

## Registrado 3D-2D para el solapamiento cráneo-cara en superposición craneofacial mediante CMA-ES\*

Jose Santamaría	Oscar Cordon	Sergio Damas	Oscar Ibáñez
Dept. de Informática	European Centre for	European Centre for	European Centre for
Universidad de Jaén	Soft Computing	Soft Computing	Soft Computing
Campus Linares	Edif. Cient.-Tecnológico	Edif. Cient.-Tecnológico	Edif. Cient.-Tecnológico
23700 Linares	33600 Mieres	33600 Mieres	33600 Mieres
jslopez@ujaen.es	{oscar.cordon,	sergio.damas,	oscar.ibanez}@softcomputing.es

### Resumen

La superposición craneofacial es una técnica de forense cuyo objetivo es identificar una persona desaparecida a partir de una fotografía del desaparecido y el cráneo encontrado. Una de las tareas cruciales en este proceso consiste en el solapamiento cráneo-cara normalmente llevado a cabo por los antropólogos manualmente lo que hace que sea un proceso que les lleva mucho tiempo y que presenta diversas dificultades cuando se trata de hallar el mejor encaje del modelo 3D del cráneo y la fotografía 2D de la cara.

En esta contribución abordamos el solapamiento cráneo-cara como un problema de registrado 3D-2D mediante la estrategia de evolución de adaptación de la matriz de covarianza (CMA-ES). Para evaluar nuestra propuesta presentamos varios superposiciones correspondientes a casos de identificación reales resueltos por el Laboratorio de Antropología Forense de la Universidad de Granada.

### 1. Introducción

La medicina forense es la disciplina que aborda la identificación de personas, ya sean vivas o fallecidas. Dentro de la medicina forense, hallamos diferentes especialidades. En

particular, la antropología forense aborda la identificación de personas basándose en el estudio de los restos del esqueleto y su entorno. Ello supone que, a partir del esqueleto, se identifiquen tanto las características físicas de la víctima como de la causa y manera de la muerte. Una definición más formal puede ser “la antropología forense estudia las cuestiones medico-legales relativas a la persona fallecida mediante el examen de los restos de su esqueleto tratándose, entre otros objetivos, de determinar la identidad de la persona y la causa y manera de su muerte” [1].

La *superposición craneofacial* (SC) [2, 3] es una técnica forense en la que fotografías (o fotogramas de vídeo) de la persona desaparecida se comparan con el cráneo encontrado. Proyectando una fotografía del cráneo sobre la de la persona desaparecida, el antropólogo trata de determinar si ese cráneo corresponde a esa persona desaparecida. Si se dispone de un escáner láser de rangos, el experto forense trata de orientar manualmente el modelo 3D del cráneo para alcanzar la misma pose de la persona desaparecida en la fotografía disponible.

Para ello, se precisa en primer lugar un modelo preciso del cráneo [4]. Los expertos forenses seleccionan ciertos puntos de referencia faciales en la fotografía y otros en el modelo 3D del cráneo. A continuación, se considera el emparejamiento de los mismo para guiar la superposición del modelo 3D sobre la fotografía, a partir de la cual tomar una decisión

\*Este trabajo está soportado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. TIN2009-07727), incluyendo fondos FEDER.

de identificación. Sorprendentemente, hasta la fecha no se ha usado ningún método automático en aplicaciones prácticas a pesar del alto número de casos examinados en este problema que consume tanto tiempo. Por ello, los expertos forenses demandan métodos automáticos y rápidos que aborden el proceso de SC. En este trabajo, afrontamos el problema de solapamiento cráneo-cara. En particular, nuestro objetivo es formular dicho problema como un problema de registro 3D-2D de imágenes (RI) [5]. Entonces, nuestro propósito es abordar el RI diseñando un algoritmo evolutivo (AE) [6] basado en la estrategia de evolución CMA-ES [7] que hoy es el estado del arte en optimización con codificación real.

La estructura de esta contribución es la siguiente. La Sección 2 introduce aspectos básicos de solapamiento cráneo-cara. La formulación del problema de identificación se detalla en la Sección 3. La Sección 4 describe el AE basado en CMA-ES para abordar el problema de solapamiento cráneo-cara. A continuación, la Sección 5 presenta los resultados obtenidos considerando casos de identificación reales. Por último, la Sección 6 recoge las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Solapamiento cráneo-cara y registro de imágenes

El solapamiento cráneo-cara (SCC) es una de las tareas a las que el experto forense dedica más tiempo. Además, no hay una metodología sistemática sino que cada experto normalmente aplica un proceso particular. Por tanto, hay un gran interés en el diseño de métodos automáticos que ayuden al antropólogo a llevarlos a la práctica.

Contribuciones recientes confirman que ciertos autores piensan que el método más avanzado se basa en el solapamiento digital mediante el uso de Adobe Photoshop<sup>®</sup> y Corel Draw<sup>®</sup>, así como las herramientas proporcionadas por estos paquetes software [8]. Sin embargo, los métodos que usan no son automáticos puesto que, usando una técnica de ensayo y error, cambian el tamaño, desplazan o rotan las imágenes. Dando lugar por tanto a un proceso que

consume mucho tiempo y propenso al error. De hecho, el experto forense podría tardar hasta 24 horas en cada caso de identificación.

Por otro lado, el RI es una tarea fundamental en procesamiento de imágenes [5]. Su objetivo es hallar una correspondencia (o transformación) entre dos o más imágenes tomadas en condiciones diferentes, esto es, en instantes distintos, desde diferentes puntos de vista, usando diversos sensores o una combinación de estos factores. El RI se ha estudiado en profundidad en problemas de imagen médica [9, 10]. La idea central del proceso de RI es estimar la transformación que coloca las imágenes (habitualmente llamadas escena y modelo) en un sistema de coordenadas común, poniendo los puntos tan juntos como es posible. Esto se consigue siguiendo un proceso de optimización que pretende minimizar el error dado por una métrica de similitud (ver figura 1). Los AEs [6] se han aplicado con éxito para aplicar diversos problemas de RI [4, 11, 12, 13, 14].

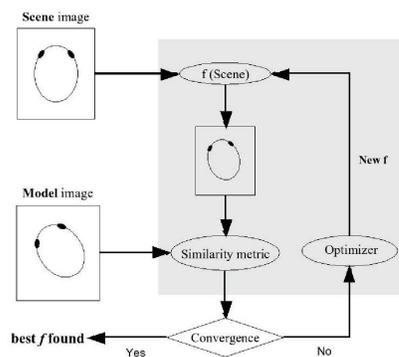


Figura 1: El procedimiento de RI.  $f$  es la transformación geométrica que trata de superponer las imágenes escena y modelo

## 3. Formulación del problema

Dados dos conjuntos de puntos de referencia 2D faciales y 3D craneales,  $F$  y  $C$  respectivamente, cada uno de los cuales contiene  $N$  puntos:

$$F = \begin{bmatrix} x_{f1} & y_{f1} & 1 & 1 \\ x_{f2} & y_{f2} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{fN} & y_{fN} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} x_{c1} & y_{c1} & z_{c1} & 1 \\ x_{c2} & y_{c2} & z_{c2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{cN} & y_{cN} & z_{cN} & 1 \end{bmatrix}$$

nuestro objetivo es resolver el siguiente sistema de ecuaciones con doce incógnitas: una rotación representada mediante un eje ( $d_x, d_y, d_z$ ) y un ángulo ( $\theta$ ), un centro de masas ( $r_x, r_y, r_z$ ), un vector de traslación ( $t_x, t_y, t_z$ ), un cambio de escala uniforme ( $s$ ) y una proyección 3D/2D dada por un campo de visión (*field of view*) ( $\phi$ ). Estos doce parámetros determinan la transformación geométrica<sup>1</sup>  $f$  que proyecta cada punto de referencia del modelo 3D del cráneo  $C_i$  sobre su correspondiente punto 2D facial  $F_i$  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 en la misma pose que la de la fotografía. Tal rotación implica una serie de transformaciones geométricas ( $A \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot R_\theta$ ) para:

- Trasladar el cráneo para alinear el origen de coordenadas con el eje de rotación( $A$ ).
- Reorientar el cráneo de forma que el eje de rotación coincida con uno de los ejes cartesianos ( $D_1$  and  $D_2$ ).
- Llevar a cabo la rotación dada por  $R_\theta$ .
- Usar las matrices de rotación inversas en el orden opuesto para llevar el eje de rotación a su orientación inicial ( $D_2^{-1}, D_1^{-1}, A^{-1}$ ).

<sup>1</sup>El lector interesado puede consultar [15] donde se da una descripción detallada de las matrices de la Ecuación 1 y su relación con las doce incógnitas del problema.

- Aplicar la matriz de traslación inversa para dejar el cráneo rotado en su localización original.

$S$ ,  $T$  y  $P$  son matrices de cambio de escala uniforme, traslación y proyección perspectiva, respectivamente.

Para delimitar los rangos factibles en los que estos doce parámetros tomarán valores, primero orientamos el modelo 3D del cráneo hacia el eje de la cámara. Es evidente que sólo estamos interesados en aquellas transformaciones que nos proporcionen una visión del cráneo cercana a la frontal. Por tanto, calculamos el centroide,  $Z$ , de cuatro puntos de referencia no coplanares,  $C_j$  ( $j \in \{1, \dots, 4\}$ ), para estimar la orientación actual del cráneo y para rotarlo adecuadamente hacia una vista frontal. También usamos la distancia máxima,  $r$ , desde  $Z$  al punto más lejano de los cuatro señalados ( $r = \|Z - C_j\|$ ,  $j = \{1, \dots, 4\}$ ) para la estimación adecuada de los rangos válidos de los valores de los doce parámetros de la siguiente forma:

$$\begin{array}{ll} r_i & \in [Z_i - r, Z_i + r], i \in \{x, y, z\} \\ d_x, d_y & \in [-1, 1] \\ d_z & \in [0, 1] \\ \theta & \in [-45^\circ, 45^\circ] \\ s & \in [0, 25, 2] \\ \phi & \in [10^\circ, 150^\circ] \\ t_x & \in [-length_{FB} - (Z_x + r), \\ & \quad length_{FB} - (Z_x - r)] \\ t_y & \in [-length_{FB} - (Z_y + r), \\ & \quad length_{FB} - (Z_y - r)] \\ t_z & \in [PCC - (Z_z + r), PCL - (Z_z - r)] \end{array}$$

donde  $PCL$  y  $PCC$  son los planos de corte lejano y cercano, respectivamente;  $length_{FB}$  es la longitud de la base del frustum; y

$$length_{FB} = 1 + FCP * \tan\left(\frac{\phi_{max}}{2}\right)$$

#### 4. Registrado 3D-2D mediante CMA-ES

CMA-ES [7] se considera el estado del arte en AEs con codificación real [16]. De forma similar a los métodos quasi-Newton, CMA-ES es un enfoque de segundo orden que estima

una matriz definida positiva dentro de un procedimiento iterativo. Por tanto, el método es adecuado para problemas no separables y/o mal condicionados, como es nuestro caso. Este algoritmo de optimización es una avanzada estrategia de evolución  $(\mu - \lambda)$  [6] que actualiza la matriz de covarianza de la distribución de mutación normal multivariada.

Con el fin de guiar el proceso de optimización de CMA-ES, se define una función objetivo que se adapta al problema que se pretende abordar. En el SCC dicha función corresponde a la métrica de similitud que evalúa la transformación proyectiva codificada en una solución en particular. Por tanto, dados  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$  y  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ , dos conjuntos de puntos de referencia 3D y 2D, respectivamente, proponemos la minimización de la siguiente función objetivo:

$$fitness = \beta_1 \cdot MSE + \hat{w} \cdot \beta_2 \cdot MAX \quad (2)$$

where:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N \|f(C_i) - F_i\|^2}{N} \quad (3)$$

and

$$MAX = MAX_{i=1}^N \|f(C_i) - F_i\|^2 \quad (4)$$

siendo  $f(C_i)$  las localizaciones de los puntos de referencia 3D  $C_i$  una vez que han sido transformados espacialmente y proyectados en la imagen 2D.

El factor de escala  $\hat{w}$  (usado cuando  $\beta_1 \neq 0$  y  $\beta_2 \neq 0$ ) se obtiene promediando la proporción entre MSE y MAX (notado por  $w_{S_i}$ ) para cada individuo  $S_i$  de la población inicial ( $P_0$ ):

$$\hat{w} = \frac{\sum_{i=1}^M w_{S_i}}{M} \quad (5)$$

donde  $w_{S_i} = MSE(S_i)/MAX(S_i)$  y  $M$  es el tamaño de la población inicial.

## 5. Experimentos

Consideramos cinco casos reales de identificación de mujeres desaparecidas resueltos por

el Laboratorio de Antropología Física de la Universidad de Granada en colaboración con la policía científica. Los expertos antropólogos nos facilitaron un modelo 3D del cráneo y una fotografía de cada caso para automatizar el proceso de SCC. La figura 2 muestra las fotografías disponibles. El cuadro 1 incluye sus correspondientes dimensiones y el número de puntos de referencia (N) identificados por los antropólogos.



Figura 2: Cinco imágenes de casos reales de identificación de mujeres desaparecidas

Cuadro 1: Dimensiones de la imagen y número de puntos de referencia (N) de cada caso de identificación

	Dimensión	N
Caso 1	768x1179	8
Caso 2	744x1149	12
Caso 3	744x1147	9
Caso 4	747x1144	11
Caso 5	290x371	6

### 5.1. Ajuste de parámetros

Después de llevar a cabo una experimentación preliminar, consideramos los siguientes valores como los más adecuados para los parámetros de CMA-ES:

$N^{\circ}$ evaluations	=	552,000
M soluciones iniciales	=	100
$\sigma$ inicial	=	0,01
$\lambda$	=	100
$\mu$	=	15
$\beta_1$	=	0,5
$\beta_2$	=	0,5

### 5.2. Análisis de resultados

El cuadro 2 muestra los resultados cuantitativos correspondientes a la función objetivo (ver Eq. 2) alcanzados por CMA-ES. Se consideraron 30 ejecuciones diferentes en cada problema de SCC para evitar el problema de la dependencia en la ejecución.

Los mejores resultados demuestran el buen rendimiento de CMA-ES abordando cada problema de SCC. Asimismo, la robustez de nuestra propuesta queda reflejada por los bajos valores de desviación típica obtenidos. Nótese que estos buenos resultados sólo son posibles cuando se pueden localizar de forma precisa tanto los puntos de referencia faciales y craneales en la fotografía y en el modelo 3D del cráneo, respectivamente.

Otro objetivo de esta sección es evaluar los resultados de SCC alcanzados por nuestra propuesta en comparación con los realizados de

Cuadro 2: Resultados de SCC obtenidos a partir de las treinta ejecuciones independientes

	Mejor	Peor	Media	Desv. Típica
Caso 1	0.021	0.036	0.023	0.005
Caso 2	0.062	0.067	0.063	0.002
Caso 3	0.013	0.014	0.013	0.000
Caso 4	0.032	0.062	0.034	0.008
Caso 5	0.010	0.010	0.010	0.000

forma manual por los expertos forenses para los citados casos. El procedimiento de comparación establecido puede basarse fundamentalmente en dos aspectos: la calidad de los solapamientos y el tiempo empleado para obtenerlos.

Con el fin de analizar la competitividad respecto al humano relativa a la calidad de los solapamientos, primero debemos mencionar que aunque comparar dos resultados gráficos es siempre una tarea subjetiva, podemos beneficiarnos del hecho de que contamos con un equipo de forenses con una larga experiencia que puede validar nuestros resultados.

Debido a limitaciones de espacio, sólo presentamos los solapamientos gráficos correspondientes a los primeros dos casos de identificación considerados. Las imágenes en la parte izquierda de la figura 3 muestran los solapamientos manuales llevados a cabo por los expertos forenses de la Universidad de Granada. Las imágenes de la parte derecha de la misma figura recogen los mejores solapamientos alcanzados por CMA-ES. Incluso un lector no experto puede reconocer directamente la gran similitud entre los dos solapamientos de la parte superior de la figura 3, que presentan exactamente la misma pose. Nótese como nuestro solapamiento alcanza un mejor ajuste de la parte superior de la cabeza gracias a un mejor tratamiento de la transformación perspectiva. Ese hecho lo confirmaron también los expertos forenses que prefirieron nuestro solapamiento al suyo. Finalmente, el resultado más destacable fue el relacionado con el segun-



Figura 3: De izquierda a derecha: mejores solapamientos cráneo-cara obtenidos por los expertos forenses y por el algoritmo CMA-ES

do caso de estudio. La imagen inferior izquierda de la figura 3 muestra el solapamiento que los expertos forenses consiguieron cuando resolvieron este caso. Como puede verse, aunque son capaces de ajustar el eje frontal (ver el alineamiento adecuado de la mandíbula y de las cuencas oculares), el cráneo está mucho más reducido de lo deseable y las partes superior y derecha de la cara no se ajustan bien<sup>2</sup>. Esta es una consecuencia de las limitaciones

<sup>2</sup>Este exceso en la reducción del tamaño del cráneo era la única alternativa que tenían los expertos forenses para conseguir el mejor ajuste manual del eje frontal

del software considerado por los forenses, incluso más palpable que en el caso anterior. Por esa razón, esta segunda fotografía fue finalmente ignorada para la identificación. Sin embargo, podemos valorar la gran calidad del solapamiento basado en CMA-ES, mostrado en la imagen inferior derecha de la figura 3. No sólo el eje frontal sino también las partes exteriores de la cara (la frente y la mejilla derecha) están correctamente alineadas, gracias a un manejo mejor de la proyección perspectiva. De hecho, el software comercial usado por los antropólogos para llevar a cabo los solapamientos manuales sólo permite rotaciones 3D, traslaciones

y cambios de escala uniformes. Los expertos forenses se sorprendieron gratamente con la calidad del solapamiento automático.

Respecto al tiempo de ejecución, el tiempo medio de una ejecución de CMA-ES oscila entre los 15 y 17 segundos cuando se llevan a cabo las 552,000 evaluaciones consideradas. Comparando estos tiempos con el tiempo que precisa un experto forense para llevar a cabo las identificaciones citadas (alrededor de 24 horas por caso) el enfoque evolutivo es siempre mucho mejor, inferior en varios órdenes de magnitud.

## 6. Conclusiones

Los algoritmos evolutivos se están aplicando de forma creciente a complejos problemas reales y están siendo cada vez más competitivos respecto a los resultados obtenidos por personas expertas. En esta contribución hemos propuesto y validado el uso de un algoritmo evolutivo avanzado con codificación real para la etapa de SCC del problema de SC para la identificación forense. Con este objetivo, hemos diseñado un algoritmo CMA-ES. El método propuesto es rápido (siempre consume menos de 18 segundos), robusto y totalmente automático y, por tanto, muy útil para resolver una de las actividades más tediosas llevado a cabo por los antropólogos forenses pues requiere alrededor de 24 horas de su tiempo por cada caso.

Sin embargo, los resultados obtenidos provienen de un estudio experimental preliminar con, posiblemente, demasiados pocos casos de identificación reales. Por tanto, planeamos extender este trabajo con una experimentación más amplia (más casos reales, probando diferentes rangos de valores para los parámetros de CMA-ES y factores de peso de la función objetivo, entre otros) a fin de confirmar estos primeros resultados y explorar nuevas líneas de investigación.

## Referencias

- [1] *Amnesty International Manual*, 1994.
- [2] W. M. Krogman and M. Y. Iscan, *The human skeleton in forensic medicine*. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1986, 2nd edition.
- [3] M. Y. Iscan, "Introduction to techniques for photographic comparison," in *Forensic Analysis of the Skull*, M. Y. Iscan and R. Helmer, Eds. Wiley, 1993, pp. 57–90.
- [4] J. Santamaría, O. Cordón, S. Damas, J. García-Torres, and A. Quirin, "Performance evaluation of memetic approaches in 3D reconstruction of forensic objects," *Soft Computing*, vol. 13, no. 8-9, pp. 883–904, 2009.
- [5] B. Zitova and J. Flusser, "Image registration methods: a survey," *Image and Vision Computing*, vol. 21, pp. 977–1000, 2003.
- [6] T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz, Eds., *Handbook of Evolutionary Computation*. IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997.
- [7] N. Hansen and A. Ostermeier, "Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies," *Evolutionary Computation*, vol. 9, no. 2, pp. 159–195, 2001.
- [8] S. Al-Amad, M. McCullough, J. Graham, J. Clement, and A. Hill, "Craniofacial identification by computer-mediated superimposition," *Journal Of Forensic Odontostomatology*, vol. 24, pp. 47–52, 2006.
- [9] P. Viola and W. M. Wells, III, "Alignment by maximization of mutual information," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, 1995, pp. 16–23.
- [10] H. Zhou, T. Liu, Y. Pang, F. Lin, J. Wu, and J. Wu, "Towards efficient registration of medical images," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 31, no. 6, pp. 374–382, 2007.
- [11] P. Chalermwat and T. A. El-Ghazawi, "Multi-Resolution Image Registration Using Genetics," in *International Conference on Image Processing, ICIP'99*, 1999, pp. 452–456.

- [12] L. Silva, O. Bellon, and K. Boyer, "Range image registration using enhanced genetic algorithms," in *International Conference on Image Processing, ICIP'03*, 2003, pp. 711–714.
- [13] O. Cordón, S. Damas, and J. Santamaría, "Feature-based image registration by means of the CHC evolutionary algorithm," *Image and Vision Computing*, vol. 24, no. 5, pp. 525–533, 2006.
- [14] O. Cordón, S. Damas, and J. Santamaría, "A Fast and Accurate Approach for 3D Image Registration using the Scatter Search Evolutionary Algorithm," *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 11, pp. 1191–1200, 2006.
- [15] D. Hearn and M. P. Baker, *Computer graphics (2nd ed.): C version*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [16] S. García, D. Molina, M. Lozano, and F. Herrera, "A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: A case study on the cec'2005 special session on real parameter optimization," *Journal of Heuristics*, vol. 15, pp. 617–644, 2009.