

Desarrollo de un sistema de entrenamiento médico para artroscopia de rodilla

Ing. Oscar Herrera*, Dr. Rolando Espitia**, Dr. Gamal Zayed***, Ing. Pablo Figueroa****,
Ing. Jorge Torres*****, Ing. Antonio García*****

* Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica y Computadores. Universidad de los Andes.

** Residente de Ortopedia y Traumatología. Universidad El Bosque.

*** Departamento de Ortopedia y Traumatología, Artroscopia y Cirugía de la Rodilla. Fundación Santa Fe de Bogotá.

**** Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad de los Andes.

***** Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad de los Andes.

Correspondencia:

o-herrer@uniandes.edu.co

rolandoec@gmail.com

Fecha de recepción: noviembre 15 de 2007

Fecha de aprobación: agosto 14 de 2008

Resumen

Se presenta el desarrollo de un prototipo de simulador para entrenamiento en los procedimientos médicos de artroscopia de rodilla. El objetivo es implementar un sistema que permita simular algunos procedimientos artroscópicos empleando un dispositivo háptico de retorno de fuerza. Para esto se construyó un modelo tridimensional de la articulación de la rodilla. Con base en imágenes de resonancia magnética, se simulan algunos de los efectos percibidos durante una artroscopia real y se implementan las escenas gráficas y hápticas que permitan contrastar las sensaciones que se perciben en un proceso artroscópico.

Palabras clave: realidad virtual, simulación por computador, procesamiento de imagen asistida por computador, modelos en 3D, imagen por resonancia magnética, dispositivos hápticos.

Abstract

A simulator prototype is presented, for the appropriate training of physicians in knee arthroscopy. The objective is to implement a new system that allows the simulation of some arthroscopic procedures, by the use of a haptic force device. To achieve this, a 3D knee model was built. Based on MRI, some of the effects during an actual arthroscopic procedure were reproduced. Real time graphic and haptic scenes were implemented, in order to replicate those present in an actual arthroscopic procedure.

Key words: Virtual reality, computer simulation, image processing, computer-assisted, 3D models, magnetic resonance imaging, haptic devices.

Introducción

El desarrollo de simuladores de procedimientos quirúrgicos ha tenido un avance progresivo en los últimos diez años, en particular, orientado al entrenamiento médico. Se destacan, entre otros, los creados por consorcios entre diversas instituciones como: Cambridge University, Carnegie Mellon University y Mitsubishi que desarrollaron el primer simulador de artroscopia de rodilla (1); Foundation Trust y Sheffield Teaching Hospital que desarrollaron el sistema "SKATS" (*Sheffield Knee Arthroscopy Training*) (2); Warwick University, Imperial College of London y Sheffield Hospital que desarrollaron el sistema "WISHKATS" (*Warwick, Imperial, Sheffield Knee Arthroscopy Training*) (3).

Existen diversos desarrollos de simuladores semejantes en Estados Unidos y Europa (4, 5, 6, 7, 8, 9), algunos orientados a procedimientos en rodilla y otros dispuestos para otros procedimientos quirúrgicos, por ejemplo gineco-obstétricos (10). Actualmente, los esfuerzos se centran en la validación médica en las etapas de formación de especialistas (11, 12).

En Colombia y, en general, en América latina no encontramos antecedentes de trabajos semejantes en esta dirección. Los procesos de entrenamiento médico se desarrollan hoy en día con la participación directa del estudiante de la especialidad

médica en el procedimiento, con el paciente real o mediante entrenamiento con cadáveres.

Dada la necesidad de desarrollar sistemas de entrenamiento médico en el país que empleen plataformas virtuales, se optó por realizar un simulador de artroscopia de rodilla: en el proceso de entrenamiento médico resulta de particular importancia la manipulación de instrumentos y estructuras anatómicas que no cuentan con visibilidad directa y la coordinación entre las manos y los ojos del especialista que requieren de la pericia que solo se gana con la práctica.

Se presenta la metodología empleada para el desarrollo del simulador, desde la obtención de las imágenes, su procesamiento para obtener un modelo en 3D reconstruido a partir de imágenes reales de resonancia magnética, hasta la puesta en operación sobre la plataforma de retorno de fuerza y las primeras pruebas desarrolladas.

Materiales y métodos

Actualmente, la cirugía mínimamente invasiva marca el futuro del manejo médico de ciertas patologías. Para la capacitación del personal en estas técnicas sin poner en riesgo a los pacientes, se requieren métodos de simulación que sean lo más reales posibles por lo que se propone el desarrollo de un prototipo de simulación que cuenta tanto con imágenes como con sensación táctil.

La artroscopia de la articulación de la rodilla emplea los siguientes instrumentos: un monitor de alta definición, una fuente de luz con cables de fibra de vidrio, un sistema de ópticas con regulación automática de color e intensidad de la luz, una impresora para fotografías intraoperatorias, un VHS, una cámara de video digital para grabaciones digitales de alta resolución, un panel de instrumental motorizado que consiste en un par de motores que emplean distintos tipos de cuchillas y fresas, y un artroscopio con sondas o exploradores que se consiguen en el mercado en dimensiones de 1,9 a 8,0 mm (figura 1).



Figura 1. Imagen de una artroscopia.

El prototipo consta de un ambiente virtual de una rodilla simulada por computador (modelo 3D) y de ciertas texturas que intentan reproducir la sensación de un procedimiento artroscópico real (dispositivo de retorno de fuerza). En la actualidad existen varios modelos de este tipo en diversas áreas que pueden ser tan reales y probados como los simuladores de vuelo sin los cuales los pilotos de algunas aerolíneas no pueden iniciar su experiencia laboral.

Para el desarrollo del sistema se requiere de una etapa de pre-procesamiento de las imágenes de resonancia magnética durante la cual éstas son segmentadas. Posteriormente se construye el modelo en 3D a partir del cual se crean las escenas gráficas o geométricas y hápticas o de retorno de fuerzas, de tal forma que cuando el dispositivo háptico interactúa con el modelo virtual, éste puede modificarse generando cambios en la escena geométrica que a su vez son visualizados en el computador. En la figura 2, se observan las principales características del sistema desarrollado.

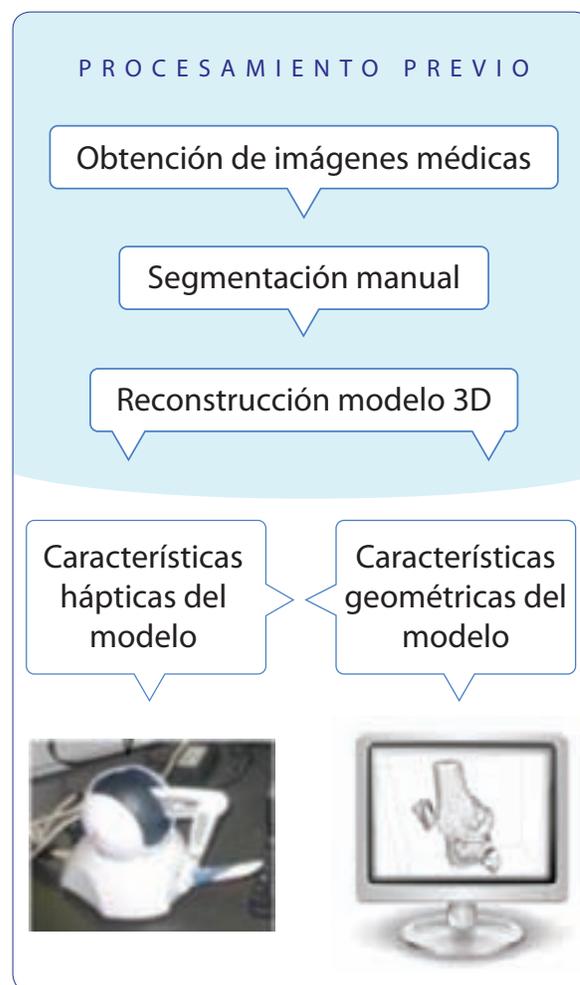


Figura 2. Sistema de simulación de artroscopia.

Construcción de un modelo 3D

Con el fin de construir un modelo tridimensional de la articulación de la rodilla, se desarrolló un procedimiento de segmentación manual sobre imágenes de resonancia magnética, con el cual se busca tener un prototipo de referencia que sirva para posteriores procesos de segmentación automática y contar con un modelo real para el simulador de artroscopia.

Durante el desarrollo del modelo 3D del simulador, se emplearon herramientas de uso libre para el procesamiento de imágenes como GIMP, ITK, VTK y ParaView.

El procedimiento empleado fue el siguiente:

1. Obtención de las imágenes

Objetivo: obtener series de imágenes de buena resolución en diferentes cortes y diferentes modos o secuencias de operación.

Resultado esperado: varias series de imágenes en diferentes cortes y secuencias de operación, de donde sea posible seleccionar la serie que permita visualizar con mayor claridad las diferentes estructuras de interés, las estructuras vecinas, las imágenes en las que una estructura inicia y finaliza, así como los puntos de cruce y nacimiento de otras estructuras de interés.

En este punto es necesario obtener los datos técnicos de operación tanto de la máquina como de las imágenes pues esta información, como el número y la distancia entre píxeles, la separación entre los cortes y la secuencia o el modo de aplicación son importantes para el proceso de reconstrucción en 3D.

Una gran cantidad de cortes por serie de imágenes permite obtener un modelo más cercano a la realidad pero requiere mayor tiempo para su segmentación.

2. Delineamiento de las zonas de interés

Objetivo: demarcar los contornos de cada estructura de interés en cada corte de 2D.

Resultado esperado: una serie de contornos cerrados en cada imagen de 2D, que representan el límite de cada estructura de interés.

En este paso es conveniente emplear algún programa de manipulación de imágenes que permita adicionar capas transparentes a la imagen original. Ésta se convertirá en el fondo y las capas transparentes serán el lugar donde se construyan los contornos.

3. Relleno con tonos de gris

Objetivo: rellenar en colores diferentes cada parte delineada.

Resultado esperado: secciones de 2D con asignación de gris que diferencien cada parte o estructura de interés de las demás.

En este punto es importante saber la cantidad de estructuras que se desea segmentar, de tal forma que la separación en la escala de gris se mantenga uniforme. La forma de calcular la separación es dividiendo los 256 valores de la escala entre el número de partes que se van a segmentar y asignar los valores de gris guardando dicha separación.

4. Eliminación del fondo

Objetivo: obtener una serie de imágenes de una sola capa.

Resultado esperado: una serie de imágenes que en una capa contienen las partes de interés.

Aquí, con la ayuda del programa de manipulación de imágenes, se cambia la imagen original de fondo por un fondo negro y se combina todo en una sola capa.

5. Construcción del modelo en 3D

Objetivo: recuperar un modelo de 3D con base en las imágenes segmentadas manualmente.

Resultado esperado: un prototipo de la anatomía seleccionada que permite su visualización desde diversas direcciones.

Se deben emplear herramientas para la reconstrucción volumétrica y la visualización, teniendo en cuenta las características del hardware de la máquina en la que se corre el modelo y la cantidad de imágenes que se hayan segmentado.

6. Administración de las imágenes

Objetivo: mantener una secuencia lógica y ordenada de las imágenes de trabajo que permita reversar o ajustar cualquier parte del proceso.

Resultado esperado: una serie de carpetas donde se mantiene cada secuencia de imágenes completas por cada proceso que se aplica.

Éste, que realmente no es el último proceso sino uno paralelo, resulta importante en la medida en que permite encontrar y corregir cualquier error que se pueda generar. Resulta valioso cuando el número de imágenes es grande y, además, permite adicionar posteriormente otras estructuras sin tener que volver a realizar el proceso sobre todo el modelo.

En la figura 3 se observa el resultado de la segmentación manual sobre una imagen 2D.

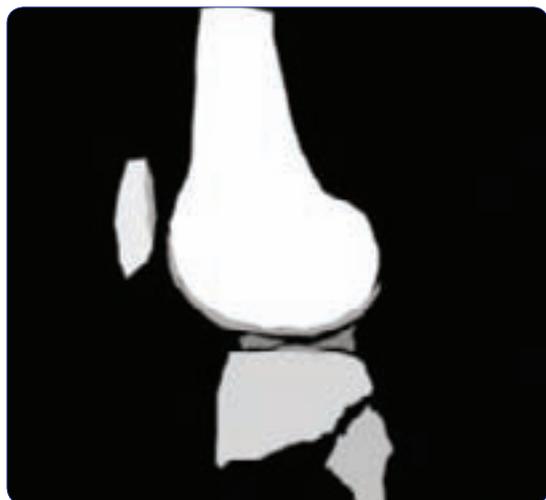


Figura 3. Resultado del proceso de segmentación manual.

Acople del dispositivo de retorno de fuerza

Al modelo 3D desarrollado se le acopló un robot de retorno de fuerza, dispositivo que permite retroalimentar al usuario con las sensaciones de fuerza y velocidad que se generan en el ambiente virtual. Posteriormente, se realizaron pruebas iniciales para evaluar las características táctiles generadas, primero por un residente de ortopedia y posteriormente por un ortopedista especialista en artroscopia.

Se empleó un dispositivo “Phantom Omni” de la marca Sensable Technologies, el cual básicamente es un brazo robot de seis grados de libertad que permite retroalimentar las siguientes sensaciones: *stiffness*, o dureza del objeto que se está tocando en el ambiente virtual; *damping*, o reducción de la elasticidad de la superficie; *static friction*, o fricción estática de la superficie; *dynamic friction*, o fricción dinámica del cursor sobre la superficie; y *popthrough*, o control de la cantidad de fuerza que el usuario puede aplicar a la superficie.

Adicionalmente, se construyó un modelo que permite simular la deformación de estructuras como los ligamentos cruzados y los meniscos. La deformación es tratada aquí en una etapa inicial generando una malla sobre la superficie de las partes, de tal forma que en los puntos donde se interactúa con la superficie, ésta detecta los puntos de choque del cursor, modifica los puntos del enmallado y redibuja la superficie. Aquí no se tienen en cuenta, por ahora, los efectos de la fuerza aplicada sobre el modelo.

Resultados

Se construyeron dos modelos de la articulación de la rodilla empleando la metodología descrita. Para el primero, se utilizó

una serie de 17 imágenes de resonancia magnética en corte sagital de rodilla izquierda en secuencia spin echo, de 512 x 512 píxeles con una separación entre imágenes de 4,6 mm. Para el segundo, se utilizaron 337 imágenes de rodilla derecha tomadas en cortes sagitales en una secuencia spin echo con una resolución de 512 x 512 píxeles con una separación de 0,33 mm entre los cortes.

En la figura 4 se observa la reconstrucción en 3D de una serie de 17 imágenes segmentadas más la aplicación de un filtro de contorno para observar la superficie de todo el modelo. En la figura 5 se observa el resultado de una segmentación para la serie de mayor resolución espacial, visualizado con VTK (13). La primera es una prueba piloto en la cual se genera una imagen tridimensional de baja calidad y la segunda tiene una fidelidad mayor pero el tiempo para su realización es mucho mayor ya que el delineado es manual.

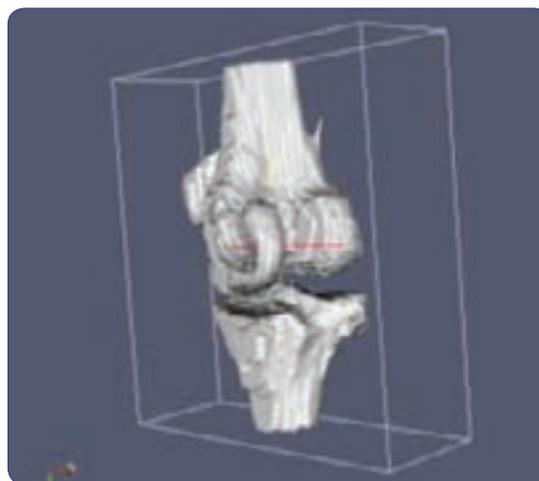


Figura 4. Modelo de rodilla en 3D, vista de los contornos.

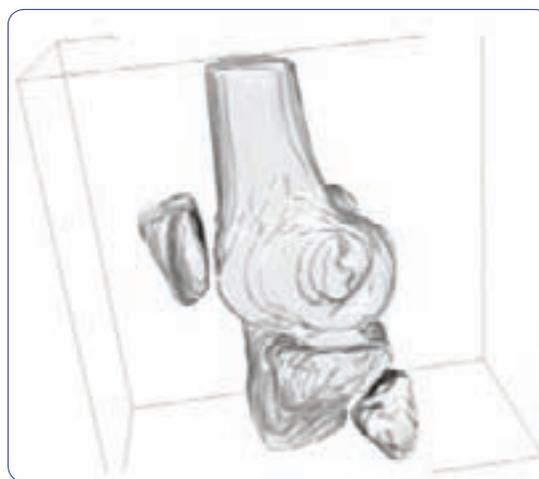


Figura 5. Modelo de rodilla derecha en 3D, segmentada, empleando 337 imágenes.

La figura 6 muestra la extracción de la tibia como parte del modelo segmentado; de igual forma, se pueden obtener todas las partes segmentadas.

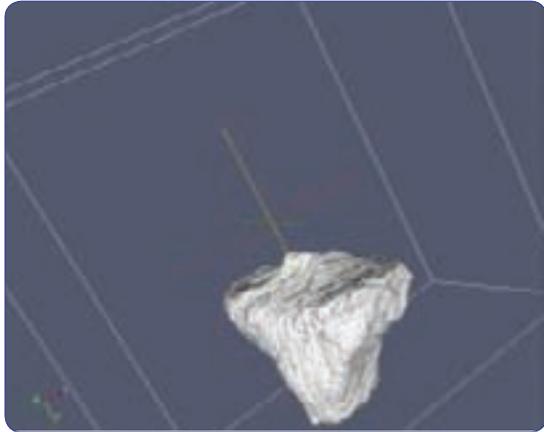


Figura 6. Tibia segmentada recuperada del modelo 3D.

En la figura 7 se pueden observar los diferentes volúmenes segmentados y presentados en una ventana de VTK. Allí, son claramente identificables el fémur, la rótula, la tibia y los cartílagos femorales y tibiales.

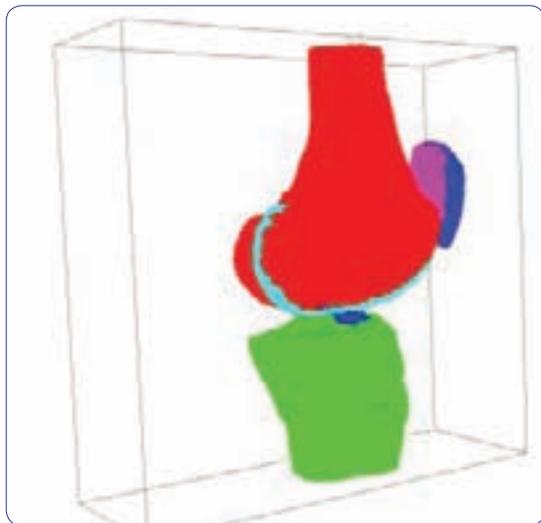


Figura 7. Diferentes volúmenes de la rodilla segmentados del modelo 3D.

Para las etapas de validación de la construcción del modelo 3D y del ambiente háptico, se contó con el trabajo de profesionales de la ingeniería y la medicina, quienes probaron los sistemas e hicieron aportes tanto para el proceso de segmentación como para el ajuste de las características de las sensaciones que el sistema genera. La alimentación sensitiva del sistema fue asistida en todo momento por una persona en

entrenamiento en artroscopia. Una vez alimentado el sistema, un experto en cirugía artroscópica con más de 5 años de experiencia llevó a cabo una prueba final encontrando que algunas de las sensaciones básicas tales como la forma y la textura de ciertos tejidos, el agarre y la manipulación experimentados, y la noción de profundidad, se aproximan a los percibidos en una artroscopia real.



Figura 8. Prototipo de simulador de artroscopia operando.

En la actualidad, el navegador solo cuenta con una rodilla sana (meniscos y ligamento cruzado anterior sanos). En el futuro, se planea alimentarlo con situaciones patológicas las cuales se someterán a una validación similar.

Discusión

Este trabajo es la primera aproximación en Colombia al desarrollo de simuladores de procedimientos quirúrgicos que emplean dispositivos de retorno de fuerzas. Se realizaron dos modelos: el primero se desechó por tener una baja definición mientras que el segundo, modelo de alta definición, se cargó con el dispositivo de retorno de fuerza y se alimentó con las sensaciones dadas por un experto en el tema.

En la actualidad, se han diseñado alrededor del mundo múltiples sistemas similares en conjunto con grandes hospitales y multinacionales. En efecto, el primer simulador de artroscopia de rodilla fue desarrollado por la Cambridge University y la Carnegie Mellon University, en asocio con la Mitsubishi (1). Asimismo, la Simulab Corporation diseñó un simulador endoscópico que ofrece desde el entrenamiento inicial en triangulación básica hasta modelos avanzados de cirugías endoscópicas tanto abdominales como de rodilla y cadera.

Los modelos en 3D generados sirven para optimizar procesos de segmentación automática o semiautomática en el campo de la ingeniería electrónica y de la programación puesto que, al crear un proceso definido, se ahorra tiempo en el momento de realizar la programación del sistema. Así, empleando otras secuencias de imágenes de resonancia magnética nuclear y no solamente de spin echo es posible obtener mejor y más clara información de las imágenes con programas más versátiles y completos que están disponibles en la actualidad. Es necesaria la integración de plataformas de programación para el desarrollo de este tipo de aplicaciones dado que la diversidad de plataformas aquí empleadas dificultó el trabajo desarrollado.

En una siguiente fase es posible mejorar el modelo de deformación, empleando sistemas de masa resorte o elementos finitos, siempre que se tengan en cuenta los tiempos de procesamiento para que la simulación se pueda desarrollar en línea. En etapas siguientes, el sistema debe permitir adicionalmente a la simulación de las sensaciones básicas durante la artroscopia, el desarrollo de partes del procedimiento tales como la triangulación de los instrumentos sobre el campo visual de la cámara, para lo cual se requiere un dispositivo háptico adicional.

Referencias bibliográficas

- Gibson S, Samosky J, Mor A, Fyock C, Grimson E, Kanade T, Kikinis R, Lauer H, McKenzie N, Nakajima S, Ohkami H, Osborne R, Sawada A. Simulating arthroscopic knee surgery using volumetric object representations, real-time volume rendering and haptic feedback. Full Technical Report. Mitsubishi Electric Research Laboratories; 1996 Oct. Report No.: TR1996-019.
- McCarthy AD, Moody L, Waterworth AR, Bickerstaff DR. Passive haptics in a knee arthroscopy simulator: is it valid for core skills training? *Clin Orthop Relat Res* 2006 Jan; 442: 13-20.
- Zivanovic A, Dibble E, Davies B, Moody L, Waterworth AR. Engineering requirements for a haptic simulator for knee arthroscopy training. *Stud Health Technol Inform* 2003; 98: 244-6.
- Muller W, Bockholt U. The virtual reality arthroscopy training simulator. *Stud Health Technol Inform* 1998; 50: 13-9.
- Moody L, Waterworth AR. A flexible virtual reality tutorial for the training and assessment of arthroscopic skills. *Stud Health Technol Inform* 2004; 98: 244-6.
- Mabrey JD, Cannon WD, Gillogly SD, Kasser JR, Sweeney HJ, Zarins B, Mevis H, Garrent WT, Poss R. Virtual reality simulation of arthroscopy of the knee. *Arthroscopy* 2002 Jul-Aug; 18(6): E28.
- Deorto JK, Peden JP. Accuracy of haptic assessment of patellar symmetry in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 2004 Aug; 19(5): 629-34.
- Moodly L, Arthur J, Zivanovic A, Waterworth A. A part-task approach to haptic knee arthroscopy training. *Stud Health Technol Inform* 2003; 94: 216-8.
- Marbrey JD, Cannon WD, Gillogly SD, Kasser JR, Sweeney HJ, Zarins B, Mevis H, Garrent WE, Poss R. Development of a virtual reality arthroscopic knee simulator. *Stud Health Technol Inform* 2000; 70: 192-4.
- Obst T, Burgkart R, Ruckhaberle E, Riener R. The delivery simulator: a new application of medical VR. *Stud Health Technol Inform* 2004; 98: 281-7.
- Cannon WD, Eckhoff DG, Garrett WE Jr, Hunter RE, Sweeney HJ. Report of a group developing a virtual reality simulator for arthroscopic surgery of the knee joint. *Clin Orthop Relat Res* 2006 Jan; 442: 21-9.
- Chant G, Ward J, Wills D, Phillips R, Sherman K. Smart tool for force measurements during knee arthroscopy: in vivo human study. *Stud Health Technol Inform* 2006; 119: 85-9.
- Schroeder W, Martin K, Lorensen B. Visualization Tool Kit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics. New York: Kitware; 2004.