

Ajuste de Objetos 3D Mediante Parches NURBS Optimizados con Estrategias Evolutivas

3D Objects Fit by NURBS Patches with Optimized Evolutionary Strategies

Sandra Mateus S., MSc. ¹, John W. Branch B., PhD. ²

¹Institución Universitaria de Envigado, Colombia
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín
spmateus@iue.edu.co, jwbranch@unalmed.edu.co

Recibido para revisión 28 de Noviembre de 2007, aceptado 14 de Febrero de 2008, versión final 28 de Febrero de 2008

Resumen—Este artículo presenta un método para ajustar objetos 3D con parches NURBS (B-Splines Racionales No Uniformes), los cuales son optimizados mediante una Estrategia Evolutiva (EE), la cual determina los pesos de los puntos de control en tales parches, sin modificar la ubicación de los puntos muestreados de la superficie original, de manera que se reduzca el error en el ajuste de las NURBS sin alterar la geometría de la superficie del objeto real.

Palabras Clave—Ajuste, NURBS, Estrategias Evolutivas.

Abstract—This article presents a method to fit 3D objects with patches NURBS (Non Uniform Rational B-Splines), which are optimized by means of Evolutionary Strategies (ES), which they determine the weights of the control points of surface NURBS, without modifying the location of the sampled points of the original surface, so that the error in the fit of the NURBS is reduced without altering the geometry of the surface of the real object.

Keywords—Fit, NURBS, Evolutionary Strategies.

I. INTRODUCCIÓN

Reconstruir un objeto tridimensional, se refiere a obtener su representación en la memoria de un computador, manteniendo sus características de volumen y forma, partiendo de un conjunto discreto de puntos muestreados a partir de su superficie. La reconstrucción tridimensional es una tarea no trivial que en general involucra cinco etapas tales como: adquisición, registro, integración, segmentación y ajuste, siendo esta última la que proporciona el modelo computacional del objeto representado.

Una de las fases más importantes del proceso de reconstrucción

3D es el ajuste de superficies, dado que es en ésta, donde finalmente se obtiene el modelo matemático o representación computacional del objeto real. Existen muchos métodos que se pueden emplear para modelar superficies de objetos 3D, el ajuste por mallas triangulares [2] y por superficies NURBS, son algunos de ellos.

Las NURBS se han convertido en un estándar en los sistemas modernos CAD/CAM, por su maleabilidad y propiedades de modificación local de las superficies. A pesar de sus ventajas, las NURBS poseen inconvenientes como: la restricción de topología rectangular y la dificultad de representación de detalles finos [3].

En este artículo, se presenta una metodología para optimizar los pesos de los puntos de control de parches NURBS, mediante Estrategias Evolutivas. Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II, se presenta la revisión de la literatura; en la sección III, se explica la optimización de los parches NURBS; en la sección IV, se detallan los resultados y en la sección V se muestran las conclusiones.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En 1996, Eck y Hoppe [10] presentaron la primera solución al problema de ajuste de superficies B-spline sobre superficies de topología arbitraria a partir de puntos dispersos no ordenados. El método construía una parametrización inicial sobre una malla generada sobre los puntos de datos, sobre la que construía una base triangular que era necesario reparametrizar para construir un dominio cuadrilateral. Sobre el dominio cuadrilateral se realizaba el ajuste de parches B-Spline con grado de continuidad G^1 entre ellos. El paso final consistía de un costoso proceso de

refinamiento adaptativo de la malla para reducir el error de ajuste del parche a una tolerancia especificada por el usuario. Este método aunque efectivo, resulta ser muy complicado por la cantidad de pasos y procesos a los que se dan lugar para construir la red parches B-Spline sobre la superficie de ajuste.

También en 1996, Krishnamurthy y Levoy [6] presentó un nuevo enfoque para ajustar parches de superficies NURBS sobre puntos dispersos. El método consistía en construir una malla poligonal sobre el conjunto de puntos; sobre dicha malla se realizaba un re-muestreo para genera una malla regular sobre la que se pudieran ajustar parches de superficies NURBS. El método tenía un desempeño pobre al operar sobre superficies complejas. Otros inconvenientes del método eran la imposibilidad de aplicarse sobre superficies con presencia de huecos y la dificultad subyacente del mantenimiento de la continuidad entre los parches de superficies NURBS.

En 1999, Park y Sang [7] propusieron un algoritmo de dos fases, en cuya fase inicial se realiza un agrupamiento de los puntos mediante el algoritmo k-means; una vez establecido los grupos, se construye una malla poliedral sobre cada una de estas para luego reducirla a malla triangular, la cual a su vez se convertirá en una malla de cuadriláteros. En la segunda fase, el modelo inicial es representado en un grafo que se utiliza para construir una red de parches NURBS con continuidad G^1 sobre la totalidad de la superficie del objeto. La propuesta de Park asume que la nube de puntos que se está ajustando es cerrada, de manera que siempre se pueda construir el modelo cuadrilateral que da lugar a la red de parches NURBS. Lo anterior implica que el método propuesto, en general no es aplicable sobre superficies abiertas. El empleo de parches NURBS implica un procesamiento adicional para efectos de mantener la continuidad de los mismos, lo cual vuelve el método costoso computacionalmente, incluso en los que la regularidad de la superficie no lo requiere.

Una nueva propuesta es presentada por Gregorski [4]. El algoritmo propuesto descompone un conjunto de puntos dados, en una estructura de datos similar a un quad-tree, conocida como strip-tree. El strip-tree es usado para ajustar un conjunto de superficies cuadráticas de mínimos cuadrados a los puntos de datos. A las superficies cuadráticas se les realiza una elevación de grado a superficies bi-cúbicas, y se mezclan para formar un conjunto de superficies B-Spline que aproximan el conjunto de puntos dado. Esta propuesta no se puede aplicar a superficies cerradas, ni superficies que se "curven" sobre si misma. La propuesta presenta una complejidad alta dado que debe realizar elevación de grado y unión de parches en parches B-spline, al tiempo que un grado de continuidad C^1 se debe mantener entre parches adyacentes. Al igual que con la propuesta de Park, ésta realiza un procedimiento complicado innecesario en algunos casos, como por ejemplo, al ajustar superficies regulares suaves.

Samareh [8], presenta una técnica para triangulación de

superficies NURBS. Esta técnica es construida con la combinación de proyecciones de puntos de rejillas y ha sido satisfactoriamente implementada para rejillas estructuradas y no estructuradas. En este método, inicialmente las superficies NURBS son aproximadas por un pequeño número de parches bilineales; luego, la rejilla es generada en éstos parches bilineales y finalmente la rejilla se proyecta sobre las superficies NURBS. Esta técnica presenta muy buenos resultados, pero presenta restricciones en cuanto al manejo de curvaturas, ya que ha sido implementado con objetos 3D pero con bajo nivel de curvatura.

Kahlesz [5] propone un método que determina automáticamente los límites comunes de las superficies NURBS recortadas. En este método cada superficie NURBS es convertida en una representación poligonal antes del renderizado (comúnmente conocido como subdivisión de superficies NURBS). El procedimiento de conversión produce una aproximación lineal continua de la superficie a modelar y posteriormente se maneja el error entre la superficie original y la modelada. Sin embargo, este proceso ha sido aplicado sólo en el campo industrial y tiene dificultades en el modelamiento de los detalles finos.

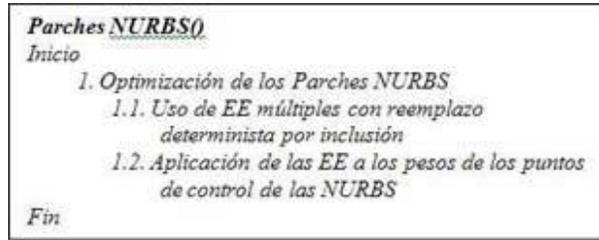
En 2003, Bertram [1] propuso un método para aproximar en forma adaptativa puntos dispersos usando B-spline triangular jerárquicos. El método se compone de las siguientes fases: 1. Realización de un agrupamiento adaptativo basado en un refinamiento sobre una estructura quad-tree. 2. Ajuste de mínimos cuadrados de parches polinomiales a los puntos de datos ubicados en cada grupo obtenido en la fase 1. 3. Combinación de los parches polinomiales en parches de superficies B-Spline, con inserción de múltiples nodos en los límites del grupo. Finalmente, 4. Refinamiento recursivo de los grupos con errores por encima de una tolerancia especificada. Un limitante de la propuesta de Bertram, es que asume una distribución no uniforme del muestreo sobre la superficie, de forma que las zonas con curvatura pronunciada presenten un muestreo más denso que las zonas con poca curvatura. Al igual que las propuestas anteriores, ésta hace uso de parches para el ajuste de los datos, lo cual le agrega complejidad a la solución.

Un enfoque diferente más reciente es el presentado por Yvart [9]; en el se emplean NURBS triangulares para el ajuste de puntos dispersos. Las NURBS triangulares no requieren que el conjunto de puntos posea topología rectangular, aunque su complejidad computacional frente a las NURBS es mayor. Al igual que los trabajos anteriores, éste requiere de pasos intermedios en los que se construyen mallas triangulares, se realizan procesos de reparametrización y se ajustan parches de continuidad G^1 para obtener el modelo de la superficie.

III. OPTIMIZACIÓN DE LOS PARCHES NURBS

Esta fase presenta un método que emplea una Estrategia Evolutiva (EE) para determinar los pesos de los puntos de control

de una superficie NURBS, sin modificar la ubicación de los puntos muestreados de la superficie original, de manera que se reduzca el error en el ajuste de las NURBS, sin alterar la geometría de la superficie del objeto real. La metodología seguida en esta fase, se muestra en el Algoritmo 1.



Algoritmo 1. Metodología utilizada para la optimización de los parches NURBS

Una superficie NURBS está completamente determinada por sus puntos de control P_{ij} , lo cual implica, que la superficie cambia de manera predecible conforme lo indican sus puntos de control (Ver Figura 1). A esto se le conoce como la propiedad de soporte local y permite que el movimiento de un punto de control sólo afecte la superficie localmente. La principal dificultad en aplicaciones de ajuste es encontrar una parametrización adecuada y escoger automáticamente el número de puntos de control y sus posiciones para definir la topología de la superficie.

Fig. 1. Superficie NURBS

Los factores de peso W_{ij} de la superficie NURBS juegan un papel muy importante en el proceso de ajuste, dado que son estos los que determinan que tanto influye localmente un punto en la topología de la superficie. Generalmente, los pesos de los puntos de control de una superficie NURBS se asignan de manera homogénea e iguales a 1, reduciéndose ésta a su caso particular conocido como superficie B-Spline, la cual es limitada en la representación de superficies arbitrariamente curvadas y superficies cónicas.

En esta etapa, se emplearon EE múltiples de tipo "más", las cuales se denotan de la siguiente manera: $(\lambda + \mu) - ES$, indicando λ el tamaño de la población y μ el tamaño de la descendencia; el símbolo "+" para señalar el reemplazo determinista por inclusión. La manipulación de los pesos se realiza por medio de esta EE configurada de la siguiente manera:

A Criterio de Representación

Este criterio está basado en parejas de vectores reales. Normalmente se usa una representación mediante tríos, en la que el último vector controla la correlación entre las mutaciones de cada componente, pero debido a lo costoso del método, se decidieron utilizar solo parejas.

B. Operadores Genéticos

1) *Individuo*: Se conforma por los pesos de los puntos de control pertenecientes a la nube de puntos original y los parámetros de adaptación del paso de mutación, como lo ilustra la Figura 2.

$$I = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_n & \sigma_1 & \dots & \sigma_n \end{bmatrix}$$

Fig. 2. Individuo de la Estrategia Evolutiva

Los valores iniciales w_i , δ_i de los alelos de cada individuo se distribuyen uniformemente en el intervalo [0.5, 1.5]. Se escogió este rango porque en el se dan los valores iniciales de los alelos de los individuos, los cuales corresponden a los pesos de los puntos de control y por eso inicialmente no deben ser cero porque se deformaría la geometría del objeto original; y hasta 1.5 para poder compensar los valores inferiores a 1 cuando se utilizan pesos homogéneos iguales a 1.

2) *Mutación*: La mutación de los individuos de la estrategia será de tipo no correlacionada con n σ 's (pasos de mutación), como se estableció en la configuración del individuo y se realiza conforme lo indican las ecuaciones 1 y 2.

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot e^{(\tau_0 \cdot N(0,1) + \tau_i \cdot N_i(0,1))} \quad (1)$$

$$x'_i = x_i + \sigma'_i \cdot N_i(0,1) \quad (2)$$

Donde $N(0,1)$ es una distribución Normal con esperanza 0 y varianza 1. τ_0, τ_i son constantes que controlan el tamaño del paso de la mutación. Lo anterior se refiere al cambio en paso de mutación σ y una vez que se ha actualizado el paso de mutación se genera la mutación de los alelos de los individuos w_i .

C. Criterio de Selección

Se seleccionan los mejores individuos en cada generación, conforme al ajuste obtenido en la función de aptitud dada por la ecuación (3).

$$E(S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{p,s_i} < \delta \quad (3)$$

Donde d_{p,s_i} representa la distancia entre un punto del conjunto P de puntos muestreados de la superficie original, y un punto sobre la superficie aproximada S. Se pretende conseguir

la configuración de la superficie S que haga E menor que una tolerancia δ dada.

D. Operador de Recombinación

Se aplican dos tipos de recombinación, según si se están recombinando variables objeto W_i o parámetros de la estrategia σ_i . Para las variables objeto se utiliza una recombinación intermedia global (ecuación 4), mientras que para los parámetros de la estrategia, se emplea una recombinación intermedia local (ecuación 5).

$$b'_i = \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^{\rho} b_{k,i} \quad (4)$$

Donde b'_i es el nuevo valor del alelo i , y u_i el número de individuos de la población.

$$b'_i = u_i b_{k_1,i} + (1 - u_i) b_{k_2,i} \quad (5)$$

Donde b'_i es el nuevo valor del alelo i , y u_i es un número real que se distribuye uniformemente en el intervalo $[0,1]$.

En la recombinación intermedia local se seleccionan aleatoriamente 2 individuos y se promedian los alelos correspondientes para obtener el valor del alelo del nuevo individuo y en intermedia global se promedian los alelos respectivos de todos los individuos del grupo de recombinación. El número de individuos seleccionados para recombinación se distribuye uniformemente en el intervalo $[2,n]$. El cálculo de la distancia entre las superficies NURBS S y el conjunto de puntos muestreados P , se realiza mediante un esquema iterativo que calcula los valores de los parámetros (u_k, v_k) , que hacen $S(u_k, v_k)$ más cercana a cada P_k .

La Figura 3 muestra el resultado de la optimización del ajuste de la superficie NURBS con el método propuesto. Los círculos rojos en las figuras señalan los puntos de control de la superficie NURBS, mientras que los puntos azules representan muestras discretas ubicadas sobre ésta. Se aprecia como los puntos de la superficie NURBS mostrada en la Figura 3b presentan mayor tendencia hacia los puntos de control, que los mostrados en la Figura 3a. La distancia entre la superficie NURBS de la Figura 3b y los puntos de control que la determinan, calculada según la ecuación 3, es de 3.48, 23% menos que la distancia de 4.55 medida entre la superficie NURBS de la Figura 3a y los puntos de control dados.

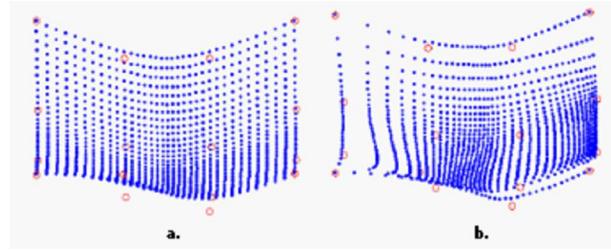


Fig. 3. Optimización del ajuste de la superficie NURBS. a) Superficie NURBS ajustada sobre datos muestreados, con conjunto de pesos homogéneos iguales a 1. b) Superficie NURBS ajustada sobre los datos muestreados, con conjunto de pesos obtenidos por la EE.

IV. RESULTADOS

Todas las pruebas fueron realizadas utilizando una computadora con procesador de AMD Sempron a 3,0GHz, memoria RAM de 512 MB, corriendo bajo el sistema operativo Windows XP. Las implementaciones de los modelos fueron realizados en C++ y Matlab, y se programó un motor gráfico en OpenGL, para obtener la representación gráfica de las imágenes.

El método propuesto el cual fue aplicado primero a una imagen sintética, que es una función de senos y cosenos, como se muestra en la Figura 4. La figura muestra el proceso realizado para dos cuadriláteros, pero el proceso se realizó para toda la malla cuadrilateral.

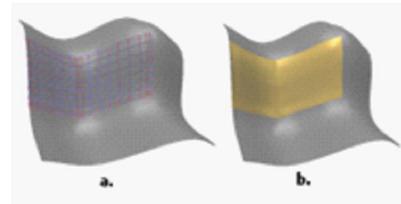


Fig. 4. a. Optimización mediante EE. b. Parches NURBS para dos cuadriláteros.

Posteriormente, y con el fin de cumplir con lo propuesto, el método fue probado con una imagen de rango del objeto cultural moai del Max Planck Institut Informatik, el cual tiene topología arbitraria irregular. En la Figura 5, se muestra en detalle el procedimiento aplicado a un cuadrilátero de la malla del objeto. En esta Figura, se observa como el procedimiento desde la malla cuadrilateral, hasta el trazado del parche NURBS optimizado. De igual forma, el método fue realizado para todos los cuadriláteros de la malla, para el objeto moai, como se observa en la Figura 6.

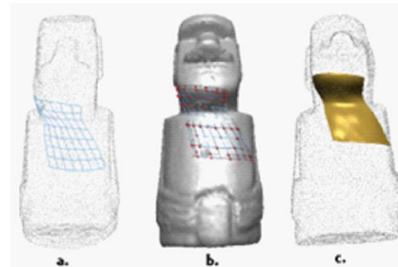


Fig. 5. a. Malla cuadrilateral. b. Optimización mediante EE. c. Parches NURBS para el cuadrilátero.

La configuración de la EE planteada es la siguiente: $\mu = 16$ individuos, $\lambda = 112$ individuos, con pool de recombinación de tamaño igual al 10% de la población y probabilidad de mutación de $1/n$ donde n es el número de individuos. El número de generaciones por cada prueba realizada es de 200. Los resultados de la optimización de la superficie NURBS pueden observarse en las Figuras 5 y 6. En estos resultados, se obtuvo una reducción media del 8% de la distancia entre la superficie NURBS y la nube de puntos tomada para tal fin, en donde se aprecia que existe mayor tendencia de la superficie NURBS hacia los puntos de control.

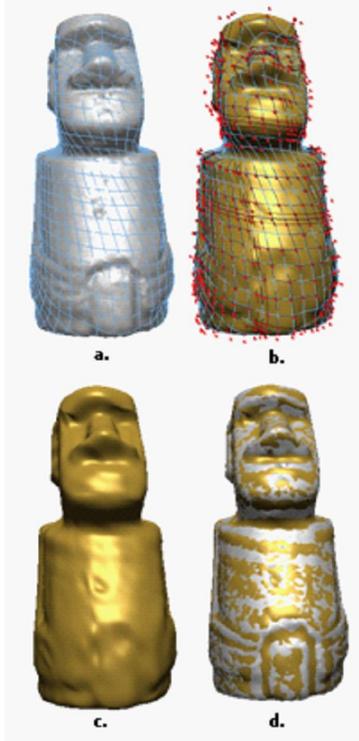


Figura 6. Ajuste de toda la superficie. a. Malla cuadrilateral. b. Optimización de las NURBS. c. Ajuste por parches NURBS. d. Superficie Ajustada vs Superficie Original

El error de ajuste utilizado, es el error cuadrático que está definido como la distancia al cuadrado absoluta media desde los puntos de originales a la superficie modelada, mediante la ecuación (6):

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i^2| \quad (6)$$

Para la Figura 5, el error de ajuste fue de $5,3 \times 10^{-3}$ y para la Figura 6, el error de ajuste fue estimado en $1,8 \times 10^{-4}$.

V. CONCLUSIONES

El esquema del método desarrollado, muestra modelos aceptables aproximados de las superficies de los objetos 3D

con topología arbitraria, conservando los detalles finos de los objetos, mediante la optimización de los parches NURBS, los cuales son una herramienta estándar en los sistemas CAD/CAM y en varias áreas de la computación gráfica y la visión por computador. La desventaja del método propuesto es que es costoso computacionalmente en términos de tiempo y almacenamiento.

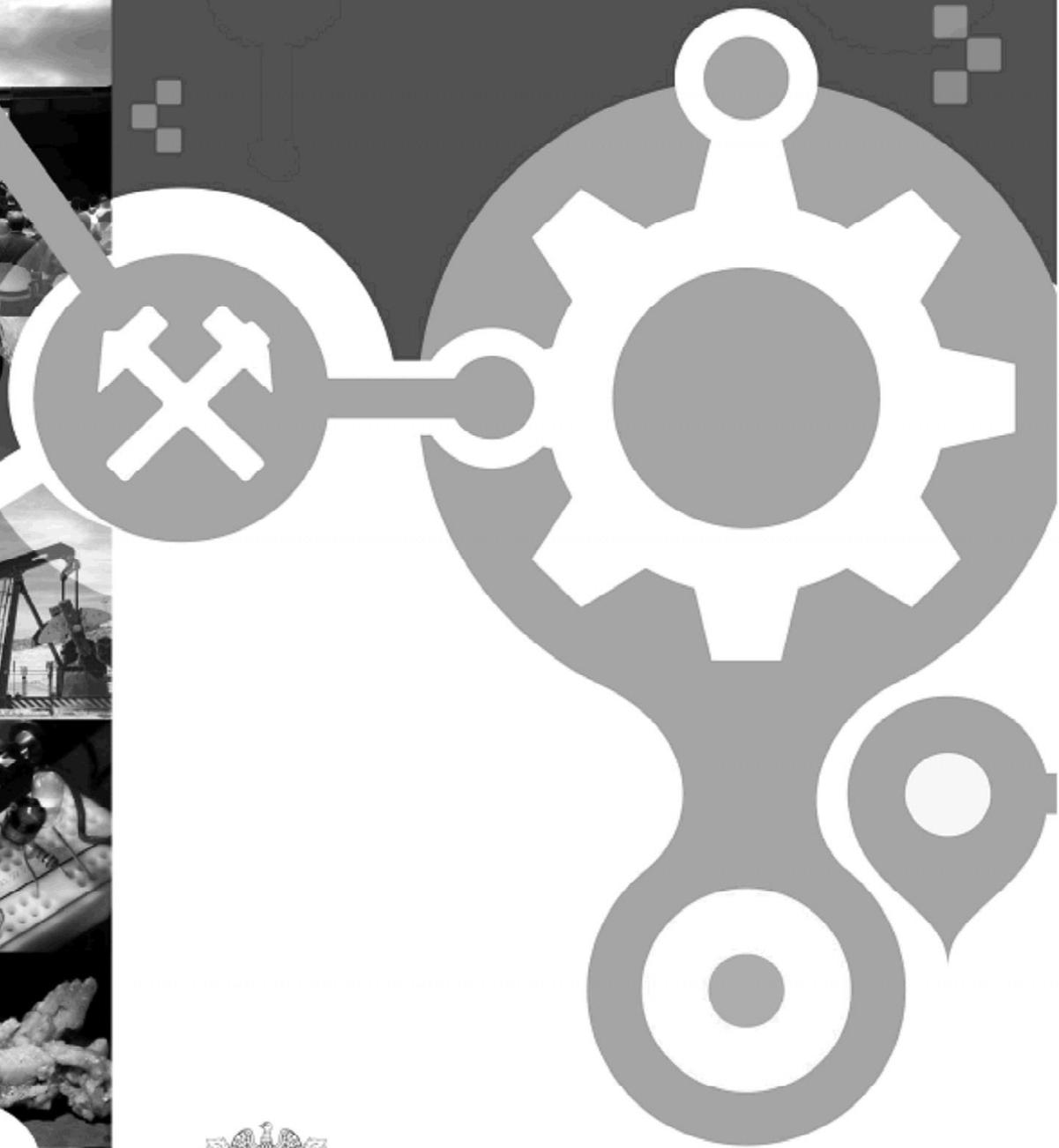
Como trabajo futuro, se propone explorar una versión paralela para reducir el costo computacional del método propuesto.

REFERENCIAS

- [1] M. Bertram, X. Tricoche, y H. Hagen. Adaptive smooth scattered-data approximation for large-scale terrain visualization. EUROGRAPHICS - IEEE -TCVG Symposium on Visualization. 2003.
- [2] P. Bremer, H. Edelsbrunner, B. Hamann, y V. Pascucci. A topological hierarchy for functions on triangulated surfaces. TVCG 10, 4, 385-396. 2004.
- [3] S. Dong, P. Bremer, P. Garland, V. Pascucci y J. Hart, J. Quadrangulating a mesh using laplacian eigenvector. Technical Report UIUCDCS-R-2005-2583. 2005.
- [4] B. Gregorski, B. Hamann, y D. Joy. Reconstruction of B-spline surfaces from scattered data points. Proceedings of Computer Graphics International. 2000.
- [5] F. Kahlesz. Multiresolution rendering by sewing trimmed NURBS surfaces. ACM 1-58113-506-8, 2. 2002.
- [6] V. Krishnamurthy y M. Levoy. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes. In SIGGRAPH 96 Conference Proceedings. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley. 1996.
- [7] I. Park y U. Sang. Constructing NURBS surface model from scattered and unorganized range data. Second International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. 1999.
- [8] J. Samareh. Triangulation of NURBS surfaces. Computer Sciences Corporation. 2002.
- [9] A. Yvart, S. Hahmann, y G. Bonneau. Smooth adaptive fitting of 3D models using hierarchical triangular splines". Shape Modelling International. 2005.
- [10] M. Eck y Hoppe, H. Automatic reconstruction of b-spline surface of arbitrary topological type. ACM-0-89791-747-4, 8. 1996.

Sandra Patricia Mateus Santiago. Ingeniera de Sistemas de la Universidad del Magdalena y Magister en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Docente Investigador Tiempo Completo, Coordinadora de la Línea en Inteligencia Computacional de la Institución Universitaria de Envigado. Carrera 27 B N° 39 A Sur 57, Bloque C, Of: 201. Tel: 3391010 Ext: 223, Envigado - Antioquia (Colombia). Email: spmateus@iue.edu.co.

John William Branch B. Ingeniero de Minas, Magister en Ingeniería de Sistemas, Doctor en Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente se desempeña como profesor Asociado en la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y Director del Área Curricular de Sistemas y Administración. Ha dirigido y trabajado en proyectos de investigación en el área del procesamiento digital de imágenes y visión artificial en la resolución de problemas empleando técnicas de la inteligencia artificial.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

120 años 
TRABAJO Y RECTITUD