

Uso de Marcadores Difusos para Solucionar el Problema de la Coplanaridad en la Calibración de la Cámara en 3D. Aplicación en Identificación Forense por Superposición Craneofacial

Óscar Ibáñez¹ Óscar Cordon¹ Sergio Damas¹ José Santamaría²

¹ European Centre for Soft Computing, {oscar.ibanez,oscar.cordon,sergio.damas}@softcomputing.es

² Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Jaén, jslopez@ujaen.es

Resumen

La Superposición Craneofacial es un proceso forense cuyo objetivo es identificar a personas desaparecidas a partir de fotografías y de un cráneo encontrado. Las técnicas más avanzadas usan un modelo 3D del cráneo.

La segunda etapa de esta compleja técnica forense, el emparejamiento cráneo-cara, trata de encontrar la pose más adecuada del modelo 3D del cráneo que será proyectado sobre la fotografía. Esta segunda etapa se puede modelar como un problema de calibración de la cámara, problema ampliamente referenciado en la bibliografía de visión por ordenador.

Esta contribución se centra en el estudio de la coplanaridad del conjunto de marcadores usados para guiar el emparejamiento cráneo-cara. Además, se propone el uso de marcadores difusos para evitar situaciones de coplanaridad

Palabras Clave: Superposición craneofacial, marcadores difusos, calibración de la cámara.

La primera etapa conlleva la construcción de un modelo digital del cráneo de manera precisa. Este problema ya fue abordado con éxito en nuestros trabajos mediante el uso de metaheurísticas para el registro de las diferentes vistas del cráneo [12].

En la siguiente etapa de la tarea de identificación, conocida como *emparejamiento cráneo-cara*, se trata de superponer el modelo 3D del cráneo sobre la fotografía de la cara mediante el emparejamiento de dos conjuntos de puntos radiométricos (puntos antropométricos faciales en la cara del sujeto y puntos antropométricos craneales en el modelo 3D del cráneo obtenido) [10].

A continuación, comienza la tercera etapa, ayuda a la toma de decisiones, en donde se analizan los diferentes tipos de emparejamientos entre marcadores logrados en la etapa anterior.

La SC es un proceso que implica mucho tiempo de trabajo y para el que no hay una metodología sistemática ya que cada experto suele aplicar su propio proceso. Por lo tanto, hay un fuerte interés en el diseño de métodos automáticos que den soporte al antropólogo forense en la realización de esta tarea.

La propuesta aquí presentada se centra en la segunda etapa del proceso de superposición craneofacial, formulada por Ibáñez y colaboradores [9] como un problema de registro de imágenes (RI) [14] y abordado por medio de algoritmos evolutivos (AEs) [2].

En todos esos trabajos previos los autores no llegaron a estudiar la influencia que tiene el conjunto de marcadores proporcionados por el experto forense para guiar la superposición, sobre el emparejamiento cráneo-cara resultante, motivo de este trabajo.

Además, proponemos el uso de conjuntos difusos para modelar un nuevo tipo de marcador, marcador difuso o incierto, que permitan a los expertos forenses localizar un mayor número de puntos cefalométricos, y así evitar la coplanaridad de éstos.

1. INTRODUCCIÓN

En antropología forense, la superposición craneofacial (SC) es un proceso en el que fotografías de una persona desaparecida son comparadas con un cráneo encontrado. Proyectando este sobre una fotografía (o, incluso mejor, haciendo corresponder un modelo 3D del cráneo con la fotografía de la cara), el forense trata de determinar si se trata de la misma persona.

En [4] los autores presentan un enfoque metodológico de este proceso, identificando las siguientes tres etapas:

Este artículo se ha estructurado de la siguiente forma. La Sección 2 resume la modelización utilizada en la etapa de emparejamiento cráneo-cara, así como los aspectos más importantes del problema de coplanaridad en visión por ordenador. A continuación, en la Sección 3 se presenta un estudio experimental sobre el comportamiento de diferentes AEs cuando son guiados por un conjunto de marcadores coplanares. En la Sección 4 se presenta nuestra propuesta basada en el uso de marcadores difusos. La experimentación sobre casos de estudio reales se presenta en la Sección 5 para posteriormente, en la Sección 6, analizar los emparejamientos resultantes. Finalmente, en la Sección 7 se agrupan una serie de conclusiones y trabajos futuros.

2. PRELIMINARES

2.1. EMPAREJAMIENTO CRÁNEO-CARA

Como ya se ha mencionado, el objetivo de esta etapa es lograr una adecuada superposición del modelo 3D del cráneo sobre la fotografía de la cara de la persona desaparecida mediante el emparejamiento de pares de marcadores. En [9], los autores formularon esta tarea como un problema de optimización numérica relacionado con el registrado de imágenes (RI). De este modo, dos conjuntos de marcadores guían la búsqueda automática de los parámetros de la transformación que logre el preciso emparejamiento de dichos puntos. Esta transformación se corresponde con una proyección 3D/2D, modelada en [9] como un conjunto de operaciones geométricas, definidas por doce parámetros/incógnitas.

Formalmente, la formulación del emparejamiento cráneo-cara es la siguiente: dados dos conjuntos de marcadores faciales 2D y craneales 3D, F y C , respectivamente, ambos compuestos de N puntos, la tarea de emparejamiento trata de resolver el sistema de ecuaciones con las siguientes doce incógnitas: una rotación representada por un eje (d_x, d_y, d_z) y un ángulo (θ) , un centro de masas (r_x, r_y, r_z) , un vector de traslación (t_x, t_y, t_z) , un escalado uniforme (s) , y una función de proyección 3D/2D dada por un campo de visión (ϕ) . Estos doce parámetros determinan la transformación geométrica f que proyecta cada punto craneométrico C_i del modelo 3D sobre su correspondiente punto cefalométrico F_i en la fotografía:

$$F = f(C) = C \cdot (A \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot R_\theta \cdot D_2^{-1} \cdot D_1^{-1} \cdot A^{-1}) \cdot S \cdot T \cdot P \quad (1)$$

donde $R = (A \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot R_\theta \cdot D_2^{-1} \cdot D_1^{-1} \cdot A^{-1})$ representa una matriz de rotación para orientar el cráneo a la misma pose que tiene la cara en la fotografía. S , T , y P son las matrices de escalado uniforme, traslación, proyección perspectiva, respectivamente¹.

¹Se recomienda [7], para aquellos lectores interesados en

Por otro lado, en [9], los autores adaptaron tres AEs para resolver el problema de emparejamiento: dos variantes de un algoritmo genético (AG) de codificación real y la estrategia evolutiva CMA-ES.

La función objetivo a minimizar por estos algoritmos de búsqueda/optimización es el error medio²:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N \|f(cl^i) - fl^i\|}{N} \quad (2)$$

donde $\|\cdot\|$ es la distancia Euclídea 2D, N es el número de marcadores considerados (proporcionados por los expertos forenses), cl^i se corresponde con cada punto craneométrico 3D, mientras que fl^i hace referencia a los puntos cefalométricos 2D, f es la función que define la transformación proyectiva 3D-2D, y $f(cl^i)$ representa cada punto craneométrico cl^i una vez proyectado sobre el plano imagen/foto.

2.2. COPLANARIDAD EN VISIÓN POR ORDENADOR

El problema de emparejamiento cráneo-cara puede ser claramente relacionado con otro problema ampliamente estudiado en visión por ordenador (VO), el problema de la calibración de la cámara (CC) [6]. El propósito de la CC es estudiar la relación entre coordenadas 3D del mundo real y sus correspondientes coordenadas 2D de la imagen adquirida mediante una cámara. La mayoría de las aproximaciones de CC distinguen dos etapas:

- Determinar los *parámetros intrínsecos*: centro de proyección y distancia focal de la cámara.
- Determinar los *parámetros extrínsecos*: transformación rígida (rotación y traslación) que relaciona el sistema de coordenadas de la cámara al sistema de coordenadas del mundo real.

Dentro de los métodos más usados para determinar los conjuntos de parámetros intrínsecos y extrínsecos está la transformación lineal directa (DLT, del inglés *direct linear transformation*), propuesto originalmente por Abdel-Aziz y Karara [1]. En este método, los parámetros de la cámara se obtienen a partir de correspondencias entre pares de puntos de referencia 3D/2D.

En el problema de emparejamiento cráneo-cara no se suelen conocer los parámetros internos de la cámara con la que se tomó la fotografía de la persona desaparecida, por lo que deben ser también estimados durante una descripción más detallada de las matrices de la ecuación 1 y de su relación con las doce incógnitas del problema.

²Nótese que el error cuadrático medio se descartó debido al efecto negativo que éste tiene cuando los rangos de la imagen se normalizan entre [0,1], como es nuestro caso.

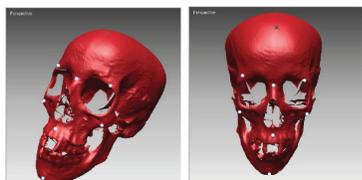


Figura 1: Poses frontal y lateral del caso sintético de cráneo humano. Los puntos craneométricos y cefalométricos se han resaltado mediante círculos blancos.

el proceso de optimización. Si bien la mayoría de los trabajos en VO que abordan el problema de CC usan puntos de referencia no coplanares, el escenario es mucho más complejo con la coplanaridad de éstos [11], situación en la que estamos más interesados. Además, no es un problema que se haya estudiado profundamente en la comunidad científica, siendo el trabajo de Tsai [13] uno de los primeros que estudió el problema en profundidad, así como uno de los más citados. En un primer paso, el método lleva a cabo una estimación lineal de los parámetros de CC. Dicha estimación se utilizará como la inicial para una segunda etapa en donde se usa una estimación no-lineal basada en el método de Levenberg-Marquardt, que hará un refinado de los parámetros³. Por contra, es bien sabido que este tipo de métodos de optimización no-lineales son muy dependientes de la inicialización siendo muy frecuente su convergencia a óptimos locales. Esta situación nos llevó a pensar nuevamente en el uso de AEs para abordar el problema de manera más robusta.

3. COPLANARIDAD EN EL EMPAREJAMIENTO

En esta sección se presenta un estudio experimental del comportamiento de un AE abordando el problema de emparejamiento cráneo-cara cuando el conjunto de marcadores proporcionados es coplanar. En particular, de entre los tres diseños evolutivos diferentes propuestos en [9] para resolver el problema, hemos optado por el AG generacional de codificación real (RCGA) con los siguientes operadores: selección por torneo, cruce binario simulado (SBX, del inglés *simulated binary crossover*) y mutación aleatoria. La función objetivo a minimizar viene dada por la Ecuación 2.

Este estudio preliminar se centra en un caso sintético. Como primera aproximación al problema de la coplanaridad, hemos preferido simplificarlo considerando el mismo objeto, es decir, el modelo 3D de cráneo y una

³Aquellos lectores interesados en una descripción más detallada del método de Tsai pueden dirigirse a http://people.csail.mit.edu/people/bkph/articles/Tsai_Revisited.pdf

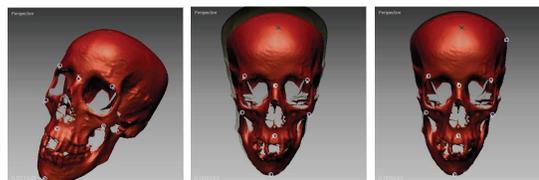


Figura 2: Mejor superposición resultante en la pose lateral (izquierda), y para la pose frontal usando siete (centro) y ocho (derecha) marcadores. Cruces y círculos indican la localización de los puntos craneométricos y cefalométricos, respectivamente.

imagen 2D del mismo. Se ha obtenido un modelo 3D, y se han considerado dos proyecciones del mismo, una rotada (lateral) y otra frontal, que se utilizarán como la imagen 2D sobre la que superponer el modelo 3D. Con respecto al conjunto de marcadores, se localizaron siete puntos craneométricos simulando el proceso seguido por los expertos forenses. Aunque dadas las características de un cráneo no es común tener un conjunto de puntos completamente coplanares, podemos tratarlo como tal por tener todos sus puntos un valor de profundidad muy similar. Los puntos cefalométricos se corresponden directamente con los puntos craneométricos proyectados sobre el plano imagen. La Figura 1 muestra las dos imágenes consideradas y el conjunto de puntos de referencia usados.

En cuanto a la pose lateral, la imagen más a la izquierda de la Figura 2 muestra el mejor resultado del RCGA con siete marcadores. Nótese que, no hay diferencias apreciables entre el modelo 3D proyectado y la imagen 2D.

El comportamiento del AE para el caso de la pose frontal y los mismos siete marcadores es bastante diferente (Figura 2, centro). La distribución casi coplanar de estos marcadores hace que el sistema de ecuaciones que rige la transformación 3D-2D sea indeterminado, y por lo tanto, no es posible encontrar una transformación que empareje adecuadamente cráneo y cara. Sin embargo, añadiendo un nuevo marcador en un plano diferente al del resto, el sistema de ecuaciones pasa a ser determinado y el AE es capaz de encontrar un mínimo global que se corresponde con un adecuado emparejamiento (Figura 2, derecha).

Teniendo en cuenta que tanto en el caso de la pose lateral como frontal ambos comparten el mismo conjunto de puntos craneométricos casi coplanares, este simple caso de estudio nos lleva a las siguientes conclusiones. El inadecuado comportamiento del procedimiento de optimización del emparejamiento cráneo-cara se debe principalmente a: i) el uso de un conjunto de puntos craneométricos coplanar o casi coplanar; y ii) el pa-

ralelismo entre el plano que contiene los puntos craneométricos y el plano imagen de la cámara.

Por tanto, para resolver estas es necesario el estudio de alternativas más robustas.

4. MARCADORES DIFUSOS PARA LA COPLANARIDAD

En el problema de SC, los expertos forenses han usado durante siglos marcadores precisos (un punto) para identificar los diferentes puntos antropométricos (craneales y faciales). Sin embargo, por culpa de oclusiones de zonas de la cara debido a la perspectiva o a la presencia de otros objetos, y también por la baja calidad/resolución/estado conservación de las fotografías, muchos de los marcadores faciales no pueden ser localizados en la fotografía. En el modelo 3D del cráneo se pueden localizar de manera precisa todos los marcadores dada la resolución de los escáneres usados.

En [8] se propone el uso de marcadores difusos para abordar el problema de la incertidumbre en la localización de marcadores faciales. Esta aproximación permite a los expertos forenses usar una figura geométrica (una elipse en el artículo) para delimitar una pequeña zona de la imagen en donde con toda seguridad se encontrará el punto fisonómico que se corresponde con el marcador. Por lo tanto, usando marcadores difusos en lugar de, o además de, marcadores precisos, los expertos pueden localizar un mayor número de marcadores con el adecuado nivel de confianza (usando marcadores difusos de diferente tamaño). Dado que los forenses son incapaces de situar un número suficiente de marcadores precisos solo en la fotografía, el uso de más marcadores faciales (difusos) eliminará la coplanaridad en el nuevo conjunto de puntos craneométricos correspondiente.

Siguiendo la idea de métricas espaciales descrita en [5], hemos usado el marco basado en conjuntos difusos propuesto en [8] para modelar los marcadores difusos y la distancia de estos a marcadores precisos.

Si bien la distancia entre un par de marcadores precisos se calcula mediante la distancia Euclídea, en el caso en el que uno de los marcadores sea difuso (conjunto de puntos), se trata de calcular la distancia de un punto x a un conjunto difuso \tilde{F} de la siguiente manera,

$$d^*(x, \tilde{F}) = \sum_{i=1}^m d_i \cdot \alpha_i / \sum_{i=1}^m \alpha_i$$

donde, $d_i = d(x, \tilde{F}_{\alpha_i})$ es la distancia del punto x al conjunto de puntos del α -corte \tilde{F}_{α_i} .

Por lo tanto, la función de objetivo a minimizar es la que se muestra en la Ecuación 2):

$$fuzzy ME = \frac{\sum_{i=1}^N d^*(f(cl^i), \tilde{F}^i)}{N} \quad (3)$$

donde N es el número de marcadores considerados, cl^i se corresponde con cada punto 3D craneométrico, f es la función de transformación 3D-2D, $f(cl^i)$ representa la posición de los puntos craneométricos cl^i una vez han sido proyectados al plano imagen, es decir, un único punto. \tilde{F}^i representa el conjunto difuso correspondiente a cada marcador difuso.

5. EXPERIMENTACIÓN

En la Sección 5.1 se presenta el diseño experimental seguido. En las Secciones 5.2 y 5.3 se analizan los resultados en dos casos de estudio reales, donde la pose que tiene la persona desaparecida en la fotografía es frontal.

5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El primer caso de estudio real tuvo lugar en Cádiz. La familia de la desaparecida proporcionó una fotografía⁴. La pose de la cara es casi frontal y el correspondiente conjunto de marcadores es casi coplanar. El segundo caso de estudio real tuvo lugar en Granada. En este caso sólo se dispone de una imagen de la cara de la desaparecida, también en una pose casi frontal. Para la adquisición de los modelos 3D del cráneo se utilizó el laser-escáner VI-910 de Konica-Minolta.

Los expertos forenses nos proporcionaron dos conjuntos de marcadores distintos por cada caso de estudio. El primero compuesto por puntos precisos (sólo aquellos marcadores cuya localización es precisa) y el segundo compuesto por puntos difusos (elipses de tamaño y orientación variable). Es importante destacar que el uso de marcadores difusos permitió que los expertos fueran capaces de localizar más marcadores.

En todos los experimentos se utilizó la mejor configuración de parámetros del RCGA, según [9]: número de generaciones = 600, tamaño de población = 1,000, parámetros η del SBX = 1, probabilidad de mutación = 0.2, probabilidad de cruce = 0.9, y tamaño de torneo = 2. Para todas las pruebas se consideraron 30 ejecuciones del algoritmo. Para conjuntos de marcadores precisos, la función de evaluación viene dada por la Ecuación 2. En el caso de conjuntos de marcadores difusos, la función de evaluación es la definida en la Ecuación 3.

⁴Por motivos legales ésta ha sido procesada.



Figura 3: Caso de estudio 1. modelo 3D del cráneo (izquierda) y fotografía de la persona desaparecida con marcadores precisos (izquierda) y difusos (derecha).



Figura 4: Caso de estudio 1. Mejores resultados de emparejamiento cráneo-cara usando nueve marcadores precisos (izquierda) y catorce difusos (derecha).

5.2. CASO DE ESTUDIO 1

En este primer caso (Figura 3), los antropólogos identificaron nueve y catorce marcadores siguiendo un enfoque preciso y difuso, respectivamente. Estos marcadores adicionales juegan un rol esencial a la hora de resolver el problema de la coplanaridad ya que, sus correspondientes puntos craneométricos (como por ejemplo el marcador más elevado), se sitúan en un plano que no es paralelo al plano imagen de la cámara.

Para poder realizar una comparativa visual, en la Figura 4 se muestra el mejor resultado usando marcadores precisos y difusos.

5.3. CASO DE ESTUDIO 2

En este segundo caso de estudio real, la única fotografía disponible es la que aparece en el pasaporte (Figura 5). Como es normal en los pasaportes, incluye un sello de agua que hace más difícil aún una localización precisa de puntos cefalométricos. Por lo tanto, el uso de marcadores difusos puede ayudar a localizar un mayor número de marcadores faciales. De hecho, si bien los expertos forenses sólo localizaron seis marcadores de manera precisa, fueron capaces de identificar dieciséis marcadores difusos (Figura 5).

La Figura 6 muestra la mejor solución encontrada para ambas aproximaciones.



Figura 5: Caso de estudio 2. Modelo 3D del cráneo (izquierda) y fotografía de la desaparecida con puntos cefalométricos precisos (centro) y difusos (derecha).

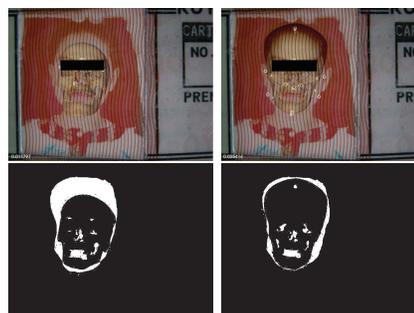


Figura 6: Caso de estudio 2. Fila superior. Mejor emparejamiento con marcadores precisos (izquierda) y difusos (derecha). Fila inferior. Imagen binaria resultante de aplicar el operador XOR sobre las imágenes del mejor emparejamiento, usando marcadores precisos (izquierda) y difusos (derecha).

6. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta resultados cualitativos, es decir, analizando visualmente los emparejamientos cráneo-cara obtenidos, se identifica claramente la mejora en el proceso de emparejamiento cuando se incluye el uso de marcadores difusos (Figuras 4 y 6). El equipo de antropólogos forenses confirmaron que los resultados obtenidos eran suficientemente buenos para poder usarlos en la última etapa del proceso de SC.

Dado que no es posible una comparación cuantitativa de la calidad de los emparejamientos cráneo-cara en base a los valores de la función objetivo (diferente en cada caso), se diseñó un nuevo método que posibilita un análisis cuantitativo más en correspondencia con lo que los expertos forenses consideran un buen emparejamiento. Para ello, los antropólogos forenses segmentaron manualmente el contorno de la cara en la fotografía. A continuación, se obtiene una imagen binaria tanto de los bordes de la cara como del cráneo, una vez proyectado. Después, se aplica el operador lógico XOR considerando las dos imágenes binarias resultantes en el paso anterior. Finalmente, el error asociado a un emparejamiento cráneo-cara se calcula como el

porcentaje del contorno de la cara que no es cubierto por el área que ocupa el cráneo proyectado. Por ejemplo, la Figura 6 muestra el resultado de aplicar el operador XOR sobre la mejor superposición del segundo caso de estudio. El error obtenido para los dos casos de estudio puede verse en la Tabla 1. Hay que tener en cuenta que, si bien este método posibilita una comparativa cuantitativa, esta está ligada al proceso de valoración subjetiva del forense.

Tabla 1: Error de desviación del área de los mejores emparejamientos cráneo-cara mediante las dos aproximaciones estudiadas.

Tipo de Marcadores	Caso 1	Caso 2
Precisos	49,18 %	48,03 %
Difusos	24,17 %	41,35 %

7. CONCLUSIONES

Hemos propuesto el uso de marcadores difusos para abordar el problema de la coplanaridad en el emparejamiento cráneo-cara. Se han probado los beneficios del uso de este tipo de marcadores en comparación con los tradicionales precisos. Los resultados muestran como mediante el uso de marcadores difusos se elimina la coplanaridad del conjunto de marcadores, posibilitando la obtención de emparejamientos adecuados.

Como única desventaja, el uso de marcadores difusos, y en concreto el cálculo de distancias entre puntos difusos y precisos, conlleva un mayor tiempo de cómputo del AG: de los 20-40" por ejecución en el caso de usar marcadores precisos a los 2-4' para el caso difuso. Sin embargo, este tiempo es todavía significativamente mucho menor que el empleado por los expertos forenses a la hora de realizar la misma tarea de manera manual, en la cual pueden llegar a invertir 24 horas por cada caso de estudio.

Por otro lado, estos resultados tienen que ser confirmados en un estudio más extensivo, con un mayor número de casos y usando otras definiciones para distancias entre un punto y un conjunto difuso [3].

Finalmente, planeamos abordar la última etapa del proceso de superposición, es decir la etapa de ayuda a la toma de decisiones, mediante el uso de lógica difusa.

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente soportado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (ref. TIN2009-07727) y la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía (ref. TIC1619), incluyendo fondos FEDER.

Referencias

- [1] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pages 1–18, 1971.
- [2] T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz, editors. *Handbook of Evolutionary Computation*. IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997.
- [3] I. Bloch. On fuzzy distances and their use in image processing under imprecision. *Pattern Recognition*, 32:1873–1895, 1999.
- [4] S. Damas, O. Cordón, O. Ibáñez, J. Santamaría, I. Alemán, F. Navarro, and M. Botella. Forensic identification by computer-aided craniofacial superimposition: a survey. Technical report, European Centre for Soft Computing, Mieres, Spain.
- [5] P. Diamond and P. Kloeden. Metric topology of fuzzy numbers and fuzzy analysis. In D. Dubois and H. Prade, editors, *Fundamentals of Fuzzy Sets*, The Handbooks of Fuzzy Sets, chapter 11, pages 583–637. Kluwer Academic, 2000.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2000.
- [7] D. Hearn and M. Pauline Baker. *Computer graphics (2nd ed.): C version*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.
- [8] L. Ibáñez, O. Cordón, S. Damas, S. Guadarrama, and J. Santamaría. A new approach to fuzzy location of cephalometric landmarks in craniofacial superimposition. In *Proceeding of the IFSA/EUFLAT Conference*, pages 195–201, 2009.
- [9] O. Ibáñez, L. Ballerini, O. Cordón, S. Damas, and J. Santamaría. An experimental study on the applicability of evolutionary algorithms to craniofacial superimposition in forensic identification. *Information Sciences*, 179:3998–4028, 2009.
- [10] M. Y. Iscan. Introduction to techniques for photographic comparison. In M. Y. Iscan and R. Helmer, editors, *Forensic Analysis of the Skull*, pages 57–90. Wiley, 1993.
- [11] J. Salvi, X. Armangué, and J. Batlle. Algorithms for coplanar camera calibration. *Machine Vision and Applications*, 12:84–97, 2000.
- [12] J. Santamaría, O. Cordón, S. Damas, J. M. García-Torres, and A. Quirin. Performance evaluation of memetic approaches in 3D reconstruction of forensic objects. *Soft Computing*, in press (2008), 13(8-9):883–904, 2009.
- [13] R.Y. Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 364–374, 1986.
- [14] B. Zitova and J. Flusser. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 21:977–1000, 2003.