

Extracción de contornos en tomografías y visualización 3D

Homero V. Rios, Antonio Marín^{*}, Martín Acosta, Joaquín Peña y Nora E. Cancela

Laboratorio Nacional de Informática Avanzada, A.C.
Rébsamen 80, Xalapa, Veracruz, 91090

^{*} Facultad de Física e Inteligencia Artificial
Universidad Veracruzana
Sebastián Camacho No. 5
Xalapa, Veracruz, 91090

Resumen

La cuantificación e interpretación de estructuras en imágenes de tomografía puede facilitarse empleando técnicas de segmentación orientadas a contornos. En este trabajo mostramos la aplicación y comparación de dos técnicas alternativas, que son el seguimiento de bordes y los contornos activos para extraer estructuras en imágenes de tomografía. Posteriormente las estructuras son visualizadas en tercera dimensión empleando técnicas de realidad virtual.

1. Introducción

La segmentación es uno de los problemas clásicos en el análisis de imágenes y consiste en agrupar los pixels en regiones perceptualmente significativas [2]. Desafortunadamente, el realizar esta separación automática en regiones, no es nada fácil, y los criterios de agrupamiento varían de un problema a otro, sin haberse logrado aún, imitar la capacidad visual de los seres humanos [5].

Por otra parte, puede decirse que para ciertos ambientes controlados del tipo industrial, sí se dispone de varias soluciones para el problema de la segmentación. La razón de esto consiste en que al controlar la iluminación, la posición relativa entre la cámara y los objetos, y muchas veces la coloración de los mismos, se simplifica bastante el problema [11].

Sin embargo, existen muchas aplicaciones de interés en donde la segmentación continúa siendo un problema no trivial. Una de estas aplicaciones es el análisis de imágenes biomédicas provenientes de diferentes tipos de equipos: ultrasonido, tomografía computarizada (TC), resonancia magnética (RM), etc.

El problema se complica aún más ya que en muchos diagnósticos, o sesiones preoperatorias, no es suficiente con examinar una sola imagen (digamos una placa de rayos-X), sino que se requiere analizar una secuencia o pila de imágenes y así elaborar un modelo tridimensional (muchas veces sólo mental), de las estructuras de interés. Este tipo de problemática, se presenta por ejemplo, al analizar secuencias de imágenes de ultrasonido de la próstata, previamente a una operación [1]. Otra situación análoga ocurre en el análisis de imágenes de TC para reconstruir la forma de huesos como el fémur y así poder realizar operaciones asistidas con robots [6]. Un tercer ejemplo es la reconstrucción de modelos del cerebro a partir de imágenes de RM [4].

Para facilitar la labor del médico en el análisis de “stacks” de imágenes se han propuesto métodos de segmentación que operan en imágenes individuales, o bien que usan el volumen de datos directamente, para determinar las regiones 3D de importancia.

Los métodos de segmentación podemos clasificarlos en los que:

- usan información de color o tonalidad solamente
- emplean información espacial
- analizan movimiento visual
- requieren modelos geométricos y/o cinemáticos/dinámicos
- son combinaciones de los anteriores

Otra forma de caracterizar los métodos de segmentación se basa en que si estos son guiados sólo por datos o por información a priori. Adicionalmente se podría decir que algunos emplean información local solamente (por ejemplo el seguimiento de contornos), mientras que otros son más globales (transformación de Hough, minimización de costos en el recorrido de gráficas, o los contornos activos).

En este trabajo aplicamos dos métodos de segmentación que emplean información espacial y buscan determinar el contorno de las regiones de interés. El primer método es el seguimiento de contornos del sistema DIAS y el segundo una variante de los contornos activos que incorpora fuerzas eléctricas que desarrollamos en nuestra institución. Los métodos son aplicados a una TC de una cabeza humana, imagen por imagen, y al final se busca reconstruir la forma tridimensional.

En las secciones siguientes se explican estos métodos y posteriormente se presentan los resultados obtenidos y se comparan entre sí.

Lo interesante del trabajo es que los contornos son extraídos automáticamente de cada imagen con un mínimo de parámetros y el desempeño de los algoritmos es bastante razonable.

2. Seguimiento de contornos

El seguimiento de contornos es una técnica que agrupa a una cadena de puntos en la imagen que tienen propiedades comunes, de modo que las regiones que son separadas por esta colección de puntos tengan un cambio significativo en esas propiedades. Los puntos seleccionados de ésta constituyen el contorno de una región.

Para procesamiento local, una propiedad que podemos considerar para determinar la similitud de dos puntos vecinos, (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , es el vector gradiente definido en cada uno de ellos [5]. Si denotamos por $\nabla f(x,y)$ y $\alpha(x,y)$ a la magnitud y dirección, respectivamente, del vector gradiente en el punto (x,y) , diremos que los puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) son similares en magnitud y dirección si

$$|\nabla f(x_1, y_1) - \nabla f(x_2, y_2)| < M$$

y

$$|\alpha(x_1, y_1) - \alpha(x_2, y_2)| < A$$

donde M y A son umbrales positivos. Recorriendo puntos en la imagen que son vecinos entre sí y que cumplen con esta propiedad, obtenemos el contorno de un objeto.

Para nuestras pruebas usamos una función del sistema DIAS que realiza el seguimiento de contornos de una manera distinta a la anterior. El método se basa en clasificar los puntos en dos tipos, punto del fondo o punto del objeto, a partir de un valor de gris v_0 y un punto inicial sobre el contorno. Un punto vecino es considerado parte del objeto si su valor de gris es mayor que v_0 , y del fondo en caso contrario. Un punto del contorno es aquel que tiene como vecinos al menos a un punto del fondo y a un punto del objeto.

3. Contornos activos con fuerzas eléctricas

Los contornos activos o “snakes” inicialmente propuestos por Kass et al. [7] son una herramienta fundamentada en la minimización de la energía de un contorno en términos de restricciones internas y externas, basándose principalmente en relaciones de elastodinámica y fuerzas aplicadas [8].

La energía potencial de un contorno activo se puede dividir en dos partes, una que contenga las fuerzas internas descrita por:

$$V_i(\mathbf{v}) = \int_0^1 \left(\omega_1(s) |\mathbf{v}_s|^2 + \omega_2(s) |\mathbf{v}_{ss}|^2 \right) ds, \quad (1)$$

en donde los subíndices de $\mathbf{v}$ denotan diferenciación y las funciones ω_1 y ω_2 son las encargadas de determinar la proporción en que serán aplicadas sobre el contorno la fuerza de tensión $\mathbf{v}_s(s)$ y la rigidez $\mathbf{v}_{ss}(s)$ respectivamente.

La energía potencial externa queda dada por:

$$V_e(\mathbf{v}) = \int_0^1 P(\mathbf{v}(s)) ds, \quad (2)$$

en donde $P(\mathbf{v})$ es una función potencial escalar definida en el plano de la imagen la cual es calculada normalmente a través de procesamiento de imágenes. A partir de las ecuaciones anteriores (1) y (2) se puede determinar el mínimo de energía del contorno, el cual convergirá hacia los bordes en la imagen.

Para acelerar la convergencia del método, se utilizó etapas multiescales, sin embargo esto provoca que en ciertos casos el contorno se enrolle sobre sí mismo. Este problema fue resuelto añadiendo una densidad de carga eléctrica sobre todo el contorno, lo cual provoca además que los puntos de control que definen al contorno se distribuyan en las regiones de alta curvatura [9].

El potencial eléctrico generado por la densidad de carga queda dado por:

$$V(\mathbf{v}) = \frac{1}{\epsilon} \int \frac{dq}{r}, \quad (3)$$

en donde el parámetro ε determina la magnitud de la fuerza ejercida por la densidad dq a una distancia r .

Al añadir este término a la minimización de energía, el contorno evolucionará hacia las características deseadas en la imagen, dependiendo de los valores de los parámetros c , ω_1 , ω_2 y ε , los cuales determinan la intensidad de las fuerzas correspondientes a estos.

4. Experimentos y resultados

En primer lugar, se contó con un “stack” de 72 imágenes de tomografías de la cabeza humana (rebanadas), que comienzan aproximadamente a la altura de la nariz hasta la frente (numeradas de 1..72). Cada imagen estaba codificada en 12 bits (4096 tonos de gris) con un tamaño de 256 x 256 pixels, las cuales fueron convertidas a 8 bits en tonos de gris.

4.1 Seguimiento de Contornos en DIAS

El procesamiento de imágenes se realizó en un sistema llamado DIAS (Digital Image Analysis System), codificando un programa en lenguaje Lambda para obtener los contornos de cada imagen. Dado que DIAS incluye una gran cantidad de rutinas para el procesamiento de imágenes, esta es la razón por la cual se optó utilizarlo. DIAS maneja imágenes con formato TIF y en tonos de gris, por lo que se tuvo que hacer esta conversión, y es muy fácil abrir y mostrar una imagen en pantalla, ya que una imagen es un tipo de datos en este sistema, lo que facilita el manejo de la misma y nos ahorra el hecho de crear una rutina que haga esta operación [10].

Para cada una de las imágenes, primero usamos una función en DIAS que busca un punto que forme parte de un objeto y que su valor de gris este dentro de determinado rango. La búsqueda la puede hacer a partir de ciertas coordenadas y avanzando a pasos. Una vez encontrado ese punto, otra rutina se encarga de seguir el contorno, la cual almacena todas las coordenadas en la memoria de la computadora. Una vez que se obtiene el contorno, es posible utilizar otras rutinas sobre éste, por ejemplo, para marcarlo en pantalla, para rellenarlo, para redibujarlo. Lo que se aplicó fue marcar ese contorno sobre la imagen original con otro color y redibujar simplemente el contorno (Figura 2).

En nuestro caso de estudio, la idea principal es obtener los puntos de cada imagen para la reconstrucción 3D tomando como entrada estos datos, por lo que se almacenaron los puntos del contorno en un archivo.

4.2 Contornos activos (snakes)

Para la determinación de los contornos de cada una de las imágenes a partir del método de “snakes”, se utilizó un número variable de puntos de control para cada una de las imágenes, por ejemplo para las imágenes superiores se utilizaron aproximadamente 15 puntos de control, para las imágenes intermedias, las cuales son más complejas, se utilizaron en promedio 34 puntos de control y para las primeras alrededor de 20.

Al mismo tiempo los parámetros de intensidad de cada fuerza fueron variando dependiendo de la complejidad de la imagen a excepción del parámetro requerido por la fuerza eléctrica, el cual fue constante para todas las imágenes.

Para las imágenes en donde se visualiza parte de las orejas fue necesario reducir la fuerza de tensión y aumentar la rigidez, para dar una mejor descripción, sin embargo como puede verse en la Figura 3, el ajuste del contorno no es muy bueno en las regiones de las orejas.

Otro de los problemas encontrados fue el ajuste de la nariz en las primeras imágenes, pues como se puede apreciar en la Figura 1a, ésta no aparece completa lo cual provoca que el “snake” entre en las regiones internas de la nariz (Figura 3a).

Tanto la determinación de contornos como la visualización 3D fue realizada en Visual C++, con la adición de las librerías de OpenGL, en una computadora PC.

4.3 Reconstrucción 3D

Para el caso de seguimiento de contornos, la reconstrucción 3D fue realizada con GNU PLOT y Open Inventor.

Para poder graficar datos en 3D con GNU PLOT se reunieron los puntos en un solo archivo con el formato requerido para esta herramienta con un valor de altura entre los puntos una rebanada y otra de 1 unidad (Figura 4). Es posible observar el modelo desde distintos ángulos, pero hay que proporcionar previamente los valores de dirección y esperar a que se redibuje la vista, lo que dificulta la manipulación del modelo 3D.

Para graficar con Open Inventor se usó una computadora Indy Silicon Graphics. Open Inventor tiene varios tipos de visualizadores que nos dan más facilidades para observar y manipular un modelo 3D, haciendo uso de rotaciones y traslaciones, de forma interactiva (Figuras 5 y 7). Además tiene implementado un sistema de navegación que permite recorrer la escena. Estos visualizadores son también adaptables a las necesidades de la implementación que se está realizando, en el sentido de que se le pueden agregar nuevos elementos que mejoren la interacción con el usuario [12].

Un elemento muy importante en las interfaces es la forma en que se van a visualizar los modelos 3D. La visualización estereoscópica permite al usuario localizar los objetos y distinguir unos de otros. Ésta es el resultado de la fusión de dos imágenes de un mundo tomadas desde posiciones diferentes, que nos da la sensación de ver en tres dimensiones. Open Inventor implementa este tipo de visualización generando una imagen correspondiente para cada uno de los ojos y alternándolas a razón de 60 veces por segundo. Para observar el modelo en tres dimensiones usamos unos lentes de cristal líquido que trabajan bajo el efecto de polarización. Operan con un emisor de infrarrojo que envía señales que se sincronizan con la operación de despliegue, de manera que cada ojo ve únicamente la imagen dirigida hacia él [3]. La distancia entre los objetos correspondientes en cada imagen (disparidad) determina la profundidad entre cada uno de ellos. Algunas de las aplicaciones de reconstrucción 3D y visualización estereoscópica de este tipo de modelos son con fines de entrenamiento y planeación de procedimientos médicos.

4.4 Comparación de resultados

Al comparar los resultados obtenidos por ambos métodos (Figuras 2 y 3) se puede observar que el seguimiento de contornos produce un mejor ajuste que el método de contornos activos

en las regiones en las que hay un mayor número de puntos en donde cambia la curvatura del objeto.

Con el primer método obtenemos todos los puntos del contorno del objeto, los cuales si se grafican punto a punto, muestran el modelo 3D a detalle. El modelo de la Figura 4 fue graficado utilizando todos los puntos obtenidos por este método, aproximadamente 50,000 puntos. Este volumen de datos hace que el proceso de reconstrucción y manipulación sea lento. Por ello, para la visualización del objeto en Open Inventor, se construyó un modelo de alambre que tiene 200 puntos por corte, y sólo se graficaron 36 de estos (Figura 5).

Para la reconstrucción de la superficie de la porción de la cabeza se usaron los datos obtenidos por el seguimiento de contornos para definir una superficie de Bezier. Se tomaron 30 puntos de control por rebanada, y sólo se consideraron 18 de éstas para facilitar la visualización (Figura 7).

A pesar de que el ajuste de los contornos a partir del método de “snakes” no es tan bueno como el anterior, la generación de la imagen en 3D (Figura 6) es más sencilla debido al reducido número de puntos de control requeridos para su descripción.

5. Conclusiones

El método de seguimiento de contornos sigue mejor los detalles de la imagen, mientras que el método de contornos activos hace un mayor filtrado, ya que por sus propiedades, los “snakes” tienen más problemas para ajustarse a la forma del objeto en las concavidades.

Sin embargo, para hacer la reconstrucción de los objetos, éste último método proporciona de 15 a 35 puntos de control que son suficientes para trazar una curva, mientras que el otro puede dar cientos de puntos para describir el mismo objeto, por lo que se hace necesario un procedimiento de selección o interpolación de estos puntos. Además, por hacer un procesamiento local, el seguimiento de contornos puede perderse y dar resultados no deseados. Otra ventaja de los contornos activos es que se pueden generalizar a tres o más dimensiones (por ejemplo, para el seguimiento de objetos 3D que varían en el tiempo), manteniendo un número fijo y limitado de puntos de control.

Este “snake” puede ajustarse mejor a la forma del objeto dependiendo del parámetro que corresponde a la fuerza eléctrica, y se está estudiando la manera de hacer que se comporte mejor en las concavidades del objeto. Por ahora la determinación que tomamos es que si se requiere apreciar con detalle una zona del objeto, debemos de tomar la información obtenida por el seguimiento de contornos, en caso contrario, los datos del segundo método son suficientes para darnos una idea general de la apariencia del objeto en cuestión.

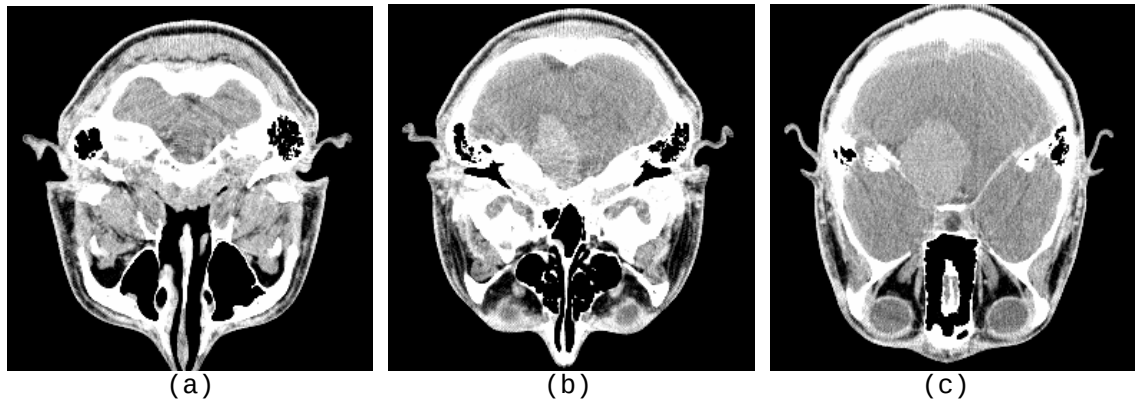


Figura 1: Imágenes 10, 19 y 30 dentro de la tomografía de una cabeza humana. La tomografía consta de 72 imágenes que se numeran desde la base del cráneo hacia la parte superior.

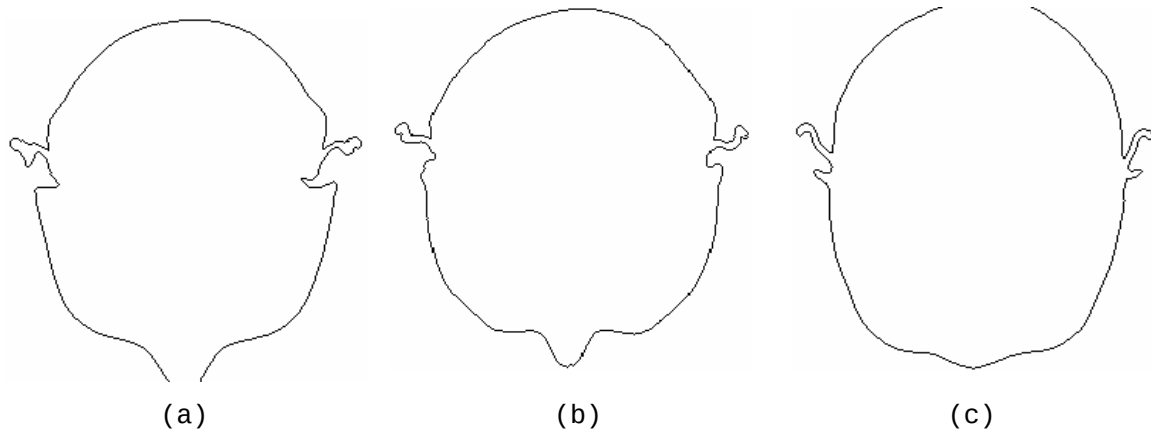


Figura 2: Contornos extraídos de la Figura 1 por el método de seguimiento de contornos del software DIAS.

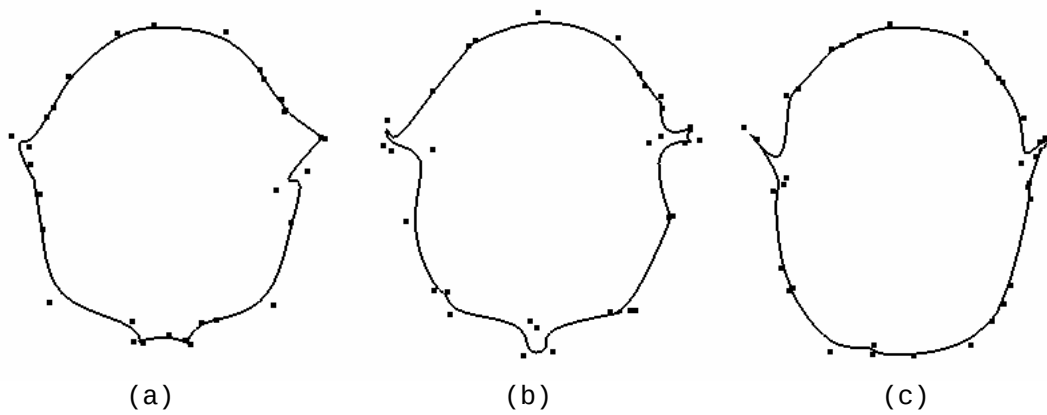


Figura 3: Contornos extraídos de la figura 1 por el método de contornos activos (snakes).

RECONSTRUCCION 3D

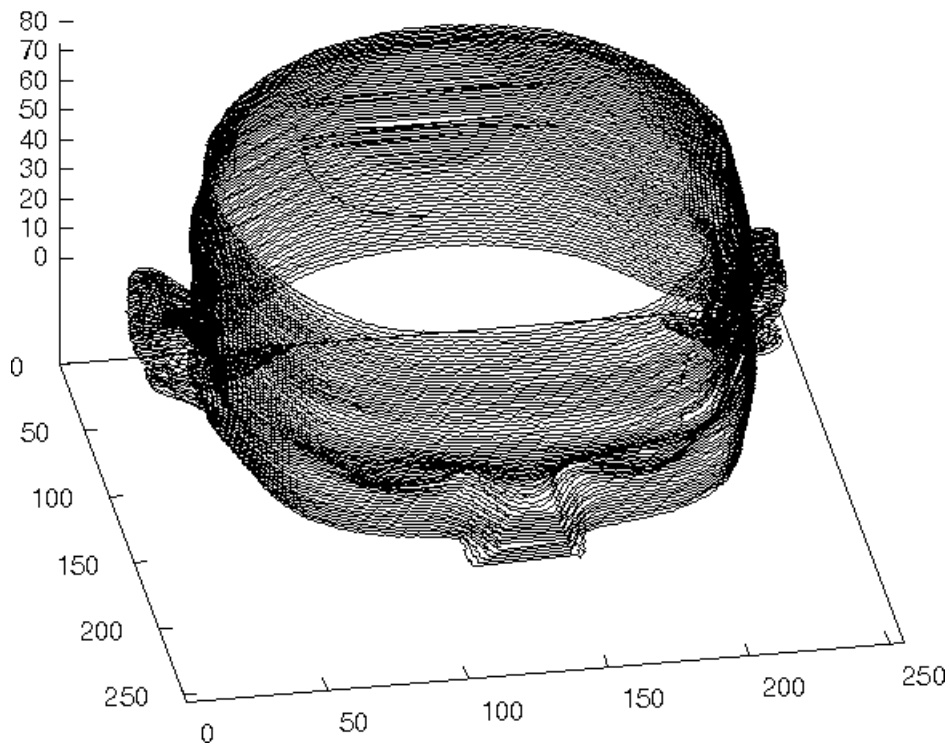


Figura 4: Los contornos extraídos de la tomografía por el método de seguimiento de contornos se muestran en un espacio 3D.

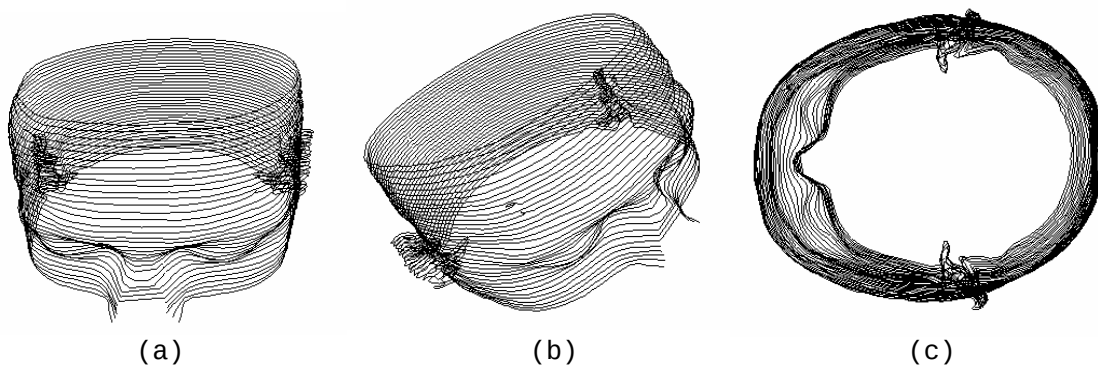


Figura 5: Para facilitar la visualización interactiva, se puede tomar una muestra del total de contornos y de los puntos en cada contorno, uniéndolos con una línea poligonal. Estos datos fueron tomados de las curvas generadas por el método de seguimiento de contornos (ver también Figura 4).

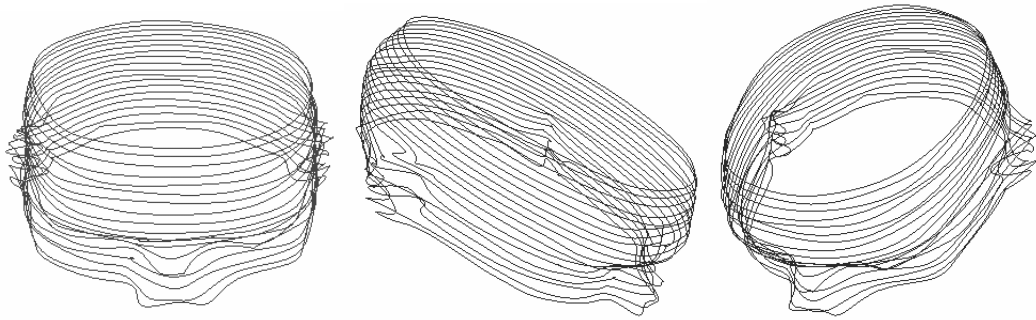


Figura 6: Los contornos extraídos de la tomografía por el método de “snakes” se muestran en un espacio 3D.

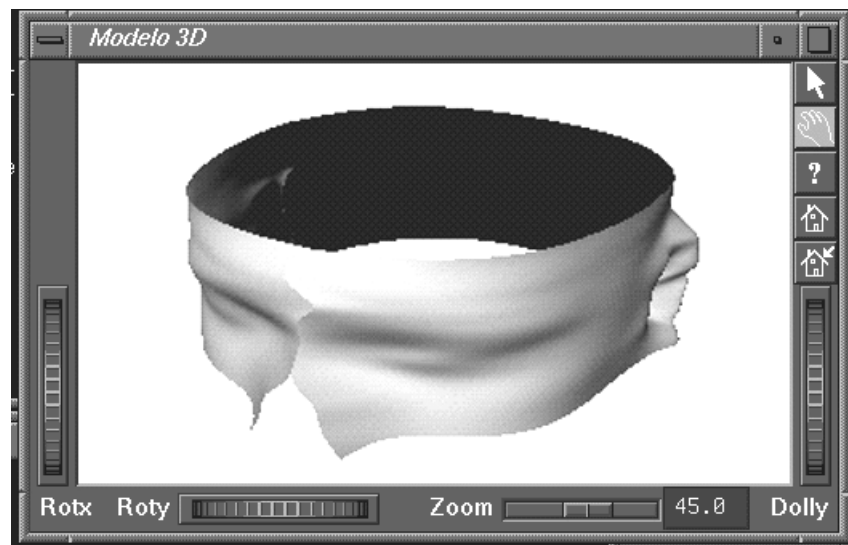


Figura 7: De los datos obtenidos por el método de seguimiento de contorno, se hizo la reconstrucción de la superficie por medio de una superficie de Bezier.

Reconocimientos

Se agradece el apoyo del Dr. Boris Escalante Ramírez, DEPFI, UNAM, por facilitarnos la tomografía objeto de estudio.

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto CONACYT 97-05-002-V.

Bibliografía

- [1] Arámbula, F. (1997). "Automated prostate recognition for robotic surgery". En *Memorias del Taller de visión y robótica, Primer Encuentro de Computación*, pp. 72-78. SMIA, SMCC. Querétaro, Qro.
- [2] Bruce, V. and Green, P. (1989), *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [3] Cancela García, N. E. y Ríos-Figueroa, H. V. (1998). *Visualización estereoscópica en ambientes virtuales*. Computación Visual 98, México.
- [4] Garza-Jinich, M., Meer, P., y Medina, V. (1997). *Detección de estructuras anatómicas en resonancia magnética: una ayuda al médico*. En *Memorias del Taller de visión y robótica, Primer Encuentro de Computación*, pp. 86-94. SMIA, SMCC. Querétaro, Qro.
- [5] Gonzalez, R.C. and R.E. Woods. (1992). *Digital Image Processing* (3rd ed.), Addison-Wesley.
- [6] Joskowicz, L., Tockus, L., Milgrom C. and Simkin, A. (1997). En *Memorias del Taller de visión y robótica, Primer Encuentro de Computación*, pp. 79-85. SMIA, SMCC. Querétaro, Qro.
- [7] Kass, M., Witkin, A., and Terzopoulos, D. (1987). *Snakes: Active Contour Models*. Proceedings of the 1st International Conference of Computer Vision, London England, pp 259-268. IEEE.
- [8] Marín-Hernández, A. y Ríos-Figueroa, H. V. (1998). *Análisis Comparativo e Implementación de Contornos Activos*. III Taller Iberoamericano de Reconocimiento de Patrones 1998, México.
- [9] Marín-Hernández, A. y Ríos-Figueroa, H. V. (1998). *Las Fuerzas Eléctricas: Un Elemento Nuevo para el Modelado de Contornos Activos*. Computación Visual 98, México.
- [10] Towersoft. (1998). *DIAS Manual, Dialogue and Programming System for Digital Image Analysis*. Berlin, Germany.
- [11] Zuech, N. (1988). *Applying Machine Vision*. Wiley.
- [12] Wernecker, Josie (1994). *Open Inventor C++, Reference Manual*. Addison Wesley.