

RECONSTRUCCIÓN ARTERIAL A PARTIR DE ULTRASONIDO INTRAVASCULAR SINCRONIZADO CON ELECTROCARDIOGRAMA

Lucas Lo Vercio^{a,b}, Emanuel Arguiñarena^a, Luis Romero^a, Ignacio Jonas^a,
Mariana del Fresno^{a,c}, Marcelo Vénere^{a,d}

^aPLADEMA, Universidad Nacional del Centro, Tandil, Argentina
{mdelfres,venerem}@exa.unicen.edu.ar

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

^cComisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires (CIC-PBA)

^dComisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

Keywords: Segmentación de imágenes, reconstrucción de mallas, ultrasonido intravascular, visualización de geometrías.

Abstract. El ultrasonido intravascular (IVUS) es una modalidad diagnóstica que brinda información sobre el interior de las arterias con alta resolución espacial y temporal, realizada mediante un cateterismo con el cual se introduce un transductor ultrasónico.

Durante el examen, las imágenes obtenidas suelen verse alteradas acorde al ciclo cardíaco, debido a las fuerzas sobre la arteria, el flujo sanguíneo y el propio catéter, situación que dificulta la detección de las capas arteriales, lesiones y placas por parte del especialista y la construcción de un modelo tridimensional del vaso sanguíneo.

En este trabajo se propone una técnica de construcción de geometrías tridimensionales (3D) a partir de las sucesivas imágenes que componen un estudio de IVUS y de un electrocardiograma (ECG) realizado en forma simultánea. El procedimiento incluye la generación de múltiples representaciones tridimensionales del segmento arterial estudiado correspondientes a diferentes momentos del ciclo cardíaco, que son generadas a partir de la sincronización del electrocardiograma y las imágenes.

1 INTRODUCCIÓN

El ultrasonido intravascular (*Intra Vascular Ultra Sound* - IVUS) se está convirtiendo en un método complementario al estudio mediante angiografías en el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares. Esta tecnología permite obtener información de alta resolución temporal y espacial del interior de las arterias, empleando ondas sonoras para producir imágenes axiales de la pared arterial (Telayna, 2003).

A partir de las imágenes IVUS obtenidas es posible explorar la composición de las arterias coronarias, describir el lumen y las paredes de los vasos sanguíneos, además de eventuales alteraciones que se presenten en los mismos, responsables de numerosos problemas tratados en medicina cardiovascular (Liang et al., 2006). Sin embargo, su procesamiento computacional suele presentar un gran desafío ya que esta tecnología basada en ultrasonido por lo general genera imágenes de bajo contraste, con transiciones difusas entre objetos y alto nivel de ruido (Figura 1). Este tipo de artefactos puede llegar a dificultar la correcta detección de la pared arterial, placas arterioscleróticas, ulceraciones y calcificaciones, que son el objeto del estudio. Por otro lado, la posición del catéter y la morfología del vaso pueden verse alterados debido a la actividad del músculo cardíaco y el consecuente cambio del flujo sanguíneo. Estas alteraciones pueden dificultar el análisis de los especialistas y también del software de asistencia al diagnóstico.

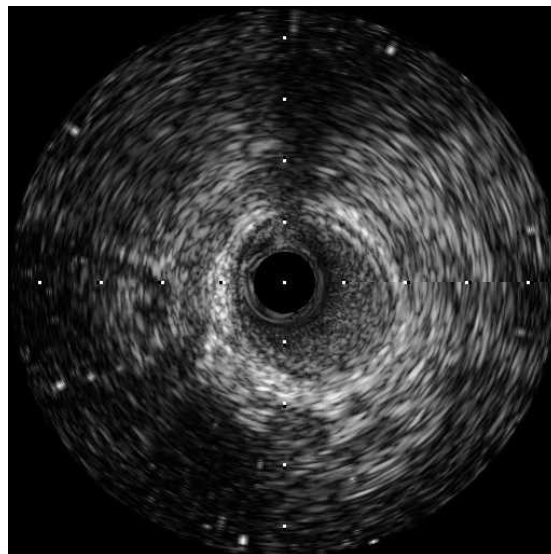


Figura 1: Imagen IVUS

En el procesamiento computacional de las imágenes IVUS comúnmente se busca localizar el contorno arterial mediante la detección de una o ambas paredes arteriales. La pared interna se encuentra entre la íntima y la luz o lumen del vaso, mientras que la externa delimita la media y la adventicia (Figura 2). Además, ya que las imágenes corresponden a sucesivos cortes de la arteria, es de interés la reconstrucción tridimensional del vaso con el fin de mejorar la interpretación del estudio.

Para la detección de las paredes arteriales se han planteado algunos algoritmos de segmentación basados en crecimiento de regiones (Bouraoui et al., 2007) y modelos deformables (Taki et al., 2010; Jonas et al., 2009), y de análisis de textura (Zhang et al., 1998) y espectral para la detección de placas (Caballero et al., 2007).

En lo que respecta a la actividad cardíaca, esta es conocida por medio del electrocardiograma (ECG), el cual registra las variaciones del potencial eléctrico del corazón

(Esper et al., 1997). Varios son los algoritmos propuestos para la caracterización del ECG, tanto para la determinación del ciclo cardíaco (Vidal Silva et al., 2010) como la detección de arritmias (Silipo and Marchesi, 1998; Krishna Prasad and Sahambi, 2003).

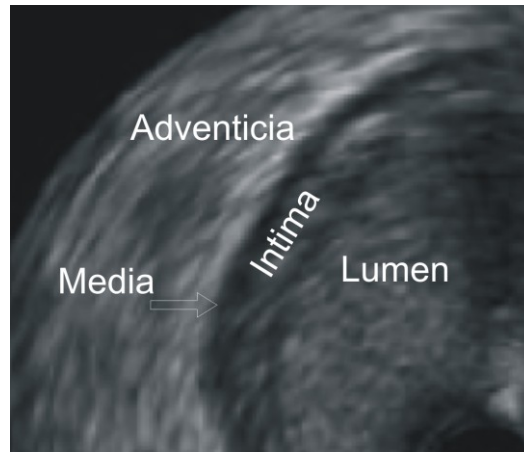


Figura 2: Capas de la arteria coronaria

En este contexto, el presente trabajo propone la detección de las paredes arteriales en las sucesivas imágenes IVUS y su diferenciación según las fases del ciclo cardíaco, guiado por la información proveniente del ECG. Así se puede seleccionar aquellos cuadros que no han sido distorsionados por el ciclo cardíaco y de esta forma poder construir mallas parciales más coherentes que faciliten *a posteriori* la realización de estudios diagnósticos y simulaciones.

2 ELEMENTOS DE TRABAJO Y METODOLOGÍA

La implementación se desarrolló dentro de la plataforma de trabajo extensible DcmView4j (Arguiñarena et al., 2012), que provee acceso a repositorios de estudios DICOM (Gibaud, 2008) y un entorno de visualización y procesamiento de imágenes en dos y tres dimensiones.

Se utilizaron imágenes de IVUS provistas por el Laboratorio Nacional de Computación Científica de Petrópolis, Brasil, que fueron obtenidas con el equipo iLab® Ultrasound Imaging System de Boston Scientific. El equipo cuenta con una sonda de ultrasonido que captura imágenes a una velocidad constante de 0,5mm/segundo y con una frecuencia de 30 imágenes por segundo y de forma simultánea obtiene un ECG del paciente.

El procesamiento de las imágenes, obtenidas por medio de la plataforma DcmView4j, comienza con la definición de un contorno inicial por parte del usuario, el cual es utilizado por el algoritmo de segmentación para detectar las paredes arteriales en los sucesivos cuadros. Una vez detectadas las paredes, se procede a sincronizar las imágenes con el ECG, al cual posteriormente se lo caracteriza. Finalmente se selecciona el momento de interés del ciclo cardíaco, se obtiene la segmentación para los cuadros correspondientes y se genera la malla tridimensional de la arteria.

El método de segmentación utilizado para la detección de las paredes arteriales está basado en la aplicación de modelos deformables o *snakes*. Para su ejecución, se requiere por parte del usuario la especificación de un único contorno inicial sobre alguno de los cortes que componen el estudio de IVUS, lo cual se realiza de manera simple mediante las facilidades provistas por la interfaz gráfica.

Durante el proceso de segmentación de una imagen IVUS, la curva inicial se deforma, contrayéndose o expandiéndose, por aplicación de fuerzas internas y externas. La energía

interna representa las características de deformación del contorno elástico. La energía externa se diseña según extremos de intensidad, bordes u otra característica de interés en la imagen que resulte relevante para el dominio del problema. Generalmente los bordes presentes en la imagen actúan como atractores del contorno, pudiendo detener la expansión provocada por las fuerzas aplicadas. La forma del contorno alcanzará su estado final cuando las fuerzas internas y externas se equilibren y el estado alcanzado será el resultado del proceso de segmentación (Jonas *et al.*, 2009). El contorno de la primera imagen de la secuencia constituye la aproximación inicial al contorno de la imagen siguiente para repetir en ella el proceso de segmentación de la pared arterial. Este procedimiento se repite para el resto de las imágenes del estudio (del Fresno *et al.*, 2010).

En cuanto a la caracterización del electrocardiograma, en el presente trabajo se utilizó una variante del algoritmo de Holsinger (Vidal Silva *et al.*, 2010) para la detección del complejo QRS, que representa la contracción de los ventrículos del corazón. Su nombre deriva de las ondas Q, R y S que simbolizan distintos vectores de polarización ventricular. La elección de la segmentación del ECG por este complejo está basada en la simplicidad de su detección y su importancia clínica.

Para la detección automática del complejo QRS, la señal electrocardiográfica discretizada cada 1 ms $y[x]$ es caracterizada por las funciones $y_1'[x] = y[x] - y[x - 1]$ y $y_2'[x] = y[x + 1] - y[x]$. Luego, la derivada $y'[x]$ se define como:

$$y'[x] = \begin{cases} 0 & |y_1'[x] + y_2'[x]| \neq |y_1'[x]| + |y_2'[x]| \\ \frac{y_1'[x] + y_2'[x]}{2} & |y_1'[x] + y_2'[x]| = |y_1'[x]| + |y_2'[x]| \end{cases} \quad (1)$$

Una posición x corresponde al inicio del complejo QRS si ésta y las 4 siguientes posiciones del ECG cumplen con $y'[x] > 0,36$. Finalmente, se define como ciclo cardíaco al intervalo entre dos puntos de inicio consecutivos de complejos QRS; y a un momento del ciclo cardíaco como un instante dentro de ese intervalo, en el cual el corazón se encuentra en una situación puntual de contracción o relajación.

Con la información temporal brindada por el equipo se hace corresponder cada instante del ECG a un cuadro obtenido por el ultrasonido. Luego, para un mismo momento en cada ciclo cardíaco, se seleccionan las segmentaciones correspondientes a ese instante en la secuencia de imágenes IVUS.

Para la generación de mallas parciales correspondientes a los diferentes momentos del ciclo cardíaco, se deben recuperar los datos de los cortes segmentados correspondientes. El método de triangulación aplicado consiste en unir los vértices de los contornos sucesivos en tal secuencia, seleccionando para cada punto de un contorno el punto más cercano del siguiente. A partir de estos puntos se generan los triángulos utilizando los puntos vecinos hasta completar el contorno, considerando la orientación adecuada para generar mallas correctas.

3 RESULTADOS

En la Figura 3 se observa una malla de 5 mm, correspondiente a 10 segundos de un estudio de IVUS sin sincronización con el ECG, la cual se asocia a una geometría arterial muy densa e irregular, debido a que se combinan cortes de diferentes momentos del ciclo cardíaco.

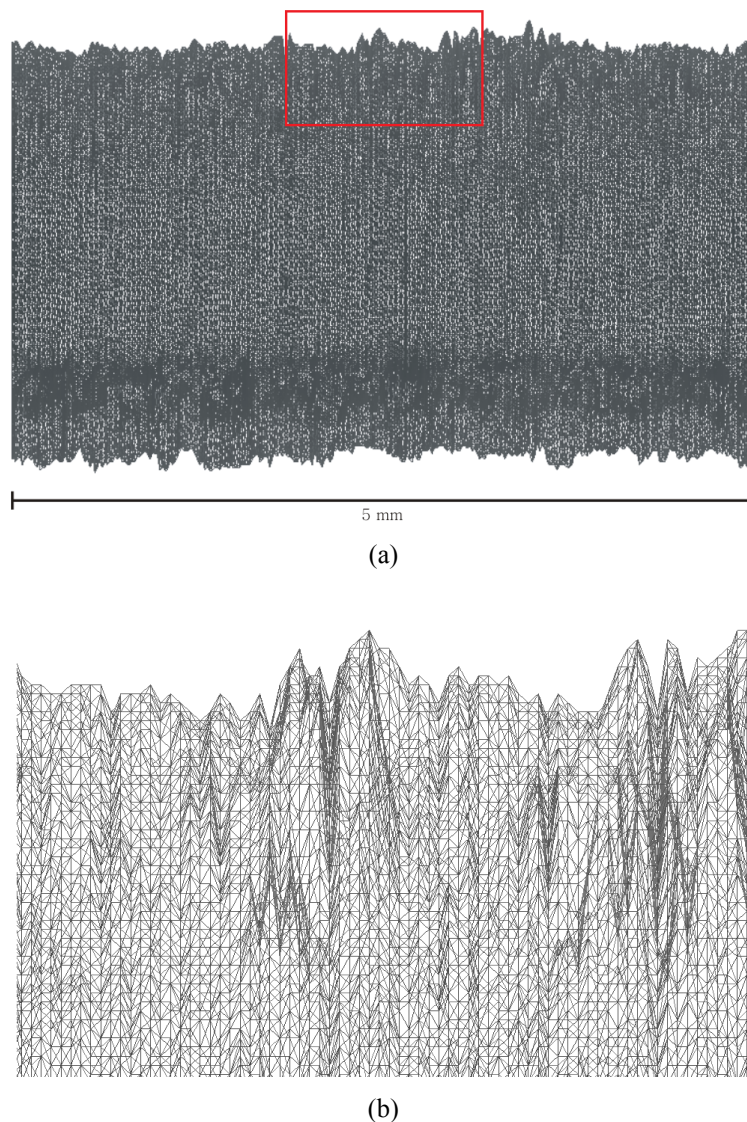


Figura 3: Malla correspondiente a la arteria sin sincronización con ECG, incluyendo todos los momentos de ciclo cardíaco: a) Vista longitudinal de la malla en modo wire, b) detalle de la porción de a) señalada en rojo

Por otro lado, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan los resultados de la aplicación del método propuesto para los momentos de interés puntuales 0,3 y 0,7 dentro del ciclo cardíaco, marcados con verde y rojo respectivamente. Cada una de estas líneas indica la ubicación en la malla de los puntos de la segmentación del cuadro correspondiente a ese instante de tiempo. Así, los contornos a partir de los cuales se construyen las geometrías corresponden a una misma situación cardiovascular, por lo que estas resultan coherentes respecto al ciclo cardíaco y no presentan irregularidades como las que se manifiestan en la reconstrucción 3D de la Figura 3.

La herramienta desarrollada permite estudiar como impactan las alteraciones producidas por la contracción del corazón en las segmentaciones. De la misma forma, se posibilita la detección de los cuadros del estudio que son invariantes respecto a las alteraciones producidas por la contracción del músculo cardíaco.

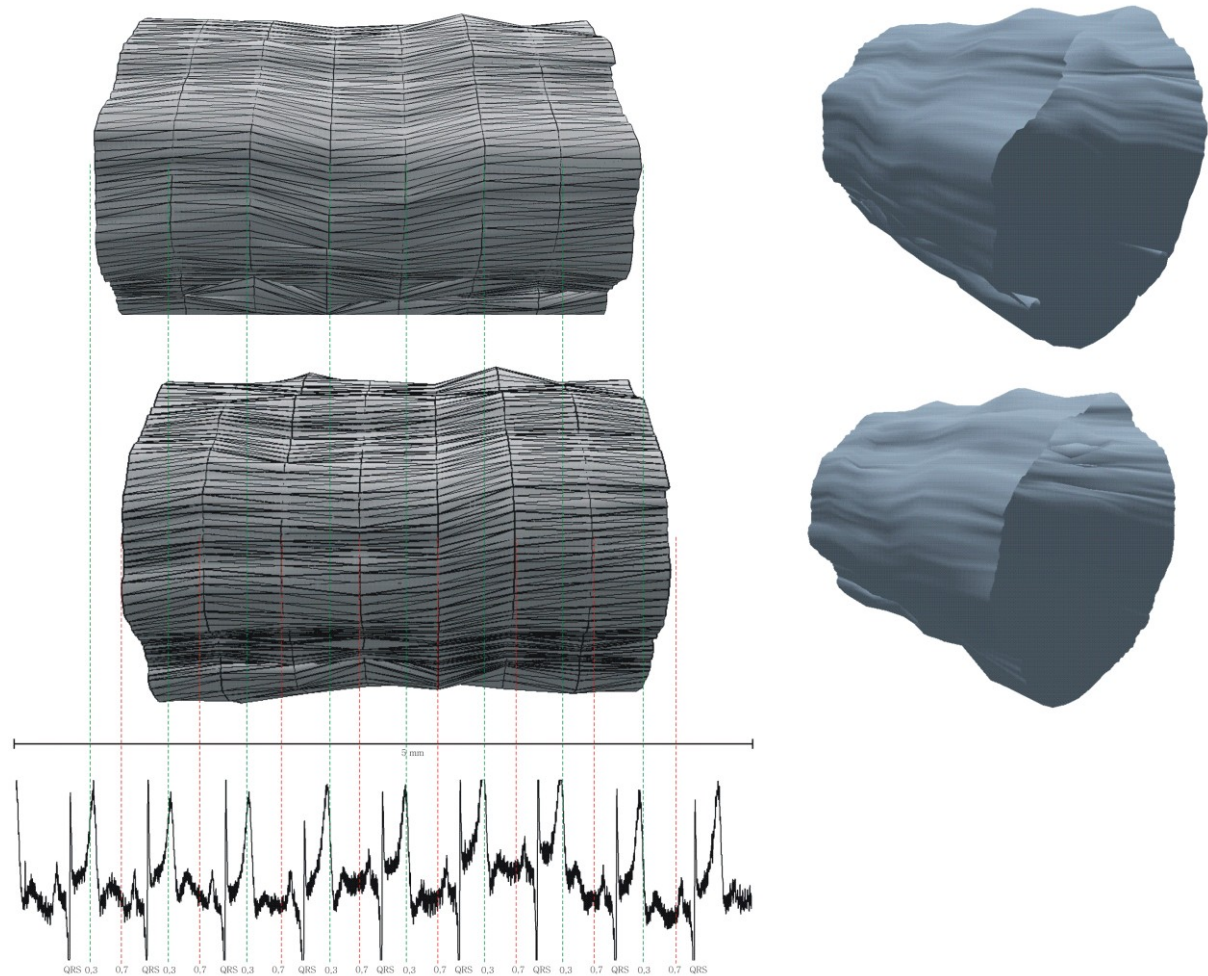


Figura 4: Geometrías arteriales sincronizadas con ECG para dos puntos específicos (0,3 y 0,7) del ciclo cardíaco.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método para la generación de mallas tridimensionales de arterias utilizando estudios de IVUS e información de electrocardiograma. En la reconstrucción se contemplan las alteraciones que producen la actividad cardíaca y el flujo sanguíneo durante la obtención del estudio para generar mallas más coherentes respecto a los métodos clásicos de reconstrucción.

El método propuesto permite la detección de las paredes arteriales en un estudio de IVUS y su clasificación según el ECG, lo que posibilita la recuperación de los cortes axiales y geometrías arteriales para un mismo momento del ciclo cardíaco. Además, se logra mejorar la fidelidad geométrica de la malla, debido a en la reconstrucción 3D que se tiene en cuenta la información espacio-temporal presente en los archivos DICOM del estudio.

Si bien al seleccionar un subconjunto de imágenes del estudio se puede perder cierta información diagnóstica, el método ofrece un aporte importante para obtener cuadros de referencia que en un futuro puedan ser utilizados para la aplicación de técnicas de registración o reconstrucción.

5 TRABAJOS FUTUROS

La detección de los contornos arteriales presenta todavía algunos problemas de precisión y eficiencia, pero dadas las características del método de segmentación con *snakes*, éste podría ser implementado de manera paralela en las modernas GPU para aumentar tanto el número de puntos que definen cada *snake* como su velocidad de ejecución.

Por otro lado, la sincronización con el ECG y la obtención de las mallas parciales constituyen el punto de inicio para simulaciones del movimiento arterial como animación; y del flujo sanguíneo con técnicas generales de simulación tridimensional de fluidos.

Finalmente, la representación tridimensional brinda soporte a la realización de evaluaciones volumétricas del espacio arterial y de su pared que pueden constituir un soporte al diagnóstico de aterosclerosis y aneurismas, entre otras. Relacionado a esta perspectiva, al tener calculadas las mallas parciales, se aspira a la detección de las enfermedades cardiovasculares que modifican el espesor y la rigidez de la pared arterial.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó adelante en el marco del Proyecto PICT 2010-1287 “Procesamiento y segmentación de imágenes digitales tridimensionales para el desarrollo de aplicaciones médicas e industriales” de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica - ANPCyT, Argentina y el Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnica – CONICET.

REFERENCIAS

- Arguiñarena, E., del Fresno, M., Escobar, P., Massa, J. and Santiago, M. DcmView4j: una plataforma para procesamiento y visualización de imágenes médicas. In: SADIO (ed) *Congreso Argentino de Informatica y Salud*. La Plata, Argentina: SADIO. 2012
- Bouraoui, B., Ronse, C., Baruthio, J., Passat, N. and Germain, P. Gray-level hit-or-miss transform based region-growing for automatic segmentation of 3D coronary arteries. *8th International Symposium on Mathematical Morphology*. Brasil. 2007
- Caballero, K., Barajas, J., Pujol, O., Rodriguez, O. and Radeva, P. Using Reconstructed IVUS Images for Coronary Plaque Classification. *EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*. 2007
- del Fresno, M., Romero, L., Jonas, I., D’Amato, J. and Vénere, M. Segmentación mediante modelos deformables aplicada a imágenes 3D de ultrasonido intravascular. *Congreso Argentino de Informática y Salud*. 2010
- Esper, R., García Guiñazú, C., Bereziuk, E. and Ingino, C. Las derivaciones electrocardiográficas. *Electrocardiografía*. Ed. La Agenda. 1997
- Gibaud, B. The DICOM Standard: A Brief Overview. In: Lemoigne Y and Caner A (eds) *Molecular Imaging: Computer Reconstruction and Practice*. Springer Netherlands, 229-238. 2008
- Jonas, I., Romero, L., Del Fresno, M., D’Amato, J. and Vénere, M. Generación de mallas de elementos finitos para arterias coronarias a partir de imágenes IVUS. *Mecánica Computacional* 28. 2009
- Krishna Prasad, G. and Sahambi, J.S. Classification of ECG Arrhythmias using Multi-Resolution Analysis and Neural Networks. *TENCON 2003*. 2003
- Liang, Y., Oakeson, K., Zhu, H. and Friedman, M. Estimation of Arterial Wall Strain Based on IVUS Image Registration. *28th IEEE EMBS Annual International Conference*. 2006

- Silipo, R. and Marchesi, C. Artificial Neural Networks for Automatic ECG Analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing* 46: 1417-1425. 1998
- Taki, A., Hetterich, H., Roodaki, A., Setarehdan, S., Unal, G., Rieber, J., Navab, N. and König, A. A new approach for improving coronary plaque component analysis based on intravascular ultrasound images. *Ultrasound in Medicine & Biology* 36: 1245–1258. 2010
- Telayna, J. Ultrasonido Intravascular (I.V.U.S.): Lecciones del pasado, utilidad presente y perspectivas futuras. In: *Cardiología FAd (ed) 3° Congreso Virtual de Cardiología*. 2003
- Vidal Silva, C., Gatica Rojas, V., Alegría León, D. and Arce Lillo, P. Mejoramiento de algoritmo clásico de detección de complejos QRS en señal electrocardiográfica. *Revista Chilena de Ingeniería* 18. 2010
- Zhang, X., McKay, C. and Sonka, M. Tissue Characterization in Intravascular Ultrasound Images. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 17: 889-899. 1998