

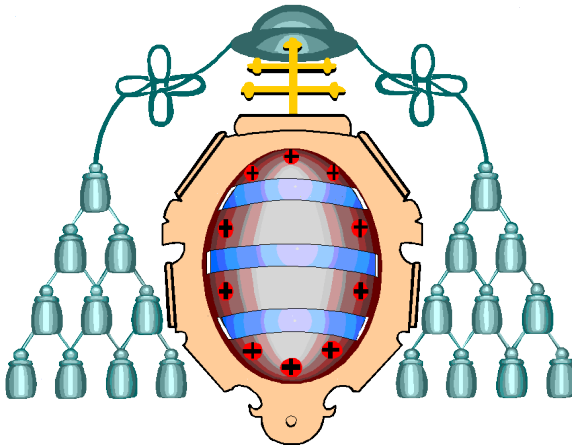
# Integración de Información y Compensación de Sensores con Tolerancia Variable basadas en Soft Computing Aplicadas a la Metrología Dimensional en Inspección de Vehículos

Adolfo Otero Rodríguez

17 de diciembre de 2010

**Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Electrónica, de Computadores y Sistemas**

**Universidad de Oviedo**



**Tesis Doctoral**

---

**Integración de información y compensación  
de sensores con tolerancia variable basadas  
en soft computing aplicadas a la metrología  
dimensional en inspección de vehículos**

---

**Autor:** Adolfo Otero Rodríguez

**Directores:** Luciano Sánchez Ramos  
José Otero Rodríguez

## **Agradecimientos**

Hay dos personas sin las cuales esta tesis no hubiera existido: José Otero Rodríguez y Luciano Sánchez Ramos. Tanto es así que es más suya que mía.

Gracias.

*A mis padres,  
a mi hijo.*

## **Resumen**

En la inspección técnica de taxis además de comprobarse aspectos relativos a la seguridad del vehículo, se verifica la validez legal de los instrumentos de medida del consumo. En esta tesis se profundiza en dos de los problemas de mayor complejidad técnica en esta inspección: la verificación del estado de las ruedas y la comprobación de los errores de los taxímetros. En las mediciones correspondientes a ambas verificaciones se precisa integrar diferentes fuentes de información, como cámaras de video, emisores láser y sensores GPS, cuya imprecisión depende de condicionantes externos que dificultan su tratamiento mediante las técnicas habituales en metrología legal. En particular, las mediciones basadas en sensores GPS tienen una imprecisión asociada que depende, entre otros, de factores atmosféricos y de la localización geográfica del vehículo. Por esta razón, la tolerancia de la medida no puede acotarse a priori y es necesario diseñar un preprocesado inteligente de las sucesivas mediciones que, descartando los peores casos, limite la tolerancia de la medición. Un segundo proceso de interés es la medición de la superficie de las ruedas con un dispositivo láser portátil, donde la determinación de la posición del sensor debe combinarse con información del movimiento de la imagen basada en flujo óptico y, de nuevo, ha de recurrirse a un análisis inteligente de los datos con objeto de seleccionar la información más precisa y de combinar las diferentes fuentes involucradas con un procedimiento susceptible de ser homologado legalmente.

La línea de investigación desarrollada ha consistido en el análisis teórico de la tolerancia legal de medidas sintetizadas a partir de diferentes sensores (GPS, visual, flujo óptico) y en el desarrollo de dos productos aplicables a la metrología dimensional (sensor láser de medición de huella de neumáticos y taxímetro patrón con tecnología GPS). En esta tesis se detallan los resultados teóricos, recogidos en tres publicaciones de revista con impacto y un capítulo de libro indexado en el JCR, junto con la primera aplicación práctica de los mismos, que ha sido objeto de una patente nacional.



## **Abstract**

When carrying out the Taxi MOT Inspection several aspects of the vehicle security as well as the taximeters must be tested from a legal metrology point of view. This thesis deals with two of the problems that present a high degree of technical complexity in these inspections: the testing of the state of the tyre tread and the taximeter homologation. In the measurements to be made in order to carry out both tests, data from several sources, such as video cameras, laser beams and GPS sensors, must be used together. The lack of accuracy of the data from those sources depends on outward factors, and this fact makes that common techniques used in legal metrology are not well suited for dealing with the imprecise data. Mainly those measurements made by GPS systems show some sort of imprecision that depends on the atmospheric conditions as well as on the geographic location of the GPS unit. Therefore, the measurements tolerance interval cannot be "a priori" bounded and the design of intelligent methods are needed for the preprocessing of the measurements that, discarding the worst cases, limit the tolerance margins of the measurement. The second field of study is the measurement of tread on the tyres of the cab using a portable laser device. This process includes the combination of the sensor position and the information about the movement of the image based on the optical flow. Once again, an intelligent data analysis is needed for the selection of the most precise information and for the combination of data taken from different sources within a measurement procedure to be approved.

This research comprises two sides: the theoretical study of the legal margins of data measured by different sensors (GPS, imaging, optical flow) and the development of two devices to be used in dimensional metrology (laser sensor for the measurement of the tread of the tyre and GPS based prototype taximeter). In this thesis the theoretical results, which have already been published in three impact factor scientific journals and in a chapter of a JCR indexed book, as well as the first practical realization included in a national patent title, are to be shown.





# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1. Verificación de taxímetros en la inspección técnica de vehículos . . .	15
1.2. La inspección técnica de los neumáticos . . . . .	17
1.3. Estructura de la memoria . . . . .	20
<b>2. Problemática de la medición de trayectorias con GPS</b>	<b>21</b>
2.1. Restricciones legales y decisiones estadísticas . . . . .	21
2.2. Cota superior mínima de una trayectoria . . . . .	22
2.3. La naturaleza imprecisa de las mediciones GPS . . . . .	23
<b>3. Problemática de la medición de huellas de neumáticos</b>	<b>27</b>
3.1. Introducción . . . . .	27
3.2. Sistemas de Visión Activa . . . . .	27
3.2.1. La condición de Scheimpflug . . . . .	31
3.2.2. Cuestiones relacionadas con la precisión . . . . .	32
<b>4. Antecedentes del estudio y desarrollos teóricos relacionados</b>	<b>37</b>
4.1. Tratamiento de datos GPS . . . . .	37
4.1.1. Alternativas no evolutivas para el tratamiento de informa- ción adquirida con GPS y otros sensores . . . . .	37
4.2. Soft Computing y GPS . . . . .	40
4.3. Determinación de la velocidad de un objeto a partir de secuencias de imágenes: flujo óptico 3D . . . . .	42
4.3.1. Flujo óptico . . . . .	42
4.3.2. Estimación del movimiento 3D usando reconstrucción 3D y flujo óptico 3D . . . . .	44
4.3.3. Extensión 3D de la OFC . . . . .	44
4.3.4. Estimación robusta del flujo óptico y extensión 3D . . . . .	47
4.3.5. Resultados cuantitativos para datos sintéticos. . . . .	48

<b>5. Patentes más relevantes en relación con la invención propuesta</b>	<b>51</b>
5.1. FULLY-COUPLED POSITIONING PROCESS AND SYSTEM THEREOF . . . . .	51
5.1.1. Resumen . . . . .	52
5.1.2. Descripción del problema . . . . .	52
5.1.3. Realización preferida . . . . .	52
5.2. INTEGRATED GPS/IMU METHOD AND MICROSYSTEM THEREOF . . . . .	53
5.2.1. Resumen . . . . .	53
5.2.2. Descripción del problema . . . . .	53
5.2.3. Realización preferida . . . . .	54
5.3. TURN DETECTION ALGORITHM FOR VEHICLE POSITIONING . . . . .	55
5.3.1. Resumen . . . . .	55
5.3.2. Descripción del problema . . . . .	55
5.3.3. Realización preferida . . . . .	56
5.4. COMBINATION RFID AND GPS FUNCTIONALITY ON INTELLIGENT LABEL . . . . .	58
5.4.1. Resumen . . . . .	58
5.4.2. Descripción del problema . . . . .	58
5.4.3. Realización preferida . . . . .	59
5.5. METHOD AND SYSTEM FOR CALIBRATING AN IG/GP NAVIGATIONAL SYSTEM . . . . .	59
5.5.1. Resumen . . . . .	59
5.5.2. Descripción del problema . . . . .	60
5.5.3. Realización preferida . . . . .	61
5.6. VEHICLE NAVIGATION APPARATUS PROVIDING RAPID CORRECTION FOR EXCESSIVE ERROR IN DEAD RECKONING ESTIMATES OF VEHICLE TRAVEL DIRECTION BY DIRECT APPLICATION OF POSITION AND DIRECTION INFORMATION DERIVED FROM GPS POSITION MEASUREMENT DATA . . . . .	61
5.6.1. Resumen . . . . .	62
5.6.2. Descripción del problema . . . . .	62
5.6.3. Realización preferida . . . . .	64
5.7. INERTIAL AUGMENTATION FOR GPS NAVIGATION ON GROUND VEHICLES . . . . .	64
5.7.1. Resumen . . . . .	64
5.7.2. Descripción del problema . . . . .	64
5.7.3. Realización preferida . . . . .	65
5.8. INERTIAL GPS NAVIGATION SYSTEM . . . . .	66

5.8.1.	Resumen . . . . .	66
5.8.2.	Descripción del problema . . . . .	66
5.8.3.	Realización preferida . . . . .	66
5.9.	PROCESS AND SYSTEM OF COUPLED REAL-TIME GPS/IMU SIMULATION WITH DIFFERENTIAL GPS . . . . .	67
5.9.1.	Resumen . . . . .	67
5.9.2.	Descripción del problema . . . . .	67
5.9.3.	Realización preferida . . . . .	67
5.10.	TRAVEL CONTROLLING APPARATUS OF UNMANNED VEHI- CLE . . . . .	69
5.10.1.	Resumen . . . . .	69
5.10.2.	Descripción del problema . . . . .	69
5.10.3.	Realización preferida . . . . .	69
5.11.	PORTABLE NAVIGATION DEVICE WITH INTEGRATED GPS AND DEAD RECKONING CAPABILITIES . . . . .	70
5.11.1.	Resumen . . . . .	71
5.11.2.	Descripción del problema . . . . .	71
5.11.3.	Realización preferida . . . . .	71
5.12.	LOW COST MULTISENSOR HIGH PRECISION POSITIONING AND DATA INTEGRATED METHOD AND SYSTEM THEREOF . . . . .	72
5.12.1.	Resumen . . . . .	72
5.12.2.	Descripción del problema . . . . .	72
5.12.3.	Realización preferida . . . . .	73
5.13.	VEHICLE POSITIONING APPARATUS AND METHOD . . . . .	74
5.13.1.	Resumen . . . . .	74
5.13.2.	Descripción del problema . . . . .	74
5.13.3.	Realización preferida . . . . .	74
5.14.	ENHANCED DEAD RECKONING METHOD . . . . .	75
5.14.1.	Resumen . . . . .	75
5.14.2.	Descripción del problema . . . . .	75
5.14.3.	Realización preferida . . . . .	76
5.15.	NAVIGATION SYSTEM AND METHOD USING DIRECTIO- NAL SENSOR . . . . .	76
5.15.1.	Resumen . . . . .	77
5.15.2.	Descripción del problema . . . . .	77
5.15.3.	Realización preferida . . . . .	77
5.16.	MULTI-SOURCE POSITIONING SYSTEM FOR WORK MA- CHINES . . . . .	78
5.16.1.	Resumen . . . . .	79
5.16.2.	Descripción del problema. . . . .	79
5.16.3.	Realización preferida . . . . .	79

<b>6. Resultados teóricos</b>	<b>81</b>
6.1. Una representación borrosa de los datos GPS . . . . .	81
6.1.1. Cálculo de la CSM usando datos borrosos . . . . .	81
6.1.2. Preprocesamiento de los datos . . . . .	83
6.1.3. Estimación determinista del trayecto más largo . . . . .	85
6.1.4. Estimación randomizada del trayecto más largo . . . . .	87
6.1.5. Trayectorias predeterminadas y mapas . . . . .	88
6.2. Filtrado de los datos mediante algoritmo genético . . . . .	89
6.2.1. Codificación de un individuo . . . . .	90
6.2.2. Función de fitness multiobjetivo . . . . .	90
6.2.3. Operadores genéticos . . . . .	91
6.3. Experimentos y resultados . . . . .	91
6.3.1. Trayectos simulados . . . . .	92
6.3.2. Tolerancia de la máquina de rodillos . . . . .	94
6.3.3. Datos reales . . . . .	96
6.3.4. Cálculo multinivel de cotas superior e inferior . . . . .	99
6.3.5. Interpolación de una trayectoria y fusión de información .	101
6.4. Configuración de los experimentos . . . . .	104
6.4.1. Datos sintéticos . . . . .	105
6.4.2. Datos reales . . . . .	107
6.5. Resultados numéricos . . . . .	107
6.5.1. Datos sintéticos . . . . .	107
6.5.2. Datos reales . . . . .	108
6.6. Medición del estado de los neumáticos . . . . .	109
6.6.1. Desarrollo de técnicas aplicables a la medición de neumá-	
ticos . . . . .	109
6.6.2. Modelo del neumático . . . . .	116
6.6.3. Simulación de la adquisición de imágenes del modelo ilu-	
minado por el láser . . . . .	117
6.6.4. Resultados preliminares . . . . .	118
<b>7. Resultados prácticos</b>	<b>125</b>
7.1. Descripción del sistema comercial . . . . .	125
7.2. Manual del usuario del sistema . . . . .	127
7.3. Primer prototipo . . . . .	141
7.4. Segundo prototipo . . . . .	141
7.5. Esquemas electrónicos . . . . .	141
7.6. PCB del sistema de medición . . . . .	145
7.7. Documento de calibración . . . . .	146
<b>8. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>165</b>





# Índice de figuras

1.1. Calibre digital para medición de profundidad de surcos de neumáticos. . . . .	18
1.2. Dispositivo para medición de la profundidad de los surcos en producción. . . . .	19
1.3. Dispositivo para medición de la profundidad de los surcos “al vuelo”. . . . .	19
2.1. Medidas reales del GPS, los valores CEP cambian entre medidas. .	24
3.1. Esquema de un sistema de visión activa basado en un sólo punto de láser. . . . .	29
3.2. Sistema de visión activa con un plano láser en lugar de un punto. .	30
3.3. Esquema de calibración del sistema en el que se usa un plano láser.	30
3.4. Esquema de un AVS genérico. . . . .	31
3.5. Esquema de un AVS que verifica la condición de Scheimpflug para una cámara con sensor normal al eje óptico. . . . .	32
3.6. Esquema de un AVS que no verifica la condición de Scheimpflug.	33
3.7. Ajuste de un modelo parabólico al perfil gaussiano del haz láser. .	33
3.8. Efecto de la perspectiva, el centro de la línea en la imagen difiere de la proyección del centro de la zona iluminada. . . . .	34
3.9. Efecto producido por la existencia de cambios bruscos de reflectividad en la superficie del neumático. . . . .	35
4.1. Captura de imágenes a diferentes $z$ . . . . .	45
4.2. Vecindario para la $k$ -ésima estimación a partir de un conjunto de imágenes a diferentes profundidades. . . . .	46
4.3. Ejemplo de reconstrucción de imágenes con datos 2D. . . . .	49
4.4. Histograma del error en el cálculo del flujo óptico de la secuencia 4.3. Los picos se deben a las imprecisiones del modelo. . . . .	49
5.1. Sistema para posicionamiento mediante datos GPS e inerciales. . .	51
5.2. Sistema GPS, MEMS, IMU y brújula digital con compensación de temperatura. . . . .	53

5.3.	Fusión de información para ajustar factores de escala y bias de los sensores de un vehículo. . . . .	56
5.4.	Integración de GPS y RFID en un único dispositivo. Vista superior. . . . .	58
5.5.	Integración de GPS y RFID en un único dispositivo. Vista lateral. . . . .	58
5.6.	Sistema de calibración de señales de sensores inerciales y GPS . . . . .	60
5.7.	Uso de datos cartográficos para corrección de errores de posicionado de un GPS. . . . .	62
5.8.	Otro ejemplo de corrección de errores de posicionado de un GPS. . . . .	63
5.9.	Compensación inercial de datos GPS para vehículos agrícolas, instalación del GPS. . . . .	65
5.10.	Compensación inercial de datos GPS para vehículos agrícolas, cálculo de la orientación. . . . .	65
5.11.	Sistema de simulación de datos GPS e inerciales (modelo 1). . . . .	68
5.12.	Sistema de simulación de datos GPS e inerciales (modelo 2). . . . .	68
5.13.	Sistema de control de un vehículo con GPS, giróscopo, odómetro y láser. . . . .	70
5.14.	Dispositivo para medir la distancia a los límites de la calzada. . . . .	71
5.15.	Integración de datos IMU y de varios receptores GPS. . . . .	73
5.16.	Sistema para usar un GPS como baliza para navegación submarina. . . . .	78
5.17.	Uso de múltiples GPS, inclinómetros, giróscopos y acelerómetros para control de maquinaria pesada. . . . .	80
6.1.	Ejemplo sintético de trayectorias real y reconstruida a partir de las coordenadas GPS. . . . .	82
6.2.	Ejemplo sintético de construcción de una poligonal que cubra los datos de entrada GPS entendidos como conjuntos borrosos. . . . .	83
6.3.	Ejemplo sintético de filtrado de un punto espúreo. Los puntos no filtrados deben representar de forma fidedigna la trayectoria. . . . .	85
6.4.	Ejemplo de estimación de la cota superior de la longitud usando el algoritmo comentado en la sección 6.1.3. . . . .	86
6.5.	Posibles posiciones relativas de los vértices y las líneas entre los vértices anteriores y siguientes. Este esquema es útil para la determinación de la convexidad y concavidad de los vértices. . . . .	87
6.6.	Algunas de las posibles trayectorias obtenidas por exploración exhaustiva de combinaciones de puntos discretos. . . . .	88
6.7.	Seudocódigo del algoritmo NGS-A-II . . . . .	89
6.8.	Ejemplo de datos GPS sintéticos y la trayectoria teórica obtenida después del filtrado con NSGA-II. . . . .	93
6.9.	Boxlots de la distancia medida con el odómetro del vehículo cuando la máquina de rodillos indica 1000 metros. . . . .	96
6.10.	Prototipo del primer data logger que se ha desarrollado para la verificación de los taxímetros. . . . .	97



6.11. Imagen aérea del circuito utilizado en los tests y situado en el Campus de Viesques. . . . .	98
6.12. Camino detectado por el GPS, representando las trayectorias de 10 vueltas al circuito de la figura anterior. . . . .	98
6.13. Boxplots de 10 medidas al circuito utilizando coordenadas GPS no filtradas y las medidas equivalentes en una máquina de rodillos. . . . .	99
6.14. Boxplots de 10 medidas del recorrido real utilizando coordenadas GPS no filtradas y coordenadas GPS filtradas con NSGA-II. . . . .	100
6.15. Boxplots de las 10 medidas del circuito real utilizando coordenadas GPS filtradas utilizando NSGA-II y medidas equivalentes de la máquina de rodillos. . . . .	100
6.16. Polinomio ajustado a las medidas del GPS con deltas añadidas, compatible con un CEP dado. . . . .	103
6.17. Arriba: trayectoria sintética mostrando la simulación de la adquisición de datos del GPS. Abajo: misma trayectoria con un CEP mayor. . . . .	106
6.18. Muestras de longitudes de trayectorias. Arriba: datos sintéticos. Abajo: datos reales. De izquierda a derecha: boxplots de longitud mínima y máxima para cada enfoque usando CEP de 3 y 5 metros. . . . .	110
6.19. Calibración del AVS, los datos se almacenan en un mapa que relaciona las coordenadas $(x, y)$ con la profundidad correspondiente. . . . .	111
6.20. Estimación intervalar 3D mediante un AVS. . . . .	113
6.21. AVS+flujo óptico+estéreo para realizar la correspondencia y la estimación 3D de los puntos iluminados por el láser. . . . .	114
6.22. Estimaciones intervalares de las coordenadas 3D de los puntos escaneados. . . . .	116
6.23. Parámetros del modelo de neumático. . . . .	117
6.24. Esquema del proceso de renderizado de la línea láser. . . . .	118
6.25. Ejemplo de mapa de profundidad, un tono más claro significa una profundidad mayor. . . . .	120
6.26. Intersección teórica entre el plano característico del láser y la superficie del neumático, tal y como se proyectarían en las dos cámaras. . . . .	121
6.27. Línea láser tal y como se proyectaría en cada una de las cámaras virtuales usadas en esta sección. . . . .	121
6.28. Profundidades máxima y mínima de los surcos del neumático (compatibles con el ancho del plano láser de 2 mm.) obtenidas con las dos cámaras. . . . .	123
6.29. Profundidades máxima y mínima de los surcos del neumático (compatibles con el ancho del plano láser de 1 mm.) obtenidas con las dos cámaras. . . . .	124



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Verificación de taxímetros en la inspección técnica de vehículos

Las tarifas de los taxis en España se revisan una vez al año, debido a esto los taxímetros deben de ser programados con las nuevas tarifas en un taller y posteriormente verificados mediante una Inspección Técnica de Vehículos (ITV). La tarifa depende de dos variables: la velocidad del taxi y la distancia recorrida. En particular, mientras la velocidad del taxi sea menor que determinado umbral al usuario se le aplica una tarifa que depende del tiempo transcurrido. En caso contrario se le tarifica en función de la distancia.

Desde 1990, el grupo de investigación Metrología y Modelos de la Universidad de Oviedo ha sido responsable del diseño de los equipos y dispositivos necesarios para la verificación de los taxis en Asturias. Hasta hace poco la verificación de los taxímetros se realizaba utilizando una máquina equipada con rodillos diseñada por el grupo de investigación anteriormente mencionado. En esta máquina, las ruedas motrices se sitúan encima de los rodillos y su velocidad angular se muestrea a intervalos regulares. El test dura unos minutos durante los que el conductor es asistido por un técnico de la ITV. La distancia total recorrida se calcula multiplicando la circunferencia de los rodillos por la velocidad angular de los mismos. Aunque conceptualmente simple, el uso de una máquina de rodillos presenta varios inconvenientes:

1. El diámetro de los rodillos es relativamente pequeño, por este motivo la deformación que sufren los neumáticos es distinta de la que sufrirían si se apoyasen en una superficie plana como la de cualquier calzada. La diferencia entre el radio efectivo obtenido en estas circunstancias y el radio teórico que tendrían los neumáticos recién salidos de la fábrica hace que la medida de la distancia cubierta no sea correcta. Es más, este error depende del

desgaste de las ruedas y del peso del vehículo.

2. Un empleado de la ITV no puede verificar más de un taxímetro simultáneamente, durando el proceso entre 15 y 30 minutos. Los costes del mismo se abaratarían si se pudiese realizar la verificación de forma desatendida.
3. Se han detectado problemas cuando se verifica un taxímetro en un vehículo que dispone de medidas electrónicas de seguridad activa, tales como ESP, TCS, etc. En el caso de estos vehículos, las señales que utiliza el taxímetro para tarificar un servicio se toman directamente de la centralita del vehículo. Cuando el vehículo se sitúa encima de los rodillos, las ruedas de uno de los trenes se mueven mientras las del otro tren permanecen inmóviles. Algunos tipos de centralitas presentes en ciertas marcas de vehículos no están preparadas para una situación tan anómala y no proporcionan información de la velocidad en estas condiciones. Lo mismo ocurre con los vehículos de tracción trasera ya que en este caso las ruedas delanteras no giran en la máquina de rodillos.

El tercero de los problemas expuestos es el más preocupante porque imposibilita la verificación en ciertos vehículos. En estos casos, la longitud y duración de los trayectos se verifican mediante dos tests distintos. En el primero de los casos se utiliza un circuito de longitud conocida en el que el taxi realiza un trayecto real. En el segundo caso se utiliza un cronómetro. No todas las estaciones de ITV disponen de un circuito calibrado y además, en estos casos, es necesario utilizar el odómetro del vehículo para asegurar que el recorrido se realiza por encima de la velocidad de arrastre o bloquear el taxímetro para que mida sólo distancia.

Las razones anteriormente expuestas impulsaron a ITVASA, la compañía concesionaria de la ITV en Asturias, a encargar al grupo de Metrología y Modelos de la Universidad de Oviedo el diseño de un sistema capaz de realizar la verificación de los taxímetros que cumpla con los siguientes requisitos: (a) las medidas no deben depender del estado de los neumáticos del vehículo, (b) debe de ser posible verificar la tarificación horaria y kilométrica simultáneamente, en un sólo test, (c) el test debe de ser desatendido, (d) la precisión del dispositivo debe de cumplir con la reglamentación vigente y (e) la verificación debe poder realizarse independientemente del modelo del vehículo. Los estudios llevados a cabo para diseñar un sistema que cumple los objetivos anteriores fueron financiados en parte por la Fundación para la Investigación Científica y Tecnológica en Asturias.

Así pues, la aportación práctica de este trabajo consiste en un nuevo sistema portátil que cumple todos estos requisitos. El sistema propuesto usa un receptor GPS para muestrear la posición y la velocidad del taxi a intervalos regulares. Para evitar largas esperas en las revisiones de los taxímetros, cada estación ITV debería disponer de entre 10 y 20 de estos dispositivos; así, para mantener asumibles los

costes relativos al hardware y conseguir una rápida amortización de la inversión, se han utilizado GPS comerciales de bajo coste.

Sin embargo existen problemas legales que dificultan el uso de medidas con un GPS. Se sabe que la tecnología GPS es inherentemente imprecisa. Es más, la tolerancia no es conocida a priori y tampoco es constante sino que varía con cada medida. A no ser que se acote la tolerancia de la medida de la velocidad y de la distancia, no se puede rechazar legalmente un taxímetro. Se trata del mismo problema que existe cuando se comprueban las velocidades de los vehículos en una carretera con un radar, no se puede multar al conductor de un vehículo que conduzca por encima del límite establecido a no ser que: (a) se conozca la tolerancia del radar y (b) la velocidad medida sobrepase el límite establecido una cantidad mayor que la tolerancia del radar.

Por lo tanto es difícil homologar un dispositivo basado en GPS, porque no se puede conocer su precisión "a priori", es decir, en una ruta la tolerancia puede ser del 5 % y en otra del 11 %. Para resolver este problema, se propone un sistema que no sólo produce una estimación de la longitud de la trayectoria sino que calcula una cota superior de esta. En otras palabras, el sistema propuesto calcula la incertidumbre de las medidas, detecta aquellas en las que la tolerancia es mayor de un umbral porcentual e invalida el test en ese caso. De esta forma se garantiza un precisión mínima y el sistema puede ser homologado.

## **1.2. La inspección técnica de los neumáticos**

Desde un punto de vista general, las inspecciones realizadas durante la Inspección Técnica de Vehículos (ITV) cubren dos aspectos fundamentales, el cuidado del medioambiente y la seguridad. En el caso de los taxis, además se comprueba el cumplimiento de las tarifas vigentes y se persigue el fraude. Una tarea relacionada con dos de estos aspectos, seguridad y persecución del fraude, es la comprobación del estado de los neumáticos. Aunque no es el único factor que contribuye a la eficacia de los neumáticos, durante la ITV se verifica que la profundidad de los surcos del dibujo de los neumáticos no sea menor que 1,6 mm, el límite legal en España. Debido a problemas mecánicos (falta de alineado, por ejemplo) o condiciones de uso (frenadas bruscas) puede ocurrir que el neumático presente distinto desgaste en distintas zonas. Por este motivo es necesario inspeccionar todo el perímetro de todas las ruedas del vehículo. En el caso de los taxis, los neumáticos desgastados implican una tarificación mayor que la correspondiente al servicio realizado, ya que al disminuir el radio de la rueda, el número de vueltas medido por la centralita del vehículo aumenta y por lo tanto la distancia medida será mayor que la cubierta. Por este motivo, aunque la verificación del taxímetro se realiza mediante una inspección específica, la inspección de los neumáticos de los taxis es doblemente importante.



Figura 1.1: Calibre digital para medición de profundidad de surcos de neumáticos.

La inspección se puede realizar de dos formas. La primera consiste en examinar si en algún punto la superficie de los tacos del neumático está a la misma altura que unas protuberancias (testigos) situadas a ciertos intervalos en los surcos de los mismos. Si el desgaste de los neumáticos fuese uniforme, con esta inspección sería suficiente. Sin embargo, debido a las circunstancias antes mencionadas, es posible que el desgaste sea más pronunciado en zonas en donde no existen dichos testigos. Por este motivo en ocasiones es necesario realizar medidas usando una herramienta similar a un calibre como el de la figura 1.1. La medición consiste en apoyar la parte plana superior en la superficie de los tacos e introducir la punta metálica hasta alcanzar el fondo del surco. La profundidad se indica en el display del dispositivo.

Evidentemente este procedimiento es tedioso puesto que las medidas deben realizarse a lo largo de los surcos del neumático. Resulta del todo inviable recoger suficientes datos como para realizar una reconstrucción tridimensional del neumático con el fin de adjuntarla al informe técnico del vehículo. Por este motivo parece necesario algún tipo de sistema que permita la automatización, en la medida de lo posible, de esta tarea, permitiendo un modelado 3D de la superficie del neumático que se pueda adjuntar al informe de la inspección.

Debido al hecho de tratarse de un procedimiento realizado en el marco de una ITV, es necesario conocer el error de medida cometido por el sistema. El enfoque utilizado en este trabajo es el de considerar en todo caso el máximo y el mínimo valor de cada medida compatible con los datos obtenidos por el sistema. Esto conduce a que cada medida se representa en realidad por un intervalo en el que, con toda certeza, se encuentra el valor real de la magnitud medida, en este caso la profundidad del surco del neumático.

Algunos fabricantes usan la triangularización láser como parte del control de calidad durante la fabricación de neumáticos [1]. Obviamente, en este caso el



Figura 1.2: Dispositivo para medición de la profundidad de los surcos en producción.



Figura 1.3: Dispositivo para medición de la profundidad de los surcos “al vuelo”.

neumático no está montado en el vehículo y es posible realizar medidas a lo largo del perímetro del mismo (ver figura 1.2).

Por otra parte existen sistemas comerciales que permiten la medición de la profundidad de los surcos del neumático sin desmontarlos e incluso en condiciones reales [2]. En este caso, obviamente, sólo se mide la porción del neumático que apoya sobre el sensor del dispositivo (ver figura 1.3).

Las alternativas anteriores no cubren totalmente las necesidades de una ITV, por lo que en este trabajo se intenta desarrollar una alternativa que aúne las cualidades de ambas, permitiendo la medición completa del perímetro sin necesidad de desmontar el neumático. No obstante se hace notar que, a diferencia del problema de verificación de taxímetros, las aportaciones a esta segunda línea de investigación propuestas en esta tesis se circunscriben al estudio teórico de estas medidas, ya que no se ha desarrollado aún un sistema práctico que de solución industrial al problema.

### **1.3. Estructura de la memoria**

Esta memoria de tesis doctoral se divide en los capítulos que se comentan a continuación.

Capítulo 1. Introducción. En este capítulo se presentan los dos problemas cuya resolución forma la justificación de esta tesis: la verificación de taxímetros y el análisis de la superficie de los neumáticos de vehículos.

Capítulo 2. Problemática de la medición de trayectorias con GPS. Donde se realiza una exposición de las restricciones a cumplir por los dispositivos de verificación de taxímetros. En particular se presenta la necesidad de establecer una cota superior para el caso de usar datos de GPS, dada su naturaleza imprecisa.

Capítulo 3. Problemática de la medición de huellas de neumáticos. Se analiza la aplicación de las técnicas de visión activa para obtener un mapa de profundidades de las huellas de los neumáticos incidiendo en la necesidad de analizar la precisión.

Capítulo 4. Antecedentes del estudio y desarrollos teóricos relacionados. En este capítulo se comentan varias publicaciones en las que se estudian y presentan métodos (evolutivos y no evolutivos) de proceso de datos de GPS. Asimismo se discuten métodos de cálculo de flujo óptico 2D y 3D.

Capítulo 5. Patentes más relevantes en relación con la invención propuesta. Parte del trabajo de esta tesis ha podido aplicarse en el desarrollo de un sistema real para la verificación de taxímetros. En este capítulo se exponen características de algunas invenciones en el campo del uso de datos GPS para el análisis de trayectorias.

Capítulo 6. Resultados teóricos. Los métodos desarrollados para el tratamiento de datos GPS para la medida de trayectorias han sido validados en primera instancia sobre datos sintéticos y posteriormente sobre datos reales. En este capítulo también se incluyen los resultados preliminares obtenidos sobre datos sintéticos al aplicar métodos de visión activa y de flujo óptico 3D en el análisis del estado de los neumáticos

Capítulo 7. Resultados prácticos. En este capítulo se incluyen distintos documentos referentes al dispositivo desarrollado para la calibración de taxímetros mediante datos GPS.

Capítulo 8. Conclusiones y trabajo futuro. Donde se incluyen las conclusiones derivadas del trabajo realizado y las aportaciones en la resolución de los dos problemas tratados. Además se trazan las líneas para investigaciones futuras.

Para finalizar la memoria se incluye la bibliografía más relevante y los apéndices con copia de los artículos publicados en revista con impacto, el capítulo de libro indexado en el JCR y el documento de patente de la Oficina Española de Patentes y Marcas.



## Capítulo 2

# Problemática de la medición de trayectorias con GPS

### 2.1. Restricciones legales y decisiones estadísticas

Considérese un dispositivo de medida tal que, dado un taxímetro con un error de medida desconocido  $e$ , produce una estimación  $\hat{e}$  de su error y que esta estimación no tiene sesgo, es decir  $E(\hat{e} - e) = 0$ . Por lo tanto la regla de decisión trivial se puede definir como:

$$D_0(\hat{e}) = \begin{cases} \text{Aceptar} & \text{Si } \hat{e} \leq 0 \\ \text{Rechazar} & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2.1)$$

Sin embargo, cualquier dispositivo de medida tendrá una tolerancia  $\epsilon$  asociada: Esto quiere decir que  $\hat{e} - \epsilon \leq e \leq \hat{e} + \epsilon$  con una probabilidad muy alta y al mismo tiempo  $p(|\hat{e} - e| > \epsilon)$  es próximo a cero. Esta tolerancia tiene implicaciones legales. Por ejemplo, supóngase que se rechaza un taxímetro porque la estimación de su error es  $\hat{e} = 5\%$ , y que la tolerancia del dispositivo utilizado es  $\epsilon = 7\%$ , mayor que el error. El propietario del taxi podría argumentar que existe la posibilidad de que el error del taxímetro sea menor o igual que cero e impugnar la verificación negativa. En pocas palabras, no se puede rechazar un taxímetro a no ser que la estimación del error sea mayor que la tolerancia, en ese caso se puede asegurar que el taxímetro no está bien calibrado con alta probabilidad.

En España, cuando el Grupo de Metrología y Modelos de la Universidad de Oviedo diseñó el primer sistema para la verificación de taxímetros, la desviación máxima entre la tarifa aplicada por un servicio y la tarifa real no podía ser mayor que el 10% (aunque en la actualidad se sigue la recomendación R21 de la Organización Internacional de Metrología Legal situando el umbral en el 2%), por lo tanto no se podía homologar un dispositivo con una tolerancia mayor que este valor. Es conveniente recordar que la tolerancia de un GPS depende de varios

factores (geometría o constelación de los satélites, forma de la trayectoria, velocidad, etc.). Como se ha mencionado, no se puede garantizar que todas las medidas realizadas con un determinado GPS sean más precisas que el 10 %. Sin embargo, si se puede determinar cuando la tolerancia de determinada medida ha estado por debajo de los límites legales. Este es el objetivo de una parte de esta tesis.

También se ha expuesto que el problema legal es similar al de usar un radar para medir la velocidad de un vehículo durante un control. Sin embargo, la regla garantista que determina que no se ha cometido una infracción beneficia al propietario del taxi si se aplica también en este caso.

La regla de decisión es

$$D(\hat{e}) = \begin{cases} \text{Aceptar} & \text{Si } \hat{e} \leq 10 \\ \text{Rechazar} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.2)$$

que no es justa desde el punto de vista estadístico. Sea  $p(x)$  la probabilidad de que el error del taxímetro sea  $x$ . Por otra parte la probabilidad de rechazar un taxímetro que en realidad está dentro de los márgenes legales es

$$P(\text{Rechazar} \mid e \leq 0) = \frac{p(\hat{e} > 10 \cap e \leq 0)}{p(e \leq 0)}. \quad (2.3)$$

La posibilidad de dar de paso un taxímetro incorrecto es

$$P(\text{Aceptar} \mid e > 0) = \frac{p(\hat{e} \leq 10 \cap e > 0)}{p(e > 0)}. \quad (2.4)$$

Para que  $D$  sea justa, se necesita que los dos errores sean iguales, sin embargo no lo son. Si la tolerancia de dispositivo es menor que el 10 %, entonces  $p(\hat{e} > 10 \cap e \leq 0)$  está cerca de cero, por lo tanto  $P(\text{Rechazar} \mid e \leq 0)$  es despreciable, pero  $P(\text{Aceptar} \mid e > 0) \geq p(0 < e < 10 - \epsilon)/p(e > 0)$ , lo cual es bastante alto. La experiencia demuestra que los propietarios de los taxis en España calibran sus taxímetros de modo que obtengan la máxima ventaja legal. Es decir, es mucho más frecuente que un taxi tenga un error más cercano al máximo permitido que por debajo del 0 %.

## 2.2. Cota superior mínima de una trayectoria

Con el fin de obtener el mayor número posible de verificaciones legalmente válidas (es decir, aquellas para las que la tolerancias sean menores que el error máximo permitido) es interesante determinar cual es la trayectoria más corta cuya longitud se sabe que es mayor que al trayectoria real, dado un conjunto de medidas imprecisas obtenidas mediante un GPS. Por lo tanto, en este trabajo se propone una forma de calcular la Cota Superior Mínima (CSM) de todas las posibles trayectorias compatibles con las medidas realizadas mediante un GPS.

Debido a la naturaleza imprecisa de los datos de entrada, se ha desarrollado un método para calcular la CSM. Para ello los datos de entrada se representan como datos borrosos. Estos datos se filtran con el fin de obtener el subconjunto de datos de menor cardinal que induce una superficie poligonal que cubre los datos de entrada en el mayor grado posible. Finalmente los datos filtrados alimentan un algoritmo determinista para calcular la CSM.

El proceso de filtrado es la parte más compleja del proceso, ya que incluye resolver un problema de optimización multicriterio para lo que se usará el algoritmo genético NSGA-II [12, 13].

### **2.3. La naturaleza imprecisa de las mediciones GPS**

El sistema GPS (Global Positioning System) [23] se refiere a un conjunto de dispositivos (satélites y receptores) que se usan de forma coordinada con el fin de obtener la posición del receptor. El receptor recoge las señales de los satélites y calcula una serie de medidas: longitud, latitud, altitud, número de satélites en uso, hora, etc. Las señales enviadas desde cada satélite contienen información sobre su posición y la hora de envío.

Teóricamente puede pensarse que con las señales de cuatro satélites es suficiente para determinar la posición del receptor: tres para determinar las coordenadas geográficas y un cuarto para corregir errores en la hora. Sin embargo, la posición calculada con sólo cuatro satélites es muy imprecisa, debido a distintos tipos de errores:

- Perturbaciones de las señales al atravesar la atmósfera.
- Desviaciones en las efemérides de los satélites.
- Errores en los relojes de los satélites.
- Errores en el receptor.
- Recepción indirecta de las señales debida a rebotes.

A priori, a mayor número de satélites, mejor precisión. Pero incluso con un elevado número de satélites en uso (de 12 a 16) la geometría de su disposición o constelación debe ser tenida en cuenta para estimar la precisión de los datos de posición. La magnitud que mide la precisión de la estimación de la posición se denomina DOP (Dilution Of Precision), cuanto más grande es este valor, más débil es la constelación de satélites y más imprecisa la estimación de la posición del receptor [28]. El DOP tiene cuatro componentes: PDOP (DOP 3D o DOP esférico), HDOP (DOP de longitud y latitud), VDOP (DOP Vertical) y TDOP (DOP del Tiempo).

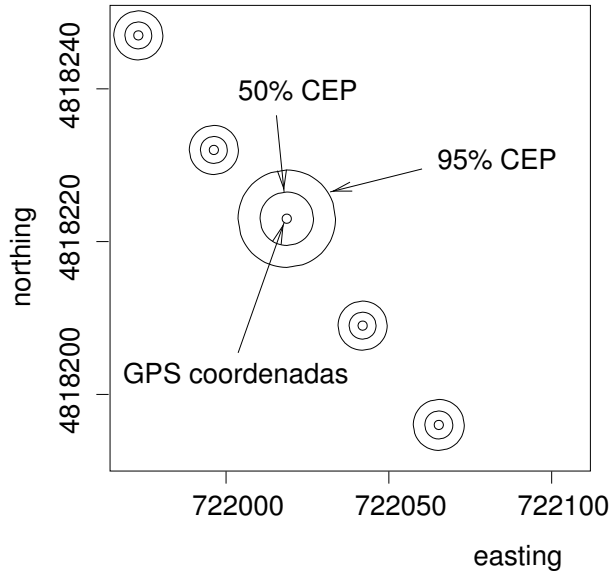


Figura 2.1: Medidas reales del GPS, los valores CEP cambian entre medidas.

Bajo ciertas condiciones, las medidas tomadas con un GPS siguen una distribución gaussiana bidimensional. Cuando un número alto de satélites está disponible, esta distribución se puede considerar circular [14]. Por este motivo, los receptores GPS comunes dan una indicación de su error denominada CEP (Círculo de Error Probable). Para una determinada probabilidad, el CEP indica el radio de un círculo, centrado en la posición medida por el receptor, que contiene la posición real del receptor con dicha probabilidad. Si la probabilidad es del 50 %, se puede estimar el CEP a partir de los errores estándar de las coordenadas medidas mediante la Ecuación 2.5 [29, 35].

$$CEP = 0,56\sigma_x + 0,62\sigma_y \quad (2.5)$$

donde  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las componentes horizontal y vertical de las desviaciones típicas de las medidas.

El CEP al 95 % se conoce como R95 y puede obtenerse multiplicando por 2,08 el CEP al 50 %.

En la figura 2.1, se muestra un ejemplo real en el que se puede observar como varía el CEP entre medidas consecutivas.

Los GPS comerciales no envían información sobre los errores estándar. Los valores del HDOP están disponibles a través del protocolo NMEA usado en la mayor parte de los receptores GPS y su magnitud informa sobre el impacto de la geometría de la constelación de satélites en la precisión de las coordenadas

calculadas. Por lo tanto, sería posible obtener de forma empírica una estimación de la relación entre el CEP y el HDOP [15, 11], a partir de la definición de CEP y de las coordenadas medidas en una posición fija. Para cada HDOP, el subconjunto de medidas tomadas con el GPS con ese valor se separan del total de datos. El círculo más pequeño que cubre el 50 % de los puntos es el CEP a esa probabilidad. El procedimiento para el CEP al 95 % es análogo.



## Capítulo 3

# Problemática de la medición de huellas de neumáticos

### 3.1. Introducción

Como se ha mencionado en la sección 1.2, una de las tareas asociadas a la persecución del fraude es la comprobación del estado de los neumáticos. Durante la ITV se verifica que la profundidad de los surcos del dibujo de los neumáticos no sea menor que 1,6 mm, el límite legal en España. En el caso de los taxis, los neumáticos desgastados implican una tarificación mayor que la correspondiente al servicio realizado, ya que al disminuir el radio de la rueda, el número de vueltas medido por la centralita del vehículo aumenta y la distancia medida será mayor que la cubierta. Por tanto la verificación del estado de los neumáticos es importante tanto por motivos de seguridad como por motivos metrológicos.

Como ya se mencionó anteriormente, la inspección se puede realizar de dos formas. Una de ellas consiste en examinar si en algún punto la superficie de los tacos del neumático está a la misma altura que unas protuberancias (testigos) situadas a ciertos intervalos en los surcos de los mismos. Si el desgaste de los neumáticos fuese uniforme, con esta inspección sería suficiente. Sin embargo es posible que el desgaste sea más pronunciado en zonas en donde no existen dichos testigos por lo que sería necesario usar un calibre. En este trabajo se intenta desarrollar una alternativa que aúne las cualidades de las dos soluciones anteriores para así conseguir la medición completa del perímetro sin necesidad de desmontar el neumático.

### 3.2. Sistemas de Visión Activa

La medida de la profundidad de una escena se puede obtener mediante un Sistema de Visión Activa (Active Vision System, AVS en inglés). Estos sistemas

se basan en el uso de fuentes de iluminación adicional y de naturaleza distinta a la ambiental. Las fuentes más habituales son el láser y la proyección sucesiva de franjas usando el código de Gray ([109]). Las dos alternativas utilizan la triangularización con el fin de recuperar la profundidad de la escena. Para una geometría del AVS conocida o tras un proceso de calibración, a un pixel  $(i, j)$  en la imagen iluminada con luz estructurada se corresponde un valor de profundidad único. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo simplificado de esta situación. Básicamente, a partir de la separación entre la cámara y el láser  $b$  y del ángulo de este medido con respecto al eje  $x$   $\alpha$  de la imagen se calcula la profundidad mediante operaciones trigonométricas sencillas.

Aplicando el teorema de la proyección central:

$$\frac{X}{x} = \frac{Z}{f} = \frac{Y}{y} \quad (3.1)$$

Dado que los triángulos son rectos:

$$\tan\alpha = \frac{Z}{b - X} \quad (3.2)$$

Buscando  $X$ :

$$X = \frac{\tan(\alpha)bx}{f + x\tan(\alpha)} \quad (3.3)$$

$Y$  y  $Z$  se obtienen de forma análoga:

$$Y = \frac{\tan(\alpha)by}{f + x\tan(\alpha)} \quad (3.4)$$

$$Z = \frac{\tan(\alpha)bf}{f + x\tan(\alpha)} \quad (3.5)$$



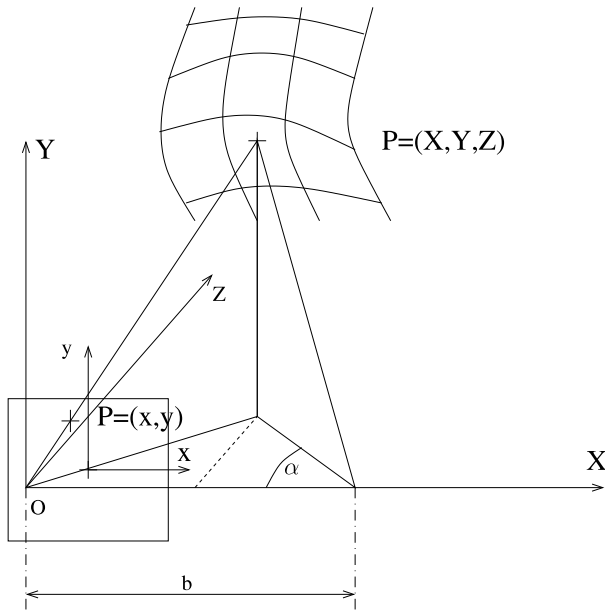


Figura 3.1: Esquema de un sistema de visión activa basado en un sólo punto de láser.

Esta configuración se conoce como Single Spot Range Imaging y tiene dos inconvenientes: la complejidad del mecanismo necesario para recorrer la escena con el láser y el pequeño ancho de banda (medidas por unidad de tiempo) del sistema, ya que se invierte un cierto tiempo en efectuar ese recorrido.

Una mejora de esta configuración consiste en el empleo de un plano láser (Sheet of Light), en lugar de un único punto, como se muestra en la Figura 3.2. De esta forma, en lugar de iluminar un único punto para cada posición del láser, se obtiene una imagen en la que la intersección entre dicho plano y la escena está iluminada. Es evidente que el número de medidas por segundo se puede incrementar ya que no es necesario reposicionar el láser para obtener la profundidad de los puntos que están en la intersección entre el plano láser y la escena.

Este sistema se puede calibrar fácilmente [112] usando el procedimiento de la Figura 3.3. En esta figura se puede apreciar como a medida que el plano de calibración se acerca al láser, la porción de la escena iluminada por el mismo se proyecta en zonas distintas de la imagen, moviéndose en este caso de derecha a

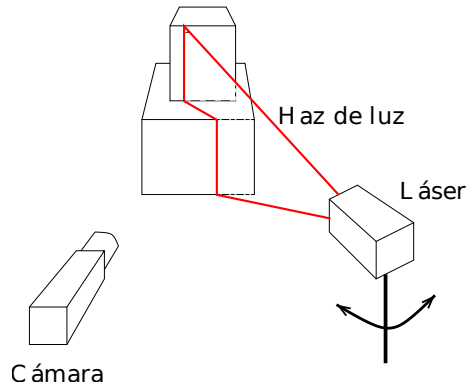


Figura 3.2: Sistema de visión activa con un plano láser en lugar de un punto.

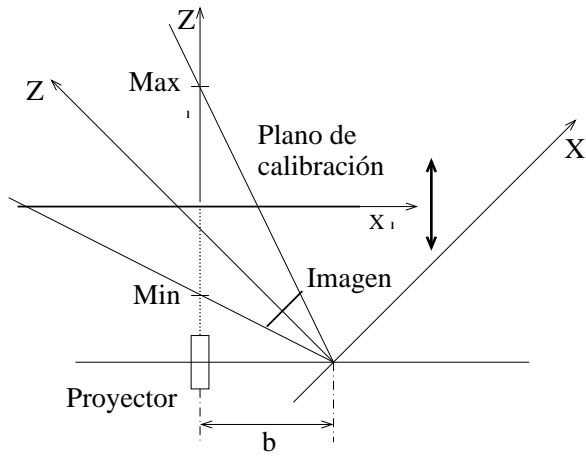


Figura 3.3: Esquema de calibración del sistema en el que se usa un plano láser.

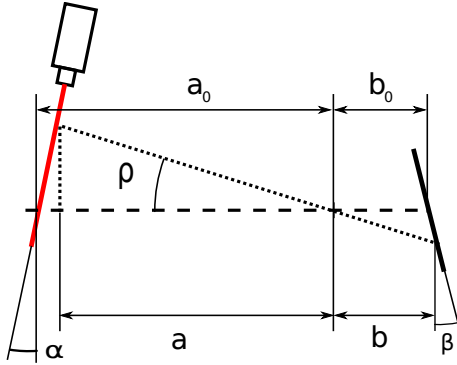


Figura 3.4: Esquema de un AVS genérico.

izquierda.

Esta alternativa no está libre de inconvenientes ([111]), en este caso relacionados con el ancho de la línea láser y con la necesidad de enfocar la zona iluminada, lo cual no es siempre posible, dependiendo de la orientación de la superficie. En las siguientes secciones se comentará como solventar estos problemas.

### 3.2.1. La condición de Scheimpflug

En la figura 3.4 se muestra la configuración de un AVS para unos ángulos arbitrarios de láser y sensor. La relación entre la distancia focal y la profundidad de campo viene dada por la ecuación 3.6

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0} \quad (3.6)$$

Para un rayo de luz cualquiera con un ángulo de incidencia  $\rho$  con el eje óptico proyectándose en el sensor en  $s$ , se pueden encontrar las correspondientes distancias  $a$  y  $b$  desde el centro óptico al plano láser usando las ecuaciones 3.7 y 3.8, respectivamente.

$$a = \frac{a_0}{1 + \tan \rho \tan \alpha} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{b_0}{1 - \tan \rho \tan \beta} \quad (3.8)$$

Si se desea que un rayo incidente sobre el sensor en el punto  $s$  esté enfocado,  $a$  y  $b$  tienen que satisfacer la ecuación 3.6. De las ecuaciones 3.7 y 3.8 se obtiene la expresión 3.9.

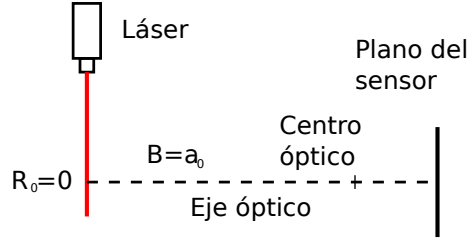


Figura 3.5: Esquema de un AVS que verifica la condición de Scheimpflug para una cámara con sensor normal al eje óptico.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{a_0}(1 + \tan \rho \tan \alpha) + \frac{1}{b_0}(1 - \tan \rho \tan \beta) \quad (3.9)$$

Evidentemente, la ecuación 3.6 se cumple para un valor de  $\rho$  arbitrario si  $\frac{\tan \alpha}{a_0} = \frac{\tan \beta}{b_0}$ . Para los valores  $\alpha = \beta = 0$  esta igualdad se cumple y en general para aquellos que verifican la ecuación 3.10, conocida como condición de Scheimpflug ([108]).

$$\tan \beta = \frac{b_0 \tan \alpha}{a_0} \quad (3.10)$$

Esta condición define el ángulo del sensor para que la zona iluminada por el AVS esté completamente enfocada, cuando el eje óptico de la cámara no es normal al sensor ni a la superficie iluminada. Normalmente el ángulo del sensor es normal al eje óptico de la cámara, por lo que debe de cumplirse entonces que  $\alpha = \beta = 0$ . Un AVS que cumpla esta condición tendrá la configuración que se puede observar en la figura 3.5.

Como puede observarse, esta configuración es poco útil para la aplicación que se pretende en este trabajo, por el escaso espacio que existe entre el suelo y los bajos de la mayor parte de los vehículos.

La configuración más común para un AVS es girar la cámara y su eje óptico de modo que el ángulo  $\alpha$  será sustancialmente más grande que cero, típicamente medirá entre 30 y 60 grados, obteniéndose una configuración como la de la figura 3.6. Puesto que en este caso no se verifica al ecuación 3.10, no toda la zona iluminada estará enfocada y por lo tanto el grosor aparente de la línea láser será mayor.

### 3.2.2. Cuestiones relacionadas con la precisión

Debido al grosor del plano láser, probablemente la zona iluminada de la escena se proyectará en una línea de ancho mayor que un pixel. Por este motivo cabe

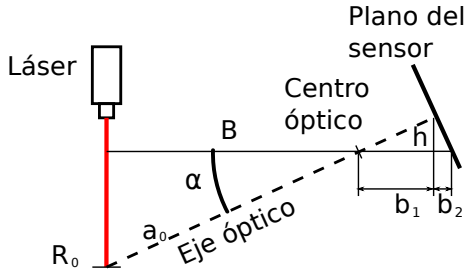


Figura 3.6: Esquema de un AVS que no verifica la condición de Scheimpflug.

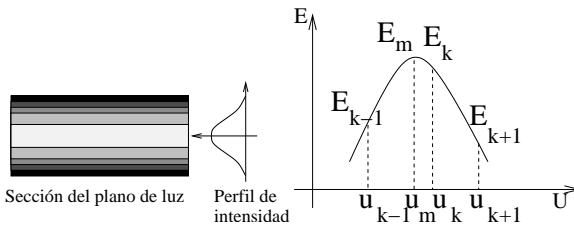


Figura 3.7: Ajuste de un modelo parabólico al perfil gaussiano del haz láser.

preguntarse qué pixel de la sección transversal de la línea es el más representativo del punto de la superficie que se está midiendo.

En algunos trabajos se intenta resolver este problema estimando el centro de la sección de la línea proyectada en la imagen. En la Figura 3.7 se muestra como se puede ajustar un modelo parabólico al perfil gaussiano de la sección de la imagen de la zona iluminada por el láser. Con sólo tres medidas se puede estimar el punto de mayor intensidad:

$$\begin{aligned}
 E &= a u^2 + b u + c \\
 \begin{pmatrix} E_{k-1} \\ E_k \\ E_{k+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u_{k-1}^2 & u_{k-1} & 1 \\ u_k^2 & u_k & 1 \\ u_{k+1}^2 & u_{k+1} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u_{k-1}^2 & u_{k-1} & 1 \\ u_k^2 & u_k & 1 \\ u_{k+1}^2 & u_{k+1} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} E_{k-1} \\ E_k \\ E_{k+1} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Por otra parte, el efecto de la perspectiva puede en algunos casos invalidar el razonamiento anterior, como se puede comprobar en la Figura 3.8. La zona iluminada por el láser se proyecta en la imagen y por el efecto de la perspectiva (ver detalle) el centro de la línea en la imagen no coincide con la proyección del centro de la zona iluminada.

En el contexto de la ITV y de la medición de la profundidad del surco de los

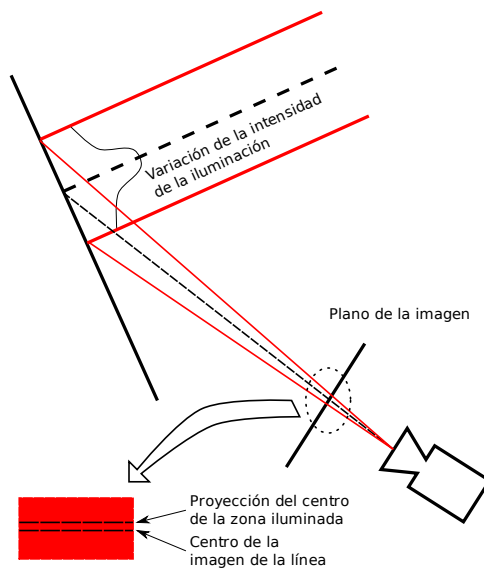


Figura 3.8: Efecto de la perspectiva, el centro de la línea en la imagen difiere de la proyección del centro de la zona iluminada.

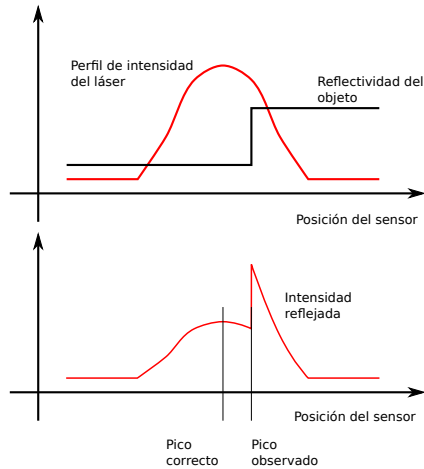


Figura 3.9: Efecto producido por la existencia de cambios bruscos de reflectividad en la superficie del neumático.

neumáticos, existen otros motivos por los que este tipo de procedimientos no son válidos. Por ejemplo la presencia de zonas en las que existen cambios bruscos de reflectividad, como la parte del neumático que toca la calzada y el fondo del surco. En la figura 3.9 se muestra este efecto. En la parte superior de esta figura se muestra el plano láser y la reflectividad de la superficie. En la parte inferior el perfil medido en la imagen. Como puede verse, el máximo de intensidad se desvía hacia la derecha y no es representativo del punto que en realidad se desea medir. Esto no es un problema si la superficie a medir es plana pero puede conducir a errores en caso contrario. En el caso de los neumáticos concurren los dos factores, la superficie no es plana y puede existir una gran diferencia de reflectividad entre la superficie de los tacos que tocan la calzada y el fondo de los surcos del neumático, sobre todo cuando existe polvo depositado en la calzada. La limpieza de los neumáticos durante la ITV no está prevista, de modo que es necesario tener en cuenta este aspecto.





## Capítulo 4

# Antecedentes del estudio y desarrollos teóricos relacionados

### 4.1. Tratamiento de datos GPS

#### 4.1.1. Alternativas no evolutivas para el tratamiento de información adquirida con GPS y otros sensores

El tratamiento de la información adquirida mediante un GPS depende del uso que se le vaya dar a esta. En este documento nos ceñiremos en lo posible al problema que nos ocupa: la medida de la longitud de la trayectoria seguida por un vehículo. No es un problema al que se le haya prestado gran atención en la literatura del tema, al menos cuando entran en juego cuestiones de tipo legal. Sin embargo dado que está relacionado con la medida y modelado de carreteras, con el ajuste de coordenadas GPS a un mapa y su interpolación o con el seguimiento de vehículos, hemos recopilado una serie de artículos que tratan estos temas con el fin de completar el estado del arte de esta parte del documento.

En [74] se muestra un método para estimar el tiempo invertido para realizar un recorrido, usando como dato exclusivamente la velocidad del vehículo. Se proponen distintos modelos para la velocidad entre la adquisición de datos y se discute cual debe emplearse para proporcionar una estimación optimista o pesimista. Los modelos consisten en distintas familias de curvas que representan la variación de la velocidad entre toma de medidas.

En [75] se trata el problema de la reconstrucción de trayectorias a partir de datos dispersos, en este caso imágenes de los objetos móviles. Se trata de seleccionar que puntos pertenecen a cada trayectoria (se considera el problema de existir varios objetos móviles en las imágenes). Es por lo tanto un problema distinto al que nos ocupa en este trabajo.

Por otra parte, en [76] se presenta un método para ajustar los datos de una

carretera (adquiridos mediante un sistema inercial que consta que mide velocidad y orientación) a una serie de curvas que se supone se han utilizado para realizar esa carretera (clotoides, etc.) Si bien se dispone de un GPS en el vehículo utilizado, no se utiliza ninguna técnica de fusión de información, el GPS sólo se utiliza para eliminar los errores acumulativos de la unidad inercial. El fin de este sistema es obtener un modelo compacto de las vías que se van a incorporar al mapa de un navegador, de modo que, sin perder precisión, los datos ocupen el menor espacio posible.

Un trabajo que tiene conexiones con el anterior es [49], en el que se trata de la realización de un modelo de una autopista utilizando splines. La fuente de información es en este caso un GPS RTK (Real Time Kinematics: sistema GPS en que los errores se corrigen con la información obtenida a partir de una posición geodésica conocida) con un error medio de entre 10 y 20 mm. tras el procesado offline mediante el software del fabricante. Con el fin de deducir la posición de la línea central de la vía, se realizaron dos pasadas sobre la misma, una en cada sentido. En [77] se lleva esta cuestión al extremo, realizando simultáneamente un escaneo 3D mediante un láser con el fin de obtener un modelo tridimensional de la superficie de la calzada y evaluar su estado.

Más relacionado con nuestro problema se tiene [78], en el que se utiliza un GPS para posicionar un vehículo (en concreto un autobús) y, simultáneamente, calibrar el odómetro del mismo, de modo que cuando las señales de la constelación de satélites GPS se pierden o no se recibe con suficiente calidad, son las medidas del odómetro las que permiten estimar la posición del autobús. Esto es posible gracias a que se dispone de un mapa de las calles por las que circula el autobús. Similar al anterior, en [72], se añade la medición de la altura (sobre un Modelo Digital del Terreno, DTM en Inglés) a esta información proporcionada por el GPS. Según los autores de ese trabajo, a mayor resolución de la retícula sobre la que se ha medido la altura, mayor es el incremento de la precisión obtenido. Por otra parte, no se observa gran aumento de la precisión por el hecho de utilizar polinomios de orden alto comparados con un modelo bilineal. En cierto sentido, en lo que se refiere al cálculo de distancias, [79] está muy relacionado con el trabajo presentado en este documento ya que aborda el problema del cálculo de distancias cubiertas por barcos pesqueros. En este artículo se menciona el error de medida que se produce al modelar mediante rectas los tramos entre coordenadas GPS cuando se realizan medidas a intervalos de tiempo que van desde un segundo hasta 10 segundos. Sin embargo existen ciertos aspectos particulares que difieren del problema que se presenta en este documento. En primer lugar, en mar abierto la recepción de las señales GPS es óptima, dado que no existen edificios ni vegetación que interfiera en su recepción. En segundo lugar, el recorrido que realiza un barco pesquero mientras faena no se realiza sobre una calzada cuya forma se pueda modelar de forma precisa. En tercer lugar, la velocidad de un barco durante

las labores mencionadas en general es menor que la de un vehículo.

Otro trabajo en el que se realiza un procesamiento mediante técnicas clásicas de las señales GPS es [80]. En el trabajo mencionado se analiza el problema del análisis de rutas para ser cubiertas específicamente en bicicleta. Se realiza un proceso de detección de outliers y de fusión de información mediante un filtro de Kalman. Por otra parte se simplifica la trayectoria obtenida mediante el algoritmo Douglas-Peucker geometric rounding [81].

En [82] se confronta el filtrado de datos GPS mediante filtro de Kalman con un filtro exponencial doble [70], en el contexto de un recorrido urbano. En las pruebas de campo se toma como referencia un GPS diferencial con IMU integrada, de gran precisión y se confronta esta referencia con un GPS convencional. Según los autores los resultados demuestran el mejor comportamiento del filtro exponencial doble frente al filtro de Kalman en cualquier circunstancia.

En [83] se detalla una taxonomía de los modelos de trayectorias planas que los autores de dicho trabajo consideran avanzados. Los distintos modelos surgen de la consideración de la velocidad, aceleración o curvatura constantes. Estos modelos se estiman mediante un filtro de Kalman usando las observaciones realizadas mediante un GPS diferencial que se fusionan con los datos del odómetro del vehículo utilizado en el estudio. Se concluye que, de los modelos considerados, el que mejor se comporta es el que considera la curvatura y la aceleración constantes.

Un trabajo similar se presenta en [84] en donde modelos similares se estiman mediante la información tomada por un GPS y un filtro de Kalman. El propósito de estos modelos no es otro que localizar de forma precisa al vehículo en un mapa y superponer el modelo estimado por delante del vehículo sobre imágenes de la calzada, constituyendo de esta forma una ayuda a la conducción en casos en los que la visibilidad sea reducida.

En [85] se fusionan mediante técnicas clásicas las informaciones de un sistema inercial, un GPS y un sensor que detecta el ángulo de la dirección del vehículo. En el trabajo se realizan experimentos en situaciones reales, encontrando una mejora del 30 % sobre la integración GPS/IMU.

Un ejemplo reciente en el que se realiza la fusión de información de un sistema inercial y un GPS es [65]. En este trabajo se utilizan variaciones del filtro de Kalman ideadas por los propios autores [64] para llevar a cabo esta tarea. Otro trabajo similar es [59], en donde se utilizan variantes adaptativas del filtro de Kalman (innovación adaptativa y factor de olvido adaptativo [73]) para la misma tarea. En [72] se muestra una implementación hardware usando una FPGA de un sistema clásico que utiliza un filtro de Kalman para fusionar la información de un GPS y de una unidad inercial. Si se desea consultar un análisis exhaustivo de un sistema en el que se fusiona la información de un GPS, una brújula electrónica y una unidad inercial, se puede consultar [71], los autores de este trabajo concluyen que la unidad MEMS utilizada en el prototipo del estudio no ofrece un rendimiento

suficiente para suplir al GPS cuando las señales de este no están disponibles.

## 4.2. Soft Computing y GPS

Las técnicas agrupadas genéricamente entorno al término Soft Computing se han aplicado a distintos aspectos de las tareas relacionadas con la tecnología GPS. En esta sección se pasará revista a las más destacadas y recientes.

En [52] se muestra un módulo neuro-fuzzy para integrar un módulo inercial y otro GPS con el fin de permitir la navegación aunque haya pérdidas de la señal GPS. Es bien conocido que las técnicas de fusión de información habituales no proporcionan una buena solución cuando los intervalos en ausencia de medidas GPS son grandes [51]. En el mencionado trabajo se utiliza la validación cruzada durante el proceso de actualización del modelo producido por el módulo neuro-fuzzy. Más recientemente, se puede consultar [53] en donde se aplican técnicas similares en un sistema de bajo coste.

Relacionado con el anterior, en [54] se fusiona la información de un receptor GPS con varios módulos inerciales, utilizando un filtro de Kalman y un Filtro de Kalman extendido. En el caso del filtro de Kalman simple se utilizan reglas del tipo *IF* < *antecedente* > *THEN* < *consecuente* > para actualizar la matriz *R* del filtro de Kalman. El número de reglas, su configuración y las pertenencias borrosas son decididas por el experto humano. Por otra parte, se utiliza también un observador [55] que asigna un grado de confiabilidad al estado estimado por el filtro de Kalman simple. Las estimaciones proporcionadas por el filtro anterior se fusionan con las medidas proporcionadas por un módulo inercial, utilizando un filtro de Kalman extendido. Un artículo relacionado con el anterior es [56] en donde se fusiona la información procedente de GPS, brújula electrónica e imágenes digitales usando aritmética fuzzy con el fin de tener en cuenta la imprecisión asociada a cada medida.

En la misma línea estaría [57], centrado este en el tema de solucionar el bias de los errores las medidas GPS, especialmente cuando la Disponibilidad Selectiva (Selective Availability) estaba activada, situación que no se produce actualmente.

Siguiendo con el tema de fusión de información para acoplar sistemas GPS e inerciales, en [68] y [69] se usa una red neuronal para mejorar el comportamiento del sistema inercial cuando, como en alguno de los casos anteriores, la señal GPS no está disponible. Según los autores la fusión de información utilizando un filtro de Kalman se comporta mejor cuando los períodos sin señal GPS son menores de 30 segundos y por el contrario, cuando la señal no está disponible durante 90 segundos o más, es mejor utilizar una red neuronal. Una vuelta de tuerca a este trabajo se puede ver en [63] utilizando un tipo de red neuronal distinto.

Otro ejemplo de fusión de información se puede encontrar en [66], en donde se intenta optimizar el proceso de fusión de información GPS/IMU/Odómetro clasi-

ficando el conjunto de maniobras posibles realizadas por el conductor del vehículo y utilizando la técnica más adecuada a cada una de ellas.

En [67] no se realiza ningún tipo de fusión de información, en este caso se utiliza un controlador difuso para evitar los obstáculos presentes en un campo de cultivo con el fin de permitir la navegación autónoma de un vehículo fumigador dotado de un GPS diferencial. Es este último dispositivo el que se encarga de proporcionar la información necesaria para la navegación. El algoritmo genético se utiliza para optimizar el controlador difuso. Según los autores, esta última optimización, llevada a la práctica, no ha proporcionado unos resultados tan buenos como en las simulaciones debido a los deslizamientos de las ruedas del vehículo y al retardo de los actuadores hidráulicos sobre la dirección del mismo.

En [59] se utiliza una red neuronal de base radial y una optimización mediante enjambres de partículas para identificar la dinámica no lineal de los errores del sistema y mejorar la integración de las medidas realizadas por un módulo GPS y un módulo inercial.

Por otra parte, [61] está relacionado con un método para describir y manejar conocimiento espacial sobre determinadas magnitudes de interés en una plantación vinícola. Los datos incluyen valores tanto cuantitativos como cualitativos y cada uno de ellos posee una imprecisión intrínseca a su naturaleza. Entre estas magnitudes está la posición en la que se toma la medida de estas magnitudes, que se realiza mediante un GPS. Los autores del trabajo mencionado confieren a esta medida una precisión, en términos absolutos, de entre uno y tres metros, pero no se menciona ninguna probabilidad asociada a esa precisión ni al concepto de CEP o DOP.

Sin relación con los anteriores trabajos, en [58] se utiliza la programación genética con el fin de derivar las ecuaciones que permitan transformar al sistema de referencia del elipsoide TWD67 las coordenadas referidas al episodio WG84, de modo que se minimicen los errores de redondeo y el esfuerzo computacional.

Remotamente relacionado con el presente trabajo, se tiene [60] en donde el problema que se resuelve mediante un algoritmo genético es la planificación de una serie de medidas GPS sobre un área amplia en lo que se refiere a precisión de las medidas y el coste de desplazamiento de el/los receptores desde una localización cuyas coordenadas se quieren conocer hasta la siguiente.

Finalmente, en [62] se utiliza un algoritmo genético en un proceso que no está relacionado con ninguno de los temas anteriores pero que es también habitual en la literatura del tema, se trata de la mejora de alguna parte del proceso de obtención de las coordenadas GPS a partir de las señales de la constelación de satélites GPS. En este caso concreto se trata de sustituir la resolución de un problema de mínimos cuadrados linealizado por otro no lineal mediante un algoritmo genético de codificación real.

### 4.3. Determinación de la velocidad de un objeto a partir de secuencias de imágenes: flujo óptico 3D

La técnica que se describe aquí tuvo su origen en un problema que se da durante una parte de la fabricación del vidrio, el afinado. Este proceso consiste en la eliminación de las burbujas de gas atrapadas en el vidrio fundido. En las siguientes secciones se exponen aspectos básicos sobre el cálculo del Flujo Óptico y su extensión a 3D.

#### 4.3.1. Flujo óptico

En esta sección se comenta la referencia [86] en donde se utiliza una estimación del flujo óptico 3D combinada con profundidad a partir de enfoque con el fin de medir la velocidad 3D de las burbujas de aire presentes en una maqueta del proceso de afinado del vidrio. El motivo de exponer en este momento la técnica desarrollada es que guarda relación con el proceso que se detallará más tarde, donde se combina esta metodología con una técnica de reconstrucción 3D en la que el flujo óptico 3D se utiliza para calcular el posicionamiento relativo de las franjas de la superficie de un neumático escaneadas con un láser.

El flujo óptico es la proyección en el plano de la imagen de los vectores de movimiento de los puntos de la escena no ocluidos. Básicamente existen tres formas de calcular el flujo óptico correspondiente a una secuencia de imágenes.

- Técnicas basadas en el gradiente de intensidad
- Técnicas basadas en correlación.
- Técnicas frecuenciales.

Las técnicas basadas en el gradiente de intensidad usan la ecuación conocida como “Optical Flow Constraint” (OFC) con el fin de calcular el flujo óptico [99]. Esta ecuación supone que los cambios de intensidad que ocurren en una secuencia de imágenes se deben exclusivamente al movimiento de los objetos de la escena: cada pixel que es proyección de un punto de la escena, tendrá una intensidad constante independientemente de la orientación de la superficie de la escena a la que pertenece y que será (probablemente) cambiante a lo largo de la secuencia. Formalmente esta hipótesis se expresa mediante la ecuación 4.1.

$$\frac{dI(x, y, t)}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

Como es evidente, las derivadas espaciotemporales deben de ser estimadas numéricamente a partir de las imágenes. Esta estimación es sensible al ruido presente en las imágenes, lo cual se trasladará a la estimación del flujo óptico.

Las técnicas basadas en correlación [89] [91] se basan en la minimización de la diferencia entre vecindarios tomados de dos imágenes consecutivas centrados en un pixel dado de cada imagen. El vector definido por las coordenadas de ambos pixels es una estimación del flujo óptico. Esta alternativa es costosa computacionalmente y su complejidad crece con el cuadrado de la velocidad máxima considerada.

Las técnicas frecuenciales usan un conjunto de filtros espaciotemporales sintonizados con distintas velocidades y orientaciones [98]. Cada uno de los filtros proporcionará una respuesta a la secuencia de imágenes que será máxima para aquel que coincida en orientación y magnitud con la velocidad del pixel que se analice. Existen argumentos para creer que es la técnica más precisa [94] y también la más costosa computacionalmente. El artículo de referencia clásico para comparar las tres técnicas es [93].

El flujo óptico 3D no es sustancialmente diferente del flujo óptico 2D, por lo tanto podría extenderse un método perteneciente a cualquiera de las tres familias anteriores, pero existen evidencias de que las derivadas espaciotemporales poseen un rol importante en la estimación del movimiento 3D [100].

### Técnicas basadas en el gradiente

En el caso de imágenes bidimensionales, la ecuación 4.1 se puede expandir y reescribir obteniéndose la ecuación 4.2.

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial y} v = \nabla(f) \cdot \bar{c} \quad (4.2)$$

Donde  $\nabla(f)$  es el gradiente de intensidad de la imagen, “ $\cdot$ ” es el producto escalar,  $\bar{c}$  es la velocidad del pixel estudiado y  $\frac{\partial f}{\partial t}$  es la derivada temporal del mismo pixel. Esta expresión relaciona las derivadas espaciotemporales con la velocidad en la imagen.

Como se puede observar, existen dos incógnitas en la ecuación ( $u$  y  $v$ ), por lo tanto no es posible determinar completamente la velocidad de un pixel sólo con información local. Existen distintas formas de añadir información global a la estimación con el fin de conseguir calcular las dos componentes de la velocidad. El artículo seminal de Horn y Schunk [99] utiliza una expresión con dos términos que pondera el cumplimiento de la OFC y la “suavidad” del flujo óptico. Esto conduce a un proceso iterativo para toda la imagen que permite, en efecto, el cálculo del flujo óptico completo.

Otra alternativa es analizar las medidas en el espacio de las velocidades, tratando de realizar una estimación robusta de la velocidad usando los resultados obtenidos al intersecar múltiples OFC’s en un vecindario del pixel a analizar [106]. Una de las formas de realizar un análisis de este tipo es hacer un clustering de los cortes de las OFC’s citadas, de modo que el centro de ese cluster se toma como

solución. El tipo de clustering utilizado en [103] [95] y [106] es unidimensional, referido a la OFC del pixel central del vecindario. Por el contrario el clustering utilizado en [104] utiliza todos los datos presentes en el vecindario, proporcionando una solución más robusta. Esta será la técnica utilizada aquí, extendida a 3D. Con ese fin se extiende la OFC a una tercera dimensión y se aplica a un modelo tridimensional de las burbujas de aire mencionadas anteriormente.

### 4.3.2. Estimación del movimiento 3D usando reconstrucción 3D y flujo óptico 3D

En esta sección se explica como obtener la velocidad 3D desde datos 3D y como obtener un modelo 3D a partir de secciones 2D de un objeto tomadas en distintos instantes de tiempo.

### 4.3.3. Extensión 3D de la OFC

Con el fin de realizar el análisis del movimiento 3D en las condiciones comentadas, la misma hipótesis que se plasma en la OFC, se extiende a tres dimensiones, por lo tanto se postula que la intensidad de los puntos de las burbujas 3D reconstruidas es constante en el tiempo. De esta forma, la secuencia se convierte en una función en  $x, y, z, t$  y la OFC 3D tiene la expresión que se muestra en la ecuación 4.3. En esta ecuación,  $f$  es la intensidad de los pixels en el modelo 3D y  $\bar{c}_{3D}$  es la velocidad de los pixels.

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial y} v + \frac{\partial f}{\partial z} w = \nabla(f) \cdot \bar{c}_{3D} \quad (4.3)$$

Como en el caso de la OFC usual, el número de incógnitas hace imposible la determinación de la velocidad usando sólo información 3D. Las mismas técnicas que solventan este problema en 2D se pueden extender a la OFC 3D.

### Reconstrucción 3D a partir de secciones de una escena tomadas a distinta profundidad e instante temporal

La reconstrucción 3D se estima usando varias imágenes tomadas a distinta  $z$ , es decir, desplazando la cámara ajustada con una profundidad de campo estrecha. De esta forma, se tiene una proyección 2D de los objetos de la escena a cada  $z$ , donde la zona enfocada contiene la porción de la escena correspondiente a cada sección. El volumen de fluido estudiado se representa por una caja con una única burbuja. A la izquierda de la figura 4.1 se muestra la situación en el instante  $t_i$ , a la derecha en el instante  $t_{i+1}$ . El eje de la cámara se mueve hacia abajo y la burbuja hacia la esquina superior izquierda. En cada situación se detalla cual es



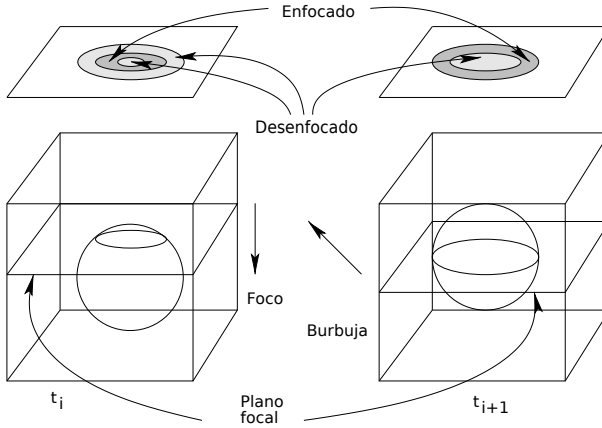


Figura 4.1: Captura de imágenes a diferentes  $z$ .

la sección enfocada. La imagen 2D resultante se muestra en la parte superior de cada volumen.

Debido a que las distintas imágenes no son adquiridas en el mismo instante de tiempo, no se puede realizar una estimación de las derivadas espaciotemporales usando un dominio alrededor de cada pixel y hallando las diferencias entre los distintos valores en la dirección adecuadas. En lugar de esto se calcula una estimación en cada  $(x, y, z)$  usando imágenes tomadas en distinto instante de tiempo, suponiendo una variación lineal de intensidad, como queda reflejado en la ecuación 4.4.

$$f(x, y, z, t) = k_1x + k_2y + k_3z + k_4t + k_5 \quad (4.4)$$

Como es evidente, una vez realizada la estimación, las constantes  $k_i$ ,  $i \in 1..4$  son las derivadas de la intensidad, como se puede observar en la ecuación 4.5.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = k_1; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = k_2; \quad \frac{\partial f}{\partial z} = k_3; \quad \frac{\partial f}{\partial t} = k_4; \quad (4.5)$$

Como mínimo se necesita un conjunto de cinco ecuaciones como 4.4 para resolver el sistema lineal de ecuaciones para las incógnitas  $k_i$ . Esto conduce al sistema de ecuaciones 4.6.

$$\begin{aligned} f(x_1, y_1, z_1, t_1) &= k_1x_1 + k_2y_1 + k_3z_1 + k_4t_1 + k_5 \\ f(x_2, y_2, z_2, t_2) &= k_1x_2 + k_2y_2 + k_3z_2 + k_4t_2 + k_5 \\ f(x_3, y_3, z_3, t_3) &= k_1x_3 + k_2y_3 + k_3z_3 + k_4t_3 + k_5 \\ f(x_4, y_4, z_4, t_4) &= k_1x_4 + k_2y_4 + k_3z_4 + k_4t_4 + k_5 \\ f(x_5, y_5, z_5, t_5) &= k_1x_5 + k_2y_5 + k_3z_5 + k_4t_5 + k_5 \end{aligned} \quad (4.6)$$

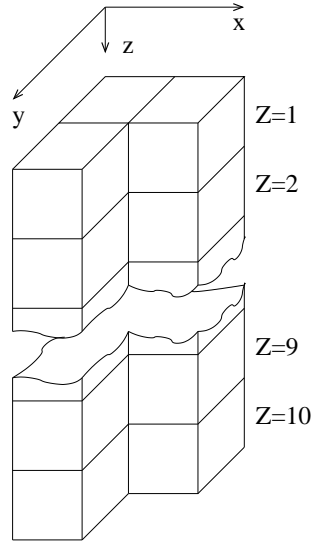


Figura 4.2: Vecindario para la  $k$ -ésima estimación a partir de un conjunto de imágenes a diferentes profundidades.

Con el fin de mejorar la calidad de los resultados, se ha escogido realizar la estimación sobre un conjunto de datos mayor, usando un vecindario de pixels que contenga información suficiente en cada dirección en el espacio de parámetros. Dado que la resolución de los datos es mayor en los ejes  $x$  e  $y$  que en  $z$  y  $t$ , se toma una mayor cantidad de datos en esas direcciones, con el fin de obtener suficiente información de la variación de la intensidad en  $z$  y  $t$ . De los experimentos realizados se ha concluido que un vecindario como el de la figura 4.2 es el más adecuado. En este vecindario se toman todos los datos en las direcciones  $z$  y  $t$  que tienen coordenadas  $x$  e  $y$  en el conjunto  $(i, j), (i + 1, j), (i, j + 1)$ . Para cada estimación de la velocidad, la cámara toma imágenes a 10 valores de  $z$  distintos, de modo que se tiene un total de 30 ecuaciones. El sistema resultante es sobredeterminado y puede resolverse para calcular los valores de las derivadas espaciotemporales que se necesitan para, a su vez, definir la ecuación 4.3. El sistema sobredeterminado de ecuaciones es 4.7.

$$\begin{aligned}
f(j, i, 1, 1) &= k_1j + k_2i + k_3 + k_4 + k_5 \\
f(j, i, 2, 2) &= k_1j + k_2i + 2k_3 + 2k_4 + k_5 \\
&\dots \\
f(j, i, 10, 10) &= k_1j + k_2i + 10k_3 + 10k_4 + k_5 \\
f(j, i + 1, 1, 1) &= k_1j + k_2(i + 1) + k_3 + k_4 + k_5 \\
f(j, i + 1, 2, 2) &= k_1j + k_2(i + 1) + 2k_3 + 2k_4 + k_5 \\
&\dots \\
f(j, i + 1, 10, 10) &= k_1j + k_2(i + 1) + 10k_3 + 10k_4 + k_5 \\
f(j + 1, i, 1, 1) &= k_1(j + 1) + k_2i + k_3 + k_4 + k_5 \\
f(j + 1, i, 2, 2) &= k_1(j + 1) + k_2i + 2k_3 + 2k_4 + k_5 \\
&\dots \\
f(j + 1, i, 10, 10) &= k_1(j + 1) + k_2i + 10k_3 + 10k_4 + k_5
\end{aligned} \tag{4.7}$$

#### 4.3.4. Estimación robusta del flujo óptico y extensión 3D

Como se ha comentado anteriormente, la naturaleza de los datos disponibles en este problema complica el cálculo del flujo óptico. Esto es debido a lo disperso de las secciones, que no pueden proporcionar una reconstrucción 3D perfecta de las burbujas. Debido a que el parámetro que se estima a partir de las distintas secciones, las  $k_i$  son las derivadas espaciotemporales que aparecen en la ecuación 4.3, el flujo óptico resultante puede resultar afectado por los errores cometidos durante la reconstrucción 3D. Por ello se ha decidido utilizar un algoritmo robusto, de elaboración propia [104], que descarta de forma automática las medidas erróneas que puedan ocurrir. Se ha decidido analizar la densidad de la distribución de velocidades y buscar su máximo (la moda) en lugar de calcular su valor medio, lo que sería más rápido pero está influenciado por los outliers.

##### La moda como estimador robusto del flujo óptico

El máximo de la función de densidad de la distribución de velocidades puede estimarse sin más que encontrar el mayor valor del histograma bidimensional correspondiente, pero esta estimación puede hacerse de forma más precisa y rápida si se maximiza de forma numérica una estimación k-vecinos o una estimación kernel de su densidad [107]. Se han probado las dos alternativas, usando un kernel de soporte compacto en el último de los casos.

$$k(\bar{x}) = \begin{cases} \frac{|\bar{x}_0 - \bar{x}|}{d} \cdot y(\bar{x}) & \text{if } |\bar{x}_0 - \bar{x}| < d \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \tag{4.8}$$

Para cada pixel en el vecindario utilizado, se calcula la solución del sistema formado por cada par posible de OFCs, descartando aquellos cuyo número condición es demasiado alto. Se descartan también las velocidades de módulo superior

a un umbral. Las velocidades se guardan ordenadas lexicográficamente con el fin de optimizar el cálculo del máximo de la función de densidad.

Si se usa un kernel de soporte compacto, la eficiencia del algoritmo se ve incrementada porque se reduce el número de evaluaciones de la ecuación 4.8 necesarias para calcular la moda. Dado que el kernel es 0 para puntos que distan más que  $d$ , sólo se necesita aplicar el kernel a las velocidades que distan menos de ese valor.

Como el array de velocidades está ordenado lexicográficamente, a priori se pueden descartar las velocidades cuyas diferencias en valor absoluto usando sólo la primera componente es mayor que  $d$ .

Por otra parte, el valor del máximo en relación al número de pixels es un indicativo de la verosimilitud de la estimación, cuanto mayor sea este valor, más fiable es la estimación.

La extensión de este procedimiento a 3D es inmediata, sin más que añadir la velocidad en  $z$ . Evidentemente en este caso es necesario realizar la intersección de todos los tripletes de OFCs que se puedan formar con el vecindario utilizado, ya que el número de incógnitas ahora es tres. De esta forma, para cada punto de la reconstrucción 3D analizado, se tendrá una distribución de velocidades, también 3D, de la cual se calculará el máximo de su función de densidad, del mismo modo que en el caso 2D.

### **4.3.5. Resultados cuantitativos para datos sintéticos.**

Como es habitual en los trabajos de este tema, para estimar el error cometido por los algoritmos de flujo óptico, es necesario disponer de secuencias de imágenes sintéticas cuyo flujo óptico sea conocido de forma teórica. Con este fin se ha creado una secuencia de imágenes sintéticas que posee unas propiedades similares a las encontradas en la aplicación real.

En la figura 4.3 se muestran tres imágenes sintéticas. La imagen más a la izquierda y la central son imágenes de una misma figura a diferentes profundidades, moviéndose desde la esquina inferior izquierda a la superior derecha y hacia el observador: la velocidad de todos los puntos de la burbuja es entonces  $(1, 1, 1)$ . A la derecha se muestra la reconstrucción 3D de la burbuja a partir de la secuencia completa de imágenes.

En la figura 4.4 se muestra el histograma del error para la componente de la velocidad en  $z$ , obtenida a partir de la reconstrucción 3D. El error total en la imagen es  $0,15 \cdot 10^4$ , es decir, un 15 % para una imagen de tamaño  $100 \times 100$ .

El error cometido es suficiente para la aplicación real que se le pretende dar a la técnica propuesta, incorporando una información valiosa para el ajuste de los parámetros del proceso. La precisión real seguramente será menor debido a la influencia del error en la adquisición de imágenes y cuerpos extraños, impurezas, presentes en las imágenes reales.

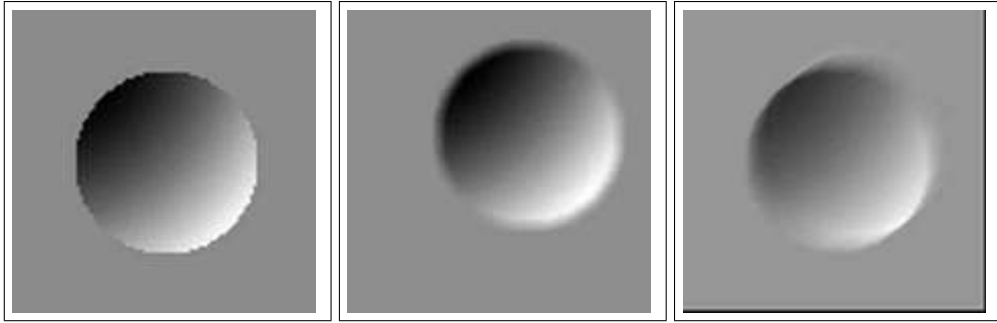


Figura 4.3: Ejemplo de reconstrucción de imágenes con datos 2D.

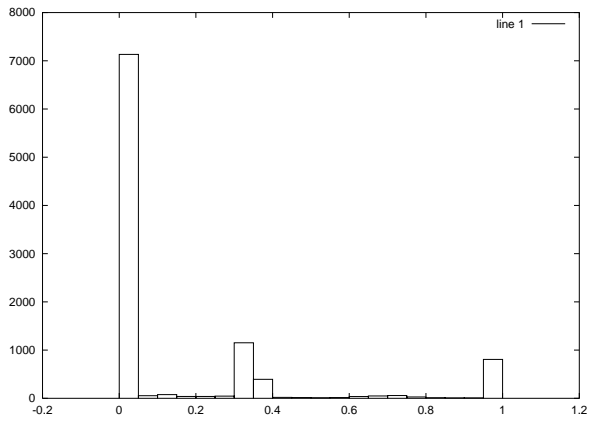


Figura 4.4: Histograma del error en el cálculo del flujo óptico de la secuencia 4.3. Los picos se deben a las imprecisiones del modelo.





### **5.1.1. Resumen**

Esta invención trata de un sistema para proporcionar la posición de un vehículo en tierra, aire o espacio, usando las medidas de un sistema GPS y de una unidad inercial. Se usa un filtro de Kalman para procesar todas las medidas posibles: pseudorange, fase de la portadora y la información de la IMU. El filtro de Kalman es multimodo, seleccionándose el modo óptimo basándose en la disponibilidad de las medidas y la estabilidad del filtro. Con esto se pretende incrementar la robustez frente a interferencias.

### **5.1.2. Descripción del problema**

En el documento original de esta patente se expone cuales son (eran en el momento de su publicación) las tendencias en cuanto a sistemas de navegación se refiere. Según los inventores, las aplicaciones futuras demandan el desarrollo de un sistema GPS/inercial que sea fiable, integrado, capaz de operar en un entorno altamente dinámico, con una pluralidad de sistemas globales de posicionamiento sensibles al deterioro de sus señales. Como es sabido, los sistemas inerciales adolecen de una deriva que hace que el error de medida se incremente con el tiempo. Si bien existen sistemas más precisos, su precio es prohibitivo. Por el contrario los sistemas GPS no presentan deriva pero son susceptibles de ser interferidos. Un sistema compuesto de los dos tipos de sensores se complementaría y permitiría utilizar componentes más baratos. Se vaticina el alcance de la precisión de un metro en pocos años. En el documento original de la patente se muestra brevemente el estado del arte de la tecnología de los sensores mencionados, que carece de interés en este momento dada la fecha en la que se redactó.

### **5.1.3. Realización preferida**

En la figura 5.1 se muestra el esquema de bloques de la solución propuesta en esta patente. Su característica fundamental es que la fusión de información se produce antes de determinar la posición mediante el GPS, es decir, previamente a la resolución del sistema de ecuaciones que se forma a partir de la información de cada satélite. Los autores denominan a la posición así obtenida “solución totalmente acoplada”. El proceso de estimación de la posición sería como sigue:

1. Se toma una medida de la velocidad angular y de la aceleración o de otros sensores, se inicializan las ecuaciones de navegación inercial.
2. Se leen las señales GPS y se obtienen los pseudorange, delta rangos y la fase de la portadora.
3. Se leen la velocidad angular y la aceleración, se resuelven las ecuaciones inerciales para obtener la posición, velocidad y orientación.



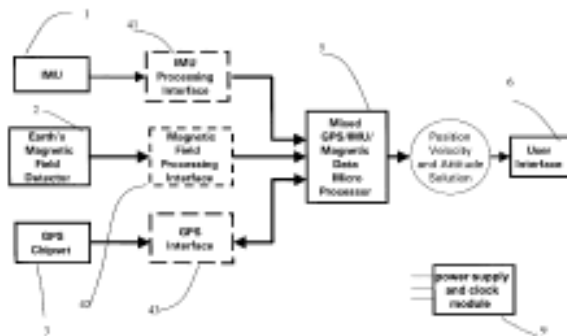


Figura 5.2: Sistema GPS, MEMS, IMU y brújula digital con compensación de temperatura.

4. Se combinan las medidas tomadas con el GPS con la generada por el sistema inercial para dar la solución totalmente acoplada.

En el documento original de la patente se desmenuza cada uno de los bloques de la figura 5.1.

## 5.2. INTEGRATED GPS/IMU METHOD AND MICROSYSTEM THE-REOF

Ching-Fang Lin, Simi Valley, CA (US); Dong An, Simi Valley, CA (US)

American GNC Corporation, Simi Valley, CA (US)

US 6,480,152 B2

Nov. 12,2002

### 5.2.1. Resumen

Esta invención se refiere a un sistema integrado que consta de GPS, MEMS IMU y brújula digital con compensación de temperatura, proporcionando una solución estable y de alto rendimiento en un rango amplio de temperaturas.

### 5.2.2. Descripción del problema

Este sistema trata de proporcionar de forma altamente precisa velocidad angular, aceleración, posición, velocidad y orientación de un vehículo en diversos entornos. Convencionalmente, esta labor es posible realizarla utilizando una IMU o un GPS. Una IMU es la parte clave de un sistema de navegación inercial, constituido además por un microprocesador y el correspondiente software. A su vez

una IMU consta de sensores inerciales: giróscopos y acelerómetros, montados de tres en tres en direcciones ortogonales. Basándose en la aceleración y velocidad angular medidas por la IMU, se obtienen la posición, velocidad y orientación del vehículo. Sin embargo los sistemas de navegación inercial presentan deriva con el paso del tiempo. Esta deriva proviene de la propia de los giróscopos, del bias de los acelerómetros, desalineamiento, perturbaciones gravitatorias y de errores debidos a factores de escala. La forma convencional de corregir estos errores pasa por utilizar sistemas más precisos (caros y grandes) o bien añadir otros tipos de sensores. Recientemente se han usado receptores GPS con este fin, pero el sistema GPS es vulnerable a interferencias y oscurecimientos de la señal. Por lo tanto parece claro que ninguna de las soluciones (IMU o GPS) por separado es capaz de proporcionar de forma eficiente las medidas comentadas. Parece evidente que la naturaleza de ambos sistemas es tal que sus virtudes se complementan solventando cada uno los defectos del otro:

- Ciertos procesos de cálculo del GPS se agilizan inicializando el sistema con las medidas de la IMU.
- La IMU permite proporcionar medidas cuando el sistema GPS no funcione adecuadamente.
- Mientras el sistema GPS proporcione medidas con suficiente precisión, estas pueden ser empleadas para calibrar las del sistema inercial.
- El GPS hace innecesario el alineamiento inicial del sistema inercial, permitiendo realizar esta tarea “al vuelo”.

### **5.2.3. Realización preferida**

La presente invención proporciona un sistema integrado que fusiona las medidas de una IMU, un GPS y una brújula digital, con el fin de obtener con alta precisión una medida de la posición, velocidad y orientación. El sistema incluye (ver figura 5.2):

- Una IMU que proporciona medidas de aceleración y velocidad angular en tres ejes.
- Una brújula digital que mide el vector del campo magnético terrestre en X, Y, Z.
- Un GPS.
- Interfaces adecuados para cada uno de los dispositivos anteriores.
- Un microprocesador en el que se procesan las señales anteriores con el fin de obtener una estimación conjunta de las medidas.

- Interfaz de usuario.
- Fuente de alimentación y reloj.

En el documento original se descomponen cada uno de estos dispositivos en partes más específicas y se da algún detalle sobre los cálculos implicados, sin entrar en demasiados detalles y mencionando, como no, el uso de un filtro de Kalman para fusionar la información.

### **5.3. TURN DETECTION ALGORITHM FOR VEHICLE POSITIONING**

Bishnu P. Phuyal, DesPlaines, IL (US)  
Navigation Technologies Corp., Chicago, IL (US)  
US 6,502,033 B1  
Dec. 31,2002

#### **5.3.1. Resumen**

Esta invención describe un método para detectar los giros de un vehículo con el fin de determinar su posición y su orientación respecto a la vía por la que circula, cuyos datos están almacenados en la base de datos del sistema de navegación. Los datos de partida son los obtenidos por un receptor GPS y los obtenidos por los sensores montados en el vehículo. Estos datos se usan para formar un histórico de la trayectoria del vehículo que se actualiza constantemente. la información de la cartografía, del sistema GPS y de los sensores de abordo se fusiona con el fin de ajustar los factores de escala y el bias de los sensores del vehículo (ver figura 5.3).

#### **5.3.2. Descripción del problema**

El sistema GPS proporciona la posición del receptor sobre la superficie de La Tierra. La utilidad de los sistema de navegación de abordo reside en su capacidad para proporcionar indicaciones sobre el itinerario a seguir para alcanzar un determinado destino. Con este fin, en ocasiones es necesario proporcionar al sistema la orientación y posición del receptor con respecto a una determinada vía de las que figuran en la cartografía almacenada. Idealmente tanto el sistema GPS como la navegación inercial permiten llevar a cabo esta tarea, sin embargo los errores de ambos sistemas pueden dar lugar a orientaciones y posiciones incorrectas.

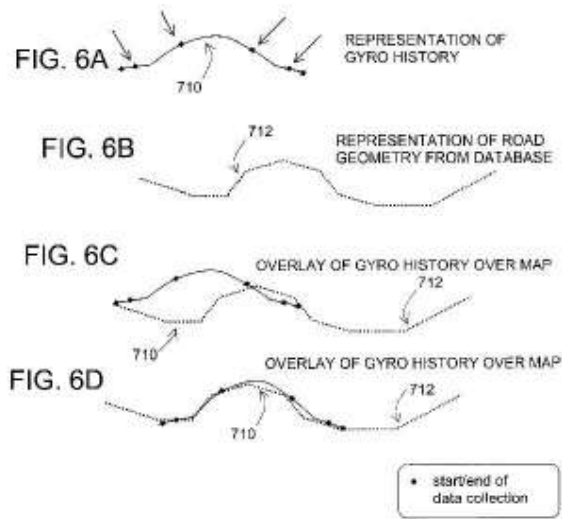


Figura 5.3: Fusión de información para ajustar factores de escala y bias de los sensores de un vehículo.

### 5.3.3. Realización preferida

#### Sistema de navegación

El sistema propuesto puede realizarse en la forma de un dispositivo portátil para su uso en cualquier tipo de vehículo o bien integrarse en otras plataformas. El sistema de navegación es una combinación de componentes hardware y software. La parte hardware incluye procesador, memoria, etc. También puede incluir dispositivos que adquieran datos utilizados para determinar la posición del vehículo y sensores, incluyendo un sistema GPS. El sistema también incluye un interfaz de usuario que permite recibir instrucciones por parte del usuario, incluyendo teclados, micrófonos, sistemas de reconocimiento de voz, etc. También dispone de medios adecuados para proporcionar información al usuario. Los componentes pueden ser convencionales o no y el uso y fabricación conocidos por los expertos en el tema.

#### Base de datos Geográfica

Para proporcionar al usuario la funcionalidad propia del sistema de navegación, se usa información geográfica que puede estar almacenada en el mismo sistema, mediante cualquier medio, o bien llegar a este mediante un sistema inalámbrico de comunicaciones que puede formar parte del sistema de navegación. La información no se limita a la forma geométrica de las vías de comunicación sino que incluye cualquier información relevante, sentido del tránsito, intersecciones,

limitaciones, nombres, lugares de interés, poblaciones, etc. Las vías pueden estar formadas por tramos delimitados por puntos de coordenadas conocidas.

## **Software de navegación**

El software de navegación utiliza la base de datos, la información proporcionada por el sistema GPS y la proporcionada por los distintos sensores con el fin de alcanzar el destino especificado por el usuario. En el documento original correspondiente a esta patente, se intenta cubrir todas las posibles configuraciones de este software, incluyendo el almacenamiento local en distintos medios o el almacenamiento en un servidor, así como la descomposición de la funcionalidad del mismo en distintos componentes software. Como es habitual, la intención de esta sección es proteger la invención y no aporta novedades científicas relevantes.

## **Posicionamiento del vehículo**

Entre las tareas que realiza el software está el posicionamiento del vehículo en relación a la base de datos geográfica, incluyendo las vías presentes en la misma. Si el vehículo está en una de esas vías, su posición puede ser utilizada por el sistema de navegación con el fin de proporcionar un itinerario hasta el destino. Dada la variedad de modelos de vehículos, así como de sensores, el software se apoya en una capa independiente del dispositivo que uniformiza las señales de los distintos sensores antes de suministrárselas al software. Entre los sensores especificados en la realización preferida están:

- Receptor GPS.
- Giróscopo.
- Odómetro.
- Marcha adelante/atrás.
- Acelerómetro.

Las señales de estos sensores pueden verse alteradas por las condiciones ambientales, de modo que se tratan como aproximaciones o como variables aleatorias (sic). El sistema de posicionamiento realiza la fusión de la información suministrada por las fuentes anteriores, permitiendo la detección de errores en los datos del GPS y la navegación a estima. Se incluye un algoritmo de detección de giros que permite determinar de forma precisa la orientación del vehículo. De esta forma es posible distinguir si el vehículo viaja en línea recta o está girando y afinar el proceso de navegación a estima.

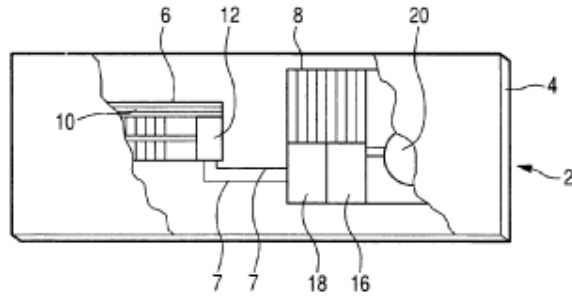


Figura 5.4: Integración de GPS y RFID en un único dispositivo. Vista superior.

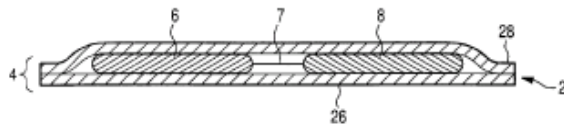


Figura 5.5: Integración de GPS y RFID en un único dispositivo. Vista lateral.

## 5.4. COMBINATION RFID AND GPS FUNCTIONALITY ON INTELLIGENT LABEL

John Howard, Wildwood, MO (US)

Delaware Capital Formation, Inc., Wilmington, DE (US)

US 6,614,392 B2

Sep. 2,2003

### 5.4.1. Resumen

Se trata de la combinación de una etiqueta RFID, un GPS y una memoria, entre otros dispositivos. Usando estos dispositivos, adosados a un mismo sustrato, se consigue una etiqueta inteligente que permite identificar un objeto, monitorizar sus desplazamientos y consultar estos en cualquier momento.

### 5.4.2. Descripción del problema

Esta invención es de utilidad en cualquier situación en la que sea necesario recabar información sobre la evolución en el tiempo de la posición de un objeto o persona. En ocasiones este objetivo se cubre parcialmente mediante el escaneado de códigos de barras adheridos a aquello que se desea rastrear. Sin embargo en este caso solo se puede tener la certeza del paso del objeto o persona por el lugar en

el que se encuentre el escáner. Es más, se necesita personal para realizar la tarea. Si se usan etiquetas de radiofrecuencia, esta tarea se automatiza parcialmente, pero sigue sin ser posible saber donde ha estado el objeto entre dos puntos de monitorización.

### **5.4.3. Realización preferida**

En esta invención se unen tres dispositivos (GPS, etiqueta de radiofrecuencia y memoria) sobre un mismo sustrato susceptible de ser adherido a un objeto (ver figuras 5.4 y 5.5) con el fin de:

- Identificar el objeto en cualquier momento.
- Conocer la posición del objeto en cada momento.
- Almacenar la posición del objeto en cada momento.

En el apartado correspondiente de la presente patente se detallan distintas posibles realizaciones, con etiquetas pasivas o activas, con distintos tipos de alimentación, tamaños y formas de adherir el dispositivo a cualquier objeto. También se detallan distintas aplicaciones de la invención. Entre ellas se encuentra el campo de la paquetería, ya mencionado, pero también se incluyen otras aplicaciones como por ejemplo el seguimiento de personas. Incluso se sugiere su utilización en actividades deportivas como la práctica del golf, con el fin de analizar el rendimiento del jugador. Otra aplicación sugerida es la protección de bienes. Finalmente se propone el uso de la invención para el control de la exposición del ganado a focos de infección.

## **5.5. METHOD AND SYSTEM FOR CALIBRATING AN IG/GP NAVIGATIONAL SYSTEM**

Michael S. Perlmutter, Sherborn, MA (US); Ian Humphrey, Foxboro, MA (US)  
Fibersense Technology Corporation, Canton, MA (US)  
US 6,622,091 B2  
Sep. 16,2003

### **5.5.1. Resumen**

Esta invención trata de un sistema para calibrar la señales de un conjunto de acelerómetros y giróscopos que forman parte de un sistema combinado con un GPS. Los datos de la navegación actual se determinan en función de las señales de los sensores y de los datos de instantes anteriores. Las señales del GPS se

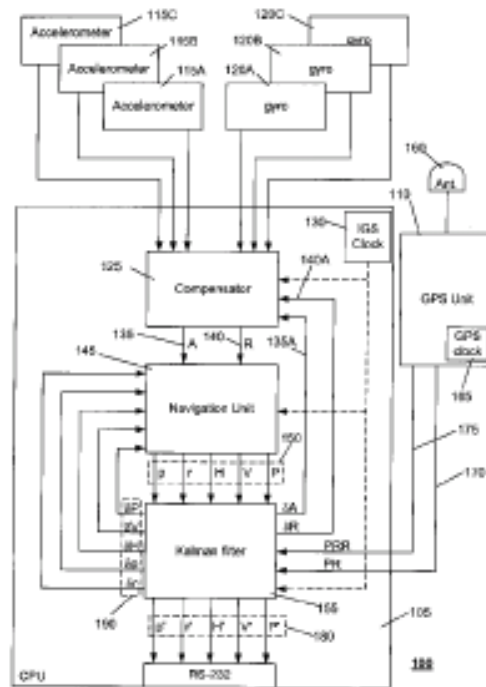


Figura 5.6: Sistema de calibración de señales de sensores inerciales y GPS

combinan con las del sistema inercial mediante un filtro de Kalman ver figura 5.6. De esta forma, las señales del sistema inercial se calibran de acuerdo con el resultado de la estimación conjunta.

### 5.5.2. Descripción del problema

Existen sistemas de guiado inerciales de alta precisión, pero se basan en el uso de giróscopos de alta precisión, del orden de 100 grados por hora. Por el contrario, existen aplicaciones de giróscopos integrados, de baja precisión, del orden de 10 grados por segundo, que son mucho más baratos. Dichos sistemas pueden utilizarse en automoción para detectar movimientos bruscos, pero no para construir sistemas de navegación inercial. El error de los giróscopos integrados se compone de dos términos, el correspondiente al escalado y el correspondiente al bias. El primero caracteriza la diferencia entre el ángulo medido y la rotación experimentada por el giróscopo, está afectado por las condiciones ambientales y no se puede compensar con una cantidad fija. El segundo se produce tras la inicialización del dispositivo, se puede compensar si se conoce su magnitud, pero esta puede variar en cada inicialización. Los sistemas de navegación inercial son de gran utilidad para cubrir los períodos en los que las señales GPS no están



disponibles, lo cual ocurre a menudo en la circulación por ciudad o por lugares montañosos. El mismo problema puede surgir en el contexto de la navegación marítima cuando se navega por pasos estrechos.

### **5.5.3. Realización preferida**

En este apartado del documento original de la presente invención se presentan una serie de realizaciones que intentan cubrir distintas combinaciones de los elementos comentados, con el fin de proteger los derechos de los inventores. De entre ellas destacan las siguientes:

- Utilizar tres acelerómetros mutuamente ortogonales.
- Utilizar tres giróscopos mutuamente ortogonales.
- Obtener al menos un factor de corrección del bias de los acelerómetros.
- Obtener tres factores de corrección del bias de los acelerómetros.
- Idem que los dos anteriores pero almacenando los factores de corrección en memoria.
- Idem que los tres anteriores pero para el caso de los giróscopos, para bias y escalado.
- Corregir las medidas de acelerómetros y giróscopos mediante un algoritmos ejecutado por un procesador, implementado con lógica cableada o mediante una tabla look-up.
- Integrar las medidas del sistema inercial con las realizadas por el GPS, mediante un filtro de Kalman, en cada uno de los casos anteriores.

## **5.6. VEHICLE NAVIGATION APPARATUS PROVIDING RAPID CORRECTION FOR EXCESSIVE ERROR IN DEAD RECKONING ESTIMATES OF VEHICLE TRAVEL DIRECTION BY DIRECT APPLICATION OF POSITION AND DIRECTION INFORMATION DERIVED FROM GPS POSITION MEASUREMENT DATA**

Yasuhiro Shimizu, Tokoname (JP); Kiyoshi Tsurumi, Okazaki (JP)

Denso Corporation, Kariya (JP)

US 6,658,353 B2

Dec. 2,2003

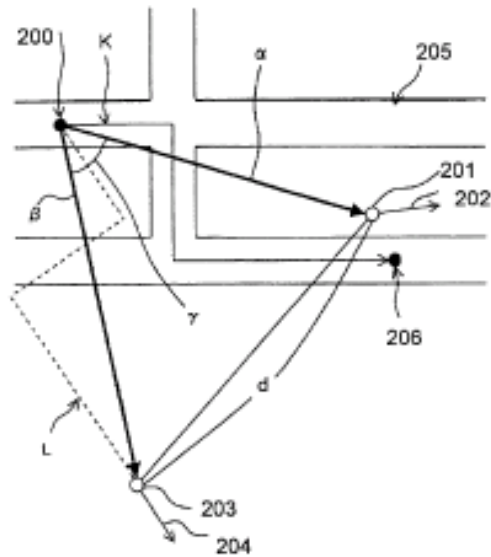


Figura 5.7: Uso de datos cartográficos para corrección de errores de posicionamiento de un GPS.

### 5.6.1. Resumen

Se trata de un sistema que permite detectar errores en un sistema de navegación a estima de un vehículo. Se basa en el uso de un receptor GPS que calcula la posición y el rumbo de forma periódica, comparando estas medidas con las obtenidas por el sistema de navegación a estima. Cuando se detecta una discrepancia excesiva, la posición y el rumbo obtenido por el GPS sustituye a la obtenida por el sistema de navegación a estima.

### 5.6.2. Descripción del problema

Como es conocido, un giróscopo es capaz de medir rotaciones con respecto a su propio eje, pero este tipo de sensores está sujeto a errores acumulativos (deriva), que empobrecen la precisión con el transcurso del tiempo. Por el contrario el sistema GPS no presenta esta deriva pero si otro tipo de errores aleatorios que hacen que su precisión sea del orden de metros. Usualmente los datos obtenidos por el sistema GPS se procesan mediante un filtro de Kalman con el fin de paliar estos errores. En la mayor parte de las ocasiones, los vehículos circulan por carreteras, calles, etc. que están registradas en los mapas de que disponen los sistemas de navegación. Esta circunstancia se puede utilizar como restricción adicional para descartar las posiciones que, calculadas mediante alguno de los procedimientos anteriores, resulten incorrectas (ver figuras 5.7 y 5.8).

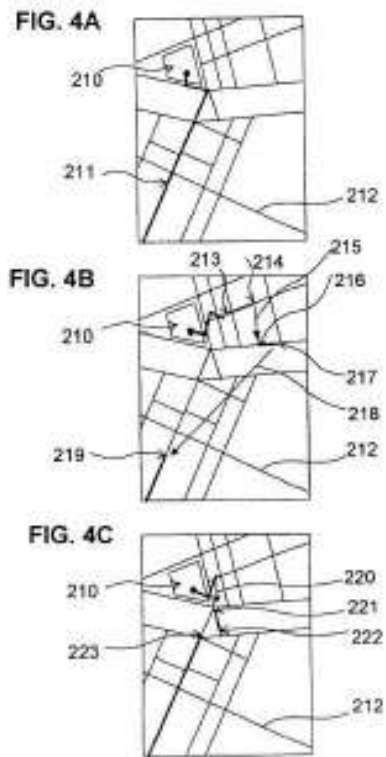


Figura 5.8: Otro ejemplo de corrección de errores de posicionado de un GPS.

### **5.6.3. Realización preferida**

La invención a la que se refiere esta patente trata de un método por el cual las medidas de rumbo y posición obtenidas por el sistema de navegación inercial y por el GPS colaboran para una estimación más precisa de la posición y del rumbo, mientras la discrepancia entre ambas esté por debajo de cierto umbral. Por encima de este umbral la medida GPS sin procesar (mediante un filtro de Kalman) se usa para corregir la medida del sistema inercial. Si bien la estimación de rumbo y posición obtenidos por este procedimiento estará sujeta a ciertos errores, se usa esta para recuperar lo antes posible el sistema de navegación a estima, incluso mediante la confrontación de estas medidas con un mapa.

## **5.7. INERTIAL AUGMENTATION FOR GPS NAVIGATION ON GROUND VEHICLES**

Andrew Karl Wilhelm Rekow, Waterloo, IA (US)

Deere & Company, Moline, IL (US)

US 6,694,260 B1

Feb. 17,2004

### **5.7.1. Resumen**

Esta invención trata de un montaje de compensación inercial para su uso en vehículos agrícolas, tractores y similares, de modo que se corrija la información relativa a la posición, rumbo, espacio entre pasadas, etc. producidas por el desnivel del terreno.

### **5.7.2. Descripción del problema**

La antena receptora de las señales GPS debe situarse en una posición en la que la recepción de las mismas sea óptima. En el caso de un vehículo agrícola esa posición suele ser el techo de la cabina, por lo tanto a metros sobre el nivel del suelo. Por este motivo, cuando el área de trabajo presenta fuertes desniveles, se producen errores de posición y orientación (ver figura 5.9). Por este motivo es necesario estimar la orientación del vehículo. Una alternativa consiste en montar varias antenas con el fin de determinar la posición de varios puntos del vehículo. Sin embargo la precisión y número de receptores GPS necesarios encarecen el sistema. Otra alternativa se basaría en el uso de un sistema inercial para estimar la orientación del vehículo y corregir la deriva de este mediante la información del GPS. Sin embargo de nuevo el coste de este sistema es prohibitivo si se usan componentes de calidad, que incluyan giróscopos y acelerómetros de precisión.

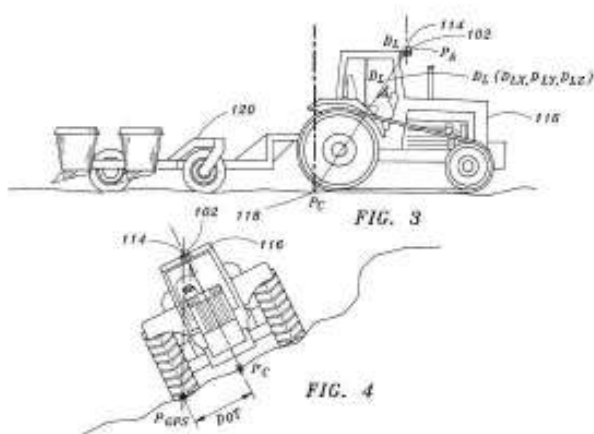


Figura 5.9: Compensación inercial de datos GPS para vehículos agrícolas, instalación del GPS.

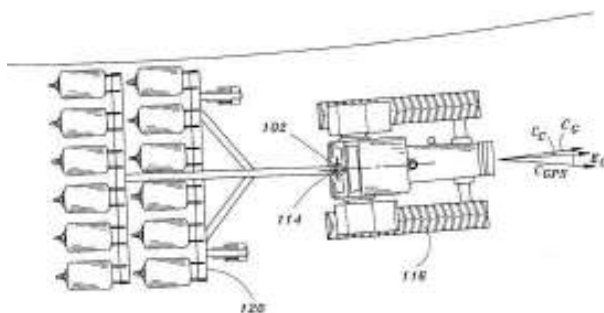


Figura 5.10: Compensación inercial de datos GPS para vehículos agrícolas, cálculo de la orientación.

Esta invención trata de limitar los componentes del sistema inercial de modo que se abarate su coste manteniendo su utilidad.

### 5.7.3. Realización preferida

En el documento original correspondiente a esta patente se detallan varias realizaciones que, como ocurre frecuentemente, pretenden cubrir todas las posibles combinaciones de los dispositivos comentados: GPS, acelerómetros y giróscopos. En esencia se trata de utilizar el sistema inercial para calcular la orientación en el espacio del vehículo (ver figuras 5.9 y 5.10) de modo que se pueda calcular el ancho que cubren los accesorios sobre el terreno. En el mismo documento se detallan los cálculos necesarios en función del equipamiento de que se disponga.

## **5.8. INERTIAL GPS NAVIGATION SYSTEM**

Thomas John Ford, Calgary (CA); Janet Brown Neumann, Calgary (CA); Ian Williamson, Calgary (CA)

NovAtel, Inc., Calgary (CA)

US 6,721,657 B2

Apr. 13,2004

### **5.8.1. Resumen**

Esta invención consiste en un dispositivo que integra las medidas realizadas con un GPS con las realizadas mediante un sistema inercial. La señal de reloj del GPS etiqueta las medidas realizadas por el sistema inercial. Mediante un filtro de Kalman se actualiza la estimación de la posición, velocidad y rumbo obtenidas mediante el sistema inercial, con el fin de reducir los errores del mismo. La redundancia del sistema también permite al mismo recuperarse de la pérdida de señal de la constelación de satélites GPS.

### **5.8.2. Descripción del problema**

Es sobradamente conocida la problemática del sistema GPS cuando la orografía, entorno y otras circunstancias no son favorables para la recepción de las señales de los satélites. Cuando se interrumpen dichas señales el sistema deja de funcionar y desde que la señal vuelve a estar disponible hasta que el sistema proporciona información de nuevo pueden pasar hasta 30 segundos. Existen propuestas en las que este problema se soluciona mediante un módulo de navegación inercial dotado de giróscopos y acelerómetros. Además cuando la señal GPS está disponible, pueden utilizarse las medidas obtenidas para limitar los errores (bias y deriva) de giróscopos y acelerómetros. Sin embargo no se conoce ningún sistema en el que la información del sistema de navegación inercial se utilice para que el sistema GPS se recupere lo antes posible en el caso de pérdida de señal.

### **5.8.3. Realización preferida**

Esta invención consiste en un receptor que usa un sólo procesador para controlar un subsistema GPS y un subsistema inercial, de modo que las medidas de ambos sistemas se integran por software. Las medidas del subsistema inercial se etiquetan según la fecha y hora proporcionada por el GPS, de modo que se conoce la medida proporcionada por cada subsistema en cada momento. Estas medidas se alimentan a un filtro de Kalman. El receptor utiliza las medidas del subsistema inercial para incrementar la velocidad de recuperación del sistema GPS en caso

de perder la señal de los satélites, en concreto, se utilizan para estimar pseudoranges y desplazamientos Doppler que están suficientemente próximos a los valores reales como para facilitar la re-adquisición de la señal de los satélites. Los detalles de los procesos de cálculo implicados se pueden consultar en el documento íntegro de la patente.

## **5.9. PROCESS AND SYSTEM OF COUPLED REAL-TIME GPS/IMU SIMULATION WITH DIFFERENTIAL GPS**

Ching-Fang Lin, Simi Valley, CA (US); Jen-Hao Mao, Simi Valley, CA (US)  
American GNC Corp., Simi Valley, CA (US)  
US 6,735,523 B1  
May 11,2004

### **5.9.1. Resumen**

Esta invención se refiere a un sistema para simular en tiempo real una unidad GPS/IMU usando para ello, entre otros dispositivos, un GPS diferencial. La idea es permitir la comparación de un sistema que integre GPS y navegación inercial con un sistema que utilice sólo GPS.

### **5.9.2. Descripción del problema**

Debido a su naturaleza, es difícil probar en condiciones de laboratorio una unidad compacta GPS/IMU. Cuando esta se halla en reposo ninguna de las dos puede proporcionar medidas dinámicas, como resulta evidente. En el caso de aplicaciones terrestres, es posible realizar pruebas a bajo coste en un recorrido planificado y medido, pero esto es imposible en el caso de aplicaciones aeroespaciales. Las unidades inerciales se pueden probar en condiciones de laboratorio pero las dimensiones de los dispositivos que generan el movimiento y el hecho de realizarse bajo techo dificultan o hacen imposible la prueba simultánea de un GPS. La alternativa consiste en la generación en el laboratorio de señales de radiofrecuencia idénticas a las emitidas por los satélites del sistema GPS. Estas señales se suministran al receptor a través de su antena.

### **5.9.3. Realización preferida**

Mediante un generador de trayectorias con seis grados de libertad se simulan las medidas GPS, utilizando un modelo matemático del error (ver 5.13 y 5.14). Al mismo tiempo, usando los datos del generador de trayectorias, se generan los

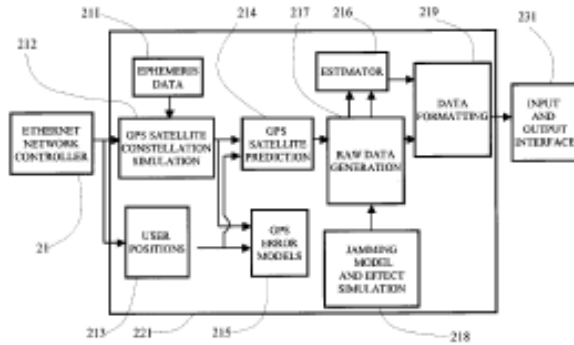


Figura 5.11: Sistema de simulación de datos GPS e inerciales (modelo 1).

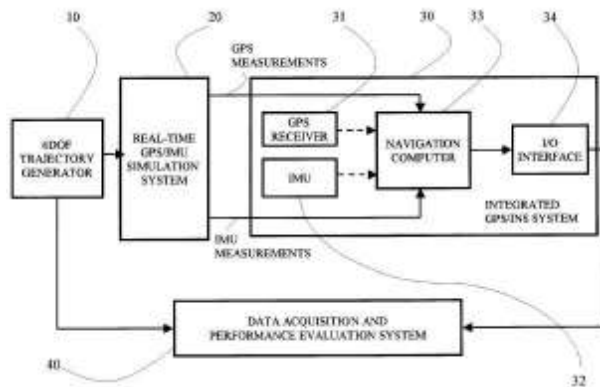


Figura 5.12: Sistema de simulación de datos GPS e inerciales (modelo 2).

datos de giróscopo y acelerómetro, modelando también sus respectivos errores. El modelo de GPS, DGPS e IMU se ejecuta en un servidor. Existen dos modelos de receptor de GPS de diferente complejidad. Cada uno de los modelos se alimenta con los datos del generador de trayectorias, de modo que la salida de los modelos se corresponde con el mismo punto de la trayectoria en el mismo instante de tiempo. También sería posible utilizar dos computadores simultáneamente sincronizando de forma adecuada los procesos de los modelos. En el documento de la patente se detallan los modelos matemáticos utilizados y se muestran diagramas de flujo de los algoritmos utilizados. Se remite al lector a la consulta del documento completo para satisfacer cualquier curiosidad al respecto.



## **5.10. TRAVEL CONTROLLING APPARATUS OF UNMANNED VEHICLE**

Masaki Mori, Kawasaki (JP)

Komatsu Ltd., Tokyo (JP)

US 6,751,535 B2

Jun. 15,2004

### **5.10.1. Resumen**

La presente invención describe un dispositivo de control de un vehículo autónomo compuesto de un dispositivo GPS, un giróscopo, un velocímetro y un sistema de medida de distancia mediante láser. Las medidas de los sensores se llevan a un microprocesador desde el que se controlan los distintos elementos del vehículo.

### **5.10.2. Descripción del problema**

El vehículo autónomo al que se refiere la invención está destinado al tránsito por un trayecto establecido en una mina, cantera o similar.

Existen otras invenciones en las que se integran las medidas GPS y las proporcionadas por sistemas de navegación autónoma (que utilizan información sobre la velocidad o distancia y rumbo para calcular una posición relativa a una inicial). En esta invención se distingue entre navegación a estima (utilizando la velocidad y el tiempo transcurrido más el rumbo o bien la distancia y el rumbo) y navegación inercial (usando giróscopos y acelerómetros), englobando ambos métodos en la categoría de navegación autónoma.

Los inconvenientes de las alternativas mencionadas son los siguientes:

- Si se utiliza el GPS, para estimar la dirección es necesario disponer de dos medidas, de modo que existe un retardo dependiente de la frecuencia con que el GPS proporciona las medidas. Además la recepción de las señales está limitada por las condiciones ambientales.
- Los errores de los sistemas de navegación a estima e inercial son acumulativos e inadmisibles en largos períodos de tiempo.

### **5.10.3. Realización preferida**

Con el fin de solucionar los problemas mencionados, esta invención está compuesta de los siguientes elementos (ver figura 5.13):

- Un receptor GPS con el que se obtienen las coordenadas absolutas del vehículo en un instante dado.

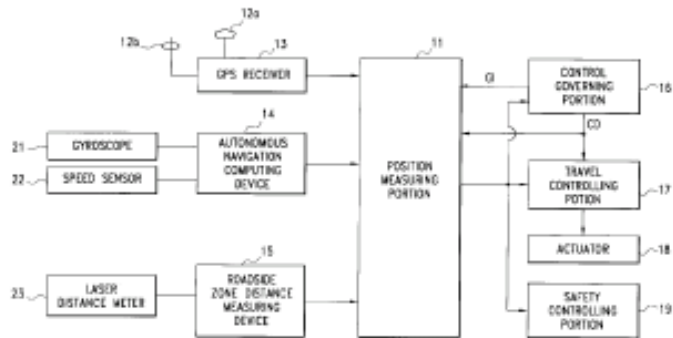


Figura 5.13: Sistema de control de un vehículo con GPS, giróscopo, odómetro y láser.

- Un sistema de navegación autónoma que mide la dirección y la distancia recorrida desde una posición inicial con el fin de calcular la posición actual.
- Un dispositivo capaz de integrar las medidas anteriores.
- Un dispositivo capaz de comparar la posición y orientación actual con un trayecto preestablecido actuando sobre el vehículo para que la desviación de este sea lo menor posible.
- Un sistema capaz de medir la distancia del vehículo al límite de la calzada por la que circula (ver figura 5.14).

El hecho de que se pueda medir la distancia al borde de la calzada permite al vehículo seguir el itinerario planificado aún cuando no sea posible utilizar el GPS ni el sistema de navegación autónoma. Además el sistema es robusto frente a cambios en la topografía de la explotación producidos por los trabajos habituales o por derrumbes.

## 5.11. PORTABLE NAVIGATION DEVICE WITH INTEGRATED GPS AND DEAD RECKONING CAPABILITIES

Thomas H. Walters, Gardner, KS  
 (US); Cliff A. Pemble, Olathe, KS  
 (US); Min H. Kao, Leawood, KS (US)  
 Garmin Ltd. (KY)  
 US 6,850,844 B1  
 Feb. 1,2005

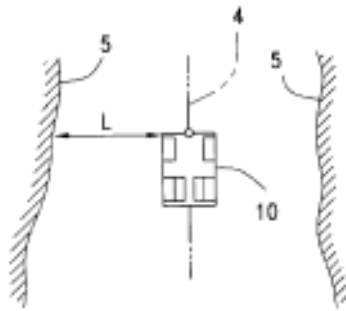


Figura 5.14: Dispositivo para medir la distancia a los límites de la calzada.

### 5.11.1. Resumen

Esta invención consiste en un sistema portátil de navegación que consta de varios elementos, entre ellos un microprocesador y una memoria. En la memoria se almacenan los datos de la cartografía. El dispositivo también incluye un receptor GPS que se comunica con la memoria y el procesador. Adicionalmente se dispone de un sistema de telefonía móvil. Finalmente el dispositivo incluye un sistema de navegación a estima que consta de un giróscopo, brújula digital, podómetro y/o acelerómetro adaptados para la comunicación con memoria y microprocesador.

### 5.11.2. Descripción del problema

El uso del GPS en dispositivos de navegación está muy extendido, pero actualmente existen otros medios de realizar procesos análogos a la triangularización empleada por ese sistema. Por ejemplo antenas de telefonía. Actualmente existen distintos receptores GPS susceptibles de conectarse a ordenadores de mano conocidos genéricamente como PDA. Sin embargo no está solucionado el conocido problema de la circulación por calles estrechas con edificios altos o bajo techo, en donde la recepción de las señales GPS es deficiente. Por lo tanto existe la necesidad de complementar la funcionalidad de los navegadores GPS en las situaciones mencionadas. Es más, sería deseable que esta funcionalidad se integrase en una PDA junto con otros servicios como telefonía móvil, sin que se deteriorase la portabilidad del conjunto.

### 5.11.3. Realización preferida

La parte del documento de la patente en la que se detallan varias realizaciones preferidas de esta invención es, como en otros casos, un documento cuyo interés es meramente legal. En el mismo se detallan todas las posibles combinaciones de

GPS y al menos otros de los dispositivos mencionados mas accesos inalámbricos, servidores, teléfonos móviles, distintos sistemas de almacenamiento masivo, etc. Además se especifican una serie de aplicaciones no relacionadas directamente con la navegación y que podrían correr simultáneamente en el dispositivo. Todo esto puntualizando en todo momento que la patente no se limita a lo descrito sino que también cubre otros desarrollos similares que pueda idear un experto en el tema. Sin embargo no se detallan los cálculos que integran las medidas realizadas por los distintos sensores.

## **5.12. LOW COST MULTISENSOR HIGH PRECISION POSITIONING AND DATA INTEGRATED METHOD AND SYSTEM THEREOF**

Guohui Hu, Simi Valley, CA (US);  
Ching-Fang Lin, Simi Valley, CA (US)  
American GNC Corporation, Simi Valley, CA (US)  
US 6,879,875 B1  
Apr. 12,2005

### **5.12.1. Resumen**

En esta invención se detalla un método para integrar medidas procedentes de una IMU y de un GPS mediante un receptor GPS dual en el que se realizan medidas sobre la fase de la portadora con el fin de inicializar y estabilizar el azimut del sistema IMU/GPS integrado. Estas medidas se realizan con el fin de aumentar la rapidez de la resolución de ambigüedades.

### **5.12.2. Descripción del problema**

Debido a los altos costes de los sistemas de navegación inercial (conocidos por sus siglas INS en inglés) y a la acumulación de errores de que adolecen, su aplicabilidad es limitada. Por el contrario el sistema GPS puede proporcionar una estimación de la posición, la velocidad y otras magnitudes sin errores acumulativos. Se ha demostrado que la integración de GPS/INS en un mismo dispositivo proporciona mejores resultados que cualquiera de estos sistemas por separado.

Los avances en la tecnología de sensores inerciales de estado sólido han reducido los precios de estos sistemas. Actualmente las placas OEM de receptores GPS de una sola frecuencia también son muy económicas. Los sistemas de navegación inercial permiten, en principio, un funcionamiento autónomo, proporcionando de forma continua la posición, la velocidad y la orientación después de inicializar la

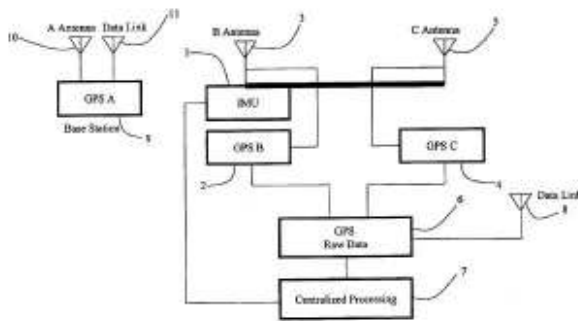


Figura 5.15: Integración de datos IMU y de varios receptores GPS.

posición y del proceso de alineamiento. Otra ventaja es su disponibilidad, independientemente de la orografía, climatología, etc. Sin embargo son caros y están sujetos a deriva en períodos largos de tiempo. Esto ocasiona que el error aumente con el tiempo. Estos errores se deben a la deriva de los giróscopos, el bias de los acelerómetros y a factores de escala.

### 5.12.3. Realización preferida

En la invención descrita en esta patente se integra una unidad GPS/IMU con un receptor dual GPS, de modo que el sistema resultante proporciona alta precisión, fiabilidad, pequeño tamaño, consumo limitado, facilidad de uso y mantenimiento así como un bajo coste. En la figura 5.15 se muestra un esquema de una realización preferida en la que aparecen los elementos más destacables de los que se compone la invención. En la mencionada figura se aprecia el receptor dual GPS (GPS A) dos receptores GPS adicionales (GPS B y GPS C), una unidad inercial de estado sólido (IMU), una unidad de almacenamiento de datos GPS, una unidad de proceso y varios enlaces de datos a una estación GPS base. Las ventajas de esta invención son las siguientes:

- Los sistemas de navegación inerciales poseen una alta precisión a corto plazo pero están sujetos a deriva con el paso del tiempo. Los sistemas GPS diferenciales poseen una alta precisión, del orden de centímetros. La integración de ambos sistemas presenta una alta precisión a corto y a largo plazo.
- Los giróscopos de los sistemas inerciales de bajo coste no pueden detectar la rotación de La Tierra para realizar el alineamiento inicial. No proporcionan el azimut por sí mismos. Las medidas realizadas sobre la diferencia de fase de la portadora de las señales GPS utilizando dos receptores permiten

realizar el alineamiento inicial. Posteriormente el sistema inercial permite deshacer las ambigüedades en la medida de estas diferencias de fase.

- Las señales del sistema GPS no están disponibles con cierta frecuencia, lo cual produce ciclos perdidos que impiden utilizar la diferencia de fases como se ha comentado. La precisión a corto plazo de los sistemas inerciales permite detectar estas ausencias de ciclo.

La integración de los diversos sensores se realiza mediante un filtro de Kalman. En la mencionada patente se hace una exposición completa de todo el aparato matemático implicado en el proceso.

## **5.13. VEHICLE POSITIONING APPARATUS AND METHOD**

Robert Lindsay Mailer  
Beeline Technologies Pty LTD (AU)  
US 6,876,920 B1  
Apr. 5,2005

### **5.13.1. Resumen**

En esta invención se muestra un sistema de guiado para un vehículo agrícola sobre un terreno cultivado. Se usa un GPS para determinar si el vehículo está pasando sobre una parte ya trabajada. El guiado puede ser mediante indicaciones o directamente mediante la dirección asistida.

### **5.13.2. Descripción del problema**

El cultivo de terrenos extensos con vehículos agrícolas se realiza mediante sucesivas pasadas paralelas de los mismos, de modo que se cubra toda el área a cultivar. Se deben minimizar tanto los solapamientos como las áreas no trabajadas, con el fin de economizar combustible, fertilizantes, fitosanitarios, etc. Para un operario puede ser una tarea difícil que requiere habilidad y entrenamiento. Además los errores cometidos en una pasada pueden propagarse a las siguientes, dificultando la tarea. Existen trabajos previos en los que se utilizan acelerómetros y giróscopos, así como sistemas de planificación previa.

### **5.13.3. Realización preferida**

El sistema de guiado al que se refiere esta invención se instala en un tractor u otro vehículo agrícola cuyo guiado se desee automatizar en el sentido expuesto previamente. Las pasadas no tienen que ser paralelas, también pueden seguir el contorno de polígonos concéntricos. El sistema dispone de un microprocesador

y de un sistema de entrada que permite al conductor especificar las características del trazado a seguir, pasadas paralelas, concéntricas y la distancia entre pasadas (típicamente igual al ancho del accesorio utilizado para trabajar el terreno). El microprocesador está programado de modo que determine si el vehículo se mueve en la dirección adecuada y se proponen realizaciones en las que o bien se indica al conductor la acción a realizar si se desvía o bien el sistema actúa sobre la dirección del vehículo automáticamente. En otras realizaciones expuestas en la patente se incluyen además del GPS acelerómetros para incrementar la posición del sistema y sensores de efecto Hall en la dirección del vehículo para detectar si el conductor sigue las indicaciones del sistema. La presente patente es bastante extensa y contiene una prolija descripción de los dibujos en los que se muestran diversos aspectos de la invención, tanto mecánicos como software, estos últimos en la forma de diagramas de flujo. Se dan detalles del equipo utilizado pero no se profundiza en los cálculos necesarios para realizar el proceso mencionado.

## **5.14. ENHANCED DEAD RECKONING METHOD**

Assimakis Tzamaloukas, San Jose, CA (US)  
CircumNav Networks, Inc., Palo Alto, CA (US)  
US 7,076,365 B2  
Jul. 11,2006

### **5.14.1. Resumen**

Esta invención describe un sistema mejorado para la navegación a estima de un vehículo cuando este no puede recibir las señales del sistema GPS. La posición del vehículo se calcula en base a la diferencia en tiempo e intensidad con que se reciben ciertas señales de radio. Además el vehículo puede comunicarse con otros vehículos o puntos de tránsito.

### **5.14.2. Descripción del problema**

Los sistemas de navegación por satélite, no funcionan adecuadamente en las siguientes circunstancias:

- Circulación por áreas urbanas con calles estrechas y edificios altos.
- Circulación por áreas boscosas.
- Circulación por áreas montañosas.
- Circulación por áreas con altos niveles de interferencias.

Adicionalmente los mapas que se usan en conjunción con el sistema suelen actualizarse cada 6 meses, de modo que cualquier cambio que ocurra en ese período no aparecerá en la cartografía. La actualización se realiza en ocasiones mediante viajes por las vías a cartografiar, inspecciones aéreas o información gubernamental. Han existido intentos de automatizar el proceso de actualización de la cartografía mediante una flota de vehículos que viajan por la región a actualizar y que recogen información de las vías por las que circulan, descargándola por algún medio inalámbrico a una central. La integración de esta información es complicada debido a las distintas condiciones meteorológicas, de tráfico, accidentes, etc. que pueden ocurrir en una misma vía en diferentes pasadas por parte del mismo o de distintos vehículos. Sin embargo estos sistemas también son sensibles a las condiciones mencionadas más arriba, siendo imposible en algunos casos la comunicación con la central. Una posible mejora sería posibilitar la comunicación entre los vehículos que circulan por una red de transporte y de estos con una central y dotarlos de una estimación de la posición cuando las señales GPS no estén disponibles.

### **5.14.3. Realización preferida**

La sección de la patente en donde se refleja no una sino varias realizaciones preferidas es un documento extenso y farragoso, con profusión de dibujos en los que se detallan todas las posibles configuraciones que los inventores han podido idear. El contenido del documento es sobre todo de índole legal y no aporta gran cosa al estado del arte de esta tesis. Se refiere al lector al documento original para más información.

## **5.15. NAVIGATION SYSTEM AND METHOD USING DIRECTIONAL SENSOR**

Benjamin A. Cray, West Kingston, R  
(US); Harold T. Vincent, 11, North  
Kingstown, RI (US)

The United States of America represented by the Secretary of the Navy, Washing-  
ton, DC (US)

US 7,106,658 B1

Sep. 12,2006



### 5.15.1. Resumen

Esta invención consiste en un dispositivo para determinar la posición que incluye un emisor que transmite información sobre su posición y el instante de tiempo correspondiente a esa posición. El receptor dispone de una antena direccional. La antena se posiciona de modo que se determina la posición del emisor. Se decodifica la señal y se obtiene la posición de la fuente y el instante de emisión. Conocido el instante en que se produce la recepción, la posición de la fuente, el instante de emisión y la dirección en que se encuentra el emisor, se calcula la posición del receptor.

### 5.15.2. Descripción del problema

Se trata de facilitar la navegación de vehículos submarinos usando un solo sensor en el vehículo y un único emisor en el entorno en el que se mueva. En este contexto se hace imposible el uso del sistema GPS, ya que las frecuencias de radio utilizadas por los satélites son bloqueadas por el agua. Los sensores que más frecuentemente se usan en vehículos submarinos miden variaciones en la presión del agua. Entre estos sensores se tienen:

- Hidrófonos: son sensores no direccionales. Para obtener información direccional se utilizan arrays de sensores, siendo una dimensión importante el tamaño relativo del array en relación a la longitud de onda utilizada. Por ese motivo en vehículos de pequeño tamaño es necesario utilizar frecuencias altas que se atenúan rápidamente en el agua.
- Sensores acústicos vectoriales. Miden la presión acústica de forma no direccional y las componentes vectoriales de una señal acústica. Se suelen montar tres ortogonalmente y pueden motorizarse para proporcionar mayor o menor sensibilidad en una dirección.
- Sensor omnidireccional y múltiples emisores. Es el análogo al GPS en el dominio de las señales acústicas. Las frecuencias utilizadas son elevadas de modo que también se atenúan rápidamente.

### 5.15.3. Realización preferida

En la figura 5.16 se muestra una realización del dispositivo. En dicha figura se pueden ver los siguientes elementos:

- Receptor GPS. Situado en una boya, permite conocer la posición de un punto de referencia. En la misma boya se encuentra un procesador de señal que codifica las coordenadas proporcionadas y el instante de recepción sobre

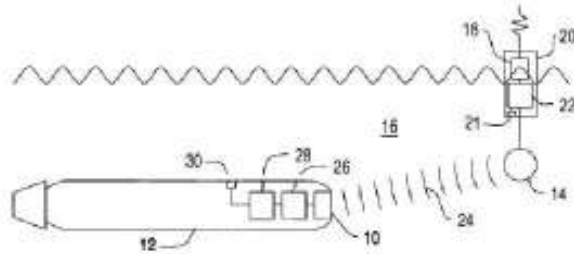


Figura 5.16: Sistema para usar un GPS como baliza para navegación submarina.

la portadora acústica utilizada. Pueden existir sensores adicionales que midan temperatura, salinidad, etc., con el fin de reallizar correcciones en la velocidad de la portadora.

- Emisor. En la misma boya se encuentra el emisor de dicha portadora.
- Sensor direccional. En el vehículo submarino se dispone de un sensor direccional capaz de recibir la señal mencionada y medir la dirección en la que se recibe.
- Sensor de salinidad, temperatura, etc. El fin de estos sensores es el mismo que el explicado previamente.
- Procesador de sensores. Trata las señales recibidas por los sensores anteriores.
- Procesador de señal. Integra las distintas señales con el fin último de determinar la posición del vehículo. Es necesario que disponga de un reloj sincronizado con el de la boya.

## 5.16. MULTI-SOURCE POSITIONING SYSTEM FOR WORK MACHINES

Timothy J. Knowlton, Benson, AZ (US)  
 Kenneth W. Gay, Tucson, AZ (US)  
 Modular Mining Systems, Inc., Tucson, AZ (US)  
 US 7,139,651 B2  
 Nov. 21,2006

### **5.16.1. Resumen**

En esta invención se combina una unidad GPS tridimensional y otra bidimensional que periódicamente proporcionan las coordenadas de las posiciones de una máquina en una mina y que, combinados con un filtro de Kalman, produce un punto de referencia en la propia máquina. La estimación se mejora utilizando un acelerómetro y otro filtro de Kalman. Adicionalmente, el GPS bidimensional proporciona una estimación de la orientación que se combina con la obtenida mediante un giróscopo utilizando un filtro de Kalman adicional. Un inclinómetro proporciona información sobre la orientación de la herramienta con respecto al suelo. A partir de estos datos se calcula la posición de distintos elementos de la máquina y se registra su posición a través de la mina. Cuando la señal GPS no está disponible, la estimación se realiza mediante los datos proporcionados por acelerómetros y giróscopo.

### **5.16.2. Descripción del problema.**

Esta invención trata de mejorar el uso de máquinas en minas en aspectos relacionados con la automatización, la seguridad y la logística. En una mina en explotación existen una diversidad de máquinas de gran tonelaje que realizan distintas tareas, excavadoras, cintas transportadoras, perforadoras, camiones, etc. Estas máquinas se mueven constantemente y necesitan un operario que las maneje. El tránsito de estas máquinas tiene que planificarse cuidadosamente y ciertas actividades sólo pueden realizarse en momentos precisos del día debido al peligro que entrañan para el resto del personal de la mina. Además la operación de estas máquinas altera la topografía de la mina, que debe ser actualizada constantemente. Por estos motivos, cualquier invención que automatice alguno de estos aspectos implica una mejora en la productividad de la mina y en la seguridad de los operarios.

### **5.16.3. Realización preferida**

En la figura 5.17 se muestra la disposición de los receptores GPS, acelerómetros y giróscopos en una excavadora, a modo de ejemplo, ya que la invención es aplicable a distintos tipos de maquinaria. En dicha figura se muestra la localización de un receptor GPS 3D, dos receptores GPS 2D, inclinómetro, giróscopo y acelerómetros. El receptor GPS 3D es del tipo Real-Time Kinematic (RTK) a 20Hz. Los receptores 2D se usan para determinar la orientación del eje longitudinal y para aumentar la precisión de la medida de la posición fusionando las medidas de los tres GPS. Además los receptores 2D necesitan menos satélites que los 3D para proporcionar una medida (3 satélites frente a 5), de modo que cuando las condiciones sean tales que el GPS 3D no pueda proporcionar una medida, los GPS 2D pueden proporcionarla. La invención incluye además un inclinómetro

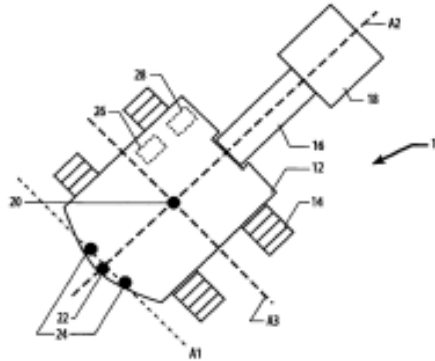


Figura 5.17: Uso de múltiples GPS, inclinómetros, giróscopos y acelerómetros para control de maquinaria pesada.

que permite medir el ángulo de inclinación de la máquina con respecto a los ejes vertical y transversal. La invención dispone también de acelerómetros que se usan para estimar la posición en caso de no poder realizarse mediante los GPS. La información procedente de las fuentes mencionadas alimenta un banco de filtros de Kalman adaptativo, de modo que en función de los datos disponibles se selecciona el banco adecuado que modele el sistema correspondiente. Con la estimación de la posición de un punto de referencia y de los ángulos de inclinación se puede calcular la posición de cualquier elemento de la parte móvil de la máquina.

## Capítulo 6

# Resultados teóricos

### 6.1. Una representación borrosa de los datos GPS

En el contexto de las probabilidades imprecisas, un conjunto borroso puede verse como un conjunto de tolerancias. A cada tolerancia se le asigna un grado de confianza, cuanto más pequeña sea la tolerancia, menor será el grado de confianza [20]. En particular, dado un conjunto incompleto de intervalos de confianza de una variable aleatoria, es posible generar una variable aleatoria borrosa para la que sus  $\alpha$ -cortes sean los intervalos de confianza para los niveles  $(1 - \alpha)$  [10]. En la solución propuesta se usa esta representación y se realiza un cálculo a varios niveles de confianza de la cota superior mínima (CSM).

En el caso de las medidas obtenidas con un GPS, se tienen dos intervalos de confianza al 50 % y al 95 %. Usando el procedimiento explicado en esta sección, se puede obtener un valor para el CEP a cada nivel de probabilidad [30]. Puede verse fácilmente que cuanto más alta sea la probabilidad, mayor será el radio del CEP. El significado físico de este hecho es claro en el caso de las medidas realizadas con GPS: cuanto mayor sea el grado de confianza necesario para determinar la posición del receptor GPS, mayor será el valor del CEP.

#### 6.1.1. Cálculo de la CSM usando datos borrosos

Las medidas GPS se realizan a intervalos regulares. Cada medida es un conjunto borroso, como se ha dicho anteriormente, cuyos  $\alpha$ -cortes son círculos centrados en las coordenadas GPS medidas. Por lo tanto cada círculo es un intervalo de confianza para las coordenadas reales del vehículo (un taxi en este caso) en el instante en el que se han realizado esas medidas. En la figura 6.1 se muestran algunas medidas sintéticas y la trayectoria sintética ideal (línea continua). Como se puede observar, el CEP correspondiente a cada punto muestreado puede contener o no al punto correspondiente de la trayectoria ideal. La trayectoria obtenida

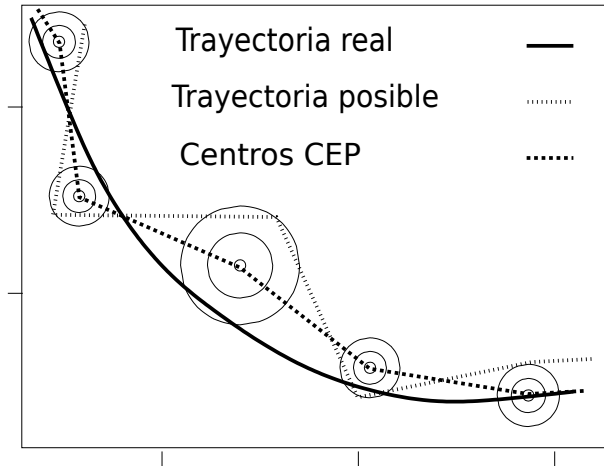


Figura 6.1: Ejemplo sintético de trayectorias real y reconstruida a partir de las coordenadas GPS.

uniendo las coordenadas GPS medidas se representa mediante línea a trazos y se ha dibujado a puntos una trayectoria compatible con las medidas GPS. Nótese que la longitud de esas tres trayectorias puede ser diferente pero que todas son compatibles con las medidas realizadas con un GPS. Por lo tanto, con el fin de conocer la precisión de la medición, necesitamos calcular la cota superior más baja de las longitudes de todas las trayectorias cuyos vértices se encuentren dentro de los CEP a cada nivel. Esta cota es la longitud de la trayectoria más larga compatible con las medidas GPS realizadas. Obsérvese que la CSM es infinita a no ser que se introduzcan restricciones adicionales en los cálculos. La principal restricción que se ha aplicado en este trabajo es que los cambios en la dirección del vehículo entre dos muestras son pequeños. Por lo tanto, podemos aproximar la trayectoria entre dos muestras consecutivas mediante una línea recta.

Se define una superficie poligonal que cubre los datos borrosos, buscando las tangentes exteriores al CEP para cada  $\alpha$ -corte y a continuación calculando los puntos de corte entre las correspondientes tangentes entre dos puntos consecutivos (ver 6.2). Obsérvese que

1. El segmento de mayor longitud contenido en un cuadrilátero es una de sus diagonales.
2. El trayecto más largo que abarca dos cuadriláteros siempre contiene dos de esas diagonales.
3. El trayecto más largo contenido en tres cuadriláteros adyacentes se compone también de diagonales pero no necesariamente las más largas de cada cuadrilátero.

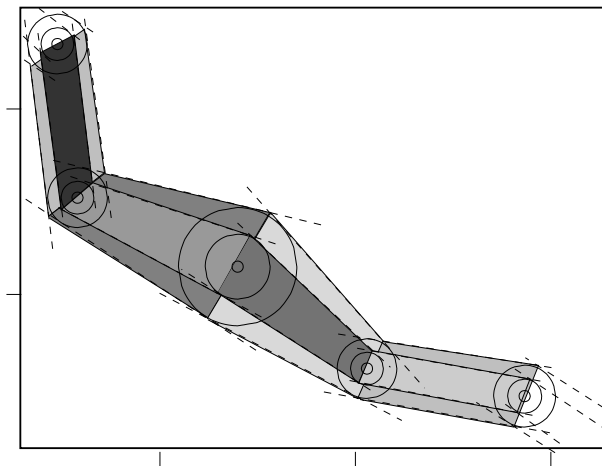


Figura 6.2: Ejemplo sintético de construcción de una poligonal que cubra los datos de entrada GPS entendidos como conjuntos borrosos.

La CSM se define como un subconjunto de la lista de vértices de la superficie poligonal. A continuación se exponen ciertos algoritmos de preprocesado que mejoran la precisión del resultado final.

### 6.1.2. Preprocesamiento de los datos

La precisión de las mediciones puede mejorarse si algunos puntos colineales se unen y si algunas de las coordenadas peor estimadas se descartan. Si el período de muestreo es suficientemente bajo, a pesar de estas operaciones, todavía es válido suponer que el vehículo sigue una trayectoria recta entre dos puntos, pudiendo realizar este preproceso con anterioridad al cálculo de la CSM.

Dado un nivel  $\alpha$ , cada dato de entrada borroso se representa como un círculo centrado en la coordenada medida y cuyo radio es el CEP a la probabilidad  $(1 - \alpha)$ . Como se ha mencionado anteriormente, para cada valor de  $\alpha$ -corte, además se tienen las tangentes exteriores a esos círculos y sus respectivos cortes, definiendo, para cada nivel, una superficie poligonal. El objetivo del preprocesado es hacer esta poligonal más sencilla (entendiendo por sencilla estar definida por un menor número de puntos) pero de modo que aún así contenga la CSM para cada  $\alpha$ . Si se hubiesen utilizado datos nítidos, la simplificación de cadenas de segmentos rectilíneos se podría haber realizado utilizando las técnicas expuestas en [16, 22]. Utilizando datos borrosos la técnica más próxima es la expuesta en [5], donde los datos borrosos de una base de datos geográfica se usan para realizar reconstrucciones tridimensionales utilizando B-splines borrosos [7].

El proceso de cálculo de la CSM consta de tres pasos:

1. Filtrado por colinealidad.
2. Filtrado mediante algoritmo genético multiobjetivo.
3. Cálculo determinista de la CSM a partir del conjunto de datos reducido.

Estos procesos se aplican a cada  $\alpha$ -corte.

En las siguientes secciones se explican estos procesos y en la Sección 6.1.3 el cálculo determinista de la CSM.

### **Filtrado por colinealidad**

Como se ha dicho anteriormente, para cada  $\alpha$ -corte se obtiene una superficie poligonal. Si para tres datos consecutivos los dos pares de tangentes exteriores son paralelos, entonces el cuadrilátero definido por los dos primeros datos está contenido en el cuadrilátero definido por los datos primero y último, de modo que se puede prescindir del dato intermedio. El período de muestreo determina cuantos puntos se pueden eliminar de este modo sin violar la suposición inicial: la trayectoria del vehículo entre dos puntos consecutivos es recta.

### **Filtrado de datos espúreos**

Los datos espúreos son aquellos en los que el error es anormalmente alto. Se pueden eliminar esos puntos en donde la estimación de las coordenadas no fue suficientemente precisa siempre y cuando no se elimine una cantidad significativa de puntos, es decir, para cada nivel  $\alpha$  una fracción  $1 - \alpha$  de los vértices de la poligonal reducida deben de estar en el trayecto sin filtrar. En la figura 6.3 se ilustra el proceso para un determinado  $\alpha$ .

El filtrado reduce el área de la superficie poligonal, de modo que la CSM será menor también, lo cual es indeseable. No se desea filtrar puntos representativos. Maximizar el tanto por ciento de puntos cubiertos al mismo tiempo que se filtran los datos son objetivos contrapuestos. Por este motivo se emplea un algoritmo genético multiobjetivo para realizar el filtrado, como se explica en la Sección 6.2

### **Comportamiento dinámico del vehículo**

El proceso de filtrado puede mejorarse si se supone que el vehículo tiene inercia y que algunas trayectorias contenidas en la superficie poligonal no son físicamente realizables o plausibles. Por ejemplo, un vehículo que circule a cierta velocidad no puede realizar un giro mayor de determinado ángulo sin correr el riesgo de volcar, derrapar, etc. Además existe un límite para el giro máximo a una velocidad dada si se considera que el vehículo está dedicado al transporte de viajeros, como es el caso.



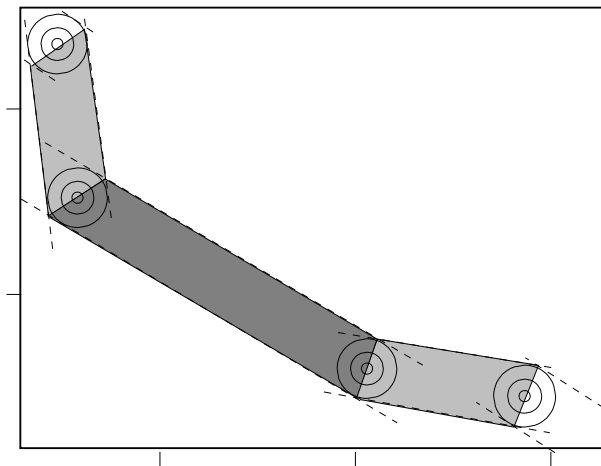


Figura 6.3: Ejemplo sintético de filtrado de un punto espúreo. Los puntos no filtrados deben representar de forma fidedigna la trayectoria.

Por lo tanto, se puede introducir una segunda hipótesis en el análisis del problema que se aborda en este trabajo: el trayecto realizado en un taxi debe de ser confortable. El ángulo máximo de giro es función de la velocidad del vehículo: cuanto mayor es la velocidad menor es el ángulo de giro. Para estimar el ángulo de giro en cada punto de la trayectoria se utiliza el punto borroso anterior y siguiente. Para cada  $\alpha$ -corte se determina cual es la trayectoria más larga que pasa por los vértices de la superficie poligonal. Se toma el ángulo entre los segmentos que la definen como el ángulo con el que ha girado el vehículo. Si este ángulo es mayor que el máximo para la velocidad a la que circulaba el vehículo en ese punto, este es eliminado del conjunto que se utilizará para calcular la CSM.

### 6.1.3. Estimación determinista del trayecto más largo

Una vez que los datos han sido preprocesados, se evalúa su CSM con el algoritmo determinista que se explica en esta sección.

Para cada  $\alpha$ -corte se tiene una superficie poligonal construida por cuadriláteros como la de la Figura 6.4. La dirección del movimiento se indica mediante una flecha a trazos. Cada vértice de cuadrilátero se denota con un par de enteros, los que están a la izquierda de la flecha se identifican con un cero en primer lugar, los que están a la derecha con un uno. El otro entero es un índice que identifica el paso dentro de la secuencia de movimientos. El trayecto más largo en cada paso  $i$  pasa por  $(0, i)$  o  $(1, i)$ . El conjunto de vértices que definen el trayecto más largo puede ser calculado por exploración exhaustiva de todas las posibles combinaciones, pero es costoso computacionalmente e impracticable para cualquier trayectoria real

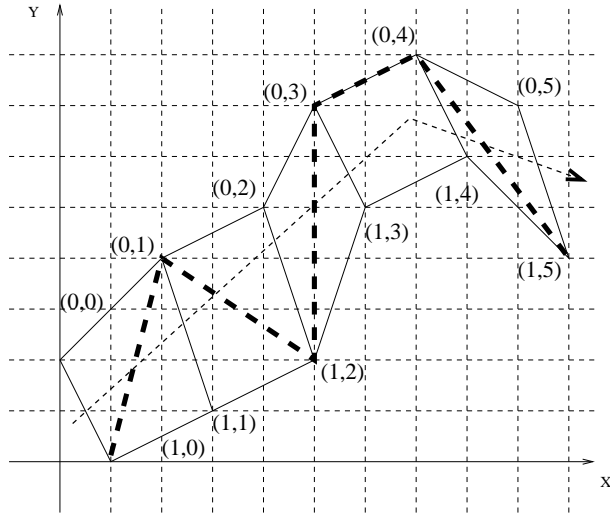


Figura 6.4: Ejemplo de estimación de la cota superior de la longitud usando el algoritmo comentado en la sección 6.1.3.

con 100 o más puntos, por ejemplo. Este problema ha sido estudiado en Geometría Computacional y está relacionado con el denominado problema del camino más largo con pares prohibidos [6], que es NPO PB-completo.

Por este motivo y debido a las limitaciones existentes si se consideran la dinámica real de un vehículo, la geometría de una calzada convencional y el comportamiento de los receptores GPS, en lugar de un cálculo exhaustivo se utiliza un heurístico que es lineal con respecto al número de vértices. El heurístico se basa en la selección de los vértices convexos: cuando un vehículo gira, el trayecto más largo se recorre por el exterior de la curva. La convexidad de cada vértice se analiza usando las líneas rectas que unen el vértice anterior y siguiente del mismo lado de la superficie poligonal. Las posibles posiciones relativas del vértice central se pueden ver en la figura 6.5. En dicha figura los vértices convexos están marcados con un círculo y se han dibujado las líneas que pasan por los vértices  $(0, i - 1)$ ,  $(0, i + 1)$  y  $(1, i - 1)$ ,  $(1, i + 1)$ . De izquierda a derecha y de arriba a abajo, si los dos vértices están entre las líneas, los dos son cóncavos. Si sólo uno está fuera entonces debe de ser convexo. Si los dos están fuera o bien los dos son convexos o uno es cóncavo y el otro convexo. En ambos casos, si se escoge el más alejado de la línea más próxima, es convexo.

El heurístico es como sigue: el primer segmento del trayecto más largo va desde el vértice del paso 1 al vértice del paso 0 que proporciona el segmento de mayor longitud. Del paso 1 en adelante, el trayecto pasa por los vértices siguientes:

- Si hay sólo un vértice convexo, pasará por ese vértice.

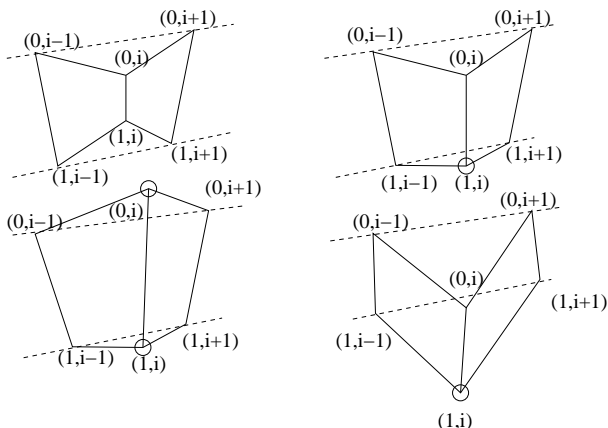


Figura 6.5: Posibles posiciones relativas de los vértices y las líneas entre los vértices anteriores y siguientes. Este esquema es útil para la determinación de la convexidad y concavidad de los vértices.

- Si hay dos vértices convexos, por el más alejado.
- Si no hay vértices convexos, por el más alejado.

El último segmento acaba en el vértice más alejado del anterior.

En la Figura 6.4 el trayecto obtenido mediante este heurístico se marca mediante una línea gruesa a trozos. El primer segmento va de  $(1, 0)$  a  $(0, 1)$  porque  $(0, 1)$  es convexo y la distancia a  $(0, 0)$  es más corta. A continuación el trayecto continúa por  $(1, 2)$  porque es el único convexo. Lo mismo sucede con  $(0, 3)$  y  $(0, 4)$ . Finalmente, el trayecto concluye en  $(1, 5)$  porque está más alejado de  $(0, 4)$  que  $(0, 5)$ .

#### 6.1.4. Estimación randomizada del trayecto más largo

Existe una implementación alternativa del método propuesto en la sección anterior. Supóngase que se superpone una rejilla a la cadena de datos borrosos (ver Figura 6.6) y que se calcula el conjunto de longitudes obtenido seleccionando un punto de la rejilla dentro de cada punto borroso que representa una coordenada obtenida con el GPS. Un algoritmo de backtracking que calcule el conjunto completo de forma exhaustiva es impracticable para trayectorias reales. Sin embargo se puede utilizar el método de Montecarlo muestreando de forma uniforme una cantidad suficientemente elevada de trayectorias, de modo que se tendría una estimación de la distribución de las longitudes. A partir de la estimación de la distribución de las longitudes se podría asimismo estimar su media o un intervalo de confianza para la misma, el cual se podría usar como tolerancia.

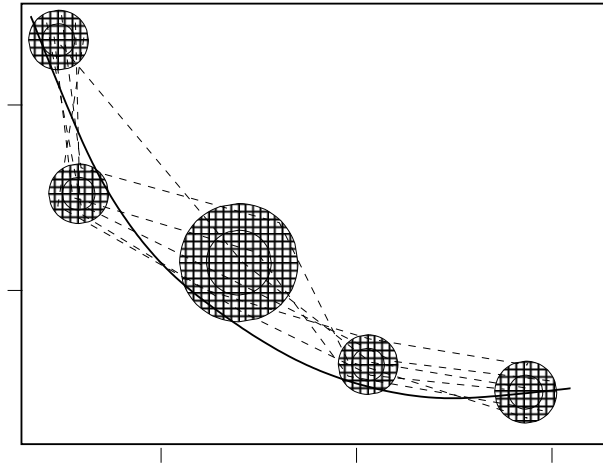


Figura 6.6: Algunas de las posibles trayectorias obtenidas por exploración exhaustiva de combinaciones de puntos discretos.

Con el fin de probar este método se ha diseñado el siguiente procedimiento: para cada coordenada, con probabilidad 0.95 se selecciona de forma aleatoria un punto de la rejilla que está dentro del CEP a dicha probabilidad (por lo tanto, con probabilidad 0.05 estará fuera de dicho CEP). Con el conjunto de puntos de la rejilla de cada punto borroso se calcula la longitud de la trayectoria que los une, almacenándose el valor obtenido. Este proceso se repite un elevado número de veces. La distribución de la muestra de longitudes obtenida se usa para calcular la media muestral (una estimación de la distancia cubierta por el vehículo) y un intervalo de confianza para la misma.

Desgraciadamente, este método posee algunos inconvenientes. En particular, el rango de la muestra de longitudes está limitado por el tamaño de la muestra, y en general no coincide con la longitud máxima de una trayectoria compatible con los datos GPS. De hecho, el máximo de la muestra sería un estimador más fiable de la CSM en este caso. Dado que no existe una ganancia clara de velocidad ni precisión con respecto al método alternativo, no se ha considerado el método de Montecarlo en este trabajo.

### 6.1.5. Trayectorias predeterminadas y mapas

Una mejora trivial de la precisión podría obtenerse si se restringiese el análisis a una ruta conocida y ajustando las coordenadas GPS de modo que cada punto obtenido fuese sustituido por el punto más próximo del centro de la carretera utilizada. Sin embargo este método ha sido rechazado por expertos de agencias de certificación que deben homologar el dispositivo. La razón es que las medidas

```

 $R_t = P_t \cup Q_t$ 
 $F = \text{ordenamiento-rapido-no-dominado}(R_t)$ 
 $P_{t+1} = \phi, i = 1;$ 
while  $|P_{t+1}| + |F_i| > N$ 
    asignación-distancia-crowding( $F_i$ )
     $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ 
     $i = i + 1$ 
end while
Sort( $F_i, \prec_n$ )
 $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - |P_{t+1}|)]$ 
 $Q_{t+1} = \text{generar-nueva-población}(P_{t+1})$ 
 $t = t + 1$ 

```

Figura 6.7: Seudocódigo del algoritmo NGSa-II

deben de ser reproducibles. Existirán puntos con longitud y latitud conocidas en donde la agencia de certificación posicionará los dispositivos y verificará que la tolerancia de los dispositivos está dentro de los márgenes legales. Este tipo de certificación no es compatible con cambios dinámicos en las coordenadas, porque el punto más próximo de la calzada puede estar fuera del CEP, haciendo el cálculo de la CSM inútil.

Sin embargo, nada impide utilizar un mapa como restricción adicional, es decir, podemos suponer que el vehículo se encuentra dentro de la intersección entre la carretera y el intervalo de confianza producido por el GPS. En este caso serían necesarias no sólo las coordenadas de la línea central de la carretera, también sería necesario conocer las coordenadas de ambos márgenes. Esta alternativa no se ha empleado porque no se dispone de los datos mencionados con validez legal para ser aplicados en metrología. Este requisito es importante porque un error en los mapas puede anular todas las medidas tomadas con el GPS. Sin embargo, en el caso de disponerse de la cartografía con validez general (en el futuro), no se alteraría el resto de cálculos expuestos en este trabajo.

## 6.2. Filtrado de los datos mediante algoritmo genético

En esta sección se detallan los operadores y codificación utilizados en el algoritmo genético que se ha usado para filtrar los datos obtenidos con el GPS. Se ha usado un algoritmo genético multiobjetivo durante el proceso de filtrado, específicamente NSGA-II [12, 13]. En la Figura 6.7 se muestra el pseudocódigo de este algoritmo.

### 6.2.1. Codificación de un individuo

Cada individuo es un subconjunto de puntos borrosos, codificado como un vector de booleanos. Es decir: los datos de entrada son una serie temporal de puntos borrosos. Cada uno de los puntos borrosos tiene un booleano asociado. En un individuo concreto, si el booleano es verdadero entonces ese punto se incluye en los cálculos de la CSM, si es falso se excluye.

Para generar un individuo, se utiliza un umbral de probabilidad  $p$ , cada punto borroso se incluye en un individuo con probabilidad  $p$ . El origen y el fin del trayecto recorrido por el taxi siempre se incluye en el individuo.

### 6.2.2. Función de fitness multiobjetivo

Como se ha comentado anteriormente, tanto el área de la superficie poligonal como el tanto por ciento de los puntos borrosos cubiertos por ella son funciones borrosas, evaluadas a distintos niveles de confianza. Se desea minimizar el área de la superficie poligonal y maximizar el número de puntos borrosos cubiertos. Siguiendo la propuesta expuesta en [3], no se obtiene un punto representativo nítido de cada valor borroso sino que se utiliza una función de fitness borrosa que puntúa la calidad del filtrado.

Los algoritmos genéticos pueden resolver problemas de optimización borrosos. Por ejemplo, se puede definir una ordenación total de valores borrosos de la función de fitness [4, 32, 38, 34, 37]. En particular, es necesario ordenar números borrosos, tarea que, según algunos autores es inconsistente con la mayor parte de las definiciones de orden total entre conjuntos borrosos [41, 40]. El uso de una ordenación parcial puede hacerse compatible con una selección basada en torneo en un algoritmo genético convencional. En este contexto, en [24, 40] se usa una representación intervalar, y en [19] se usa otra ordenación parcial, restringida a funciones de pertenencia trapezoidales. Esta última solución no puede ser aplicada al problema aquí tratado, ya que no se dispone de ninguna información sobre las funciones de pertenencia. Existen diferentes propuestas para evaluar la dominancia de Pareto usando funciones de fitness borrosas. En [42] se propone el uso de reglas difusas para determinar la dominancia de un individuo con respecto a otro. Alternativas similares se exponen en [39, 25]. En este trabajo se ha decidido usar una implementación propia del algoritmo NSGA-II para datos borrosos que se describe en [33]. Se ha usado un ranking basado en probabilidades imprecisas en combinación con las definiciones de ordenación no dominada y distancia de crowding explicadas en las referencias citadas.

### 6.2.3. Operadores genéticos

Las definiciones de cruce y mutación deben conducir a la reducción del número de vértices en los individuos de la población.

- **Cruce.** Datos dos progenitores  $A$  y  $B$ , los descendientes son dos nuevas cadenas  $C$  y  $D$  tales que  $A \cap B \subseteq C$  y  $A \cap B \subseteq D$ ; un vértice  $v \in A - B$  tiene una probabilidad  $p^+$  de estar en  $C$ , y un vértice  $w \in B - A$  tiene una probabilidad  $p^-$  de estar en  $C$ , donde  $p^-$  es mucho menor que  $p^+$ . El conjunto  $D$  Se construye de la misma forma.
- **Mutación.** Este operador está definido como la eliminación aleatoria de un punto de la cadena que no sea el inicio o el fin del trayecto. Es importante tener en cuenta que ni el inicio ni el fin del trayecto son alterados por los operadores genéticos porque estos datos deben de estar incluidos en todos los individuos.

## 6.3. Experimentos y resultados

En esta sección se describen los experimentos que se han realizado para respaldar las afirmaciones y conclusiones de esta parte de la tesis. El diseño experimental utilizado tiene tres objetivos:

1. Comprobar la precisión teórica del método propuesto.
2. Obtener la tolerancia real de la máquina de rodillos.
3. Comparar las precisiones del método propuesto y de la máquina de rodillos.

Por lo tanto se han realizado tres tipos de experimentos:

1. **Recorridos simulados:** se han generado datos sintéticos y se les ha añadido ruido aleatorio para simular las propiedades de un receptor GPS típico. Usando los datos con ruido añadido se estima la bondad del ajuste la CSM a la longitud teórica de cada trayecto.
2. **Tolerancia de la máquina de rodillos:** aunque la máquina de rodillos tiene un error teórico nulo, en la práctica la presión de los neumáticos y el nivel de desgaste produce una dispersión de las medidas del mismo orden que las del receptor GPS.
3. **Precisiones comparadas:** se usa un ejemplo real para comparar las medidas realizadas con el método propuesto y el anterior: se ha medido un circuito con un odómetro certificado ISO-9002 y a continuación se ha realizado

la misma medida utilizando un GPS. El vehículo utilizado ha realizado un recorrido equivalente en la máquina de rodillos y los resultados se han comparado y discutido.

Cada una de las categorías se analiza con detalle en las secciones que siguen.

### 6.3.1. Trayectos simulados

Se ha evaluado la metodología propuesta en trayectos realísticos que cubren la mayor parte de las situaciones encontradas cuando se realiza la ITV de un taxi. Estos trayectos sintéticos simulan giros en todos los sentidos posibles, aceleraciones, deceleraciones y cambios en el CEP. Las coordenadas sintéticas se han medido utilizando el sistema Universal Transverse Mercator (UTM) con el fin de facilitar el cálculo de las distancias entre coordenadas GPS [36]. Con este sistema, los puntos de la superficie terrestre se proyectan en unos ejes cartesianos planos, de modo que la distancia entre dos puntos se puede calcular utilizando la norma euclídea habitual. La trayectoria se muestrea una vez por segundo.

Dado que se necesita calcular la longitud real del trayecto sintético simulando el uso de un GPS, se ha añadido ruido a cada punto muestreado de la trayectoria. En cada posición se usa un número aleatorio ente 4 y 8 como radio del CEP al 95 %. La imprecisión en las medidas GPS se simula utilizando el siguiente procedimiento: con una probabilidad del 95 %, se escoge un punto que dista del punto real menos que el CEP y con probabilidad 0.05 % se escoge un punto más alejado. Parte de los datos generados se pueden ver en la Figura 6.8. Las medidas GPS se representan mediante círculos (en realidad elipsoides por cuestiones de escala) con un radio igual al CEP al 95 %. La trayectoria sintética ideal se representa mediante una línea continua. Como se puede comprobar, el 95 % de los círculos interseca la trayectoria pero ninguno está centrado sobre ella.

Se han realizado dos experimentos con dos trayectorias de 120 puntos cada uno con el fin de comprobar si la tolerancia de la CSM es menor que el margen legal o no. Si la longitud real de la trayectoria es conocida, la tolerancia es

$$\epsilon = (\text{CSM} - \text{longitud})/\text{longitud}. \quad (6.1)$$

También se han realizado varios experimentos para comprobar el funcionamiento del filtrado genético. En la tabla 6.1 se pueden observar los parámetros del algoritmo genético. En primer lugar, para las dos trayectorias empleadas, se ha ejecutado 10 veces el algoritmo multiobjetivo, sin restricciones de dinámica. Finalmente se ha realizado una segunda tanda de 10 ejecuciones con el algoritmo genético usando los mismos parámetros pero contemplando la dinámica del vehículo.



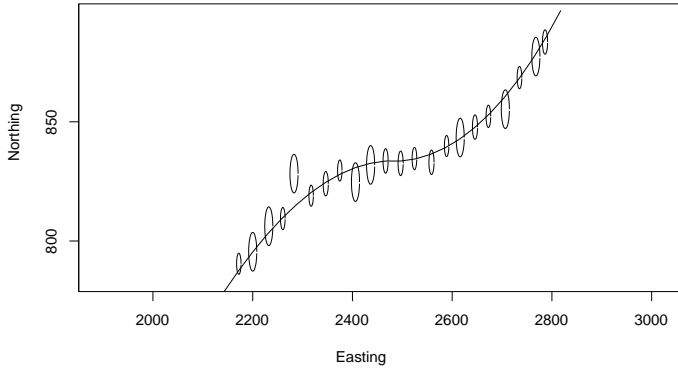


Figura 6.8: Ejemplo de datos GPS sintéticos y la trayectoria teórica obtenida después del filtrado con NSGA-II.

Parámetro	Valor
Número de generaciones	1000
Número de individuos	100
Número de poblaciones	1
Mínimo % de puntos fuzzy cubiertos por cada individuo	0.85
Probabilidad de cruce $p^+$	0.5
Probabilidad de cruce $p^-$	0.1
Probabilidad de cruce	0.7
Probabilidad de mutación	0.1

Cuadro 6.1: Parámetros para el algoritmo NSGA-II

### Caso de estudio I

La longitud verdadera de la primera trayectoria es 3228.6 metros. La distancia medida usando las coordenadas GPS es 3238.5 metros. Los taxímetros que marquen más de  $3228.6 + 10\%$  metros = 3551.4 serán rechazados. Obsérvese que en circunstancias reales no se conoce la longitud real de la trayectoria y en realidad se rechazarán los taxis que tarifiquen más de  $3238.5 + 10\% = 3562.4$ .

La CSM media para esta trayectoria (primera fila de la tabla en la Figura 6.2) es 3499.5. Por lo tanto la esperanza de la tolerancia es 0.084 (0.081 si se usan los valores medidos para calcular la tolerancia). Esto quiere decir que es seguro (legalmente) rechazar los taxímetros que tarifiquen más de 3551.4.

Trayectoria	Longitud Verdadera	Longitud Medida	Estimación CSM Mejor	Estimación CSM Media
1	3228.57	3238.521	3456.61	3499.48
2	2741.30	2696.487	3126.99	3192.51

Cuadro 6.2: Resultados de 10 ejecuciones de NSGA-II sin análisis de dinámica.

Trayectoria	Longitud Verdadera	Longitud Medida	Estimación CSM Mejor	Estimación CSM Media
1	3228.57	3238.521	3242.64	3243.45
2	2741.30	2696.487	2765.63	2798.01

Cuadro 6.3: Resultados de 10 ejecuciones de NSGA-II con análisis de dinámica.

### Caso de estudio II

La longitud de la segunda trayectoria es 2741.3 metros. Esta trayectoria tiene giros más bruscos que la primera y se verá que la CSM es menos ajustada en este caso, usando el procedimiento determinista explicado en la sección 6.1.3. La distancia medida usando las coordenadas GPS es 2696.5 metros. Si se repite el análisis del caso anterior (segunda fila de la Tabla 6.2), la CSM es 3127.0 metros. La esperanza de la tolerancia es 0.141 (0.160 si se usan los datos medidos), por lo tanto no se puede rechazar un taxímetro basándose en un test realizado en esta ruta.

El uso de restricciones dinámicas en el filtrado genético produce una mejora significativa de la tolerancia, la cual es ahora 0.021 (0.038 usando las coordenadas medidas), por lo tanto se puede rechazar legalmente los taxis que tarifiquen más de  $2741.3 + 10\% = 3015.4$  (2966.2) usando los mismos datos de entrada.

A la luz de estos resultados, se recomienda a las empresas concesionarias de la ITV escoger circuitos con giros suaves, ya que se conseguirá un ratio menor de verificaciones inválidas.

### 6.3.2. Tolerancia de la máquina de rodillos

Las medidas GPS son inherentemente imprecisas, de hecho la imprecisión es la que se ha obtenido en la simulación anterior. Aunque en ocasiones no se ha podido demostrar que la precisión de las medidas es menor que el 10 %, la precisión real fue del 0.3 % en el primero de los casos de estudio y 1.6 % en el segundo. Sin embargo, una máquina de rodillos debería tener un error nulo, porque el número de vueltas de los cilindros puede ser contado de forma precisa. Por este motivo, desde el punto de vista de un experto en metrología, este procedimiento tiene más

Presión o estado	Min	Med	Max	Gastado
Media	1006.525	1027.437	1009.578	1030.420
Desviación estándar	14.29073	3.661429	6.815601	5.170147

Cuadro 6.4: Medidas del odómetro del vehículo para un ensayo sobre la máquina de rodillos de 1000 metros a distintas presiones y estado de los neumáticos.

sentido y sería el preferible si se pudiese aplicar.

Sin embargo, en la práctica, la presión de inflado de los neumáticos y su desgaste influye en las medidas. El efecto de la presión de las ruedas en las medidas realizadas con rodillos no es fácil de modelar porque el número de vueltas de los rodillos por metro lineal depende del radio efectivo de la rueda y del deslizamiento. El grado de desgaste tiene una influencia directa sobre la distancia medida: a mayor desgaste mayor distancia medida.

Para estudiar estas dependencias, se ha diseñado un pequeño conjunto de experimentos. En primer lugar se han medido los errores introducidos por las diferentes presiones en las ruedas. Se han usado cinco modelos distintos de taxis y las presiones fueron:

- la máxima según las especificaciones del fabricante.
- la presión recomendada.
- 0.5 bar por debajo de la recomendada.

En segundo lugar, para analizar la dispersión de los resultados para distintos niveles de desgaste, se realizó una última ronda de experimentos con una serie de neumáticos desgastados hasta el límite legal e inflados con una presión estándar. Todos los experimentos tuvieron que realizarse a una velocidad muy baja para evitar que se activasen los sistemas de seguridad activa, como el control de tracción.

Cada ronda de experimentos consistió en tres mediciones. Cada medición comenzaba con el odómetro del vehículo a cero y terminaba cuando la máquina de rodillos alcanzaba los 1000 metros. En la tabla 6.4 se muestran la media y la desviación típica de la medición del odómetro del vehículo a cada presión o estado de los neumáticos. El comportamiento del sistema es complejo: cuando la presión de los neumáticos es alta, el diámetro efectivo aumenta y las medidas del odómetro decrecen. Si la presión es demasiado baja, la deformación de los neumáticos sobre los rodillos aumenta el perímetro de aquellos y las medidas también disminuyen. El efecto del desgaste es más simple; siempre reduce el perímetro del neumático. En la figura 6.9 se muestra la distribución de los datos gráficamente, usando boxplots.

Obsérvese que la dispersión de las medidas en la Tabla 6.4 es mayor de lo esperado. Existen diferencias de 30 metros, es decir un 3 %, que está por encima

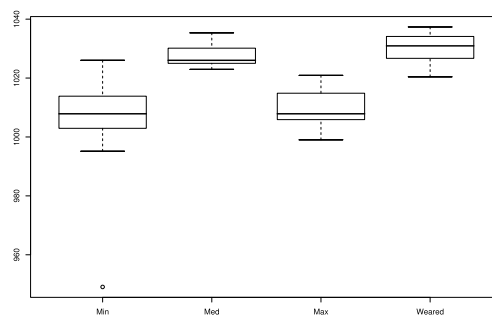


Figura 6.9: Boxlots de la distancia medida con el odómetro del vehículo cuando la máquina de rodillos indica 1000 metros.

de la precisión teórica del GPS en el recorrido simulado. No se ha probado el efecto combinado del desgaste más las diferentes presiones de inflado, pero la dispersión podría ser incluso mayor. En la siguiente sección, se comparan los dos métodos (rodillos y GPS) en un trayecto real, y se confirma que la tolerancia del GPS no es peor, a efectos prácticos, que la de los rodillos.

### 6.3.3. Datos reales

Para poder recoger los datos durante el recorrido en el que se hace la verificación, se ha desarrollado un prototipo de data logger portátil que se sitúa dentro del vehículo. El dispositivo (que se puede ver en la Figura 6.10) dispone de un GPS comercial y la gestión de datos la llevan a cabo microcontroladores de bajo coste. Una vez que el taxi finaliza el recorrido y regresa a la estación ITV, las medidas GPS pueden descargarse en un ordenador en donde se calcula la CSM.

Sólo se contemplan coordenadas bidimensionales, la altura no es relevante: los trayectos tienen una longitud de entre 3 y 5 kilómetros, y las diferencias de altitud son de pocos metros. Cada medida incluye las coordenadas, el CEP para los  $\alpha$ -cortes especificados y el número de satélites disponibles.

Para los experimentos realizados en esta sección se ha utilizado un circuito que rodea los edificios del Campus de Viesques en Gijón. La longitud del circuito se ha medido con un odómetro certificado ISO-9002. En la Figura 6.11 se puede ver una imagen aérea del circuito. Consta de dos rectas de cierta longitud y dos menores, con cuatro secciones con giros bruscos. El circuito, que mide 1093 m., presenta una zona (a la izquierda en la imagen) entre árboles y edificios en la cual el funcionamiento del GPS empeora dando lugar a datos de menor calidad.

Como es evidente, no se puede comparar de forma directa la máquina de rodi-



Figura 6.10: Prototipo del primer data logger que se ha desarrollado para la verificación de los taxímetros.

	NSGA-II	GPS	Máq. Rodillos
Media	1121.494	1103.635	1106.667
Desviación estándar	7.665415	16.49395	5.532274

Cuadro 6.5: Media y desviación estándar de las 10 medidas del recorrido real (1093 m.) utilizando filtrado NSGA-II, coordenadas GPS sin filtrado y recorrido equivalente en máquina de rodillos.

llos con otros métodos, de modo que se ha diseñado un procedimiento indirecto, usando el mismo vehículo en el circuito y en la máquina de rodillos. Se ha recorrido el circuito 10 veces y se anotó la distancia medida por el odómetro. Posteriormente, situando el vehículo en la máquina de rodillos se ha realizado una tanda de 10 mediciones parando cuando el odómetro del vehículo marcaba 1093 metros, anotándose la indicación de la máquina de rodillos.

En la Figura 6.12, se puede ver la ruta registrada por el GPS para las 10 vueltas empleadas. Hay grandes diferencias entre los centros de las mediciones de vueltas distintas, especialmente en la parte izquierda del circuito. Este comportamiento incontrolable se traduce en una variación acusada de la medición de la longitud sobre el mismo circuito, como se puede ver en la Tabla 6.5. Esta tabla recopila la media y la desviación estándar de las medidas obtenidas usando NSGA-II con filtrado basado en la dinámica del vehículo, coordenadas GPS sin procesar y má-



Figura 6.11: Imagen aérea del circuito utilizado en los tests y situado en el Campus de Viesques.

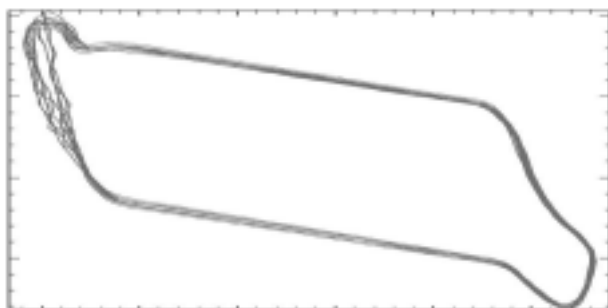


Figura 6.12: Camino detectado por el GPS, representando las trayectorias de 10 vueltas al circuito de la figura anterior.

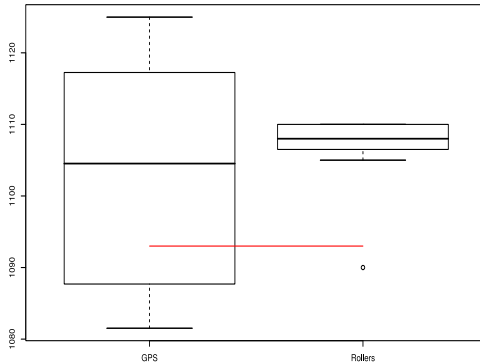


Figura 6.13: Boxplots de 10 medidas al circuito utilizando coordenadas GPS no filtradas y las medidas equivalentes en una máquina de rodillos.

quina de rodillos. En lo que se refiere a la variabilidad de los resultados obtenidos con la máquina de rodillos, en este caso no se ha variado la presión de los neumáticos ni se han utilizado neumáticos con distinto nivel de desgaste, estos aspectos se discuten más adelante.

Como en anteriores ocasiones, los mismos datos se muestran gráficamente en la forma de boxplots en las figuras 6.13 y 6.14. La línea horizontal central marca la longitud del circuito tal y como fue medida por el odómetro certificado (1093 m.). Obsérvese en 6.13 que las coordenadas GPS sin filtrar producen una gran dispersión de medidas, la línea a trazos se cruza con una probabilidad no despreciable. Sin embargo en la figura 6.14 se aprecia claramente el efecto del filtrado mediante el algoritmo evolutivo: el filtrado produce una buena aproximación de la CSM, que nunca está por debajo de la longitud real.

Finalmente, en la Figura 6.15, se comparan los resultados obtenidos mediante las coordenadas GPS filtradas y la máquina de rodillos. Es destacable que la precisión de los resultados obtenidos con el GPS es mejor que la de los rodillos cuando las condiciones de presión son muy altas o muy bajas y que las medidas realizadas con GPS no dependen de la condición de los neumáticos.

### 6.3.4. Cálculo multinivel de cotas superior e inferior

La interpretación borrosa que se usa en este apartado es la misma que se ha usado anteriormente. Se refiere al lector de nuevo a la Figura 6.1 en donde se representa de forma gráfica en que se traduce la imprecisión de las medidas GPS.

En este apartado se usa de forma distinta esa misma interpretación. Si la infor-

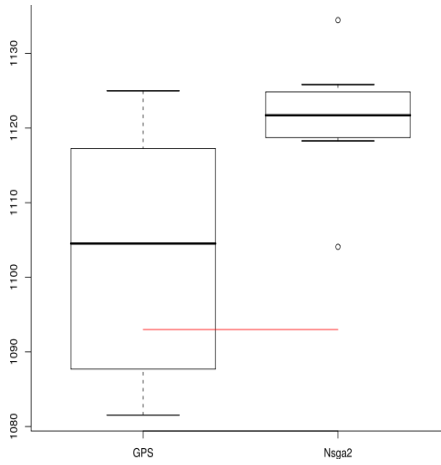


Figura 6.14: Boxplots de 10 medidas del recorrido real utilizando coordenadas GPS no filtradas y coordenadas GPS filtradas con NSGA-II.

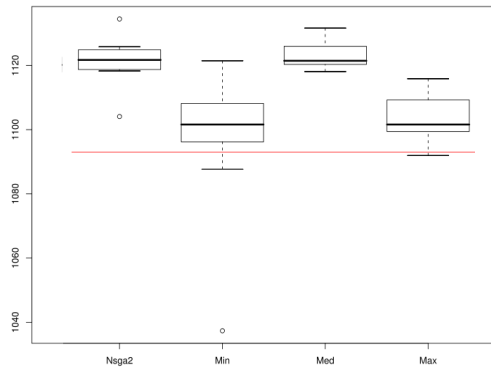


Figura 6.15: Boxplots de las 10 medidas del circuito real utilizando coordenadas GPS filtradas utilizando NSGA-II y medidas equivalentes de la máquina de rodillos.



mación del CEP a distintas probabilidades se descartase, las medidas GPS serían nítidas y se podría ajustar un modelo usando splines a los datos [46][7][49]. En lugar de esta alternativa, se propone usar una interpretación intervalar [5]. Además, partiendo de las mismas hipótesis que en el caso anterior, se puede considerar que se tiene un cierto conocimiento a priori del trayecto y del comportamiento del vehículo. De esta forma, tomar la trayectoria entre coordenadas como una línea recta puede ser en algunos casos una simplificación excesiva debido a la forma habitual de las carreteras y a la dinámica de los vehículos. Además se ha encontrado que la información de la velocidad y de la dirección de movimiento es más precisa que la de las coordenadas [50] y prácticamente todos los GPS comerciales proporcionan esa información, de modo que se puede usar para incrementar la precisión de las medidas. La orientación que se le ha dado al problema tiene cierta relación con las técnicas de fusión de información borrosa [47]. En las siguientes secciones se expone como se va a abordar el problema de interpolar trayectorias físicamente realizables y como calcular cotas superior e inferior para sus longitudes. Nótese que en este caso, a diferencia del cálculo de la CSM, se van a calcular tanto cotas superiores como inferiores.

### 6.3.5. Interpolación de una trayectoria y fusión de información

Una trayectoria plana puede representarse mediante la ecuación

$$c(t) = x(t) \vec{i} + y(t) \vec{j} \quad (6.2)$$

Supóngase que cada componente de la trayectoria es un polinomio,

$$\begin{aligned} a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 &= x(t) \\ b_n t^n + b_{n-1} t^{n-1} + \dots + b_1 t + b_0 &= y(t) \end{aligned} \quad (6.3)$$

las componentes de la velocidad serían entonces

$$\begin{aligned} n a_n t^{n-1} + (n-1) a_{n-1} t^{n-2} + \dots + a_1 &= \dot{x}(t) \\ n b_n t^{n-1} + (n-1) b_{n-1} t^{n-2} + \dots + b_1 &= \dot{y}(t). \end{aligned} \quad (6.4)$$

En otras palabras, para cada muestra de la trayectoria obtenida con un GPS, centrada en  $(x(t), y(t))$ , la velocidad es  $(\dot{x}(t), \dot{y}(t))$  y se cumple la ecuación 6.4, donde  $t$  representa el tiempo y  $a_i, b_i$  son constantes a estimar. Esto quiere decir que se obtienen cuatro ecuaciones de cada muestra. El número de incógnitas es  $2(n+1)$ . Se puede encontrar una solución si el número de medidas  $m$  cumple  $m \geq 2(n+1)$ , de esta forma se obtiene un sistema que puede ser sobredeterminado.

Si el sistema es estrictamente determinado la solución del sistema conduce a la estimación de los coeficientes de los polinomios  $\hat{a}_{i,j}, \hat{b}_{i,j}, i \in [1, m], j \in [0, n]$  y la trayectoria estará representada por la ecuación 6.5, la cual contendrá las

coordenadas medidas. Si el sistema es sobredeterminado, el modelo obtenido no pasará exactamente por las coordenadas medidas

$$\begin{aligned}\hat{x}(t) &= \hat{a}_{1,n}t^n + \hat{a}_{1,n-1}t^{n-1} + \dots + \hat{a}_{1,1}t + \hat{a}_{1,0} \\ \hat{y}(t) &= \hat{b}_{1,n}t^n + \hat{b}_{1,n-1}t^{n-1} + \dots + \hat{b}_{1,1}t + \hat{b}_{1,0}\end{aligned}\quad (6.5)$$

Dado un polinomio ajustado a una serie de datos, la longitud de la trayectoria se puede estimar integrando un diferencial de longitud a lo largo del polinomio ajustado entre dos instantes de tiempo cualesquiera. De esta forma el efecto de considerar tramos rectos entre coordenadas se mitiga: la longitud medida realizando la integral de la curva será siempre mayor o igual que la recta que las une.

Con el fin de reformular la estimación de la longitud como un problema de optimización restringido al CEP, se ha escogido añadir a  $x(t)$  e  $y(t)$  las cantidades apropiadas (positivas o negativas) que maximizan o minimizan la longitud de la trayectoria. La forma más fácil de hacer esto es utilizar coordenadas cilíndricas y considerar entonces que las variables a optimizar son  $\alpha \in [0, 2\pi]$  and  $\rho \in [0, CEP]$ . El sistema anterior se transforma como sigue:

$$\begin{aligned}a_{1,n}t^n + a_{1,n-1}t^{n-1} + \dots + a_{1,0} &= x_1(t) + \rho \cos \alpha \\ b_{1,n}t^n + b_{1,n-1}t^{n-1} + \dots + b_{1,1}t + b_{1,0} &= y_1(t) + \rho \sin \alpha \\ na_{1,n}t^{n-1} + (n-1)a_{1,n-1}t^{n-2} + \dots + a_{1,1} &= \dot{x}_1(t) \\ nb_{1,n}t^{n-1} + (n-1)b_{1,n-1}t^{n-2} + \dots + b_{1,1} &= \dot{y}_1(t) \\ &\dots \\ a_{m,n}t^n + a_{m,n-1}t^{n-1} + \dots + a_{m,0} &= x_m(t) + \rho \cos \alpha \\ b_{m,n}t^n + b_{m,n-1}t^{n-1} + \dots + b_{m,1}t + b_{m,0} &= y_m(t) + \rho \sin \alpha \\ na_{m,n}t^{n-1} + (n-1)a_{m,n-1}t^{n-2} + \dots + a_{m,1} &= \dot{x}_m(t) \\ nb_{m,n}t^{n-1} + (n-1)b_{m,n-1}t^{n-2} + \dots + b_{m,1} &= \dot{y}_m(t)\end{aligned}\quad (6.6)$$

Con la adición de los incrementos determinados por  $\alpha$  y  $\rho$  a las coordenadas GPS, la longitud de la trayectoria se convierte en una función de  $\alpha$  y  $\rho$ , el modelo de la trayectoria es ahora:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t, \alpha, \rho) &= \hat{a}(\alpha, \rho)_{1,n}t^n + \hat{a}(\alpha, \rho)_{1,n-1}t^{n-1} + \dots \\ + \hat{a}(\alpha, \rho)_{1,1}t + \hat{a}(\alpha, \rho)_{1,0} &= \hat{b}(\alpha, \rho)_{1,n}t^n + \hat{b}(\alpha, \rho)_{1,n-1}t^{n-1} + \dots \\ &+ \hat{b}(\alpha, \rho)_{1,1}t + \hat{b}(\alpha, \rho)_{1,0}\end{aligned}\quad (6.7)$$

Y por lo tanto la longitud de la trayectoria es

$$L(t_i, t_j, \alpha, \rho) = \int_{t_i}^{t_j} \sqrt{\dot{\hat{x}}(t, \alpha, \rho)^2 + \dot{\hat{y}}(t, \alpha, \rho)^2} dt \quad (6.8)$$

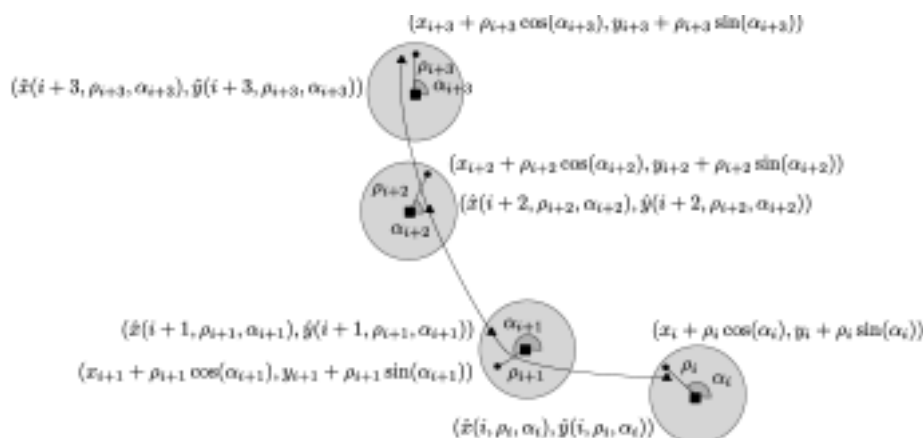


Figura 6.16: Polinomio ajustado a las medidas del GPS con deltas añadidas, compatible con un CEP dado.

El esquema propuesto se ilustra en la Figura 6.16 donde las marcas cuadradas son las medidas originales del GPS, los puntos son las coordenadas más las deltas y los triángulos la estimación del modelo. Nótese que en la ecuación 6.6 la velocidad es nítida, en otras palabras, confiamos en que esas medidas son correctas. Si el fabricante del receptor GPS proporcionase un análogo al CEP para la velocidad y la orientación, podría extenderse la metodología expuesta a ese caso.

Para una trayectoria de  $p$  puntos, se puede usar un polinomio para modelar cada porción de la trayectoria entre dos instantes de tiempo cualesquiera y entonces calcular la longitud de la trayectoria completa mediante al suma de las longitudes de cada uno de los polinomios que modelan la trayectoria. La trayectoria entonces se compone de  $p - 1$  fragmentos, cada uno modelado por polinomios como los de la ecuación 6.5 obtenidos resolviendo el sistema anteriormente mencionado. La longitud total será entonces:

$$L(\alpha_1, \rho_1, \alpha_2, \rho_2, \dots, \alpha_p, \rho_p) = \sum_{i=2}^{i=p} \int_{t_i}^{t_j} \sqrt{\dot{x}(t, \alpha_i, \rho_i)^2 + \dot{y}(t, \alpha_i, \rho_i)^2} dt \quad (6.9)$$

Usando la ecuación 6.9, el problema de encontrar la trayectoria compatible con las medidas GPS que proporcionan la longitud mínima y máxima se formula fácilmente. Nótese que es el sumatorio total el que tiene que maximizarse o minimizarse, no cada una de las porciones en las que se ha descompuesto la trayectoria total. Es más, siguiendo la línea centrada en la interpretación de las medidas GPS

como datos borrosos, este cálculo puede realizarse a distintos niveles de probabilidad, sin más que limitar  $\rho$  al CEP correspondiente a esa probabilidad. De esta forma se obtiene un conjunto anidado de intervalos para la medida de la longitud, usando la ecuación 6.10. En esa ecuación  $P_1, P_2, \dots, P_q$  son las distintas probabilidades para el CEP y  $CEP_{P_q}$  los CEP correspondientes a dichas probabilidades. Como es lógico, para  $P_i$  creciente se obtiene un CEP también creciente, una longitud máxima mayor y una longitud mínima menor.

Finalmente,

$$\begin{aligned}
 L_{\text{mín } P_1} &= \text{mín}\{L(\alpha_1, \rho_1, \dots, \alpha_p, \rho_p)\} \rho_i \in [0, CEP_{P_1}] \\
 L_{\text{máx } P_1} &= \text{máx}\{L(\alpha_1, \rho_1, \dots, \alpha_p, \rho_p)\} \rho_i \in [0, CEP_{P_1}] \\
 &\dots \\
 L_{\text{mín } P_q} &= \text{mín}\{L(\alpha_1, \rho_1, \dots, \alpha_p, \rho_p)\} \rho_i \in [0, CEP_{P_q}] \\
 L_{\text{máx } P_q} &= \text{máx}\{L(\alpha_1, \rho_1, \dots, \alpha_p, \rho_p)\} \rho_i \in [0, CEP_{P_q}] \\
 &P_1 < P_2 < \dots < P_q \tag{6.10}
 \end{aligned}$$

y  $[L_{\text{mín } P_i}, L_{\text{máx } P_i}] \subset [L_{\text{mín } P_j}, L_{\text{máx } P_j}]$  for  $P_i > P_j$ .

En el caso de los GPS comerciales, las probabilidades habituales son 50 % y 95 %. En los experimentos de la siguiente sección se usarán estos valores. Resumiendo el proceso, se ha modelado la trayectoria de cada coordenada a la siguiente utilizando un polinomio. Si las medidas de velocidad están disponibles, entonces el modelo se puede estimar utilizando estos datos. Para los GPS comerciales, estos datos se pueden obtener fácilmente, puesto que son enviados por el receptor al ordenador que almacena y procesa los datos mediante el protocolo NMEA.

Para cada fragmento de trayectoria de una coordenada a la siguiente, usando el modelo ajustado al fragmento completo, se calcula la longitud de la trayectoria integrando el polinomio ajustado. El procedimiento es computacionalmente pesado: una trayectoria de  $n$  puntos conduce a un problema de optimización con  $2 \times n$  variables.

## 6.4. Configuración de los experimentos

La propuesta presentada en esta sección se ha probado con trayectorias realísticas (sintéticas) y reales. El propósito del uso de las primeras es probar el algoritmo con un dataset del cual se conocen a priori sus propiedades: longitud de la trayectoria, distribución de los errores de medida, etc. El propósito de los datos reales es, evidentemente, probar la solución al problema en condiciones del mundo real.

Todos los datos se han generado o se han convertido al sistema UTM con el fin de agilizar los cálculos [36]. Para cada dataset conteniendo una trayectoria, se calculan las cotas superior e inferior de la longitud de la trayectoria usando distintos

métodos: líneas rectas entre medidas GPS sin usar la velocidad ni la orientación, polinomios de segundo grado sin usar velocidad ni orientación y polinomios de segundo grado fusionando la información de velocidad y rumbo con la de las coordenadas.

Dada la naturaleza del proceso se ha escogido como método de optimización Genoud [48]. En concreto la implementación rgnoud que se encuentra disponible en el paquete estadístico R. Se ha escogido este algoritmo porque combina métodos evolutivos con métodos de optimización local basados en derivadas (cuasi-Newton) y puede resolver problemas con un gran número de mínimos locales y un número alto de variables.

### 6.4.1. Datos sintéticos

El dataset sintético se ha obtenido simulando 10 vueltas a un circuito cerrado con giros en todas las posibles direcciones (ver Figura 6.17), con velocidad variable desde un máximo en los tramos más rectos hasta un mínimo en los giros más extremos. Los círculos pequeños señalan la posición real del receptor, las cruces las coordenadas medidas por el GPS, las líneas que parten de estos puntos representan el módulo y orientación de la velocidad, los círculos grandes representan el CEP.

Las ecuaciones de la trayectoria son las siguientes:

$$\begin{aligned} x(t) &= r \left( \cos \left( \frac{t}{t_f} n 2\pi \right) + e \right) * \sin \left( \frac{t}{t_f} 2\pi \right) \\ y(t) &= r \left( \cos \left( \frac{t}{t_f} n 2\pi \right) + e \right) * \cos \left( \frac{t}{t_f} 2\pi \right) \end{aligned} \quad (6.11)$$

donde  $r$  representa el radio,  $t$  el tiempo,  $t_f$  el tiempo necesario para completar una vuelta (cuanto mayor sea este valor, menor será la velocidad media),  $n$  representa el número de convexidades en la trayectoria y  $e$  la excentricidad (cuanto menor sea este valor, más redondeada es la trayectoria y menos pronunciados los giros). La velocidad con la que se recorre la trayectoria y la longitud pueden obtenerse como se expuso en la sección 6.3.5. Las medidas GPS se han simulado muestreando la ecuación cada segundo.

Al igual que en el caso de los experimentos del capítulo anterior, se ha simulado el comportamiento real de los receptores GPS, de modo que la posición del receptor en el instante  $t$  está dentro del CEP con la probabilidad correspondiente. Se ha añadido ruido gaussiano a la velocidad y a la orientación, tratando de aproximar un dispositivo real.

En la parte superior de la Figura 6.17 se muestra una representación gráfica de la ecuación 6.12 después de simular su muestreo con un GPS, para un CEP de 3 metros. Como se puede comprobar, en algunos casos el CEP no interseca a la

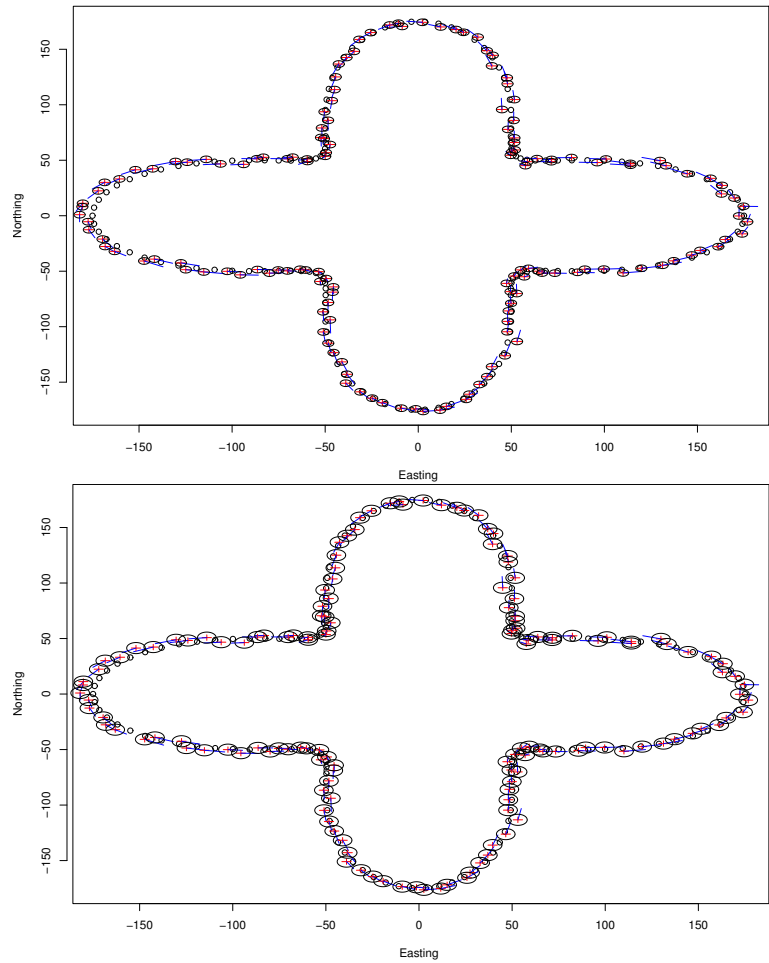


Figura 6.17: Arriba: trayectoria sintética mostrando la simulación de la adquisición de datos del GPS. Abajo: misma trayectoria con un CEP mayor.

trayectoria. En la parte inferior de la misma figura se ha repetido el procedimiento con un CEP de 5 metros. Como es lógico, algunos de los CEP que no intersecaban la trayectoria si la intersecan en este caso.

#### **6.4.2. Datos reales**

Se ha probado la alternativa expuesta en el mismo circuito en el caso de la propuesta del capítulo anterior. (ver figura 6.11). De nuevo, con el fin de disponer de una muestra de datos representativa, se han dado 10 vueltas al circuito. Se recuerda que la longitud de este se midió con un odómetro certificado. Se remite al lector a la sección correspondiente del capítulo anterior si se desean más detalles.

### **6.5. Resultados numéricos**

En esta sección se discuten los resultados obtenidos con el método propuesto en este capítulo usando los dataset comentados en la sección anterior.

#### **6.5.1. Datos sintéticos**

En la tabla 6.6 se muestran los resultados (media y desviación típica) obtenidos para la trayectoria sintética, usando los tres métodos comentados. Se han realizado dos tandas de 10 vueltas a la trayectoria y se han realizado los cálculos con CEP de 3 y 5 metros, siendo en el primer caso las cotas más ajustadas.

En la Figura 6.18 las muestras de longitudes de trayectoria se representan como boxplots para cada una de las alternativas. 'L4' es el enfoque basado en fusión de información borrosa, 'C' usa polinomios de segundo grado ajustados a las medidas del GPS, 'SL' usa líneas rectas de una medida GPS a la siguiente. Las cotas más ajustadas se obtienen con el enfoque 'L4'. De izquierda a derecha, cada grupo de cuatro boxplots representa una de estas alternativas: los dos primeros (de izquierda a derecha) corresponden a la distribución de máximos y mínimos con un CEP de 3 metros y los otros dos a las mismas magnitudes obtenidas con CEP de 5 metros. Es destacable que las cotas más ajustadas se obtienen incorporando la velocidad y la orientación al modelo.

Asimismo, puede observarse que las distribuciones de los mínimos son comparables, pero las de los máximos tienen una media mucho menor cuando se incorporan la velocidad y el rumbo a los cálculos. Esto es debido a que estas magnitudes se miden de forma más precisa y por lo tanto la precisión global del modelo mejora.

Líneas rectas				
CEP	Min Med	Min SD	Max Med	Max SD
3	1041.878	8.754915	1553.377	24.56959
5	991.7894	8.175372	1975.620	28.81959
Polinomios de Segundo Grado				
3	1033.29	6.047035	1427.402	13.70028
5	987.7802	5.593647	1698.075	19.02959
Polinomios de segundo grado usando orientación y velocidad				
CEP	Min Med	Min SD	Max Med	Max SD
3	1035.776	8.99255	1203.178	10.24138
5	990.5467	6.237333	1270.932	8.539436

Cuadro 6.6: Media y desviación estándar obtenidas con datos sintéticos y tres enfoques probados con valores de CEP de 3 y 5 metros.

### 6.5.2. Datos reales

El propósito de esta sección es validar la propuesta realizada en este apartado con datos reales obtenidos con un GPS comercial en una carretera abierta al tráfico. El circuito utilizado es el de la figura 6.11. Los experimentos realizados han sido los mismos que con los datos sintéticos: líneas rectas, polinomios de segundo orden y polinomios de segundo orden más velocidad y rumbo.

En la Tabla 6.7, se muestran los resultados (media y desviación estándar) obtenidos con la trayectoria de al Figura 6.11. Como puede verse, se mantiene la misma tendencia que en el caso de los datos sintéticos, obviamente, a menor CEP, cotas más ajustadas.

En la Figura 6.18, se muestra la dispersión de las muestras de longitudes para cada alternativa. Como en el caso de los datos sintéticos, de izquierda a derecha, cada grupo de cuatro boxplots representa una de estas alternativas, los dos primeros (de izquierda a derecha) corresponden a la distribución de máximos y mínimos con un CEP de 3 metros y los otros dos a las mismas magnitudes obtenidas con CEP de 5 metros. De nuevo la incorporación de la información relativa a la velocidad y al rumbo mejora la precisión de los resultados: las cotas son más ajustadas.

A la luz de los resultados anteriores se puede afirmar que que el modelo realizado con polinomios de segundo grado fusionando la información de las coordenadas con la de velocidad y rumbo es el más recomendable. El modelo representa de forma más fidedigna el comportamiento de un vehículo real y su trayectoria. Si además, como es probable, el sistema resuelto es sobredeterminado, se realiza un filtrado implícito en la estimación que hace menos vulnerable la estimación a errores de medida del GPS. Finalmente, la incorporación de la velocidad y rumbo al modelo mejora la precisión de la estimación de las cotas (estas son más ajustadas)



Líneas rectas				
CEP	Min Med	Min SD	Max Med	Max SD
3	971.4588	18.32016	1391.11	71.80738
5	940.204	19.19713	1785.405	122.5640
Polinomios de segundo grado				
CEP	Min Med	Min SD	Max Med	Max SD
3	965.7175	17.82051	1304.862	55.59313
5	931.8834	19.83234	1578.455	95.01664
Polinomios de segundo grado usando orientación y velocidad				
CEP	Min Med	Min SD	Max Med	Max SD
3	1032.780	6.586798	1206.878	8.433708
5	989.7233	9.371552	1277.49	11.48268

Cuadro 6.7: Media y desviación estándar obtenidas con datos reales y los tres enfoques probados con CEP de 3 y 5 metros. Nótese que las cotas son más ajustadas con menores CEP.

y disminuye su dispersión.

## 6.6. Medición del estado de los neumáticos

Debido a las cuestiones planteadas en el Capítulo 3 relativas a los sistemas de visión activa basados en un plano láser, en este apartado proponemos abordar el problema dentro del marco de los llamados datos de baja calidad [3]. De este modo no se realizan ningún tipo de suposiciones sobre las propiedades de las magnitudes a medir ni sobre los sensores empleados y simultáneamente se toman en cuenta todas las medidas compatibles con los datos obtenidos, lo cual lleva implícito un cálculo de la tolerancia de aquellas.

Con el fin de comprobar empíricamente la validez de la alternativa propuesta, se han simulado cada uno de los pasos del procedimiento, desde la adquisición de las imágenes de la superficie del neumático hasta la obtención de la reconstrucción 3D, pasando por la calibración del sistema. Todo el modelo es parametrizable, tanto el modelo de las cámaras en si mismo como las dimensiones y número de los tacos del neumático como el ancho del láser, su ubicación, etc.

### 6.6.1. Desarrollo de técnicas aplicables a la medición de neumáticos

En esta sección se explica como se puede abordar el problema del desenfoque y del ancho del láser a partir de la idea de datos de baja calidad. Se propone utilizar esta aproximación tanto en la etapa de calibración como durante el proceso de

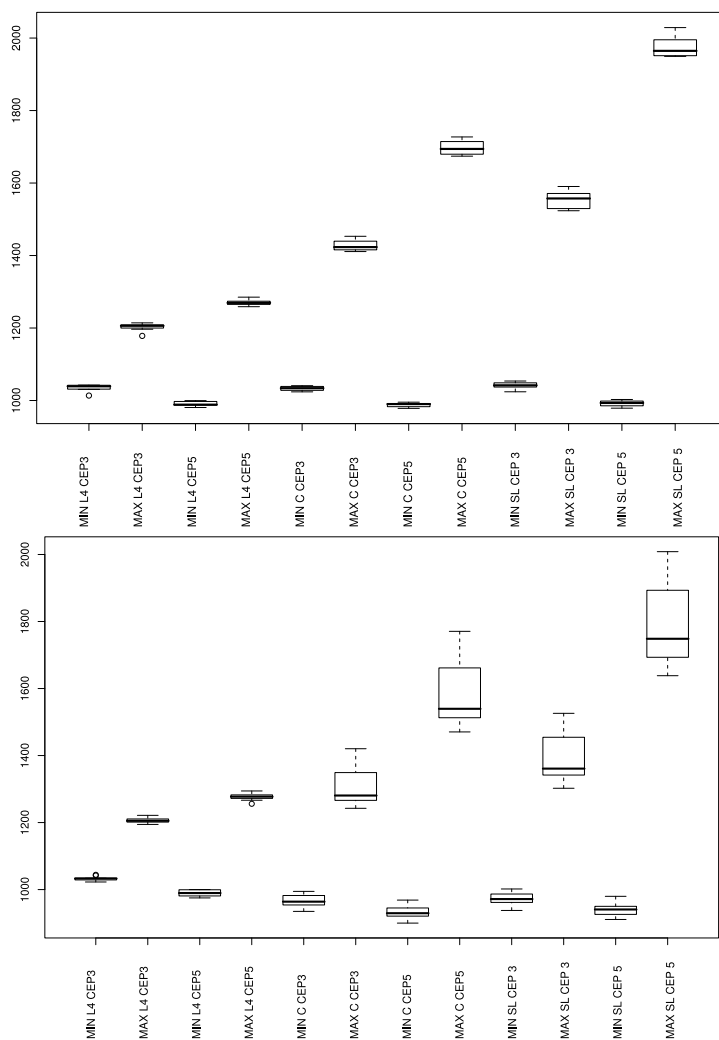


Figura 6.18: Muestras de longitudes de trayectorias. Arriba: datos sintéticos. Abajo: datos reales. De izquierda a derecha: boxplots de longitud mínima y máxima para cada enfoque usando CEP de 3 y 5 metros.

medición de la profundidad. El proceso de calibración se puede observar en la Figura 6.19.

Dado un AVS con parámetros fijos, se proyecta un plano láser sobre un plano de calibración. Se obtiene una serie de imágenes del plano y de la zona iluminada

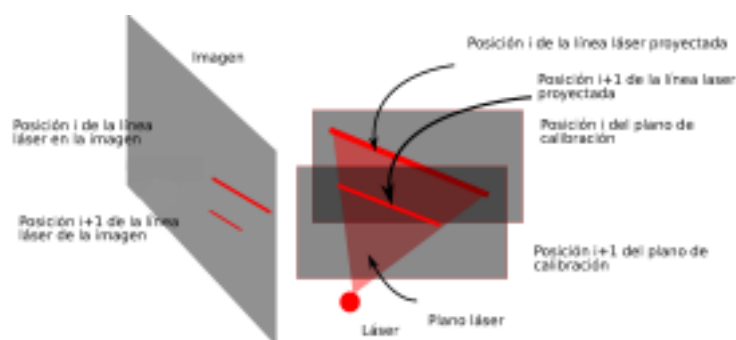


Figura 6.19: Calibración del AVS, los datos se almacenan en un mapa que relaciona las coordenadas  $(x, y)$  con la profundidad correspondiente.

por el láser situando el plano a diferentes profundidades. Debido al desenfoque y al ancho del plano láser, la línea proyectada en la imagen tendrá varios pixels de ancho y cada pixel puede ser proyección de una zona iluminada por el láser situando el plano de calibración a distintas profundidades. Por este motivo es necesario almacenar para cada pixel la profundidad máxima y mínima a la que se debe situar el plano de calibración para que la zona iluminada se proyecte en ese pixel. Entonces, para cada pixel que es proyección de la zona iluminada por el láser y para cada imagen adquirida:

- Si es la primera vez que ese pixel es proyección de la zona iluminada por el láser, se asigna al mapa para ese pixel la profundidad a la que se encuentre el plano en ese momento, tanto al máximo como al mínimo.
- Si no es la primera vez, se actualizan el valor máximo y el mínimo convenientemente.

Mediante este procedimiento, se obtiene un mapa de profundidad que contiene para cada punto de la imagen la profundidad máxima y mínima a la que se puede encontrar un punto de la escena que, iluminado por el láser, se proyecte en ese punto de la imagen.

Una vez calibrado el sistema, este se puede desplazar siempre y cuando las posiciones relativas de sus elementos (cámara y láser) se mantengan y no se alteren los parámetros de la cámara.

Gracias al proceso de calibración empleado, se dispone de la información necesaria para saber cual es el intervalo de distancias que se corresponde con un pixel de la imagen que es proyección de un punto de la escena iluminado por el láser, en otras palabras, se obtiene un intervalo de valores para la medida de la profundidad.

Dependiendo del ancho del plano láser, de la óptica empleada para convertir la fuente original en un plano o de lo enfocada que esté la zona iluminada por el láser, puede ocurrir que la intensidad de la luz cambie a lo largo de la sección transversal del láser. En estos casos es posible estimar una familia de intervalos anidados para la profundidad, utilizando para cada estimación la porción de la zona iluminada que presenta distintos niveles de intensidad. En cualquier caso, ya se ha mencionado antes el problema de los cambios bruscos de reflectividad y como afectan a la identificación del punto característico correspondiente a la zona iluminada por el láser.

A continuación se explica con detalle el proceso de medición. Como modelo de calibración para la cámara se usa la Transformada Lineal Directa (Direct Linear Transform, DLT), si bien es posible usar cualquier otro modelo ([112]).

Suponiendo conocidos los parámetros DLT de la cámara, se puede obtener una estimación intervalar 3D de las coordenadas de los puntos de la zona iluminada por el láser como se explica a continuación. Para cada coordenada  $x$  en la imagen, se obtiene el principio y el fin de la zona iluminada por el láser  $(y_{min}, y_{max})$ . Usando estos valores y el mapa que relaciona  $x$  e  $y$  (de la imagen) con  $Z$  (tridimensional), se obtiene un intervalo para la coordenada  $Z$  3D,  $(Z_{min}, Z_{max})_{3D}$ . Entonces, suponiendo  $Z_{3D}$  conocida, se puede reorganizar el sistema de ecuaciones

$$\begin{bmatrix} L_1 - \alpha L_9 & L_2 - \alpha L_{10} & L_3 - \alpha L_{11} \\ L_5 - \alpha L_9 & L_6 - \alpha L_{10} & L_7 - \alpha L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{3D} \\ Y_{3D} \\ Z_{3D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 - \alpha \\ L_8 - \beta \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

siendo:

$$\alpha = u - \delta u;$$

$$\beta = v - \delta v$$

$$\delta u = \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + l_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2)$$

$$\delta v = \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + l_{15}\eta\xi + L_{16}(r^2 + 2\eta^2)$$

de modo que finalmente se obtiene un sistema de ecuaciones determinado mediante el cual se pueden obtener los valores de  $X_{3D}$  e  $Y_{3D}$ .

$$\begin{bmatrix} L_1 - \alpha L_9 & L_2 - \alpha L_{10} & L_3 - \alpha L_{11} \\ L_5 - \alpha L_9 & L_6 - \alpha L_{10} & L_7 - \alpha L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{3D} \\ Y_{3D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 - \alpha - Z_{3D}(L_3 - \alpha L_{11}) \\ L_8 - \beta - Z_{3D}(L_7 - \alpha L_{11}) \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Formalmente, dado el conjunto de puntos de la imagen iluminados por el láser  $\{(x, y)_1, (x, y)_2, \dots, (x, y)_i, \dots, (x, y)_n\}$  se tiene una estimación intervalar de las coordenadas 3D de cada uno de ellos,  $((X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max}), (Z_{min}, Z_{max}))_i$ .

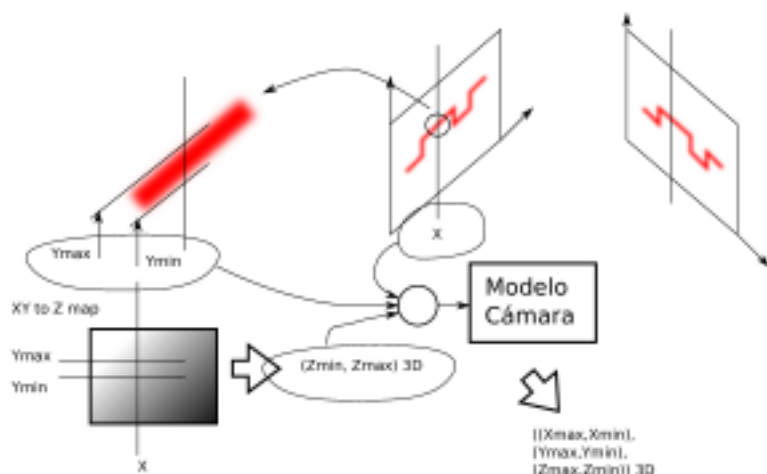
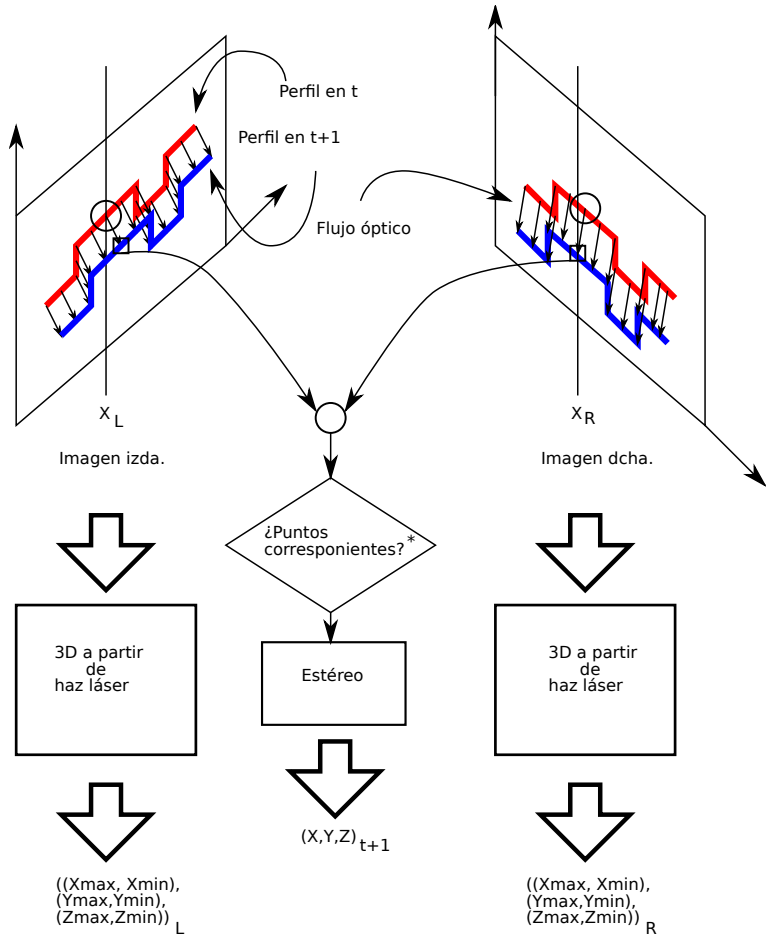


Figura 6.20: Estimación intervalar 3D mediante un AVS.

Si el proceso de medida consistiera sencillamente en medir la profundidad del surco a lo largo de la línea marcada por el láser, no se necesitarían cálculos adicionales. Sin embargo, como se ha dicho anteriormente, es necesario inspeccionar todo el perímetro de los neumáticos durante la ITV. Esto quiere decir que es necesario complementar el sistema para que se pueda explorar la circunferencia completa de cada neumático, evidentemente sin desmontarlo. Afortunadamente, con el fin de realizar otros tipos de pruebas, todas las estaciones en las que se realiza la ITV disponen de rodillos sobre los que situar cada eje de los vehículos inspeccionados. Puesto que no se puede medir con precisión la velocidad a la que gira cada neumático cuando estos se sitúan encima de dichos rodillos, el sistema a diseñar deberá incorporar un método para medir la distancia a la que se han realizado las distintas medidas consecutivas que se lleven a cabo hasta cubrir la totalidad del neumático. Esta medida permitirá representar la reconstrucción 3D del neumático de forma adecuada. En este trabajo se propone combinar la visión estereoscópica, el flujo óptico y la iluminación láser con este fin.

En la figura 6.21 se puede apreciar el proceso completo que conduce a la estimación del movimiento de la zona iluminada por el láser en el instante  $t$  hasta su posición en el instante  $t + 1$ . El proceso de estimación intervalar de las coordenadas 3D explicado anteriormente e ilustrado en la figura 6.20 se representa aquí mediante un único bloque. Así pues, en primer lugar se calcula una estimación intervalar de los puntos de la superficie del neumático iluminados por el láser para cada una de las dos cámaras. Sean  $\{(x, y)_1, (x, y)_2, \dots, (x, y)_i, \dots, (x, y)_n\}_1$  y  $\{(x, y)_1, (x, y)_2, \dots, (x, y)_i, \dots, (x, y)_m\}_2$  los puntos iluminados en las imágenes obtenidas por la cámara 1 y 2 respectivamente. Usando el procedimiento des-



\* Si están próximos, hay correspondencia en la estimación t+1

Figura 6.21: AVS+flujo óptico+estéreo para realizar la correspondencia y la estimación 3D de los puntos iluminados por el láser.

critico se obtienen  $((X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max}), (Z_{min}, Z_{max}))_i^1$  con  $i \in 1..n$  y  $((X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max}), (Z_{min}, Z_{max}))_i^2$ . con  $i \in 1..m$ .

Al mismo tiempo se calcula el flujo óptico para las dos cámaras. Usando la porción del flujo óptico que representa la estimación del movimiento de la parte iluminada (línea roja) de cada cámara, se obtiene una estimación de la posición de la zona iluminada en  $t+1$  (línea azul). Sean  $\{(u, v)_1, (u, v)_2, \dots, (u, v)_i, \dots, (u, v)_n\}_1$  y  $\{(u, v)_1, (u, v)_2, \dots, (u, v)_i, \dots, (u, v)_m\}_2$  los valores del flujo óptico para los puntos iluminados por el láser correspondientes a las dos imágenes. Para cada punto se calcula una estimación de su posición en  $t + 1$  usando la ecuación 6.14

$$(\widehat{x, y})(t + 1) = (x, y)(t) + (u, v)(t) \quad (6.14)$$

El objetivo final es obtener el flujo óptico 3D para la zona iluminada por el láser. Esta tarea resultaría sencilla si conociésemos las correspondencias entre los puntos de la estimación en  $t + 1$  de la zona iluminada de las dos cámaras. Esto no es así, pero si es fácil determinar las correspondencias entre los puntos iluminados de las dos cámaras en  $t$ , dado que se ha obtenido una estimación intervalar 3D para cada uno de ellos. El procedimiento es el siguiente, para cada punto de la línea en una de las cámaras, se recorren todos los puntos de la línea en la otra cámara y se encuentra el más próximo en 3D. En esencia se trata de buscar  $i \in 1..n$  y  $j \in 1..m$  que minimicen la distancia entre  $((X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max}), (Z_{min}, Z_{max}))_i^1$  y  $((X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max}), (Z_{min}, Z_{max}))_j^2$ . Si esos puntos están suficientemente próximos entonces  $(x, y)_i^1$  y  $(x, y)_j^2$  forman una correspondencia, son la proyección en las respectivas imágenes del mismo punto 3D. Debido al efecto de las oclusiones, es posible que un punto que se proyecta en una de las imágenes no se proyecte en la otra imagen. Por ese motivo será necesario establecer un umbral para aceptar una pareja de puntos 3D como correspondencia.

Una vez identificados las correspondencias en  $t$ , es obvio que considerando el neumático rígido en la zona iluminada, éstas se van a mantener en el instante  $t + 1$ , es decir, si  $(x, y)_i^1$  y  $(x, y)_j^2$  son una correspondencia entonces  $(\widehat{x, y})(t + 1)_i^1$  y  $(\widehat{x, y})(t + 1)_j^2$  también lo son.

Conocidas las correspondencias en  $t + 1$ , se pueden estimar las coordenadas 3D en  $t+1$ , procediendo como es usual en visión estereo. Nótese que la estimación  $(\widehat{X, Y, Z})(t + 1)$  de las coordenadas 3D en  $t + 1$  es nítida.

Con las coordenadas 3D de los puntos de la línea en  $t$  y su estimación en  $t + 1$ , es posible calcular el flujo óptico 3D que representa el movimiento que tomará esa sección del neumático por el giro dado al mismo. Dado que la magnitud del movimiento se mide usando las imágenes adquiridas por el sistema, no es necesario ningún otro tipo de sensor ni mantener una velocidad de giro constante.

Se define el flujo óptico 3D como el vector dado por las posiciones del mismo punto 3D en dos instantes de tiempo consecutivos. En este trabajo, consideraremos como posición inicial el centro de las coordenadas intervalares 3D y como

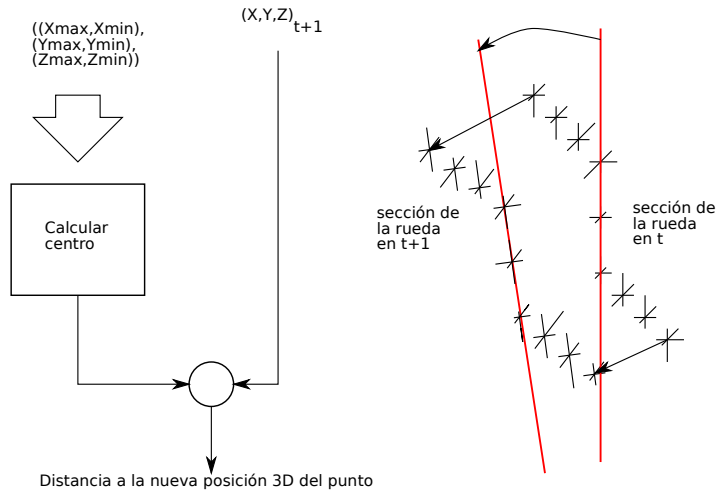


Figura 6.22: Estimaciones intervalares de las coordenadas 3D de los puntos escaneados.

posición final la estimación nítida de la línea marcada por el láser en el neumático, tal y como queda reflejado en la ecuación 6.15.

$$(u, v, w) = (\widehat{X}, \widehat{Y}, \widehat{Z})(t + 1) - C((X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max}), (Z_{min}, Z_{max})) \quad (6.15)$$

Este resultado finalmente será el que permita realizar una reconstrucción 3D del perfil del neumático, como se explica en la figura 6.22. Las estimaciones intervalares de las coordenadas 3D de los puntos escaneados por el láser se representan por trazos paralelos a los tres ejes cartesianos. Cada uno de los trazos es proporcional al ancho del intervalo para la componente correspondiente. Como se puede apreciar, a una de las franjas escaneadas se le ha dado un giro definido por el valor del flujo óptico 3D obtenido tal y como se ha comentado, evidentemente la parte inferior de los surcos se ha movido (linealmente) menos que la parte superior de los tacos y por lo tanto la franja ha adquirido un cierto giro.

### 6.6.2. Modelo del neumático

Como primera aproximación, se ha escogido un modelo simple de superficie, construido mediante superficies planas. El modelo de tacos empleado tiene una sección transversal consistente en una serie de surcos y tacos rectangulares alternados. El número, separación y altura de los tacos es parametrizable. Un parámetro final del modelo es el radio del neumático que define la velocidad lineal



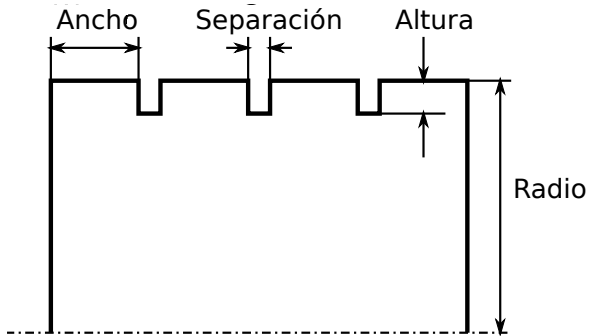


Figura 6.23: Parámetros del modelo de neumático.

de cada punto de la superficie para una velocidad angular dada. En la figura 6.23 se muestran estos parámetros acotados sobre un croquis del modelo.

### 6.6.3. Simulación de la adquisición de imágenes del modelo iluminado por el láser

El proceso de iluminación con el láser se simula intersecando un plano con el modelo. Con el fin obtener unos resultados más fidedignos, el plano se desplaza paralelamente una distancia igual al ancho que se le quiere dar al plano láser simulado. El número de posiciones intermedias es también un parámetro. Con el fin de emular el aspecto real de un láser de este tipo, la intensidad de la iluminación en los lados de la línea es más baja que en la parte central de la línea. El proceso es como sigue:

- Dado un ancho del plano láser  $w$  y un tamaño de paso (entre posiciones del plano)  $s_1$  el plano característico que representa el plano láser se sitúa a distancia  $w/2$  por encima de su posición original y se mueve una distancia  $s_1$  en cada iteración hasta alcanzar la posición simétrica por debajo de su posición original. Con el fin de imitar el aspecto usual de la iluminación de este tipo, la intensidad de los pixels iluminados comienza en un mínimo y se incrementa linealmente hasta alcanzar la posición inicial del plano, para decrecer de nuevo hasta alcanzar la posición final.
- En cada una de esas posiciones, se calcula la intersección del plano con el modelo del neumático. El resultado consiste en un conjunto de puntos definiendo el principio  $a$  y el final  $b$  de segmentos de línea recta definidos por la intersección del plano en la posición actual con las caras correspondientes de la superficie del modelo. Se obtienen dichos puntos para cada terna de planos que forman una taco o un surco en el modelo del neumático.

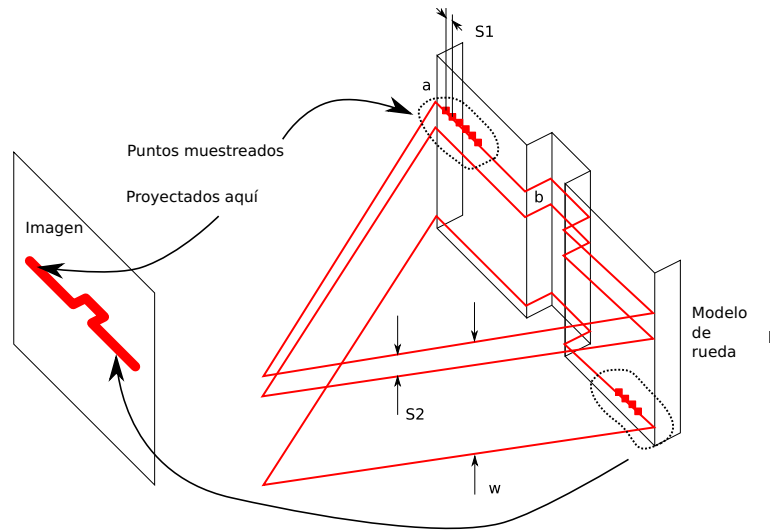


Figura 6.24: Esquema del proceso de renderizado de la línea láser.

- Cada uno de los segmentos de línea se muestrea usando un tamaño de paso  $s_2$ , desde  $a$  hasta  $b$ . Cada punto muestreado se proyecta en cada cámara usando el modelo DLT. Si la proyección entra en el rango de filas y columnas de la imagen, el pixel correspondiente adquiere el valor de nivel de gris correspondiente a la intensidad de iluminación del perfil del plano láser para esa posición del punto muestreado sobre la superficie del plano.
- El procedimiento se repite para cada segmento y para cada posición del plano.

En la figura 6.24 se esquematiza el proceso completo

#### 6.6.4. Resultados preliminares

En esta sección se muestran algunos resultados preliminares obtenidos mediante la simulación del proceso de medición usando el método propuesto.

Se han usado dos cámaras virtuales idénticas, separadas 5 cm y ligeramente convergentes, la configuración habitual en cualquier sistema de visión estereoscópica.

Los parámetros de las cámaras pueden observarse en la tabla 6.8. Como primera aproximación se ha utilizado una resolución muy baja que permite agilizar el proceso de simulación en el ordenador, muy costoso computacionalmente. La posición (cm.) y orientación (rad.) de las cámaras se detalla en la tabla 6.9.

Los parámetros que definen la forma de la superficie que simula un neumático se pueden consultar en la tabla 6.10, las dimensiones se dan en centímetros.

Resolución	150 x 150
Distancia Focal	8 mm.
Tamaño CCD	1/3"

Cuadro 6.8: Parámetros de las cámaras virtuales utilizadas en esta sección.

	Cámara 1	Cámara 2
$\alpha$	-0.95	-0.95
$\beta$	-0.15	-0.15
$\gamma$	-0.40	-0.35
X	-1	-1
Y	15	10
Z	38	38

Cuadro 6.9: Disposición espacial de las cámaras virtuales empleadas en esta sección.

Radio	30
Número de tacos	4
Ancho de tacos	4
Separación entre tacos	1
Alto de tacos	1

Cuadro 6.10: Geometría de la superficie del neumático.

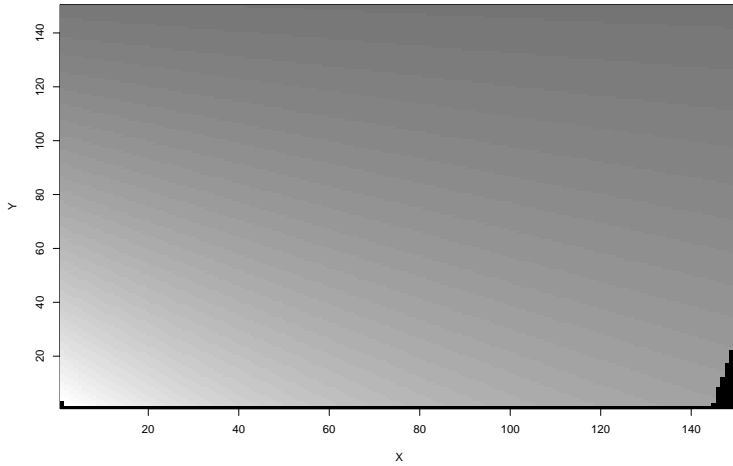


Figura 6.25: Ejemplo de mapa de profundidad, un tono más claro significa una profundidad mayor.

El láser ilumina la superficie definida por los parámetros de la tabla 6.10 verticalmente, el plano característico del mismo sería  $x = 5$ .

En primer lugar, es necesario obtener el mapa de profundidad para las dos cámaras, es decir, calibrar el AVS que se forma con el láser y cada una de las dos cámaras. Mediante este proceso se obtienen los mapas que permiten recuperar la profundidad de los surcos del neumático. A modo de ejemplo se muestra uno de los mapas en la figura 6.25. Recordar que, dada la naturaleza intervalar del problema (derivada del ancho no nulo de la sección del láser), para cada cámara se calculan dos mapas de profundidad, el que devuelve la profundidad máxima y el que devuelve la profundidad mínima.

La forma teórica de la intersección entre el plano característico de la iluminación láser y la superficie del neumático se muestra en la figura 6.26. Se han superpuesto los resultados obtenidos para las dos cámaras. Se podría decir que lo que se muestra sería la imagen ideal obtenida por las cámaras usando un láser de espesor despreciable.

Usando el método descrito, se ha simulado un AVS, generando por tanto las imágenes de la superficie del neumático iluminadas por el láser. En la figura 6.27 se muestran las dos imágenes correspondientes a las dos cámaras virtuales usadas en esta sección. El ancho de láser utilizado es de 2 mm. y se ha aplicado el procedimiento previamente explicado que reproduce las variaciones de intensidad del láser a través del perfil del mismo. Por este motivo la línea aparece difuminada en los bordes, tal y como sucedería en la aplicación real de esta técnica en este contexto. Para facilitar la impresión del documento se muestran en negativo.

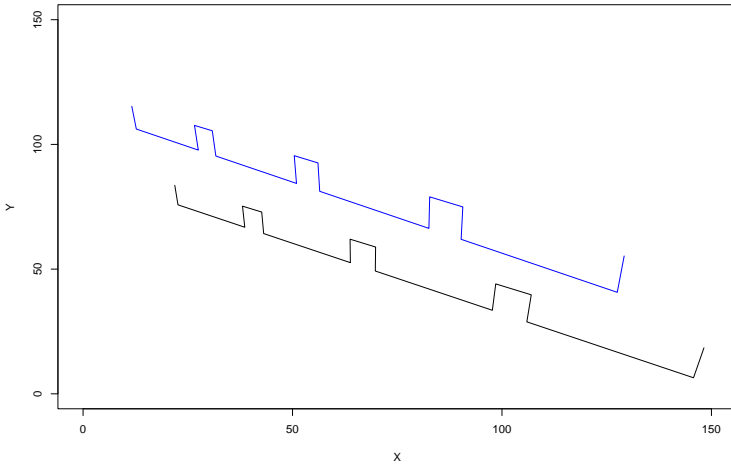


Figura 6.26: Intersección teórica entre el plano característico del láser y la superficie del neumático, tal y como se proyectarían en las dos cámaras.

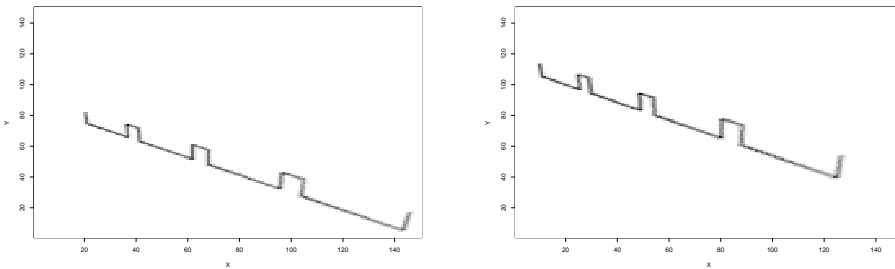


Figura 6.27: Línea láser tal y como se proyectaría en cada una de las cámaras virtuales usadas en esta sección.

Usando las imágenes anteriores y los mapas de profundidad de cada cámara, se pueden obtener las estimaciones de la profundidad máxima y mínima del surco del neumático para cada cámara. En la figura 6.28 se muestran las gráficas con estos resultados para las dos cámaras. Obsérvese como efectivamente la precisión del dispositivo es variable, dándose la tolerancia máxima en los flancos de los surcos. El distinto tamaño aparente de los tacos se debe a la exploración por columnas de las imágenes; este efecto desaparece cuando se realiza la reconstrucción 3D total.

Si se reduce el ancho del láser la tolerancia del dispositivo disminuye, reproduciéndose con mayor precisión el perfil del neumático. En la figura 6.29 se puede observar este efecto para un ancho del plano láser de 1 mm.

De los experimentos realizados se puede concluir que el ancho del plano láser tiene un impacto en la tolerancia de las medidas realizadas con un AVS. Cuando la línea láser no está completamente enfocada, es decir, cuando el AVS no verifica la condición de Scheimpflug, el desenfoco contribuye a aumentar el ancho del perfil. En la mayor parte de las aplicaciones esta condición no se cumple, de modo que es importante poder acotar la imprecisión en estos casos. Se propone una aproximación intervalar al problema para este fin.

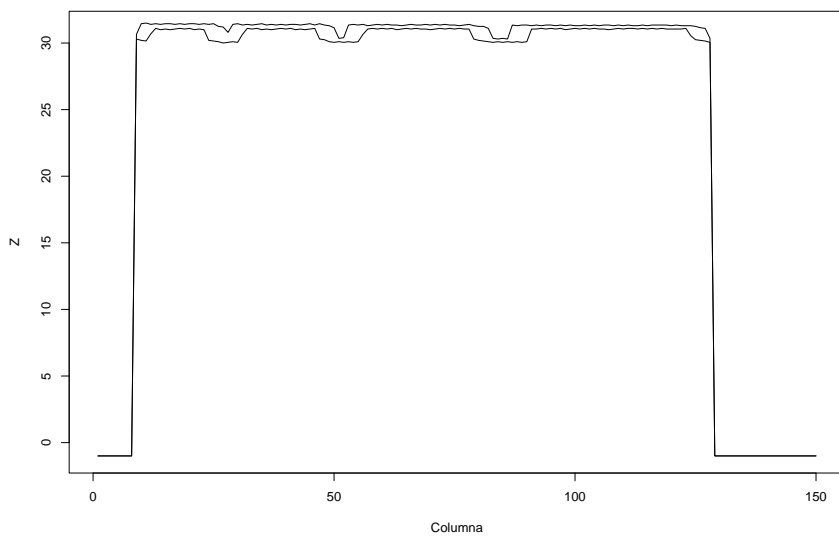
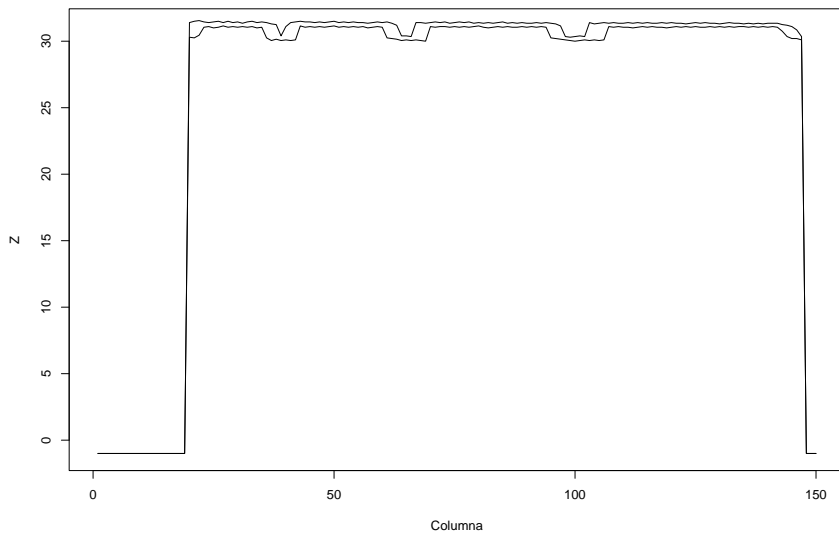


Figura 6.28: Profundidades máxima y mínima de los surcos del neumático (compatibles con el ancho del plano láser de 2 mm.) obtenidas con las dos cámaras.

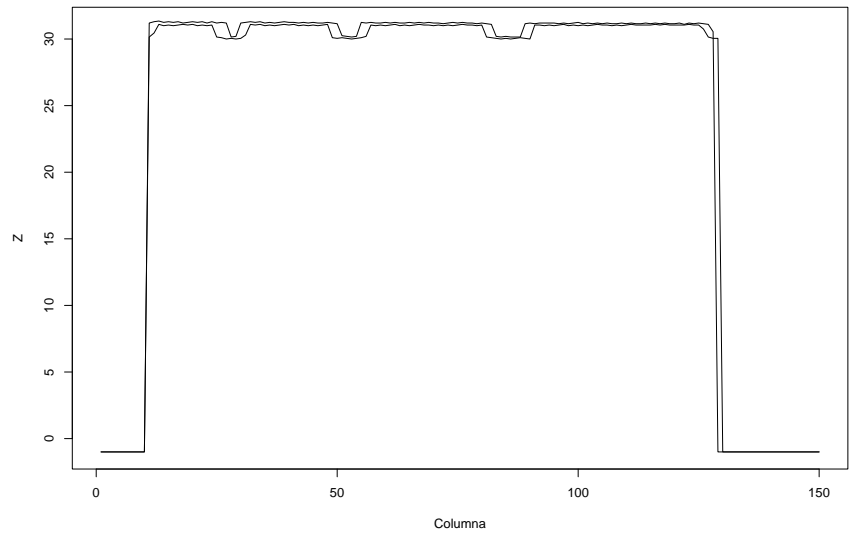
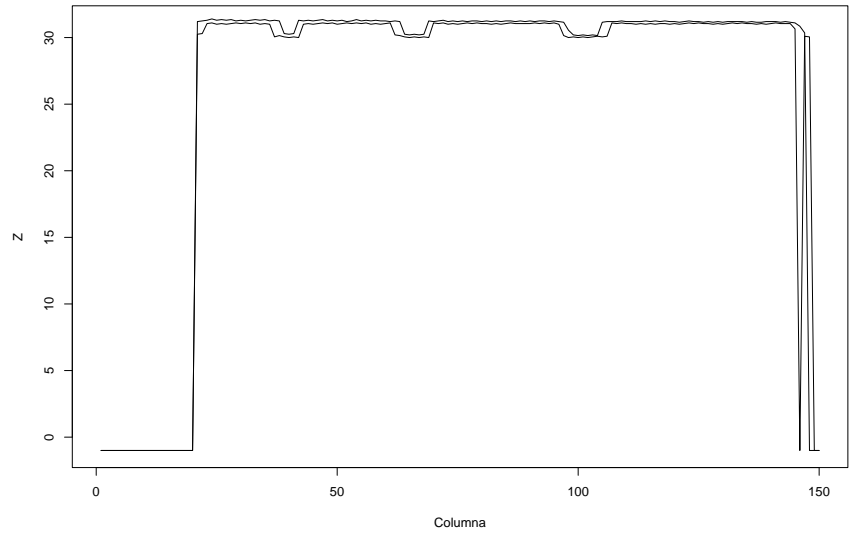


Figura 6.29: Profundidades máxima y mínima de los surcos del neumático (compatibles con el ancho del plano láser de 1 mm.) obtenidas con las dos cámaras.



## Capítulo 7

# Resultados prácticos

### 7.1. Descripción del sistema comercial

En esta sección se incluye la documentación del sistema comercial al que ha dado lugar el prototipo del dispositivo de medición. El sistema está siendo comercializado por la empresa Ryme. A continuación se adjunta el folleto del producto, el manual del usuario del sistema, los esquemas electrónicos y la placa PCB del mismo, junto con fotografías de los diferentes prototipos previos a la fabricación y el documento de calibración del mismo, que es uno de los resultados principales de esta tesis.

# 6.8

## VELOCÍMETROS - TAXÍMETROS TACÓMETROS

### TAXÍMETRO GPS

Ref. B5GPS09



#### DESCRIPCIÓN

Comprobador de taxímetros enfocado a la verificación de tarifas de todo tipo de taxis, incluidos los vehículos equipados con los más modernos sistemas de seguridad.

Mide tanto la velocidad, como la distancia recorrida y el tiempo de operación.

Equipo de medición basado en Sistema de Posicionamiento Global vía satélite (GPS). La medición se realiza mediante la evaluación del comportamiento del vehículo en carretera. El comprobador de taxímetros localiza automáticamente los satélites, evaluando la información de tiempo y posición recibidos y derivando de ello el espacio recorrido, así como la velocidad del vehículo.



#### CARACTERÍSTICAS

- ❑ Fácil de utilizar.
- ❑ No requiere instalación.
- ❑ Libre de mantenimiento.
- ❑ Evita tiempos de espera durante la realización de pruebas.
- ❑ Ensayo bajo condiciones reales del vehículo.
- ❑ Fiabilidad 100 %.
- ❑ Importa máx. y mín. admitido.
- ❑ Resistente a las condiciones de trabajo.
- ❑ Almacenamiento de hasta 200 pruebas.
- ❑ Posibilidad de descarga de datos a PC.
- ❑ Puerta USB para comunicación de datos.
- ❑ Compatible con vehículos de tracción delantera, trasera, total, con ESP, TCS, ABS, etc.



DESCRIPCIÓN GENERAL Y DE ALGUNAS PARTES CON RESPALDO A MODIFICACIONES SIN PREAVISO



DESCRIPCIÓN GENERAL Y DE ALGUNAS PARTES CON RESPALDO A MODIFICACIONES SIN PREAVISO

## 7.2. Manual del usuario del sistema

**DISPOSITIVO PARA LA  
VERIFICACION DE TARIFAS DE  
TAXI BASADO EN TECNOLOGIA  
GPS**

**I.T.V.A.S.A.  
GRUPO DE METROLOGIA Y MODELOS DE LA  
UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**GIJON, 2008**

## **CONTENIDOS**

1. Descripción del dispositivo y puesta en marcha
2. Manual del verificador
3. Manual del responsable de la estación

## **I Descripción del dispositivo y proceso de puesta en marcha.**

NOTA: este documento debe ser leído por aquellas personas que usen el "dispositivo para verificación de tarifas de taxi". Puede ser un documento público.

En el dispositivo de verificación de tarifas de taxi se pueden distinguir las siguientes partes:

- a) Una pantalla de presentación de datos.
- b) Un teclado alfanumérico.
- c) Una antena con imán de sujeción.
- d) Un compartimento situado en la parte posterior que contiene las baterías recargables.
- e) Un interruptor de encendido.
- f) Un puerto de conexión USB.

En las siguientes imágenes pueden verse distintas vistas del dispositivo:



Antes del uso del dispositivo debe comprobarse:

- a) Que la antena está conectada.
- b) Que se enciende la pantalla y se ilumina con un fondo azul al colocar el interruptor de encendido en la posición correspondiente.

Al encender el dispositivo aparece en pantalla durante un instante el mensaje:

LCD OK

Para posteriormente aparecer (también momentáneamente) el mensaje:

LTV-MM V0.9 OK

Para posteriormente aparecer en la pantalla las tarifas que se encuentran activas. Por defecto se usan 3 tarifas, numeradas del 1 al 3. La información que aparece en pantalla es, para la tarifa 1:

Tarifa 1: precio de la bajada de bandera, precio de la hora en espera, precio del kilómetro recorrido a velocidad mayor que la de arrastre.

Esta información aparece en la pantalla también para las tarifas 2 y 3.

A partir de ese momento el dispositivo entra en un estado de espera, durante el cual aparece en la pantalla la letra E, lo que indica que el dispositivo está a la espera de recibir información de la posición de los satélites.

En caso de que al encender el dispositivo no aparezca ninguna información en la pantalla, es muy posible que las baterías no estén cargadas. Ante esa situación puede usarse el dispositivo si se alimenta mediante la conexión USB. Esta conexión puede realizarse con un computador personal o con un adaptador para mechero de coche.

## II Manual del verificador

NOTA: este documento debe ser leído por los inspectores que realicen las verificaciones de las tarifas de taxi. Puede ser un documento público.

Cuando el dispositivo se encuentra preparado para iniciar una verificación, aparece en la pantalla el mensaje:

Matricula:

Indicando que debe teclarse la matrícula del vehículo que se va a verificar. Al acabar de teclear la matrícula, debe pulsarse la tecla <enter>.

Inmediatamente después de pulsar la tecla <enter>, aparecerá en la pantalla el mensaje (suponiendo que la matrícula tecleada sea 0000AAA):

Matricula: 0000AAA

Licencia:

Indicando que debe teclarse la licencia del vehículo que se va a verificar. Al acabar de teclear la licencia, debe pulsarse la tecla <enter>

Inmediatamente después de pulsar la tecla <enter>, aparecerá en la pantalla el mensaje (suponiendo que la matrícula tecleada sea 0000AAA y que la licencia tecleada sea ZZ-987):

Matricula: 0000AAA

Licencia: ZZ-987

Tarifa?

Que indica que debe seleccionarse la tarifa 1, 2 ó 3. La selección se realiza pulsando una de las tres teclas <1>, <2> o <3>.

En caso de no ser correctos los datos de matrícula y/o licencia, puede pulsarse cualquier tecla numérica, volviendo a aparecer en la pantalla el mensaje:

Matricula:

Pudiendo entonces repetir el proceso de introducir datos.

Si la selección de la tarifa ha sido correcta, se comienza el proceso de verificación. En la pantalla aparecerá entonces la siguiente información:

hora:minuto:segundo-Tar:tarifa

Vel: velocidad

KM: kilómetros recorridos

Dvalor

Por ejemplo:



13:45:56-Tar:1  
Vel: 0.000  
KM: 0.000  
D1.980

Cuyo significado es:  
La hora UTC: 13:45:56  
La tarifa es la Tarifa 1  
La velocidad es 0 Km/h  
La distancia recorrida es 0 Km

Mientras se realiza el proceso de verificación, se puede pulsar cualquier tecla **SALVO LA TECLA <D> o <F4>** que finaliza el proceso de verificación.

Mientras se realiza una verificación, puede haber algún cambio en la forma en que aparezcan los datos en la pantalla. Este hecho no indica que la verificación sea inválida. Para volver a visualizar los datos en la forma descrita, basta con pulsar la tecla <A> o <F1>.

Cuando se desee finalizar el proceso de verificación, se pulsará la tecla <D> o <F4> y **AL MISMO TIEMPO DEBE DETENERSE EL TAXIMETRO DEL VEHICULO**. En ese momento aparece en la pantalla la siguiente información:

FIN VERIFICACION  
+:Fiabilidad  
\*:Medidas  
F2: ir a libre

El significado de esta pantalla es el siguiente:  
Se ha finalizado una verificación.  
Si se pulsa la tecla <+> se presentan en pantalla datos de fiabilidad de la verificación.  
Si se pulsa la tecla <\*> se presentan datos de las medidas realizadas.  
Si se pulsa la tecla <B> o <F2> se vuelve al estado de libre.

Cuando se pulsa la tecla <+> aparece una pantalla con la siguiente información:

Segundos: segundos que ha durado la verificación  
Impre: porcentaje de medidas imprecisas  
Inval: porcentaje de medidas inválidas  
F2: ir a libre

Un ejemplo de la información que aparece en la pantalla cuando se pulsa la tecla <+> es:

Segundos: 594  
Impre: 1.456%  
Inval: 0.0%  
F2: ir a libre

Y el significado es el siguiente: se han tardado 594 segundos en realizar la verificación, durante la cual un 1.456% de las medidas fueron imprecisas y un

0.0% de las medidas fueron inválidas.

Si en esta pantalla de datos de fiabilidad se pulsa la tecla <F4> se volverá a una pantalla con la siguiente información:

FIN VERIFICACION

+:Fiabilidad

\*:Medidas

F2: ir a libre

Si en la pantalla de datos de fiabilidad se pulsa la tecla <\*> aparecerá una pantalla con la siguiente información:

K: kilómetros realizados a velocidad mayor que la velocidad de arrastre.

S: segundos transcurridos a una velocidad menor que la de arrastre.

Real: importe calculado por el dispositivo, en euros.

Maximo: importe máximo admitido según márgenes oficiales.

Mínimo: importe mínimo admitido según márgenes oficiales.

Un ejemplo de la información que aparece en la pantalla es el siguiente:

K:6.350S:100

Real: 2.760

Maximo: 2.809

Mínimo: 2.710

El significado de estos datos (ficticios) es:

Se han recorrido 6,350 kilómetros a velocidad mayor que la velocidad de arrastre, han transcurrido 100 segundos a una velocidad menor que la velocidad de arrastre. El importe que ha calculado el dispositivo es 2,760 euros; el importe máximo que puede marcar el taxímetro es 2,809 euros y el importe mínimo que debe marcar el taxímetro es 2,710 euros.

Si en esta pantalla de medidas se pulsa la tecla <F4> o <D> aparecerá la pantalla:

FIN VERIFICACION

+:Fiabilidad

\*:Medidas

F2: ir a libre

Si en la pantalla de medidas se pulsa la tecla <+> volverá a aparecer la pantalla con los datos de fiabilidad.

Si en la pantalla de medidas, en la de datos de fiabilidad o en la de fin de la verificación se pulsa la tecla <F2> o <B>, aparecerá una pantalla en la que se pedirá que se introduzca el importe que marca el taxímetro del vehículo. El mensaje que aparece en la pantalla es:

Medida taxi:

Se tecleará el importe que aparece en el taxímetro (usando como separador decimal el símbolo que se obtiene pulsando la tecla <.> o <:>) y al acabar se

pulsará la tecla <enter>.

A continuación, durante un instante aparecerá un mensaje en la pantalla indicando que se están guardando los datos:

Guard: matrícula

Guard: licencia

Guard: valor dado por el taxímetro

Guard: valor calculado por el dispositivo

Por ejemplo:

Guard: 0000AAA

Guard: ZZ-987

Guard: 8.76

Guard: 8.758

Cuyo significado es: se están guardando los datos de la verificación realizada al vehículo cuya matrícula es 0000AAA, cuya licencia es ZZ-987, cuyo taxímetro ha calculado un coste de 8.76 euros y para el que el dispositivo ha calculado un valor de 8.758 euros.

Con esta acción de guardar datos se da por finalizado el proceso de la verificación y volverá a aparecer la pantalla en la que se solicita al usuario que se introduzca la matrícula de un vehículo.

NOTA: este proceso que aquí se ha expuesto no excluye cualquieras otras acciones que se puedan llevar a cabo en la estación I.T.V. para el registro de los datos de las verificaciones o para llevar a cabo las verificaciones.

### III Manual del responsable de la estación I.T.V.

NOTA: este documento debe ser leído por la persona responsable o encargada de la supervisión de la estación I.T.V

En este apartado se expondrán las tareas de mantenimiento que se deben llevar a cabo en el dispositivo para la verificación de tarifas de taxi: cambio de tarifas, volcado de datos de la memoria del dispositivo a un PC y borrado de los datos de la memoria del dispositivo.

#### A. Cambio de tarifas.

El cambio de las tarifas vigentes se hace desde el propio dispositivo. Para el cambio de tarifas puede partirse desde el estado en el que el dispositivo está esperando por señal de los satélites (en la pantalla aparece el carácter E repetido) o desde el estado en que el dispositivo esta a la espera de que se teclee una matrícula.

El acceso a esta funcionalidad se hace pulsando `[F5]` y no se aprecia ningún efecto visual en la pantalla. En este momento se accede al cambio de tarifas pulsando exclusivamente `[F5]`.

Al pulsar `[F5]` aparece una pantalla con la siguiente información:  
Matricula: Cambio de tarifas.

El sistema se queda a la espera de que se teclee la clave. Si la clave tecleada es correcta, aparece el mensaje:

Tarifa1(B,H,K):

Con este mensaje se indica que se teclee el precio de la bajada de bandera para la tarifa 1, el precio de la hora de espera para la tarifa 1 y el precio del kilómetro recorrido para la tarifa 1.

Es preciso ser extremadamente cuidadoso al introducir los datos. Las reglas a seguir son:

- Cada valor ha de tener al menos un dígito en su parte entera.
- Cada valor ha de tener un punto decimal (<.>).
- Cada valor ha de tener al menos un dígito decimal.
- No deben aparecer letras ni otros símbolos (por tanto no se deben usar espacios en blanco) que no sean <.> (punto) o <,> (coma).

Así son valores válidos los siguientes:

0.1  
1.0  
1.1  
13.456  
123.678

Y no son valores válidos:

A:6  
.98  
1.A  
.  
A.1

Además los valores de los tres datos (bajada de bandera, horaria, kilomérica) deben estar separados por el carácter <,> (coma) y el último carácter ha de ser también <,> (coma).

Ejemplos de tarifas **BIEN** formadas:

1.23,0.56,16.78,  
12.456,3.456,234.987,

Ejemplos de tarifas **MAL** formadas:

1,23;2,6;5,7; (el separador decimal debe ser <.> y <:> no se puede emplear).  
2,3.456,6.8 (falta el <.> y un dígito decimal en el primer valor y falta la <,> para finalizar)  
2.45.,56,3.678, (falta la parte entera y el <.> en el segundo valor).

Al acabar de teclear los tres datos debe pulsarse la tecla <enter>. EN ese momento aparecerá en pantalla el mensaje:

Teclee tarifa 2:

El procedimiento a seguir es el mismo que el indicado para la tarifa 1. Y de forma idéntica se llevará a cabo para la tarifa 3.

En el momento en que se acabe de teclear los datos de la tarifa 3 y se pulse <enter>, aparecerán en pantalla brevemente los valores que se han teclado.

Si se ha cometido algún error o se han leído mal las tarifas, se repetirá el proceso de introducción de tarifas.

Nótese que no se realiza ningún tipo de verificación de los caracteres tecleados. Esto no es una omisión, es una especificación.

## B. Volcado de datos de la memoria del dispositivo a un PC.

Este dispositivo es capaz de almacenar datos de hasta 200 verificaciones en su memoria interna. Se recomienda volcar los datos de las verificaciones a un PC al menos con una frecuencia diaria.

Para llevar a cabo esta tarea se precisan conocimientos básicos de informática.

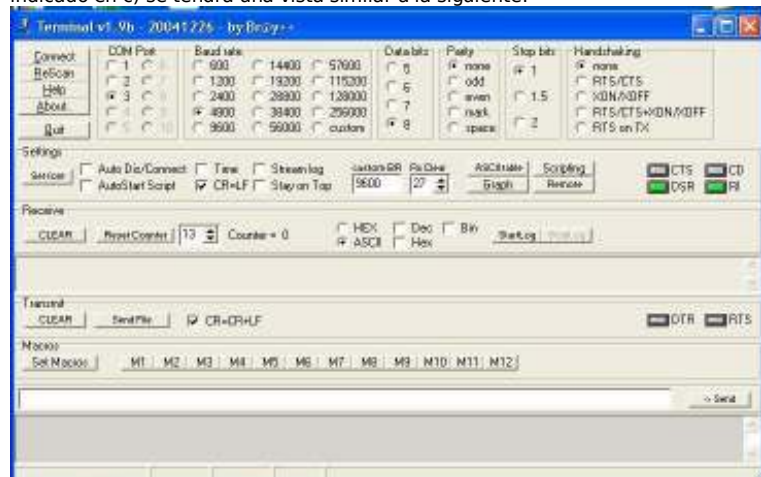
Antes del volcado de datos es preciso comprobar que el PC en el que se volcarán los datos dispone de:

a) Puerto USB

b) Drivers de acceso a USB simulando un puerto serie. Se pueden descargar desde esta página: <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>

c) Un programa de conexión al puerto serie, por ejemplo el descargable de: <http://www.sensorsportal.com/DOWNLOADS/Terminal.exe>

Una vez instalado el driver comentado en b), cuando se ejecuta el programa indicado en c) se tendrá una vista similar a la siguiente:



Se debe seleccionar estos parámetros de la aplicación, prestando especial atención a:

- Puerto: en este caso COM Port 3.
- Velocidad de conexión: en este caso 4800.
- Formato de presentación de los datos: en este caso ASCII
- Saltos de línea: en este caso CR=CR+LF

Una vez seleccionados los parámetros de conexión, pulsando el botón "Connect" la aplicación estará lista para recibir datos.

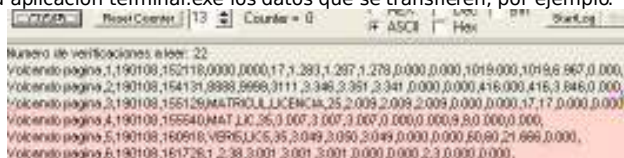
La instalación de los drivers y la configuración de la aplicación terminal sólo es

necesario hacerlas cuando se realiza el volcado por primera vez o después de instalar un nuevo sistema operativo en el PC.

Una vez comprobada la existencia del nuevo puerto de comunicaciones y el funcionamiento de la aplicación terminal.exe, se procederá a conectar el dispositivo de verificación de tarifas de taxi a un puerto USB del PC mediante el cable correspondiente.

Como en el caso del cambio de tarifas, bien cuando el dispositivo está esperando por información de los satélites, bien cuando está esperando a que se teclee una matrícula, se pulsará **Enter** y posteriormente **Esc**. Aparecerá en la pantalla del dispositivo el mensaje: Guardando datos ...

Y en la aplicación terminal.exe los datos que se transfieren, por ejemplo:



```
COM228 - Reset Center | 13 | Counter = 0
# ASCII | Hex
Numero de verificaciones a leer: 22
Volcado pagina 1,190108,162118,0000,0000,17,1,283,1,287,1,278,0,000,0,000,1018,000,1018,8,867,0,000,
Volcado pagina 2,190108,154131,8988,8988,0111,3,346,3,351,3,341,0,000,0,000,416,000,416,3,846,0,000,
Volcado pagina 3,190108,155129,MATRICULA,25,2,009,2,009,2,009,0,000,0,000,17,17,0,000,0,000,
Volcado pagina 4,190108,155540,MAT.LIC,26,3,007,3,007,3,007,0,000,0,000,9,8,0,000,0,000,
Volcado pagina 5,190108,160916,VERIFIC,35,3,049,3,049,3,049,0,000,0,000,60,60,21,666,0,000,
Volcado pagina 6,190108,161726,1,2,38,3,001,3,001,3,001,0,000,0,000,2,3,0,000,0,000,
```

En este ejemplo se vuelcan datos de 22 verificaciones.


Los datos que se vuelcan son, en este orden:

- Fecha: día, mes, año.
- Hora: hora, minuto, segundo.
- Matrícula
- Licencia
- Cantidad que se leyó en el taxímetro del vehículo
- Valor real calculado por el dispositivo.
- Valor máximo calculado por el dispositivo.
- Valor mínimo calculado por el dispositivo.
- Distancia total recorrida.
- Distancia recorrida a velocidad mayor que la de arrastre.
- Segundos a velocidad menor que la velocidad de arrastre.
- Segundos durante los cuales se han recogido datos de los satélites.
- Porcentaje de medidas imprecisas.
- Porcentaje de medidas inválidas.

Los distintos datos se separan entre sí por comas para facilitar la importación desde una hoja de cálculo. Para realizar esta importación bastaría con seleccionar en la aplicación de terminal los datos que se desean almacenar, copiarlos y pegarlos en un archivo de texto. Posteriormente se importaría este archivo de texto desde la hoja de cálculo.

### **C. Borrado de los datos de lamemoria del dispositivo.**

Mediante esta utilidad se pueden eliminar los datos de las verificaciones que han sido almacenados en el dispositivo.

Partiendo del estado en el que el dispositivo está a la espera de la señal de los satélites o del estado en que está a la espera de que se teclee una matrícula, se pulsa . Aparecerá en la pantalla el mensaje:

El dispositivo queda a la espera de que se teclee la clave correspondiente. En cuanto se teclea la clave, si es correcta, se procede a la eliminación de todos los datos de las verificaciones realizadas.

No es posible recuperar los datos borrados.



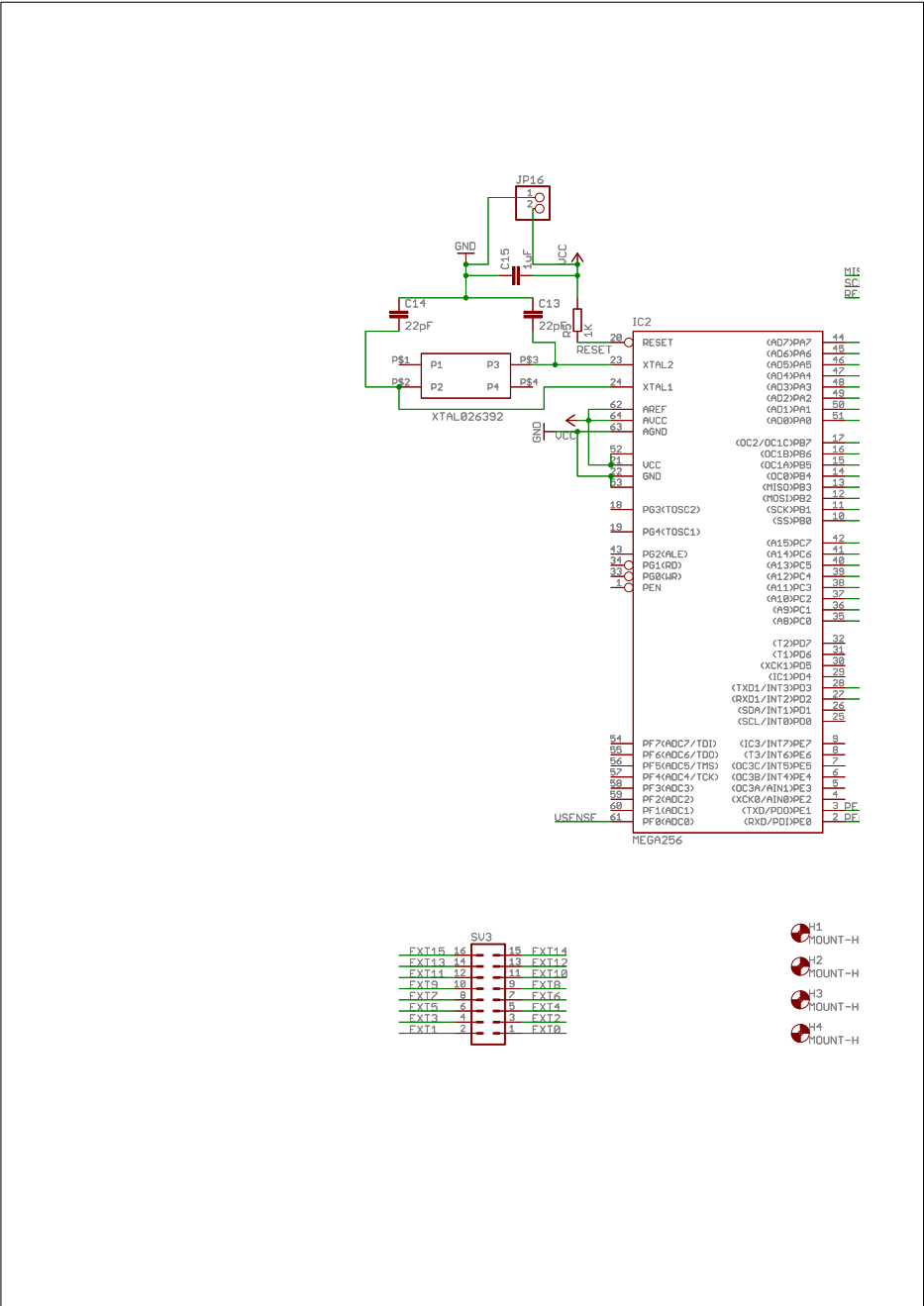
### 7.3. Primer prototipo

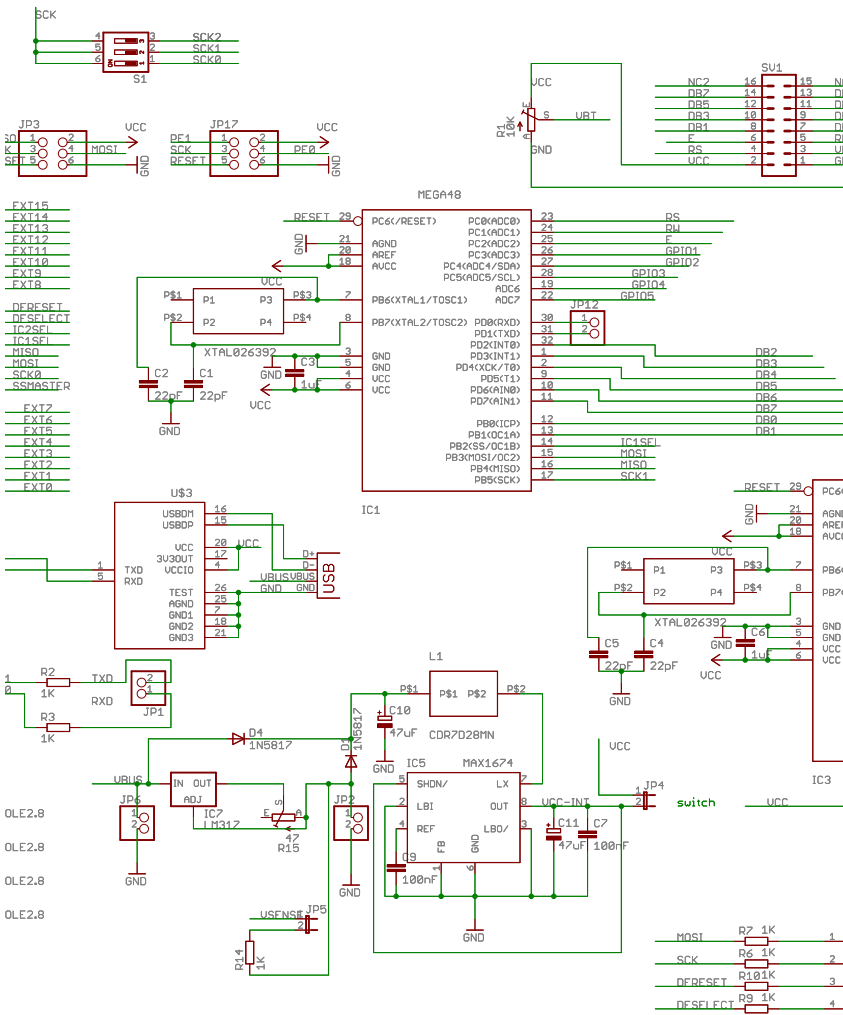


### 7.4. Segundo prototipo



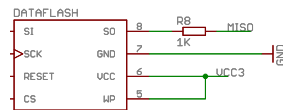
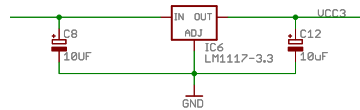
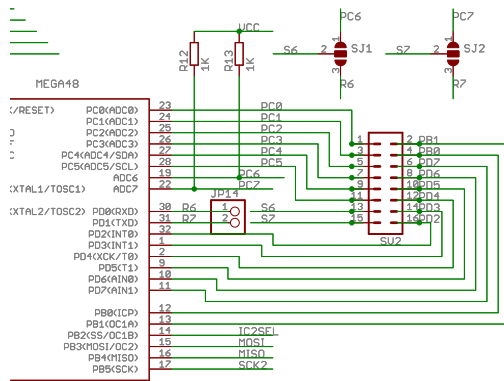
### 7.5. Esquemas electrónicos





v5.1-A.F.Electronica modificada/esquema.sch (Sheet: 1/1)

C1  
B6  
B4  
B2  
B0  
A  
B1  
B0





## **7.7. Documento de calibración**

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 1 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

**ÍNDICE:**

1. OBJETO
2. ALCANCE
3. DEFINICIONES
4. GENERALIDADES
5. DESCRIPCIÓN
6. RESULTADOS
7. BIBLIOGRAFÍA

00	02.03.2009	Adolfo Otero		Edición inicial
<b>Revisión</b>	<b>Fecha edic.</b>	<b>Realizado</b>	<b>Firma</b>	<b>Modificaciones realizadas</b>

	<b>Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo</b>	<b>Ref. PR-GPS</b> Página 2 de 18 Edición 02/09 Revisión 00
<p><b>1.- OBJETO</b></p> <p>Este procedimiento tiene como objeto describir la sistemática utilizada en la calibración de un dispositivo GPS y su empleo como patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo.</p> <p><b>2.- ALCANCE</b></p> <p>Se refiere a dispositivos electrónicos que constan de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un receptor GPS.</li> <li>• Una antena GPS.</li> <li>• Una pantalla de visualización.</li> <li>• Un teclado de entrada de datos.</li> <li>• Hardware y software necesario para la medición de distancias y tiempos a partir de datos recogidos por el receptor GPS, diseñados y desarrollados por el Grupo de Metrología y Modelos de la Universidad de Oviedo para la empresa ITVASA.</li> </ul> <p><b>3.- DEFINICIONES</b></p> <p><b>3.1.-GPS</b></p> <p>Siglas de Global Positioning System, sistema de posicionamiento global que permite la determinación de longitud, latitud y altitud de un punto de la superficie terrestre a partir de la información recibida de un grupo de satélites.</p> <p><b>3.2.-Satélite GPS</b></p> <p>Dispositivo que describe órbitas alrededor de la Tierra y envía periódicamente mediante ondas de radio información sobre su posición y hora.</p> <p><b>3.3.-Receptor GPS</b></p> <p>Dispositivo electrónico capaz de sintonizar las ondas de radio de varios satélites GPS. En el ámbito del presente documento se refiere a receptores de la denominada banda L1 que procesan las señales de varios satélites y la convierten a datos que envían a una salida digital siguiendo el protocolo NMEA-0183.</p>		



**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 3 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

**3.4.-Antena GPS**

Dispositivo que mejora la recepción de las ondas de radio de los satélites GPS.

**3.5.-CEP, Círculo de error probable**

Parámetro aportado por el fabricante de un receptor GPS que hace referencia al radio del círculo centrado en la posición real de la antena GPS, dentro del cual se encuentran el 50% de los datos de posicionado que calcula el receptor GPS.

**3.6.-DOP, Dilución de la precisión**

Magnitud adimensional que indica la pérdida de la precisión debida a la geometría o disposición espacial de los satélites.

**3.7.-HDOP, Dilución de la precisión horizontal**

DOP que afecta al posicionado horizontal.

**3.8.-Medida imprecisa**

Medida recogida por un receptor GPS cuando el valor de HDOP es mayor a 2.

**3.9.-Medida incorrecta**

Medida recogida por un receptor GPS cuando no hay señal de satélites.

**3.10.-Ajuste (de un instrumento de medida)**

Operación que tiene como objetivo llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento conveniente para su utilización.

**3.11.-Sensibilidad**

Cociente del incremento de la respuesta de un instrumento de medida por el incremento correspondiente de la señal de entrada.

	<b>Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo</b>	<b>Ref. PR-GPS</b> Página 4 de 18 Edición 02/09 Revisión 00
<p><b>3.12.-Resolución (de un dispositivo visualizador)</b></p> <p>La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.</p> <p>NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.</li> <li>2. Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador.</li> </ol> <p><b>3.13.-Calibración</b></p> <p>Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.</p> <p>NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las indicaciones.</li> <li>2. Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.</li> <li>3. Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces, certificado de calibración o informe de calibración.</li> </ol> <p><b>3.14.-Repetibilidad (de los resultados de las mediciones)</b></p> <p>Grado de concordancia entre los resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, mediciones efectuadas con aplicación de la totalidad de las mismas condiciones de medida.</p> <p>NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estas condiciones se denominan condiciones de repetibilidad.</li> <li>2. Las condiciones de repetibilidad comprenden:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• El mismo procedimiento de medida.</li> <li>• El mismo observador.</li> <li>• El mismo instrumento utilizado en las mismas condiciones.</li> <li>• El mismo lugar.</li> </ul> </li> </ol>		

3. Repetición de las medidas en un corto período de tiempo.
4. La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de dispersión de los resultados.

### **3.15.-Desviación estándar experimental**

Para una serie de  $n$  mediciones de un mismo mensurando, la magnitud  $s$  que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

siendo  $x_i$  el resultado de la  $i$ -ésima medición y  $\bar{x}$  la media aritmética de los  $n$  resultados considerados.

Notas:

1. Considerando la serie de  $n$  valores como muestra de una distribución,  $\bar{x}$  es un estimador insesgado de la media  $\mu$  y  $s^2$  es un estimador insesgado de la varianza  $\sigma^2$  de dicha distribución.
2. La expresión  $\frac{s}{\sqrt{n}}$  es una estimación de la desviación estándar de la distribución de  $\bar{x}$  y se denomina desviación estándar experimental de la medida.
3. La desviación estándar experimental de la medida en ocasiones se denomina, incorrectamente, error de la medida.

### **3.16.-Error (de indicación) de un instrumento de medida**

Indicación de un instrumento de medida menos un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente.

Notas:

- Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.
- Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.
- Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

	<b>Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo</b>	<b>Ref. PR-GPS</b> Página 6 de 18 Edición 02/09 Revisión 00
--	---	--

**3.17.-Corrección**

Valor sumado algebraicamente al resultado sin corregir de una medición para compensar un error sistemático.

Notas:

1. La corrección es igual al opuesto del error sistemático estimado.
2. Puesto que el error sistemático no puede conocerse perfectamente, la compensación no puede ser completa.

**3.18.-Incertidumbre de medida**

Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

Notas:

- El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.
- La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.
- Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

**3.19.-Trazabilidad**

Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

Notas:

1. A menudo, este concepto se expresa por el adjetivo trazable.
2. La cadena ininterrumpida de comparación se denomina cadena de trazabilidad.

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 7 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

**4.- GENERALIDADES**

Los dispositivos objeto de este procedimiento sólo se usan para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo, por lo que sólo se estudia la repetibilidad en las condiciones de uso habituales de las pruebas de verificación correspondientes.

Las variables a medir son:

- El tiempo.
- La distancia.

La unidad de medida del SI usada para el tiempo es el segundo.

Por lo que respecta a la medida de la distancia, se usa el metro y su múltiplo el km. 1km=1000 m.

En el caso de hacer referencia al concepto de velocidad, se usan como unidades el m/s y el km/h (1 m/s=3.6 km/h).

**5.- DESCRIPCION**

**5.1.-Equipos y materiales**

Los receptores GPS utilizan la información emitida por un conjunto de satélites, en forma de ondas de radio, para recabar datos de posición y tiempo. Por tanto los resultados (datos) que indica un receptor GPS están influenciados por un conjunto de condiciones, entre ellas: configuración espacial de los satélites respecto al receptor, condiciones de la troposfera y de la ionosfera, efecto rebote de las señales de radio en edificios de cierta altura, precisión del equipo y calidad del software de cálculo de los datos.

Los equipos necesarios para llevar a cabo la calibración son:

- Un odómetro calibrado con trazabilidad a patrones nacionales, que se usa para medir la longitud del recorrido.
- Un cronómetro calibrado con trazabilidad a patrones nacionales, que se usa para medir el tiempo.

**5.2.-Conocimiento del funcionamiento del dispositivo**

Al proceder al encendido del aparato, es preciso esperar a que sintonice los satélites correspondientes. Esta situación se da cuando aparece en la pantalla del dispositivo la leyenda:

"Matrícula:"

	<b>Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo</b>	<b>Ref. PR-GPS</b> Página 8 de 18 Edición 02/09 Revisión 00
<p>El dispositivo no se puede calibrar hasta que aparezca el mensaje anterior, que indica que el dispositivo está listo para su uso. Los datos que pide a continuación son licencia y tarifa. Estos datos no influyen en la medida, sino que se usan para su posterior almacenamiento en un PC de escritorio.</p> <p>Cuando el dispositivo está midiendo, aparecen en pantalla los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hora con precisión al segundo.</li> <li>• Número indicando la tarifa.</li> <li>• Distancia recorrida.</li> <li>• Velocidad.</li> <li>• HDOP</li> </ul> <p>Una vez finalizada la medida, es posible acceder a los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas totales realizadas.</li> <li>• Porcentaje de medidas imprecisas (esto es, con un elevado valor de HDOP).</li> <li>• Porcentaje de medidas inválidas (esto es, sin satélites o con una muy pobre información de los satélites).</li> </ul> <p><b>5.3.-Operaciones previas</b></p> <p>Como paso previo a la calibración, se procede a comprobar el funcionamiento del dispositivo GPS para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se comprueban la marca y el modelo del receptor GPS. En el manual de dicho receptor se comprueban los valores de los siguientes datos: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Valor CEP: menor que 4 m.</li> <li>○ Frecuencia de recogida de datos: mayor o igual a 1 Hz.</li> <li>○ Frecuencia de sintonización: 1575,42 MHz.</li> <li>○ Código: C/A.</li> <li>○ Número de canales paralelos: mayor o igual a 32.</li> <li>○ Precisión de velocidad: menor o igual a 0.1 nudos RMS.</li> </ul> </li> <li>• Se procede al encendido del dispositivo, comprobando si está en condiciones de aportar datos de posicionado. En cualquier caso, debe esperarse a que el dispositivo esté en ese estado para realizar cualquier medición.</li> <li>• Se comprueba que el dispositivo permite la visualización de la distancia recorrida en m.</li> <li>• Se comprueba que el dispositivo permite la visualización del tiempo en s.</li> <li>• Se comprueba que en el dispositivo no existen datos almacenados. En caso de que existan se procede a su borrado.</li> </ul>		

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 9 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

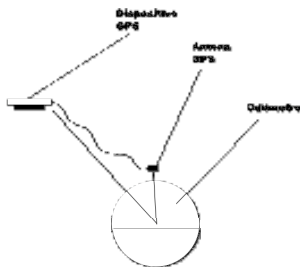
- Se realiza una primera comprobación de funcionamiento, que tiene como objetivo verificar que el valor HDOP es inferior a 2.
- En una segunda comprobación se cubren la antena y el receptor GPS de forma que se impida la llegada de la señal de los satélites y se repite la comprobación anterior. En este caso el dispositivo debe indicar, con un valor de HDOP mayor o igual a 100, la inexistencia de satélites de cuyas señales pueda extraer datos.

**5.4.-Metodología de recogida de datos para la Calibración GPS**

Como ya se indicó previamente, se realiza por una parte la calibración de la medida del tiempo y por otra parte la calibración de la distancia recorrida.

El proceso de calibración de la medida del tiempo se basa en el uso de una señal horaria calibrada.

El proceso de calibración de la medida de la distancia se basa en el uso simultáneo del dispositivo GPS para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo y de un odómetro calibrado, de forma que ambos dispositivos realizan la medición del mismo trayecto en el mismo instante de tiempo. Para ello se procede a colocar el dispositivo GPS sobre el odómetro, como se indica en el siguiente esquema, de forma que la antena GPS se sitúa en la vertical del centro de la rueda del odómetro:



### **5.5.-Proceso de calibración**

Mediante este proceso se pretende determinar la incertidumbre del dispositivo GPS en la medida de:

- Distancia.
- Tiempo.

Para alcanzar estas metas se procede a realizar los experimentos correspondientes de repetibilidad de las medidas. Dada la especial naturaleza de las señales que se usan para llevar a cabo las medidas, debe tenerse en cuenta el efecto de la geometría de los satélites, representado en el valor de la variable adimensional HDOP. El dispositivo aporta información porcentual sobre aquellas medidas que han sido recogidas cuando la geometría de los satélites provoca un valor de HDOP superior a 2 (medidas imprecisas) e información porcentual de aquellas medidas que han sido recogidas en ausencia de señal de satélites (medidas incorrectas).

### **5.6.-Repetibilidad de las lecturas**

El concepto de repetibilidad expresa la capacidad del GPS para obtener resultados similares en la medida del mismo mensurando. Se expresa mediante la desviación típica de un conjunto de lecturas repetidas.

#### **5.6.1-Tiempo**

El cálculo de la desviación típica se realiza sobre los datos de 12 medidas de tiempo, en series de 4 medidas cada una. El intervalo a medir es de 3600 segundos. El número de medidas llevadas a cabo permite el uso de la desviación típica como medida cuantitativa de la precisión.

#### **5.6.2.- Distancia**

El cálculo de la desviación típica se realiza usando una adaptación del procedimiento completo recogido en la norma ISO 17123-8:2007.

Con este procedimiento adaptado se pretende realizar un análisis estadístico de los errores en el cálculo de distancias entre dos puntos,  $P_1$  y  $P_2$ . Para ello se parte de un punto  $P_1$  y se recorre la distancia hasta un punto  $P_2$  dónde se procede a recoger los datos. Las distancias  $d = d(P_1, P_2)$  serán 500 m., 1.000 m. y 5.000 m. y su medida se lleva a cabo de forma simultánea en un odómetro calibrado y en el dispositivo GPS.



**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 11 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

Las medidas se realizan en cuatro días diferentes, realizando tres series cada día para cada una de las distancias y estando cada serie compuesta por tres medidas. En cada medida se recoge el valor de la distancia  $d = d(P_1, P_2)$ . Para eliminar el efecto rebote de las señales de los satélites, los conjuntos de medidas se distribuyen uniformemente a lo largo de 25 minutos. Deben realizarse al menos tres series de medidas, separadas temporalmente al menos 24 horas para tener en cuenta los efectos de la ionosfera y la troposfera en la transmisión de las señales de los satélites.

Esta forma de llevar a cabo la calibración permite el uso de la desviación típica como una medida cuantitativa de la precisión en distintas condiciones de recepción de la señal de los satélites.

Para realizar las medidas, se parte de una situación en la que el dispositivo GPS y el odómetro calibrado están parados, procediendo a su inicialización. A continuación se realiza el recorrido. En el punto de partida ( $P_1$ ), cuando el odómetro se encuentra parado, se hace puesta a cero y se procede a activar el dispositivo GPS para que empiece a calcular distancias. Al alcanzar el punto final ( $P_2$ ), una vez que el dispositivo GPS y el odómetro se encuentran parados, se procede a la anotación de los datos que posteriormente se usan en el tratamiento de datos.

**5.7.-Toma y tratamiento de datos**

**5.7.1.- Tiempo**

Para cada una de las series de 4 medidas del tiempo se calculan:

- $t_{ij}$ : tiempo medido por el dispositivo en la serie i, medida j.
- $t_{ij}^*$ : tiempo medido por la señal horaria calibrada en la serie i, medida j.
- $\varepsilon_{ij} = t_{ij} - t_{ij}^*$ : desviación del tiempo.

Con los datos de las 3 series, se calcula el valor medio de las medidas de tiempo realizadas:

$$\bar{t} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 t_{ij}$$

Como  $r_{ij} = \bar{t} - t_{ij}$  son los residuos del ajuste por mínimos cuadrados y  $v_r = (m \times n - 1) = 3 \times 4 - 1 = 11$  son los grados de libertad para el tiempo, entonces la desviación estándar [según 3] es:

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 12 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

$$s = \sqrt{\frac{\sum r^2}{11}}, \text{ siendo } \sum r^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 r_{ij}^2$$

Los datos que se recogen para cada instrumento a calibrar son:

- Identificación de la señal horaria usada para la medida del tiempo.
- Fecha de realización.

Para cada prueba:

- Número de medida.
- Número de serie.
- Horas de comienzo y fin del recorrido.
- Técnico que realiza la calibración.
- Datos de la calibración e incertidumbres.

**5.7.2.- Distancia**

Para cada una de las series, se calculan:

- $d_{ij}$ : distancia medida por el GPS en la serie i, medida j.
- $d_{ij}^*$ : distancia medida por el odómetro en la serie i, medida j.
- $\varepsilon_{ij} = d_{ij} - d_{ij}^*$ : desviación de la distancia.

Una vez que se tienen los datos de las tres series, una estimación de la distancia es:

- $\bar{d}$ : valor medio de las medias realizadas entre los puntos  $P_1$  y  $P_2$ .
- $\bar{d} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 d_{ij}$

Siendo  $r_{ij} = \bar{d} - d_{ij}$  residuos del ajuste por mínimos cuadrados.

Para calcular la desviación estándar, es preciso calcular:  $\sum r^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 d_{ij}^2$

Los grados de libertad para la distancia son:  $v_d = (m \times n - 1) = 3 \times 4 - 1 = 11$ , y la desviación

estándar [según 3] es:  $s = \sqrt{\frac{\sum r^2}{11}}$

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 13 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

No se tienen en cuenta aquellas medidas obtenidas en recorridos en los que se cumplan al menos una de las siguientes condiciones:

- Se han realizado paradas durante el recorrido.
- El porcentaje de medias imprecisas supera el 5%.
- Se han detectado medidas incorrectas.

Los datos que se recogen para cada instrumento a calibrar son:

- Identificación del odómetro usado para la medida del recorrido.
- Fecha de realización.

Para cada prueba:

- Número de medida.
- Número de serie.
- Horas de comienzo y fin del recorrido.
- Técnico que realiza la calibración.
- Datos de la calibración e incertidumbres.

## **6.- RESULTADOS**

Una vez se han llevado a cabo las medidas en los distintos recorridos, se analizan los resultados, calculando los valores de incertidumbre.

### **6.1.-Cálculo de incertidumbres**

#### **6.1.1.- Calibración del dispositivo GPS patrón (distancia)**

Para el cálculo de incertidumbre de calibración se sigue la guía de la referencia [4].

La expresión matemática de la que se parte para la evaluación de la incertidumbre, teniendo en cuenta que se trata de determinar la corrección de calibración en función de las variables de entrada. es:

$$C_c = I_p - I_j + \delta_{Der} + \delta I_d$$

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 14 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

Donde:

- $C_c$  Corrección de calibración del instrumento (GPS)
- $I_p$  Lectura del patrón de referencia (Odómetro)
- $I_j$  Lectura del instrumento en cada punto de calibración. (GPS)
- $\delta_{Der}$  Corrección debida a la deriva del patrón. (Odómetro)
- $\delta I_d$  Contribución debida a la división de escala del instrumento. (GPS)

**Según la ley de propagación de incertidumbres tendremos la expresión para la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  (se supone que no existe correlación entre las variables):**

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{df}{dx} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

Aplicando lo anterior para el caso de la evaluación de la incertidumbre de calibración y en concreto de la variable de salida  $C_c$ :

$$C_c = f(I_j, I_p, \delta_{Der}, \delta I_d)$$

será:

$$u_c^2(C_c) = \left[ \frac{df}{dI_j} \right]^2 u^2(I_j) + \left[ \frac{df}{dI_p} \right]^2 u^2(I_p) + \left[ \frac{df}{d\delta_{Der}} \right]^2 u^2(\delta_{Der}) + \left[ \frac{df}{d\delta I_d} \right]^2 u^2(\delta I_d)$$

operando tendremos:

$$u_c^2(C_c) = u^2(I_j) + u^2(I_p) + u^2(\delta_{Der}) + u^2(\delta I_d)$$

A continuación se especifica cómo se estiman las contribuciones a la incertidumbre final:

• **Tipo A:**

- A1 Desviación típica de las lecturas (GPS)

• **Tipo B:**

- B1 Longitud patrón de referencia (Odómetro)
- B2 Corrección por deriva del patrón (Odómetro)
- B3 Corrección por resolución finita del instrumento (GPS)

**Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo**

Ref. PR-GPS  
Página 15 de 18  
Edición 02/09  
Revisión 00

1-Debida al patrón utilizado como referencia,  $u(I_p)$

En la influencia de los patrones utilizados para la calibración se pueden considerar las siguientes contribuciones:

-El Odómetro patrón que se utilice para la calibración deberá estar calibrado, por lo que se dispondrá de su certificado de calibración en vigor, en el que se incluirá la incertidumbre expandida  $U_{cal}$  para un determinado factor de cobertura  $k_{cal}$  (por regla general será  $k=2$ ), luego la incertidumbre típica del patrón utilizado para la calibración será:

$$u(I_p) = U_{cal} / k_{cal}$$

2-Debida a la deriva del patrón,  $u(\delta I_{Der})$

-Por otro lado consideraremos la posible deriva entre calibraciones, ésta la podremos evaluar del histórico de calibración del Odómetro (a partir de los datos de máxima diferencia de corrección entre calibraciones).

$$u(\delta I_{Der}) = \frac{d}{\sqrt{3}} \text{ siendo } d \text{ la deriva. (entre dos calibraciones)}$$

Si no disponemos de éste valor, podremos estimarlo del orden de la incertidumbre de calibración, tomada como semi-amplitud de una distribución rectangular, por tanto la incertidumbre típica será:

$$u(\delta I_{Der}) = \frac{U_{cal}}{\sqrt{3}} \text{ (cuando no se conoce el valor de la deriva)}$$

En consecuencia la contribución a la incertidumbre del patrón de referencia será:

$$u(I_p) = \sqrt{(u_{cal})^2 + (u_{der})^2}$$

3-Debida a la falta de repetibilidad del instrumento,  $u(I_j)$

De la calibración en los diferentes puntos tendremos unas desviaciones típicas, el valor de estas desviaciones la tomaremos para determinar la evaluación de Tipo A de incertidumbre:

$$u(I_j) = \frac{s_j}{\sqrt{n}}$$

siendo n el número de medidas repetidas que se han realizado en cada punto.

4-Debido a la división de escala (resolución);  $u(\delta l_d)$

Suponiendo una distribución rectangular de semiamplitud  $d/2$ , la incertidumbre típica será:

$$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}}$$

**Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada de las correcciones locales**

Magnitud $X_m$	Estimación $x_m$	Incertidumbre típica $u(x_m)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad $C_m$	Contribución a la incertidumbre $u_m(c_i)$
$I_p$	$I_p$	$u(I_p)$	Normal	1	$U_{cal} / k_{cal}$
$I_j$	$I_j$	$u(I_j) = \frac{s_j}{\sqrt{n}}$	Normal	-1	$-\frac{s_j}{\sqrt{n}}$
$\delta I_{Der}$	0	$u(\delta I_{Der}) = \frac{d}{\sqrt{3}}$ o $u(\delta I_{Der}) = \frac{U_{cal}}{\sqrt{3}}$	Rectangular	1	$u(\delta I_{Der}) = \frac{d}{\sqrt{3}}$ o $u(\delta I_{Der}) = \frac{U_{cal}}{\sqrt{3}}$
$\delta l_d$	0	$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}}$	Rectangular	1	$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}}$
$C_i$	$c_i = \sum_m x_m$	Incertidumbre combinada $u(C_i)$			$u(C_i) = \sqrt{\sum_m u_m^2(c_i)}$
		Incertidumbre expandida $U(C_i)$			$U = k u$

La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por un factor de cobertura  $k$ .

Podríamos atribuir una distribución normal al mensurando y multiplicar la incertidumbre combinada por el factor de cobertura  $k=2$ , que corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente un 95%, por lo que la Incertidumbre expandida de calibración resulta ser:

$$U = k u(C_i)$$

**6.1.2.- Cálculo de incertidumbres de medida frente al GPS patrón**

Para el cálculo de incertidumbre de medida se sigue la guía de la referencia [4].

La expresión matemática de la que se parte para la evaluación de la incertidumbre, teniendo en cuenta que se trata de determinar la incertidumbre de medida en función de las variables de entrada, es:

$$U_m = I_p - I_j + \delta_{Der} + \delta I_d$$

donde:

- $U_m$  Incertidumbre de medida (Empleando GPS como patrón)
- $I_p$  Lectura del patrón de referencia (GPS)
- $I_j$  Lectura del instrumento en cada punto de calibración. (Vehículo)
- $\delta_{Der}$  Corrección debida a la deriva del patrón. (GPS)
- $\delta I_d$  Contribución debida a la división de escala del instrumento. ((Vehículo)

De forma análoga a lo expresado en el punto 6.1.1. se obtendrá la incertidumbre combinada de la medida:

$$u_M = \sqrt{u^2(I_{j\text{vehículo}}) + u^2(I_{p\text{GPS}}) + u^2(\delta I_{Der\text{GPS}}) + u^2(\delta I_{d\text{vehículo}})}$$

La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por un factor de cobertura k.

Podríamos atribuir una distribución normal al mensurando y multiplicar la incertidumbre combinada por el factor de cobertura k=2, que corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente un 95%, por lo que la Incertidumbre expandida de calibración resulta ser:

$$U = k u(Ci)$$

**6.1.3.- Tiempo**

Para el cálculo de la incertidumbre combinada, se tienen en cuenta:

- La desviación estándar de las medidas (calculada siguiendo el apartado 5.7.1).
- La incertidumbre típica de la señal horaria calibrad:  $u_{señal}$

- La resolución del dispositivo indicador:  $u_{res}^2 = \frac{\left(\frac{res}{2}\right)^2}{3} = \frac{res^2}{12}$

La expresión final de la incertidumbre es:  $u = \sqrt{u_{señal}^2 + s^2 + u_{res}^2}$

	<b>Procedimiento de calibración de un dispositivo GPS patrón para la verificación del conjunto taxímetro-vehículo</b>	<b>Ref. PR-GPS</b> Página 18 de 18 Edición 02/09 Revisión 00
<p><b>7.- BIBLIOGRAFIA</b></p> <p>[1] "Vocabulario Internacional de Términos Básicos y Generales de Metrología". Centro Español de Metrología. 1994.</p> <p>[2] Orden ITC/3709/2006 de 22 de noviembre. BOE nº 292, 7-dic-2006.</p> <p>[3] International Standard ISO 17123-8.</p> <p>[4] "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida". Centro Español de Metrología. 1998.</p>		



## Capítulo 8

# Conclusiones y trabajo futuro

Tomando como punto de partida un problema real planteado por la empresa ITVASA al Grupo de Metrología y Modelos de la Univeridad de Oviedo, se han llevado a cabo estudios sobre el uso conjunto de sensores cuya precisión (o tolerancia) depende de factores difíciles de controlar y se han desarrollado métodos para reducir dicha tolerancia en los datos de dichos sensores.

Concretamente, los métodos desarrollados se han aplicado a la medida de datos para la comprobación del cálculo correcto de la tarifa que realizan los dispositivos taquicrométricos (taxímetros).

Por una parte se ha considerado el uso de datos GPS para el cálculo de la distancia recorrida por un vehículo.

Ya que es importante asegurar que el dispositivo verificador no rechace ningún taxímetro cuyos errores estén dentro de los márgenes permitidos, se ha desarrollado un método que permite conocer la longitud de la trayectoria más larga compatible con los datos de posicionado (CSM). Para ello se ha ideado una representación borrosa de los datos GPS y se han diseñado filtros para eliminar datos colineales, espúreos o aquellos que darían lugar a trayectorias imposibles debidas a la inercia del vehículo. A la vista de los datos obtenidos, tanto en trayectorias sintéticas como reales, se llega a la conclusión que el filtrado usando el algoritmo NSGA-II garantiza que las medidas nunca son inferiores a las reales y que la desviación típica de las mismas (muy relacionada con la incertidumbre metroológica) disminuye considerablemente.

Utilizando el mismo esquema anterior de representación borrosa de los datos, se ha presentado una propuesta novedosa para realizar la medición de la longitud de un trayecto usando datos GPS y calcular la tolerancia de la medida. Esto es posible mediante el cálculo de una familia de intervalos anidados para la cota superior e inferior y para los niveles de probabilidades habituales. La estimación se realiza utilizando un algoritmo de búsqueda que ajusta los modelos compatibles con las mediciones realizadas que proporcionan la longitud máxima y mínima. Si

además se usan los datos (nítidos) de velocidad y rumbo del movimiento para realizar una fusión de información, se mejora de forma notable la precisión global del sistema.

Este procedimiento de fusión de información puede extenderse a cualquier tipo y número de dispositivos que proporcionen la velocidad, la orientación e incluso la aceleración y por lo tanto a dispositivos como IMU's, brújulas digitales, más de un GPS, etc.

Además de los desarrollos teóricos citados, se ha llevado a la práctica el trabajo realizado y se ha diseñado y creado un dispositivo autónomo que permite la verificación de taxímetros. Este dispositivo lleva integrado un receptor GPS y tres microcontroladores que procesan los datos. El dispositivo es susceptible de ser patentado, trámite que está a punto de concluir.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la base de cálculo de las tarifas kilométricas por parte de los taxímetros es el diámetro efectivo de las ruedas, es importante comprobar que las superficies de los neumáticos presenten las condiciones adecuadas y no presenten un desgaste mayor que el permitido. En este trabajo se han establecido las bases para la aplicación de las técnicas de visión activa al análisis del estado de los neumáticos de vehículos a partir de datos de baja calidad. Se propone un sistema con dos cámaras y un haz láser y se han realizado simulaciones del funcionamiento de este sistema, llegando a la conclusión de que es necesario establecer cotas para la imprecisión debida al desenfoque del haz láser mediante una aproximación intervalar. Debido a la necesidad de analizar todo el perímetro del neumático se propone usar el flujo óptico 3D para estimar el movimiento de la sección del neumático al girar la rueda.

El trabajo realizado no cierra el paso a futuras investigaciones y desarrollos, dentro de los que se pueden citar:

- Estudios sobre la mejora de la precisión que se puede conseguir en el cálculo de distancias y velocidades al fusionar información de GPS y de unidades inerciales, diseñando además un dispositivo que permita la comprobación de las mejoras con datos reales.
- Recientemente han aparecido en el mercado receptores GPS que permiten conocer la precisión del cálculo de los datos de velocidad por medio de la variable DOP correspondiente (SDOP). Esto permitirá tratar dicha magnitud como un dato borroso, al igual que se hace en este trabajo con la posición, pudiendo extender el estudio que se ha hecho en esta tesis.
- Análisis de la precisión que se puede alcanzar con el sistema de visión activa y flujo óptico 3D sobre datos reales.
- En función de los resultados obtenidos con el análisis anterior, estudiar la viabilidad y, en su caso, diseñar, desarrollar y patentar un sistema que permita la reconstrucción tridimensional de la superficie de los neumáticos.

# Bibliografía

- [1] Pastorius W., Snow M. Laser line technology enhances rubber production. Rubber and Plastics News. April. 2007.
- [2] Image processing in the fast lane: tire tread check at 120 km/h. Application Story. Kontron.
- [3] Sánchez L., Couso I. Advocating the use of Imprecisely Observed Data in Genetic Fuzzy Systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 15(4): 551-562. 2007.
- [4] Abbasbandy S., Asady B. Ranking fuzzy numbers by sign distance. Information Sciences 176: 2405-2416. 2006.
- [5] Anile A.M., Falcidieno B., Gallo G., Spagnuolo M., Spinello S. Modeling uncertain data with fuzzy B-splines. Fuzzy Sets and Systems. 113: 397-410, 2000.
- [6] Berman P., Schnitger G. On the complexity of approximating the independent set problem, Information and Computing. 96: 77-94. 1992.
- [7] de Boor C. On Calculating with B-splines, Journal of Approximation Theory. 6: 50-62, 1972.
- [8] Chen L., Lu H. The preference order of fuzzy numbers, Computer and Mathematics with Applications. 44: 1455-1465. 2002.
- [9] Coello C.A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques. Knowledge and Information Systems. An International Journal. 1(3):269-308. 1999.
- [10] Couso I., Montes S., Gil P. The necessity of the strong alpha-cuts of a fuzzy set, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 9(2): 249-262. 2001.
- [11] Cressie N.A.C. Statistics for spatial data. John Wiley & Sons. 1991.

- [12] Deb K., Agrawal S., Pratab A., T. Meyarivan T. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II,  
Schoenauer M., Deb K., Rudolph G., Yao X., Lutton E., Merelo J.J., Schwefel H., editors. Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference. Springer-Verlag, 849-858. 2000.
- [13] Deb K., Goel T. Controlled Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms for Better Convergence  
Zitzler E., Deb K., Thiele L., Coello C., Corne D., editors. First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. 67-81. Springer-Verlag. 2001.
- [14] van Diggelen F. GNSS Accuracy: Lies, Damn Lies, and Statistics. *GPS World*. 9(1): 41-45. 2007.
- [15] Dussault C., Courtois R., Ouellet J. P., Huot J. Influence of Satellite Geometry and Differential Correction on GPS Location Accuracy. *Wildlife Society Bulletin*. 29(1): 171-179. 2001
- [16] Estkowski R., Mitchell J. S. B. Simplifying a polygonal subdivision while keeping it simple. SCG '01: Proceedings of the seventeenth annual symposium on Computational geometry. 40-49. ACM Press. 2002.
- [17] Farina M., Amato P., Fuzzy Optimality and Evolutionary Multiobjective Optimization, Fleming P.J., Zitzler E., Deb K., Thiele L. eds. Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Second International Conference, EMO 2003. 58-72. Springer-Verlag. 2003.
- [18] Carlos M. Fonseca , Peter J. Fleming. Multiobjective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithms. Part I: A Unified Formulation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*. 28(1): 26-37. 1998.
- [19] Ganesan K., Veeramani P., Fuzzy linear programming with trapezoid fuzzy numbers, *Annals of Operation Research*. 143: 305-315. 2006.
- [20] Goodman, Nguyen. Uncertainty Models for Knowledge-based Systems. North-Holland. 1985.
- [21] Hapke M., Jaszkievicz A., Slowinski R. Pareto Simulated Annealing for Fuzzy Multi-Objective Combinatorial Optimization. *Journal of Heuristics*. 6(3): 329-345. 2000.

- [22] Hershberger J., Snoeyink J. Speeding up the douglas-peucker line simplification algorithm. Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling. 134-143. 1992.
- [23] Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins. GPS Theory and Practice, Springer. 2004.
- [24] Jahanshahloo G. R., Soleimani-damaneh M., Nasbaradi E. Measure of efficiency in DEA with fuzzy input-output levels: a methodology for assessing, ranking and imposing of weight restrictions, Applied Mathematics and Computation. 156: 175-187. 2004.
- [25] Kiyota T., Tsuji Y., Kondo E. New Multiobjective Fuzzy Optimization Method and Its Application. American Control Conference ACS'2000. 6: 4224-4228. 2000.
- [26] Köppen M., Franke K., Nickolay B. Fuzzy-Pareto Dominance Driven Multiobjective Genetic Algorithm. In Proceedings of the 10th IFSA World Congress (IFSA 2003). 450-453. 2003.
- [27] Koduru P., Das S., Welch S., Roe J.L. Fuzzy Dominance Based Multiobjective GA-Simplex Hybrid Algorithms Applied to Gene Network Models. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. Part I. Springer-Verlag.
- [28] Langley R.B. Dilution of Precision. GPS World. 10(5): 52-59. 1999.
- [29] Langley R.B., The Mathematics of GPS. GPS World. 2(7): 45-59. 1991.
- [30] Manning, J., Harvey, B. Status of the Australian geocentric datum. Aust. Surveyor. 39(1): 28-33. 1994.
- [31] Meratnia N., de By R.A. Trajectory representation in location-based services : problems and solutions. Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Web and Wireless Geographical Systems (W2GIS 2003) in conjunction with the Fourth International Conference on Web Information Systems Engineering (WISE). 18-24. 2003.
- [32] Mitchell H.B. Ranking type-2 fuzzy numbers. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 14(2): 287-294. 2006.
- [33] Sánchez, L., Couso, I., Casillas, J. Modeling vague data with genetic fuzzy systems under a combination of crisp and imprecise criteria. First IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (MCDM 2007). 30-37. 2007.

- [34] Sheen J. N. Fuzzy evaluation of Cogeneration Alternatives on a Petrochemical Industry. *Computers and Mathematics with Applications*. 49: 741-755. 2006.
- [35] Strang G., Borre K. Random Variables and Covariance Matrices, in *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press. 1997.
- [36] Snyder, J. P., *Map Projections Used by the U. S. Geological Survey*. 2nd edition, Geological Survey Bulletin. U. S. Government Printing Office. 1982.
- [37] Sun H., Wu J. A new approach for ranking fuzzy numbers based on fuzzy simulation analysis method *Applied Mathematics and Computation*. 174: 755-767. 2006.
- [38] Tran L., Duckstein L. Comparisons of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure. *Fuzzy Sets and Systems*. 130: 321-341. 2002.
- [39] Trebi-Ollennu A., White B. A. Multiobjective Fuzzy Genetic Algorithm Optimization Approach to Nonlinear Control System Design. *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications*. 2(144): 137-142. 1997.
- [40] Wang Y-M., Greatbanks R., Yang J-B. Interval efficiency assessment using data envelopment analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 153: 347-370. 2005.
- [41] Yeh C-H., Deng H. A practical Approach to fuzzy utilities comparison in fuzzy multicriteria analysis. *International Journal of Approximate Reasoning*. 35: 179-194. 2004.
- [42] Youssef H., Sait S.M., Khan A. Fuzzy Simulated Evolution Algorithm for Topology Design on Campus Networks 2000 Congress on Evolutionary Computation. 1: 180-187. 2000.
- [43] Zhang J., Pham B., Chen P. Fuzzy Genetic Algorithms Based on Level Interval Algorithm. Kazmierczak, E, Eds. *Proceedings The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 1424-1427. 2001.
- [44] Villar J., Otero A., Otero J., Sánchez L. Taximeter verification using imprecise data from GPS. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 22(2): 250-260. 2009.
- [45] Villar J., Otero A., Otero J., Sánchez L. Taximeter verification with GPS and soft computing techniques. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*. 14(4): 405-418. Springer. 2009.
- [46] Ben-Arieh D., Chang S., Rys M., Zhang G. Geometric Modeling of Highways Using Global Positioning System Data and B-Spline Approximation. *Journal of Transportation Engineering*. 130(2): 632-636. 2004.

- [47] Dou, W., Ruan, S., Chen, Y., Bloyet, D., Constans, J. A framework of fuzzy information fusion for the segmentation of brain tumor tissues on MR images. *Image Vision and Computing*. 25(2): 164-171. 2007.
- [48] Mebane Jr., W. M. , Sekhon, J. S. The rgenoud Package. 2002.
- [49] Castro M, Iglesias L, Rodríguez-Solano R, Sánchez JA. Geometric modelling of highways using global positioning system (GPS) data and spline approximation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*,14(4): 233-243.
- [50] T. Witte, A. Wilson. Interval efficiency assessment using data envelopment analysis. Accuracy of non-differential GPS for the determination of speed over ground. 37(12): 1891-1898. 2005.
- [51] Noureldin A., Irvine-Halliday D., Mintchev M.P. Accuracy limitations of FOG-based continuous measurement-while-drilling surveying instruments for horizontal wells. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 51(6): 1177-1191. 2002.
- [52] Noureldin A., El-Shafie A., El-Sheimy N. Adaptive neuro-fuzzy module for inertial navigation system/global positioning system integration utilising position and velocity updates with real-time cross-validation. *Radar, Sonar and Navigation, IET*. 1(5): 388-396. 2007.
- [53] Noureldin A., Karamat T. B., Eberts M. D., El-Shafie A. Performance Enhancement of MEMS-Based INS/GPS Integration for Low-Cost Navigation Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, . 58(3): 1077-1096. 2009.
- [54] Loebis D., Sutton R., Chudley J., Naeem W. Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system. *Control Engineering Practice*. 12(12): 1531-1539. 2004
- [55] Escamilla-Ambrosio P.J., Mort N. A hybrid Kalman filter-fuzzy logic multisensor data fusion architecture with fault tolerant characteristics. *Proceedings of the 2001 international conference on Artificial Intelligence*. 361-367. 2001.
- [56] Deelertpalboon C., Parnichkun M. Fusion of GPS, compass, and camera for localization of an intelligent vehicle. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 5(4): 315-326. 2008.
- [57] Swanson S.R. A fuzzy navigational state estimator for GPS/INS integration. *IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium*. 541-548. 1998.

- [58] Wu, C., Chou, H., Su, W. Direct transformation of coordinates for GPS positioning using the techniques of genetic programming and symbolic regression. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 21(8): 1347-1359. 2008.
- [59] Jwo, D.J., Chen, J. J. GPS/INS Navigation Filter Designs Using Neural Network with Optimization Techniques. LNCS. 4221: 461-470. 2006. Springer-Verlag.
- [60] Saleh H. A., Chelouah R. The design of the global navigation satellite system surveying networks using genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 17(1): 111-122. 2004.
- [61] Paoli J.N., Straussb O., Tisseyre B., Roger J.M., Guillaume S. Spatial data fusion for qualitative estimation of fuzzy request zones: Application on precision viticulture. *Fuzzy Sets and Systems*. 158: 535-554. 2007.
- [62] Liu, Zh., Du, Z., Zou, R. Application of the Improved Genetic Algorithms With Real Code on GPS Data Processing. *ICNC '07: Proceedings of the Third International Conference on Natural Computation*. 420-424. 2007.
- [63] Chiang K., Noureldin A., El-Sheimy N. Constructive neural-networks-based MEMS/GPS integration scheme. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 44(2): 582-594. 2008.
- [64] Cho S. Y., Choi W. S. Robust positioning technique in low-cost DR/GPS for land navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 55(4): 1131-1142. 2006.
- [65] Cho S. Y., Kim B. D. Adaptive IIR/FIR fusion filter and its application to the INS/GPS integrated system. *Automatica*. 44(8): 2040-2047. 2008.
- [66] Chen C., Ibanez-Guzman J., Le-Marchand O. Low-cost loosely-coupled GPS/odometer fusion: a pattern recognition aided approach. *11th International Conference on Information Fusion*. 1-6. 2008.
- [67] Cho S. I, Lee J. H. Autonomous speedsprayer using differential Global Positioning System, genetic algorithm and fuzzy control. *Journal of Agricultural Engineering*. 76(2): 111-119. 2000.
- [68] Chiang K., Huang Y. An intelligent navigator for seamless INS/GPS integrated land vehicle navigation applications. *Applications of Soft Computing*. 8(1): 722-733. 2008.



- [69] Chiang K., Huang Y. An intelligent and autonomous MEMS IMU/GPS integration scheme for low cost land navigation applications. *GPS Solutions*. 12(2): 135-146. 2008.
- [70] LaViola J. Double Exponential Smoothing: An Alternative to Kalman Filter-Based Predictive Tracking. *Proceedings of the Eorkshop on Virtual Environments*. 199-206. 2003.
- [71] Park M., Gao Y. Error and performance analysis of MEMS-based inertial sensors with a low-cost GPS receiver. *Sensors*. 8(4): 2240-2261. 2008.
- [72] Li Y., Rizos C., Wang J., Mumford P., Ding W. Seamless navigation through GPS outages. A low-cost GPS/INS solution. *Inside GNSS*. 3(5): 39-44. 2008.
- [73] Xia O., Rao M., Ying Y., Shen X. Adaptive fading Kalman filter with an application. *Automatica*. 30(8): 1333-1338. 1994.
- [74] Suna L., Yangb J., Mahmassanic H. Travel time estimation based on piecewise truncated quadratic speed trajectory. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 42(1): 173-186. 2008.
- [75] Partsinevelos P., Agouris P., Stefanidis A. Reconstructing spatiotemporal trajectories from sparse data. *International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 60(1):3-16. 2005.
- [76] Jiménez F., Aparicio F., Estrada G. Measurement uncertainty determination and curve-fitting algorithms for development of accurate digital maps for advanced driver assistance systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 17(3): 225-239. 2009.
- [77] Si-Jie Yu S, Sukumara S.R., Koschana A.F., Pagea D.L., Abidia M.A. 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. *Optics and Lasers in Engineering*. 45(7): 808-818. 2007.
- [78] Taylor G., Brunson C., Li J., Olden A., Steup D., Winter M. GPS accuracy estimation using map matching techniques: Applied to vehicle positioning and odometer calibration. *Computers, Environment and Urban Systems*. 30(6): 757-772. 2006.
- [79] Palmer M.C. Calculation of distance traveled by fishing vessels using GPS positional data: A theoretical evaluation of the sources of error. *Fisheries Research*. 89(1): 57-64. 2008.
- [80] Edelkamp S., Jabbar S., Willhalm T. Geometric travel planning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 6(1):5-16. 2005.

- [81] Douglas D., Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *IEEE Transactions on The Canadian Cartographer*. 10(2): 112-122. 1973.
- [82] Aloï D., Korniyenko O. Comparative performance analysis of a Kalman filter and a modified double estimation of automotive platforms in an urban-canyon environment. *IEEE Transactions on Vehicle. Technology*. 56(5): 2880-2892. 2007.
- [83] Schubert R., Richter E., Wanielik G. Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking. *11th International Conference on Information Fusion*, 2008. 1-6. 2008.
- [84] Wang C., Hu Z., Uchimura K. Precise curvature estimation by cooperating with digital road map. *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 4(6): 859-864. 2008.
- [85] Gao J., Petovello., Cannon M. Integration of steering angle sensor with Global Positioning System and Micro-Electro-Mechanical Systems Inertial Measurement Unit for vehicular positioning. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 12(4): 159-167. 2008.
- [86] Otero J., Otero A., Sánchez L. 3D motion estimation of bubbles of gas in fluid glass, using an optical flow gradient technique extended to a third dimension. *Machine Vision and Applications*. 14(3): 185-191. 2003.
- [87] Adiv, G. Determining three-dimensional motion structure from optic flow generated by several moving objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 11(5):477-489. 1989.
- [88] Ahuja N., Abbott A.L. Active Stereo: Integrating Disparity, Vergence, Focus, Aperture, and Calibration for Surface Estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 15(10):1007-1029. 1993.
- [89] Anandan P. A computational framework an an algorithm for the measurement of visual motion. *International Journal of Computer Vision*. 2: 283-310. 1985.
- [90] McCane B., Galvin B., Novins K. On The Evaluation of Optical Flow Algorithms. Computer Science Department. University of Otago, New Zealand. 1998.
- [91] Ancona N., Poggio T. Optical Flow from 1D Correlation: Aplication to a simple Time-To-Crash Detector. Massachusetts Institute of Technology. Artificial Intelligence Laboratory and Center for Biological and Computational Learning. 1993.

- [92] Battiti R., Amaldi E., Koch C. Computing optical flow across multiple scales: An adaptive coarse-to-fine strategy. *International Journal of Computer Vision*. 6(2): 133-145, 1991.
- [93] Barron J.L., Fleet D.J., Beauchemin S.S. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*. 1(12): 43-77. 1995.
- [94] Beauchemin S. S. ,Barron J.L. The computation of Optical Flow. *ACM Computing Surveys*. 3(27): 433-467. 1996.
- [95] Ben-Tzvi D., Del Bimbo, Nesi P. Optical Flow from Constraint Lines Parametrization. *Pattern Recognition*. 11:1549-1561. 1993.
- [96] Weinstein M., Castleman K.R. Reconstructing 3D Specimens from 2D Section Images. *Proceedings of the SPIE*. 26:131-138. 1971.
- [97] Enkelmann W. Investigations of multigrid algorithms for the estimation of optical flow fields in image sequences. *IEEE Proceedings of Workshop on Motion: Representation and Analysis*. 81-87. 1986.
- [98] Heeger D.J. Optical flow using spatiotemporal filters. *International Journal of Computer Vision*. 1(4): 279-302. 1988.
- [99] Horn B.K.P., Schunk B.G. Determining Optical Flow. A.I. Memo N°572. Massachusetts Institute of Technology. Artificial Intelligence Laboratory. 1980.
- [100] Koenderink J.J., van Doorn A.J. Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*. 56: 247-254. 1987.
- [101] Murray D.W., Buxton B.F. Experiments in the Machine Interpretation of Visual Motion. Massachusetts Institute of Technology. 1990.
- [102] Nagel H.H. Displacement Vectors Derived from Second Order Intensity Variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 21. 1983.
- [103] Nesi P. Real-Time Motion Estimation. Department of Systems and Informatics. Faculty of Engineering, University of Florence. 1995.
- [104] Otero J., Otero A., Sánchez, L. Mode based hierarchical optical flow estimation. *Machine Graphics*. 10(4): 489-501. 2001.
- [105] Otte M., Nagel H.H. Optical flow estimation: Advances and comparisons. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (J.O. Eklundh, ed.)*. 51-60. 1994.

- [106] Shunck B.G. Image Flow Segmentation and Estimation by Constraint Line and Clustering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 11(10):1010-1027. 1989.
- [107] Silverman B.W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall. 1986.
- [108] Besl, P.J. Active, optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications*. 1(2): 127-152. 1988.
- [109] Chen S., Li Y., Zhang J., Wang W. *Active Sensor Planning for Multiview Vision Tasks*. Springer. 2008.
- [110] Wang, W. and Duncan, J.H. Recovering the three-dimensional motion and structure of multiple moving objects from binocular image flows. *Computer Vision and Image Understanding*, 63(3):430-446. 1996.
- [111] Yang , Z. and Wang, Y. F. Error analysis of 3D shape construction from structured lighting. *Pattern Recognition*. 29(2):189-206. 1996.
- [112] Vilaca, J.L. and Fonseca, J. and Pinho, A.C. Stereo Vision Calibration Procedure for 3D Surface measurements. *IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics, IECON 2006*. 3508-3513. 2006

## **Apéndice A**

# **Publicaciones aportadas**



## Publicación 1

- **Nombre de la revista:** Engineering Applications of Artificial Intelligence
- **Factor de impacto:** 1.444
- **Ranking:** 16/79 en Engineering, Multidisciplinary (Q1)



Contents lists available at ScienceDirect

## Engineering Applications of Artificial Intelligence

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/engappai](http://www.elsevier.com/locate/engappai)

## Taximeter verification using imprecise data from GPS

José Villar, Adolfo Otero, José Otero\*, Luciano Sánchez

Computer Science Department, Oviedo University, Spain

## ARTICLE INFO

*Article history:*  
 Received 20 July 2007  
 Received in revised form  
 29 May 2008  
 Accepted 11 July 2008  
 Available online 19 October 2008

*Keywords:*  
 Genetic fuzzy systems  
 Fuzzy fitness function  
 GPS  
 Metrology  
 Vague data

## ABSTRACT

Until recently, local governments in Spain were using machines with rolling cylinders for testing and verification of taximeters. However, the tyres condition can lead to errors in the process and the mechanical construction of the test equipment is not compatible with certain vehicles. Thus, a new measurement device should be designed.

In our opinion, the verification of a taximeter will not be reliable unless measurements taken on an actual taxi run are used. Global positioning system (GPS) sensors are intuitively well suited for this process, because they provide the position and the speed with independence from those car devices that are under test. Nevertheless, since GPS measurements are inherently imprecise, GPS-based sensors are difficult to homologate. In this paper we will show how these legal problems can be solved. We propose a method for computing an upper bound of the length of the trajectory, taking into account the vagueness of the GPS data. The uncertainty in the GPS data will be modelled by fuzzy techniques. The upper bound will be computed using a multiobjective evolutionary algorithm. The accuracy of the measurements will be improved further by combining it with restrictions based on the dynamic behavior of the vehicles.

© 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Taxi fares in Spain are revised once a year, and the taximeters must be recalibrated and verified by a Technical Inspection (TI) through a certified station. The tariff depends on two variables: the speed of the taxi and the distance travelled. In particular, while the speed of the taxi is lower than a threshold, the user is being charged for the elapsed time. Otherwise, he/she is charged for the distance.

Since 1990, the Metrology and Models group at Oviedo University has been responsible for the design of the equipment and devices needed for the verification of taxis in Asturias, Spain. Currently, the verification of the taximeters is being carried out using of a machine with rollers. The drive wheels are placed on the rollers, whose speed is regularly sampled. The test lasts a few minutes, while the driver must be assisted by a TI technician. The total distance in the simulated run is computed by multiplying the circumference of the roller by the number of turns, and the linear speed is estimated from the angular speed of the rollers.

However, the use of a machine with rollers presents some drawbacks:

1. The rollers have a relatively small radius, and the tyres do not deform the same over the rollers than over a flat surface. The

difference between the actual and the theoretical radius means that tyres appear to be smaller than they are for the system. Moreover, this error depends on the tyres condition and the weight of the vehicle.

2. A TI employee can only verify one taximeter at a time, and this task lasts between 15 and 30 min. The price charged for the test could be reduced if an unattended procedure is devised, for which this employee would not be needed.
3. Problems have been detected when verifying a taximeter in a car with electronic driving aids (such as ESP, TCS, etc.). In these cars, the signals that feed the taximeter are taken from the electronic control unit. But, when the car is placed in the rollers, two wheels are moving and the other two are locked. For certain brands of vehicles, the electronic control unit is not prepared for such an abnormal driving condition, and the unit does not produce information about the speed of the moving wheels.

The third problem is the most daunting, because it means that the verification of certain vehicles is not possible. In these cases, length and time fares are verified in two different tests. A chronometer is used for verifying the time fare, and the distance fare is being checked through an actual run of the cab, in a circuit with a known length. Nevertheless, not all TI stations own this kind of facilities. Moreover, we have concerns with this procedure, because the speed of the taxi is metered with the instruments of the vehicle being tested.

\* Corresponding author. Tel.: +34 98 5182500; fax: +34 98 5103382.  
 E-mail addresses: [villarjose@uniovi.es](mailto:villarjose@uniovi.es) (J. Villar), [otero@lsi.uniovi.es](mailto:otero@lsi.uniovi.es) (A. Otero), [jotero@lsi.uniovi.es](mailto:jotero@lsi.uniovi.es), [jotero@uniovi.es](mailto:jotero@uniovi.es) (J. Otero), [luciano@uniovi.es](mailto:luciano@uniovi.es) (L. Sánchez).



In this situation, ITVASA, the company responsible of the TI in Asturias, Spain, asked the Metrology and Models group at Oviedo University for the design and development of a system capable of the verification of taximeters task with the following requirements: (a) the measures should not depend on the condition of the tyres of the vehicle, (b) it should be possible to verify the time fare and the length fare in an unique test, (c) the test should be unattended, (d) the accuracy of the device should comply with the regulations and (e) any vehicle could be tested, even those with electronic aids.

We have introduced a new portable system that fulfills all these requirements. Our system uses a global positioning system (GPS) receiver to sample the position and the speed of the taxi at regular intervals. The new test is less expensive, because the technician is no longer needed and the cabin where the rollers are installed would be freed for other uses. Due to cost reasons, we also want to use a cheap, consumer grade, GPS. We are aware that higher quality GPS receivers are more accurate, however, each station must acquire between 10 and 20 devices (otherwise the queuing time would not be acceptable) and the cost of deploying the new solution has to be amortized in a few years.

Additionally, there are legal problems that difficult the use of GPS measurements. It is well known that GPS data are inherently imprecise. Moreover, the tolerance is neither a prior knowledge nor constant, but it varies with each measurement. Unless we are able to bound the tolerance in our estimation of the length of the trajectory and the speed of the vehicle, we will not be able to legally reject a taximeter. This is the same problem that happens, for instance, when speed penalties are applied by a highway radar: we cannot penalize a vehicle whose speed is higher than the limit unless we also know (a) the tolerance of the radar and (b) that the measured speed surpasses the limit by more than that tolerance. In any other case, we must assume that the driver (and, conversely, the taxi owner) has not committed an offence.

Therefore, it is difficult to homologate a GPS-based device, because we cannot assess its absolute accuracy, e.g. the tolerance may be 5% for a certain route and 11% for a different route. To solve this problem, in this paper we propose a device that not only produces an estimation of the length of the trajectory, but it also computes an upper bound of this length. In other words, our system accounts the uncertainty of the measures, detects those cases where the accuracy of the test is not well under 10% and invalidates the test, if needed. This way, our system guaranties a minimum accuracy and therefore it can be homologated.

1.1. Legal constraints and statistical decisions

Let us suppose we have a measurement device which, given a taximeter with an unknown error  $e$ , produces an estimation  $\hat{e}$  of its error. We will assume that the device is unbiased, i.e.  $E(\hat{e} - e) = 0$ . Therefore, we could define the trivial decision rule that follows:

$$D_0(\hat{e}) = \begin{cases} \text{Accept} & \text{if } \hat{e} \leq 0, \\ \text{Reject} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

However, any measurement device will have a tolerance  $\varepsilon$ : this means that  $\hat{e} - \varepsilon \leq e \leq \hat{e} + \varepsilon$  with a very high probability and, conversely, that the probability  $p(|\hat{e} - e| > \varepsilon)$  is near zero. This tolerance has legal implications. Suppose, for instance, that we reject a taximeter because we estimate that its error is  $\hat{e} = 5\%$ , and the tolerance of our device is  $\varepsilon = 7\%$ , which is higher than this error. The taxi owner could argue that there is a chance that the true error of the taximeter is less than or equal to 0, and have our rejection revoked. In short, we cannot reject a taxi unless the

estimation of the error is higher than the tolerance, thus we are sure that the taximeter is incorrect with a high probability.

In Spain, the maximum deviation between the charged fare and the true fare must not be higher than 10%, and therefore we cannot homologate a device with a tolerance higher than this value. It is remarked that the tolerance of a GPS device depends on many factors (geometry or constellation of the satellites, shape of the trajectory, speed, etc.) As we have mentioned in the preceding section, we cannot certify that all measurements taken with the certain GPS device will be more accurate than 10%. However, we will show in this paper that we can determine whether the tolerance of a particular measure has been within the legal margins. This is the main objective of this paper.

We have also mentioned that the legal problem is similar to that of using a radar for measuring the speed of a vehicle. But, the legal assumption of innocence, that most drivers would be glad to accept if accused of surpassing the speed limit, benefits the taxi owner.

The legal decision rule is

$$D(\hat{e}) = \begin{cases} \text{Accept} & \text{if } \hat{e} \leq 10, \\ \text{Reject} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

which, from a statistical point of view, is not fair. Let  $p(x)$  be the probability of the error of a taximeter being  $x$ . On the one hand, we can reject a correct taximeter with a probability

$$P(\text{Reject} | e \leq 0) = \frac{p(\hat{e} > 10 \cap e \leq 0)}{p(e \leq 0)}. \quad (3)$$

On the other hand, we will pass an incorrect taximeter with probability

$$P(\text{Accept} | e > 0) = \frac{p(\hat{e} \leq 10 \cap e > 0)}{p(e > 0)}. \quad (4)$$

For  $D$  to be fair, we need that both errors are the same. However, they are not. If the tolerance of the device is lower than 10%, then  $p(\hat{e} > 10 \cap e \leq 0)$  is near zero, thus  $P(\text{Reject} | e \leq 0)$  is negligible, but  $P(\text{Accept} | e > 0) \geq p(0 < e < 10 - \varepsilon) / p(e > 0)$ , which is rather high. According to our own experience, Spanish taxi drivers calibrate their taximeters to obtain their maximum legal advantage, i.e. it is by far more frequent that a taxi has an error near 10 than an error lower than 0.

1.2. Lower upper bound of a trajectory

In order to obtain the highest number of valid measurements (i.e. those for which the tolerance is lower than 10%) we are interested in knowing the shortest trajectory whose length is known to be longer than the actual path, given a set of imprecise coordinates of the vehicle. Therefore, in this work, it is proposed to calculate the lower upper bound (from now on called LUB) of all possible trajectories that are compatible with the measurements given by the GPS.

Due to the imprecise nature of input data, a new method for establishing the LUB is presented. In doing so, input data are represented as fuzzy data. These data are filtered in order to produce the smallest subset of coordinates that induces a multipolygonal that covers the input data as much as possible. Finally, that filtered data are fed to a deterministic algorithm for computing the upper bound of length of the trajectory.

The filtering process is the most complex part of the procedure. It involves solving a multicriteria optimization problem, for which we will use the genetic algorithm NSGA-II (Deb et al., 2000; Deb and Goel, 2001).

### 1.3. Summary

The structure of this work is as follows. In the next section, we describe how GPS measurements are obtained. We also explain the imprecise nature of GPS measurements, and how they can be interpreted as fuzzy data. Then, a description of the proposal is set out in Section 3, where the filtering process and the issues regarding LUB computation are detailed. Deterministic (Section 3.2) and randomized (Section 3.3) algorithms for computing the LUB are given in the same section. In Section 4 details about the genetic algorithm used to filter the data are given. In Section 5 numerical results are shown. Finally, conclusions and future work are presented.

## 2. The vague nature of the GPS measurements

The term GPS (Hofmann-Wellenhof et al., 2004) refers to a set of devices (satellites and receiver) working together to get a fix (the position) of the receiver. The receiver can receive some signals from the satellites and compute a set of measurements: longitude, latitude, altitude, number of satellites in use, time, etc. Each signal received from a satellite contains information about the time that the signal takes from the satellite to the receiver.

So it can be thought that using signals from four satellites (three for geographical coordinates and one for time correction) could be enough to achieve a fix. A fix computed with that information, however, is very inaccurate: there are some errors in GPS technology that make it necessary to receive signals from more than four satellites. Some of the sources of these errors are: perturbations of the satellites signals when crossing the atmosphere, satellite ephemerids deviation, satellite clock errors, receiver errors and multipath (signals are not received directly from the satellite).

As a rule of thumb, the higher the number of satellites the better the accuracy. But even with a high number of satellites in use (12–16) the geometry or constellation of the satellites must be taken into account to estimate the fix accuracy. This is done using DOP (dilution of precision), a measurement of the probability of the effects of the constellation on the fix accuracy (Langley, 1999); a higher value of DOP indicates a weaker geometry of satellites. DOP has four components: PDOP (3D or spherical DOP), HDOP (latitude and longitude DOP), VDOP (vertical DOP) and TDOP (time DOP).

Under certain conditions, GPS measurement errors follow a bidimensional Gaussian distribution. When many satellites are available that distribution can be regarded as circular (van Diggelen, 2007). Because of this, consumer grade GPS gives an indication of their precision through a magnitude called circular error probable (CEP). Given a probability threshold, the CEP indicates the radius of a circle. This circle is approximately centered on the position where the receiver was when it registered the measurement. If the threshold is 50% the CEP can be calculated from the standard errors of the estimated coordinates with (Langley, 1991; Strang and Borre, 1997)

$$\text{CEP} = 0.56\sigma_x + 0.62\sigma_y, \quad (5)$$

where  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  are the horizontal components of the standard deviations of the measurements. The CEP at 95% probability is also known as R95 and can be obtained multiplying by 2.08 the 50% probability CEP. In Fig. 1, a real example showing how the CEP could vary between consecutive measurements is displayed.

Consumer grade GPS does not send information related to the standard errors. HDOP values are available from the standard NMEA protocol used in most of the GPS receivers and this magnitude accounts for the impact of constellation geometry in

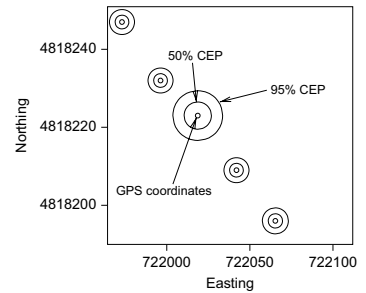


Fig. 1. Real GPS measurements, the CEP value changes from one measurement to another.

horizontal accuracy. Thus, an empirical estimation of CEP/HDOP relationship must be carried out (Dussault et al., 2001; Cressie, 1991). From the definition of CEP, this is easily done from a sample of GPS coordinates taken in a given location. For each HDOP value, the subset of GPS obtained under that value is extracted from the whole data. Then the smallest circle that covers 50% of the points is the CEP at that probability. The procedure for the 95% CEP is analogous.

### 2.1. A fuzzy representation of GPS data

In the context of imprecise probabilities, a fuzzy set could be seen as a set of tolerances. Each tolerance is assigned a confidence rate, and the lower the tolerance the lower the confidence rate (Goodman and Nguyen, 1985). In particular, given an incomplete set of confidence intervals of a random variable, it is possible to generate a random fuzzy variable for which  $\alpha$ -cuts are confidence intervals of rate  $(1 - \alpha)$  (Couso et al., 2001). We will use this representation and perform a multilevel calculation of the LUB.

In the case of the measurements obtained from a GPS unit, two confidence intervals are given at 50% and at 95%. Using the procedure explained in this section, a value of CEP could be calculated for each probability value (Manning and Harvey, 1994). It can easily be seen that the higher the probability value the higher the CEP value. The physical meaning of this fact is simple for the GPS measurements: the higher the confidence rate needed for determining the real position from which the GPS measurement was taken, the higher the CEP value.

## 3. Calculation of a LUB using fuzzy data

The GPS measurements are sampled at equally spaced time intervals. Each measurement is a fuzzy set, as stated before, whose  $\alpha$ -cuts are circles centered on the GPS coordinates. Therefore, each circle is a confidence interval for the true coordinates of the taxi when the measurement was taken. In Fig. 2 some simulated GPS measurements and trajectories are shown. The position where the measurement was taken is on the real trajectory—continuous line—and it can be inside or outside the respective circle of radius CEP. The trajectory using the GPS coordinates is drawn using a dashed line. A trajectory totally compatible with the GPS measurements is also drawn as a dotted line. Notice that the lengths of these trajectories are different, but all of them are compatible with the measurements of the GPS. Thus, to know the accuracy of the measure, we want to compute the LUB of the lengths of all the paths which have all of their

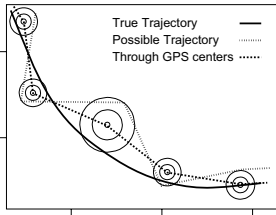


Fig. 2. Simulated example where the differences between the true trajectory and the trajectory through the GPS coordinates are shown.

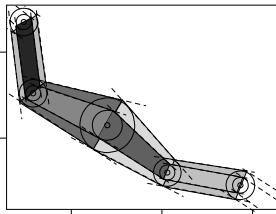


Fig. 3. Simulated example showing how a polygonal that covers the fuzzy input data from GPS could be built.

vertices inside the circles (for each confidence level). This bound is the largest trajectory compatible with the GPS measurements. Observe that the LUB is infinite unless we introduce some constraints. The main assumption in this paper is that changes in the direction of the vehicle between two samples are small, thus we can approximate the trajectory between two consecutive samples by a straight line.

We will define a polygonal chain that covers the fuzzy data, by finding the outside tangents to the CEP for each  $\alpha$ -cut, and then computing the cross points of the corresponding tangents between two consecutive fuzzy points (see Fig. 3). Observe that

1. The longest segment contained in each polygon of four sides—a quadrilateral—is one of its diagonals.
2. The longest path contained in two adjacent quadrilaterals always comprises two of these diagonals.
3. The longest path contained in three adjacent quadrilaterals is also composed of diagonals, but they might not be the longest diagonals of each quadrilateral.

The LUB is defined by a subset of the list of vertexes. Later in this section we explain how to obtain this subset. We introduce first some preprocessing algorithms that will improve the accuracy of the final measurement.

### 3.1. Preprocessing the data

The accuracy of the measure can be improved if some collinear points are joined, and some of the worst GPS fixes are discarded. In case the sampling rate is high enough, our hypothesis (straight trajectory between samples) still holds after performing these two changes, and we can safely preprocess the data before computing the estimation of the length and the LUB.

Given an level value  $\alpha$ , the fuzzy input data are represented as a circle centered on the coordinates, and whose radius is the CEP at probability  $(1 - \alpha)$ . We have mentioned that, for each  $\alpha$ -cut value, the data comprise a set of circles, and also that the two outside tangents of two consecutive circles, and the cross points of the tangents to every three consecutive circles define a polygonal chain. The objective of the preprocessing is to obtain a reduced polygonal chain of fuzzy sets which still contains the LUB for each level  $\alpha$ . If crisp data were used, polygonal chain simplification has been studied in Estkowski and Mitchell (2002) and Hershberger and Snoeyink (1992). For fuzzy data, to our knowledge, the most similar work in the available literature is that presented in Anile et al. (2000), where fuzzy data from a geographical data base are used to reconstruct 3D images by means of fuzzy B-splines (de Boor, 1972).

Our process of computing the LUB is a three step procedure: the first step is filtering by collinearity, then filtering by a multiobjective algorithm, and finally using a deterministic algorithm for determining the largest polyline in a polygonal chain; this is done for each  $\alpha$ -cut. These filtering stages are described in the subsections that follow, and the deterministic algorithm is explained in Section 3.2.

#### 3.1.1. Filtering by collinearity

For each  $\alpha$ -cut a polygonal chain is obtained, as explained before. If for three consecutive circles, both pairs of outside tangents are parallel, then the quadrilateral defined by the first and third circles is contained in the quadrilateral defined by the first and third circles, and the intermediate circle could be filtered. Further removals of points are limited by the sampling rate, i.e. if too many points are filtered out, we cannot assume the trajectory is straight between the first and the last one.

#### 3.1.2. Filtering spurious data

Spurious data are input points where the error is abnormally high. We can remove those points where the fix was not accurate enough, provided that we do not discard a significant number of points, i.e. a fraction  $1 - \alpha$  of the vertexes of the reduced polygonal must be in the unfiltered path, for each level  $\alpha$ . In Fig. 4 the process is illustrated for a given  $\alpha$ -value.

Filtering points reduce the area of the polygonal chain, so the LUB will be smaller too, and this is not a desired effect. We do not want to filter representative points. Maximizing the percentage of covered data, while filtering the outliers, are objectives that counteract one another. We will use a multicriteria genetic algorithm to optimize the filtering, as we will explain in Section 4.

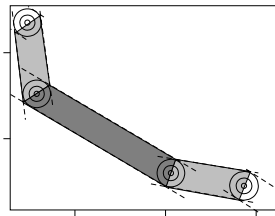


Fig. 4. The simplifying process over a synthetic example: filtering a point reduces the area of the polygonal chain, but the remaining points must resemble the trajectory.

3.1.3. Dynamic behavior of the vehicle

The filtering process can be further improved if we assume that the vehicle has inertia and some trajectories contained in the polygonal chain are not feasible. For example, think of a vehicle moving at a certain speed. There exists a maximum angle the vehicle could turn without risking its security. Moreover, for each speed value there exists a maximum angle, lower than that given by security reasons, which is comfortable for the vehicle passengers.

Therefore, we can introduce a second hypothesis in our analysis: *driving a taxi must be comfortable*. The maximum angle of turn is a function of the speed of the vehicle: the larger the speed, the shorter the maximum angle of turn. In determining the angle of turn at each point, the one before and one after fuzzy points are used. For an  $\alpha$ -cut value the fuzzy points are circles. By means of the tangents the polygonal chain for the three fuzzy points could be defined. The largest trajectory included in such polygonal chain is one of the four possible polylines that goes through the vertexes of the polygonal chain. Once the largest trajectory for this three points polygonal chain has been found, if the angle that the segments of the largest trajectory define is larger than the maximum angle of turn at current speed, the trajectory is not considered as a candidate for its length being the LUB.

3.2. Deterministic longest path estimation

Once the data are preprocessed, we evaluate its LUB with a deterministic algorithm, that we explain in this section.

For each  $\alpha$ -cut of the chain, we get a polygonal set constructed with trapezoids, as can be seen in Fig. 5. The motion direction is indicated by a thin dashed arrow. Each trapezoid vertex is denoted with a pair of integers, those at the left of the arrow are zero at first, those at the right have one at first. The other number is the step in the motion sequence. The longest path at each step  $i$  goes through  $(0, i)$  vertex or  $(1, i)$  vertex. The set of vertexes that defines the longest path, can be computed by exhaustive exploration of all possible combinations, but this is very expensive in terms of computational cost and proved impracticable in a realistic trajectory with 100 points, for instance. This problem has been studied in the area of Computational geometry and is related with longest path with forbidden pairs (Berman and Schnitger, 1992), that is NPO PB-complete.

Because of this and given that in a realistic trajectory the changes of direction and the changes in distance between left and right vertex are limited due to the dynamics of the taxi, the

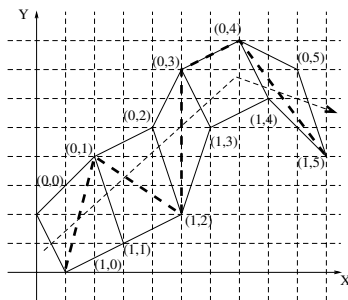


Fig. 5. Example of longest path estimation following the algorithm explained in Section 3.2.

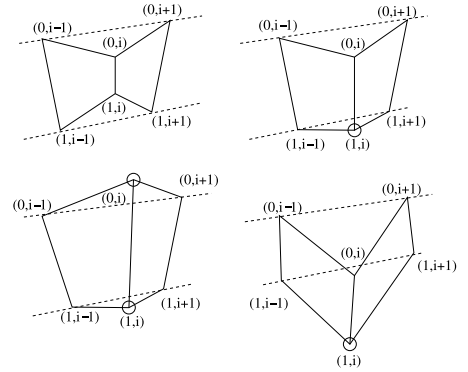


Fig. 6. Possible relative positions of vertexes and lines between prior and next vertexes. This is useful in the determination of convex and non convex vertexes.

geometry of the road and GPS behavior, we use a heuristic that is linear in time with the number of vertex. The heuristic is based on the selection of convex vertexes: when a vehicle turns, the longest path goes through the exterior of the trajectory curvature. The convexity of a vertex is analyzed using the straight lines that rely on previous and following vertexes, the possible relative positions of the central vertex can be seen in Fig. 6, where convex vertexes are marked with a small circle and the lines that pass through vertexes  $(0, i - 1)$ ,  $(0, i + 1)$  and  $(1, i - 1)$ ,  $(1, i + 1)$  are drawn. From left to right and top to bottom, if both vertexes are between the lines, both are concave. If only one is outside the lines, it must be convex. If both are outside the lines, both may be convex (left) or one may be concave and the other is convex. In both cases, if the farthest one from the nearest line is chosen, then it is convex.

The heuristic is as follows: the first segment of the longest path goes from a convex vertex in step 1 to the vertex at step 0 that gives the maximum segment length. From step 1 to the one before the last, the path goes through:

- If there is only a convex vertex, through this vertex.
- If there are two convex vertexes, through the farthest one.
- If there are no convex vertex, through the farthest one.

The last segment ends in the farthest vertex from the previous one.

In Fig. 5 the path computed with this heuristic is marked with a thick dashed line. The first segment goes from  $(1, 0)$  to  $(0, 1)$  because  $(0, 1)$  it is convex and the distance to  $(0, 0)$  is shorter. Then the longest path continues to  $(1, 2)$  because it is the only convex. The same happens with  $(0, 3)$  and  $(0, 4)$ . Finally, the path ends in  $(1, 5)$  because it is farther from  $(0, 4)$  than  $(0, 5)$ .

3.3. Randomized longest path estimation

There is an alternate implementation for the method proposed in the preceding section. Let us suppose that we superimpose a grid on the chain of circles (see Fig. 7) and compute the whole set of lengths obtained by the selection of one point of the grid from each fix. In order to compute the maximum length from the obtained trajectories, a backtracking algorithm is impracticable due to the high number of points present in real trajectories.

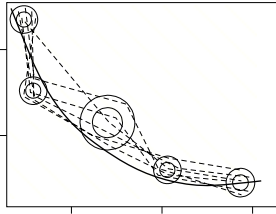


Fig. 7. Discretization of GPS measurements and exhaustive exploration of the lengths of all the trajectories obtained from all the possible combinations of discretized points. Only a fraction of the possible trajectories is shown.

However, we can uniformly sample a number of trajectories and compute a Monte Carlo estimate of the probability distribution of the lengths that arise. The mean value of this distribution would be our estimation of the length, and we can also produce a confidence interval for the mean, from which to calculate our tolerance.

To build a sample trajectory, we have implemented the procedure that follows: for each fix, with a probability 0.95, a point of the grid which is inside the CEP at that level is randomly selected (thus with a probability 0.05 the point is selected from outside the corresponding CEP). The length of the polygonal that joins all these points is stored and the whole procedure repeated a high number of times. The sample distribution of these lengths is finally used to compute the sample mean (which is an estimator of the length that the taximeter should have produced) and a confidence interval for it.

Unfortunately, there are some issues with this method. In particular, the range of the sample distribution of the lengths is bounded by the maximum sample length, which is general is not the maximum length of a compatible path. As a matter of fact, the maximum of the sample would be more reliable estimator of the LUB for our purposes. Since there are not clear improvements in speed neither in accuracy with respect to the method in the preceding section, Monte Carlo analysis is not considered in this work.

### 3.4. Predetermined trajectories and maps

A trivial improvement of the accuracy could be obtained if we restricted ourselves to a known route, and adjust the GPS coordinates so that each position is replaced by its nearest point in the center of the road. However, this method has been rejected by the experts in the certification agency that will homologate the device. The reason given was that all the measurements have to be reproducible. There will be points with known latitude and longitude where the certification agency will position the devices and check that the tolerance of the measurements is within the range. This kind of certification is not compatible with dynamic changes in the coordinates, because the nearest point of the road may well be out of the circle defined by the CEP, making the determination of the LUB useless.

However, nothing prevents using the map as a constrain, i.e. we know that the car is in the intersection between the road and the confidence interval produced by the GPS. The coordinates of the whole road and not only its center are needed, though. This method has not been implemented either, because we have not measured the width of the road, neither have access to a cartography of the route with legal validity. This last point is important, because any error in the maps would void all the

measurements taken with the devices. Nevertheless, observe that, even if we decided to include this information in the future, it would not alter the computations we present in this paper.

## 4. Genetic filtering of the fuzzy data

In this section the details of the codification and operators used in the genetic algorithm which has been used to filter the data are given. A multiobjective genetic algorithm has been used in the filtering process. Specifically, the multiobjective genetic algorithm used in this work is the well known NSGA-II (Deb et al., 2000; Deb and Goel, 2001). This algorithm is outlined in Fig. 8.

### 4.1. Codification of an individual

Each individual is a subset of the chain of fuzzy points, codified as an array of Booleans. That is to say: input data are a series of timely ordered fuzzy points. Each one of the fuzzy input points has a Boolean value associated for each individual. When the Boolean value for a fuzzy point is set to *true* then that fuzzy point is included by the individual. When the Boolean value for a fuzzy point is set to *false* that fuzzy point is filtered out.

To generate an individual, a probability threshold *p* is given, and each fuzzy point in the vector of input fuzzy data is included with probability *p*. The origin and the end of the taxicab run must always be included.

### 4.2. Multiobjective fuzzy fitness function

Observe that both the area of the polygonal chain and the percentage of covered fuzzy data by the polygonal chain are fuzzy functions. We want to minimize the area of the defined polygonal chain and to maximize the percentage of covered fuzzy data. Following Sánchez and Couso (2007), we will not defuzzify the objectives, but use a fuzzy valued fitness function to assess the quality of the filtering.

Genetic algorithm can solve fuzzy valued optimization problems. For instance, we can define a total order between the fuzzy values of the fitness function (Abbasbandy and Asady, 2006; Mitchell, 2006; Tran and Duckstein, 2002; Sheen, 2006; Sun and Wu, 2006). In particular, we need to sort fuzzy numbers, which some authors think it is inconsistent with most definitions of total order between fuzzy sets (Yeh and Deng, 2004; Wang et al., 2005). The use of a weaker (partial) order can also be made compatible with a tournament-based selection in conventional genetic algorithms. In this context, in Jahanshahloo et al. (2004) and Wang et al. (2005) an interval representation is used, and in Ganesan and Veeramani (2006) another partial order relation is proposed, restricted to trapezoid membership functions. This last

```

Rt = Pt ∪ Qt
F = fast-non-dominated-sort (Rt)
Pt+1 = ϕ, i = 1;
while |Pt+1| + |Fi| > N
    crowding-distance-assignment (Fi)
    Pt+1 = Pt+1 ∪ Fi
    i = i + 1
end while
Sort(Fi, <n)
Pt+1 = Pt+1 ∪ Fi[1 : (N - |Pt+1|)]
Qt+1 = make-new-population (Pt+1)
t = t + 1
    
```

Fig. 8. Pseudocode of the NSGA-II algorithm.

solution cannot be applied to our problem, either, as there is neither knowledge nor restrictions about the membership functions type and certainty distributions. Also, different approaches for evaluating the Pareto dominance using fuzzy fitness functions have been proposed. In Youssef and Khan (2000) the use of fuzzy rules for determining the dominance of one individual with regard to another is proposed. Similar works are documented in Trebi-Ollennu and White (1997) and Kiyota et al. (2000). In this work we have decided to use our own implementation of the NSGA-2 algorithm for fuzzy data, which is described in Sánchez et al. (2007) and Sánchez et al. (submitted). We have used an imprecise probabilities based ranking, in combination with the definitions of nondominated sorting and crowding distance explained therein.

#### 4.3. Genetic operators

The definitions of the crossover and mutation must reduce the number of vertices in the population.

- **Crossover.** Given two parents  $A$  and  $B$ , the offspring are two new chains  $C$  and  $D$  such that  $A \cap B \subseteq C$  and  $A \cap B \subseteq D$ ; a vertex  $v \in A - B$  has a probability  $p^+$  of being in  $C$ , and a vertex in  $B - A$  has a probability  $p^-$  of being in  $C$ , where  $p^-$  is much lower than  $p^+$ .  $D$  set is constructed in the same way.
- **Mutation.** This operator is defined as the random removing of a point of the chain, different from the first or last one. It is important to notice that neither the first nor the last fuzzy points will be included in the genetic operations because both trajectory ends must be included for all individuals.

## 5. Experiments and results

In this section we describe the experiments that we have devised for justifying the claims in this paper. Our experimental design has three objectives:

1. Assessing the theoretical accuracy of the proposed method.
2. Obtaining the actual tolerance of the roller machine.
3. Comparing the accuracies of this method and the roller machine in practical cases.

Therefore, three sets of experiments have been conceived:

1. **Simulated paths:** We have generated synthetic data, and added random noise to it mimicking the properties of a typical GPS sensor. Using this noisy data we made estimates of the percentage of error between our LUB and the true length of each path.
2. **Tolerance of the roller machine:** Even though the roller machine has a theoretical null error, in practice the pressure of the tyres and the level of wear cause a dispersion of the measurements of the same order of magnitude as the GPS sensor.
3. **Compared accuracies:** A real-world example is used to compare the measurements taken with our system and the former method: we have measured a circuit with an ISO-9002 certified odometer and then used it in our own testing procedure. The same vehicle was also tested in the roller machine, and all the results are compared and discussed.

Each one of these categories will be analyzed in detail in the sections that follow.

### 5.1. Simulated paths

We have evaluated our algorithm in realistic paths that cover most of the situations found when the TI test of a taxi is carried out. These synthetic paths simulate several turns, accelerations, decelerations and changes in CEP. GPS longitude/latitude coordinates were translated to Universal Transverse Mercator northing/easting coordinates in order to make distance calculations between GPS fixes easier (Snyder, 1982). With this system, points on the Earth's surface are projected onto an equally spaced planar metric grid, therefore the distance between fixes is the usual Euclidean one. The trajectory is sampled once each second.

Since we need to know the true length of the path, and the differences between the actual position and the GPS data, some random noise is added to each point of the trajectory. At each location, a random number from 4 to 8 is taken as the CEP at 95% probability. The uncertainty in the GPS measurements is simulated using the following procedure: with a probability of 0.95, a point is selected whose distance to the real one is shorter than the CEP, and with probability of 0.05 an outlier is introduced. Part of the generated data is shown in Fig. 9. GPS measurements are represented with circles (actually ellipsoids in Fig. 9, due to scaling issues) with a radius equal to 95% CEP and the original trajectory with a continuous line. As can be seen, 95% of the circles intersect the trajectory, but none of their centers are in the actual trajectory.

We perform two experiments with two trajectories of 120 points each in order to test if the tolerance computed from the LUB is lower than the legal margin or not. If the true length of the trajectory is known, the tolerance is

$$\varepsilon = (\text{LUB} - \text{length})/\text{length}. \quad (6)$$

Several tests were also carried out to assess the genetic filtering. This was launched with the parameters shown in Table 1. Firstly, and for both trajectories, 10 runs of each of the multiobjective algorithm were done, without restrictions based on the dynamic behavior of the vehicle. Finally, a second set of 10 runs were done with the multiobjective algorithm using the same parameters but assuming that the angular velocity of the vehicle had a speed dependent bound.

#### 5.1.1. Case study I

The true length of the first trajectory is 3228.6 m. The distance through the GPS fixes is 3238.5 m. Taximeters which mark more than  $3228.6 + 10\% = 3551.4$  will be rejected. Observe that, in practical circumstances we do not know the actual length of the path and we will reject those taxis that charge more than  $3238.5 + 10\% = 3562.4$ .

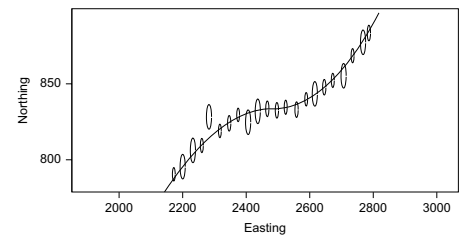


Fig. 9. Example of GPS generated data along with the true trajectory. As can be seen, some of the fixes CEP do not intersect the true trajectory. The most part of the points of the trajectory are inside the CEP at 95%.

**Table 1**  
Parameters used for NSGA-II algorithm

Parameter	Value
Number of generations	1000
Number of individuals	100
Number of populations	1
Minimum percentage of fuzzy points covered by each individual	0.85
Probability $p^*$ for genetic crossover	0.5
Probability $p^*$ for genetic crossover	0.1
Crossover probability	0.7
Mutation probability	0.1

**Table 2**  
Results from 10 runs of NSGA-II without dynamic analysis

Dataset	True length	Measured length	LUB estimation Best	LUB estimation Mean
1	3228.57	3238.521	3456.61	3499.48
2	2741.30	2696.487	3126.99	3192.51

The mean LUB for this trajectory (first row of table in Fig. 2) is 3499.5. Then, the expected tolerance is 0.084 (0.081, if we used the measured values to compute the tolerance). This result means that taximeters charging more than 3551.4 can be safely rejected.

If we filter the data taking into account the dynamics of the vehicle (see Table 3) the expected tolerance is 0.005 (0.002 if we used the measured length) which is much lower than the legal margin.

5.1.2. Case study II

The length of the second trajectory is 2741.3 m. This trajectory has stronger turns than the first, and we will see that the LUB will be less tight, given the deterministic procedure explained in Section 3.2. The distance through the GPS fixes is 2696.5 m. If we repeat the analysis done in the preceding case (see second row of Table 2), then the mean LUB is 3127.0. The expected tolerance is 0.141 (0.160), thus we cannot reject a taximeter on the basis of a test carried in this route (see also Table 3).

The use of dynamic restrictions in the genetic filtering causes a significant improvement of the tolerance, which is now 0.021 (0.038) thus we could legally reject taxis that charge more than  $2741.3 + 10\% = 3015.4$  (2966.2) using the same input data.

Observe that, given these results, we recommend the TI station to choose circuits with smooth turns, since they will surely produce a low rate of null verifications. In general terms, the use of convoluted paths is not advised with the system we propose here.

5.2. Tolerance of the roller machine

The GPS measurements are inherently imprecise. As a matter of fact, that imprecision is not too high, as the simulation in the preceding section has shown. Even though sometimes we could not demonstrate that the accuracy of the measurements was lower than 10%, the actual accuracies were around 0.3% in the first test case, and 1.6% in the second. Nevertheless, the roller machine has a theoretically null error, because the number of turns of the cylinders can be precisely counted, and from a point of view of a metrology expert, this procedure has more sense and reportedly should be preferred, if applicable.

However, in practice, tyre pressure and wear influence the measurements. The dependence is not immediate, though. The

**Table 3**  
Results from 10 runs of NSGA-II with dynamic analysis

Dataset	True length	Measured length	LUB estimation Best	LUB estimation Mean
1	3228.57	3238.521	3242.64	3243.45
2	2741.30	2696.487	2765.63	2798.01

**Table 4**  
Vehicle's odometer measurements for a roller machine measurement of 1000 m

Press or condition	Min	Med	Max	Wear
Mean	1006.525	1027.437	1009.578	1030.420
Std. deviation	14.29073	3.661429	6.815601	5.170147

In each column the mean and standard deviation at each pressure or condition are shown. The behavior of the system is complex: when the tyre pressure is high, the diameter of the tyre increases and the odometer measurements are lower. If the pressure is too low, the deformation of the tyre increases the perimeter and the measurements are lower also. The effect of the wear is simpler; it always decreases the perimeter of the tyre.

effect of the tyre pressure on the measures taken with the roller machine is not easy to model, because the number of turns of the cylinder for each linear meter depends on both the effective diameter of the wheel and the tyre slip, although conversely the level of wear is directly related to the measured distance.

For studying these dependences, we have designed a small set of experiments. In the first place, we measured the errors introduced by the different pressures in the tyres. Five taxi models were used, and the pressures were:

- the maximum allowed (according to the manufacturer specifications);
- the recommended pressure;
- a very low pressure (0.5 bar below the recommended).

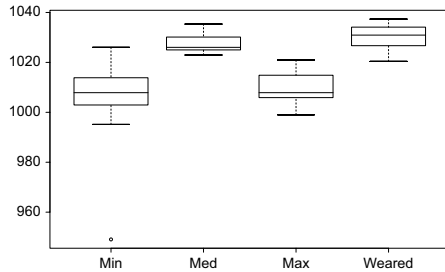
In the second place, for analyzing the dispersion of results for different levels of wear, one last round of experiments was performed with a set of wheels wore to the limit, and inflated to standard pressure. It is also remarked that all the experiments had to be done at very low speed to avoid the electronic traction control system activation.

Each round of experiments consisted on 10 runs. Each run began with the vehicle's odometer set to zero and ended when the roller machine reached 1000 m. In Table 4 the mean and standard deviation of the odometer measurements is shown. In Fig. 10 the same data are shown graphically using boxplots.

It should be observed (Table 4) that the dispersion of the measurements is much higher than expected. There have been differences of 30 m in a 1000 m run, or 3%, which is well above the theoretical tolerance of the GPS in the simulated path. We have not tested the combined effect of wear plus different inflating pressures, but the actual dispersion could be even higher. In the next section we compare both methods (rollers and GPS) on an actual path, and confirm that the tolerance of the GPS sensor is not, in practical cases, worse than that of the rollers.

5.3. Real-world measurements

When a taximeter is being verified, the taxi owner is sent for a run. He/she must carry the target taximeter, and the GPS-based



**Fig. 10.** Boxplots of the distance, as measured by the odometer, when the rollers indicate 1000 m. Note how the pressure of the tyre or the level of wear affects to the distance reported by the taximeter.



**Fig. 11.** Prototype of the data logger that is being developed for the verification of taximeters. The design is based on low cost automotive microcontrollers and a consumer-grade GPS receiver.

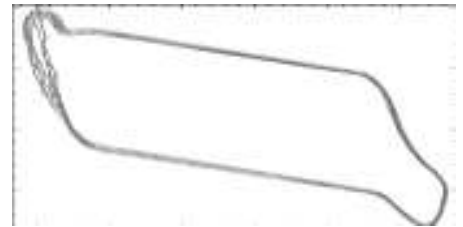
datalogger device. (A photograph of the prototype which is currently under development is shown in Fig. 11.) Once the taxi comes back to the TI, the GPS measurements are loaded into the computer where the LUB computing will be carried out. Only bidimensional measurements are to be taken into account as the height is not relevant: the trajectories range between 3 and 5 km, and the differences in altitude are a few meters. Each measurement includes the coordinates, the calculated CEP value for the desired  $\alpha$ -cuts and the number of available satellites.

In this section we have used a circuit surrounding the Campus de Viesques' buildings (Gijón, Asturias, Spain). The length of the circuit was measured using an ISO-9002 certified odometer. In Fig. 12, a picture of the circuit can be seen. The circuit comprises two long and two short straight paths, and four sections with close turns. The measured length was 1093 m.

A direct comparison of the rolling machine against the other methods is not possible, so an indirect procedure was employed. We equipped a car with an odometer that reported the distance travelled. Then we placed the same car in the rolling machine, and travelled 1093 m, according to the same instrument. Lastly, we



**Fig. 12.** Aerial picture of the circuit used in the tests. In the left of the image, a portion of the road is shown between the building and an area covered with trees, where GPS measurements are difficult.



**Fig. 13.** Path registered by the GPS, 10 laps to the circuit depicted in the preceding figure. There are large differences between the laps, mostly in the left part of the circuit.

**Table 5**  
Mean and standard deviation of the 10 measurements of the real path using MOSA and NSGA-II filtering, unfiltered GPS coordinates and equivalent rolling cylinder machine run

	MOSA	NSGA-II	GPS	Rolling machine
Mean	1118.872	1121.494	1103.635	1106.667
Standard deviation	7.353936	7.665415	16.49395	5.532274

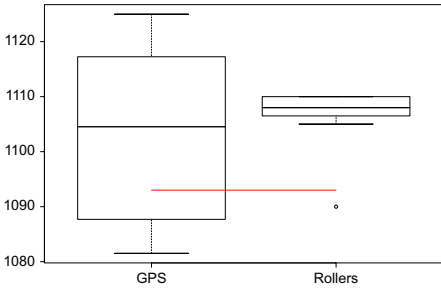
The measured length using a certified odometer was 1093 m.

read the measurement produced by the rolling machine. This procedure was repeated 10 times.

In Fig. 13, the route recorded by the GPS in the analyzed laps can be seen. There are large differences between the centers of the measurements between successive laps, especially in the left part of the circuit. This uncontrollable behavior results in a variation of the measured length of the same path, as shown in Table 5. This table collects the mean and standard deviations of the obtained measures, using each method discussed in the paper: MOSA and NSGA-II dynamical filtering, raw GPS coordinates, and cylinders. It is remarked that the variability of the results in the cylinders does not take into account the variability induced by changes in pressure of the tyres neither their wear that will be discussed later in this section.

The same results are graphically shown in Figs. 14 and 15, where data collected in 10 runs is summarized by means of boxplots. We have placed an horizontal line at the true length (the value that was measured with the certified odometer) in both





figures. Observe in Fig. 14 that the unfiltered GPS coordinates produce a large dispersion of measurements, and the dashed line is crossed with a probability which is not negligible. However, in Fig. 15 the effect of the evolutionary filtering is clear, as both boxplots, depicting the filtered results, are well above the dashed line. That is to say, the filtering produces a good approximation of the LUB, which is never below the actual length. From the two filtering techniques, MOSA exhibits less variability and a mean lower mean value than NSGA-II, closer to the actual length.

Lastly, in Fig. 16, a comparison between the filtered GPS measurements and the rolling machine is done. Observe that the accuracy of the filtered GPS is not only comparable but better than that of the cylinders if the tyre pressure is too low or high. It is also remarked that the GPS-based verification does not depend on the condition of the tyres.

Fig. 14. Boxplots of 10 measurements of the circuit using unfiltered GPS coordinates, and the equivalent measurements using rolling cylinders. The measured length using a certified odometer was 1093 m (the horizontal line). Raw GPS measurements had a high variability and were not a suitable alternative for the cylinders.

6. Conclusions

There are legal issues concerning the use of GPS devices for verifying taximeters. However, in our opinion a GPS is the measuring device that best balances cost and accuracy for a TI.

To homologate a GPS for this application, we need to guarantee that the tolerance of the measurements is lower than the legal 10% margin. We cannot assert that this tolerance holds in absolute terms, but in this paper we have defined how to compute the upper bound of any trajectory length compatible with GPS data, which effectively is a computation of the upper tolerance of the device, for a particular route. This calculations must be repeated each time a taxi is verified, because the obtained margins depend on the GPS signal reception, the satellite configuration and the shape of the path. We have also found that, the stronger the turns in the calibration trajectory, the less accurate the measurement is. Therefore, we recommend to avoid convoluted paths in the GPS-based verification of taximeters.

Acknowledgement

This work was funded by Spanish M. of Education, under the Grant TIN-2005-08386-C05-05 and ITVASA.

References

Abbasbandy, S., Asady, B., 2006. Ranking fuzzy numbers by sign distance. *Information Sciences* 176, 2405–2416.

Anlie, A.M., Falcidieno, B., Gallo, G., Spagnuolo, M., Spinello, S., 2000. Modeling uncertain data with fuzzy B-splines. *Fuzzy Sets and Systems* 113, 397–410.

Berman, P., Schnitzer, G., 1992. On the complexity of approximating the independent set problem. *Information and Computation* 96, 77–94.

de Boor, C., 1972. On calculating with B-splines. *Journal of Approximation Theory* 6, 50–62.

Couso, I., Montes, S., Gil, P., 2001. The necessity of the strong alpha-cuts of a fuzzy set. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems* 9 (2), 249–262.

Cressie, N.A.C., 1991. *Statistics for Spatial Data*. Wiley, New York ISBN 0-471-84336-9.

Deb, K., Goel, T., 2001. In: Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L., Coello Coello, C.A., Corne, D. (Eds.), *Controlled Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms for Better Convergence*. First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1993. Springer, Berlin, pp. 67–81.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T., 2000. In: Schoenauer, E.M., Deb, K., Rudolph, G., Yao, X., Lutton, E., Merelo, J.J., Schwefel, H.-P. (Eds.), *A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II*. Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, pp. 849–858.

van Diggelen, F., 2007. GNSS accuracy: lies, damn lies, and statistics. *GPS World* 9 (1), 41–45.

Dussault, C., Courtois, R., Ouellet, J.P., Huot, J., 2001. Influence of satellite geometry and differential correction on GPS location accuracy. *Wildlife Society Bulletin* 29 (1), 171–179.

Estkowski, R., Mitchell, J.S.B., 2002. Simplifying a polygonal subdivision while keeping it simple. In: *SCG '01: Proceedings of the Seventeenth Annual*

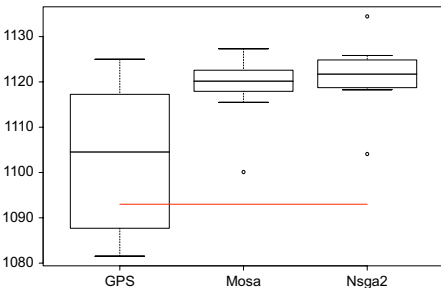


Fig. 15. Boxplots of the 10 measurements of the real path using unfiltered GPS coordinates and filtered GPS coordinates with MOSA and NSGA-II. The measured length using a certified odometer was 1093 m, the horizontal line is placed at that length. Note that the measurements done with filtered GPS coordinates never fall under the actual value of the length.

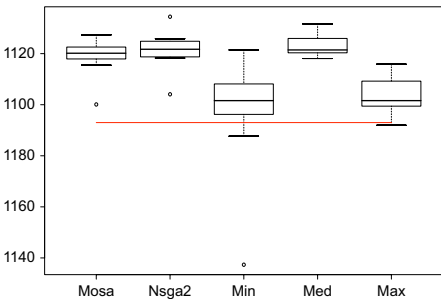


Fig. 16. Boxplots of the 10 measurements of the real path using MOSA and NSGA-II filtered GPS coordinates, and equivalent measurements using rolling cylinders. The measured length using a certified odometer was 1093 m, the horizontal line is placed at that length. Note that filtered GPS measurements are comparable to those made with recommended tyre pressure.

- Symposium on Computational Geometry. ACM Press, New York, NY, USA, pp. 40–49, ISBN 1-58113-357-X.
- Ganesan, K., Veeramani, P., 2006. Fuzzy linear programming with trapezoid fuzzy numbers. *Annals of Operation Research* 143, 305–315.
- Goodman, I.R., Nguyen, H.T., 1985. *Uncertainty Models for Knowledge-Based Systems*. North-Holland, Amsterdam.
- Hershberger, J., Snoeyink, J., 1992. Speeding up the Douglas-Peucker line simplification algorithm. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Charleston, USA, pp. 134–143.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., 2004. *GPS Theory and Practice*. Springer, Berlin ISBN 3211835342.
- Jahanshahloo, G.R., Soleimani-damaneh, M., Nasbaradi, E., 2004. Measure of efficiency in DEA with fuzzy input–output levels: a methodology for assessing, ranking and imposing of weight restrictions. *Applied Mathematics and Computation* 156, 175–187.
- Kiyota, T., Tsuji, Y., Kondo, E., 2000. New multiobjective fuzzy optimization method and its application. In: *American Control Conference ACS'2000*, vol. 6, Chicago, IL, USA, pp. 4224–4228.
- Langley, R.B., 1991. The mathematics of GPS. *GPS World* 2 (7), 45–59.
- Langley, R.B., 1999. Dilution of precision. *GPS World* 10 (5), 52–59.
- Manning, J., Harvey, B., 1994. Status of the Australian geocentric datum. *Australian Surveyor* 39 (1), 28–33.
- Mitchell, H.B., 2006. Ranking type-2 fuzzy numbers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 14 (2), 287–294.
- Sánchez, L., Couso, I., 2007. Advocating the use of imprecisely observed data in genetic fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 15 (4), 551–562.
- Sánchez, L., Couso, I., Casillas, J., 2007. Modeling vague data with genetic fuzzy systems under a combination of crisp and imprecise criteria. In: *First IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (MCDM 2007)*, Honolulu, Hawaii, USA.
- Sánchez, L., Couso, I., Casillas, J., 2007. Genetic Learning of Fuzzy Rules based on Low Quality Data. *Fuzzy Sets and Systems*, submitted for publication.
- Sheen, J.N., 2006. Fuzzy evaluation of cogeneration alternatives on a petrochemical industry. *Computers and Mathematics with Applications* 49, 741–755.
- Snyder, J.P., 1982. *Map Projections Used by the U.S. Geological Survey*, second ed. Geological Survey Bulletin, vol. 1532. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 313pp.
- Strang, G., Borre, K., 1997. *Random Variables and Covariance Matrices, in Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, MA.
- Sun, H., Wu, J., 2006. A new approach for ranking fuzzy numbers based on fuzzy simulation analysis method. *Applied Mathematics and Computation* 174, 755–767.
- Tran, L., Duckstein, L., 2002. Comparisons of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure. *Fuzzy Sets and Systems* 130, 321–341.
- Trebi-Ollennu, A., White, B.A., 1997. Multiobjective fuzzy genetic algorithm optimization approach to nonlinear control system design. *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications* 2 (144), 137–142.
- Wang, Y.-M., Greatbanks, R., Yang, J.-B., 2005. Interval efficiency assessment using data envelopment analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 153, 347–370.
- Yeh, C.-H., Deng, H., 2004. A practical approach to fuzzy utilities comparison in fuzzy multicriteria analysis. *International Journal of Approximate Reasoning* 35, 179–194.
- Youssef, H., Sait, S.M., Khan, A., 2000. Fuzzy simulated evolution algorithm for topology design on campus networks. In: *2000 Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, Piscataway, New Jersey, USA, pp. 180–187.

## Publicación 2

- **Nombre de la revista:** Soft Computing
- **Factor de impacto:** 1.328
- **Ranking:** 51/103 en Computer Science, Artificial Intelligence (Q2)

## Taximeter verification with GPS and soft computing techniques

José Villar · Adolfo Otero · José Otero ·  
Luciano Sánchez

Published online: 10 March 2009  
© Springer-Verlag 2009

**Abstract** Until recently, local governments in Spain were using machines with rolling cylinders for verifying taximeters. However, the condition of the tires can lead to errors in the process and the mechanical construction of the test equipment is not compatible with certain vehicles. Thus, a new measurement device needs to be designed. In our opinion, the verification of a taximeter will not be reliable unless measurements taken on an actual taxi run are used. GPS sensors are intuitively well suited for this process, because they provide the position and the speed with independence of those car devices that are under test. But there are legal problems that make difficult the use of GPS-based sensors: GPS coordinate measurements do not match exactly real coordinates and, generally speaking, we are not given absolute tolerances. We can not know whether the maximum error is always lower than, for example, 7 m. However, we might know that 50% of the measurements lie on a circle with a radius of 7 m, centered on the real position. In this paper we describe a practical application where these legal problems have been solved with soft computing based technologies. In particular, we propose to characterize the uncertainty in the GPS with fuzzy techniques, so that we can reuse certain recent algorithms, formerly intended

for being used in genetic fuzzy systems, to this new context. Specifically, we propose a new method for computing an upper bound of the length of the trajectory, taking into account the vagueness of the GPS data. This bound will be computed using a modified multiobjective evolutionary algorithm, which can optimize a fuzzy valued function. The accuracy of the measurements will be improved further by combining it with restrictions based on the dynamic behavior of the vehicles.

**Keywords** Fuzzy systems · Genetic algorithms · Vague data · Fuzzy fitness function · GPS · Metrology

### 1 Introduction

From an engineering point of view, measuring the length of a path covered by a vehicle using the global positioning system (GPS) may seem an easy task using position data, speed data or both. Nevertheless, if these measurements are to be used for legal purposes, the situation is different. The measurements provided by a GPS receiver have a vague nature, and there might be large deviations between the actual position and the sensed coordinates of the vehicle. These deviations are infrequent, although they are possible, and this fact can invalidate the use of GPS in some applications.

This kind of behavior (i.e., an instrument having high accuracy most of the time, but also a chance of its accuracy being unacceptable) is not an exclusive property of GPS. Many other sensors used for legal purposes (for example, the radar) show this problem, albeit to a lesser degree. However, these sensors are routinely used because, in practical circumstances, if the probability of a measure being not allowable is very low, the evidence it provides is admissible. In other words, if we are able to provide an

---

J. Villar · A. Otero · J. Otero (✉) · L. Sánchez  
Computer Science Department, Oviedo University,  
Edificio departamental 1 Campus de Viesques s/n,  
33204 Gijón, Asturias, Spain  
e-mail: jotero@uniovi.es

J. Villar  
e-mail: villarjose@uniovi.es

A. Otero  
e-mail: otero@uniovi.es

L. Sánchez  
e-mail: luciano@uniovi.es

estimation of the length of a path which is conservative enough, so that the probability of the estimation being shorter than the actual length is negligible, we can use GPSs for legal purposes. Besides, the statistical model of a GPS is different from that of a radar in that it contains some different confidence intervals for the position of the receiver, given at different levels. If we honor the accuracy given by the lowest levels, then the measurements will be too coarse and, if we use the highest levels, the probability of the estimation being wrong will be too high. Therefore, we want to simultaneously process all these confidence intervals and find a balance between the accuracy of the measurement and its probability of being valid.

As we will detail later, such a family of confidence intervals matches some recent interpretations of a fuzzy set (Couso et al. 2001). These interpretations are being actively used in another Soft Computing field, that of learning of fuzzy rules from low quality data with genetic algorithms (Sánchez and Couso 2007) [in short, low quality data-based genetic fuzzy systems (GFS) or LQ-GFS] or in industrial applications (Otero et al. 2008). In this paper, we will model each measurement of the GPS, along with its family of confidence intervals, with a fuzzy set. Then, we will compute an upper bound of the length of the path. This will be derived from the membership function of the fuzzy estimation of the length. Previously, we will pre-process the data in order to remove outliers and redundant samples. This preprocessing will be based on certain heuristic rules which will be explained later, and involves the use of a genetic algorithm. Since the objective function is fuzzy-valued, we will use a specially crafted multicriteria genetic algorithm (GA), which is able to optimize fuzzy-valued fitness functions. Again, this genetic algorithm will be taken from the LQ-GFS field, where such kind of GAs are used to solve the aforementioned problem, finding fuzzy rules from imprecise data. In this respect, this paper follows the guidelines given in (Sánchez and Couso 2007), and applies the algorithms defined in (Sánchez et al. 2006; Casillas et al. 2001) and (Sánchez and Couso 2007) to a new research field. Plain fuzzy logic has been applied successfully to some problems that bear some relationship with this paper, in the area of multisensor fusion we refer the reader to Guixing et al. (2006). An example of improving the precision of GPS raw data with the aid of fuzzy logic can be found in Mosavi et al. (2002). Examples of the use of fuzzy logic in the context of navigation of different vehicles can be found in Zhao et al. (2007) and Naranjo et al. (2007).

The structure of this work is as follows. In the next section, we describe the problem to be solved. Then, in Sect. 3 how GPS measurements are obtained is detailed. We also explain the imprecise nature of GPS measurements, and how they can be interpreted as fuzzy data.

The description of the proposal is set out in Sect. 4, where the filtering process and the issues regarding LUB computation are detailed. Deterministic (Sect. 4.2) and randomized (Sect. 4.3) algorithms for computing the LUB are given in the same section. In Sect. 5 details about the genetic algorithm used to filter the data are given. In Sect. 6 numerical results are shown. Finally, conclusions and future work are presented.

## 2 Problem statement

Taxi fares in Spain are regulated by local governments. Each time the fares are changed, the taximeters must be calibrated again and verified. One of the tasks to be performed in the Spanish VTSS is the testing and verifying of the taximeters in the taxicabs. The fares depend on two variables: the speed of the taxi during the service, and the length of trajectory covered during the service.

Since 1990, the Metrology and Models group at Oviedo University has been responsible for the design of the equipment and devices needed for the verification of taxis in Asturias, Spain. Currently, the verification of the taximeters is being carried out by means of a machine with rollers. The drive wheels are placed on the rollers, whose speed is regularly sampled. The test lasts a few minutes, while the driver must be assisted by a VTSS technician.

Once the test is over, the fare in the taximeter is compared to the fare in the machine with rollers. If the fare showed in the taximeter display is not 10% higher than the one calculated by the machine with rollers, then the taximeter may be used.

The total distance in the simulated run is computed by multiplying the circumference of the roller by the number of turns, and the linear speed is estimated from the angular speed of the rollers. However, the rollers have a relatively small radius, and the tire deforms differently over the rollers than over a flat surface. The difference between the actual and the theoretical radius means that tires appear to be smaller than they are for the system. Moreover, this error depends on the tire condition and the weight of the vehicle, making the whole test unreliable.

We intend to introduce a new portable system, that uses a GPS sensor to sample the position and the speed of the taxi at regular intervals. The new test would imply a significant saving for the VTSS station, because the technician is no longer needed and the cabin where the rollers are installed would be freed for other uses. Because of cost reasons, we also want to use cheap, consumer grade GPS. Price matters, because each station must acquire between 10 and 20 devices; otherwise the queuing time needed would not be acceptable.

Unfortunately, there are legal problems that complicate the use of GPS measurements. It is well known that data collected by a consumer grade, nondifferential GPS, is imprecise at submeter level. GPS manufacturers usually report the accuracy of a receiver in terms of a CEP value (see Sect. 3 for details), but with no reference to the number of satellites used, their relative positions, ionospheric influence or multipath; these sources of error must be taken into account to calculate the tolerance of the measurements in a given fix.

Unless we are able to bound the tolerance in our estimation of the length of the trajectory and the speed of the vehicle, we will not be able to legally reject a taximeter. This is the same problem that happens, for instance, when speed penalties are applied by a highway radar: we can not penalize a vehicle whose speed is higher than the limit unless we also know (a) the tolerance of the radar, and (b) that the measured speed surpasses the limit by more than that tolerance. In any other case, we must assume that the driver (and, conversely, the taxi owner) has not committed an offence.

Therefore, it is difficult to homologate a GPS-based device, because we can not assess its absolute accuracy, e.g., the tolerance may be 5% for a certain route and 7% for a different route. If we knew that the tolerance is always under 10% (which is the legal limit) we could homologate the device, but we can not assert that. Thus, in this paper, we propose a device that not only produces an estimation of the length of the trajectory, but it also computes an upper bound of this length. In this way, once the taxi has finished the run, we can know whether the tolerance of the measurement has been under the legal limit or not, and repeat the test if needed.

### 2.1 Legal constraints and statistical decisions

Let us suppose we have a measurement device which, given a taximeter with an unknown error  $e$ , produces an estimation  $\hat{e}$  of its error. We will assume that the device is unbiased, i. e.  $E(\hat{e} - e) = 0$ . Therefore, we could define the trivial decision rule that follows:

$$D_0(\hat{e}) = \begin{cases} \text{Accept} & \text{If } \hat{e} \leq 0 \\ \text{Reject} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

However, any measurement device will have a tolerance  $\epsilon$ : this means that  $\hat{e} - \epsilon \leq e \leq \hat{e} + \epsilon$  with a very high probability and, conversely, that the probability  $p(|\hat{e} - e| > \epsilon)$  is near zero. This tolerance has legal implications. Suppose, for instance, that we reject a taximeter because we estimate that its error is  $\hat{e} = 5\%$ , and the tolerance of our device is  $\epsilon = 7\%$ , which is higher than this error. The taxi owner could argue that there is a chance that the true error of the taximeter is less than or equal to 0, and have our rejection revoked. In short, we can not reject a taxi unless the

estimation of the error is higher than the tolerance, thus we are sure that the taximeter is incorrect with a high probability.

In Spain, to prevent taxi users from fraud, the charged fare must be less than 10% higher than the true fare, and therefore we can not homologate a device with a tolerance higher than this value. It is remarked that the tolerance of a GPS device depends on many factors (geometry or constellation of the satellites, shape of the trajectory, speed, etc.). As we have mentioned in the preceding section, we can not certify that all measurements taken with a certain GPS device will be more accurate than 10%. However, we will show in this paper that we can determine whether the tolerance of a particular measurement has been within the legal margins. This is the main objective of this paper.

We have also mentioned that the legal problem is similar to that of using a radar for measuring the speed of a vehicle. But, the legal assumption of innocence, that most drivers would be glad to accept if accused of surpassing the speed limit, benefits the taxi owner.

The legal decision rule is

$$D(\hat{e}) = \begin{cases} \text{Accept} & \text{If } \hat{e} \leq 10 \\ \text{Reject} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

which, from a statistical point of view, is not fair. Let  $p(x)$  be the probability of the error of a taximeter being  $x$ .

On the one hand, we can reject a correct taximeter with a probability

$$P(\text{Reject} | e \leq 0) = \frac{p(\hat{e} > 10 \cap e \leq 0)}{p(e \leq 0)}. \quad (3)$$

On the other, we will pass an incorrect taximeter with probability

$$P(\text{Accept} | e > 0) = \frac{p(\hat{e} \leq 10 \cap e > 0)}{p(e > 0)}. \quad (4)$$

For  $D$  to be fair, we need both errors to be the same. However, they are not. If the tolerance of the device is lower than 10%, then  $p(\hat{e} > 10 \cap e \leq 0)$  is near zero, thus  $P(\text{Reject} | e \leq 0)$  is negligible, but  $P(\text{Accept} | e > 0) \geq p(0 < e < 10 - \epsilon) / p(e > 0)$ , which is rather high. According to our own experience, Spanish taxi drivers calibrate their taximeters to obtain their maximum legal advantage, i.e., it is by far more frequent that a taxi has an error near 10 than an error lower than 0.

### 2.2 Lower upper bound of a trajectory

In order to obtain the highest number of valid measurements (i.e., those for which the tolerance is lower than 10%), we are interested in knowing the shortest trajectory whose length is known to be longer than the actual path, given a set of imprecise coordinates of the vehicle.

Therefore, in this work, it is proposed to calculate the lower upper bound (from now on called LUB) of all possible trajectories that are compatible with the measurements given by the GPS.

Due to the imprecise nature of input data, a new method for establishing the LUB is presented. In doing so, input data is represented as fuzzy data. This data is filtered in order to produce the smallest subset of coordinates that induces a multipolygonal that covers the input data as much as possible. Finally, that filtered data is fed to a deterministic algorithm for computing the upper bound of the length of the trajectory.

The filtering process is the most complex part of the procedure. It involves solving a multicriteria optimization problem, for which we will use the genetic algorithm NSGA-II (Deb et al. 2000; Deb and Goel 1993).

### 3 The vague nature of the GPS measurements

The term global positioning system (GPS) (Hofmann-Wellenhof and Collins 2004) refers to a set of devices (satellites and receiver) working together to get a fix (the position) of the receiver. The receiver can receive some signals from the satellites and compute a set of measurements: longitude, latitude, altitude, number of satellites in use, time, etc. Each signal received from a satellite contains information about the time that the signal takes to travel from the satellite to the receiver.

Using signals from four satellites, a GPS receiver can compute the three 3D coordinates and data for time correction (Mohinder et al. 2007). If more satellites are in view, they can be used to improve accuracy. For example the four best positioned can be selected to compute position and time. Another way to improve accuracy is overdetermining the equation system (Lachapelle and Ryan 2000), trying to minimize the errors due to perturbations of the satellites signals when crossing the atmosphere, satellite ephemeris deviation, satellite clock errors, receiver errors and multipath (Hofmann-Wellenhof and Collins 2004). As a rule of thumb, the higher the number of satellites the better the accuracy. But even with a high number of satellites in use (12–16) the geometry or constellation of the satellites must be taken into account to estimate the fix accuracy. This is done using DOP (dilution of precision), a measurement of the probability of the effects of the constellation on the fix accuracy (Langley 1999), a higher value of DOP indicates a weaker geometry of satellites. DOP has four components: PDOP (3D or spherical DOP), HDOP (latitude and longitude DOP), VDOP (vertical DOP) and TDOP (time DOP).

Under certain conditions, GPS measurement errors follow a bidimensional Gaussian distribution. When many

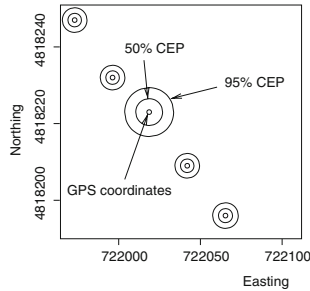


Fig. 1 Real GPS measurements, the CEP value changes from one measurement to another

satellites are available, that distribution can be regarded as circular (van Diggelen 2007). Because of this, consumer grade GPS receivers give an indication of their precision through a magnitude called Circular Error Probable (in following CEP): the radius within which 50% of the horizontal position solution will fall and it is centered at the true position.

CEP can be computed from the standard errors of the estimated coordinates with Eq. 5 (Langley 1991; Strang and Borre 1997).

$$CEP = 0.56\sigma_x + 0.62\sigma_y \tag{5}$$

The CEP at 95% probability is also known as R95 and can be obtained multiplying by 2.08 the 50% probability CEP.

In Fig. 1 a real example showing how the CEP could vary between consecutive measurements can be seen.

Consumer grade GPS do not send information related to the standard errors. HDOP values are available from the standard National Marine Electronics Association (NMEA) protocol used in most of the GPS receivers and this magnitude accounts for the impact of constellation geometry in horizontal accuracy. Thus, an empirical estimation of CEP/HDOP relationship must be carried out (Dussault et al. 2001; Cressie 1991). From the definition of CEP, this is easily done from a sample of GPS coordinates taken in a given location. For each HDOP value, the subset of GPS obtained under that value is extracted from the whole data. Then the smallest circle that covers 50% of the points is the CEP at that probability. The procedure for the 95% CEP is analogous.

#### 3.1 A fuzzy representation of GPS data

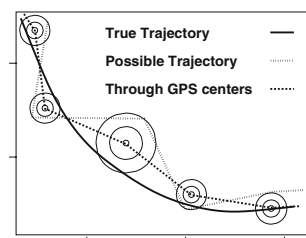
In the context of imprecise probabilities, a fuzzy set could be seen as a set of tolerances. Each tolerance is assigned a confidence rate, and the lower the tolerance the lower the

confidence rate (Goodman and Nguyen 1985). In particular, given an incomplete set of confidence intervals of a random variable, it is possible to generate a random fuzzy variable for which  $\alpha$ -cuts are confidence intervals of rate  $(1 - \alpha)$  (Couso et al. 2001). We will use this representation and perform a multi-level calculation of the LUB.

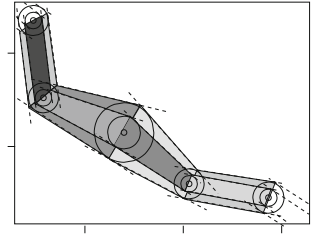
In the case of the measurements obtained from a GPS unit, two confidence intervals are given at 50% and at 95%. Using the procedure explained in this section, a value of CEP could be calculated for each probability value. It can easily be seen that the higher the probability value the higher the CEP value. The physical meaning of this fact is simple for the GPS measurements: the higher the confidence rate needed for determining the real position from which the GPS measurement was taken, the higher the CEP value.

#### 4 Calculation of a LUB using fuzzy data

The GPS measurements are sampled at equally spaced time intervals. Each measurement is a fuzzy set, as stated before, whose  $\alpha$ -cuts are circles centered on the GPS coordinates. Therefore, each circle is a confidence interval for the true coordinates of the taxi when the measurement was taken. In Fig. 2 some simulated GPS measurements and trajectories are shown. The position where the measurement was taken is in the real trajectory—continuous line—and it can be inside or outside the respective circle of radius CEP. The trajectory using the GPS coordinates is drawn using a dashed line. A trajectory totally compatible with the GPS measurements is also drawn as a dotted line. Notice that the lengths of these trajectories are different, but all of them are compatible with the measurements of the GPS. Thus, to know the accuracy of the measurement, we want to compute the lower upper bound of the lengths of all the paths which have all of their vertexes inside the circles (for each confidence level). This bound is the largest trajectory compatible with the GPS measurements.



**Fig. 2** Simulated example where the differences between the true trajectory and the trajectory through the GPS coordinates are shown



**Fig. 3** Simulated example showing how a polygonal chain that covers the fuzzy input data from GPS could be built

Observe that the LUB is infinite unless we introduce some constraints. The main assumption in this paper is that *changes in the direction of the vehicle between two samples are small*, thus we can approximate the trajectory between two consecutive samples by a straight line.

We will define a polygonal chain that covers the fuzzy data, by finding the outside tangents to the CEP for each  $\alpha$ -cut, and then computing the cross points of the corresponding tangents between two consecutive fuzzy points (see Fig. 3). Observe that

- (1) The longest segment contained in each polygon of four sides, a quadrilateral, is one of its diagonals.
- (2) The longest path contained in two adjacent quadrilaterals always comprises two of these diagonals.
- (3) The longest path contained in three adjacent quadrilaterals is also composed of diagonals, but they might not be the longest diagonals of each quadrilateral.

This means that the LUB is defined by a list of vertexes, but it is not immediate to find out which vertexes from the polygonal chain should be chosen to define the path. Later in this section it is explained how we solve this problem, however let us first introduce first some preprocessing algorithms that will improve the accuracy of the final measurement.

##### 4.1 Preprocessing the data

The accuracy of the measurements can be improved if some collinear points are joined, and some of the worst GPS fixes are discarded. If the sampling rate is high enough, our hypothesis (straight trajectory between samples) still holds after performing these two changes, and we can safely preprocess the data before computing the estimation of the length and the LUB.

Given a level value  $\alpha$ , the fuzzy input data is represented as a circle centered on the coordinates, and whose radius is the CEP at probability  $(1 - \alpha)$ . We have mentioned that,



for each  $\alpha$ -cut value, the data comprises a set of circles, and also that the two outside tangents of two consecutive circles, and the cross points of the tangents to every three consecutive circles define a polygonal chain. The objective of the preprocessing is to obtain a reduced polygonal chain of fuzzy sets which still contains the LUB for each level  $\alpha$ . If crisp data were used, polygonal chain simplification has been studied in (Estkowski and Mitchell 2002; Hershberger and Snoeyink 1992; Buzer 2009; Drysdale et al. 2008; Chen et al. 2005; Gudmundsson et al. 2007). For fuzzy data, to our knowledge, the most similar work in the available literature is that presented in (Anile et al. 2000), where fuzzy data from a geographical data base are used to reconstruct 3D images by means of fuzzy B-splines (de Boor 1972). Further to the approach in this paper are (Li and Chen 1999; Quddus et al. 2006).

Our process of computing the LUB is a three step procedure: the first step is filtering by collinearity, then filtering by a multiobjective algorithm, and finally using a deterministic algorithm for determining the largest polyline in a polygonal chain; this is done for each  $\alpha$ -cut. These filtering stages are described in the subsections that follow, and the deterministic algorithm is explained in Sect. 4.2.

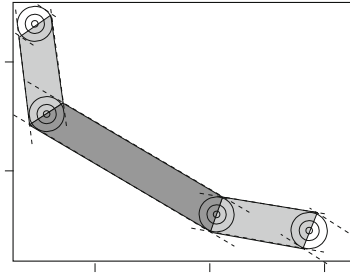
#### 4.1.1 Filtering by collinearity

For each  $\alpha$ -cut a polygonal chain is obtained, as explained before. If for three consecutive circles, both pairs of outside tangents are parallel, then the quadrilateral defined by the first two circles is contained in the quadrilateral defined by the first and third circles, and the intermediate circle could be filtered. Further removals of points are limited by the sampling rate, i.e., if too many points are filtered out, we can not assume the trajectory is straight between the first and the last one.

#### 4.1.2 Filtering spurious data

Spurious data are input points where the error is abnormally high. We can remove those points where the fix was not accurate enough, provided that we do not discard a significant number of points, i.e., a fraction  $1 - \alpha$  of the vertexes of the reduced polygonal must be in the unfiltered path, for each level  $\alpha$ . In Fig. 4 the process is illustrated for a given  $\alpha$ -value.

Filtering points reduces the area of the polygonal chain, so the LUB will be smaller too, and this is not a desired effect. We do not want to filter representative points. Maximizing the percentage of covered data, while filtering the outliers, are objectives that counteract one another. We will use a multicriteria genetic algorithm to optimize the filtering, as we will explain in Sect. 5.



**Fig. 4** The simplifying process over a synthetic example: filtering a point reduces the area of the polygonal chain, but the remaining points must resemble the trajectory

#### 4.1.3 Dynamic behavior of the vehicle

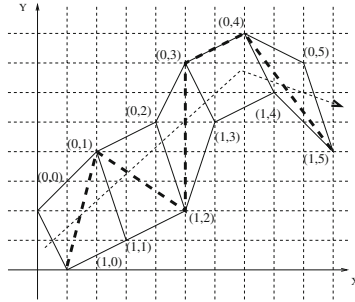
The filtering process can be further improved if we assume that the vehicle has inertia and some trajectories contained in the polygonal chain are not feasible (Chen et al. 2005). For example, think of a vehicle moving at a certain speed. There exists a maximum angle the vehicle could turn without risking its security. Moreover, for each speed value there exists a maximum angle, lower than that given due to security reasons, which is comfortable for the vehicle passengers.

Therefore, we can introduce a second hypothesis in our analysis: *driving a taxi must be comfortable*. The maximum angle of turn is a function of the speed of the vehicle: the greater the speed, the shorter the maximum angle of turn. In determining the angle of turn at each point, the one before and the one after fuzzy points are used. For an  $\alpha$ -cut value the fuzzy points are circles. By means of the tangents the polygonal chain for the three fuzzy points could be defined. The largest trajectory included in such polygonal chain is one of the four possible polylines that goes through the vertexes of the polygonal chain. Once the largest trajectory for this three points polygonal chain has been found, if the angle that the segments of the largest trajectory define is larger than the maximum angle of turn at current speed, the trajectory is not considered as a candidate for its length being the LUB.

#### 4.2 Deterministic longest path estimation

Once the data are preprocessed, we evaluate its LUB with a deterministic algorithm, that we explain in this section.

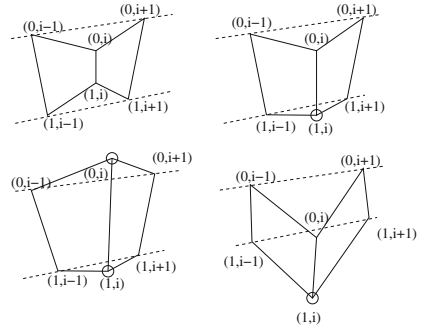
For each  $\alpha$ -cut of the chain, we get a polygonal set constructed with trapezoids, as can be seen in Fig. 5. The motion direction is indicated by a thin dashed arrow. Each trapezoid vertex is denoted with a pair of integers, those at



**Fig. 5** Example of longest path estimation following the algorithm explained in Sect. 4.2

the left of the arrow have zero at first, those at the right have one at first. The other number is the step in the motion sequence. The longest path at each step  $i$  goes through  $(0, i)$  vertex or  $(1, i)$  vertex. The set of vertices that defines the longest path, can be computed by exhaustive exploration of all possible combinations, but this is very expensive in terms of computational cost and proved impracticable in a realistic trajectory with 100 points, for instance. This problem has been studied in the area of Computational Geometry and is related with Longest Path with Forbidden Pairs (Berman and Schnitger 1992), that is NPO PB-complete.

Due to this fact and given that in a realistic trajectory the changes of direction and the changes in distance between left and right vertex are limited due to the dynamics of the taxi, the geometry of the road and GPS behavior, we use a heuristic that is linear in time with the number of vertices. The heuristic is based on the selection of convex vertices: when a vehicle turns, the longest path goes through the exterior of the trajectory curvature. The convexity of a vertex is analyzed using the straight lines that rely on previous and following vertices. The possible relative positions of the central vertex can be seen in Fig. 6, where convex vertices are marked with a small circle and the lines that pass through vertices  $(0, i - 1), (0, i + 1)$  and  $(1, i - 1), (1, i + 1)$  are drawn. From left to right and top to bottom, if both vertices are between the lines, both are concave. If only one is outside the lines, it must be convex. If both are outside the lines, both may be convex (left) or one may be concave and the other is convex. In both cases, if the farthest one from the nearest line is chosen, then it is convex. The heuristic is as follows: the first segment of the longest path goes from a convex vertex in step 1 to the vertex at step 0 that gives the maximum segment length. From step 1 to the one before the last, the path goes through:



**Fig. 6** Possible relative positions of vertices and lines between prior and next vertices. This is useful in the determination of convex and nonconvex vertices

- If there is only a convex vertex, through this vertex.
- If there are two convex vertices, through the farthest one.
- If there are no convex vertices, through the farthest one.

The last segment ends in the farthest vertex from the previous one.

In Fig. 5 the path computed with this heuristic is marked with a thick dashed line. The first segment goes from  $(1, 0)$  to  $(0, 1)$  because  $(0, 1)$  is convex and the distance to  $(0, 0)$  is shorter. Then the longest path continues to  $(1, 2)$  because it is the only convex. The same happens with  $(0, 3)$  and  $(0, 4)$ .

Finally, the path ends in  $(1, 5)$  because it is farther from  $(0, 4)$  than  $(0, 5)$ .

#### 4.3 Randomized longest path estimation

There is an alternate implementation for the method proposed in the preceding section. Let us suppose that we superimpose a grid on the chain of circles (see Fig. 7) and compute the whole set of lengths obtained by the selection of one point of the grid from each fix. In order to compute the maximum length from the obtained trajectories, a backtracking algorithm is impracticable due to the high number of points present in real trajectories. However, we can uniformly sample a number of trajectories and compute a Montecarlo estimate of the probability distribution of the lengths that arise. The mean value of this distribution would be our estimation of the length, and we can also produce a confidence interval for the mean, from which to calculate our tolerance.

To build a sample trajectory, we have implemented the procedure that follows: for each fix, with a probability 0.95,

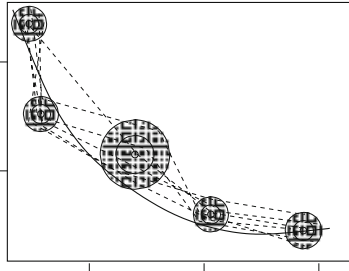


Fig. 7 Discretization of GPS measurements and exhaustive exploration of the lengths of all the trajectories obtained from all the possible combinations of discretized points. Only a fraction of the possible trajectories is shown

a point of the grid which is inside the CEP at that level is randomly selected (thus with a probability 0.05 the point is selected from outside the corresponding CEP). The length of the polygonal that joins all these points is stored and the whole procedure repeated a high number of times. The sample distribution of these lengths is finally used to compute the sample mean (which is an estimator of the length that the taximeter should have produced) and a confidence interval for it.

Unfortunately, there are some issues with this method. In particular, the range of the sample distribution of the lengths is bounded by the maximum sample length, which in general is not the maximum length of a compatible path. As a matter of fact, the maximum of the sample would be a more reliable estimator of the LUB for our purposes. Since there are not clear improvements neither in speed nor in accuracy with respect to the method in the preceding section, Montecarlo analysis is not considered in this work.

4.4 Predetermined trajectories and maps

A trivial improvement of the accuracy could be obtained if we restricted ourselves to a known route, and adjust the GPS coordinates so that each position is replaced by its nearest point in the center of the road. However, this method has been rejected by the experts in the certification agency that will homologate the device. The reason given was that all the measurements have to be reproducible. There will be points with known latitude and longitude where the certification agency will position the devices and check that the tolerance of the measurements is within the range. This kind of certification is not compatible with dynamic changes in the coordinates, because the nearest point of the road may well be out of the circle defined by the CEP, making the determination of the LUB useless.

However, nothing prevents using the map as a constraint, i.e., we know that the car is in the intersection between the road and the confidence interval produced by the GPS. The coordinates of the whole road and not only its center are needed, though. This method has not been implemented either as we have not measured the width of the road, nor do we have access to a cartography of the route with legal validity. This last point is important, because any error in the maps would void all the measurements taken with the devices. Nevertheless, observe that, even if we decided to include this information in the future, it would not alter the computations we present in this paper.

5 Genetic filtering of the fuzzy data

In this section the details of the codification and operators used in the genetic algorithm which has been used to filter the data are given. A multiobjective genetic algorithm has been used in the filtering process. Specifically, the multi-objective genetic algorithm used in this work is the well known NSGA-II (Deb et al. 2000; Deb and Goel 1993). This algorithm is outlined in Fig. 8.

5.1 Codification of an individual

Each individual is a subset of the chain of fuzzy points, codified as an array of booleans. That is to say: input data is a series of timely ordered fuzzy points. Each one of the fuzzy input points has a boolean value associated for each individual. When the boolean value for a fuzzy point is set to true then that fuzzy point is included by the individual. When the boolean value for a fuzzy point is set to false that fuzzy point is filtered out.

To generate an individual, a probability threshold  $p$  is given, and each fuzzy point in the vector of input fuzzy data is included with probability  $p$ . The origin and the end of the taxicab run must always be included.

```

Rt = Pt ∪ Qt
F = fast-non-dominated-sort (Rt)
Pt+1 = ∅, i = 1;
while |Pt+1| + |Fi| > N
    crowding-distance-assignment (Fi)
    Pt+1 = Pt+1 ∪ Fi
    i = i + 1
end while
Sort(Fi, <n)
Pt+1 = Pt+1 ∪ Fi[1 : (N - |Pt+1|)]
Qt+1 = make-new-population (Pt+1)
t = t + 1
    
```

Fig. 8 Pseudocode of the NSGA-II algorithm

### 5.2 Multiobjective fuzzy fitness function

Observe that both the area of the polygonal chain and the percentage of covered fuzzy data by the polygonal chain are fuzzy functions. We want to minimize the area of the defined polygonal chain and to maximize the percentage of covered fuzzy data. Following (Sánchez and Couso 2007), we will not defuzzify the objectives, but use a fuzzy valued fitness function to assess the quality of the filtering.

For a genetic algorithm being able to solve a fuzzy valued optimization, we can define a total order between the fuzzy values of the fitness function (Abbasbandy and Asady 2006; Mitchell 2006; Tran and Duckstein 2002; Sheen 2006; Sun and Wu 2006). In particular, we need to sort fuzzy numbers, which some authors think is inconsistent with most definitions of total order between fuzzy sets (Yeh and Deng 2004; Wang et al. 2005). The use of a weaker (partial) order can also be made compatible with a tournament-based selection in conventional genetic algorithms. In this context, in (Jahanshahloo et al. 2004; Wang et al. 2005) an interval representation is used, and in (Ganesan and Veeramani 2006) another partial order relation is proposed, restricted to trapezoid membership functions. This last solution can not be applied to our problem, either, as there is neither knowledge nor restrictions about the membership functions type and certainty distributions. Also, different approaches for evaluating the Pareto dominance using fuzzy fitness functions have been proposed. In the use of fuzzy rules (Youssef et al. 2000) for determining the dominance of one individual with regard to another is proposed. Similar works are documented in (Trebi-Ollennu and White 1997; Kiyota et al. 2000). In this work we have decided to use our own implementation of the NSGA-2 algorithm for fuzzy data, which is described in Sánchez and Couso (2007), Sánchez and Couso et al. (2009). We have used an imprecise probabilities based ranking, in combination with the definitions of nondominated sorting and crowding distance explained therein.

### 5.3 Genetic operators

The definitions of the crossover and mutation must reduce the number of vertexes in the population.

- *Crossover*. Given two parents  $A$  and  $B$ , the offspring are two new chains  $C$  and  $D$  such that  $A \cap B \subseteq C$  and  $A \cap B \subseteq D$ ; a vertex  $v \in A - B$  has a probability  $p^+$  of being in  $C$ , and a vertex in  $B - A$  has a probability  $p^-$  of being in  $C$ , where  $p^-$  is much lower than  $p^+$ .  $D$  set is constructed in the same way.
- *Mutation*. This operator is defined as the random removing of a point of the chain, different from the first or last one. It is important to notice that neither the first

nor the last fuzzy points will be included in the genetic operations because both trajectory ends must be included for all individuals.

## 6 Experiments and results

In this section the results of the experiments that support the claims in Sect. 2 are shown. Therefore, the experiments are designed to:

- (1) Evaluate the accuracy of the proposed method in a realistic scenario using synthetic data.
- (2) Compare both methods in real situations.

Because of this, two batches of experiments were performed:

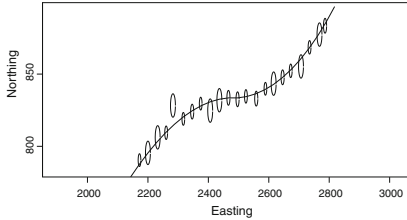
- (1) Simulated GPS data acquisition from synthetic data: the run of the vehicle is simulated and the GPS measuring process is also simulated adding random noise to mimic the properties of a GPS sensor. Under these controlled conditions the percentage of error between the LUB and the known length of the path is estimated.
- (2) Compared performance in real world situations: a real circuit is measured with a certified ISO-9002 odometer and the reported length is compared with that obtained with the proposed method. The run with the same length is measured using the same vehicle and the roller machine, in order to compare the obtained results.

In the following sections these experiments are detailed.

### 6.1 Synthetic data

It was decided to evaluate our algorithm in a realistic path that covers the situations usually found when the VTSS test of a taxi is carried out. Since we need to know the true length of the path, these datasets must be synthetic. The data includes several turns, accelerations and decelerations and changes in CEP. GPS longitude/latitude coordinates were translated to Universal Transverse Mercator northing/easting coordinates in order to make distance calculations between GPS fixes easier (Snyder 1982). With this system, points on the Earth's surface are projected onto an equally spaced planar metric grid, therefore the distance between fixes is the usual Euclidean one.

The trajectory is sampled once each second. At each location, a random value ranging from 4 to 8 m is taken as the CEP at 95% probability, being suitable values for a consumer grade GPS receiver. The uncertainty in the GPS measurements is simulated using the following procedure: with a probability of 0.95, a point is selected whose



**Fig. 9** Example of GPS generated data along with the true trajectory. As can be seen, some of the fixes CEP do not intersect the true trajectory. The majority of the points of the trajectory are inside the CEP at 95%

distance to the real one is shorter than the CEP, and with probability of 0.05 an outlier is introduced. Part of the generated data is shown in Fig. 9. GPS measurements are represented with circles (actually ellipsoids in Fig. 9, due to scaling issues) with a radius equal to 95% CEP and the original trajectory with a continuous line. As can be seen, 95% of the circles intersect the trajectory, but none of their centers are in the actual trajectory.

We perform three experiments in order to test if the tolerance computed from the LUB is lower than the legal margin or not.

If the true length of the trajectory is known, the tolerance is

$$\epsilon = (\text{LUB} - \text{length})/\text{length}. \tag{6}$$

The synthetic trajectories generated for this batch of experiments were:

- A first 120 points dataset, with smooth turns, similar to a conventional road.
- A second 120 points dataset, with stronger turns, also similar to a conventional road.
- A third 200 points dataset, similar to test circuit, with a mixture of strong and smooth turns in all possible directions.

Several tests were also carried out to assess the genetic filtering. This was launched with the parameters shown in Table 1. Firstly, and for both trajectories, ten runs of each of the multiobjective algorithm were done, without restrictions based on the dynamic behavior of the vehicle. Finally, a second set of ten runs were done with the multiobjective algorithm using the same parameters but assuming that the angular velocity of the vehicle had a speed dependent bound.

6.1.1 Case study I

The true length of the first trajectory is 3,228.6 m. The distance through the GPS fixes is 3,238.5 m. Taximeters

**Table 1** Parameters used for NSGA-II algorithm

Parameter	Value
Number of generations	1,000
Number of individuals	100
Number of populations	1
Minimum percentage of fuzzy points covered by each individual	0.85
Probability $p^+$ for genetic crossover	0.5
Probability $p^-$ for genetic crossover	0.1
Crossover probability	0.7
Mutation probability	0.1

**Table 2** Results from 10 runs of NSGA-II without dynamic analysis

Dataset	True length	Measured length	LUB estimation standard deviation	LUB estimation mean
1	3,228.57	3,238.521	16.95	3,499.48
2	2,741.30	2,696.487	43.55	3,192.51
3	9,337.78	9,364.49	43.55	9,404.68

**Table 3** Results from 10 runs of NSGA-II with dynamic analysis

Dataset	True length	Measured length	LUB estimation standard deviation	LUB estimation mean
1	3,228.57	3,238.521	0.52	3,243.45
2	2,741.30	2,696.487	10.88	2,798.01
3	9,337.78	9,364.49	10.88	9,353.85

which mark more than  $3,228.6 + 10\% = 3,551.4$  will be rejected. Observe that, in practical circumstances we do not know the actual length of the path and we will reject those taxis that charge more than  $3,238.5 + 10\% = 3,562.4$ .

The mean LUB for this trajectory (first row in Table 2) is 3,499.5. Then, the expected tolerance is 0.084 (0.081, if we used the measured values to compute the tolerance). This result means that taximeters charging more than 3,551.4 can be safely rejected.

If we filter the data taking into account the dynamics of the vehicle, (see Table 3) the expected tolerance is 0.005 (0.002 if we used the measured length) which is much lower than the legal margin.

6.1.2 Case study II

The length of the second trajectory is 2,741.3 m. This trajectory has stronger turns than the first, and we will see that the LUB will be less tight, given the deterministic procedure explained in Sect. 4.2. The distance through the



**Fig. 10** First version of the prototype of the data logger that is being developed for the verification of taximeters. An evolution of this device is shown in Fig. 11

GPS fixes is 2,696.5 m. If we repeat the analysis done in the preceding case (see second row of Table 2) we obtain that the mean LUB is 3,127.0 m. The expected tolerance is 0.141 (0.160), thus we can not reject a taximeter on the basis of a test carried out on this route.

The use of dynamic restrictions in the genetic filtering causes a significant improvement of the tolerance, which is now 0.021 (0.038,) thus we could legally reject taxis that charge more than  $2,741.3 + 10\% = 3,015.4$  (2,966.2) using the same input data.

Observe that, given these results, we recommend that the VTSS station choose circuits with smooth turns, since they will surely produce a low rate of null verifications. In general terms, the use of convoluted paths is not advised with the system we propose here.

**Fig. 11** *Left* evolution of the prototype shown in Fig. 10 inside a commercial enclosure. The design is based on low cost automotive microcontrollers and a consumer-grade GPS receiver. *Right* the same prototype, with the enclosure opened showing the pcbs of the device



### 6.1.3 Case study III

The length of the third trajectory is 9,337.78 m. As stated before, this trajectory resembles a test circuit and has a mixture of stronger and smooth turns.

The distance through the GPS fixes is 9,364.49 m. If we repeat the analysis done in the preceding case (see third row of Table 2) we obtain that the mean LUB is 9,404.68 m. The expected tolerance is 0.007 (0.004).

Again, the use of dynamic restrictions in the genetic filtering causes a significant improvement of the tolerance, which is now 0.0011 (0.0017).

In this case, any taximeter that charges more than  $9,337.78 + 10\% = 10,271.56$  can be legally rejected.

Note that the computed LUB is *under* the measured length but *over* the real length: when GPS measurements are accurate, the LUB is tighter.

### 6.2 Real-world measurements

For taximeter verification, the taxi owner is sent on a run. He/she must carry the target taximeter, the GPS and the datalogger device. Once the taxi comes back to the VTSS, the GPS measurements are loaded into the computer where LUB computing will be carried out. Only bi-dimensional measurements are to be taken into account as the losses of information using this representation are not significant: the trajectories range between 3 and 5 km, and the differences in altitude are a few meters. Each measurement includes the coordinates, the calculated CEP value for the desired  $\alpha$ -cuts and the HDOP. The prototype which is currently under development is shown in Figs. 10 and 11.



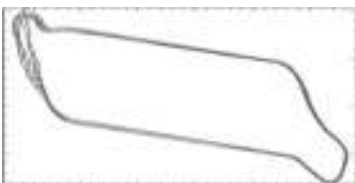
**Fig. 12** Aerial picture of the circuit used in the tests. In the left of the image, a portion of the road is shown between the building and an area covered with trees, where GPS measurements are difficult

The device was entirely designed at the Metrology and Models group at Oviedo University. It uses three Atmel AVR microcontrollers, and collects NMEA data from a San Jose Navigation FV-M5 GPS module. It incorporates a flash memory chip (Atmel dataflash) to store data, as well as a USB connection to program the controllers, send or receive data from a PC. Moreover, the device's got an LCD display and a bubble keyboard to control its operation.

In this section we have used a circuit surrounding the Campus de Viesques' buildings (Gijón, Asturias, Spain). The length of the circuit was measured using an ISO-9002 certified odometer. In Fig. 12, a picture of the circuit can be seen. The circuit comprises two long and two short straight paths, and four sections with sharp turns. The measured length was 1,093 m.

A direct comparison of the rolling machine against the other methods is not possible, so an indirect procedure was employed. We equipped a car with an odometer, that reported the distance travelled. Then we placed the same car in the rolling machine, and travelled 1,093 m, according to the same instrument. Lastly, we read the measurement produced by the rolling machine. This procedure was repeated 10 times.

In Fig. 13, the route recorded by the GPS in the analysed laps can be seen. There are large differences between the



**Fig. 13** Path registered by the GPS, ten laps of the circuit depicted in the preceding figure. There are large differences between the laps, mostly in the left part of the circuit

**Table 4** Mean and standard deviation of the 10 measurements of the real path using NSGA-II filtering, unfiltered GPS coordinates and equivalent rolling cylinder machine run

	NSGA-II	GPS	Rolling Mach.
Mean	1,121.494	1,103.635	1,106.667
Standard deviation	7.665415	16.49395	5.532274

The measured length using a certified odometer was 1,093 m

**Table 5**  $p$ -Values of Wilcoxon test between each of the tested methods

	NSGA-II	GPS	Rolling Mach.
NSGA-II	–	<b>0.0057</b>	<b>0.0001</b>
GPS	–	–	0.9205

The differences in bold are statistically significant at 0.05 level, even after Bonferroni adjustment (adjusted  $\alpha = 0.05/3 = 0.0167$ )

centers of the measurements between successive laps, especially in the left part of the circuit. This uncontrollable behavior results in a variation of the measured length of the same path, as shown in Table 4. This table collects the mean and standard deviations of the obtained measurements, using each method discussed in the paper: NSGA-II dynamical filtering, raw GPS coordinates, and cylinders. It is remarked that the variability of the results in the cylinders does not take into account the variability induced by changes in pressure of the tires or their wear. As can be seen, the variability of the proposed method and the roller machine are comparable and much lower than that obtained using unfiltered GPS data. Moreover, the obtained LUB is effectively an upper bound of the actual length and can be used to take the decision of when the test must be repeated or not. The  $p$ -values obtained from nonparametric Wilcoxon test are shown in Table 5. As can be seen, the differences between NSGA-II and the other methods are statistically significant at 0.05 level, even after Bonferroni adjustment (Hsu 1996) for a number of comparisons  $n = 3$ . In this case, the differences are significant if the obtained  $p$ -value is less than  $\alpha/n = 0.0167$ .

## 7 Conclusions

There are legal issues concerning the use of GPS devices for verifying taximeters. However, in our opinion a GPS is the measuring device that best balances cost and accuracy for a VTSS.

To homologate a GPS for this application, we need to guarantee that the tolerance of the measurements is lower than the legal 10% margin. We can not assert that this tolerance holds in absolute terms, but in this paper we have defined how to compute the upper bound of any trajectory

length compatible with GPS data, which effectively is a computation of the upper tolerance of the device, for a particular route. These calculations must be repeated each time a taxi is verified, because the obtained margins depend on the GPS signal reception, the satellite configuration and the shape of the path. We have also found that the stronger the turns in the calibration trajectory, the less accurate the measurement is. Therefore, we recommend to avoid convoluted paths in the GPS-based verification of taximeters.

**Acknowledgments** This work was funded by Spanish Min. of Education, under the grant TIN2005-08386-C05-05, TIN2008-06681-C06-04 and ITVASA.

## References

- Abbasbandy S, Asady B (2006) Ranking fuzzy numbers by sign distance. *Inform Sci* 176:2405–2416
- Anile AM, Falcidieno B, Gallo G, Spagnuolo M, Spinello S (2000) Modeling uncertain data with fuzzy B-splines. *Fuzzy Sets Syst* 113:397–410
- Berman P, Schnitger G (1992) On the complexity of approximating the independent set problem. *Inform Comput* 96:77–94
- Buzer L (2009) Optimal simplification of polygonal chains for subpixel-accurate rendering. *Comput Geom* 42(1):45–59
- Casillas J, Cordón O, del Jesus MJ, Herrera F (2001) Genetic tuning of fuzzy rule-based systems integrating linguistic hedges. In: *Proceedings of the 9th IFSA world congress and 20th NAFIPS international conference*, Vancouver, pp 1570–1574
- Chen DZ, Daescu O, Hershberger J, Kogge PM, Mi N, Snoeyink J (2005) Polygonal path simplification with angle constraints. *Comput Geom* 32(3):173–187
- Couso I, Montes S, Gil P (2001) The necessity of the strong alphacuts of a fuzzy set. *Int J Uncertain Fuzziness Knowl Based Syst* 9(2):249–262
- Cressie NAC (1991) *Statistics for spatial data*. Wiley, London. ISBN 0-471-84336-9
- de Boor C (1972) On calculating with B-splines. *J Approx Theory* 6:50–62
- Deb K, Goel T (2001) Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithms for better convergence. In: Zitzler E, Deb K, Thiele L, Coello CAC, Corne D (eds) *First international conference on evolutionary multi-criterion optimization*. Springer, Heidelberg, LNCS No. 1993, pp 67–81
- Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2000) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In: Schoenauer M, Deb K, Rudolph G, Yao X, Lutton E, Merelo JJ, Schwefel HP (eds) *Proceedings of the parallel problem solving from nature VI conference*. Springer, Heidelberg, pp 849–858
- Drysdale RLS, Rote G, Sturm A (2008) Approximation of an open polygonal curve with a minimum number of circular arcs and biarcs. *Comput Geom* 41(1–2):31–47
- Dussault C, Courtois R, Ouellet JP, Huot J (2001) Influence of satellite geometry and differential correction on GPS location accuracy. *Wildl Soc Bull* 29(1):171–179
- Estkowski R, Mitchell JSB (2002) Simplifying a polygonal subdivision while keeping it simple, SCG '01. In: *Proceedings of the seventeenth annual symposium on computational geometry*, ISBN 1-58113-357-X, 40–49, ACM Press, New York
- Ganesan K, Veeramani P (2006) Fuzzy linear programming with trapezoid fuzzy numbers. *Ann Oper Res* 143:305–315
- Goodman IR, Nguyen HT (1985) *Uncertainty models for knowledge-based systems*. Elsevier, New York
- Grewal MS, Weill LR, Andrews AP (2007) *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*, 2nd edn. Wiley, London. ISBN: 978-0-470-04190-1.
- Gudmundsson J, Narasimhan G, Smid M (2007) Distance-preserving approximations of polygonal paths. *Comput Geom* 36(3):183–196
- Hershberger J, Snoeyink J (1992) Speeding up the douglas-peucker line simplification algorithm. In: *Proceedings of the 5th international symposium on spatial data handling*, Charleston, pp 134–143
- Hofmann-Wellenhof B, Collins L (2004) *GPS theory and practice*. Springer, Heidelberg. ISBN 3211835342
- Hsu JC (1996) *Multiple comparisons: theory and methods*. Chapman and Hall, London
- Jahanshahloo GR, Soleimani-damaneh M, Nasbaradi E (2004) Measure of efficiency in DEA with fuzzy input-output levels: a methodology for assessing, ranking and imposing of weight restrictions. *Appl Math Comput* 156:175–187
- Kiyota T, Tsuji Y, Kondo E (2000) New multiobjective fuzzy optimization method and its application. In: *American control conference ACS' 2000* 6, Chicago, pp 4224–4228
- Lachapelle G, Ryan S (2000) Statistical reliability measures for GPS. In: *IMA workshop on mathematical challenges in GPS*. University of Minnesota, August 16–18
- Langley RB (1991) The mathematics of GPS. *GPS World* 2(7):45–59
- Langley RB (1999) Dilution of precision. *GPS World* 10(5):52–59
- Li L, Chen W (1999) Corner detection and interpretation on planar curves using fuzzy reasoning. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 21(11):1204–1210
- Mitchell HB (2006) Ranking type-2 fuzzy numbers. *IEEE Trans Fuzzy Syst* 14(2):287–294
- Mosavi MR, Mohammadi K, Refan MH (2002) Fuzzy processing on GPS data to improve positioning accuracy, before and after S/A Is turned off. In: *The Asian GPS conference*, India, pp117–120
- Naranjo J, González C, García R, de Pedro T (2007) Fuzzy logic for transportation guidance: developing fuzzy controllers for maintaining an inter-vehicle safety headway. In: Bai Y, Zhuang H, Wang D (eds) *Advances in industrial control, advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*. Springer, London, pp 129–143
- Otero J, Sanchez L, Alcalá-Fdez J (2008) Fuzzy-genetic optimization of the parameters of a low cost system for the optical measurement of several dimensions of vehicles. *Soft Comput* 12(5):751–764
- Quddus MA, Noland RB, Ochieng WY (2006) A high accuracy fuzzy logic based map matching algorithm for road transport. *J Intell Transport Syst* 10(3):103–115
- Sánchez L, Couso I (2007) Advocating the use of imprecisely observed data in genetic fuzzy systems. *IEEE Trans Fuzzy Syst* 15(4):551–562
- Sánchez L, Couso I, Casillas J (2006) A multiobjective genetic fuzzy system with imprecise probability fitness for vague data. In: *Second international symposium on evolving fuzzy systems 2006 (EFS06)*, Ambleside Lake District, pp 131–137
- Sánchez L, Couso I, Casillas J (2007) Modeling vague data with genetic fuzzy systems under a combination of crisp and imprecise criteria. In: *First IEEE symposium on computational intelligence in multi-criteria decision-making (MCDM 2007)*, Honolulu
- Sánchez L, Couso I, Casillas J (2009) Genetic learning of fuzzy rules based on low quality data. *Fuzzy Sets Syst* (submitted)
- Sheen JN (2006) Fuzzy evaluation of cogeneration alternatives on a petrochemical industry. *Comput Math Appl* 49:741–755



- Strang G, Borre K (1997) Random variables and covariance matrices. In: Linear algebra, geodesy, and GPS. Wellesley-Cambridge Press, Massachusetts
- Snyder JP (1982) Map projections used by the U.S. geological survey. Geol. Survey Bulletin 1532. U.S. Government Printing Office, Washington
- Sun H, Wu J (2006) A new approach for ranking fuzzy numbers based on fuzzy simulation analysis method. *Appl Math Comput* 174:755–767
- Tran L, Duckstein L (2002) Comparisons of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure. *Fuzzy Sets Syst* 130:321–341
- Trebi-Ollennu A, White BA (1997) Multiobjective fuzzy genetic algorithm optimization approach to nonlinear control system design. *IEEE Proc Control Theory Appl* 2(144):137–142
- van Diggelen F (2007) GNSS accuracy: Lies, Damn Lies, and statistics. *GPS World* 9(1):41–45
- Wang Y-M, Greatbanks R, Yang J-B (2005) Interval efficiency assessment using data envelopment analysis. *Fuzzy Sets and Syst* 153:347–370
- Yeh C-H, Deng H (2004) A practical approach to fuzzy utilities comparison in fuzzy multicriteria analysis. *Int J Approx Reason* 35:179–194
- Youssef H, Sait SM, Khan A (2000) Fuzzy simulated evolution algorithm for topology design on campus networks. In: Congress on evolutionary computation 1. Piscataway, pp 180–187
- Sun Z, Dong T, Liao X, Zhang R, Song D (2007) Fuzzy logic for flight control II: fuzzy logic approach to path tracking and obstacles avoidance of UAVs. In: Bai Y, Zhuang H, Wang D (eds) *Advances in industrial control, advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*. Springer, London, pp 223–235
- Zheng G, Zhao R, Guo Q, Liu L, Bai L, Du L (2006) Adaptive avoiding divergence algorithm for GPS/DR integration based on fuzzy logic. *Intelligent control and automation, 2006. WCICA 2006*. In: *The sixth world congress, vol 2, 21–23 June 2006*, pp 8679–8682



## Publicación 3

- **Nombre de la revista:** Machine Vision and Applications
- **Factor de impacto:** 0.952
- **Ranking:** 75/103 en Computer Science, Artificial Intelligence (Q3)

## 3D motion estimation of bubbles of gas in fluid glass, using an optical flow gradient technique extended to a third dimension

J. Otero, A. Otero, L. Sanchez

Computer Science Department, Oviedo University, Campus de Viesques, 33203 Gijón, Asturias, Spain; e-mail: jotero@lsi.uniovi.es

Received: 9 July 2001 / Accepted: 5 August 2002

Published online: 3 June 2003 – © Springer-Verlag 2003

**Abstract.** To solve the problem of estimating velocities of gas bubbles in melted glass, a method based on optical flow constraint (OFC) has been extended to the 3D case. A single camera, whose distance to the fluid is variable in time, is used to capture a sequence of frames at different depths. Since objects are not static, we cannot obtain two frames of different height values at the same time, and to our knowledge, this prevents the use of common 3D motion estimation techniques. Since the information will be rather sparse, our estimation takes several measures around a given pixel and discards the erroneous ones, using a robust estimator. Along with the exposition of the practical application, the estimation proposed here is first contrasted in the 2D case to common benchmarks and then evaluated for a synthetic problem where velocities are known.

**Key words:** 3D motion parameter – 3D reconstruction – Depth computation – Optical flow – robust estimation

### 1 Preliminary

There are basically three ways to perform the calculation of the optical flow field in the case of 2D conventional images:

- Gradient-based techniques
- Correlation-based techniques
- Frequency-based techniques

Gradient-based techniques use the well-known optical flow constraint (OFC) in order to compute the optical flow [14]. This technique makes the assumption that intensity changes in a sequence of images are due only to the movement of the objects in the scene: each pixel, corresponding to a given point of an object, will have constant brightness in the different positions that it takes during the sequence. Mathematically this is expressed as shown in Eq. (1).

$$\frac{dI(x, y, t)}{dt} = 0. \quad (1)$$

As it can be seen, the spatiotemporal derivatives must be estimated. This estimation is noise sensitive, so optical flow

This work has been supported by Saint Gobain Cristaleria S.A., under contract FOU-EM-034-01 with Oviedo University, Spain.

estimation has the same problem. Later in this paper, we will analyze this expression in depth.

Correlation-based techniques try to minimize a measure of similarity (or dissimilarity) between patches taken from two consecutive frames centered on a given pixel [3,5]. The displacement that maximizes (or minimizes) the selected measure divided by the interval between the acquisition of the frames is the velocity of the pixel. This approach is computationally expensive, and its complexity grows with the square of the maximum displacement searched. There are approaches that solve this problem using a bidimensional LUT (look-up table) instead of performing floating-point calculations. The gray-scale depth must be limited to maintain the LUT within a convenient size [19], but the quality of the estimation decreases as the number of gray levels does.

Frequency-based techniques use a set of tuned spatiotemporal filters to search for the velocity of a pixel [13]. Each one of the filters will give a response to the stimuli of the data (the sequence of images); the filter with the maximal response will be tuned with the velocity searched; once the filter is identified, so is the velocity. Some researchers are of the opinion that this is the most precise approach, but it is very expensive in terms of computational cost [8]. A comparison of these techniques can be found in [7].

3D optical flow estimation is not different in essence from 2D; thus, the three families of techniques could be used, but it is known that information regarding the spatiotemporal derivatives have an important role in 3D motion estimation [15].

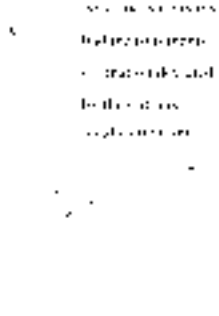
We will show that previous approaches like [1,2,23] cannot be directly applied to the practical problem that originated this work, because of reasons that will be made clear later (Sect. 1.2).

#### 1.1 Overview of gradient-based techniques

In 2D problems, the OFC in Eq. (1) can be expanded and written in the form

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial y} v = \nabla(f) \cdot \vec{v}, \quad (2)$$

where  $\nabla(f)$  is the spatial gradient of the image, “ $\cdot$ ” is the dot vector product,  $\vec{v}$  is the velocity of the pixel and  $\frac{\partial f}{\partial t}$  is the temporal derivative of the sequence for that pixel.



**Fig. 1.** Clusters of intersections of OFC pairs. Some of them belong to a dominant cluster; a few can cause deviation of the estimation if they are not rejected

The previous expression shows how the spatiotemporal derivatives are related to the observed velocities.

There are two unknowns ( $u$  and  $v$ ) in this equation, so it is not possible to solve it in order to recover the full motion vector. This is known in the literature as the *aperture problem* [16], meaning that there is no way to recover the complete optical flow vector using only local (one pixel) information. With local information only the motion in the direction of the gradient (known as *normal flow*) can be computed. Many authors try to solve the aperture problem by adding some kind of global information, involving a process of regularization. That is, given a measure of some error, the process of regularization consists of applying extra restrictions to the sequence of images, searching for a minimum in the measure of that error. One of the first algorithms found in the literature using this technique is the one by Horn and Schunk, in the early 80s [14]. They apply a restriction that consists in maximizing a measure (a global smoothness criteria) and minimizing another one (the error given by the fit to OFC); these restrictions are applied all over the image.

Other researchers use an estimation of the velocities with a confidence measurement, so for each measure it is known how reliable it is [3].

There are authors that use other invariants than pixel intensity, like the zero crossings of the Laplacian of the Gaussian [11]. The motivation is that they are closer to the biological facts of animal vision systems.

Another alternative is to analyze the measures in the space of the velocities; that is, it tries to find a robust estimation of the velocity by performing an analysis on the results of many systems of OFC equations, each one applied to a pair of pixels (see Fig. 1), or it tries to fit the data to a model in order to estimate the velocity. In this way, the analysis is performed directly in the data domain that we want to recover, which is the  $(u, v)$  space [21]. Finally, some researchers perform a clustering of the OFCs themselves in order to find the most reliable one; once obtained, the corresponding normal flow to that OFC is obtained [9, 18].

We will follow the first approach, using a 3D model of the bubbles and an extended OFC to a third dimension (3D OFC).



**Fig. 2.** Reduced-scale model of the installation where the process is analyzed

## 1.2 Statement of the problem and summary

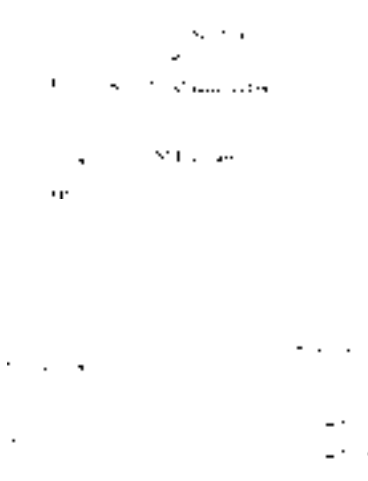
This study originated in a problem in glass manufacturing. We were asked to count the number, dimension and velocities of gas bubbles in melted glass, in order to control working parameters of the oven. In this paper, we are only concerned with the third objective, measuring velocities.

The velocity of the bubbles of gas is of interest in a glass factory because the motion is related to two features of the process: the quantity of glass produced (the bubbles move with it) and the amount of heat needed to make the glass fluid enough to let the bubbles move from bottom to top and leave it. The installation used to measure all parameters is shown in Fig. 2, and its design is outlined in Fig. 3. Fluid glass falls from the upper to the lower part of the oven. There is a window from which one single camera can take images. The camera can be manually focused to any depth in the fluid, and there is room enough to install a motor that allows the camera to travel along the line shown in the schema. The velocity of the camera is 2 mm/s. In any case, we cannot take two simultaneous photographs of the fluid, and thus images will be taken in both different time and depth.

We are faced with the problem of deciding whether the addition of the automatic displacement would allow measuring velocities with a reasonable precision. To evaluate this possibility, we have synthesized a set of frames that simulate the view of the melted glass from the motorized camera and designed an algorithm able to process them. In Fig. 4, an image obtained in the real installation is juxtaposed with a synthetic frame. Bubbles are at a different  $z$ , and because of this, they are blurred with a different intensity.

Intuitively, it is clear that the precision will not be as high as it could be in the case where we could install two cameras, but it can still be of practical interest. It is remarked that existing 3D reconstruction techniques, like optical sectioning usually found in microscopy (see [10]), cannot be applied, and the same can be said about stereo-based approaches [2, 23], as we anticipated in the introduction. Approaches like [1] cannot be applied to our problem because the motion of the camera in that work is fundamental to the behavior of the algorithm.

In the next sections, the 3D reconstruction method is explained, and after it the velocity computation is presented. The algorithm will be applied to solve a synthetic problem for



**Fig. 3.** *Top:* Schema of glass circulation in the model of the installation. The camera is mounted perpendicular to the pipe. *Bottom:* Detail of elements of interest for the problem

which the true velocity field is known in order to estimate its precision, and then it is applied to the real data. Additionally, some of the decisions adopted when estimating OFC intersections will be contrasted to their equivalents in different optical flow algorithms for standard 2D benchmarks [7].

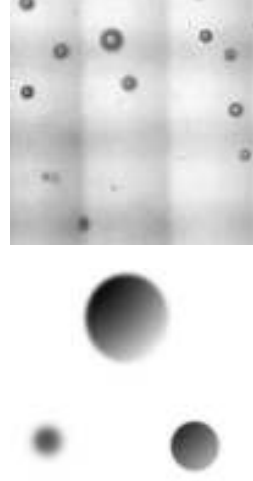
### 2 3D motion estimation from 3D reconstruction and 3D OFC

In this section, we explain how to obtain 3D velocity from 3D data, and how to reconstruct 3D data from 2D sections taken at different times.

#### 2.1 3D extension of OFC

In order to perform our 3D motion analysis, the same assumption relied upon for the usual OFC is extended to the 3D model, and thus we postulate that the intensity of the bubbles reconstructed is constant over the time. In this way, the sequence becomes a function in  $x, y, z, t$  and the 3D OFC is now the expression found in Eq. (3). In this equation,  $f$  is the intensity of the pixels in the 3D model and  $\vec{c}_{3D}$  is the 3D velocity of the pixels.

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial f}{\partial z} \frac{dz}{dt} \\
 &= \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial y} v + \frac{\partial f}{\partial z} w = \nabla(f) \cdot \vec{c}_{3D}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$



**Fig. 4.** *Top:* Bubbles of gas in melted glass at different depth. Note the different degree of blurriness. *Bottom:* Synthetic frame

As in the case of the usual OFC [see Eq. (2)], there are too many unknowns in the 3D OFC to solve it and obtain  $c_{3D}$ . The same techniques that try to solve the OFC for  $u$  and  $v$  can be extended to obtain  $u, v$  and  $w$  from 3D OFC.

#### 2.2 3D reconstruction from sections taken at different time and depth

The 3D intensity reconstruction is estimated from several images taken with a different  $z$ , which is with a different focal distance and with a narrow field depth. In this way, we get a 2D projection of the objects at each  $z$ , where a given focal setting gives the highest precision in the image acquisition. In Fig. 5, this process is schematized. The volume of fluid being studied is represented by a box with a single bubble. The left side of the figure, shows the situation at time  $t_i$ , and the right side of the image shows the position of the bubble at time  $t_{i+1}$ . The focus moves down and the bubble moves to the left top corner. In each situation, the position is shown where the focus brings finer detail. The resultant 2D image is shown above each volume of fluid.

Since the different images are not taken at the same time, we cannot perform a numerical estimation of the spatiotemporal derivatives using a domain around each pixel and using the difference between values in convenient directions as derivatives. Instead of this, we compute an estimation of the intensity at each  $(x, y, z)$  from images taken at different  $t$ , assuming a



**Fig. 5.** Acquisition of the images at different  $z$ . The relative motion between the focus plane and the bubbles bring different degrees of blurriness

lineal evolution of the intensity as can be seen in Eq. (4).

$$f(x, y, z, t) = k_1x + k_2y + k_3z + k_4t + k_5. \quad (4)$$

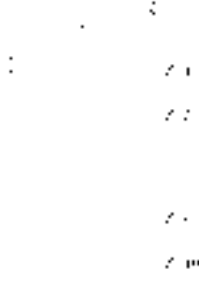
It should be clear that, after the model has been estimated,  $k_i$  is the intensity derivative ( $i$  varying from 1 to 4) as can be seen in Eq. (5).

$$\frac{\partial f}{\partial x} = k_1; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = k_2; \quad \frac{\partial f}{\partial z} = k_3; \quad \frac{\partial f}{\partial t} = k_4. \quad (5)$$

As a minimum, we need a set of five equations like Eq. (4) to solve the linear equation system for the unknowns  $k_i$ . This leads us to the equations in Eq. (6).

$$\begin{aligned} f(x_1, y_1, z_1, t_1) &= k_1x_1 + k_2y_1 + k_3z_1 + k_4t_1 + k_5; \\ f(x_2, y_2, z_2, t_2) &= k_1x_2 + k_2y_2 + k_3z_2 + k_4t_2 + k_5; \\ f(x_3, y_3, z_3, t_3) &= k_1x_3 + k_2y_3 + k_3z_3 + k_4t_3 + k_5; \\ f(x_4, y_4, z_4, t_4) &= k_1x_4 + k_2y_4 + k_3z_4 + k_4t_4 + k_5; \\ f(x_5, y_5, z_5, t_5) &= k_1x_5 + k_2y_5 + k_3z_5 + k_4t_5 + k_5. \end{aligned} \quad (6)$$

In order to improve the quality of the results, we choose to perform an estimation over a larger set of data, using a neighborhood of pixels that hold enough information in each direction of the parameter space. Because the resolution of the data is greater in the  $x$  and  $y$  directions than in  $z$  and  $t$  directions, we take a greater amount of data in these directions, in order to gain enough information about variations of intensity through  $z$  and  $t$ . In our experiments, we have found that a neighborhood like the one in Fig. 6 is suitable for the estimation of  $k_i$ . In this neighborhood, we take all the data in  $z$  and  $t$  directions that have  $x$  and  $y$  coordinates from the set  $(i, j), (i + 1, j), (i, j + 1)$ . For each velocity estimation, the camera takes images at 10 different  $z$ 's, so we have a total of 30 equations. This is an over-constrained set of equations that can be solved to find  $k_i$ , the spatiotemporal derivatives that we need to use in Eq. (3). The final over-constrained system is the one in Eq. (7).



**Fig. 6.** Neighborhood for  $k_i$  estimation of the bubbles model from a set of images at different depth

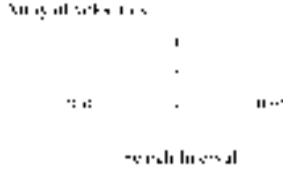
$$\begin{aligned} f(j, i, 1, 1) &= k_1j + k_2i + k_3 + k_4 + k_5 \\ f(j, i, 2, 2) &= k_1j + k_2i + 2k_3 + 2k_4 + k_5 \\ \dots & \\ f(j, i, 10, 10) &= k_1j + k_2i + 10k_3 + 10k_4 + k_5 \\ f(j, i + 1, 1, 1) &= k_1(j + 1) + k_2i + k_3 + k_4 + k_5 \\ f(j, i + 1, 2, 2) &= k_1(j + 1) + k_2i + 2k_3 + 2k_4 + k_5 \\ \dots & \\ f(j, i + 1, 10, 10) &= k_1(j + 1) + k_2i + 10k_3 + 10k_4 \\ &\quad + k_5 \\ f(j + 1, i, 1, 1) &= k_1(j + 1) + k_2i + k_3 + k_4 + k_5 \\ f(j + 1, i, 2, 2) &= k_1(j + 1) + k_2i + 2k_3 + 2k_4 + k_5 \\ \dots & \\ f(j + 1, i, 10, 10) &= k_1(j + 1) + k_2i + 10k_3 + 10k_4 \\ &\quad + k_5 \end{aligned} \quad (7)$$

Once having calculated the spatiotemporal derivatives  $k_i$ , we can estimate the 3D velocity using Eq. (3).

### 3 Robust estimation of optical flow

As we stated before, the nature of the available data in our problem complicates the computation of the optical flow. This is due to the sparsity of the sections, which cannot bring us a perfect reconstruction of the 3D structure of the bubbles. Since the parameters that we recover from the different sections,  $k_i$ , are the spatiotemporal derivatives that appear in Sect. 2.1, the resulting optical flow can be affected by the errors during the 3D reconstruction. Because of this, we have to develop an algorithm that discards the erroneous measurements that may occur. We decided to analyze the density of the distribution of velocities and to search for its maximum (the mode of the distribution) instead of calculating its mean value, which is faster to obtain but is rather influenced by outliers, which in the problem addressed here are frequent.

In our problem, another circumstance arises: the fact that there is several objects (the bubbles) moving over an static background. In this case, it is not possible to use approaches like [14] because the global smoothness criteria does not hold in those boundaries. Authors, like Nagel, propose to relax the



**Fig. 7.** This is the array where the velocities are sorted in order to improve the performance of mode calculation. Because of the sorting criteria, we only need to examine the velocities that belong to the search interval

smoothness criteria in those places where the gradient is high, smoothing the flow along the contour but not through the contour [17]. But the problem remains: due to the fact that the OFC has two unknowns, it's necessary to take measurements from at least two pixels. If the pixels are chosen from different objects with different velocities (for instance, a bubble and the background), the solution to the system of equations obtained will give an erroneous velocity. The analysis of the velocity distributions present within a neighborhood of each pixel (in the direction addressed in [21]) is necessary to determine which velocities are supposed to be correct and which one is the dominant velocity in the neighborhood (see Sect. 3.1). Most of the previous work in this area, and all standard benchmarks, are based in 2D data. To assess the effectiveness of the mode as a robust estimator, we will first reformulate our algorithm for the 2D case and then compare it to other algorithms, using images found in [4] and [7].

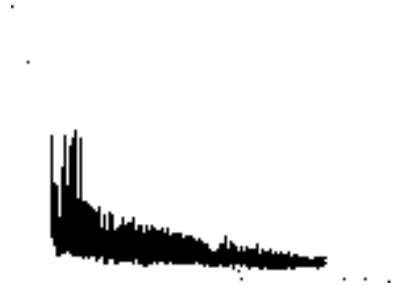
### 3.1 Mode as an estimator of optical flow

The maximum of the density function of the velocity field can be estimated by finding the higher cell of the bidimensional (in 2D) histogram of the velocity field, but this estimation can be made both faster and more precise if we numerically maximize either a  $k$ -neighbor or a kernel estimation of this density [22]. We tried both of them, with a compact support kernel in the latter case:

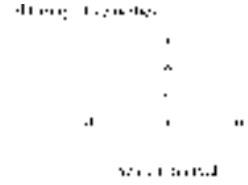
$$k(\vec{x}) = \begin{cases} \frac{|\vec{x}_0 - \vec{x}|}{d} \cdot y(\vec{x}) & \text{if } |\vec{x}_0 - \vec{x}| < d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

As in the previous method, we compute the solutions of every possible pair of OFCs (except the systems whose condition number is too high) for a given neighborhood. We discard the solutions whose module is greater than a threshold as errors. The solutions to the system of OFCs solved are stored in an array with three columns. In the first column, we store the velocity component in the  $x$  direction, and in the second column, we store the velocity component in the  $y$  direction as shown in Fig. 7 (the array is rotated 90 degrees in the figure.)

Using compact support kernels allows us to improve the efficiency of the algorithm, because we can limit the number of evaluations of Eq. (8) needed to find the mode. Since the kernel is 0 for points further than  $d$ , we only need apply the kernel to the velocities closer than this value. If the array is sorted by the first component ( $u$ ) and then by the second ( $v$ ) (the third field



**Fig. 8.** Plot of the density value versus the error of the estimation. As can be seen, there is a decreasing tendency in the graphic



**Fig. 9.** Array where the 3D velocities are stored and sorted in order to improve the efficiency of the algorithm

is used to store the sum of the kernel function centered at that velocity for all points in the array), we can restrict ourselves to velocities for which the difference in the first component is smaller than  $d$  (see Fig. 7). The mode will be the pair  $(u, v)$  for which the value of the third field is maximum. The value of the maximal density is also a measure of the reliability of the estimation: the bigger the value of the maximal is, the more reliable the estimation is. This can be seen in Fig. 8, where the density of neighbors obtained (in  $x$  axis) versus the error of an experiment (in  $y$  axis) is shown. Clearly, as the value of the density grows, the error decreases. The test sequence used was "MysineC-16," taken from the ones used in [7]. In this sequence a bidimensional sinusoidal pattern moves at (1, 1) pixels per frame.

Observe that the 3D formulation is immediate. There are three unknowns in the 3D OFC, therefore we need at least three equations to compute the velocity of a point of the reconstructed 3D solid. In Sect. 3.1, we computed all the pairs of OFC that can be found in a 2D neighborhood of a pixel. Now we will compute all the possible triplets of equations that can be found in a 3D neighborhood of a point of the reconstructed solid. Then, for each point of the reconstructed solid, we have a 3D distribution of velocities, whose mode must be determined. Velocities are stored now in an array with four rows that are sorted using a similar criteria as in the 2D algorithm (see Fig. 9). After the sorting stage, a kernel like the one in Eq. (8) is applied to the 3D data ( $\vec{x}$  and  $\vec{x}_0$  will be 3D vectors in this case). Only the data belonging to the search



interval  $(u - d, u + d)$  has to be used to compute the density estimation of each velocity, exactly as before.

#### 4 Results

The 2D version of the algorithm is compared to other algorithms first, and the 3D version will be used to solve a synthetic problem later. The objective of the 2D comparison is to determine whether the mode is indeed a more robust estimator than other approaches. The synthetic problem is introduced to determine if the estimation of the velocities of the bubbles is precise enough for the practical application.

##### 4.1 Comparative results, 2D algorithm

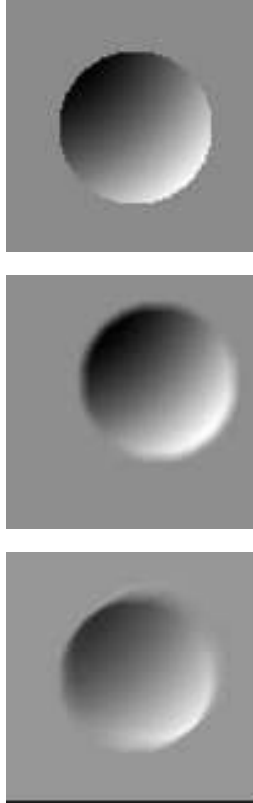
In order to perform a quantitative comparison with other algorithms, we adopt the metric defined in [20]; other measures (for example, [7]) would serve as well. In short, the error over an image is the sum of errors of all pixel, and the error on a pixel is the Euclidean distance between estimated and real velocities.

The test sequences used in these series of test were “Translating tree,” “Diverging tree,” “Yosemite flight thru,” “Rotating sphere,” “Diverging office,” and “Street.” The first three are used in [7]. The sequences are semi-synthetic, real images manipulated to give the illusion of movement in the scene or by the camera. The last three ones were proposed in [4] as an alternative to perform the same task. We chose these sequences to perform the same analysis published in [7]. The source code used in the test of Anandan’s algorithm is the same as used in [7]. To test the algorithms in [21] and [18], we used our own implementation. In Table 1, numerical values of the error are compared to those algorithms from [3, 18, 21]. The neighborhood size was  $5 \times 5$  for both Anandan’s algorithm and our approach. For the other approaches the size of the neighborhood was  $15 \times 15$ . The size of the neighborhoods was chosen in order to provide the algorithms with a sufficient amount of data (comparable to the quantity used in our approach) to perform the estimation as proposed in [18] and [21]. The estimator presented here performs better than Anandan’s algorithm in the case of the “Translating tree,” “Diverging tree” and “Diverging office” sequences. In the case of “Rotating sphere” our approach performs better than OFC’s parameter clustering. In the case of “Yosemite flight thru” and “Street,” Anandan’s algorithm performs slightly better. The  $k$ -neighbor approach is slightly worse than the kernel estimator, but it is also more computationally efficient.

##### 4.2 Quantitative results, 3D synthetic data

It was mentioned that, in order to know the attainable precision when estimating 3D motion with one only camera, we had to build a synthetic problem for which the true motion is known. This lets us test our algorithm prior to the full implementation of the system in the future.

In Fig. 10, three synthetic images are shown. The top and center parts of the image are simulated photographs of a single bubble at different heights, moving from the lower left corner



**Fig. 10.** Example of image reconstruction from the synthetic 2D data. An image at  $z = 5$ ,  $t = 1$  is reconstructed with the model in Eq. (4) from the whole set of 2D images

to the upper right corner and toward the observer; the velocity of all the points of the image is  $(1, 1, 1)$ . The bottom part of the figure is reconstructed from the sequence of images from which the two previous ones were taken, assuming that the hypotheses in Eq. (4) concerning linear change in the movement are true. The bubble in that figure moves with velocity  $(1, 1, 1)$ .

In Fig. 11, the error histogram for the component in the  $z$  direction obtained from the reconstructed 3D data is shown. The total error in the image was  $0.15 \times 10^4$ , that means a percent error of 15% for an image size of  $100 \times 100$ .

The obtained error is good enough for the purpose in the factory process and brings important information regarding the amount of heat needed by the process. Real precision will

**Fig. 11.** Histogram of the error in the optical flow computation from sequence in Fig. 10. Note the peaks due to imprecision of the model

**Table 1.** The error obtained (divided by  $10^4$ ) in the test by kernel estimator and variable kernel, compared to Anandan's algorithm [3], OFC's slope intercept parameter clustering [18] and intersections over central pixel OFC clustering [21]

Sequence	Schunck	OFC par. clustering	Anandan	Kernel	Var kernel
Trans. tree	6.7663	4.4438	3.9809	2.3039	2.4032
Div. tree	3.5310	2.8188	1.5067	1.4246	1.5195
Yosemite	16.090	15.580	10.154	10.985	11.287
Rot. Sph.	1.8011	1.0137	2.4696	0.6612	0.7408
Office	5.1679	3.8374	2.1625	1.9104	2.1828
Street	5.8890	4.7729	1.8539	2.1046	2.4034

be lower, since noise was not present in synthetic data (see Fig. 4), but these results suggest us that the method is useful for practical purposes.

**5 Concluding remarks**

Due to the particular conditions of the process discussed here (one single camera, absence of references), it was not possible to apply common 3D motion estimation procedures to determine the velocities of bubbles in melted glass. Since the camera can focus at different depths in the fluid but cannot take two simultaneous photographs of the fluid, our algorithm had to cope with sequences of images taken at both different times and depth. This restriction was solved when some linearity constraints were assumed and a method for estimating all needed partial derivatives comprising the OFCs was developed. This provided us with the data needed to state and solve a problem formulated in terms of OFC equations with three unknowns. The result is a new algorithm for estimating 3D optical flow, based on robust gradient techniques. The precision of this method, while being inherently inferior to that of stereo procedures, was high enough for it to be applied in practice.

**References**

1. Adiv G (1989) Determining three-dimensional motion structure from optic flow generated by several moving objects. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 11(5):477–489

2. Ahuja N, Abbott AL (1993) Active stereo: integrating disparity, vergence, focus, aperture, and calibration for surface estimation. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 15(10):1007–1029

3. P Anandan (1985) A computational framework an an algorithm for the measurement of visual motion. *Int J Comput Vision* 2:283–310

4. McCane B, Galvin B, Novins K (1998) On the evaluation of optical flow algorithms. Computer Science Department, University of Otago, New Zealand

5. Ancona N, Poggio T (1993) Optical flow from 1D correlation: application to a simple time-to-crash detector. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory and Center for Biological and Computational Learning

6. Battiti R, Amaldi E, Koch C (1991) Computing optical flow across multiple scales: an adaptive coarse-to-fine strategy. *Int J Comput Vision* 6(2):133–145

7. Barron JL, Fleet DJ, Beauchemin SS (1995) Performance of optical flow techniques. *Int J Comput Vision* 1(12):43–77

8. Beauchemin SS, Barron JL (1996) The computation of optical flow. *ACM Comput Surv* 3(27):433–467

9. Ben-Tzvi D, Del Bimbo A, Nesi P (1993) Optical flow from constraint lines parametrization. *Pattern Recogn* 26(10):1549–1561

10. Weinstein M, Castleman KR (1971) Reconstructing 3D specimens from 2D section images. *Proc SPIE* 26:131–138

11. Duncan JH, Chou T-C (1992) On the detection of motion and the computation of optical flow. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* March 14(3):346–352

12. Enkelmann W (1986) Investigations of multigrid algorithms for the estimation of optical flow fields in image sequences. In: Proceedings of workshop on motion, representation and analysis, Charleston, S.C., 7–9 May 1986. IEEE Computer Society Press, Los Angeles, Calif.

13. Heeger DJ (1988) Optical flow using spatiotemporal filters. *Int J Comput Vision* 1:279–302

14. Berthold K P Horn, Schunk BG (1980) Determining optical flow. A.I. Memo 572. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory

15. Koenderink JJ, van Doorn AJ (1987) Facts on optic flow. *Biological Cybern* 56:247–254

16. Murray DW, Buxton BF (1990) Experiments in the machine interpretation of visual motion. MIT Press, Cambridge, Mass.

17. Nagel HH (1983) Displacement vectors derived from second-order intensity variations. *Comput Vision Graph Image Process* 21(1):85–117

18. Nesi P (1995) Real-time motion estimation. Department of Systems and Informatics, Faculty of Engineering, University of Florence

19. Otero J, Cancelas JA, Gonzalez RC (1998) Optical flow calculation using look-up tables. In: Ollero A (ed) IFAC workshop on intelligent components for vehicles, Seville, Spain, 23–24 March 1998. Pergamon, New York

20. Otte M, Nagel HH (1994) Optical flow estimation: advances and comparisons. In: Eklundh J-O (ed) European conference on computer vision, Stockholm, Sweden, 2–6 May 1994. Springer, Berlin Heidelberg New York

21. Shunck BG (1989) Image flow segmentation and estimation by constraint line and clustering. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 11(10):1010–1027

22. Silverman BW (1986) Density estimation for statistics and data analysis. Chapman and Hall, London

23. Wang W, Duncan JH (1996) Recovering the three-dimensional motion and structure of multiple moving objects from binocular image flows. *Comput Vision Image Understanding* 63(3):430–446

## Publicación 4

- **Nombre del libro:** Lecture Notes in Computer Science 4224
- **Factor de impacto:** 0.402
- **Ranking:** 62/71 en Computer Science, Theory and Methods (Q4)

# Genetic Algorithms for Estimating Longest Path from Inherently Fuzzy Data Acquired with GPS

José Villar, Adolfo Otero, José Otero, and Luciano Sánchez\*

Computer Science Department, Universidad de Oviedo, Edificio Departamental 1,  
Campus de Viesques s/n Gijón (Spain)

otero@uniovi.es, jotero@uniovi.es, luciano@uniovi.es,  
villarjose@uniovi.es

**Abstract.** Measuring the length of a path that a taxi must fare is an obvious task: when driving lower than certain speed threshold the fare is time dependent, but at higher speeds the length of the path is measured, and the fare depends on such measure. When passing an indoor MOT test, the taximeter is calibrated simulating a cab run, while the taxi is placed on a device equipped with four rotating steel cylinders in touch with the drive wheels. This indoor measure might be inaccurate, as the information given by the cylinders is affected by tires inflating pressure, and only straight trajectories are tested. Moreover, modern vehicles with driving aids such as ABS, ESP or TCS might have their electronics damaged in the test, since two wheels are spinning while the others are not. To surpass these problems, we have designed a small, portable GPS sensor that periodically logs the coordinates of the vehicle and computes the length of a discretionary circuit. We will show that all the legal issues with the tolerance of such a procedure (GPS data are inherently imprecise) can be overcome if genetic and fuzzy techniques are used to process and analyze the raw data.

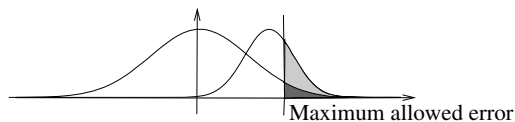
## 1 Introduction

One of the tasks to be performed in the Spanish VTSS is the test and control of the taximeters in the taxicabs. This supervision must be performed every year because the taxicabs' fares are revised and published by the authorities every year. The process a taxicab owner must follow includes driving the taxicab to a specialized garage to change the fares in the taximeter. When the fares are changed, a MOT test must be done. In this MOT test, the tester engineer verifies if both the distance traveled and the waiting time fares lie between the limits imposed.

The verification of the fares can be done in two ways. The simplest way consists in doing a cab run in a previously measured circuit, manually computing the fare. More over, one person from the MOT agency must do it. One second approach is to use a machine capable of the recovering of the speed of the cab to select

---

\* This work was funded by Spanish M. of Education, under the grant TIN2005-08386-C05.



**Fig. 1.** If the owners of the taxis calibrated their taximeters in good faith, the density of the errors in the measures of taximeters should be centered in 0. Field measures show that the density is centered near 9% (the legal cut point is 10%). A small deviation in the tolerance of our measure, which would be unnoticed under theoretical circumstances (dark gray area,) will cause a high percentage of rejections (light gray area).

the waiting fare or the traveled fare and to compute the time elapsed and the distance. Currently, such device is used, but fails when active safety systems nowadays present in cars trigger, moreover these systems may be damaged.

In this situation, a new method of testing taximeters must be developed. This system should be designed taking into account that it is not desirable to block one MOT test engineer when testing a taximeter. We have decided to use GPS technology to track the position of a vehicle in an actual road, and process this information on-line [13]. Moreover, the taxi driver can be sent alone to cover a distance, and no personal of MOT agency is needed, making the process cheaper.

There are some drawbacks, though. GPS generates imprecise data, and the degree of imprecision of every sample is different. The differences in tolerances must be taken into account in the algorithm that analyzes the data. The significance of this step is crucial for our system to compute the upper bound of the length of the trajectory, which must be provided in the case that a taximeter is rejected. The legal margin of error of a taximeter in Spain is 10%. We can not reject a taxi with a deviation of 7% if we can not warrant a tolerance lower than 3%, say. This could seem a minor problem, and it would be, if the density of the errors in the taxis resembled the left Gaussian in Fig. 1. Unfortunately, our study revealed that the calibration of taximeters is far from unbiased. Small changes in the tolerance produce important changes in the number of rejections. Therefore, it is needed a procedure to determine the bounds of the measure with high accuracy and it is also needed that all the tolerance errors benefit the owner of the taxi. In other words, we need to compute the lowest upper bound (LUB) of the trajectories compatible with the (imprecise) GPS measures.

In this paper we will explain a new method for estimating the LUB of the trajectory from imprecise data. Through multiobjective genetic algorithms, the measures are filtered to obtain the smallest set of samples that define a multi polygonal covering the input data. The LUB of the path is found by means of a deterministic algorithm that processes this multi polygonal.

The structure of this work follows: In next section, how GPS measures are obtained is detailed. Then, a description of the proposal is done in Sect. 3. The genetic algorithms are detailed in Sect. 3.1, while the deterministic algorithm for estimating the maximum length is detailed in Sect. 3.2. In Sect. 4 experiment and results are shown. Finally, conclusions and future work are presented.

## 2 GPS-Based Measures Are Fuzzy Data

The term Global Positioning System (GPS) refers to a set of devices (satellites and receiver) working together to get a fix (the position) of the receiver. The receiver can get some signals from the satellites and compute a set of measures: longitude, latitude, altitude, number of satellites in use, time, etc. Each signal received from a satellite contains information about the time that the signal lasts from the satellite to the receiver.

The higher the number of satellites, the better the accuracy. But even with a high number of satellites in use (12 to 16) the geometry or constellation of the satellites must be taken into account to estimate the fix accuracy. This is done using DOP (Dilution of Precision), a measure of the probability of the effects of the constellation on the fix accuracy; a higher value of DOP indicates a weaker geometry of satellites. In the case of GPS longitude and latitude accuracy, the HDOP (latitude and longitude DOP) value must be taken into account. Related with HDOP is the CEP (Circular Error Probable), a given value of CEP at probability  $P$  means that the receiver is inside a circle of radius CEP, centered at the measured fix with that probability. When using consumer-grade receivers, it is very common to obtain accuracies like 3 meter CEP (50%) and 7 meters (90%). Given the number of satellites  $n$  used for the measure and an accuracy probability  $P$ , the CEP is computed by means of equation Eq. 1. Constants A, B, C and D are device dependant [16].

$$CEP = \left( -\left( A \cdot \left( \frac{C}{n^2} + D \right) + B^2 \right) \cdot \ln(1 - P(Err \leq CEP|HDOP)) \right)^{0.5} \quad (1)$$

### 2.1 Fuzzy Interpretation of GPS-Values

Under the imprecise probabilities framework, it makes sense to understand a fuzzy set as a set of tolerances, each one of them is assigned a confidence degree, being the lower degree the narrower tolerance [9]. In particular, it has stated that, given an incomplete set of confidence intervals for a random variable, we can build a fuzzy random variable, whose  $\alpha$ -cuts are confidence intervals with degree  $1 - \alpha$ , that contains all the information we know about the unknown random variable [4]. In our case, the GPS sensor provides two confidence intervals at 50% and 90% (the mentioned circle of radius CEP,) and therefore the fuzzy representation of GPS coordinates is immediate.

## 3 Determining the Length of Trajectories Using Fuzzy Data

GPS data is recorded at regular time intervals. Each sample is a fuzzy set, as mentioned, whose  $\alpha$ -cuts are circles. In turn, every circle is a confidence interval for the coordinates of the taxicab at that moment. It is remarked that taking the centers of these circles is not a valid estimation. We need to compute the

LUB of the paths whose extremes are contained in the circles, and this length will always be higher than the value obtained from the centers.

The answer to the problem is not easy, though. If we try to compute the maximum length of all compatible piecewise linear paths that are contained in the circles it is obvious that, the shorter the sampling period, the longer the estimation. This is not correct, and we wish the estimation of the length not to be too influenced by the sampling period [12]. We have decided to process the fuzzy data and remove all redundant information with the help of a genetic algorithm, as we will show in the section that follows.

When using crisp data, the geometric problem of simplifying polygonal lines has been studied in [7]. The most similar approach to ours, up to our best knowledge, uses fuzzy data from a geographical database for reconstruction of 3D images by means of B-splines [1], where a fuzzy point is said to be covered by the fuzzy B-spline if the fuzzy set induced by the latter completely contains the former, we use this concept next.

### 3.1 Multiobjective Fuzzy Fitness Genetic Algorithm for Filtering the Fuzzy Input Data

The fuzzy GPS measures are filtered using a multiobjective genetic algorithm. The output is the minimum set of fuzzy input data that defines a fuzzy trajectory covering as many points as possible. Using those fuzzy points, and for each  $\alpha$ -cut, a distance value is computed by means of a deterministic algorithm, which will be detailed later.

Every candidate solution is evaluated as follows: we first build a polygonal chain for each  $\alpha$ -cut of the selected data, using the tangent surfaces to the selected fuzzy data set <sup>1</sup>. We wish that this chain contain as many data as possible, while having the minimum area.

Both objectives are fuzzy numbers and define a multicriteria problem [3], and two different approaches had been used for solving the problem. The first one is using the NSGA-II algorithm [5,6]. The second approach is using the multi-objective genetic operators simulated annealing (MOSA) [14]. Further details of those algorithms follow.

**Coding of Individuals.** Each individual is a boolean vector, marking the corresponding fuzzy input data to be or not part of the hypothesis: those marked with true are used to define the polygonal chain. To generate an individual, a probability value  $p$  is given, and for each fuzzy point in the vector of input fuzzy data, it is included in the hypothesis with probability less or equal than  $p$ . The origin and the end of the ride must be always included.

**Genetic Operators.** The definitions of crossover and mutation must reduce the number of vertexes in the population, and therefore they are unbiased.

---

<sup>1</sup> This chain might include some extra points not covered by the input data, but this fact always would benefit the taxi, thus it is legally correct.

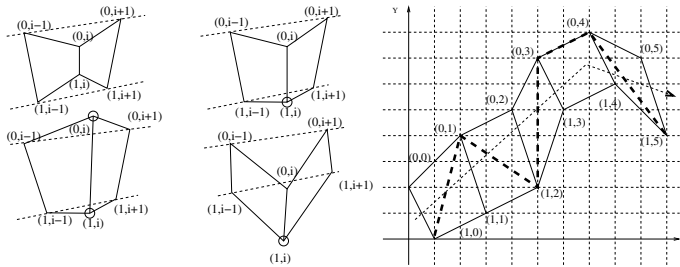
Given two parents  $A$  and  $B$ , the offspring are two new chains  $C$  and  $D$  such that  $A \cap B \subseteq C$  and  $A \cap B \subset D$ ; a vertex  $v \in A - B$  has a probability  $p^+$  of being in  $C$ , and a vertex in  $B - A$  has a probability  $p^-$  of being in  $C$ , where  $p^-$  is much lower than  $p^+$ . The chain  $D$  is built the same way. Mutation is defined as the random removing of a point of the chain, different from the first or last one. The operation named *toggle* is very similar to mutation, but it can alter the state of inclusion in the hypothesis of a randomly selected fuzzy data. Toggle is used as genetic operation for MOSA. When generating a neighborhood of current individual a random number of toggle operations are done. The number of operations is temperature dependent, and so the neighborhood of new individual, as well.

**Multiobjective Fuzzy Fitness.** As stated before, two criteria are to be reached: the minimization of polygonal chain area and the maximization of the percentage of data covered. Both of them are fuzzy numbers. This means that it is needed an operator *less than* and an operator *less or equal than*, both defined for fuzzy numbers, so dominance could be evaluated. Some work has been done in evaluating Pareto dominance with fuzzy fitness. In [17] the Pareto dominance concept is extended to fuzzy dominance, and different levels of  $\alpha$ -cut are used for each decision making process, using the concept known as  $\alpha$ -dominance. In [11] it is proposed a fuzzy rule to determine the *degree of dominance of  $x$  over  $y$* , and another fuzzy rule to determine the *degree of been dominated of  $x$  by  $y$* . Then, aggregating those rules by means of the max t-conorm, a crisp rank of dominance is obtained for each individual  $x$ . In [10] a totally different approach is used. It defines a comparison between fuzzy numbers, so Pareto dominance could be used as stated in its definition. In [8] a generalization of the Pareto dominance concept is proposed. In that work, instead of using especial operators *less than* and *less or equal than*, fuzzy Pareto dominance is defined so the result of such redefinition is that decision surface is obtained. For the purposes of this work,  $\alpha$ -dominance approach is used.

### 3.2 Deterministic Longest Path Estimation

Once the data is preprocessed by means of genetic algorithms, LUB is computed. For each  $\alpha$ -cut of the fuzzy b-splines that contains the taxi trajectory, we get a polygonal set constructed with trapezoids, as it can be seen in right side of Fig. 2. The motion direction is indicated by the thin dashed arrow. Each trapezoid vertex is denoted with a pair of integers, those at the left of the arrow have zero at first and those at the right have one at first. The other number is the step in motion sequence. The longest path at each step  $i$  goes through  $(0, i)$  vertex or  $(1, i)$ . The set of vertexes that defines the longest path, can be computed by exhaustive exploration of all possible combinations, but this is very expensive in terms of computational cost and proved impracticable in a realistic trajectory with 700 points, for instance. This problem has been studied in the area of Computational Geometry and is related with Longest Path with Forbidden Pairs [2], that is NPO PB-complete. Because of this and given that





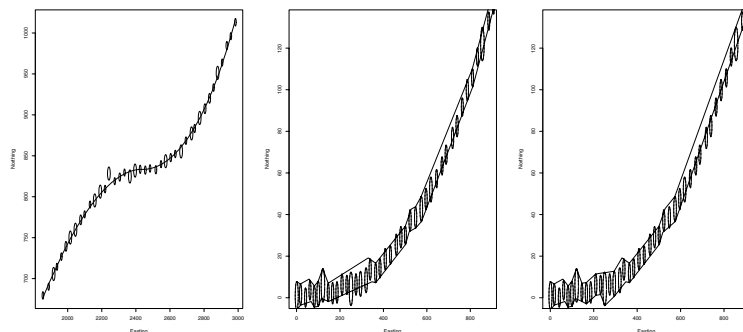
**Fig. 2.** Left: Possible relative positions of vertex and lines between prior and next vertex. Right: Example of longest path estimation.

in a realistic trajectory the changes of direction and the changes in distance between left and right vertex are limited due to the dynamics of the taxi, the geometry of the road and GPS behavior, we use a heuristic that is linear in time with the number of vertex. The heuristic is based in the selection of convex vertexes: when a vehicle turns, the longest path goes through the exterior of the trajectory curvature. The convexity of a vertex is analyzed using the straight lines that rely on previous and next vertexes, the possible relative positions of the central vertex can be seen in right side of Fig. 2, where convex vertex are marked with a small circle and the lines that pass through vertex  $(0, i - 1)$ ,  $(0, i + 1)$  and  $(1, i - 1)$ ,  $(1, i + 1)$  are drawn. From left to right and up to bottom, if both vertexes lie between the lines, both are concave. If only one is outside of the lines, it must be convex. If both are out of the lines, either both are convex (left) or one is concave and the other one convex. In both cases, if the farthest one from the nearest line is chosen, then it is convex.

The heuristic is as follows: the first segment of the longest path goes from a convex vertex in step 1 to the vertex at step 0 that gives the maximum segment length. From vertex 1 to the one before the last, the path goes through this vertex if there is only a convex vertex, through the farthest one if there are two convex vertexes or there is not any convex vertex. Last segment ends in the farthest vertex from the previous one. In right side of Fig. 2 the path computed with this heuristic is marked with a thick dashed line. The first segment goes from  $(1, 0)$  to  $(0, 1)$  because  $(0, 1)$  is convex and the distance to  $(0, 0)$  is shorter. Then the longest path continues to  $(1, 2)$  because is the only convex. The same situation happens with  $(0, 3)$  and  $(0, 4)$ . Finally, the path ends in  $(1, 5)$  because it is farther from  $(0, 4)$  than  $(0, 5)$ .

## 4 Experiments and Results

In the experiments presented here, the parameters of the NSGA-II algorithm are: 4000 generations, 15 individuals in the population, 0.1 and 0.7 of mutation and crossover probabilities,  $p^+ = 0.7$  and  $p^- = 0.01$ . Each individual must cover



**Fig. 3.** Left: Example of GPS generated data along with the real trajectory. Center: Part of the first trajectory simplified by NSGA-II algorithm. Right: Same data simplified by MOSA.

a minimum of 85 percent of input data to be included in the Pareto front. When using MOSA, delta is  $1/4000$ ,  $T_0$  is 1.0 and  $T_1$  is 0.0, while the rest of parameters are the same to those of NSGA-II. We have decided to evaluate our algorithm in a realistic path that covers the situations usually found when the MOT test of a taxi is done, and computing HDOP, CEP, and projecting earth measures adequately [16,15].

The trajectory is sampled each second, obtaining 1000 points, the total length of the trajectory is 21273.21 meters. At each location, we take a random number from 4 to 9 as the number of available satellites, that we found representative for real data. From this data, we build a dataset of GPS measures, sampled at each second. Each measurement is simulated using the following procedure, with a probability of 0.95, a point is selected that is closer in distance to the real one less than the CEP at that probability. With 0.05 probability the point is selected further than the corresponding CEP from the original data. This resembles the uncertainty that occurs using GPS, and the obtained data can be used to test how tight the bounds obtained with our algorithm are. The reader must remember that the goal is to obtain a multi polygonal chain that covers most of the GPS fixes with minimum number of vertexes and with the minimum area. In left side of Fig. 3 is shown part of the generated data. GPS measures are represented with circles (actually ellipsoids due to scaling issues) with radius equal to 95% CEP and the original trajectory with a continuous line. As it can be seen, most of the circles intersect the trajectory, that is, most of the points of the real trajectory (in fact 95%) are inside the circles with CEP radius, centered in GPS fixes.

We perform two experiments with two subset of the complete dataset with 120 points each. The true length of the first trajectory is 3228.574 meters. The estimated length of the longest path compatible with the 85 % of the points of the first processed trajectory polygonal chain using NSGA-II is 3471.75, and 3555.34 using MOSA. If the taximeter reports a distance longer more than 10% than this

upper bound, it should be rejected because even in the worst case the taximeter is out of tolerance. The distance through the GPS fixes is 3238.521, that is much closer to the real data, but the taxi owner can argue about the uncertainty of the procedure saying that it is inaccurate, if we compute an upper bound of the length compatible with GPS data there is no chance for this.

The length of the second trajectory is 2741.306 meters. The estimated length of the longest path compatible with the 85 % of the points of the corresponding processed trajectory polygonal chain using NSGA-II is 3059.1, while using MOSA is 3130.48. In this case the bound is less tight since the trajectory has stronger turns and this leads to longest path compatible with the data. In center and right of Fig. 3 can be see how the simplification of the trajectory works with NSGA-II and MOSA algorithms showing parts of the data from the first trajectory. The data correspond to the individuals with less total length. Both algorithms cover most of the data, but differ in which data must be preserved.

## 5 Conclusions and Future Work

During the development of this application we found that if we report directly the data obtained with GPS equipment, there were legality issues about the uncertainty of the measures. Taxi owners could easily gain in courts any reclamation where the uncertainty of the GPS measures were revealed. As result, the upper bound of the trajectory length compatible with GPS data is computed. In this way there is no doubt to reject a taximeter with reported length above of this measure. Additionally, this alternative is less restrictive with the real data given the biased error detected in the taximeters. In the experiments, MOSA has shown to be almost as accurate as NSGA-II but much more faster. We have found that our algorithm performs worst when the trajectory includes more and stronger turns, this issue must be solved in future modifications with an additional heuristic that includes the dynamic behavior of a real driver using the time information in GPS measures.

Future work includes also using different fuzzy dominance approaches that should be tested to better fit the longest path better.

## References

1. A.M. Anile, B. Falcidieno, G. Gallo, M. Spagnuolo and S. Spinello, *Modeling uncertain data with fuzzy B-splines*, Fuzzy Sets and Systems 113, 397–410, 2000.
2. Berman, P., and Schnitger, G. (1992), “On the complexity of approximating the independent set problem”, Inform. and Comput. 96, 77-94.
3. C. A. Coello, *An Updated Survey of Evolutionary Multiobjective Optimization Techniques : State of the Art and Future Trends*, 1999 Congress on Evolutionary Computation, IEEE Service Center, 1999.
4. I. Couso, S. Montes, P. Gil The necessity of the strong alpha-cuts of a fuzzy set International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 9-2, 249-262, 2001

5. K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab, and T. Meyarivan, *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*, In Marc Schoenauer, Kalyanmoy Deb, Günter Rudolph, Xin Yao, Evelyne Lutton, Juan Julian Merelo, and Hans-Paul Schwefel, editors, Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference, 849-858, Springer. Lecture Notes in Computer Science, 2000.
6. K. Deb and T. Goel, *Controlled Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms for Better Convergence*, In Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello, and David Corne, editors, First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 67-81. Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science No. 1993, 2001.
7. R. Estkowski and J. S. B. Mitchell, *Simplifying a polygonal subdivision while keeping it simple*, SCG '01: Proceedings of the seventeenth annual symposium on Computational geometry, ISBN 1-58113-357-X, 40-49, ACM Press, New York, NY, USA, 2002.
8. M. Farina and P. Amato, *Fuzzy Optimality and Evolutionary Multiobjective Optimization*, in Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming, Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb and Lothar Thiele (editors), Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Second International Conference, EMO 2003, pp. 58-72, Springer. Lecture Notes in Computer Science. Volume 2632, Faro, Portugal, April 2003.
9. Goodman, Nguyen. *Uncertainty Models for Knowledge-based Systems*. North-Holland. 1985
10. M. Hapke, A. Jaskiewicz and R. Slowinski, *Pareto Simulated Annealing for Fuzzy Multi-Objective Combinatorial Optimization*, Journal of Heuristics, 6(3), 329-345, August 2000.
11. M. Köppen, K. Franke and B. Nickolay, *Fuzzy-Pareto Dominance Driven Multiobjective Genetic Algorithm*, In Proceedings of the 10th IFSAWorld Congress (IFSA 2003), pages 450-453, Istanbul, Turkey, June, 2003.
12. N. Meratnia and R. A. de By, *Trajectory representation in location-based services : problems and solutions*, in Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Web and Wireless Geographical Systems (W2GIS 2003) in conjunction with the Fourth International Conference on Web Information Systems Engineering (WISE), Rome, Italy, 2003.
13. A. Otero and J. Otero and L. Sánchez and J. R. Villar, , *Longest path estimation from inherently fuzzy data acquired with GPS using genetic algorithms*, 2nd International Symposium on Evolving Fuzzy Systems, University of Lancaster, UK, 2006
14. L. Sánchez, J. Otero and J. R. Villar, *Boosting of fuzzy models for high-dimensional imprecise datasets*, in Proceedings of the Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems IPMU06, Paris, 2006.
15. Snyder, J. P., "Map Projections Used by the U. S. Geological Survey", 2nd edition, Geol. Survey Bulletin 1532, 313 p., U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1982.
16. Wilson, D., "David L. Wilson's GPS Accuracy Web Page", <http://users.erols.com/dwilson/gps.html>.
17. J. Zhang, B. Pham, and P. Chen, *Fuzzy Genetic Algorithms Based on Level Interval Algorithm*, In Kazmierczak, E, Eds. Proceedings The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pages pp. 1424-1427, Melbourne, Australia, 2001.

## Patente 1

- **Nombre:** Taxímetro Patrón Usando Tecnología G.P.S.
- **Num. Publicación OEPM:** 2335841 (B.O.P.I. de 5 Abril 2010)
- **Inventores:** José Otero, Luciano Sánchez, Adolfo Otero
- **Fecha de presentación:** 15/10/2007
- **Fecha de concesión:** 27/09/2010



GOBIERNO DE ESPAÑA  
MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO



Oficina Española de Patentes y Marcas

Base de datos de situación jurídica de expedientes

### Consulta de Expedientes - Resultado

Seleccione la página que desea u otra consulta

```

CITADES Expediente: P 200702781 (1) Fecha: 22/10/10 1:07:18
PATENTE INVENCIÓN NR. PUBLICACIÓN OEPM 2335041 ERO. PUBL. EU: -----
FECHA SOLICITUD ..... 19.10.2007 LAR 13.49 ES ASTURIAS
FECHA DE PRESENTACIÓN ..... 15.10.2007
EXAMINADOR ..... ELE28
TÍTULO .....
TAXIMETRO PATRON USANDO TECNOLOGIA G.P.S.
SOLICITANTE.. INSPECCION TECNICA DE VEHICULOS DE ASTURIAS S.A.
DNI ..... 4311828 NACIONALIDAD: ES ESPAÑA
DOMICILIO .. GENERAL FLORES, 24 - 1A
LOCALIDAD .. OVIEDO
PROVINCIA .. 33001 ASTURIAS ES ESPAÑA
AGENTE ..... 8392 (L) UNGRÍA LÓPEZ, JAVIER
- - - - - INVENTORES - - - - -
E1.- ES - OTERO RODRIGUEZ, JOSE
E2.- ES - SANCHEZ RAMOS, LUCIANO
E3.- ES - OTERO RODRIGUEZ, ADOLFO
  
```

Copyright © OEPM



2335839 A1 P 200702082 (3)

17-07-2007

ES Bsh Electrodomésticos España, S. A.  
Avda. de la Industria 49  
Zaragoza ES

F25C 1/08 (2006.01) F25D 21/04 (2006.01)  
F25B 21/02 (2006.01) F25C 1/08 (2006.01)

Dispositivo para producir cubos de hielo, aparato frigorífico con dicho tipo de dispositivo y proceso para producir cubos de hielo.

Un dispositivo para producir cubos de hielo comestibles, presenta al menos un elemento de inmersión (46) provisto con una superficie de adhesión de hielo (46a) conductible y un dispositivo frigorífico (54). El elemento de inmersión (46) está adecuado para ser inmerso con su superficie de adhesión de hielo (46a) en un líquido (58) comestible. El dispositivo frigorífico (54) está unido estructuralmente con el elemento de inmersión (46) y presenta un predefinido dispositivo de transporte de calor para enfriar por lo menos la superficie de adhesión de hielo (46a) a una temperatura de congelación del líquido (58), de tal modo que en un estado de inmersión del elemento de inmersión (46), aquél en las inmediaciones de la superficie de adhesión de hielo (46a) existente líquido (58), es enfriable, y a partir de una parte del líquido (58) es formable un cubo de hielo en la superficie de adhesión de hielo (46a).

2335840 A1 P 200702114 (5)

27-07-2007

ES Airbus España, S. L.  
Av. John Lennon, S/n  
Getafe (Madrid) ES

B64C 5/06 (2006.01)

Empenaje de aeronave.

Empenaje de aeronave. Forma en planta del empenaje de una aeronave que comprende bordes de ataque (21) y bordes de salida (22) curvulinos, con una configuración del empenaje de la aeronave en la cual el eje de charnela (13) tiene un porcentaje con respecto de la cuerda (50) en cada sección (51) no constante, siendo los largueros anterior (11) y posterior (12) rectilíneos con porcentaje con respecto a la cuerda (50) en cada sección (51) no constantes, o bien siendo estos largueros (11, 12) curvulinos con porcentaje constante o no constante con respecto a la cuerda (50) en cada sección (51). Asimismo, la invención propone también una forma en planta del empenaje de una aeronave que comprende bordes de ataque (21) y bordes de salida (22) rectilíneos, en la cual el eje de charnela (13) tiene un porcentaje con respecto de la cuerda (50) en cada sección (51) no constante, siendo los largueros anterior (11) y posterior (12) bien rectilíneos, con porcentaje constante o no constante con respecto a la cuerda (50) de cada sección (51), o bien siendo estos largueros (11, 12) curvulinos, de porcentaje constante o no.

De Elizaburu Márquez, Alberto

2335841 A1 P 200702781 (X)

15-10-2007

ES Inspección Técnica de Vehículos de Asturias S. A.  
General Elorza, 34 - la  
Oviedo (Asturias) ES

G07B 13/04 (2006.01)

Taxímetro Patrón usando tecnología GPS.

Taxímetro Patrón usando tecnología GPS.

El sistema permite verificar el funcionamiento de un taxímetro situado en un taxi. La verificación consiste en la comprobación de que las tarifas que calcula el taxímetro situado en el taxi entran dentro de los límites que establece la legislación, problema que se presenta siempre que es preciso regular el taxímetro y cuando se produce un cambio en el precio de las tarifas (anualmente, tras la publicación oficial correspondiente).

El sistema está formado por un receptor GPS (A), una antena (B), un microprocesador (C), un panel LCD (D), un teclado (E), un puerto de comunicaciones (F) y una batería (G).

El receptor GPS (A) está a su vez conectado con: la antena (B), el microprocesador (C), el panel LCD (D), el teclado (E) y el puerto de comunicaciones (F).

La verificación del funcionamiento del taxímetro es llevada a cabo por el sistema objeto de esta patente mientras el taxi hace un recorrido, procesando en línea los datos de posición, velocidad y tiempo que son recogidos por el receptor GPS y calculando de forma independiente al taxímetro del taxi las tarifas.

El control del taxímetro patrón se realiza mediante el teclado (E) y la visualización de datos se lleva a cabo en el panel LCD (D). Mediante el puerto de comunicaciones (F) se transmiten los datos del sistema a un computador personal. La batería (G) alimenta al resto de dispositivos del sistema.

Ungría López, Javier