

Revisión General de los Modelos de Reconstrucción Tridimensionales desde Imágenes de Rango

A General Review of Three-Dimensional Reconstruction Models from Range Data

Germán Sánchez Torres, Msc., John William Branch B., Msc.
Escuela de Sistemas e Informática
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
gsanche@gmail.com; jwbranch@unalmed.edu.co

Recibido para revisión 30 de Abril de 2008, Aceptado 19 de Mayo de 2008, Versión final 30 de Mayo de 2008

Resumen— Este ensayo presenta una revisión general de trabajos relacionados con la problemática de la reconstrucción de objetos tridimensionales de forma libre desde imágenes de rango. Se describe el problema y se revisa las principales áreas de interés en cada una de las etapas intermedias que componen el proceso general de reconstrucción de superficies con los trabajos más relevantes en el área cubriendo una amplia variedad de técnicas y modelos propuestos como resultados de investigaciones realizadas en las últimas décadas.

Palabras Clave: Reconstrucción de Superficies, Imágenes de Rango, Scanner 3-D, Modelos Tridimensionales.

Abstract— This paper presents a general review related to the problem of three-dimensional objects' reconstruction from range data images. It describes the problem and reviewed the main areas of concern in each of the intermediate steps that make up the overall process of surfaces reconstruction with the most important works in the area covering a wide variety of techniques and models proposed as a result of investigations conducted in recent decades.

Keywords: Surface Reconstruction, Range data, 3-D Scanner, Three-Dimensional Models.

I. INTRODUCCIÓN

El propósito de la reconstrucción tridimensional es convertir conjunto de datos o puntos, en un modelo digital en la memoria del computador, manteniendo una representación de sus características físicas como el volumen y la forma. El problema de la representación y reconstrucción de formas tridimensionales es de gran interés para investigaciones en el área de visión artificial en la última década. El interés surge debido a que la teoría de formas tiene aplicaciones en una amplia variedad de campos, tales como: el diseño geométrico asistido

por computador, automatización de manufactura, mapeo de terrenos, conducción de vehículos, arqueología, restauración de obras de arte, vigilancia, entretenimiento, robótica, visualización científica, medicina y a pesar del interés en la aplicación práctica, el problema tiene mucho interés matemático.

Encontrar un método útil y general para una representación mecanizada de formas ha resultado ser un problema no trivial. Los métodos que usan especificaciones numéricas están usualmente limitados en cuanto a generalidad, presentando alta precisión pero con fuertes restricciones a un dominio específico.

La reconstrucción 3D es un proceso que involucra una serie de etapas, las cuales determinan la precisión y eficacia en la representación final del objeto (ver Figura 1). Estas etapas involucran la obtención de las imágenes desde el mundo real sobre las cuales se estimara la representación final, esto es realizado en la etapa de Adquisición. Típicamente, como resultado de la etapa de adquisición, resulta un conjunto de imágenes de un tipo especial denominado imágenes de rango. Las imágenes de rango a diferencia de las imágenes convencionales codifican la posición espacial de un conjunto discreto de puntos de la superficie del objeto directamente.

Debido a que se pueden adquirir diferentes imágenes del mismo objeto y desde diferentes sistemas coordenados es necesario llevar a cada una de las imágenes a un mismo sistema de referencia, esto es realizado en la etapa de Registro. La adquisición no siempre resulta una labor sencilla, aunque los dispositivos de adquisición modernos brindan mucha libertad de movimiento, la naturaleza arbitraria en la topología de los objetos de nuestra realidad impide en algunas ocasiones la adquisición completa de la información, principalmente

por problemas de oclusión. La corrección de este tipo de anomalías en los datos, así como manejo de la presencia de redundancia causada por segmentos de superficies solapados en la adquisición, se realiza en la etapa de Integración. Finalmente, el conjunto de datos registrados e integrados son utilizados para estimar una representación compuesta de una o varias funciones matemáticas, esto es realizado en la etapa de Ajuste de la Superficie, la cual proporciona el modelo digital 3D completo del objeto. Algunos autores [36], [1], [15] incluyen etapas adicionales como la segmentación o el refinamiento de mallas triangulares como etapas del proceso de reconstrucción, pero estas no son necesarias en todos los modelos de representación de superficies por lo que son etapas dependientes de las técnicas, lo que sugiere que hacen parte de la técnica, mas no del proceso general de reconstrucción. Cada una de las etapas es un campo activo de investigación, en el cual se han desarrollado diversidad de algoritmos y técnicas.

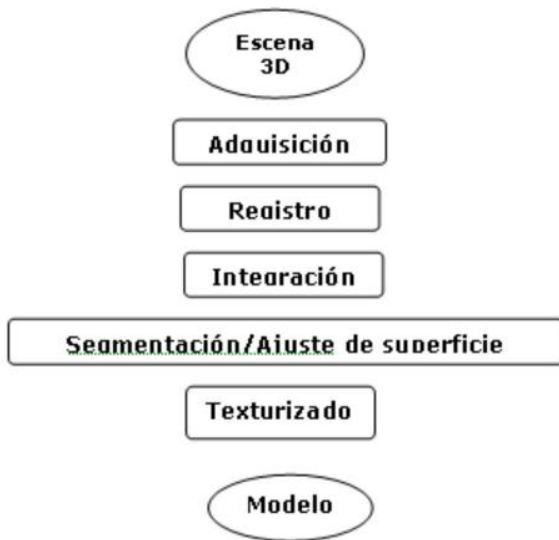


Figura 1. Diagrama de etapas del proceso de reconstrucción.

Este artículo repasa los métodos más importantes propuestos en cada una de las etapas y esta organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se describe los trabajos referentes a la etapa de registro. En la sección 3, se presenta una visión general del proceso de integración. En la sección 4, se describen las técnicas de ajuste de superficies mas utilizadas y finalmente, en la sección 5, se presentan las conclusiones y una visión general de las directrices de los trabajos futuros en el área.

II. REGISTRO

El registro es una etapa del proceso de reconstrucción 3-D, que consiste en emparentar dos o más imágenes, que pueden ser tomadas en diferentes momentos, desde diferentes sensores o desde diferentes puntos de vista. Dado que una simple vista de rango puede contener únicamente los puntos en la escena que son visibles al sensor, es necesario unir múltiples vistas de rango en un único conjunto de puntos, para obtener el modelo completo de la escena.

Tomando la definición presentada por Blais y Levine, el registro de imágenes de rango consiste en [4]:

Dadas N vistas de un objeto en una escena, cada una describiendo la estructura 3-D del objeto como si fuera visto desde un punto de vista particular, deseamos encontrar N transformaciones rígidas de movimiento $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$, que especifiquen las verdaderas posiciones del sensor de rango con respecto a un único marco de referencia (elegido arbitrariamente y, usualmente, el marco de referencia de una de las vistas).

La desalineación que se produce inevitablemente al tomar dos o más imágenes de rango desde puntos de vista diferentes y sin ningún control de las posiciones relativas entre el objeto y el sensor, corresponde al tema central del registro. La información tridimensional capturada en cada imagen esta referenciada al sistema de coordenadas de la cámara, el cual no corresponde al sistema coordenado del mundo. Una vez que la etapa de adquisición culmina con el censado de la superficie del objeto y se realiza la visualización de las imágenes en un sistema de coordenadas único, se obtienen diferentes vistas que se superponen unas a otras, sin coherencia alguna (ver Figura 2a). El propósito del registro es alinear estas vistas de tal manera que la forma del objeto sea recuperado con la mejor precisión posible (Ver Figura 2b).

En el esfuerzo por ajustar las imágenes de manera coherente se hacen evidentes dos situaciones: en la primera, no se tiene certeza de que puntos en el sistema coordenado de una imagen, se corresponde con sus equivalentes en el sistema coordenado de la otra. Este hecho, es conocido como el problema de la correspondencia y constituye la etapa de mayor consumo de tiempo de ejecución de los algoritmos. En la segunda, se requiere una transformación sobre la información tridimensional de una de las imágenes de su sistema coordenado al sistema de la imagen que se eligió como referencia, con el propósito de ajustar ambas imágenes utilizando la información común entre ellas.

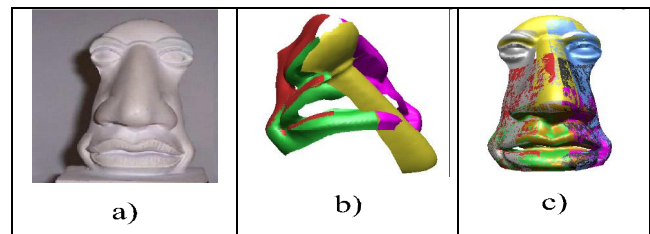


Figura 2. Problemática del registro. a) Objeto original, b) Des alineamiento de imágenes y c) Imágenes registradas

Históricamente, la correspondencia de objetos de forma libre usando datos 3-D, fue realizada en principio por Faugeras y su grupo en INRIA [13], donde demostraron una correspondencia efectiva con el timón de un Renault a principios de la década de los 80's. Este trabajo popularizo el uso de cuaterniones para registro de puntos correspondientes mediante la minimización de una función de energía a través de mínimos cuadrados. La limitación primaria de este trabajo fue que partía de

la existencia probable de regiones planas razonablemente grandes al interior de una forma libre para guiar el proceso de registro. Numerosos trabajos posteriores [29][16][17][6] y [32], constituyen aproximaciones interesantes a la solución del problema de registro, sin embargo, estos trabajos poseen limitaciones tales como la correspondencia en modelos con altas deformaciones, el alto costo de emparejamiento local para porcentajes de oclusión pequeños, entre otras. Dentro de la variedad de propuestas realizadas en el área del registro se puede distinguir una clasificación de acuerdo con las características de alineación de las imágenes antes del registro y con el nivel de presión con que finalmente se registren las imágenes. Esta clasificación divide las técnicas en: técnicas de registro grueso y técnicas para el registro fino.

Al igual que en la definición general, el objetivo de las técnicas de registro grueso es encontrar un conjunto de transformaciones que alineen las imágenes, pero se asume que no se conoce información adicional sobre su alineación inicial, es decir, las técnicas de registro grueso buscan emparejar lo mejor posible un conjunto de imágenes sobre las cuales no se conoce información adicional del sistema coordinado relativo en el cual está cada imagen. En este grupo de trabajos podemos encontrar los trabajos de Sappa et al. [30] que describen un método basado en segmentación mediante detección de bordes, estos puntos representativos o bordes son utilizados para alinear conjuntos pequeños de la imagen y así guiar el proceso general. Sin embargo, no siempre es posible distinguir puntos tan especiales geoméricamente como un borde, esto es, existen objetos que no poseen cambios geoméricos tan notable como los de un borde, y por lo tanto su naturaleza geométrica es completamente suave. Para afrontar esta dificultad, diversas técnicas basadas en estimación de propiedades geométricas como la curvatura, fueron propuestas. Chua y Jarvis [10], usaron curvaturas principales para calcular características invariantes. También, Feldmar y Ayache [14] propusieron un método para estimar desplazamientos rígidos usando curvaturas principales de superficies.

Stein y Medioni [31] propusieron la estructura Splash, la cual es un mapeo que describe las distribuciones de superficies normales a lo largo de un círculo geodésico. La imagen spin presentada por Johnson y Hebert [20], la cual es un descriptor de forma a nivel de datos, ha sido usada en registro. Lucchese et al. [21], explotan la regularidad geométrica obtenida por la transformada de Fourier como un método basado en un dominio de frecuencias para el registro de imágenes de rango. El método DARCES basado en RANSAC de Chen et al. [8], es un método robusto basado en la búsqueda exhaustiva que puede chequear todas las alineaciones de datos posibles entre dos conjuntos de datos, para registrar dos vistas parcialmente solapadas.

En general, para afrontar un problema tan complejo desde el punto de vista del tamaño del espacio de búsqueda, se necesita heurísticas más robustas que estimaciones geométricas de correspondencia. Así, recientemente nuevas técnicas de registro grueso están basadas en técnicas de búsqueda heurística como los algoritmos genéticos [5].

En contraste con los métodos de registro grueso, los métodos de registro fino se basan en la suposición de que se obtuvo inicialmente una buena transformación entre las imágenes. Entonces, las alineaciones precisas se pueden obtener con criterios confiables para medir la calidad de las transformaciones refinadas. El registro fino, es una técnica que busca aumentar la precisión en el acoplamiento entre las imágenes.

Los métodos más conocidos para realizar registro fino de imágenes son las técnicas basadas principalmente en el clásico algoritmo de punto cercano iterativo (ICP). ICP es un procedimiento iterativo que minimiza cada vez el error cuadrado medio, calculado como la suma de las distancias entre puntos en una vista y los puntos más cercanos, respectivamente en otra vista. Este método fue propuesto por Besl y McKay [2] y constituye el método clásico para abordar el problema del registro. Su principal limitación estriba en que a pesar de la satisfactoria convergencia del ICP, solo se puede garantizar un registro correcto cuando una de las imágenes es un subconjunto de la otra. Sin cumplir esto, se pueden alcanzar alineamientos erróneos. Aunque, el ICP es eficiente computacionalmente debido a que en promedio su complejidad es del orden $O(n \log(n))$ donde n es el número de puntos en la imagen, el algoritmo converge monótonamente a un mínimo local.

III. INTEGRACIÓN

La integración es una etapa del proceso de reconstrucción 3-D, que consiste en obtener una representación suave y continua del objeto. Una vez se han registrado las diferentes imágenes de rango utilizadas para el proceso de reconstrucción, se tiene un conjunto de datos en el espacio 3-D cuya conectividad y relación aun no esta muy bien definida, debido a que los datos registrados en la etapa previa generan superficies parciales que poseen huecos, intersecciones poligonales, falsos bordes, entre otros. Adicionalmente, el proceso busca eliminar toda la información redundante presente en aquellos casos en que se realiza un gran número de tomas del objeto y en cada toma se solapan regiones comunes por lo que se obtienen zonas con gran densidad (ver Figura 3).

Siguiendo el trabajo elaborado por Curless, la importancia del proceso de integración de imágenes de rango se describe así [9]:

La etapa de integración es necesaria en el proceso de reconstrucción puesto que los datos registrados en la etapa previa generan superficies parciales que poseen agujeros, intersecciones poligonales, saltos estadísticos, falsos bordes, entre otros, y los objetos reales poseen superficies continuas y suaves.

La Integración ha sido atacada desde diferentes puntos de vista, pero en muchos casos el proceso se hace dependiente de la aplicación para la cual fueron diseñados.

En 1994, Turk y Levoy [33] presentaron un algoritmo llamado Mesh Zippering, como una forma de integrar imágenes de rango, el algoritmo consta de tres fases principales o etapas, 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 agujeros 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 relleno 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.

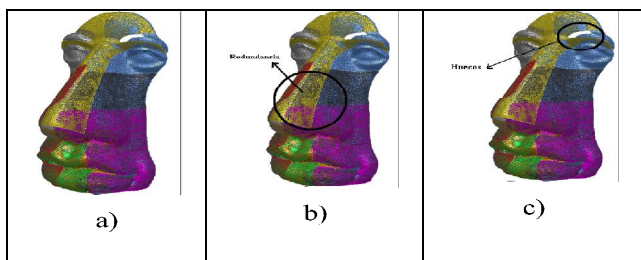


Figura 3. Problemas a corregir con el proceso de integración. a) Imagen registrada, b) Zonas de solapamiento entre imágenes que ocasionan redundancia y c) discontinuidades causadas por errores en el proceso de adquisición.

H. Hoppe [18] introdujo un algoritmo que utiliza una función signada de distancia entre puntos cercanos a la superficie estimada y luego aplica la extracción de iso-superficie 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 co-varianza locales, para a continuación 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 co-varianza es altamente sensible al ruido.

C. L. Bajaj, F. Bernardi y G. Xu [3] 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 las rejillas de ocupación llamadas Octrees. Por otro lado en 1997, Curless [9] 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 agujeros en el modelo integrado. A diferencia de Hoppe [18] 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 más pequeños, hasta que el error se haga menor que un umbral determinado, cuidando que el número de polinomios resultantes no exceda determinado umbral. En 1999 K.Pulli [22] desarrolló una técnica mediante la cual dividiendo el espacio de trabajo en un conjunto de voxels a los cuales se les realiza una clasificación dependiendo de la ocupación volumétrica del objeto en ellos y proyectando jerárquicamente el conjunto de cubos sobre cada una de las superficies de profundidad previamente registradas, cada cubo es clasificado según las siguientes reglas: si la información dice que en todas las superficies esta fuera del volumen del objeto, el cubo es eliminado. Si la información indica en todas las superficies que el cubo pertenece al volumen del objeto, entonces es clasificado como perteneciente al objeto, en cualquier otro caso se dice que el cubo pertenece a la superficie del objeto.

La mayoría de los trabajos en esta área están diseccionados a la corrección de huecos en las superficies generados principalmente por problemas de oclusión. Generar superficies completas en regiones con falta de información implica: primero, la identificación de huecos, y segundo, la generación de nuevos datos en esas zonas. Desafortunadamente, ninguno de estos problemas es trivial, debido a que los huecos creados durante el proceso de escaneo de objetos geoméricamente ricos, puede ser bastante complejo. No obstante, 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.

Los trabajos existentes sobre llenado de huecos se basan en la construcción de una superficie implícita de los datos que interpolan el hueco. Una parte significativa de tal investigación, integra el proceso de llenado del hueco en la reconstrucción de la superficie. Carr et al. [7] proponen un método para reconstruir superficies a partir de nubes de puntos usando Funciones de Base Radial (RBF), la corrección de los huecos se logra de manera implícita reconstruyendo la totalidad de la superficie mediante la interpolación de todos los puntos. En este trabajo se asume la continuidad en la totalidad de la superficie del objeto, es decir, que cualquier hueco o discontinuidad es corregida. Sin embargo, en objetos reales existen discontinuidades que pertenecen a la superficie original y que deben permanecer en las representaciones digitales finales lo que hace complejo este proceso de determinación de huecos reales de los causados en el proceso. La literatura en interpolación de datos dispersos es basta, trabajos como el de Powell [41], Arge [38] y Buhmann [39, 40], describen métodos de interpolación con RBF.

En general, los métodos descritos en la literatura realizan la corrección de anomalías topológicas asociadas con la ausencia de información mediante técnicas manuales de post-procesamiento aplicadas después de la etapa final de la reconstrucción de superficies, o son corregidas de manera implícita durante la

etapa de ajuste de superficies realizando una reconstrucción global del objeto, lo que acarrea altos costos computacionales, a pesar de esto, la corrección de este tipo de anomalías sigue siendo limitada a casos particulares del problema, por lo tanto, una solución general no ha sido propuesta.

IV. AJUSTE DE SUPERFICIES

El objetivo de esta etapa es brindar la mejor estimación digital de una superficie real descrita por un conjunto conocido de puntos (ver Figura 4). Formalmente, el ajuste de superficies se puede definir como [19]:

Sean S una superficie bidimensional perteneciente a un objeto O , incluida en el espacio tridimensional Euclidiano R^3 , y el conjunto de puntos $p_i \in P$ en R^3 , $\forall i=1, \dots, n$, un conjunto de muestras discretas de la superficie S . El ajuste consiste entonces en encontrar una superficie S_0 que aproxime S usando los datos del conjunto P , siendo la superficie reconstruida S_0 topológicamente equivalente a la superficie S del objeto original O .

El ajuste de superficies se concentra en obtener una descripción digital precisa, concisa y aproximada a la superficie real. Para ajustar una representación de una superficie se necesita alguna clase de medida de la precisión y la concisión. La concisión puede ser medida por el número de bytes que se necesitan para almacenar la representación de la superficie ajustada, las representaciones concisas no sólo ahorran memoria, también permiten un procesamiento más rápido de la superficie. La precisión de la superficie ajustada determina la cercanía entre la superficie física y la superficie ajustada S_0 . Puesto que la superficie es conocida solo por algunas muestras ruidosas, la precisión es medida usando algunas suposiciones sobre su ruido. Por ejemplo, se puede asumir que las muestras incluyen ruido gaussiano aditivo el cual no es correlacionado entre diferentes muestras.

Los métodos de ajuste de superficies se pueden clasificar como métodos de aproximación o interpolación si la superficie final reconstruida pasa cerca o exactamente, respectivamente, todos los puntos iniciales. Los métodos de interpolación construyen superficies que pasan exactamente a través del conjunto completo de puntos, mientras los métodos de aproximación sólo requieren que la superficie se acerque a los puntos y tome algunos como referencia. Los métodos que pertenecen a la segunda clase normalmente son la elección más adecuada, dado que los datos con los que se trata suelen contener ruido. Es posible también, realizar otra clasificación de los métodos de ajuste. Estos se pueden clasificar también como globales o locales de acuerdo al grado de influencia de cada punto sobre la superficie. En los métodos globales, todos los puntos son utilizados para definir la función matemática de ajuste, mientras que en los métodos locales, sólo puntos cercanos son utilizados para calcular un segmento de la superficie. Muchos esfuerzos se han dirigido a encontrar un

método general que permita obtener el modelo matemático de un objeto a partir de las muestras tomadas de la superficie de éste. Como resultado de estos esfuerzos, y del hecho de que se trata de una tarea no trivial, muchos métodos de representación de superficies han sido desarrollados, entre los que se pueden destacar: las mallas triangulares, las funciones de base radial y las superficies NURBS (Non Uniform Rational B-splines) [42, 43, 44, 45].

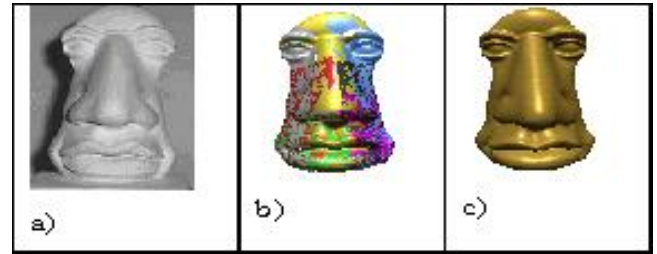


Figura 4. Proceso de ajuste de superficies. a) Objeto real, b) Conjunto de imágenes integradas y c) modelo digital final.

A. Modelos de representación de superficies

Rejillas

Es una versión discreta de una superficie explícita $z = f(x, y)$. Dada una rejilla 2D (con frecuencia rectangular) en el plano xy definida en ambas coordenadas de a hasta b , se puede asociar un valor $z_{i,j}$ a cada punto (x_i, y_i) de la rejilla de tal forma que: $f(x_i, y_i)|_a^b = z_i$ tal que $a \leq x_i \leq b$ y $a \leq y_i \leq b$. Por supuesto, también es posible tener una rejilla en otro sistema de coordenadas. Las rejillas son relativamente fáciles de calcular, pero debido a que son discretas, se debe usar alguna clase de técnica de interpolación para obtener los puntos en la superficie entre los puntos de la rejilla. Las rejillas se utilizan con frecuencia como representación intermedia cuando se construyen representaciones más complejas.

Mallas Triangulares

Una malla triangular plana consiste en las coordenadas 3D de un conjunto de puntos en la superficie, y de una estructura que describe como estos puntos están conectados con triángulos. La malla representa una superficie continua pero no suave. La densidad de triángulos en diferentes áreas de la superficie, puede ser variada para lograr buenas aproximaciones de la superficie física en áreas con detalles finos o curvaturas elevadas sin pérdida de simplicidad. Las mallas triangulares son una representación común de superficies de las que no se requiere un conocimiento previo y complejo de su topología. La simplicidad de las mallas triangulares planas radica en el hecho de que tres puntos en el espacio 3D están contenidos en un único plano.

Subdivisión de Superficie

Una malla puede ir acompañada de reglas acerca de cómo subdividirla en mallas más finas. La aplicación de estas reglas, recursiva e indefinidamente, conduce a una superficie con un

mayor grado de suavidad que la malla original. El grado de suavidad depende de las reglas de subdivisión.

La representación consiste en una malla original y sus reglas. Esto es conveniente para representar superficies suaves (o segmentos de curva suave) cuya geometría y topología sea compleja. El inconveniente de esta representación es que los puntos en las superficies no están dados de forma explícita.

Superficies de Funciones Explícita

Una superficie de función explícita es la gráfica de una función $z = f(x_i, y_i)$. El ajuste de tales superficies es relativamente simple, pero no todas las superficies físicas pueden ser modeladas como superficies de funciones debido a

que, en muchas superficies, existe al menos un punto (x_i, y_i) ara el cual están asociados dos o más valores de z .

Algunas veces con un cambio de variable, es posible convertir una superficie de función en una superficie paramétrica. Por ejemplo, una esfera no puede ser representada por una superficie de función usando coordenadas cartesianas, pero usando coordenadas esféricas el radio puede ser tratado como una función del ángulo.

Superficies Implícitas

Una superficie implícita es el conjunto de nivel de una función $f(x_i, y_i)$. Usualmente la función está definida de tal forma que la superficie buscada sea igual al conjunto cero

de la función $f(x_i, y_i) = 0$. Una representación común de superficies implícitas para superficies de reconstrucción son las supercuadráticas, o su extensión en hipercuadráticas e híbridas hipercuadráticas. Las superficies implícitas, se usan con frecuencia en métodos volumétricos para la construcción de

triangulaciones. En estas aplicaciones la función $f(x_i, y_i, z_i)$ se escoge como una función de distancia [9], [12]. La clase de superficies implícitas es mucho más grande que la clase de superficies paramétricas, puesto que todas las superficies paramétricas pueden ser transformadas a implícitas pero no lo contrario.

Superficies Paramétricas

Una superficie paramétrica es una colección de puntos que pueden ser escritos como: $x = f_1(u, v)$, $y = f_2(u, v)$, $z = f_3(u, v)$, donde (u, v) son los parámetros de la superficie.

Una parametrización trivial es: $x = u, y = v, z = f(u, v)$ la cual es una superficie de función explícita. Escogiendo otras parametrizaciones, superficies más complejas pueden ser representadas. Las superficies paramétricas tienen un buen número de propiedades, pero en problemas de ajuste puede ser difícil encontrar una parametrización adecuada. Las superficies paramétricas son usadas en muchas formas por muchos de los sistemas modernos de CAD/CAM.

Superficie B-Spline por Producto Tensorial

Las curvas Spline son segmentos polinomiales donde el cambio de polinomios ocurre en puntos de control. Sólo a las derivadas de orden superior se les permite ser discontinuas en los puntos de control. Todas las derivadas de orden inferior son continuas en todas partes excepto en puntos de control coincidentes.

Una superficie B-Spline paramétrica de producto tensorial $S(u, v) \notin R^3$ de grados (k, q) se define así:

$$S(u, v) = \sum_{i=k}^g \sum_{j=q}^h a_{ij} N_{i,k}(u) M_{j,q}(v) \tag{1}$$

Donde los coeficientes $a_{ij} \in R^3$ son llamados puntos de control, $N_{i,k}(u)$ y $M_{j,q}(v)$ son bases B-Spline univariadas de grado k y q , definidos para la secuencia de control $\Lambda = \{\lambda_{-k}, \dots, \lambda_{g+k+1}\}$ y $\Gamma = \{\gamma_{-q}, \dots, \gamma_{h+q+1}\}$ respectivamente.

Las superficies B-Spline son adecuadas para propósitos de diseño. Esto gracias a que la superficie está completamente determinada por sus puntos de control $a_{i,j}$. Moviendo un punto de control, la superficie cambia de manera predecible. La propiedad de soporte local implica que el movimiento de un punto de control sólo afecta 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. En muchas aplicaciones los grados (k, q) se escogen menores o iguales a tres.

Superficie NURBS (Non Uniform Racional B-Splines)

Un inconveniente con las curvas y superficies B-Spline es que las secciones cónicas no pueden ser representadas exactamente. Para tener una representación uniforme tanto de superficies de forma libre como de secciones cónicas, muchos de los sistemas CAD/CAM modernos han incorporado el uso de NURBS. Una superficie NURBS se define como:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=k}^g \sum_{j=q}^h N_{i,k}(u) M_{j,q}(v) a_{i,j} w_{i,j}}{\sum_{i=k}^g \sum_{j=q}^h N_{i,k}(u) M_{j,q}(v) w_{i,j}} \tag{2}$$

Nuevamente, los coeficientes $a_{ij} \in R^3$ son los puntos de control, $N_{i,k}(u)$ y $M_{j,q}(v)$ son bases B-Spline de grado k y q , definidos para la secuencia de control $\Lambda = \{\lambda_{-k}, \dots, \lambda_{g+k+1}\}$ y $\Gamma = \{\gamma_{-q}, \dots, \gamma_{h+q+1}\}$ respectivamente y los grados de libertad adicionales comparados con los de las superficies B-Spline, son representados por los pesos $w_{i,j}$ (ver Figura 5).

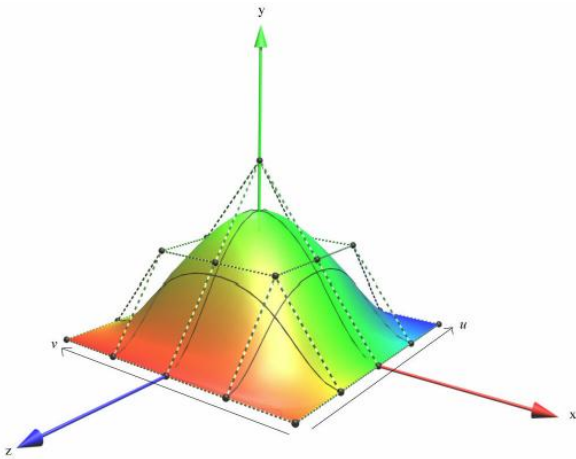


Figura 5. Ejemplo de superficie NURBS

Si estos pesos junto con los puntos de control se asumen desconocidos en una aplicación de ajuste, entonces los problemas resultantes pueden llegar a ser no lineales. Por eso es común en los procedimientos de ajuste hacer todos los pesos igual a uno. La consecuencia de esta elección es que el denominador de la ecuación anterior, llega a ser igual a uno y hemos obtenido exactamente el mismo problema de ajuste como en el caso no racional. Por lo tanto, al utilizar los grados de libertad extras que las NURBS proveen, en lugar de los B-Splines no racionales, estaremos tratando con un problema no lineal durante el proceso de ajuste.

NURBS por Pedazos

Las superficies cortadas especifican una curva NURBS que limita la superficie NURBS para crear una superficie NURBS que contiene huecos o límites suaves. Las curvas cortadas son curvas en el espacio paramétrico de la superficie. Una implementación aproximada puede estar basada en la definición cortada de OpenGL: "A trimming region is defined by a set of closed trimming loops in the parameter space of a surface".

Cuando un laso se orienta en sentido contrario a las manecillas del reloj, el área dentro del laso es retenida, y la parte exterior es descartada. Cuando el laso se orienta en el sentido de las manecillas del reloj, el área en el interior del laso se descarta y el resto es retenido. Los lasos pueden ser anidados, pero un laso anidado se puede orientar en forma opuesta al laso que lo contiene. Un laso cortado consiste de una secuencia conectada de curvas NURBS y segmentos de curvas lineales. El último punto de cada curva en la secuencia debe ser el mismo que el primer punto de la próxima curva, y el último punto de la última curva debe ser el mismo que el primer punto de la primera curva. Estos modelos han sido utilizados por diferentes autores para proponer técnicas de ajustes de superficies de diferentes dominios o diferentes aplicaciones. Históricamente podríamos anotar el trabajo del ingeniero francés Bezier presento un notable avance en el ajuste de superficies en el año 1962. Trabajando para la compañía Renault en el diseño de carrocerías de automóviles, Bézier desarrolló la teoría de curvas y superficies de Bézier. Las superficies de Bézier son combinaciones lineales

de los polinomios de Bernstein, expresados como productos tensoriales de funciones paramétricas univariadas, las cuales pueden modelar una superficie, a partir de un conjunto de puntos llamados puntos de control. Las superficies de Bézier presentan el inconveniente de la influencia global de los puntos de control, es decir, que el movimiento de un punto de control, influye en la totalidad de la superficie, característica no deseable en el diseño.

En 1972, Cox [11] generalizó las curvas y superficies de Bézier para dar lugar a las curvas y superficies B-spline. Las superficies B-Spline incorporaron importantes propiedades mediante la inclusión del vector de nodos (knots), como la propiedad de modificación local de la superficie y la reducción del orden de las funciones base B-Spline, entre otras. Debido a la propiedad de modificación local, las B-Spline poseen menor error de ajuste sobre los puntos de control en comparación con las superficies de Bézier. A pesar de las bondades de las superficies B-Spline, estas presentan como inconveniente la imposibilidad de representar superficies cónicas y en general superficies arbitrariamente curvadas. Eck et al. [12] reconstruyen una superficie B-spline de topología arbitraria sin asistencia del usuario. En este punto, el uso de knots libres ha sido un tema de investigación de autores como Schwetlick [28] y Schutze [27].

En 1975, Versprille [34] extendió las superficies B-spline a B-Spline racionales no uniformes, más conocidas como NURBS. Muchas de las propiedades y algoritmos sobre las NURBS, son presentados por Piegl y Tiller [23]. Una extensión de las NURBS, son las NURBS dinámicas (D-NURBS), en las cuales las curvas o superficies varían con el tiempo, haciendo los pesos $w_{i,j}$ dependientes del tiempo. Las NURBS por sus propiedades de modificación local, representación de superficies cónicas y arbitrariamente curvadas, rápidamente ganaron aceptación, convirtiéndose a la fecha en un estándar en los sistemas CAD/CAM y en el intercambio de especificaciones gráficas de diseño. Las NURBS incorporan factores de peso para dar mayor flexibilidad a la superficie; estos factores especifican que tanto influye un punto dentro de su localidad y pueden ser empleados para mejorar el ajuste de la superficie sobre puntos de control; aunque, la manipulación de los pesos implica tratar con problemas no lineales durante el proceso de ajuste. Al igual que las superficies de Bézier y las superficies B-Spline, las NURBS requieren que los puntos de control posean topología rectangular; esto es, se requiere que los datos sean ordenados y que un recorrido por fila sobre éstos, reporte la misma cantidad de puntos en cada una de ellas.

En cuanto a la determinación de los parámetros de las NURBS, Laurent [35] usa una versión mejorada del algoritmo "Polak-Ribiere" para minimizar algunos costos funcionales sin la reducción del número de parámetros. En este sentido, diferentes aproximaciones se han presentado para solucionar el problema de optimización de la superficie NURBS. En el 2000, Weinert [37] empleó una estrategia evolutiva para aproximar superficies NURBS a conjuntos de puntos 3-D. La estrategia consistía en dejar fijos los puntos ubicados en el borde de la

superficie NURBS durante el proceso de optimización, lo que permitía reducir la dimensión del espacio de búsqueda, determinar la ubicación de los puntos de control y determinar los valores de los knots de la superficie NURBS, de manera que la distancia a la superficie original fuera la más cercana posible.

Randrianarivony [24] considera el problema de reconstruir una superficie desde muestras ruidosas por aproximación del conjunto de puntos con superficies NURBS. Este autor se enfoca en que la secuencia de knots debe ser parte de las variables desconocidas que incluyen los puntos de control y los pesos para encontrar la posición óptima, y demuestran como los knots libres contribuyen eficientemente a optimizaciones no lineales. Finalmente, realizan una aplicación de un clúster para la implementación de éstas NURBS. Este método en realidad, sólo es aplicado a curvas de superficies NURBS; no ha sido aplicado al trabajo con objetos reales y las pruebas fueron realizadas con datos sintéticos.

Trabajos recientes [25], [7], [26] utilizan técnicas de interpolación como las funciones de base radial debido a que brindan mayor precisión y control en el ajuste. En general, en el problema de la interpolación con RBF se requiere encontrar una función $s(x)$, que aproxime una función $f(x)$ desconocida, a partir de un conjunto conocido de valores o conjunto de puntos. En las pasadas décadas las funciones de base radial, o de forma más general, los kernels condicionalmente definidos positivos fueron muy utilizados para la construcción de funciones multivariadas desde datos dispersos. Las selecciones más usadas de la función RBF incluyen, el Kernel Gaussiano, la Distancia Euclídea, la Multicuádrada Robusta, la Multicuádrada Inversa y la TPS (Thin Plate Spline). En particular, las funciones de base radial no necesitan que los puntos estén distribuidos en alguna rejilla regular, convirtiéndose esto en una de sus principales ventajas frente a técnicas como las NURBS. Sin embargo, y a pesar de sus ventajas, desde el punto de vista computacional las funciones de base radial poseen complejidad espacial y temporal de orden exponencial, causado principalmente en el cálculo del interpolante, esto debido a que los kernel globales generan grandes sistemas de ecuaciones cuando son combinados con las altas cantidades de puntos generados por los escáneres 3D.

V. CONCLUSIONES

Numerosos trabajos han sido propuestos para resolver cada uno de los problemas que se afronta en el proceso de reconstrucción 3-D. En general, en la etapa de adquisición el desarrollo de dispositivos más flexibles y de mayor precisión direccional las investigaciones, aunque desarrollos en esta etapa pertenecen a ciencias diferentes a la ciencia de la computación.

En la etapa de registro, se carece de un método robusto que acople vistas automáticamente y sin necesidad de pre-alineamientos. En este campo, nuevas características geométricas están siendo exploradas acompañadas de la idea del análisis de regiones en vez de registro basado en puntos.

La tendencia en esta área se direccionan en el estudio de propiedades geométricas no comunes, como la torsión, el operador de forma, entre otras. La etapa de integración, es quizás la etapa en las que se podría notar que la solución existente es más cercana a la solución general del problema. Sin embargo, la idea de reproducir grandes segmentos de superficies faltantes es aun un problema abierto.

Finalmente, en la etapa de ajuste, los trabajos futuros se centran en el desarrollo de las técnicas interpolación de superficies, más que en las técnicas de aproximación, debido principalmente a la pérdida en la representación de los detalles finos, como texturas o pequeños bordes, que se presentan en los objetos reales y que se pierden por el excesivo suavizado en las técnicas de aproximación.

En general, la reconstrucción de objetos de forma libre es un tema de alto interés dentro de la comunidad de visión artificial, sus diversas aplicaciones inmediatas y la posibilidad de tener sistemas autónomos provistos de subsistemas de visión que le permitan analizar y reconocer su entorno, son tópicos que motivan los trabajos en esta área. A pesar de los números trabajos que en el área se han realizado, no se cuentan con técnicas generales de reconstrucción, por lo que las investigaciones en esta área constituyen un problema abierto en el área que comprende las técnicas de visión artificial. Aunque actualmente, la tarea de reconstrucción 3-D requiere altos costos computacionales, el desarrollo de las tecnologías de cómputo hará, a corto plazo, posible la idea de tener sistemas de visión 3D en tiempo real. La reconstrucción 3-D es la base para construir sistemas de visión artificial de reconocimiento cercanos al comportamiento de los humanos, aunque en algunos aspectos parezcan disímiles, debido a que la reconstrucción tridimensional enfatiza en los detalles y en modelos de altas precisiones, y por el contrario, los sistemas humanos enfatizan en las generalidades.

REFERENCIAS

- [1] Benkó and Tamás Várady. Direct Segmentation of Smooth, Multiple Point Region. IEEE, 2002.
- [2] Besl, P. (1992). A method for registration of 3-d shapes. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, 14.
- [3] Bajaj, C., Bernardini, F., and Xu, G., "Automatic Reconstruction of Surfaces and Scalar Fields from 3D Scans", SIGGRAPH'95, pp.109-118, 1995.
- [4] G. Blais, M. L. (1995). Registering multiview data to create 3D computer objects. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17.
- [5] Branch, J. (2005). Correspondencia de puntos empleando algoritmos genéticos para el registro de múltiples vistas de imágenes de rango.
- [6] Brou, P. (1983). Using the gaussian image to find the orientation of an object. Int. Journal Robotics, 3.
- [7] Carr, J. (2001). Reconstruction and representation of d objects with radialbasis function.
- [8] Chen, C. (1999). Ransac-based darces: A new approach to fase automatic registration of partially overlapping range images. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(11).
- [9] Curless, B. and Levoy, M., A Volumetric Method for Building

- Complex Models from Range Images”, SIGGRAPH’ 96, pp. 303-312,1996.
- [10] Chua, C. (1996). 3d free-form surface registration and object recognition. *International Journal of Computer vision*, 17.
- [11] Cox, M. “The Numerical Evaluation of B-Splines” *J. Inst. Mathematics and Applications*, Vol. 10. 1972, pp.134-1
- [12] Eck, M. and Hoppe, H. “Automatic Reconstruction of B-Spine Surfaces of k , NY, 1996, pp. 325-334. Arbitrary Topological Type,” *Proc. 23rd Int’l. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques SIGGRAPH ’96*, ACM, New Yor.
- [13] Faugueras, O. (1986). The representation, recognition, and locating of 3d objects. *International Journal of Robotics Research*, 5.
- [14] Feldmar, J. (1996). Rigid affine and locally affine registration of free-from surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 18(2).
- [15] Natasha Gelfand and Leonidas J. Guibas. *Shape Segmentation Using Local Slippage Analysis*. Eurographics Symposium on Geometry Processing. 2004.
- [16] Haralick, R. (1989). Pose estimation from corresponding point data. *Machine Vision for Inspection and Measurement*.
- [17] Horn, B. (1987). Closed-form solution of orientation using unit quaternions. *Journal of Optica Society of America*, 4.
- [18] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, McDonald, T. J.A., and Stuetzle, W., Surface reconstruction from unorganized points”, *SIGGRAPH’92*, pp. 71-78, 1992.
- [19] Hrádek, J. “Methods of surface reconstruction from scattered data”. Technical Report. Department of Computer Science and Engineering University of West Bohemia in Pilsen. 2003 39.
- [20] Johnson, A. (1999). Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3d scenes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, 21.
- [21] Lucchese, L. (2002). A frequency domain technique for range data registration. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(11).
- [22] Pulli, K., Multiview Registration for Large Data Sets”, *3DIM’99*, pp. 160-168, 1999.
- [23] L. Piegl. *The NURBS Book*. Morgan-Kaufmann, 1997.
- [24] M. Randrianarivony and G. Brunnett. Parallel implementation of surface reconstruction from noisy samples, 2002. SFB preprint 02-16, Technische Universität Chemnitz.
- [25] R.Beatson (2005). Fast solution of the radial basis function interpolation equations: Domain decomposition methods.
- [26] Sánchez G., Branch, JW., Boulanger, P. Reconstrucción de Objetos de Topología Arbitraria Mediante Selección de Centros para la Interpolación con Funciones de Base Radial. *Revista Dyna*, Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Noviembre de 2006.
- [27] T. Schütze. Diskrete quadratmittel approximation durch splines mit freien knoten. PhD thesis, Mathematicx faculty, 1998.
- [28] H. Schwetlick. Least squares approximation by splines with free knots. *BIT* 35, 3, 1995.
- [29] Schwartz, J. (1987). Identification of partially obscured objects in two and three dimensions by matching noisy characteristic curves. *Int. Journal Robotics*, 6.
- [30] Sappa, A. (2001). Range image registration by using an edge-based representation. <http://www.siggraph.org>.
- [31] Stein, F. (1992). Structural indexing: Efficient 3-d object recognition. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, 14.
- [32] Taubin, G. (1988). Algebraic nonplanar curve and surface estimation in 3-space with applications to position estimation. Technical report, Brown University.
- [33] Turk, G. (1994). Zipped polygon meshes from range images. <http://www.siggraph.org>.
- [34] K. Versprille. Computer-aided design applications of the rational b-spline Approximation form. Technical report, 1975.
- [35] P. Laurent. Optimization of a nurbs representation. *Computer Aided Design*, 25, 1999.
- [36] Vanco. A Direct Approach for the Segmentation of Unorganized Points and Recognition of Simple Algebraic Surfaces. PhD Thesis. University of Technology Chemnitz 2002.
- [37] K. Weinert. Discrete nurbs-surface approximation using an evolutionary strategy. Technical report, 2000.
- [38] Arge, A. Approximation of scattered data using smooth grid functions. Technical Report STF33 A94003, SINTEF. 1994.
- [39] Buhmann, M. Multivariate interpolation in odd-dimensional Euclidean spaces using multiquadrics, *Const. Approx*; 6; 21-34.1990.
- [40] Buhmann, M. *Radial Basis Functions: Theory and Implementations*. Cambridge University Press. 2003.
- [41] Powell, M. The theory of radial basis function approximation, in *Advances in Numerical Analysis II*, W.A. Light, ed., Clarendon Press, Oxford, pp. 105. 1990.
- [42] WENDLAND, H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in computational Mathematics* 4, 389-396. 1995.
- [43] BAXTER, B. *The Interpolation Theory of Radial Basis Functions*. PhD thesis, Trinity College. 1992.
- [44] KOJEKINE, N and SAVCHENKO, V. Surface reconstruction based on compactly supported radial basis functions, *Geometric modeling: techniques, applications, systems and tools*, pp 218—231, Kluwer Academic Publishers. 2004.
- [45] FLOATER, M. and ISKE, A. Multistep scattered data interpolation using compactly supported radial basis functions. *Journal of Comp. Appl. Math.*, 73:65–78. 1996.

Germán Sánchez T., Ingeniero de Sistemas, Magíster en Ingeniería de Sistemas, Estudiante del Doctorado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Sus áreas de interés están relacionados con el campo de la visión artificial y el aprendizaje de máquinas.

John William Branch., Ingeniero de Minas, Magíster 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 Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 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



Escuela de Ingeniería de Sistemas

Pregrado

- ❖ Ingeniería de Sistemas e Informática.



Posgrado

- ❖ Doctorado en Ingeniería-Sistemas.
- ❖ Maestría en Ingeniería de Sistemas.
- ❖ Especialización en Sistemas con énfasis en:
 - Ingeniería de Software.
 - Investigación de Operaciones.
 - Inteligencia Artificial.
- ❖ Especialización en Mercados de Energía.

Áreas de Investigación

- ❖ Ingeniería de Software.
- ❖ Investigación de Operaciones.
- ❖ Inteligencia Artificial.

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
<http://pisis.unalmed.edu.co/>

