

Posicionamiento automático de las cámaras en un sistema de medición visual de cotas de vehículos

José Otero
Adolfo Otero
Luis Junco
Luciano Sánchez

Resumen— Es frecuente que en los sistemas de medición visual se utilicen cámaras, ópticas y tarjetas de captura diseñadas específicamente para la metrología. Desafortunadamente, el precio de estos componentes imposibilita su uso en pequeñas aplicaciones industriales, donde es más rentable que las mediciones se realicen manualmente.

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

LA medición de las cotas (ancho, largo, alto, distancia entre ejes, dimensiones de grúas, rampas y otros accesorios) es una de las tareas contempladas en el reglamento de la Inspección Técnica de Vehículos. Esta tarea demanda la atención de dos mecánicos inspectores, por lo que su automatización sería deseable.

Sin embargo, las soluciones habituales en metrología óptica están fuera del presupuesto de una estación media de inspección de vehículos. A nuestro juicio, la solución más fácil de amortizar se basa en 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. Se ha implantado un prototipo de este sistema la estación de I.T.V de Pruvia (Asturias), y se muestra en la figura 1. El sistema consta de cuatro cámaras, posicionadas de forma que todos los puntos de referencia en la medida de una cota sean visibles simultáneamente desde al menos dos de ellas. Dadas las coordenadas de uno de estos puntos en las vis-

tas proporcionadas por dos de las cámaras, es posible determinar las coordenadas tridimensionales de ese punto dentro de la nave con operaciones geométricas sencillas.

Como se verá, el mayor problema de esta disposición 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. 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 del tipo y naturaleza 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”.

II. FUENTES DE ERROR EN LA MEDICIÓN

A. Calibración

Se entiende por calibración de una cámara la obtención de los parámetros de la misma que permiten conocer con exactitud en que punto de la imagen se proyecta cada uno de los puntos visibles de la escena (ver figura 2). Si bien algunos fabricantes suministran parte de estos parámetros (como la distancia focal), otros no son conocidos de forma completa (como por ejemplo la distorsión introducida por las len-



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

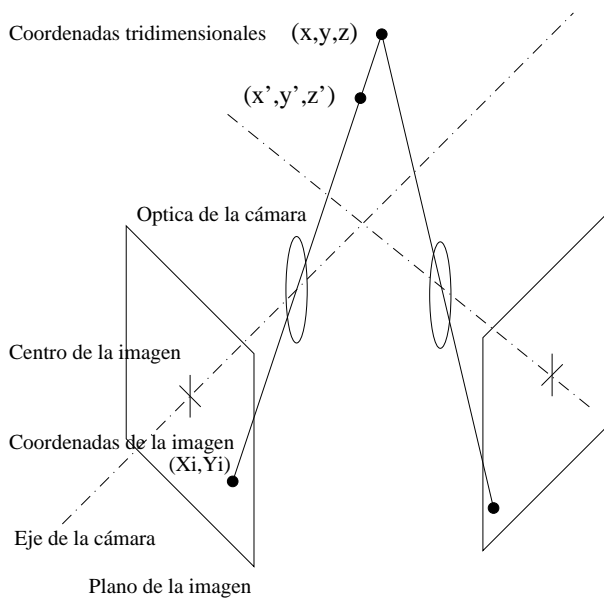


Fig. 2. Esquema de la transformación de un punto tridimensional O a un punto del plano de la imagen i . Cada cámara define una recta en el espacio, luego se necesitan al menos dos cámaras para determinar las coordenadas de un punto.

tes) o bien 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. Una vez conocido este modelo se puede proceder de modo inverso, es decir, calcular a que punto del espacio corresponde un punto de la imagen.

Es común establecer la relación entre coordenadas espaciales y coordenadas de la imagen a través de once parámetros, conocidos como parámetros DLT (Direct Linear Transform) [1], [2]. El objetivo de la calibración es el de 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.

Es inmediato que, a partir de la información proporcionada por las cuatro coordenadas de un mismo punto en dos cámaras diferentes, es posible despejar las coordenadas tridimensionales del mismo, como se ha mostrado en la 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) distorsión 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

Las lentes que se han empleado no fueron diseñadas para la metrología, sino para aplicaciones de propósito general en las que las distorsiones son admisibles. Pese a lo que en un principio pudiese parecer, 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

De lo explicado en la sección II-A es fácil concluir que es primordial conseguir un buen grado de emparejamiento entre pixels de distintas imágenes correspondientes al mismo punto del objeto cuyas coordenadas se desean medir. En la medida en que ese emparejamiento se aleje 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(a) se muestra la evolución del error en función del error cometido en pixels en sentido horizontal y vertical. 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

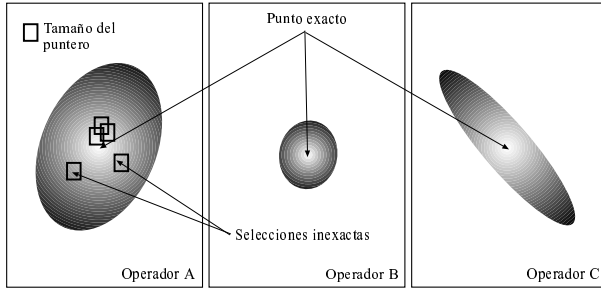


Fig. 3. Los operarios cometen errores al seleccionar los puntos que componen un par estéreo. Si se conoce la probabilidad de que se seleccione un punto, dada la posición real de la medida, puede definirse un conjunto aleatorio, cuyas imágenes son cuadrados del tamaño del puntero usado para marcar. La 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".

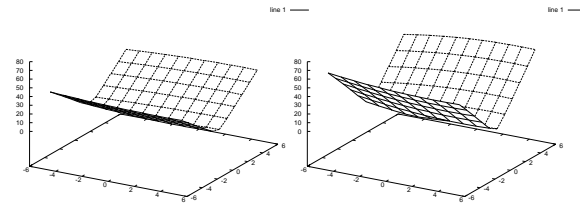
módulo de la diferencia entre la coordenada 3D obtenida y la real. En este experimento, el valor máximo del error cometido cambia en la figura de 70.7 a 47.2; es decir, 23 cm de diferencia para el mismo error del operador. El cambio de un experimento a otro consistió en desplazar una de las cámaras un metro a la derecha, sin alterar ningún otro parámetro. Esto quiere decir que 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 existe 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.

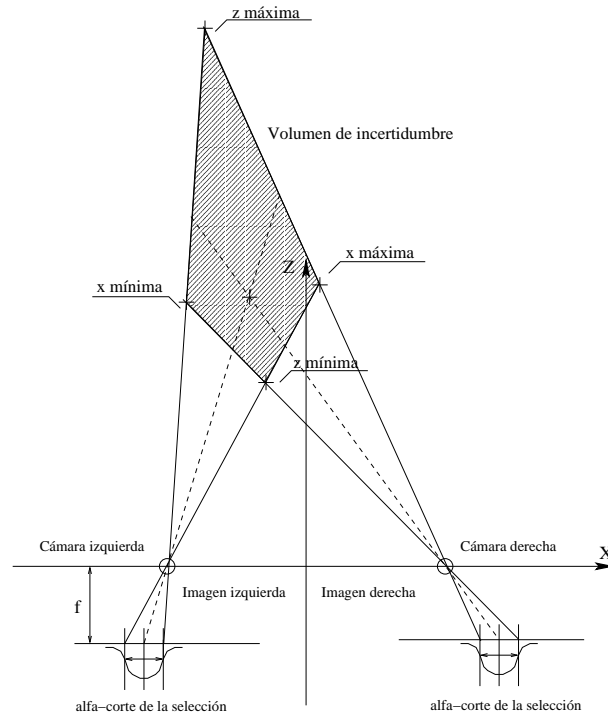
III. CARACTERIZACIÓN BORROSA DEL ERROR DE MEDIDA

La optimización de la posición de las cámaras se basa en la asignación de una puntuación numérica a cada disposición, 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.

Dado que, por una parte, el cursor con que se seleccionan los puntos tiene un área apreciable en relación con la tolerancia de la medida y, por otra, la imagen está discretizada y no todos los puntos pueden selec-



(a) Efecto del error del operario en el error de medida. Cámara en la posición inicial (izda.) y desplazada un metro (dcha).



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

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.

cionarse, 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.

Una vez caracterizado el error en una medida, es necesario estudiar cómo el error cometido sobre una pareja de medidas \mathcal{X} y \mathcal{X}' tomadas sobre dos imágenes diferentes se propaga a la medición tridimensional. Para ello trabajaremos con los α -cortes de estos conjuntos, según lo contemplado en la figura 4(b). 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, 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],

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

De este modo, la valoración de una posición 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. Parámetros del algoritmo genético

B. Representación

Todas las cámaras usadas en la instalación poseen la misma óptica y el mismo CCD, por lo tanto sólo se diferenciarán por su localización y orientación, siendo esta la 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. Para cada cámara existirá una coordenada que permanecerá constante, aquella que representa la distancia de la pared al sistema de referencia, ya que las cámaras han de ir forzosamente en una de las paredes del recinto. 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.

C. 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 consiste en lo 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) y el resultado del cruce de dichos elementos será $a - \alpha * (a - b)$ y $b + \alpha * (a - b)$. En la figura 5 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 6 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 individuos, 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

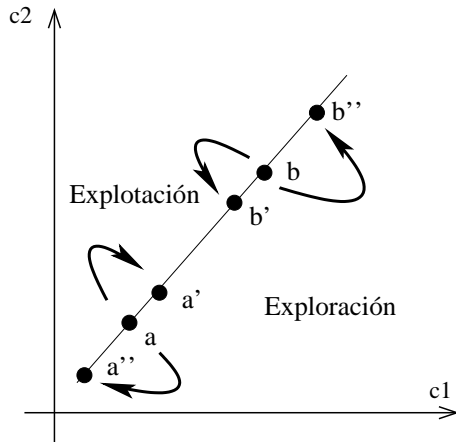


Fig. 5. Esquema del funcionamiento del cruce aritmético para el caso de individuos con cromosomas de dos genes

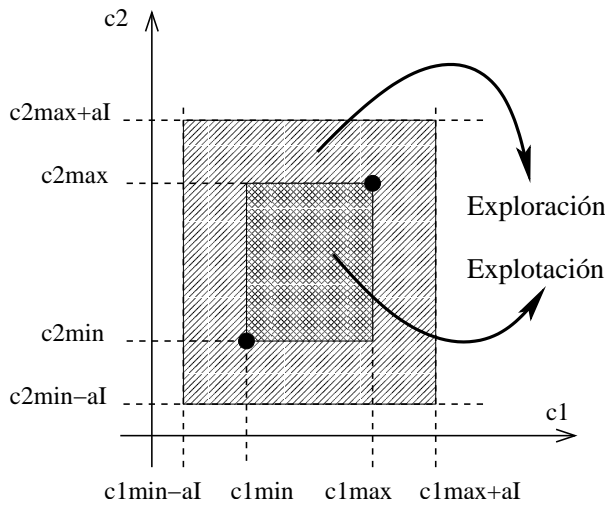


Fig. 6. Esquema del funcionamiento del cruce BLX α para el caso de individuos con cromosomas de dos genes

cruce múltiple por pareja de cromosomas y la selección de los dos mejores hijos.

D. 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 .

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

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.

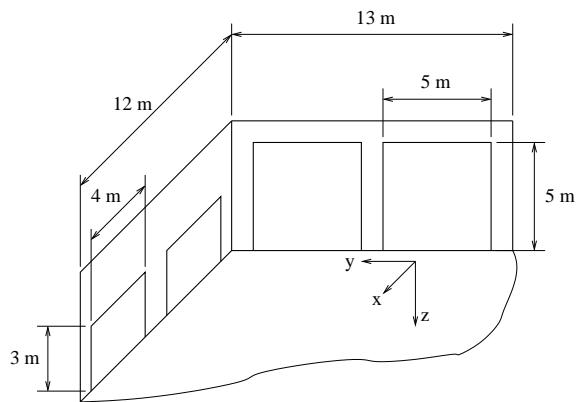
E. Fitness

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 un fitness multicriterio sino 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.

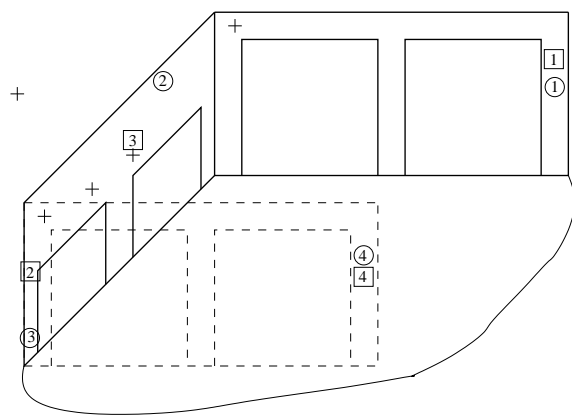
El cálculo de la tercera componente del fitness se evalúa mediante la simulación de la obtención de las coordenadas tridimensionales de los puntos de control. En primer lugar y utilizando un modelo proyectivo, se obtienen las imágenes correspondientes a cada una de las dos cámaras necesarias para realizar 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 4(b)) 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.

F. 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 7(a) se muestra un esquema de la mencionada instalación así como los ejes respecto a los cuales se miden las coor-



(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. 7. 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.

denadas 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 pixels y los centros de éstos siguen una distribución normal bidimensional con matriz de covarianzas $4 \cdot I$. 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

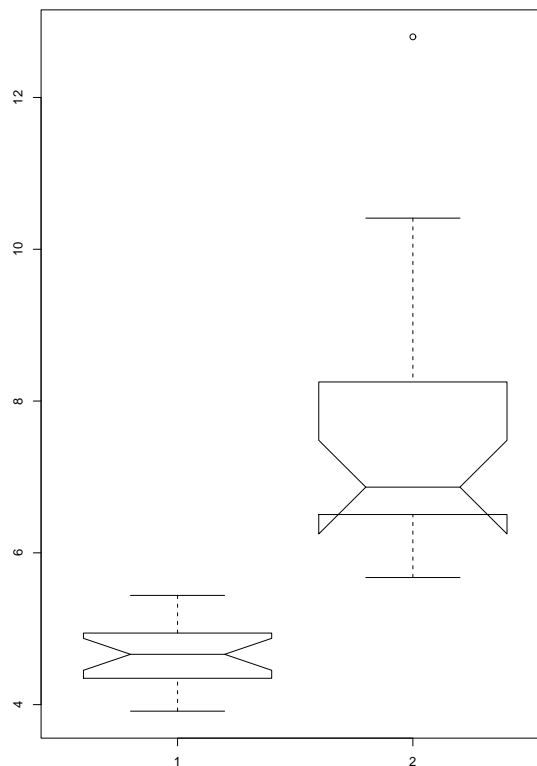


Fig. 8. Boxplot de 20 ejecuciones del algoritmo. A la izquierda se muestra la distribución del error cometido usando el operador de cruce BLX- α y a la derecha la correspondiente al operador de cruce aritmético

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 se puede ver en la figura 8. 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 7(b) se muestra gráficamente la disposición inicial y optimizada de las cámaras. 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. Las cámaras situadas de modo arbitrario se denotan con una cruz.

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 la imagen para medir el objeto utilizando el mayor número de pixels. De esta forma se puede observar en la imagen 9 como el patrón de medida no aparece en posición vertical sino como se ha comentado.

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

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-

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

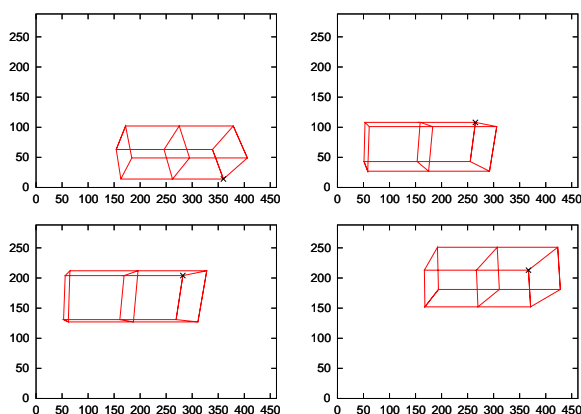


Fig. 9. Imagen del patrón de medida obtenido con los parámetros de las tablas III y IV

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 extendemos 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 *Multiple 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