

Detección Automática con Snakes y Representación 3D sobre Imágenes Cerebrales*

Miguel Ángel Cazorla, Pedro Cáceres, Francisco Escolano, Domingo Gallardo, Ramón Rizo
Grupo i³a

Departamento de Tecnología Informática y Computación
Escuela Politécnica Superior de Alicante.
Universidad de Alicante.
Apdo. Correos 99
03080 Alicante
e-mail: sco@i3a.dtic.ua.es

Tema: Análisis de Imagen

Palabras clave: Reconstrucción 3D, Contornos Activos, Imagen Biomédica Cerebral, Segmentación.

Resumen: Se aporta un método, basado en la integración de técnicas de Análisis de Imagen, para minimizar la interacción hombre-máquina en el proceso de reconstrucción 3D del cerebro a partir de un conjunto de secciones obtenidas por RNM. Dicho método se fundamenta en la utilización de contornos activos para realizar el seguimiento de las regiones de interés. Sintonizamos experimentalmente los parámetros del modelo y abordamos las distintas problemáticas que se presentan en el proceso de reconstrucción: mínimos locales, discontinuidad espacial, aparición de nuevas regiones y fusión de regiones.

Abstract: We propose a method, based on the integration of several Image Analysis Techniques, in order to minimize human-computer interaction in the process of 3D recovery given several MNR brain sections. Our method performs non-rigid tracking of regions of interest by active contours (snakes). The contour model parameters are tuned experimentally and we address several problems arised in recovering: local minima, spatial discontinuity, new region appearance and region fusion.

* Trabajo realizado en el ámbito del proyecto

1. Introducción.

La reconstrucción 3D a partir de un conjunto de secciones, como la que se muestra en la **Figura 1**, se realizaba, en un principio, de forma manual. Esta técnica consistía en la selección de los puntos clave de cada sección como base de la reconstrucción, y en la posterior aplicación de técnicas de interpolación o triangulación. Un aspecto crítico de este proceso es la elevada interacción con el usuario (imagínese el caso de seleccionar los puntos de cada sección, aproximadamente 200, y en un total de 74 secciones) sobre todo teniendo en cuenta que debe resolverse un problema de correspondencia entre secciones. Actualmente sólo se utiliza esta técnica en reconstrucciones sobre imágenes donde no se pueden seleccionar automáticamente los puntos característicos.

En [1] emplea una técnica basada en secciones perpendiculares donde utiliza la información de las características del cerebro para segmentarlo en tres partes: materia blanca, materia gris y resto. La materia gris es la que nos interesa. Realiza un umbralizado de la imagen basándose en los niveles de gris del cerebro. El umbralizado se realiza obteniendo el histograma de intensidades de la imagen y se aplican filtros para eliminar el ruido de la imagen. Para ello se genera un modelado del ruido en el conjunto global de imágenes. La selección de los niveles inferior y superior de nivel de gris para realizar la segmentación no es nada fácil debido a que el histograma puede estar o no ecualizado.

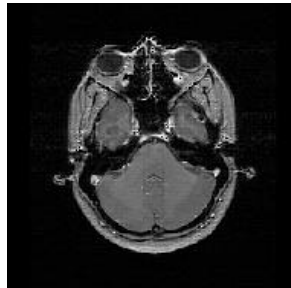


Figura 1. Sección RNM del cerebro

En [5], sabiendo que la zona de interés se encuentra en la parte superior del cerebro, se restringe el estudio a dicha zona despreciando el resto. Una vez realizada la umbralización, con operadores morfológicos y técnicas de máscaras de convolución, se obtiene el contorno a representar. Seguimos teniendo el problema de hacer corresponder los puntos entre secciones para realizar la representación.

Estas técnicas previas siguen teniendo un gran nivel de interacción con el usuario. Nuestro modelo intenta minimizar dicho nivel y para esto debemos automatizar todas aquellas funciones lo posibiliten. Por ejemplo, para la selección de la materia cuya evolución deseamos seguir, debemos obtener el umbral de intensidades que determina ese tipo de materia (manualmente) o bien realizar un estudio estadístico del histograma de la imagen original (proceso automático).

Nuestro objetivo último es el apoyo en las técnicas de diagnóstico, evaluación del tamaño del órgano y estudio del comportamiento de ciertas dolencias (tumores o edemas). Mediante la representación en 3D a partir de imágenes en 2D obtenidas mediante técnicas de RNM podemos determinar las características de la región a estudio. Con este modelo 3D podemos calcular datos antropométricos y evolutivos ante posibles deformaciones. Para ello, presentamos un modelo para el seguimiento de las características relevantes mediante la definición de campos de

potencial sobre objetos deformables. Nuestro estudio se centra en imágenes tomadas del cerebro en las que aparecen varios problemas. Básicamente, debemos realizar el seguimiento de una zona determinada. A esto añadimos la aparición de regiones con las mismas características que la zona seguida pero que no se encuentran conectadas inicialmente a ella. *Evolucionando en el espacio del objeto* las nuevas regiones se fusionan entre sí. En este momento debemos recombinar todos los datos obtenidos para poder continuar con el seguimiento de las características deseadas.

Nuestro método de representación 3D se basa, por una parte en un modelo de contorno activo (snake) guiado por un proceso de minimización de energía, y por otra parte se emplean técnicas de etiquetado de regiones para saber cuando inicializar los snakes.

En los siguientes puntos vamos a desarrollar las distintas técnicas empleadas en la realización del proceso de reconstrucción. En primer lugar vamos a describir la técnica de los contornos activos (snake) particularizando las funciones para nuestro modelo. En el punto tercero describiremos el proceso reconstrucción y las problemáticas abordadas así como el comportamiento de los distintos parámetros del modelo. Finalmente presentaremos nuestras conclusiones y trabajos futuros.

2. Contornos Activos como Base del Seguimiento

Un contorno activo o *snake* es un modelo de contorno paramétrico plano [9] propuesto por Kass, Witkin y Terzopoulos [6] y compuesto por un conjunto de puntos característicos (snaxels v_i) cuya dinámica está regida por la influencia de una energía de deformación o potencial que se pretende minimizar para alcanzar un punto de estabilidad. Dicho modelo y sus variantes han sido utilizados frecuentemente en el seguimiento automático de características sobre imágenes biomédicas [4], [5], [6]. El snake es un conjunto de puntos (snaxels) que van a ser atraídos por puntos en la imagen. Un punto de la imagen va a atraer más o menos a los snaxels dependiendo de la energía asociada a ese punto, y dicha energía viene definida por las funciones que se exponen a continuación.

La formulación *clásica* de la función de energía global es la siguiente:

$$E_{\text{Total}}(\mathbf{v}) = \mathbf{a}(\mathbf{v}) \int E_{\text{cont}}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} + \mathbf{b}(\mathbf{v}) \int E_{\text{curv}}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{v}) \int E_{\text{imagen}}(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$$

Dicho potencial está compuesto por dos tipos de energía de signo contrario: energía interna y externa. La definición clásica de los términos ponderados que componen la energía global es la siguiente [7]:

Energía Interna: Define tanto la relación espacial entre los snaxels como las restricciones de forma del contorno.

- **Energía de Contorno:** Esta función fuerza a los snaxels v_i a expandirse uniformemente. El valor \bar{d} indica la distancia media entre snaxels vecinos. Los puntos de la imagen donde el snaxel quedaría separado más de la media de sus vecinos más próximos, atraen menos al snaxel. La energía viene dada por el valor absoluto de la distancia media entre snaxels menos la distancia entre snaxels vecinos.

$$E_{cont} = \left| \bar{d} - \|v_i - v_{i-1}\| \right|$$

- **Energía de curvatura:** Esta energía estima la curvatura en un punto. De esta manera mantenemos la restricción de forma (curvatura global).

$$E_{curv} = \left\| \frac{u_{i+1}}{\|u_{i+1}\|} - \frac{u_i}{\|u_i\|} \right\|^2$$

$$u_i = v_i - v_{i-1}$$

Energía de Imagen: Esta energía, de signo contrario a la anterior y también denominada energía externa, se define en función de las características hacia las que se pretende atraer el snake (contornos, puntos de intensidad elevada, transformada de distancia [3]). En nuestro modelo, dado que queremos basar la reconstrucción en los contornos del cerebro, viene dada el valor negativo del gradiente de la imagen.

Los tres términos de energía deben estar en el mismo rango, en nuestro caso en el intervalo [0,1]. Los parámetros α , β y γ nos sirven para dar más prioridad a una energía u otra. Si, por ejemplo, sabemos que la forma de la región que va a seguir el snake no va a cambiar con el tiempo, podemos dar más valor al parámetro β para así no permitir la deformación del snake.

Mediante esta formulación intentamos determinar en que medida otra configuración del contorno hace variar las propiedades del snake. Minimizando esta energía total conseguiremos asociar los nuevos puntos con los que tenían unas propiedades parecidas en secciones anteriores. El problema del seguimiento con snakes se formula como una continuada minimización de esta energía a través de los cambios sucesivos del potencial a lo largo de la secuencia. Dicha minimización puede abordarse de forma voraz (gradiente) mediante la minimización local de la función en la vecindad de cada snaxel, calculándose el punto de mínima energía de entre los vecinos estudiados.

El seguimiento del contorno del cerebro se iniciará en una zona concreta del mismo. Mediante un adecuado preprocesamiento (filtrado y depuración de contornos) obtendremos el contorno de la zona deseada, y en consecuencia el campo de potencial inicial. El resultado del preprocesamiento se puede observar en la **Figura 2**. Inicializaremos el snake sobre dicho campo. Como el modelo general tiende a minimizar la energía global, el snake se irá adaptando a los cambios en el campo de potencial que se produzcan a lo largo de la secuencia y dicha adaptación se corresponderá con los contornos de la región o regiones a representar.

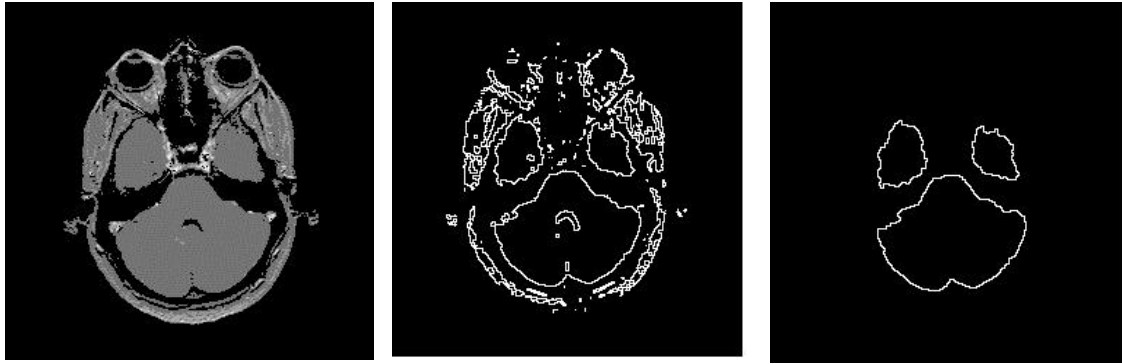


Figura 2. Visualización del filtrado que se aplica a la imagen y de los snakes.

En la **Figura 3** se muestra una secuencia donde se puede observar el comportamiento adaptativo de los snakes (contornos en color blanco superpuestos), situados sobre tres zonas de interés (zonas temporales y zona occipital), ante cambios en sus respectivos potenciales.



Figura 3. Adaptación de los snakes a campos de potencial definidos por las zonas de interés.

3. Proceso de Reconstrucción 3D

Hasta ahora el nivel de interacción con el usuario estaba condicionado por la elevada complejidad del problema y, por tanto, era precisa una gran interacción para conseguir resultados aceptables. Nuestra propuesta permite reducir este nivel de interacción, automatizando parte del proceso al incluir conocimiento previo del problema en nuestro método. Para cada región significativa el usuario únicamente indicará el lugar donde ésta se origina en la secuencia. Partiendo de esta información se realiza el seguimiento de forma automática, el resultado se procesa con un algoritmo de correspondencia volumétrica basado en triangulación, y finalmente es visualizado.

Para que el seguimiento se realice de forma correcta debemos definir los términos de energía como hemos comentado anteriormente. Como la problemática que surge al tratar este conjunto de imágenes es amplia debido a una casuística muy variada, debemos definir un método que corrija los posibles errores inducidos por los datos (ruido que dificulte el seguimiento) [2]. Esa corrección la podemos enfocar de varias formas. Podemos variar los parámetros que ponderan cada uno de los términos para cada snaxel (a , b , g). También podemos introducir en el sistema información adicional mediante la definición de nuevas energías (determinación de un modelo morfológico de los datos esperados). Una posible solución intermedia sería una técnica adaptativa donde el sistema *aprendiera* a medida que avance el análisis de las secciones.

A través de una experimentación exhaustiva hemos evaluado la adecuación de los snakes al seguimiento de este tipo de imagen. En dicha experimentación hemos abordado los siguientes aspectos:

1. **Mínimos Locales:** Dado que en las secciones aparecen distintos tipos de materia, se origina un excesivo número de contornos que potencialmente pueden atraer a los snakes situados sobre las zonas de interés. Además el límite de algunas zonas no está bien definido y el contorno resultante es abrupto [8]. Cuando calculamos el término de continuidad de ese contorno aparecen *mínimos locales* entre los puntos a los que se puede expandir los snaxels a estudio. La presencia de mínimos locales puede hacer que el snake detenga su expansión en dichos puntos de forma incorrecta. Para resolver esta cuestión proponemos realizar un filtrado de los puntos vecinos con mínimos locales.
2. **Discontinuidad Espacial:** Cuando realizamos el seguimiento de un contorno y este cambia bruscamente de forma (el contorno que sigue el snake pasa a tener un perímetro mayor que la vecindad a la que este puede expandirse) se provoca una discontinuidad espacial en el eje Z (altura de sección) que dificulta una buena adaptación a los cambios de curvatura. Los efectos negativos derivados de los *cambios drásticos en la forma del contorno* no se solucionan aumentando el ámbito de la vecindad sobre el que realizamos la búsqueda del contorno, porque al relajar dicha búsqueda se facilita la atracción de los snaxels hacia contornos no deseados. Este problema podría solucionarse extrayendo previamente un modelo morfológico que guíase el proceso de seguimiento.
3. **Aparición de Regiones Nuevas:** En determinados tipos de sección es normal la *aparición de nuevas regiones* impuestas por la forma del objeto a estudio. En nuestro caso, las imágenes de las secciones inferiores (secciones 1 a 20) sólo presentan una zona del cerebro (zona occipital). Más adelante aparecen dos nuevas zonas (zonas temporales) que se integran en las últimas secciones con la occipital formando una única región. Por lo tanto debemos conocer las coordenadas Z donde aparecen dichas regiones para efectuar el lanzamiento de los snakes. En nuestra propuesta dichos puntos son marcados por el usuario antes de iniciarse el seguimiento.
4. **Factores de Ponderación:** Los factores de ponderación de términos a, b, g , deben sintonizarse experimentalmente para obtener resultados adecuados. En la **Figura 4** puede observarse un mal comportamiento del snake. Después de una experimentación exhaustiva hemos constatado que:
 - Para valores altos o bajos de los tres parámetros el snake tiene un comportamiento incorrecto como el que se observa en la **Figura 4** (pérdida por la izquierda de ajuste a la región occipital).
 - Si damos una baja ponderación al término de la energía de la imagen con respecto a los otros dos términos ($g \ll a, g \ll b$) los pixeles con menor energía de la imagen (menos significativos) serán atraídos de la misma forma que los significativos. El efecto de esta elección es la pérdida en la forma del objeto estudiado y la expansión no-uniforme de los snaxels.

- Los mejores resultados se obtienen para $a=0.8$, $b=1$, $g=1$.

5. Fusión de Regiones: El comportamiento del snake es bueno para cada región aislada, es decir cuando no existe interacción entre las distintas regiones de interés. Sin embargo la fusión de las regiones plantea serios problemas. Por un lado debe sincronizarse en el tiempo la unión entre los snakes (*cuándo*) y por otro debe realizarse la fusión propiamente dicha (*cómo*) [10]. El primer problema (análogo al surgido con la aparición de nuevas regiones) lo hemos resuelto calculando las distancias entre cada par de snaxels de snakes distintos. De todos los pares situados a una distancia menor que un determinado umbral ($D < h$) se seleccionan las dos parejas de snaxels más exteriores y se dispara el proceso de fusión. Dicho proceso comienza con una de las parejas y, como puede observarse en la **Figura 5**, consta de las siguientes etapas que conservan la continuidad del snake unión resultante:

- Comenzando por el punto 1 del primer snake se copian todos los puntos de dicho snake en el snake unión hasta alcanzarse el punto 2
- Se recorre el segundo contorno comenzando por el punto 4 hasta alcanzar el punto 3, momento en que finaliza el proceso.

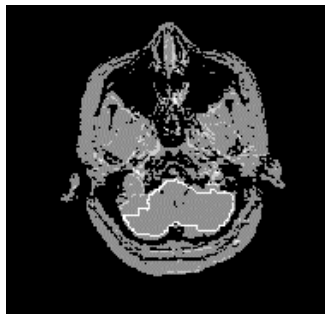


Figura 4. Comportamiento erróneo

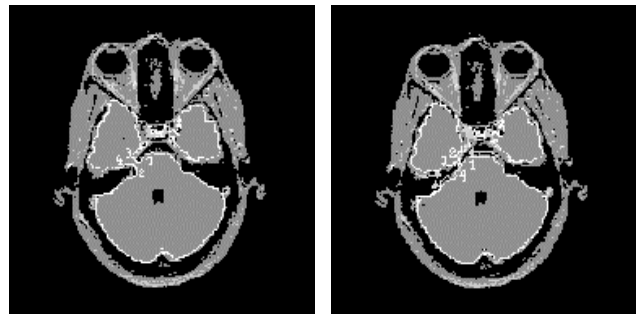


Figura 5. Proceso de fusión de snakes

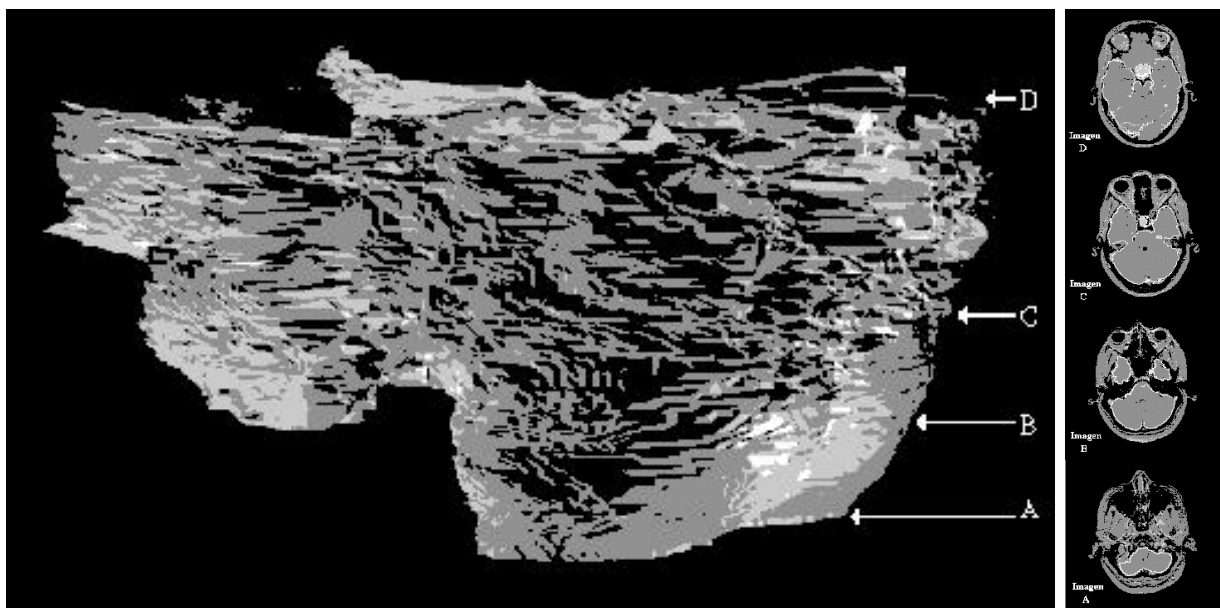


Figura 6. Resultados de la reconstrucción sobre la base del seguimiento con snakes.

Presentados los aspectos contemplados en nuestra experimentación, exponemos a continuación el proceso seguido para obtener la reconstrucción. Dicho proceso, así como los resultados que genera pueden verse en la **Figura 6**:

Imagen A. (Inicial)

Lanzamos el primer snake sobre el contorno inicial (zona occipital) que obtenemos tras aplicar un filtro de mediana. Ya conseguidos los puntos iniciales del snake calculamos los potenciales de secciones sucesivas y minimizamos la energía para adaptar el snake a los sucesivos contornos. El proceso seguirá las mismas pautas hasta llegar a la zona donde aparecen las dos nuevas regiones (zonas temporales).

Imagen B. (Nuevas Regiones)

En esta imagen aparecen dos nuevas regiones que no están conectadas con el contorno seguido desde A. En este punto de la secuencia debemos lanzar dos nuevos snakes en las zonas con el mismo tipo de materia seguido hasta ahora. Su comportamiento en el seguimiento es bueno pues se trata del mismo proceso que la imagen A controlado en tres zonas independientes.

Imagen C. (Fusión)

A partir de esta sección las tres regiones de seguimiento se fusionan. Hasta aquí, el comportamiento era el esperado y la expansión de los puntos del snake era uniforme, aportando una reconstrucción 3D bastante suavizada y continua. En este momento debemos realizar la fusión de los snakes pasando a realizar el seguimiento con el snake unión resultante.

Imagen D. (Deterioro)

En esta imagen se puede observar cómo el comportamiento del snake no es el adecuado a partir del momento que se fusionan las tres regiones. La causa fundamental del mal funcionamiento es el hecho de que determinados puntos son atraídos hacia contornos no deseados en secciones previas a la fusión, con lo cual la minimización no se realiza sobre los datos adecuados. Los contornos correctos están lo suficientemente lejos como para ejercer una atracción suficiente. Por lo tanto, si queremos conseguir que la imagen reconstruida tenga un aspecto realista debemos realizar un esquema de recuperación de las características globales dentro de la superficie definida por el snake unión.

4. Conclusiones y Trabajos Futuros

En este trabajo hemos integrado un conjunto de técnicas de Análisis y Síntesis de Imagen (filtrado, segmentación, depuración de contornos, snakes o contornos activos, correspondencia volumétrica, visualización) para obtener, de forma semiautomática, una representación 3D del cerebro, permitiendo reducir, con respecto a propuestas anteriores, el nivel de interacción con el usuario.

Debido a la elevada complejidad de las imágenes cerebrales, la determinación y el seguimiento de las características relevantes de las distintas materias es un problema muy complejo. En este sentido hemos abordado el estudio de las diversas problemáticas que surgen en el seguimiento de contornos cerebrales: mínimos locales, discontinuidad espacial, aparición de nuevas regiones y fusión de regiones.

Hemos obtenido, mediante una experimentación exhaustiva, muy buenos resultados en el seguimiento de zonas independientes. Sin embargo queda por resolver el seguimiento coherente y controlado de regiones fusionadas. Dicho problema podría resolverse diseñando un esquema de ponderación adecuado para el snake unión e incorporando conocimiento adicional en los términos de la función de energía, incluyendo aspectos como el *coloreado de contornos*, de forma que cada snake sea sensible a un determinado tipo de contorno y no a otro. Con esto solucionaríamos el problema de la atracción, en las etapas previas a la fusión, hacia contornos no deseados.

Por lo tanto nuestras investigaciones futuras en este problema tomarán fundamentalmente dos direcciones:

- Profundizar en la extracción de campos de potencial fiables mediante la incorporación de conocimiento adicional (snakes basados en el conocimiento) extraído de forma automática: conocimiento sobre la textura (tipo de material de cada región), la morfología (curvatura, concavidades, convexidades) y la organización (inclusión, conexión) de las distintas regiones. En este sentido se está trabajando en un esquema adecuado de clasificación y en la definición de un modelo de objeto.
- Asimismo profundizaremos en la extracción automática de las condiciones de disparo de los snakes. Estamos trabajando en la definición de un modelo de evolución de campos de potencial para detectar aspectos como el disparo de nuevos snakes, el crecimiento/decrecimiento del número de snaxels y la variación de los factores de ponderación a lo largo de la secuencia. Dicho modelo está basado en la evolución relativa de un conjunto de marcadores o puntos característicos que contienen información cualitativa y cuantitativa sobre la textura y morfología de la región a la que representan.

Referencias

- [1].Brummer, Russell M Mersereau, Robert L. Eisner and Richard R. J. Lewine, "*Automatic Detection of Brain Contours in MRI Data Sets*", IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 13 2 Junio 1994.
- [2].Cohen, E. Bardinet, N. Ayache. "*Surface Reconstructiion Using Active Contour Models.*" INRIA. R.R. n° 1824 Febrero 1993
- [3].Frédéric Leymarie and Martin D. Levine. "*Simulating the Grassfire Transform Using an Active Contour Model*" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 14 n° 1, Enero 1992.
- [4].Frédéric Leymarie and Martin D. Levine. "*Tracking Deformable Objects in the Plane Using an Active Contour Model*" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 15 n° 6, Junio 1993.
- [5].Ingrid Carlbom, D. Terzopoulos and Kirsten M. Harris, "*Computer-Assited Registration, Segmentation, and 3D Reconstruction from Images of Neural Tissue Sections*" IEEE Transactions on medical imaging, vol. 12 2 june 1993.

- [6].Kass, A. Witkin and D Terzopoulos, "*Snakes: Active Contour Models*", Int. Joint Compt. Vision Vol. 1, no. 4, 1988.
- [7].Kumar and D Goldgof, "*Automatic Tracking of SPAMM Grid and the Estimation of Deformation Parameters from Cardiac MR Images*" IEEE Transactions on Medical Imaging Vol 13. 1994.
- [8].Maladain, J.M. Rocchisani "*Matching of 3D Medical Images with a Potential Based Method*" INRIA R.R. n° 1890, Marzo 1993.
- [9].Parker. "*Extracting Vectors from Raster Images*" Comput. & Graphics. Vol. 12 N° 1pp 75-79 1988.
- [10].Shiuh-Yung Chen, Wei-Chung Lin, Cheng-Chung Liang y Ching-tu Chen "*Improvement on Dynamic Elastic Interpolation Technique for reconstructing 3-D objects from Serial Cross Sections*" .IEEE Transactions on Medical Imaging Vol. 9 N°1 Marzo 1990.