

Optimización genética de la posición de las cámaras en un sistema de medición bajo una caracterización borrosa del error de medida

José Otero
Adolfo Otero
Luis Junco
Luciano Sánchez

Resumen— Actualmente existen distintos aparatos de medida que utilizan información visual para la medida de distancias. Además diversos fabricantes suministran ópticas y cámaras diseñadas para registrar imágenes de modo que las medidas realizadas sobre las mismas sean lo más precisas posible. Utilizando dichos sistemas en condiciones de laboratorio, pueden realizarse reconstrucciones tridimensionales de los objetos registrados y realizar medidas sobre las mismas. Un requisito importante para poder realizar estas reconstrucciones es que las imágenes pertenezcan a la misma escena, lo cual en la práctica significa que deben adquirirse simultáneamente. Todas estas cuestiones encarecen notablemente un sistema de medida basado en Visión por Computador.

En esta comunicación se estudia cómo utilizar algunas técnicas borrosas para sacar el mejor partido de sensores de bajo coste, intrínsecamente imprecisos. El objetivo final es el desarrollo de un sistema para la medición de cotas lo bastante económico como para que poder ser utilizado en empresas de Inspección Técnica de Vehículos. Para ello, como primer paso del diseño, se analizará el posicionamiento de varias cámaras en una nave, de forma que el error de medida sea el mínimo. La búsqueda de las mejores posiciones se realizará por un algoritmo genético, que a su vez estará guiado por una caracterización borrosa de las fuentes de error en la medición.

Palabras clave— Metrología, Modelado borroso de la incertidumbre, Conjuntos aleatorios, Algoritmos genéticos, Visión estereoscópica.

I. INTRODUCCIÓN

UNA de las tareas contempladas en el reglamento de la Inspección Técnica de Vehículos es la medición de distancias entre puntos característicos de un vehículo, con el fin de obtener el ancho, largo, alto, distancia entre ejes, dimensiones de grúas, rampas y otros accesorios. El sistema más común demanda la atención de dos mecánicos inspectores, por lo que una automatización del proceso que derive en el uso de menos personal es atractiva para la empresa. Desgraciadamente, los sistemas que realizan estas tareas son excesivamente caros para una estación media de inspección de vehículos. Por ese motivo, en este trabajo se propone una automatización parcial, basada en visión estereoscópica, donde las medidas corren a cargo de un único mecánico inspector, que se encarga

de seleccionar los puntos de medida en la pantalla de un ordenador.

Actualmente, un prototipo de este sistema se está probando en la estación de I.T.V de Pruvia (Asturias), la cual se muestra parcialmente en la figura 1. El sistema consta de cuatro cámaras, posicionadas de forma que todos los puntos de referencia en la medida de una dimensión sean visibles simultáneamente desde al menos dos de ellas. Dadas las coordenadas de uno de estos puntos en las imágenes adquiridas (en el sistema de referencia de cada una) por dos de las cámaras, es posible determinar las coordenadas tridimensionales de ese punto dentro de la nave con operaciones geométricas sencillas.

Durante la elaboración de este trabajo, se concluyó que el mayor problema de este sistema está en que la precisión de la medida es muy sensible a errores humanos en la selección de los puntos. Estos errores dependen, a su vez, de las posiciones relativas de las cámaras entre sí y con respecto a los vehículos, ya que esto afecta al tamaño y a la perspectiva con que aparecen en las imágenes. Se ha comprobado que existen posiciones para las que la influencia de estos errores es mayor, por lo que tiene sentido optimizar la posición de las cámaras frente a un índice de calidad que dependerá de una medida de los errores que el operario comete. En este trabajo se han obtenido resultados aceptables al modelar estos errores mediante funciones de pertenencia borrosas. La estructura del artículo es la siguiente: en primer lugar (sección II, “Fuentes de error en la medición”), se discutirán cuáles son los orígenes del error de medida. A continuación (sección III, “Caracterización borrosa del error de medida”) se propondrá el empleo de conjuntos borrosos, interpretados como funciones de cubrimiento de conjuntos aleatorios, para modelar el error humano. En la sección IV (“Optimización de la configuración de las cámaras”) se aplica un algoritmo genético para optimizar la cota del error de medida dada en la sección anterior, y se compara la precisión medida con la conseguida con la colocación manual de las cámaras. Este trabajo termina con la

sección V, "Conclusiones y trabajo futuro".



Fig. 1. Vista parcial del sistema de medición de cotas de vehículos

II. FUENTES DE ERROR EN LA MEDICIÓN

A. Calibración

Se entiende por calibración de una cámara la estimación de un modelo de la misma, que permite conocer con exactitud en que punto de la imagen se proyecta cada uno de los puntos visibles de la escena (ver figura 2). Algunos fabricantes suministran parte de los parámetros de este modelo (como la distancia focal), otros no son conocidos de forma completa (como por ejemplo la distorsión introducida por las lentes) o pueden ser cambiados por el usuario. En la práctica esto se traduce en la necesidad de realizar un modelado de la cámara a partir de un conjunto de puntos cuyas coordenadas tridimensionales son conocidas, así como las coordenadas en la imagen. El modelo así obtenido se puede invertir, es decir, calcular a que puntos del espacio corresponde un punto de la imagen.

Es común establecer la relación entre coordenadas espaciales y coordenadas de la imagen a través de un modelo con once parámetros, conocidos como parámetros DLT (Direct Linear Transform) [1], [2]. Si se utiliza este modelo, el proceso de calibración consiste en determinar estos once parámetros característicos de cada cámara, a partir de los cuales las coordenadas tridimensionales de un punto se relacionan con las dos coordenadas de su proyección en el plano de la cámara. A partir de la información proporcionada por las cuatro coordenadas de un mismo punto en dos imágenes tomadas por dos cámaras distintas, es posible despejar las coordenadas tridimensionales del mismo (ver figura 2). Sin embargo, aunque en este proceso no hay errores intrínsecos, en su realización práctica hay algunos factores que afectan negativamente a la precisión de las medidas. Según nuestra experimentación, podemos dividir las fuentes de error en tres categorías: (a) dis-

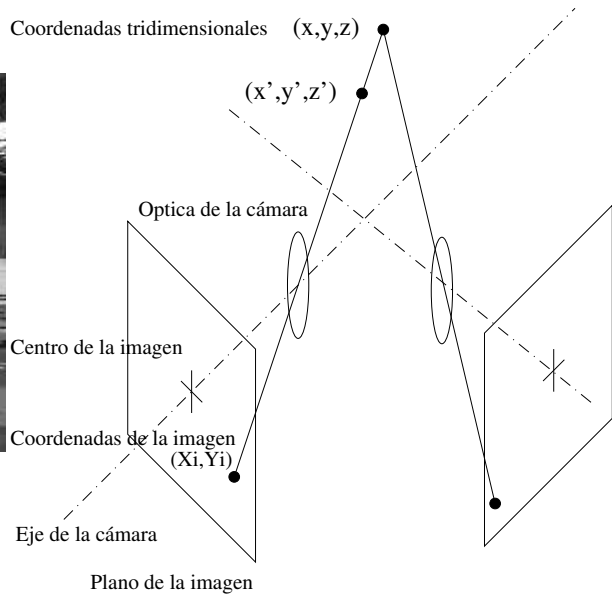


Fig. 2. Esquema de la transformación de un punto tridimensional O a un punto del plano de la imagen i . Cada cámara define una recta en el espacio, luego se necesitan al menos dos cámaras para determinar las coordenadas de un punto.

torsión debida a la lente de la cámara, (b) error de cuantización introducido por el CCD de la cámara y el frame-grabber y (c) errores en la determinación del par estéreo.

B. Distorsión debido a la lente de la cámara

La óptica utilizada en las cámaras instaladas en la instalación es de tipo estándar, sin embargo, la aberración de la lente no es el problema más importante, porque se puede compensar dentro de la tolerancia necesaria (1%) con un modelo inverso de cada una de las lentes.

Existen varios modelos que recogen el efecto de la distorsión y el descentrado de la lente; en general, dependen de más de once parámetros [6], que se estiman partir de las vistas, desde varias cámaras, de determinados puntos con coordenadas espaciales conocidas. En general, en todos los casos se eligen más puntos de los necesarios y se resuelve un sistema sobredeterminado.

C. Errores de cuantización

Tanto la cámara como el frame grabber tienen una resolución limitada, lo que introduce errores de cuantización en el modelo. En nuestro caso, la resolución está limitada por las características del CCD de la cámara. El efecto de la cuantización se introduce más adelante en el modelo (sección III).

D. Errores en la determinación del par estéreo

Como se explicó en la sección II-A, el grado de emparejamiento entre pixels de distintas imágenes,

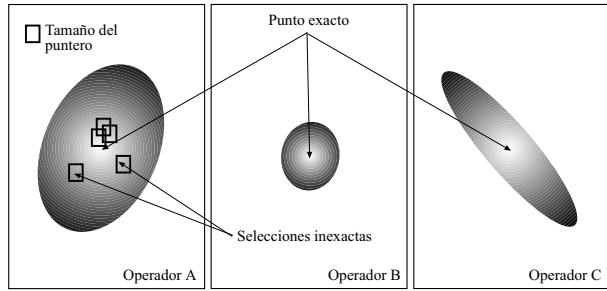


Fig. 3. Los operarios cometen errores al seleccionar los puntos que componen un par estéreo. Si se conoce la probabilidad de que se seleccione un punto, dada la posición real de la medida, puede definirse un conjunto aleatorio, cuyas imágenes son cuadrados del tamaño del puntero usado para marcar. La función de cubrimiento a un punto de este conjunto aleatorio se interpreta como una función de pertenencia borrosa que modela el error típico de un operador. Las zonas oscuras significan “pertenencia baja”.

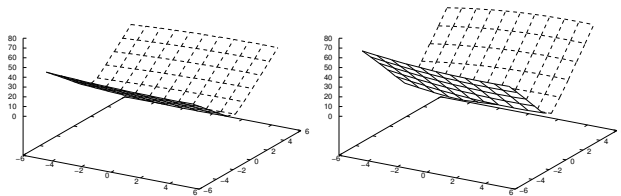


Fig. 4. La posición de las cámaras influye en la robustez de la medida. El mismo error en la selección de un par produce un mayor error de medida si las cámaras no están situadas en la posición óptima. Efecto del error del operario en el error de medida. Cámara en la posición inicial (izda.) y desplazada un metro (dcha).

correspondientes al mismo punto del objeto cuyas coordenadas se desean medir, es fundamental para mantener el error lo más bajo posible. Si ese emparejamiento se aleja de lo ideal, se cometerán errores en las medidas, porque el punto realmente seleccionado será diferente del que el operador desea marcar.

En la figura 4 se muestra la evolución del error cometido en la medida en función del error cometido por el operario. En los ejes x e y se representa el número de pixels en que se equivoca el operario en el sentido de dichos ejes, en el eje z se representa el módulo de la diferencia entre la coordenada 3D obtenida y la real. En este experimento, el valor máximo del error cometido cambia en la figura de 70.7 a 47.2; es decir, 23 cm de diferencia para el mismo error del operador. El cambio en la disposición de las cámaras de un experimento a otro consistió en desplazar una de las cámaras un metro a la derecha, sin alterar ningún otro parámetro. Por lo tanto, la disposición espacial de las cámaras y su orientación tiene influencia en cómo el error de emparejamiento se traduce en error de medida y por lo tanto cabe plantearse si existe una disposición óptima para las cámaras y un método para encontrarla.

En este trabajo se comprueba que esa posición ex-

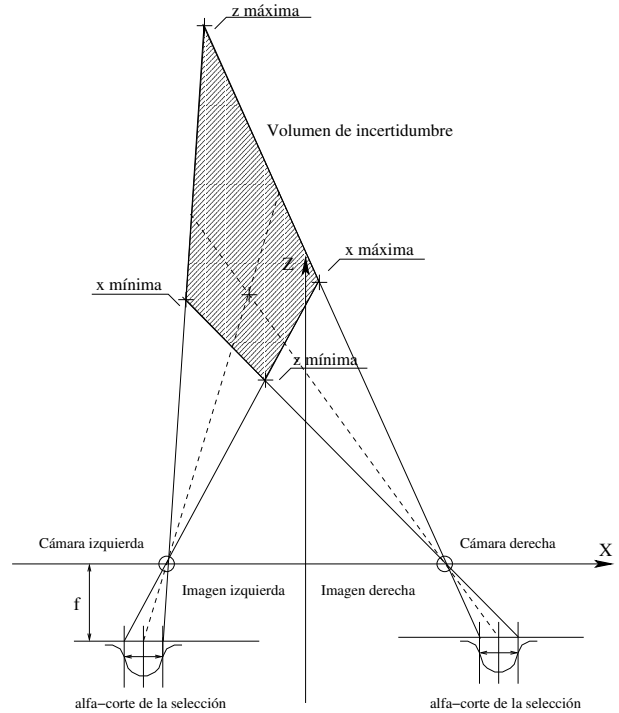


Fig. 5. Determinación esquemática, para medidas de una dimensión, de las coordenadas x máxima y mínima para un α -corte dado de la entrada.

iste y para encontrarla, en la siguiente sección se define un modelo del error de un operario, para el que se optimizará la disposición de las cámaras mediante un algoritmo genético, de modo que este error influya lo menos posible en la medida de los objetos.

III. CARACTERIZACIÓN BORROSA DEL ERROR DE MEDIDA

Con el fin de encontrar la posición óptima de las cámaras, es necesario asignar una puntuación numérica a cada una de ellas, de acuerdo con una caracterización del error cometido por los operadores.

Supongamos que al operador número 1 se le pide que realice varias veces una medida determinada. Existe una cierta variación entre los resultados de cada realización del experimento, por lo que tiene sentido modelar el error mediante una variable aleatoria bidimensional X_1 . Para una repetición ω de la medida, $X_1(\omega)$ es un vector (e_x, e_y) que une el punto de la imagen que debería haberse seleccionado con el punto que se ha elegido en realidad.

Los operarios seleccionan los puntos de la imagen con un cursor que tiene un área apreciable en relación con la tolerancia de la medida. Por otra parte, la imagen está discretizada, de modo que no se pueden seleccionar todos los puntos. Por lo tanto, los valores (e_x, e_y) no son directamente observables. Por este motivo los valores (e_x, e_y) no son directamente observables, sólo conocemos que están contenidos en

un cuadrado del tamaño del puntero empleado para seleccionarlos, y como mínimo de un pixel de lado. Por esta razón, en vez de operar con la variable X_1 , utilizaremos un conjunto aleatorio Λ_1 que contiene a X_1 : $X_1(\omega) \in \Lambda_1(\omega) \forall \omega$ [8]. La función de cubrimiento a un punto de Λ_1 se interpretará como una función de pertenencia borrosa de un conjunto \mathcal{X}_1

$$\mathcal{X}_1(x, y) = p\{\omega : (x, y) \in \Lambda_1(\omega)\}$$

que modela el error cometido en las medidas por el operador 1 [5].

Si el mismo experimento se repite con los demás operadores, obtendremos los conjuntos borrosos \mathcal{X}_2 , \mathcal{X}_3 , y sucesivos (ver figura 3). Se elegirá un modelo basado en el peor caso, y se modelará la incertidumbre en la selección de un punto mediante un conjunto \mathcal{X} , definido como

$$\mathcal{X}(x, y) = \max(\mathcal{X}_1(x, y), \mathcal{X}_2(x, y), \dots)$$

y que se estimará de forma paramétrica a partir de varias mediciones realizadas por cada operador [11], [3]. En nuestros experimentos hemos supuesto que las X_i son gaussianas y que el lado del cuadrado necesario para definir Λ_i es conocido.

Como se adelantó antes en el texto, el error cometido por los operarios en la realización de dos medidas \mathcal{X} y \mathcal{X}' influye en el error cometido en la medición tridimensional. Para estudiar este efecto, trabajaremos con los α -cortes de estos conjuntos, según lo contemplado en la figura 5. Obsérvese que cada α -corte se proyecta en un cono, y que la intersección de dos de estos conos es un volumen tridimensional. Es inmediato que los volúmenes originados por cortes anidados también están anidados, de forma que al barrer los valores de α entre 0 y 1, se obtiene un conjunto borroso \mathcal{C} definido sobre \mathbf{R}^3 , que modela las coordenadas del punto que el operador ha seleccionado junto con la imprecisión asociada a su selección.

En función de cómo se posicionen las cámaras, las propiedades de los conjuntos \mathcal{C} varían. Si admitimos que las medidas no tienen sesgo (es decir, que $E(X_i) = (0, 0)$ para todos los operadores $i = 1, 2, \dots$) entonces la posición óptima de las cámaras, para una medida dada, será aquella para la que el conjunto \mathcal{C} sea más específico. Como el catálogo de medidas es conocido y se desea obtener la mayor precisión posible en las medidas, tiene sentido plantear un problema de optimización en el que una determinada disposición de las cámaras se asocie con la noespecificidad media de los conjuntos \mathcal{C} obtenidos al simular todas las medidas posibles que se realizarán sobre cada vehículo. En este trabajo se ha usado la definición de noespecificidad definida en [9],

$$U(\mathcal{C}) = \int \log \|\mathcal{C}_\alpha\| d\alpha. \quad (1)$$

Por lo tanto la valoración de cada disposición consiste en el valor medio de la estimación de (1) en la simulación de todas las medidas contenidas en el catálogo, para un patrón de medida representativo.

IV. OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LAS CÁMARAS

A. Representación

Todas las cámaras usadas en la instalación son idénticas, por lo tanto una disposición se caracteriza por la localización y orientación de estas, única información susceptible de ser variada en el proceso de optimización. Así cada individuo de la población estará formado por los tres ángulos y las tres coordenadas de cada una de las cuatro cámaras, en total 24 parámetros. Dado que las cámaras se fijan en las paredes de la nave, existirá una coordenada que permanecerá constante, la que representa la distancia de la pared en la que está la cámara al sistema de referencia. Se ha utilizado representación real y una estrategia de régimen permanente, con tamaño de población 100, selección por torneo de tamaño 5, cruce aritmético y 1% de mutación no uniforme sobre los descendientes del cruce. La descendencia del cruce reemplaza a los dos peores individuos del torneo. A continuación se dan detalles sobre cada una de estas cuestiones.

B. Cruce

En este trabajo se han realizado pruebas con dos tipos de cruce distintos, el cruce aritmético [10] y el cruce BLX- α [4]. El cruce aritmético se define de la forma siguiente: dados dos elementos a y b , aleatoriamente se genera un coeficiente $\alpha \in (-c, c)$ (se ha tomado $c = 0.25$ en los experimentos), de modo que el resultado del cruce de dichos elementos será $a - \alpha * (a - b)$ y $b + \alpha * (a - b)$. En la figura 6 se muestra gráficamente el funcionamiento de este tipo de cruce para el caso de individuos con cromosomas de dos genes (c_1 y c_2). Nótese que los descendientes son sólo ciertas combinaciones lineales de los padres, de modo que la exploración y la explotación del espacio de soluciones se reduce a la línea recta que pasa por los dos individuos.

El cruce BLX- α sin embargo, permite una mayor exploración del espacio de soluciones. Para un genético con n parámetros, sean dos cromosomas $C_1 = (c_1^1, c_2^1, \dots, c_n^1)$ y $C_2 = (c_1^2, c_2^2, \dots, c_n^2)$. El cruce produce dos descendientes, $H_k = (h_1^k, h_2^k, \dots, h_n^k)$ y $H_k = (h_1^k, h_2^k, \dots, h_n^k)$. Cada h_i^k , $i = 1..n$, $k = 1, 2$, es escogido de forma aleatoria del intervalo $[c_{min} - I\alpha, c_{max} + I\alpha]$ donde $c_{max} = \max\{c_i^1, c_i^2\}$, $c_{min} = \min\{c_i^1, c_i^2\}$, $I = c_{max} - c_{min}$. En la figura 7 se muestra el funcionamiento de este cruce. Nótese como en este caso la exploración y la explotación no se limita a la línea recta que pasa por los dos individ-

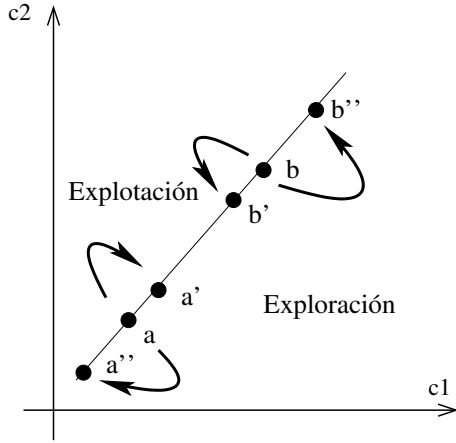


Fig. 6. Esquema del funcionamiento del cruce aritmético para el caso de individuos con cromosomas de dos genes

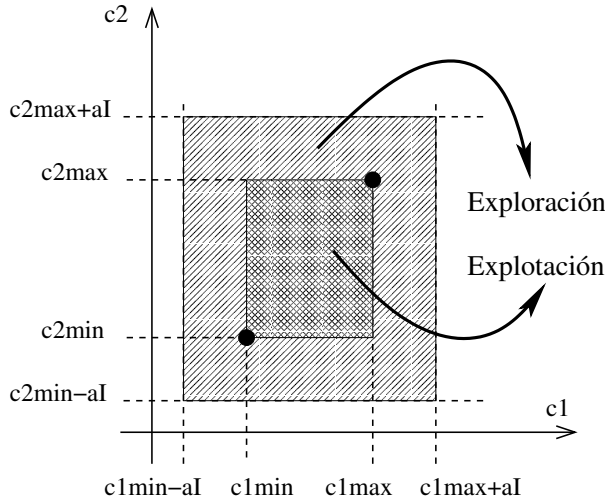


Fig. 7. Esquema del funcionamiento del cruce BLX α para el caso de individuos con cromosomas de dos genes

uos, sino que son áreas rectangulares que abarcan una parte del espacio de soluciones. En [7] se realiza un análisis en profundidad del comportamiento de este operador de cruce, incluyendo la influencia del cruce múltiple por pareja de cromosomas y la selección de los dos mejores hijos.

C. Mutación

En este trabajo se utiliza la mutación no uniforme propuesta en [10] ya que realiza una búsqueda uniforme en el espacio de soluciones al comienzo de la ejecución del algoritmo genético y progresivamente va siendo más localizada. Sea T el número total de generaciones y t la generación actual. Dado un cromosoma de la población en la generación t , $C_t = (c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_n)$ y uno de sus genes, c_k , $k \in 1, \dots, n$, definido en $[c_{ki}, c_{kd}]$, seleccionado para ser mutado, el cromosoma obtenido tras la mutación es $c^{t+1} = (c_1, \dots, c'_k, \dots, c_n)$ obteniéndose su valor

mediante la expresión 2:

$$c'_k = \begin{cases} c_k + \Delta(t, c_{kd} - c_k) & \text{si } p = 0 \\ c_k - \Delta(t, c_k - c_{ki}) & \text{si } p = 1 \end{cases} \quad (2)$$

donde p es un número aleatorio tomado de 0, 1 y la función $\Delta(t, y)$ (ver ecuación 3) devuelve un valor en el intervalo $[0, y]$ de modo que la probabilidad de que $\Delta(t, y)$ sea cercana a 0 aumenta con t .

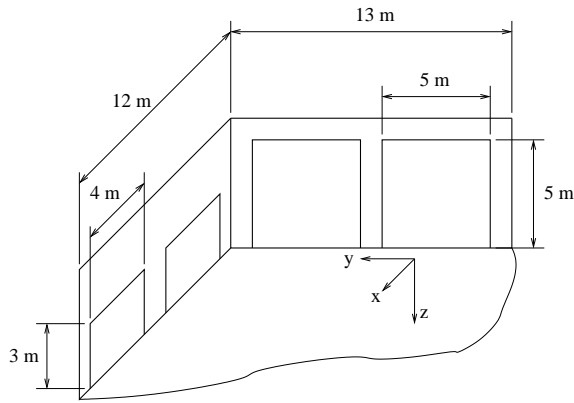
$$\Delta(t, y) = y \left(1 - r^{(1 - \frac{t}{T})^b}\right) \quad (3)$$

En la ecuación 3, r es un número aleatorio perteneciente al intervalo $[0, 1]$ y b es un número escogido por el usuario que determina el grado de dependencia existente con el número de generaciones.

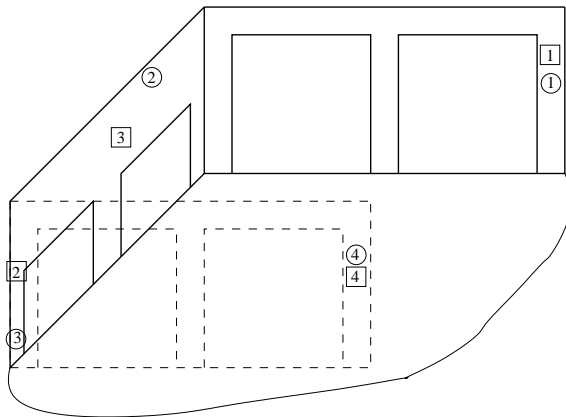
D. Fitness

Debido a las restricciones existentes para la colocación de las cámaras y a la necesidad de que el objeto de medida aparezca completo en las imágenes adquiridas, el fitness empleado en el algoritmo genético utilizado en el proceso de optimización posee tres términos: calidad de la posición, error de imagen y noespecificidad media. El primero de ellos es diferente de cero cuando la posición de la cámara no es posible (por estar en un portón, por ejemplo), siendo igual a la distancia al punto válido más cercano de la nave. El segundo mide el porcentaje del patrón de medida que es visible desde las cámaras, y el tercero ha sido comentado en la sección anterior. Existe una ordenación clara de objetivos y por tanto no se utiliza una ordenación lexicográfica de éstos, según el mismo orden en que se han expuesto: una solución de implantación imposible es peor que una que no lo es, y una solución para la que algunas medidas no pueden realizarse es peor que otra en que todas las partes del vehículo son visibles.

El cálculo de la tercera componente del fitness se evalúa mediante la simulación de la obtención de las coordenadas tridimensionales de los puntos de control. En primer lugar y utilizando un modelo proyectivo, se obtienen las imágenes correspondientes a cada una de las dos cámaras necesarias para realizar el proceso de medida. Una vez obtenidas estas imágenes, se distorsionan las coordenadas bidimensionales (en la imagen) de cada uno de los puntos de control, añadiéndoles el conjunto borroso que modela el error del operador. Finalmente, para tres α -cortes (0.25, 0.50 y 0.75) se obtienen los valores extremos de las coordenadas tridimensionales correspondientes, (ver figura 5) y se estima la noespecificidad de la extensión borrosa de la medida. El valor final es la media de estas noespecificidades para todos los puntos de control.



(a) Instalación simulada en las pruebas



(b) Representación gráfica de las posiciones de las cámaras, inicial y optimizada, utilizando el operador de cruce aritmético (rodeadas de un cuadrado) y utilizando el operador BLX- α (rodeadas de un círculo).

Fig. 8. Esquema de la instalación y solución encontrada. En frente de los portones de mayor tamaño existe otra pared idéntica a la que se muestra. En la figura se pueden observar los ejes respecto a los cuales se miden las coordenadas de las posiciones de las cámaras.

E. Resultados numéricos

Se ha simulado el proceso de medida en una instalación con varios portones de acceso y con distintos huecos en una de las paredes que impiden la instalación de las cámaras en esas zonas. En la figura 8(a) se muestra un esquema de la mencionada instalación así como los ejes respecto a los cuales se miden las coordenadas de las posiciones de las cámaras. En la misma figura se han acotado las dimensiones de mayor interés para el experimento. En el proceso de simulación se ha tomado una pertenencia borrosa originada por el cubrimiento de un conjunto aleatorio para el que las imágenes son cuadrados de dos píxeles y los centros de éstos siguen una distribución normal bidimensional con matriz de covari-

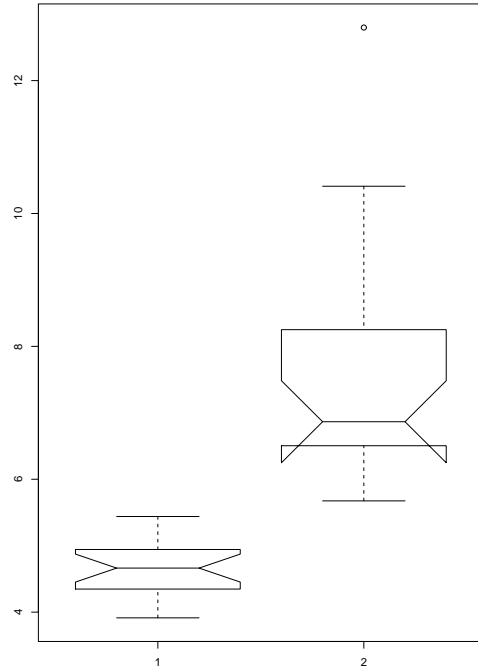


Fig. 9. Boxplot de 20 ejecuciones del algoritmo. A la izquierda se muestra la distribución del error cometido usando el operador de cruce BLX- α y a la derecha la correspondiente al operador de cruce aritmético

anzas $4 \cdot I$. El patrón de medida es un paralelepípedo de $1.5 \times 1.5 \times 3.0$ metros, análogo al utilizado en la calibración de las cámaras en la instalación real.

Si las cámaras se sitúan inicialmente en las posiciones de la tabla I y con los ángulos mostrados en la tabla II, hemos estimado que el error medio del sistema equivalente al fitness final obtenido es de 14 cm. Por el contrario, si se optimiza la configuración de acuerdo con el esquema aquí propuesto, el error cometido baja hasta 5 cm. si se utiliza el operador de cruce BLX- α y 6.5 si se utiliza el operador de cruce aritmético. Las coordenadas de las posiciones de las cámaras para el primer tipo de cruce serían las que se pueden ver en la tabla III y los ángulos en la tabla IV. Las coordenadas de las posiciones de las cámaras para el segundo tipo de cruce serían las que se pueden ver en la tabla V y los ángulos en la tabla VI

La influencia del operador de cruce utilizado en el error obtenido se puede ver en la figura 9. A la izquierda se muestra el gráfico correspondiente al operador de cruce BLX- α y a la derecha el correspondiente al operador de cruce aritmético. El gráfico representa los errores obtenidos en 20 ejecuciones del algoritmo para cada caso. Como se puede ver, el comportamiento del operador BLX- α es sustancialmente mejor que el del operador aritmético.

En la figura 8(b) se muestra gráficamente la dis-

posición inicial y optimizada de las cámaras utilizando los dos tipos de cruce. La posición de una cámara optimizada utilizando el cruce aritmético se indica con número encerrado en un cuadrado, el número de cada cámara se corresponde con el de la tabla III. En la misma figura se muestran las posiciones de las cámaras en la configuración obtenida cuando se utilizó el operador de cruce BLX- α . En este caso se identifican por un número rodeado por un círculo, correspondiéndose el número con el de la tabla V.

Nótese como las cámaras están distribuidas de modo más uniforme por la instalación, lo cual parece lógico; pero además lo están también en altura, lo cual no era tan evidente a priori. Sin embargo, una vez que el proceso de optimización lo ha revelado, parece lógico que el mismo efecto que se persigue al situar dos cámaras en distinta posición (tener distinta perspectiva del objeto a medir) deba de ser deseable para las tres dimensiones del objeto. Al estar las cámaras situadas a distinta altura, las dimensiones del mismo medidas en la dirección del eje z se realizan sobre imágenes en las que estas han sido registradas también con distinta perspectiva. La configuración obtenida mediante utilizando el operador BLX- α es más extendida, lo cual es coherente con el menor error obtenido.

TABLA I

COORDENADAS DE LAS CÁMARAS EN LA POSICIÓN ELEGIDA INICIALMENTE, DE ACUERDO CON EL CRITERIO DEL EXPERTO.

Cámara	x	y	z
1	-600	1000	-250
2	-100	1100	-75
3	100	1100	-75
4	600	1000	-250

TABLA II

ANGULOS DE LAS CÁMARAS PARA LAS POSICIONES DE LA TABLA I.

Cámara	α	β	γ
1	0.1963	-1.5708	-1.2566
2	0	1.5708	-1.2566
3	0	1.5708	-1.2566
4	0.3927	1.5708	-1.2566

Además, el algoritmo de optimización utilizado ha encontrado una solución con una característica curiosa. En la posición optimizada, los ángulos son tales que el patrón de medida tiende a alinear la dimensión mayor paralelamente al eje de las imágenes en el que existe mayor resolución. Esto es lógico ya que de esta forma se aprovecha mejor el campo de

TABLA III

COORDENADAS DE LAS CÁMARAS EN UNA POSICIÓN OPTIMIZADA SEGÚN EL ESQUEMA PROPUESTO UTILIZANDO EL OPERADOR DE CRUCE ARITMÉTICO.

Cámara	x	y	z
1	-600	-117.56	-107.08
2	587.1	1100	-2.47
3	-42.13	1100	-83.14
4	600	-163.08	77.94

TABLA IV

ANGULOS DE LAS CÁMARAS PARA LAS POSICIONES DE LA TABLA III.

Cámara	α	β	γ
1	-0.423	0.4980	-0.1815
2	0.2654	-0.0755	-0.0166
3	-1.4549	2.7439	0.8152
4	0.0120	2.0932	-0.2207

la imagen para medir el objeto utilizando el mayor número de pixels. De esta forma se puede observar en la imagen 10 como el patrón de medida no aparece en posición vertical sino como se ha comentado.

Finalmente, cabe preguntarse si existen posiciones alternativas con un error similar, que permitan reubicar las cámaras si se realiza una reforma en la instalación. La respuesta a esta pregunta es afirmativa. Efectivamente el error cometido por el operario es sensible a la disposición de las cámaras, como se ha dicho, pero las posiciones en las que este error es bajo son múltiples. En primer lugar, existen disposiciones simétricas a la mostrada en la figura 8(b), en segundo lugar, existirán disposiciones que ofrecerán una diversidad de vistas del objeto a medir, de modo que el error sea aceptable. Si se representan juntas las soluciones obtenidas por el genético en distintas ejecuciones, se observa como están distribuidas estas a lo largo y ancho de la instalación. En la figura

TABLA V

COORDENADAS DE LAS CÁMARAS EN UNA POSICIÓN OPTIMIZADA SEGÚN EL ESQUEMA PROPUESTO UTILIZANDO EL OPERADOR DE CRUCE BLX- α .

Cámara	x	y	z
1	-600	-127.97	-78.34
2	-270.96	1100	-262.75
3	583.4	1100	278.41
4	600	-114.35	-109.35

TABLA VI
ANGULOS DE LAS CÁMARAS PARA LAS POSICIONES DE LA
TABLA V.

Cámara	α	β	γ
1	0.4472	-0.4350	-0.4999
2	-0.5279	-0.9901	0.2864
3	1.8574	0.8398	0.4538
4	0.7186	0.0192	-1.5429

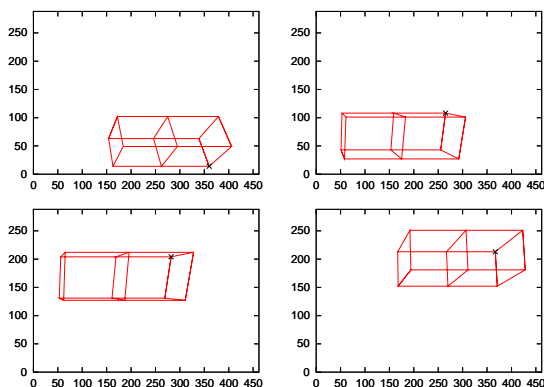


Fig. 10. Imagen del patrón de medida obtenido con los parámetros de las tablas III y IV

11 se observa como existe una variedad de disposiciones posibles, si bien las cámaras tienden a situarse en determinadas zonas. Por lo tanto, si es necesario modificar la instalación de algún modo, se puede intentar que esas zonas no resulten afectadas, con el fin de no penalizar a priori las soluciones que se puedan encontrar.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se han utilizado los conjuntos borrosos para modelar un experimento en el que hay dos fuentes de imprecisión: aquella debida a la aleatoriedad del comportamiento del operador, y la debida a la inexactitud en la observación del resultado del experimento. Partiendo de la interpretación de un conjunto borroso como la función de cubrimiento a un punto de un conjunto aleatorio, se ha desarrollado un sistema que permite asociar una cifra de mérito a la colocación de unas cámaras dentro de una nave, y se ha optimizado ésta para que el sistema de medida tenga la máxima robustez frente a los errores del usuario.

En el algoritmo genético utilizado se han utilizado dos operadores distintos de cruce, el BLX- α y el cruce aritmético, obteniendo mejores resultados para el primero de ellos.

Aún con esta colocación optimizada, el grado de precisión obtenido no es suficiente para realizar al-

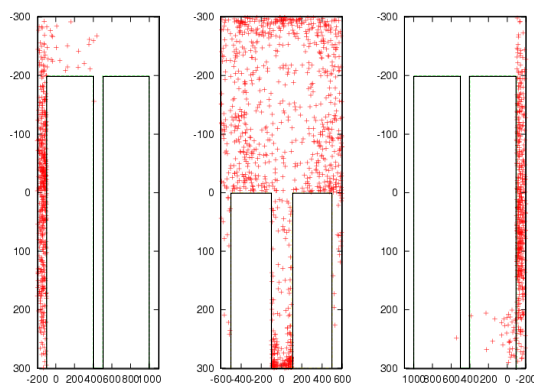


Fig. 11. Distintas disposiciones de las cámaras en distintas ejecuciones del genético

gunas de las medidas. Se ha previsto añadir más cámaras al sistema, de forma que la perspectiva de las vistas sea más sencilla. En un futuro próximo extendaremos este algoritmo para seleccionar tanto el número como la posición de las cámaras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología Español, en el marco del proyecto TIC2002-04036-C05-05.

REFERENCIAS

- [1] Abdel-Aziz, Y.I., & Karara, H.M. *Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry*, Proc. Symp. Close-Range Photogrammetry (pp.1-18). Falls Church, VA. 1971.
- [2] Chen, L., Armstrong, C.W., & Raftopoulos, D.D. *An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique*, J. Biomechanics 27, 493-500. 1994.
- [3] Cressie, N. A. C. *Statistics for Spatial Data*, Wiley, 1993
- [4] L.J. Eshelman and J.D. Schaffer. *Real-coded genetic algorithms and interval schemata*, *Foundations of Genetic Algorithms.2*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA, 187-202 (1993).
- [5] Goodman, Nguyen. *Uncertainty Models for Knowledge-based Systems*, North-Holland. 1985
- [6] Hatze, H. *High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach*, J. Biomechanics 21, 533-538. 1988.
- [7] F. Herrera, M. Lozano, E. Pérez, A.M. Sánchez y P. Villar *Muñtiple Crossover per Couple with Selection of the Two Best Offspring: An experimental Study with the BLX- α Crossover Operator for Real-Coded Genetic Algorithms*, Actas de la VIII Conferencia Iberoamericana de Inteligencia Artificial, Sevilla 12-15 Noviembre, 2002
- [8] Couso, I., Sánchez, L., Gil, P. *Imprecise distribution functions associated to a random set*, Information Sciences. In press.
- [9] Klir, G., Folger, T. *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice Hall, 1988
- [10] Z Michalewicz. *Genetic algorithms + Data Structures = Evolution Programs* Springer-verlag, 1992.
- [11] Sánchez, Luciano. *A random sets-based method for identifying fuzzy models*, Fuzzy Sets and Systems (3) pp 343-354, 1998