

# Corrección Automática de Huecos en Objetos de Forma Libre Empleando Funciones de Base Radial

## Automatic Correction of Holes in Free Form Objects Using Radial Basis Functions

John Branch, PhD.<sup>1</sup>, Flavio Prieto, PhD.<sup>2</sup>, Pierre Boulanger PhD.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial

Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

<sup>3</sup> University of Alberta, Canada

jwbranch@unalmed.edu.co, fprieto@unal.edu.co, pierreb@cs.ualberta.ca

Recibido para revisión 26 de Marzo de 2007, aceptado 15 de Junio de 2007, versión final 31 de julio de 2007

**Resumen**—En este trabajo se propone un nuevo algoritmo para identificar y llenar automáticamente los huecos en regiones asociadas con superficies suaves mediante interpoladores de funciones de base radial locales.

**Palabras Clave**—Funciones de Base Radial, Reconstrucción 3-D, Objetos de Forma Libre.

**Abstract**—In this work, a novel algorithm is proposed to identify and automatically fill the holes in regions associated with soft surfaces by means of interpolators of local radial basis functions.

**Keywords**—Radial Basis Functions, 3-D Reconstruction, Free Form Objects.

### I. INTRODUCCIÓN

EL uso combinado de imágenes de rango e imágenes a color es muy prometedor, y ha demostrado producir un grado de fotorealismo sin precedentes. [15, 17]. Desafortunadamente, algunas propiedades de las superficies (Reflexión baja o especular), oclusiones y limitaciones de accesibilidad causan que el escáner pierda algunos elementos de superficie, conduciendo a reconstrucción incompleta de la escena e introduciendo huecos en los modelos resultantes. La creación de representaciones en malla de alta calidad basadas en dicha información incompleta sigue siendo todo un reto [23]. Debido a los costos y dificultades involucradas en el escaneo de ambientes reales, es deseable contar con herramientas automáticas ó semiautomáticas para ayudar a los usuarios a mejorar la calidad del conjunto de datos incompleto.

El problema de llenar huecos en una malla triangulada puede dividirse en dos sub-problemas: 1) Identificación de los huecos y construcción de los datos que faltan, usando los datos disponibles cerca de los huecos. Desafortunadamente, ninguno de estos problemas es trivial, debido a que los huecos creados durante el proceso de escaneo de objetos geoméricamente ricos, tales como esculturas detalladas, puede ser bastante complejo [11]. Sin embargo, en muchos casos, los huecos ocurren en imágenes de rango que pueden ser topológicamente más simples. Este es el caso de muchos huecos encontrados cuando se escanean ambientes interiores, donde la mayoría de las superficies tienden a ser suaves, y abundan las áreas planas (Por ejemplo, imagine una casa ó un ambiente de oficina.). Para estas situaciones, se pueden especificar algoritmos más simples para identificar o para parametrizar sus vecinos, para evitar los problemas usualmente asociados con los casos más generales.

Este trabajo presenta un nuevo algoritmo para identificar y llenar automáticamente los huecos en regiones asociadas con superficies suaves. El algoritmo toma una malla triangulada, la cual se analiza para detectar la existencia de bordes (bordes que pertenecen a un solo triángulo). La ocurrencia de un hueco implica la existencia de un ciclo definido por los bordes de la frontera. Así, una vez que se encuentra un borde de frontera, el algoritmo traza la frontera entera. Un anillo de puntos alrededor de la frontera se usa para un procedimiento de interpolación que eventualmente llena el hueco. Los puntos cerca al hueco se usan para adaptar una superficie usando un interpolador de función de base radial (RBF). Una característica importante de nuestro algoritmo es garantizar que los parches reconstruidos se acoplan suavemente en la

superficie original; más aún, la superficie reconstruida preserva el muestreo de la malla original. Como se distinguen las nuevas primitivas de los puntos originales, estas pueden ser procesadas posteriormente. Ya que el algoritmo trabaja después de la reconstrucción de la superficie que crea la malla, puede ser usado con cualquier técnica de reconstrucción y su procesamiento se limita al tamaño de los huecos. En este trabajo se demuestra la efectividad de nuestro acercamiento empleando conjuntos de datos reales, y se muestra como puede mejorar significativamente la calidad de todo el modelo de malla triangular. Este trabajo está organizado como sigue: La sección II introduce a las funciones de base radial. La sección III presenta la revisión de la literatura. La sección IV presenta los detalles del algoritmo de llenado de huecos. La sección V discute los resultados obtenidos usando el algoritmo propuesto. La sección VI presenta las conclusiones y trabajo futuro.

## II. FUNCIONES DE BASE RADIAL

En las dos últimas décadas se ha dado un creciente interés por las aplicaciones de la interpolación multivariable en muchas áreas de la ciencia y la ingeniería, tales como: la computación gráfica, sistemas CAD, imágenes médicas, GIS (Sistemas de Información geográfica) y otras; debido a los avances en computación y la disponibilidad de hardware de altas prestaciones. La ventaja principal del uso de funciones de base radial para la reconstrucción tridimensional es la habilidad para reconstruir modelos de topología arbitraria y la habilidad para ajustar detalles de tipo local con una buena selección de centros.

En las aplicaciones originadas en problemas reales, los datos que se deben interpolar están colocados de una manera irregular sobre puntos dispersos; por ello, se necesitan algoritmos aplicables a una distribución arbitraria de puntos. Tales algoritmos existen y son bien conocidos para el caso univariado, pero las dificultades se encuentran en el caso multivariado, las funciones de base radial constituyen una herramienta eficiente en la solución del problema de interpolación de datos dispersos en varias variables [16].

Para dar una explicación de este tipo de funciones, se hará en dos partes: en la primera se explica lo que es una función de tipo radial, esto es, una función de la forma:

$$g : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R} : (x_1, \dots, x_N) \rightarrow \phi(\|x_1, \dots, x_N\|_2)$$

donde  $d$ , indica la dimensión de trabajo para alguna función  $\phi : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ , el valor de la función  $g$  en el punto  $\bar{x} = (x_1, \dots, x_N)$  sólo depende de la norma euclídea en  $\mathbb{R}^2$  dada por:

$$\|\bar{x}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^d x_i^2} \quad (1)$$

distancia de al origen, lo que explica el concepto de radial.

Ahora para entender el concepto de función básica suponemos ciertos puntos fijos llamados centros

$\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N$ , consideramos las siguientes combinaciones lineales de la función  $g$ , centrada en el punto  $\bar{x}_i$  donde  $\|\bar{x} - \bar{x}_i\|$  es la norma Euclídea entre los puntos  $\bar{x}$  y  $\bar{x}_i$ , así formamos la función compuesta  $f$ , la cual está en el espacio finito dimensional atravesado por la función básica  $g : \bar{x} \mapsto g(\|\bar{x} - \bar{x}_i\|)$ .

Una función de base radial toma la forma:

$$S(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(\|x - x_i\|) \quad (2)$$

donde  $\phi$  es una función fija de una sola variable, y los coeficientes  $\lambda_i$  son números reales. No se pone ninguna restricción sobre la norma en este punto, aunque se hace énfasis en que la norma euclídea es la elección más común. Por lo tanto, la aproximación  $S$  representa combinaciones lineales de translaciones de una función fija que es radialmente simétrica con respecto a la norma dada, en el sentido que claramente posee las simetrías de un círculo unitario.

Frecuentemente se dirá que los puntos son los centros de la función interpolante de base radial. Más aún, es usual referirse a  $\phi$  como la función de base radial, si se entiende que ésta es evaluada en la norma Euclídea.

Si  $I$  es un conjunto finito, dígame  $I = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  las condiciones de interpolación proveen el sistema lineal:  $A\mathbf{Y} = \mathbf{F}$ , donde  $A(i, j) = \phi(\|x_i - x_j\|)$ . La matriz  $A$  está formada de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} \phi(0) & \phi(\|x_1 - x_2\|) & \dots & \phi(\|x_1 - x_N\|) \\ \phi(\|x_2 - x_1\|) & \phi(0) & \dots & \phi(\|x_2 - x_N\|) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(\|x_N - x_1\|) & \phi(\|x_N - x_2\|) & \dots & \phi(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Es fácil ver que la matriz de interpolación  $A$  es simétrica y además puede ser una matriz definida positiva con una selección apropiada de la función básica  $\phi$ , el sistema lineal  $A\mathbf{Y} = \mathbf{F}$ , donde  $\mathbf{F}$  está dado por un conjunto de condiciones iniciales, puede resolverse indirectamente por un método de gradiente conjugado o directamente por un método de descomposición LU.

## III. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En 1994, Turk y Levoy [22] presentaron un algoritmo llamado Mesh Zippering, como una forma de integrar imágenes de rango, el algoritmo consta de tres fases principales, en la primera fase se aplica el algoritmo de erosión que remueve los triángulos que pertenecen a los bordes de cada imagen. En la segunda fase, se corrigen los

huecos que hayan surgido como consecuencia de la etapa de erosión, teniendo en cuenta los datos coincidentes entre las imágenes, por último, se optimiza el tamaño de los triángulos que se crearon en la fase de llenado (que generalmente son muy pequeños) con el fin de disminuir el número de elementos de superficie de la representación, este método además de requerir mucha información para hacer la reconstrucción, no hace buenas representaciones en esquinas y bordes lo que incrementa el nivel de complejidad de la representación.

Paralelamente en el mismo año, Hoppe [14] introdujo un algoritmo que utiliza una función signada de distancia entre puntos cercanos a la superficie estimada y luego aplica la extracción de isosuperficie resultante de los cruces por cero, mediante la ejecución de un algoritmo de tomas de contorno sobre una región de espacio cercano al valor de distancia igual a cero y que además contenga el conjunto de datos. La función de distancia se extrae por medio del uso de matrices de covarianza locales, para luego pasar a una representación en grafos de Riemman. Para asegurar la corrección en la dirección de las normales a los planos consecutivos se aplica un algoritmo de propagación llamado Minimal Spanning Tree, que es también utilizado en segmentación a bajo nivel, para este caso se debe destacar que el uso de matrices de covarianza es altamente sensible al ruido.

En 1997, Curless [10] presentó un algoritmo volumétrico de integración, el cual combina características de los anteriores. El carácter volumétrico de este método permite hacer una clasificación por medio de vóxeles y la reducción final de esta caracterización facilita la eliminación de huecos en el modelo integrado.

Por otro lado Bajaj, Bernardi y Xu [2] implementaron un mecanismo de integración basado en una reconstrucción polinomial implícita tricúbica o tricadrática local ajustada por mínimos cuadrados a una función de distancia signada obtenida de los datos desorganizados, los cuales son representados en una forma derivada de la malla de triángulos llamado octrees. A diferencia de Hoppe [14] los autores extraen la función signada de distancia, obteniendo los planos de pendiente en cada punto por ajuste de mínimos cuadrados a un vecindario, verificando la correlación entre las normales de los planos adyacentes. El ajuste polinómico para la extracción de la iso-superficie se realiza de manera recursiva, dividiendo el conjunto de datos en subconjuntos cada vez mas pequeños, hasta que el error sea menor que un umbral determinado.

Pito [20] presenta un método de integración basado en medidas (triángulos), el método se encarga de mantener aquellos triángulos más confidencialmente adquiridos, la confidencialidad está relacionada con la orientación y posición del sensor, después de eliminar los triángulos redundantes se establecen nuevas relaciones entre los triángulos vecinos, cerrando los huecos entre mallas adjuntas. Se destacan como desventajas de este método la utilización de muchos recursos computacionales, como los relacionados con la posición del sensor, la producción de ruido no lineal

sumamente costoso de eliminar y como ventajas tiene la facilidad de ser eficiente en superficies con grandes curvaturas.

Carr et. al [7] proponen un método para reconstruir superficies a partir de nubes de puntos usando Funciones de Base Radial Poliarmónicas, el proceso de integración se logra por medio del uso de una función implícita obtenida a partir de un subconjunto de puntos etiquetados como de nivel cero, por medio del uso de una función implícita, la RBF es ajustada a los datos de la superficie, en este proceso se utilizan métodos rápidos para el ajuste y la evaluación de la RBF, lo que permite una modelación del conjunto completo de puntos, para la reducción del número de centros utilizan el algoritmo de Greedy, el método es adecuado para reconstruir superficies a partir de datos muestreados no uniformemente, zonas con ausencia de información son llenadas suavemente, para datos con ruido se usa una aproximación no interpolante. La representación funcional genera un modelo sólido, lo que significa que los gradientes y las normales a la superficie se pueden determinar analíticamente, esto ayuda a generar mallas uniformes, la principal desventaja de este método es la utilización de todos los centros resultantes para el llenado de huecos, esto hace costoso el proceso computacional.

Davis et al [11] usan un acercamiento de difusión volumétrica análogo a las técnicas “in-painting” [5,19] para llenar huecos en imágenes de rango. El proceso consiste en convertir una superficie en una representación basada en vóxeles con una función de distancia signada asociada. El algoritmo de difusión consiste de pasos alternados de borrado y composición, después de los cuales, la superficie final se extrae empleando los “Marching Cubes”.

Alexa et al [1], usaron conjuntos de puntos para representar formas, y emplear un acercamiento similar al nuestro, ya que ellos proyectan puntos sobre planos y adaptan superficies a través de estos puntos. Las superficies reconstruidas se usan para sub-muestrear el conjunto de puntos. Este método, sin embargo, no intenta llenar los huecos sobre las superficies.

Reuter [21], presenta una técnica de modelamiento de superficies 3D basada en los puntos, la cual combina con una técnica de renderizado, en la cual las superficies son modeladas especificando un conjunto de puntos no ordenados sobre la superficie y luego se calcula una representación de la nube de puntos usando Funciones de Base Radial, el algoritmo garantiza un grado de continuidad especificado, además la superficie es renderizada directamente con base en el conjunto de puntos.

La revisión de la literatura sobre la problemática de la integración de imágenes de rango revela numerosos intentos por resolver dicho problema. Encontrar la conexión correcta entre los puntos en tres o más dimensiones es generalmente un problema muy complejo. La presencia de ruido en los datos y el muestreo no uniforme de los mismos constituyen también un problema difícil de resolver. Existen también enfoques paramétricos usando métodos variacionales basados en Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) para los cuales es

necesario disponer de una buena parametrización. Tal parametrización es casi imposible de obtener para topologías complejas. En general, la forma paramétrica carece de información sobre la profundidad y requiere de una parametrización global que hace difícil trabajar con deformaciones y cambios en la topología de la superficie [4].

Se debe considerar la utilización de funciones de base radial ya que presentan ventajas comparativas frente a las técnicas típicamente utilizadas para la corrección de anomalías topológicas en imágenes de rango, entre ellas se destacan: la obtención de una superficie implícita que permite aproximar superficies de objetos con pocos datos, la superficie reconstruida es además insensible al ruido proveniente del proceso de adquisición, pues la superficie es ajustada en lugar de ser interpolada y por último la superficie reconstruida es localmente detallada y globalmente suave, pues el uso de RBF permite altos ordenes de suavidad, justificado en la selección de una adecuada familia.

#### IV. ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA EL LLENADO DE HUECOS EN MALLAS TRIANGULARES

Con el objetivo de corregir las anomalías topológicas relacionadas con la ausencia de información en mallas que representan objetos, es necesario generar nuevos puntos en regiones las cuales no han sido sensadas, debido en su mayoría, a problemas de oclusión.

La metodología propuesta, primero identifica y analiza los huecos presentes en la malla para determinar cuales deben ser llenados y cuales hacen parte de la topología del objeto, como por ejemplo, las discontinuidades presentes en el área de los ojos en la superficie de un objeto como la máscara (Figura 1). En la Figura 2, se presenta el diagrama de bloques del algoritmo propuesto.

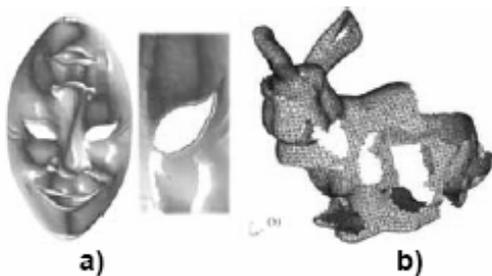


Figura 1. a) Hueco de la superficie. b) Hueco de la representación

El análisis de los huecos consiste en estudiar la torsión de la curva del contorno de cada uno de éstos. Este análisis se basa en la idea que cada agujero que pertenece a la superficie es suave y regular, pero los huecos generados por la oclusión tienen a presentar grandes irregularidades reflejadas en altas torsiones de contorno. Seguidamente comienza un proceso iterativo para la determinación de los nuevos puntos; estos puntos son generados mediante interpoladores locales de funciones de base radial construidos a partir de un vecindario seleccionado iterativamente alrededor del hueco hasta

alcanzar un umbral de ajuste establecido.

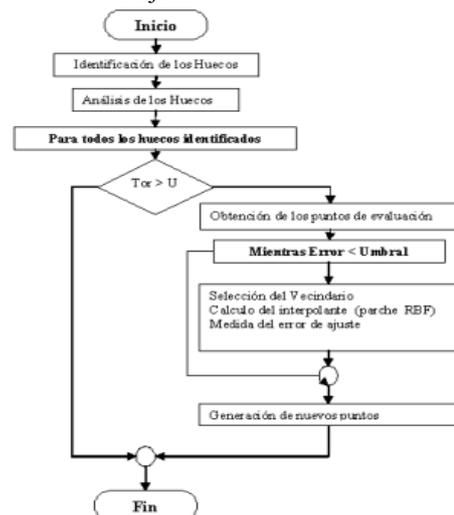


Figura 2. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto

##### A. Identificación de los Huecos

En esta etapa es posible encontrar dos tipos de huecos presentes en la topología de un objeto, aquellos que pertenecen realmente a la superficie y aquellos que fueron causados por el proceso de adquisición, debido a la oclusión o por un mal proceso de escaneo (Figura 3).



Figura 3. a) Hueco de la superficie, b) Hueco generado por oclusión y escaneo parcial

Inicialmente el algoritmo toma un triángulo semilla ubicado en cualquier parte de la malla y busca en toda la malla hasta encontrar un triángulo límite. Un triángulo límite  $T_i = \langle a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3} \rangle$  es aquel que posee por lo menos una arista que no es compartida por ningún otro triángulo, esto es  $a_{i,1} \vee a_{i,2} \vee a_{i,3} \notin T_j \forall j = \{1, \dots, N\} \wedge i \neq j$ , a esa arista se le denomina arista límite (Figura 4). A partir del primer triángulo límite encontrado se inicia una búsqueda recursiva para hallar el camino cerrado. Es decir, si el objeto es una malla triangular  $M = \{t_i / 1 < i < N\}$ , un hueco consiste de un camino cerrado de aristas de triángulos límites.

Esta búsqueda se realiza determinando la arista límite y mediante el vértice final, encontrando el triángulo límite adyacente hasta formar el contorno cerrado. Para realizar eficientemente esta búsqueda, es necesario construir una estructura de datos que relacione cada vértice con los triángulos que lo contienen. Adicionalmente, cada uno de los triángulos recorridos son marcados como visitados, para no

repetir triángulos dentro de la búsqueda.

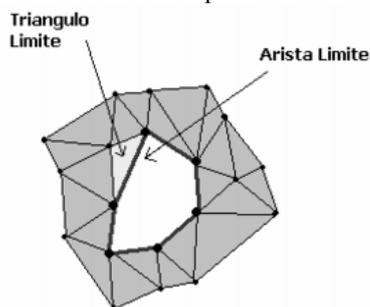


Figura 4. Triángulo Límite

Para el proceso de llenado, el camino que representa el contorno externo de la superficie es eliminado dentro del conjunto de huecos detectados, ya que este no es un hueco sino un camino que encierra la superficie.

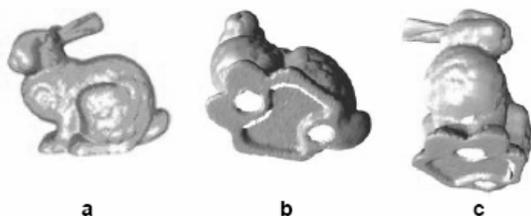


Figura 5. a) Vista lateral del conejo de Stanford, b) y c) vista de los cinco huecos que posee el objeto

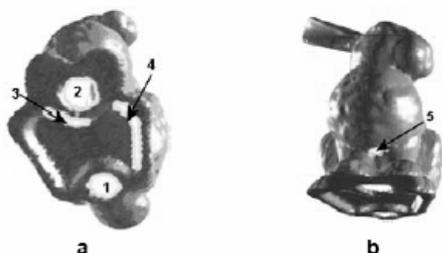


Figura 6. a) y b) Resultado del algoritmo de identificación de huecos sobre la malla

### B. Análisis del Hueco

Una vez detectados los huecos se debe determinar si un hueco será llenado o no, estableciendo si el hueco está presente en la superficie del objeto real o si fue causado en alguna de las etapas intermedias del proceso de reconstrucción tridimensional. Existe un número infinito de configuraciones de huecos en los objetos de forma libre, que hacen muy difícil establecer la pertenencia real del hueco a la superficie, motivo por el cual el proceso de llenado de huecos exige generalmente, una interacción con el usuario. Una propuesta para automatizar este procedimiento consiste en analizar la curva de contorno generada por cada uno de los huecos. Los huecos presentes en los objetos generalmente se caracterizan por ser de contorno suave, teniendo en cuenta que, la suavidad del contorno es relativa a la densidad de muestreo de los puntos. Por el contrario, los huecos causados por oclusión,

presentan comúnmente grandes variabilidades de la curva de contorno (Figura 7).

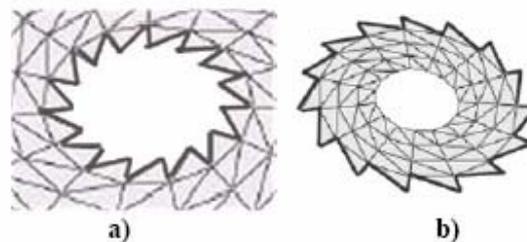


Figura 7. a) Borde interior, b) Borde exterior

Debido a que la línea de contorno es una curva, esta puede ser estudiada y clasificada de acuerdo a sus propiedades geométricas como la curvatura y torsión. Para la clasificación de las curvas de contorno, solo se considera importante la torsión y no la curvatura, debido a que un hueco de una superficie puede tener cualquier nivel de curvatura. Interesa establecer el comportamiento de cada curva en el espacio, es decir, su suavidad o su alta variabilidad.

El estudio de la torsión de una curva depende del comportamiento del plano osculador; el plano osculador es el plano más cercano a la curva en un punto arbitrario A. Este plano pasa por el punto A y contiene a la tangente T y la normal N de la curva en A (Figura 8).

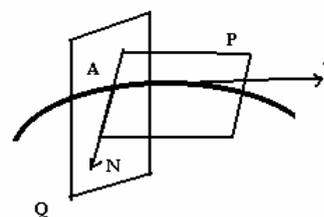


Figura 8. Plano Osculador P

De un punto a otro a lo largo de una curva, la posición del plano osculador varía en forma similar a como lo hace la dirección de la tangente y que permite caracterizar la curvatura; la variación del plano osculador permite caracterizar la torsión de una curva. De forma análoga como con la curvatura, la variación del plano osculador es medida de acuerdo a la longitud de arco; esto es, si  $\psi$  es el ángulo entre los planos osculadores en un punto fijo A y un punto próximo X, y si  $\Delta s$  es la longitud de arco AX, entonces la torsión  $\tau$  en el punto A se define como el límite:

$$\tau = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\psi}{\Delta s} \quad (4)$$

El contorno es aproximado parcialmente mediante curvas de Bezier de grado tres obtenidos con conjuntos de cuatro puntos continuos hasta obtener la estimación de la torsión en todos los puntos que conforman el contorno. Una vez obtenida las ecuaciones de los segmentos de la curva la torsión es

evaluada en el último punto; esto debido a que Bezier garantiza que la curva obtenida posea los puntos extremos del conjunto sobre el cual se calcula, de tal forma que el error de aproximación que se presenta en los puntos intermedios no afecta considerablemente a la estimación de la torsión Figura 9.

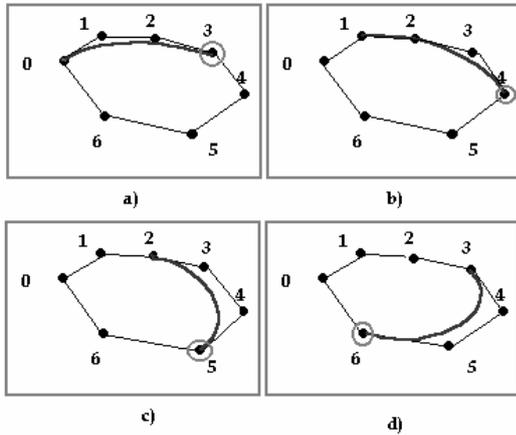


Figura 9. Aproximación de la curva de contorno mediante curvas de Bezier y puntos sobre los cuales se estima la torsión

Finalmente se calcula la varianza de las torsiones para medir el nivel de dispersión de los valores medidos en cada punto, los huecos cuyos contornos posean una varianza de torsión superior a un umbral establecido (mayores a 0.1) se llenarán.

$$S_{torsion} = \frac{\sum_{i=0}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n} \quad (5)$$

C. Cálculo del Interpolante

Una vez clasificados los huecos que deberán ser llenados, el proceso de generación de nuevos puntos requiere que se estime una aproximación de la superficie faltante. Para tal propósito se calcula una función  $f(x)$  a partir de un conjunto de puntos distribuidos homogéneamente alrededor del contorno del hueco, esta función es construida como un interpolante de función de base radial.

Los procedimientos basados en funciones de base radial (RBF) han probado ser muy útiles en la reconstrucción de formas desde datos ruidosos, dispersos e incompletos [6,8,9]. Recientes estudios en RBF se centran en la reconstrucción de grandes conjuntos de puntos producidos por los dispositivos modernos de adquisición [6, 7, 12, 18].

Las funciones de base radial son funciones circularmente simétricas centradas en un punto en particular llamado centro. Para calcular un interpolante de RBF, se considera un conjunto de puntos  $p = \{p_1, \dots, p_N\}$  muestreados desde una superficie  $S$  y con un conjunto de normales  $N = \{N_1, \dots, N_n\}$  que indican la orientación de la superficie, el objetivo principal es construir una función  $y = f(x)$  de tal forma que el conjunto de ceros que satisfacen la ecuación

$x \in \mathfrak{R}^3 : f(x) = 0$ , aproxime el conjunto de puntos  $P$ .

La interpolación típica construye una la función  $y = f(x)$  interpolando  $P$  de la siguiente forma:

$$f(x) = \sum_{p_i \in P} [g_i(x) + \lambda_i] \phi_\sigma(\|x - C_i\|) \quad (6)$$

donde:  $\phi_\sigma(r) = \phi(r/\sigma)$ ,  $\phi(r) = |r|^3$  es una función de base radial tri-armónica utilizada para la aproximación de la superficie faltante, los  $\lambda_i$  son el conjunto de pesos asociado a cada centro,  $g_i$  es típicamente un polinomio de grado 2 ó 3 y los  $C_i$  son el conjunto de centros.

Para el llenado de hueco no se calcula un solo interpolante con el conjunto total de puntos, por el contrario calculamos diferentes e independientes interpolantes locales a cada uno de los huecos, debido principalmente a que es muy costoso computacionalmente interpolar grandes cantidades de puntos para llenar pequeñas regiones de superficie faltante, por lo tanto, para cada uno de los huecos un interpolante diferente es estimado, solo con un conjunto reducido de puntos. Este conjunto de puntos deberá ser lo suficientemente grande y estar homogéneamente distribuido para lograr que la función obtenida pueda estimar la topología del segmento faltante.

D. Selección de Centros

La interpolación de funciones de base radial que no son de soporte compacto suele ser costoso, por tal motivo la selección de los centros o conjunto de puntos sobre los cuales se calculara el interpolante debe ser un proceso cuidadoso. La estimación del vecindario adecuado es realizada mediante un proceso iterativo (Figura 10).

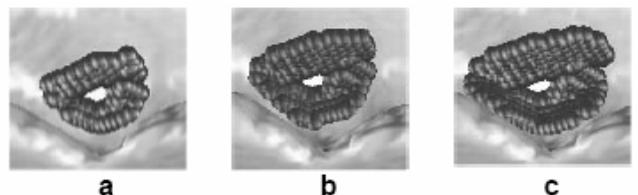


Figura 10. a) Iteración 1 tamaño del vecindario 38 b) iteración 2 tamaño del vecindario 106 c) Iteración 3 tamaño del vecindario 172

Este proceso inicia con un número pequeño de centros seleccionados como un conjunto de puntos cercanos a cada uno de los vértices de la curva de contorno, como se muestra en la Figura 11, un interpolante es calculado en cada una de las iteraciones hasta alcanzar un valor del error de ajuste igual o inferior a un umbral establecido. La evaluación de la calidad de la interpolación es realizada sobre un conjunto de puntos de referencia que inicialmente pertenecen al vecindario del hueco pero que no son utilizados para calcular el interpolante.

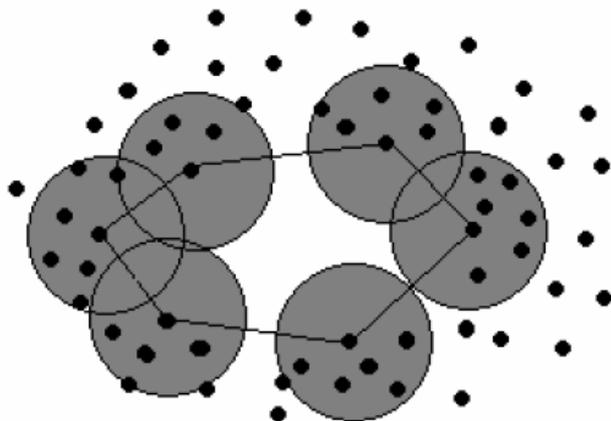


Figura 11. Estimación del conjunto de centros

En la Figura 12 se muestra el resultado de la selección del vecindario adecuado para el cálculo del interpolante sobre un objeto real. Una vez obtenido el vecindario inicial, es decir el de la primera iteración, se debe determinar el conjunto de puntos de referencia, utilizados para medir la calidad del interpolante. Este conjunto de puntos debe permanecer constante en las posteriores iteraciones del algoritmo, para garantizar que este conjunto de puntos es adecuada mente seleccionado el conjunto de puntos del vecindario inicial es clisterizado para obtener regiones homogéneas que describan las diferentes variaciones de la topología en las regiones alrededor del hueco, un cluster de tipo K-mean [13] es utilizado, donde la determinación del parámetro K será igual al numero de vértices que forma el contorno del hueco.

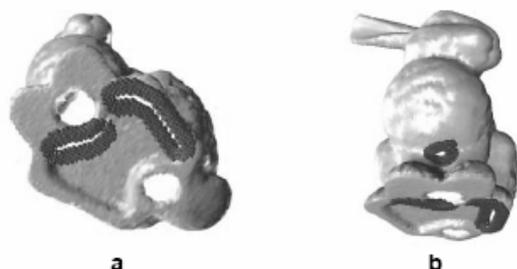


Figura 12. a) y b) Vecindario final para cada hueco del conejo de Stanford

Una vez obtenido el conjunto de regiones definida por cada cluster, se selecciona aleatoriamente dentro de cada uno de ellos un punto (Figura 13), que representará cada una de las diferentes regiones, de esta forma se garantiza que la evaluación es realizada homogéneamente alrededor del hueco. Si un interpolante alcanza el umbral de ajuste significa que representa con alta precisión la topología de la vecindad del hueco por lo tanto se espera reproduzca adecuadamente la región de la superficie faltante.



Figura 13. a) Clusterización del vecindario, b) y c) Selección del conjunto de puntos de referencia

### E. Llenado de Huecos

Para llenar cada hueco, es importante recordar que el segmento reconstruido preserva la densidad de muestro de la malla original; esto es, la densidad de muestreo como fue medida para cada uno de los huecos. En general, dos criterios importantes se usan para determinar los nuevos puntos que llenan cada hueco. Primero, la posición de los nuevos puntos debería estar al interior de del hueco y los nuevos triángulos agregados al hueco deberían ser fáciles de mezclar con la malla original. Segundo, la densidad del nuevo conjunto de puntos debe ser de esa vecindad. Para generar el nuevo segmento de la malla, se hace un algoritmo de iso-superficie con una RBF [7]. Dada una función de densidad  $S$ , una iso-superficie en el valor  $a$ , se define como el conjunto de puntos  $\vec{p}$  donde  $f(\vec{p}) = a$ . En el contexto de reconstrucción de superficies, donde  $S$  representa una función de distancia signada, la superficie reconstruida corresponde a la iso-superficie donde  $f=0$ .

La función  $S$  a intervalos regulares se usa para construir mallas de poligonos representando la iso-superficie deseada a la resolución especificada. La densidad del nuevo segmento de malla es igual al valor medio de la malla original. Los vértices de los triángulos son ordenados de manera tal que el producto cruz de los bordes adyacentes, sea consistente con el gradiente de la función de densidad  $S$ . El algoritmo de los “marching cubes” es un algoritmo bien conocido de propósito general, que usamos para llenar los huecos, como se ilustra en la Figura 14.

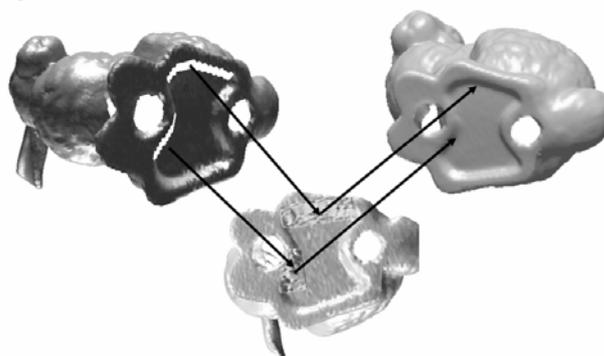


Figura 14. Llenado de huecos identificados en la sección A

## V. RESULTADOS

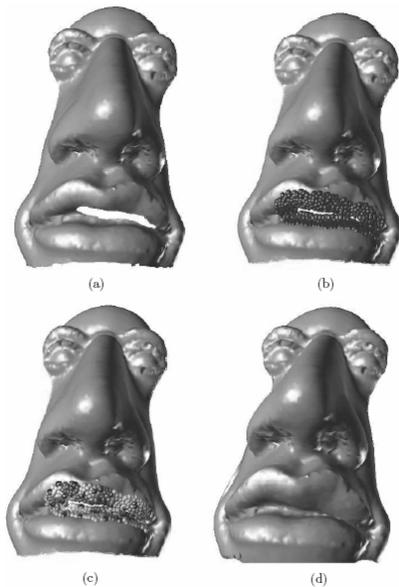
Para validar la funcionalidad del método propuesto para el llenado de huecos en mallas triangulares mediante RBF se

presentan los resultados obtenidos para un objeto de forma libre (Figura 15).

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las etapas de identificación, análisis y llenado de huecos.

**Tabla 1** Resultado de las etapas del proceso para el objeto

| Hueco   | Identificación | Análisis | Llenado |             |                    |
|---------|----------------|----------|---------|-------------|--------------------|
|         | # Aristas      | Torsión  | Centros | Referencias | Umbral             |
| Hueco 1 | 38             | 0.563    | 88      | 38          | $1 \times 10^{-3}$ |



**Figura 15.** a) Objeto inicial, b) Selección del vecindario, en azul se presentan los vecindarios determinados automáticamente, c) Cálculo del interpolante, los colores indican los diferentes clústeres, los puntos negros indican los puntos de evaluación, d) Objeto corregido

## VI. CONCLUSIONES

Se presentó un método automático, simple y efectivo para la corrección de anomalías topológicas asociadas con ausencia de información. Este método es novedoso, debido a dos contribuciones importantes: la primera es la clasificación automática de huecos que deben ser llenados, basada en la estimación de la medida de la torsión de los contornos que definen el hueco. La segunda consiste en el llenado de huecos mediante interpolantes de funciones de base radial, definidos localmente, para reproducir las características topológicas de las regiones alrededor de cada hueco a llenar.

## VII. REFERENCIAS

[1] Alexa, M., Behr, J., Cohen-Or, D., Fleishman, S., Levin, D., and Silva, C., "Point Set Surfaces", IEEE Visualization, pp. 21–28, 2001.  
[2] Bajaj, C., Bernardini, F., and Xu, G., "Automatic Reconstruction of Surfaces and Scalar Fields from 3D Scans", SIGGRAPH'95, pp.109–118, 1995.  
[3] Besl, P., "Advances in Machine Vision", Advances in Machine Vision, Springer Verlag, Chapter 1 – Active Optical Range Sensors, pp. 1–63, 1989.

[4] Besl, P. and McKay, N., "A method for registration of 3D shapes", IEEE Trans. on PAMI, 14 (2). pp. 239–256, 1992.  
[5] Bertalmio, M., Shapiro, G., Caselles, V., and Ballester, C. "Image Inpainting", SIGGRAPH'00, pp.417–424, 2000.  
[6] Buhmann, M., "Radial Basis Function: Theory and Implementations", Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics, 2003.  
[7] Carr, J., Beatson, R., Cherrie, J., Mitchell, T. Fright, W., and McCallum, B., "Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions", SIGGRAPH' 01, pp. 67–76, 2001.  
[8] Carr, J.C., Beatson, R.K., Cherrie, J. B., Mitchell, T.J., Fright, W. R., McLennan, T.J., and Evans, T.R., "Reconstruction and representation of objects with radial basis function", Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 67–76, 2001.  
[9] Carr, J. C., Beatson, R. K., McCallum, B. C., Fright, W. R., McLennan, T. J., and Mitchell, T. J., "Smooth surface reconstruction from noisy range data", Proceedings of the 1st international conference on computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia, Melbourne, Australia, February 11 - 14, ACM Press, pp. 119–ff, 2003.  
[10] Curless, B. and Levoy, M., "A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images", SIGGRAPH' 96, pp. 303–312, 1996.  
[11] Davis, J., Marschner, S., Garr, M., and Levoy, M., "Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion" Proc. First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, Transmission, pp. 428–861, 2002.  
[12] Gopi, M. and Krishnan, S., "A Fast and Efficient Projection Based Approach for Surface Reconstruction", Intern. Journal of High Performance Computer Graphics, Multimedia and Visualization, 1 (1), pp. 1–12, 2000.  
[13] Hartigan, J. and Wong, M. A., "A K–Means Clustering Algorithm", Journal of Applied Statistics, 28 (1), pp. 100–108, 1979.  
[14] Hoppe, H. Surface Reconstruction from Unorganized Points. PhD thesis, Washington University. 1994  
[15] McAllister, D., Nyland, L., Popescu, V., Lastra A. and McCue, C., "Real Time Rendering of Real World Environments", Proc. Rendering Techniques'99, pp. 145–160, 1999.  
[16] Montegranario, H. Reconstrucción de superficies mediante funciones de base radial. IX Simposio Nacional de Tratamiento de Señales, Imágenes y Vision artificial, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Septiembre de 2004.  
[17] Nyland, L., et al., "The Impact of Dense Range Data on Computer Graphics", Proceedings of Multi-View Modeling and Analysis Workshop, pp. 3–10, 1999.  
[18] Nyland, L., Lastra, A., Mc Allister, D., Popescuand, V., McCue, C., and Fuchs, H., "Capturing, Processing and Rendering Real-World Scenes", In Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, Electronic Imaging., PhotonicsWest, SPIE Vol. 4309, pp. 107–116, 2001.  
[19] Oliveira, M., Bowen, B., McKenna, R., and Chang, Y., "Fast Digital Image Inpainting", International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP 2001), Marbella, Spain, pp.261–2665, 2001.  
[20] Pito, R. Mesh integration based on comeasurements. Proceedings of ICIP, vol 2, pp. 397–400, 1996.  
[21] Reuter, P. Point based modelling and rendering using radial basis functions. ACM, 2003.  
[22] Turk, G. Zippered polygon meshes from range images. <http://www.siggraph.org>, 1994.  
[23] Yu, Y., Ferencz, A., and Malik, J., "Extracting Objects from Range and Radiance Images", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 7 (4), pp. 351–364, 2001.

**Jhon William Branch B.** Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Director de Área Curricular Sistemas y Administración de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Integrante del GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial, Categoría A (Excelencia) de Colciencias. Doctor en Ingeniería: Sistemas e Informática, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (2007). El área de énfasis de su investigación es Inteligencia Artificial, Procesamiento Digital de

Imágenes, Reconocimiento de Patrones, Computación Gráfica, Visión 3D, Realidad Virtual y Inteligencia Computacional.

**Flavio Augusto Prieto.** Graduado en Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes, DEA y Doctor del Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Lyon, Francia. Actualmente profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Sus áreas de interés incluyen los Sistemas de Visión Artificial (2D y 3D), la clasificación y Reconocimiento de Patrones y el Diseño Electrónico.

**Pierre Boulanger.** Graduated from Laval University in Engineering Physics. He also received his Masters in Physics from the same university and his PhD. in Electrical Engineering from the University of Montreal. He worked for 18 years at the National Research Council of Canada as a senior research officer where his primary research interest were in 3D computer vision, rapid product development, and virtualized reality systems. Since July 1st 2001, he is working as a professor at the Department of Computing Science at the University of Alberta doing research and teaching on virtualized reality systems. He is also an adjunct scientist and principal investigator for new media at TRILabs and at the Banff Centre. In 2004, Dr. Boulanger was awarded an iCORE industrial chair in Collaborative Virtual Environment.

He has published more than 150 scientific papers in various Journals and Conferences. He is on the editorial board of two major academic journals. Dr. Boulanger is also on many international committees and frequently gives lectures on rapid product development and virtualized reality. He is the founder of the Canadian Virtualized Reality Systems Working Group. He is also the Director of the Advanced Man Machine Interface Laboratory. On the commercial side, Dr Boulanger is the president of PROTEUS Consulting Inc.; an Alberta-based consulting firm specialized in Virtual Reality Applications.

## Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Minas



### Escuela de Ingeniería de Sistemas

#### Misión

La misión de la Escuela de Ingeniería de Sistemas es fomentar y apoyar la generación o la apropiación de conocimiento, la innovación y el desarrollo tecnológico en el área de ingeniería de sistemas e informática sobre una base científica, tecnológica, ética y humanística.



#### Visión

La formación integral de profesionales desde el punto de vista científico, tecnológico y social que les permita adoptar, aplicar e innovar conocimiento en el campo de los sistemas e informática en sus diferentes aspectos, aportando con su organización, estructuración, gestión, planeación, modelamiento, desarrollo, procesamiento, validación, transferencia y comunicación; para lograr un desempeño profesional, investigativo y académico que contribuya al desarrollo social, económico, científico y tecnológico del país.



Escuela de Ingeniería de Sistemas  
Dirección Postal:  
Carrera 80 No. 65 - 223 Bloque M8A  
Facultad de Minas. Medellín - Colombia  
Tel: (574) 4255350 Fax: (574) 4255365  
Email: [esistema@unalmed.edu.co](mailto:esistema@unalmed.edu.co)  
<http://pisis.unalmed.edu.co/>

