

PROPUESTA DE MONTAJE DE UN DISPOSITIVO DE RECONSTRUCCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES MÉDICAS DE ULTRASONIDO 3D

Este trabajo propone un sistema de reconstrucción y visualización médica tridimensional (3D) a partir de imágenes bidimensionales de ultrasonido (US), utilizando un equipo convencional bidimensional (2D) de ecografía acoplado a un sistema de localización electromagnético remoto. El atractivo de tal sistema se basa en su bajo costo, en comparación con equipos 3D genuinos, exhibiendo las mismas virtudes que éstos últimos.

David Macías Verde

Juan Ruiz Alzola

This work proposes a three dimensional (3D) medical image reconstruction and visualization system, using a standard two-dimensional (2D) ultrasound (US) device coupled to a remote electromagnetic localizer. The interest of such a system is based on its low cost, in comparison with genuine 3D equipments, exhibiting the same virtues that these ones.

INTRODUCCIÓN

Objetivo

El propósito del actual trabajo es proponer un sistema de adquisición y visualización 3D de imágenes médicas de ultrasonido utilizando un equipo convencional bidimensional asistido por un localizador electromagnético adherido al mismo, que es usado para registrar la posición y orientación del transductor ecográfico en cada instante durante la inspección del paciente (Figura 1). El conjunto de B-scans recogidos junto con sus posiciones relativas llenan una matriz regular de elementos de volumen que reconstruyen la región de interés. Finalmente esta matriz se visualiza utilizando un software de renderizado, después de segmentar los volúmenes de la misma. El software utilizado en esta ocasión es el denominado Stradx¹. Se trata

de un programa de libre distribución desarrollado en el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge, Reino Unido.

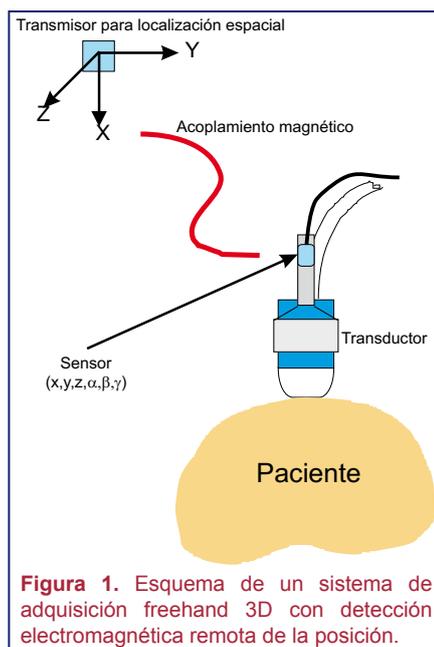


Figura 1. Esquema de un sistema de adquisición freehand 3D con detección electromagnética remota de la posición.

¹ Stradx ha sido desarrollado para Linux (<http://mi.eng.cam.ac.uk/~rwp/stradx/>). En el tiempo que ha transcurrido desde la realización de este trabajo ha surgido Stradwin, que es el software

homólogo para Microsoft Windows® (<http://svr-www.eng.cam.ac.uk/~rwp/stradwin/>)

Se trata de sistemas de bajo costo en comparación con equipos de ecografía 3D genuinos.

ECOGRAFÍA 3D

Introducción

La ecografía 3D extiende el concepto bidimensional creando volúmenes a partir de información pulso-eco. Un acercamiento muy prometedor se centra en la utilización de un transductor matricial que envía y recibe ecos de un conjunto de elementos bidimensional, en lugar de la matriz unidimensional convencional. Alternativamente se encuentran otras técnicas que, haciendo uso de ecógrafos 2D, construyen el volumen tomando una sucesión de B-scans registrados junto con sus localizaciones. Entre éstas, existen dos métodos bien diferenciados de adquisición: manos libres o freehand y cabezal oscilante. En la técnica freehand el transductor tiene libertad absoluta de movimiento y, por tanto, puede adquirir planos arbitrariamente orientados. En la de cabezal oscilante, dos cabezales bidimensionales montados sobre un dispositivo mecánico barren un área dada por un arco predeterminado a una velocidad constante.

Los equipos de cabezal oscilante son más caros, a pesar de estar limitados a unas dimensiones de adquisición dadas que dependen de la construcción del mismo. Los dispositivos freehand son ecógrafos 2D convencionales con un sistema de localización automático añadido artificialmente. Presentan menor coste que los de cabezal oscilante, incluso teniendo en cuenta el gasto en los sistemas externos de localización. No tienen límite en el tamaño del volumen en estudio, utilizando una única cabeza de adquisición que potencialmente presenta mayor definición espacial. Sin embargo, el uso de sensores de localización representa una fuente inherente de errores que hay que tener en cuenta y corregir.

Localizadores automáticos

Centrándonos en la ecografía freehand, existen cuatro formas referenciadas de llevar a cabo el proceso de localización espacial automática de la posición y orientación: acústica, óptica, electromagnética y eléctrica. Acústicamente se mide la posición acoplando un emisor sonoro al transductor y recogiendo la señal con tres micrófonos remotos, colocados en diferentes orientaciones. El método óptico trabaja de forma similar, pero en este caso se instalan al menos tres emisores LED infrarrojos. Su inconveniente es que siempre tiene que existir una línea de visión entre el sistema LED y el sensor óptico. La detección remota también se puede alcanzar utilizando campos electromagnéticos. En este caso el receptor se monta sobre el transductor, y el transmisor, generador del campo, es situado en un lugar fijo. Eléctricamente también es posible adquirir la posición de cada imagen, incorporando un brazo mecánico con uno, tres o seis grados de libertad. En las juntas del brazo se colocan potenciómetros que generan una señal eléctrica cuando se pone en movimiento. Una vez procesada esta señal, devuelve al sistema su posición y orientación. De estos cuatro métodos el más usado es el electromagnético.

Calibración espacial con Stradx

Un aspecto clave de la adquisición freehand 3D, en cualquiera de los modos citados, es la calibración espacial. Ésta no es más que la transformación de coordenadas del plano del ecógrafo al sistema de coordenadas del volumen de reconstrucción. La Figura 2 muestra los cuatro sistemas de coordenadas implicados.

Con el procedimiento de calibración se obtienen una serie de ecuaciones no lineales a partir de posiciones de puntos de un

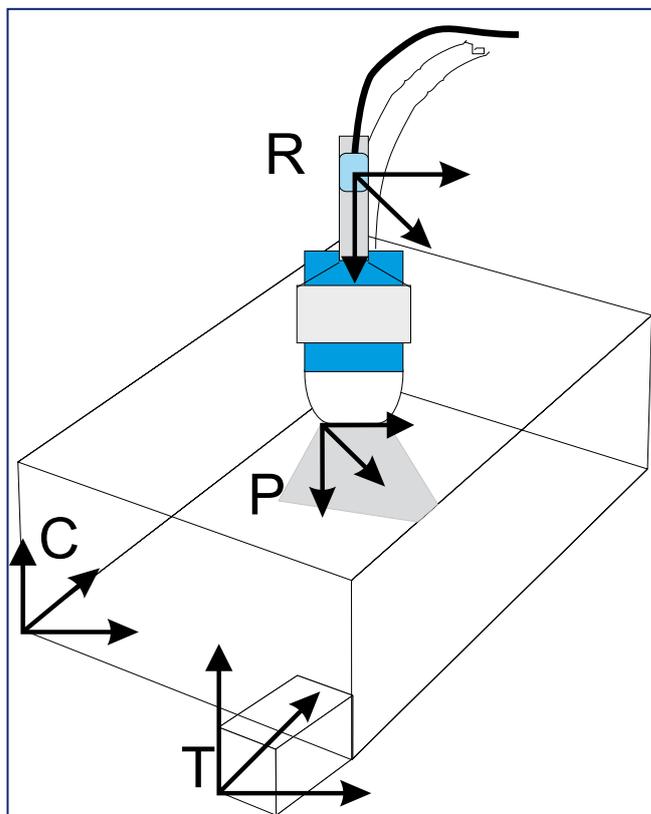


Figura 2. Sistemas coordenadas (cuatro) utilizados para la reconstrucción volumétrica. **P** es el sistema de coordenadas del plano adquirido con el origen en la esquina superior izquierda del mismo. El eje *y* está en la dirección del haz *y*, el *x* en la dirección lateral. El eje *z* se orienta perpendicularmente a este plano, hacia fuera del plano B-scan. **R** es el sistema de coordenadas del sensor receptor de posición y **T** es el del transmisor electromagnético. El volumen de reconstrucción, a partir del conjunto de B-scans adquiridos, toma la forma de una matriz **C**, tridimensional, de elementos de volumen, o vóxeles. El origen del sistema de coordenadas **C** está en la esquina del volumen de reconstrucción. Durante la reconstrucción, cada píxel del B-scan ha de quedar localizado con respecto al volumen de reconstrucción **C**. Sus coordenadas en **P**, ${}^P x$, han de ser transformadas, en primer lugar, al sistema de coordenadas del receptor **R**, luego al sistema del transmisor **T** y finalmente al sistema **C**.

maniquí de dimensiones geométricas conocidas. Las ecuaciones planteadas, resueltas por métodos iterativos, dan lugar a unas coordenadas consistentes con la localización 3D del objeto escaneado. El resultado de la calibración son seis constantes de offset, o compensación, tres de posición y tres de orientación. Los valores de compensación han de añadirse a la lectura del sensor para calcular la posición de los B-scans durante la reconstrucción. Una vez calibrado el conjunto, el sistema está listo para adquirir cualquier volumen de datos real.

Existen diversos maniqués de calibración con Stradx, citados a continuación.

- Maniquí de alambre cruzado: consiste en dos alambres que se cruzan en el fondo de una cubeta llena de agua que, escaneados repetidamente desde diferentes direcciones, muestran en cada una de ellas una cruz detectable en la imagen. Su evaluación permite obtener los parámetros de calibración correspondientes. La exactitud de esta calibración depende de la linealidad y estabilidad de los alambres dentro del agua.

- Maniquí de tres alambres: se trata de tres alambres en direcciones ortogonales colocados en el fondo de una cubeta llena

de agua. Su exactitud depende también de la linealidad de los alambres y de la estabilidad de los mismos dentro del agua, así como de su perpendicularidad.

- Baño o cubeta de agua: consiste en un recipiente lleno de agua del cual se toman imágenes de su fondo. Éste será reconstruido como un plano con los parámetros de calibración correctos. La precisión de este método depende del grado de homogeneidad del fondo y de la estabilidad del mismo. Presenta algunos problemas relacionados con la anchura

El sistema es transportable de forma sencilla de unos ecógrafos a otros

del haz ultrasónico y con la naturaleza de las reflexiones que se producen. Cuando el haz no es perpendicular, el primer eco en regresar al transductor desde el fondo es el más cercano a este último. El efecto introduce errores en las adquisiciones con ángulos oblicuos. Este fenómeno ocurre también en los dos maniqués anteriores.

- **Maniqué de Cambridge:** el maniqué de Cambridge fue diseñado por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge para eliminar los problemas inherentes a las calibraciones sobre la cubeta de agua. El dispositivo consiste en dos partes: una abrazadera que fija la sonda ecográfica y una barra de latón de pequeño espesor montada sobre dos discos circulares (Figura 3). La idea es que el sistema sólo deje que el transductor esté enfrentado rígidamente con la barra de latón, que es precisamente el objeto de dimensiones conocidas con el que hacemos la calibración.



Figura 3. Maniqué de Cambridge: el transductor va montado sobre una base móvil con ruedas, dirigido hacia una lámina de latón. El sistema está inmerso en una cubeta llena de agua.

MATERIAL

El material utilizado en la realización del trabajo es el siguiente:

- Equipo de ecografía convencional Orion de la casa comercial Philips. La marca y modelo se mencionan meramente como anécdota, pues este sistema es instalable en cualquier ecógrafo 2D convencional.

- Ordenador PC Intel Pentium IV a 2.8 GHz con tarjeta de adquisición de video, 1 Gb de RAM y 120 Gb de disco duro.

- Dispositivo de localización electromagnético miniBird 800 de la casa comercial Ascension, diseñado especialmente para equipos de diagnóstico médico. El mini-Bird es un equipo de localización electromagnética remota de uso general. En particular, una de sus aplicaciones es la reconstrucción de ecografía 3D. Las dimensiones de la sonda escogida son 18 mm x 8.1 mm x 8.1 mm.

- Software Stradx, que permite registrar secuencias de imágenes con información de su posición y orientación en el espacio gracias a un localizador de posición.

- Baño o cubeta de agua. Descrito en el apartado anterior.

- Maniqué de Cambridge. Descrito en el apartado anterior.

- Maniqué de resolución para ultrasonidos de la casa comercial CIRS, Modelo 044. A temperatura ambiente el material del que está construido posee las características del tejido de un hígado humano.

FASES

Las fases en las que se dividió el desarrollo del proyecto fueron las siguientes:

A. Montaje del sistema de captura por ultrasonidos 2D y del

dispositivo de localización electromagnético.

B. Calibración espacial del sistema de US 3D con el maniquí de calibración del baño de agua, primero, y de Cambridge, más tarde.

C. Adquisición de imágenes.

DESARROLLO

Montaje: fase A

El montaje del sistema estudiado es el que se muestra en la Figura 4-izquierda. Tanto el ecógrafo como el sensor fueron conectados al ordenador, trabajando sobre el sistema operativo Linux, en donde el software Stradx almacenó las imágenes capturadas junto con su información de posición y orientación espacial. Los pasos a seguir son los que se muestran a continuación.

- Se instala previamente Stradx en el ordenador de trabajo.
- Se conecta un cable coaxial (con conectores BNC-RCA) que envía la señal de vídeo de salida del ecógrafo a la entrada de vídeo de la tarjeta de captura.
- Se fija la abrazadera de aislamiento al transductor.

- Se monta el localizador electromagnético miniBird 800 sobre la abrazadera solidaria con el transductor.

- Se conecta la unidad central del miniBird al ordenador por un cable serial.

- Se coloca el emisor electromagnético en un lugar fijo, lejos de elementos metálicos, manteniendo siempre un campo abierto sin obstáculos entre el mismo y el receptor de la señal.

Todo queda preparado para proceder con la calibración espacial. Una vez finalizada, el sistema está listo para adquirir imágenes, reconstruirlas y visualizarlas en 3D.

Calibración espacial: fase B

En la práctica se utilizaron combinaciones de movimientos que incorporaron un conjunto de datos redundantes, capturándose el maniquí desde todos los ángulos y coordenadas posibles. La secuencia está esquematizada en la Figura 4-derecha. Como resultado de estos movimientos de traslación y rotación del sistema transductor/sonda, se hallan un conjunto completo de incógnitas, necesarias para localización de cada una de las imágenes adquiridas. Para comprobar la bondad de la calibración, es utilizado el valor de la dispersión RMS (Root Mean

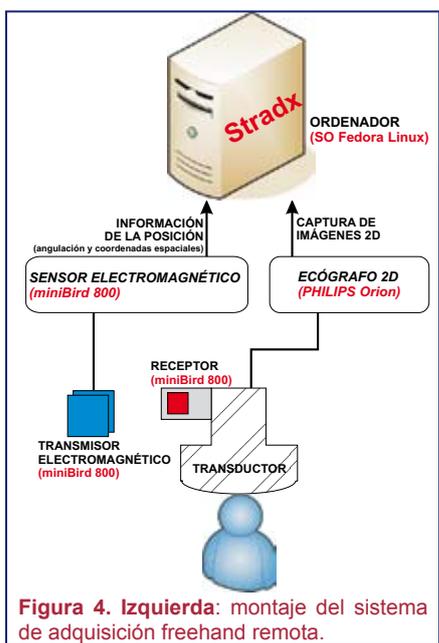


Figura 4. Izquierda: montaje del sistema de adquisición freehand remota.

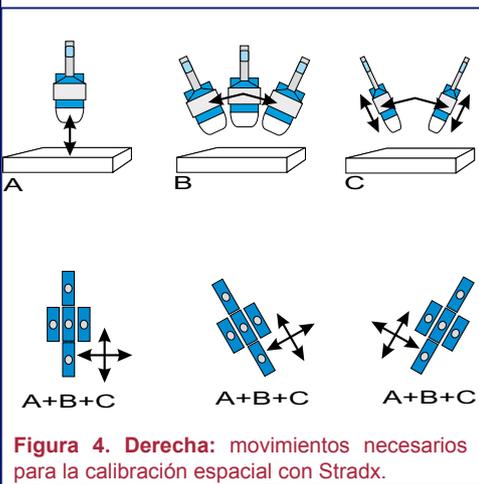


Figura 4. Derecha: movimientos necesarios para la calibración espacial con Stradx.

Square). Este valor es calculado por Stradx.

Para coger experiencia con los movimientos de calibración, inicialmente las calibraciones fueron realizadas en el baño de agua únicamente, por simplicidad, colocando el sensor electromagnético en contacto con el transductor ecográfico, adherido al mango del mismo. Las reconstrucciones obtenidas con aquellas calibraciones no fueron satisfactorias, pues los B-scans de adquisiciones de secuencias cortas y ordenadas se distribuían de forma arbitraria en el espacio, lejos de conformar una estructura volumétrica compacta y consecuente con los volúmenes de prueba escaneados. Estos datos de prueba eran secuencias del propio fondo del baño de agua utilizado en la calibración. Se encontraron aquí dos problemas importantes:

y aleatorios de la sonda. Por ello, se decidió diseñar una abrazadera. Consistió en un tubo alargador que permitía alejar el sensor del transductor. Se estimó que una distancia de separación de unos 30 cm era suficiente para suprimir totalmente el ruido. El alargador fue realizado en metacrilato para evitar artefactos metálicos. En la Figura 5 se muestra una fotografía y el detalle de su diseño.

- La situación del emisor electromagnético con respecto a la sonda fue un parámetro crucial. Aunque este tipo de localizadores se definen en teoría como remotos puros, se debe puntualizar que hay que tener especial cuidado en la distancia entre ambos elementos y la interposición de elementos que, aún siendo no metálicos, introducen pérdidas de comunicación. Se debe, así mismo, asegurar un

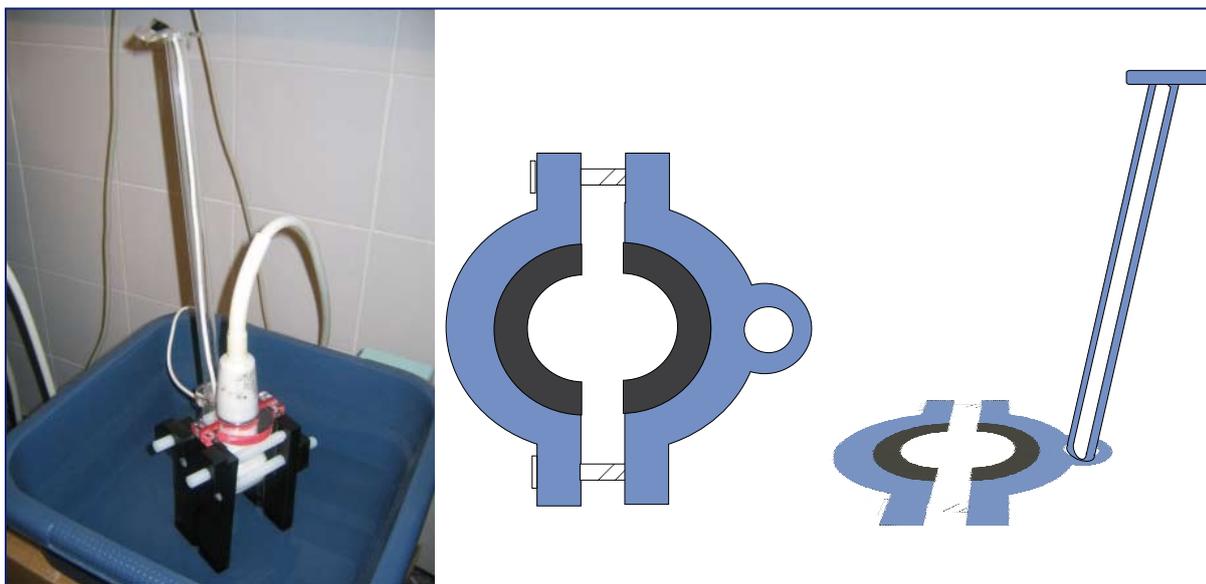


Figura 5. Foto de la abrazadera, montada en el transductor para evitar interferencias en la sonda de recepción, y diseño de la misma.

- Después de muchos intentos para lograr finalizar con éxito las calibraciones espaciales, se detectó que el transductor piezoeléctrico del ecógrafo introducía interferencias en el sensor electromagnético, ya que ambos estaban en contacto directo. Estas interferencias hacían que el miniBird registrara movimientos no reales

buen ángulo de cobertura entre el transmisor y el sensor para establecer una comunicación correcta. Se comprobó que, con el miniBird, las distancias han de ser cortas para obtener volúmenes coherentes; del orden de 30 a 50 cm.

Superados estos dos inconvenientes, el parámetro RMS

alcanzó el intervalo 0.1-0.2 mm; próximos a los valores óptimos indicados por los desarrolladores de Stradx (≈ 0.1 mm). Gracias a este nuevo montaje, se pudieron llevar a cabo mejores calibraciones, obteniéndose secuencias de chequeo más ordenadas y volumétricamente compactas. Sin embargo, la reproducibilidad de valores aceptables de RMS no era demasiado alta, dependiendo de forma importante de la precisión en la secuencia de movimientos de calibración.

Concluido el proceso de calibración con el baño de agua, se procedió a realizar el mismo procedimiento con el maniquí de Cambridge. Con él fuimos capaces de aumentar la reproducibilidad de los valores de RMS satisfactorios, aunque nunca por debajo de 0.1 mm. Las dispersiones conseguidas eran del mismo orden que las del baño de agua. Este incremento se debió, sin duda, a la solidez del sistema, permitiendo un apoyo más rígido del conjunto transductor/abrazadera. De esta forma, los movimientos de calibración no fueron tan libres y diferentes de unas calibraciones a otras, como ocurría antes. Además, con la

barra de latón las imágenes mostraron mejor definición, no apareciendo los problemas típicos de la calibración planar.

Tanto con la cubeta de agua como con el maniquí de Cambridge se halló un resultado interesante. No siempre valores correctos de RMS implicaron calibraciones espaciales satisfactorias. En particular, si no se efectuaban las tres rotaciones indicadas en la Figura 4-derecha, sino que, en su lugar, sólo se procedía con una única orientación, se obtenía un RMS excelente. Sin embargo, al existir orientaciones ausentes en la calibración, la solución hallada no representaba una solución satisfactoria debido a unas matrices de transformación incompletas.

Adquisición de imágenes: fase C

Con aquellas calibraciones que resultaron satisfactorias utilizando el maniquí de Cambridge, se hicieron adquisiciones del maniquí específico para ecografía, de material equivalente a hígado. En particular, se tomaron secuencias de imágenes de los objetos cilíndricos de 12 mm de diámetro inmersos en su estructura. En la Figura 6 se muestra el conjunto

En el campo de la oncología radioterápica, el sistema podría ser utilizado en el posicionamiento de pacientes oncológicos. Supondría un sistema más de IGRT (radioterapia guiada por la imagen).

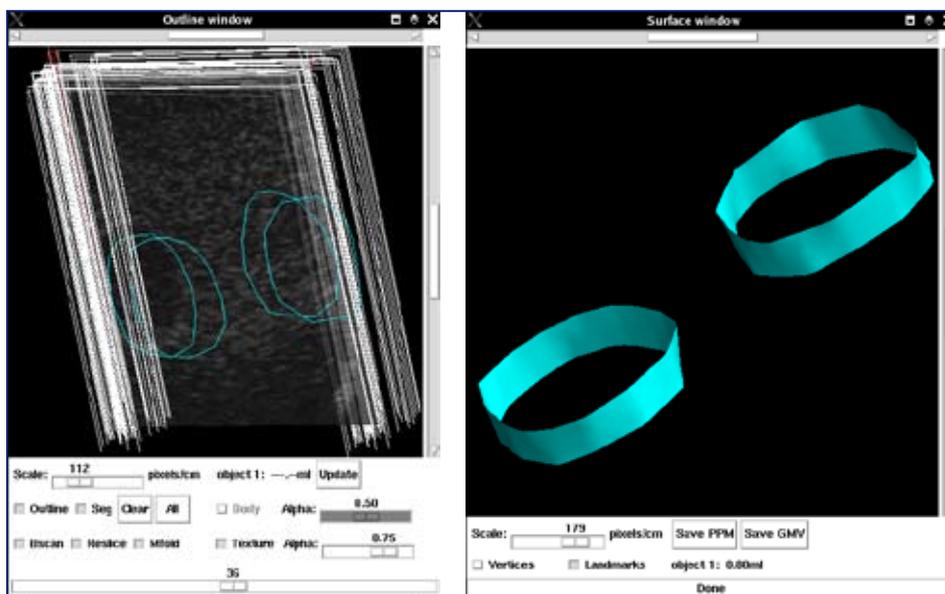


Figura 6. Izquierda: ventana de outline de Stradx mostrando todos los B-scans ordenados compactamente, así como la segmentación realizada sobre ellos. **Derecha:** superficie reconstruida de dos de los cilindros del maniquí de CIRS.

de cortes ordenados y las superficies reconstruidas a partir de dos de esos cilindros, después de segmentados manualmente. Esta segmentación se introdujo en cada uno de los B-scans adquiridos dibujando manualmente en Stradx la silueta de los cilindros. Su herramienta de superficie renderizó luego todos esos contornos teniendo en cuenta su posición y orientación en el espacio, formando una superficie que fue visualizada tridimensionalmente.

CONCLUSIONES

Se ha logrado montar el sistema objeto del estudio. Por tanto, las conclusiones son claras:

- El atractivo principal de nuestro sistema es su bajo costo, en comparación con equipos 3D genuinos, que es capaz de realizar las mismas tareas que éstos últimos.

- El sistema es transportable de unos ecógrafos a otros. Trasladando la sonda electromagnética y el ordenador de adquisición a cualquier instalación que posea un ecógrafo 2D convencional es posible montar la técnica descrita.

- El sistema abre un amplio abanico de posibilidades. Por ejemplo, en el campo de la oncología radioterápica, nuestro equipo podría ser utilizado en el posicionamiento de pacientes oncológicos con cáncer de próstata constituyendo así un sistema más de radioterapia guiada por la imagen (IGRT). Por supuesto, ésta es sólo una de las numerosas aplicaciones médicas posibles.

Como continuación a este trabajo proponemos seguir perfeccionando la técnica de calibración espacial para así lograr una mejor reconstrucción de los volúmenes en estudio. El sistema sería así utilizable para su uso médico sobre pacientes reales.

En el futuro el sistema sería útil para su uso médico sobre pacientes reales

BIBLIOGRAFÍA

[1] L.D. Landau, E.M. Lifshitz, V.B. Berestetskii, L.P. Pitaevskii. Academia de Ciencias Moscú, U.R.S.S. "Curso de Física Teórica. Mecánica de fluidos". Tomo VI. Ed. Reverté. 1991.

[2] K.K. Shung. "Advances in Ultrasound". IEEE Engineering in Medicine and Biology. November/December 1996. Pág. 18.

[3] R.W. Prager, R.N. Rohling, A.H. Gee and L. Berman. "Automatic calibration for 3-D free-hand ultrasound". Technical report CUED/F-INFENG/TR 303, Cambridge University Department of Engineering, September 1997.

[4] J.C. Carr. "3D shape reconstruction using volume intersection techniques". Cambridge University Engineering Department. Technical report CUED/F-INFENG/TR 300. 1997.

[5] R. W. Prager, A. H. Gee and L. Berman. "Stradx: real-time acquisition and visualisation of free-hand 3D ultrasound". Technical report CUED/F-INFENG/TR 319, Cambridge University Department of Engineering, April 1998.

[6] M.R. Williamson. "Ultrasonografía Fundamental". Marban Libros, S.L. 1998.

[7] P.P. Dendy, B. Heaton. "Physics for diagnostic radiology". Institute of Physics Publishing. Medical Science Series. Second Edition. 1999.

[8] T.R. Nelson, D.B. Downey, D.H. Pretorius y A. Fenster. "Three-Dimensional Ultrasound". Lippincott Williams and Wilkins. 1999.

[9] G.M. Treece, R.W. Prager, A.H. Gee and L. Berman. "Fast surface and volume estimation from non-parallel cross-sections, for free-hand 3-D ultrasound". Technical report

CUED/F-INFENG/TR 326, Cambridge University Department of Engineering, July 1998.

[10] **R. Prager.** Module 19: Medical Image Adquisition. “*Handout 3: 2D Ultrasound*”. Cambridge University Engineering Tripos Part IIB. January 2002.

[11] **R. Prager.** “*Module 19: Medical Image Adquisition. Handout 4: 3D Ultrasound. Cambridge University Engineering Tripos Part IIB.*” January 2002.

[12] “*Ultrasonidos: garantía de calidad y aplicaciones clínicas*”. Sociedad Española de Física Médica. 2003.

BIOGRAFÍAS

DAVID MACÍAS VERDE

Licenciado en Ciencias Físicas, con la especialidad de Astrofísica (1993). Radiofísico Hospitalario Adjunto adscrito al Servicio de Física Médica, primero en el Hospital Nuestra Señora del Pino (1995-2000) y, en la actualidad en el Hospital de Gran Canaria “Dr. Negrín”

Especialidad Sanitaria de Radiofísica Hospitalaria en el año 2000. Plaza por oposición para personal estatutario fijo en el Hospital Universitario de Gran Canaria Dr. Negrín, Servicio Canario de Salud, como Facultativo Especialista de Área con la Especialidad de Radiofísica Hospitalaria (2005).

Profesor de Protección Radiológica en el Centro de Estudios Técnicos Superiores de Canarias (CE-TESCA), Clínica San Roque, Las Palmas de Gran Canaria (2001 y 2005). Profesor de Biofísica en la Delegación de la Escuela Univer-

sitaria de Enfermería de la Universidad “Fernando Pessoa” de Portugal en Las Palmas de Gran Canaria (curso 2004-05). Secretario de la Sociedad Canaria de Física Médica (2006). Su interés se centra en las nuevas tecnologías en el mundo de la Física Médica, tanto desde el punto de vista diagnóstico como terapéutico.

JUAN RUIZ ALZOLA

El Dr. Juan Ruiz Alzola es Ingeniero en Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid (1992). Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid (1998). Research Fellow in Radiology, Harvard Medical School (Boston), 1999-2000. Research Fellow in Radiology, Brigham & Women’s hospital (Boston), 1999-2000.

Profesor Titular en el Departamento de Señales y Comunicaciones de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y Profesor Visitante en la Facultad de Medicina de la Universidad de Harvard (EEUU).

El Dr. Ruiz ha sido director científico-técnico del Centro de Tecnología Médica (CTM). El CTM fue fundado conjuntamente por la ULPGC y por el Hospital de Gran Canaria “Dr. Negrín” el año 2001 con el objetivo de desarrollar nuevas aplicaciones de imágenes médicas. El interés investigador del Dr. Ruiz Alzola se centra en procesado de señal, visión por computadora y sus aplicaciones médicas. Actualmente es Director de Investigación y Tecnología del Instituto Tecnológico de Canarias.

Patrocinador de esta investigación:

PUBLICIDAD ATLANTIS, S.A.