

Entorno didáctico de bajo coste para formación en tecnologías de cirugía guiada por imagen y robótica

B. Rodríguez-Vila^{1,2}, A. Gutiérrez³, M. Peral-Boiza^{2,3}, H. Ying¹, T. Gómez-Fernández^{2,3}, E.J. Gómez^{1,2,4}, P. Sánchez-González^{1,2,4}

¹ Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, {brvila, egomez, psanchez}@gbt.tfo.upm.es

² Centro de Tecnología Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

³ E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, España, aguti@etsit.upm.es

⁴ Centro de Investigación Biomédica en Red de Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina, Madrid, España.

Resumen

Este trabajo de investigación presenta un nuevo entorno didáctico de bajo coste para la formación ingenieril de temáticas de cirugía guiada por imagen y robótica. Con este entorno se pretende mejorar la motivación y autonomía del alumnado, que hasta el momento se hallaba acotada debido al alto componente teórico de las sesiones impartidas. El entorno está formado por un phantom, una herramienta software, un sistema robótico y un manipulador que permite obtener una realimentación háptica. Se ha llevado a cabo una experiencia piloto en la asignatura de cuarto curso "Simulación y planificación quirúrgica" del Grado de Ingeniería Biomédica de la Universidad Politécnica de Madrid. Los resultados de las encuestas llevadas a cabo muestran que la nueva metodología mejora en todos los casos los valores obtenidos usando la metodología clásica basada en la clase magistral y prácticas.

1. Motivación

La cirugía guiada por imagen (CGI) es el término genérico usado para cualquier procedimiento donde el cirujano usa instrumental quirúrgico localizado espacialmente, junto con imágenes médicas, preoperatorias o intraoperatorias, y/o modelos virtuales generados a partir de ellas para guiar el procedimiento quirúrgico. Los sistemas de cirugía guiada por imagen usan sistemas de posicionamiento mecánico, óptico, acústico y/o electromagnético para capturar la anatomía del paciente y relacionar los movimientos del cirujano con ésta, permitiendo la visualización en pantallas dentro del quirófano.

La cirugía robótica o cirugía asistida robóticamente (CAR) son términos usados para referirse a desarrollos tecnológicos que usan sistemas robóticos para asistir en procedimientos quirúrgicos. En este caso, en vez de mover directamente el instrumental quirúrgico, el cirujano usa un tele-manipulador para controlar los instrumentos de forma remota.

Hasta el momento, las asignaturas relacionadas con CGI y CAR impartidas en los grados y másteres de ingeniería biomédica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) tienen un enfoque mayoritariamente teórico. De esta manera, los alumnos no adquieren conocimientos prácticos a través de la utilización de los conceptos teóricos en el desarrollo de aplicaciones reales. Así, las metodologías que se suelen aplicar constan de unas sesiones en las que se

presentan los conocimientos teóricos que se desea que adquiera el alumno, y en el mejor de los casos, unas sesiones prácticas guiadas en las que el alumno puede observar el resultado de aplicar esos conocimientos teóricos a un caso concreto.

Con este entorno de formación piloto, se pretende mejorar la motivación del alumnado, así como su autonomía, involucrándolo directamente en su formación mediante el uso de una metodología didáctica que parte de la idea del aprendizaje experimental, en el que el alumno aprende haciendo. El principal problema para el uso extensivo de metodologías pedagógicas más activas en la docencia de CGI y CAR radica en que estos sistemas, comerciales o en investigación, usan tecnologías excesivamente caras. Sin embargo, los conceptos básicos que subyacen pueden ser replicados en versiones simplificadas, sin tener que tener un objetivo clínico real ni por lo tanto restricciones de precisión y/o seguridad.

2. Estado del arte

Actualmente existen en la literatura artículos sobre sistemas, herramientas y tecnologías disponibles para la simulación en cirugía, ya sea de desarrollo de un sistema propio [1]-[5] o de revisión del estado de arte de las diferentes tecnologías implicadas en la simulación [6][7].

En [1] los autores desarrollaron una serie de tareas y herramientas con un planteamiento costo-eficaz para la educación en sistemas de navegación guiado por imagen usando Image-Guided Surgery Toolkit (IGSTK) [8], en la que se pretende que los alumnos desarrollen un entendimiento de las tecnologías claves de dichos sistemas tales como imágenes médicas, visualización de datos, segmentación, registro, sistemas de rastreo, interacción hombre máquina, etc. Una de las tareas propuestas consiste en construir un phantom de imagen médica mediante piezas de LEGO, en el que se rellena el interior de arroz de forma que no es posible ver las estructuras internas. Se pretende que el alumno tenga una experiencia en primera persona de registro de imágenes biomédicas y del guiado por imagen en una biopsia simulada. Otra herramienta desarrollada fue un sistema de rastreo mediante la cámara de un ordenador portátil y trazadores ópticos. Con dicha herramienta se pretende que el alumno aprenda los

conceptos claves de un sistema de rastreo, los trazadores y sus calibraciones.

Aunque las tareas desarrolladas pueden lograr transmitir al estudiante los fundamentos claves de las tecnologías tratadas, la dificultad de entender un sistema de simulación en cirugía radica en la integración de todas las tecnologías implicadas en un sistema único, y el alumno puede no llegar a apreciar la complejidad del proceso de desarrollo si estudia cada una de éstas por separadas. Además, no llega a explicar los fundamentos de otras tecnologías implicadas en una simulación quirúrgica como la cirugía robótica o la realimentación háptica.

En [2][4] los autores crearon un proceso de simulación basado en ordenador que permite al cirujano experto a crear entornos operativos personalizados, Toolkit for Illustration of Procedure in Surgery (3DTIPS). En dicho sistema se hace uso de tecnologías hápticas y de gráficos 3D para permitir al cirujano ilustrar los conceptos claves de un procedimiento quirúrgico, además de incluir información en formato de texto e imagen. El sistema también permite al cirujano personalizar los órganos y los tejidos que aparecerían en el entorno quirúrgico virtual de forma que puede satisfacer la necesidad formativa de los alumnos de explorar las diversas situaciones que pueden ocurrir en el entorno quirúrgico real. Una vez que se documenta un procedimiento quirúrgico, los alumnos son guiados por el dispositivo háptico siguiendo los movimientos grabados y las instrucciones del cirujano experto durante las lecciones. Este sistema está orientado a la formación de cirujanos y estudiantes de medicina, pero no tiene contenido educativo para la formación ingenieril.

3. Diseño del entorno de formación

Los entornos software reales de simulación en cirugía son demasiados complejos y tienen un coste demasiado elevado para que puedan ser usados en la formación de alumnos de ingeniería biomédica. Por ello, este trabajo ha propuesto el desarrollo de un entorno de simulación quirúrgica simplificado, de uso no clínico, que permita el movimiento de una única herramienta en un grado de libertad (inserción/extracción). El entorno pedagógico completo consta de 3 componentes:

- Un phantom físico, del que se obtiene las imágenes médicas CT y sirve como base para crear los modelos virtuales 3D. Con esto se pretende que los alumnos entiendan el papel fundamental que desempeñan las imágenes médicas, así como su procesamiento y análisis, en la planificación y navegación en cirugía de mínima invasión guiada por imagen.
- Una herramienta software de realidad virtual donde se introducen los modelos virtuales, incluyendo los órganos de interés y las herramientas para la interacción. Se pretende que los alumnos lleguen a apreciar los fundamentos y los conceptos claves de una simulación. Además, se pretende que los alumnos experimenten el caso de una simulación compleja con realimentación háptica.
- Un componente robótico que permite a los alumnos relacionar los eventos que ocurren en el mundo virtual

en la herramienta software y la realidad física, de forma que capten las ideas claves de una cirugía robótica.

3.1. Phantom

Simula el papel del cuerpo del paciente en una operación de cirugía de mínima invasión real y sirve como base para la creación del modelo virtual que se incorpora al entorno pedagógico. El material con el que se fabrica debe ser adecuado para la modalidad de imagen médica seleccionada, en nuestro caso, el CT. Además, el phantom: (1) debe disponer de unos orificios por donde se introduzca el instrumental y permitir la interacción; (2) en su interior debe haber estructuras con diferentes propiedades mecánicas para simular los diferentes órganos del cuerpo humano; (3) debe estar lleno de un medio viscoso que simule el tejido y el líquido intersticial; (4) puede presentar una geometría sencilla, dado que el objetivo no es conseguir un modelo realista del cuerpo humano, sino conseguir transmitir los conceptos básicos de una simulación a los alumnos de ingeniería.

3.2. Herramientas software

Dadas las necesidades del entorno pedagógico que se pretende construir, la herramienta software seleccionada debe cumplir diversas características para cubrir las necesidades del sistema: (1) carga y visualización de imágenes médicas; (2) procesamiento de imagen, más específicamente la segmentación; (3) creación y visualización de modelos virtuales; (4) interacción del usuario con los modelos; (5) detección de colisiones en la interacción entre modelos virtuales; (6) realimentación háptica.

3.3. Sistema robótico

El sistema robótico que se plantea para el entorno pedagógico es un robot con un único grado de libertad que permita la inserción/extracción de una herramienta cilíndrica a través de alguno de los orificios del phantom. El sistema robótico funcionará al mismo tiempo como sistema de posicionamiento mecánico basado en la posición del motor que controle el único grado de libertad.

3.4. Manipulador y realimentación háptica

La interacción del usuario con la herramienta asociada al sistema robótico debe realizarse a través de un dispositivo háptico que tenga al menos un grado de libertad. Este dispositivo debe ser compatible con el sistema de realidad virtual que será el que transmita la información sobre fuerzas.

4. Resultados y discusión

El phantom está formado por un cubo rectangular ensamblado obtenido mediante impresión 3D usando PLA. Las dimensiones son 140 x 210 x 140 mm. Además, en el interior del phantom, se dispone de muescas circulares de 10 mm de diámetro dispuestas de manera regular cada 30 mm, donde se encajan los objetos que se insertan en el interior de la caja. Como objetos, se cuenta con diferentes materiales (PLA, corcho, madera y poliexpan) y formas

geométricas (cubo, esfera, cilindro) visibles a la imagen de CT con diferentes intensidades (Figura 1, izq.).

Existen multitud de herramientas software que cubren las necesidades de visualización y procesamiento de imagen médica, incluyendo habitualmente la creación y visualización de modelos virtuales. Algunas de ellas permiten una interacción del usuario más allá de un simple cambio de perspectiva en la visualización de los objetos. Sin embargo, los autores no han encontrado ninguna herramienta software que incluya las características anteriores y añadan los detección de colisiones y la realimentación háptica.

Por esta razón se han seleccionado dos herramientas independientes, una asociada a la visualización y procesamiento de imágenes médicas y otra asociada a la simulación de realidad virtual.

La primera herramienta permite la obtención de modelos virtuales a partir de imágenes DICOM, y guardar esos modelos en formato STL (*stereolithography*). En el caso concreto del piloto desarrollado se propuso el uso de 3D Slicer [9] o ITK-Snap [10].

La simulación de realidad virtual se desarrolla usando Chai3D [11], un entorno de programación open-source y multiplataforma diseñado para integrar sensación táctil, visualización y simulación interactiva en tiempo real. Este entorno, desarrollado en C++, permite al estudiante entender los conceptos básicos relativos a visualización (uso de cámaras, luces, texturas, etc.), simulación y gestión de colisiones, realimentación háptica e interacción (mediante teclado, ratón o dispositivos hápticos) y desarrollar de manera intuitiva sus propias aplicaciones.

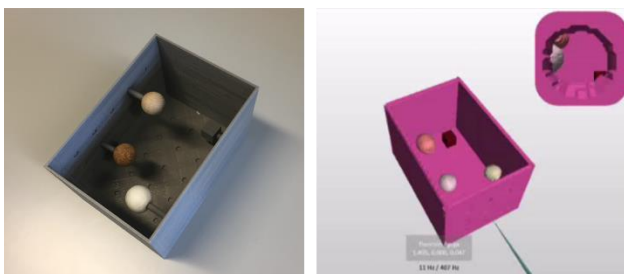


Figura 1. (izq.) Phantom físico y (der.) ejemplo de visualización de los modelos virtuales usando dos cámaras desarrollo por estudiantes.

El sistema robótico, de 1 grado de libertad, está formado por un motor que mueve una aguja a lo largo de un único eje. El motor está controlado por un microcontrolador Arduino conectado al entorno de simulación. De esta manera, el movimiento del dispositivo háptico se traduce en una inserción/extracción de la aguja.

La base del robot se encuentra fija en el entorno de trabajo, mientras que el phantom puede moverse manualmente para que la aguja se inserte por uno de los nueve puntos de acceso (Figura 2).

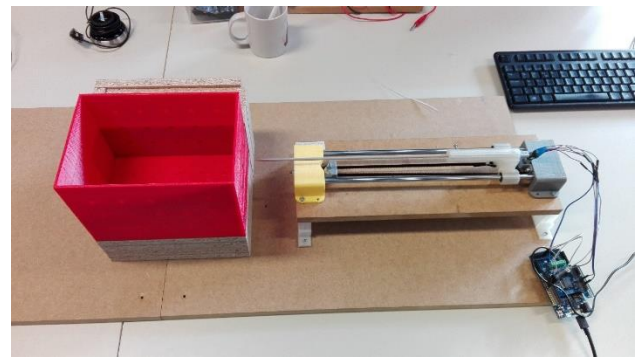


Figura 2. Sistema robótico integrado en el entorno didáctico

Como dispositivo de realimentación háptica para la integración de todo el sistema se ha seleccionado un sistema comercial de bajo coste orientado al mundo de los videojuegos, Novint Falcon (Novint Technologies, Inc.) (Figura 3). Novint Falcon es compatible con Chai3D y su integración con éste no requiere ningún desarrollo añadido. Este dispositivo tiene tres grados de libertad por lo que se ha modificado el controlador de Chai3D asociado para que únicamente se transmitan los movimientos en el eje de inserción.



Figura 3. Novint Falcon, en primer plano, con el sistema robótico y el phantom en segundo plano.

El entorno pedagógico diseñado y desarrollado permite adaptar la dificultad de los contenidos a distintos niveles de los estudiantes. La prueba piloto de este entorno se ha probado en una asignatura de 4 ECTS que se imparte en el 4º año del Grado en Ingeniería Biomédica de la UPM. La asignatura se ha diseñado siguiendo el concepto de aprendizaje basado en proyectos, donde los alumnos han trabajado en grupos pequeños (de cuatro componentes) a lo largo de un semestre en la realización de su propio simulador.

En este caso, los estudiantes recibieron inicialmente la imagen DICOM del phantom con una distribución desconocida de los elementos internos. Ellos fueron los responsables de crear los modelos 3D y exportarlos a su propia aplicación realizada en Chai3D. Posteriormente se les asignó un Novint Falcon a cada grupo y un sistema robótico que no respondía al movimiento del dispositivo háptico. Los alumnos tuvieron que relacionar el movimiento del háptico con el comportamiento del motor y realizar el registro entre el mundo virtual y el mundo real. Todos los grupos fueron capaces de entregar una aplicación

de simulación funcional propia y diferente que integraba todos los componentes necesarios.

En la Tabla 1 se muestran los valores promedio de los profesores en algunas de las preguntas de la encuesta sobre la actividad docente del profesorado (DOCENTIA-UPM). En general, los valores obtenidos por la nueva metodología mejoran en todos los casos a los valores obtenidos usando la metodología clásica basada en la clase magistral y prácticas. Esta mejora se incrementa significativamente si comparamos la primera edición en la que se aplicó cada una de las metodologías.

Tabla 1. Valores de la encuesta a estudiantes DOCENTIA-UPM en los años analizados

Pregunta	Metodología clásica		ABP
	Primera edición	Última edición	Primera edición
Las tareas previstas guardan relación con lo que se pretende que aprenda en la actividad docente.	3.36	3.36	4.23
El modo en que se evalúa guarda relación con el tipo de tareas desarrolladas.	2.95	3.60	4.20
He mejorado mi nivel de partida, con relación a las competencias previstas en el programa.	3.59	3.79	4.24
El profesor favorece la participación de los estudiantes en el desarrollo de la actividad docente.	3.45	3.68	4.16
En general estoy satisfecho con la labor docente del profesor	3.50	3.78	4.10

Como se puede observar, los alumnos valoran positivamente el cambio en la relación entre tareas y resultados de aprendizaje, la metodología de evaluación, las competencias adquiridas y la participación del alumno en el desarrollo de la asignatura. En la mayoría de los casos la diferencia se acerca o sobrepasa el medio punto en una escala 1-5.

5. Conclusiones

Las metodologías tradicionales basadas en clases magistrales y prácticas para la formación de ingenieros en conceptos de CGI y CAR se están reemplazando por otras que fomenten la motivación y autonomía de los alumnos. En este sentido, se ha desarrollado un entorno didáctico de bajo coste y se ha llevado a cabo una experiencia piloto en una asignatura del Grado en Ingeniería Biomédica de la

Universidad Politécnica de Madrid. Los resultados obtenidos han sido positivos y animan al profesorado a continuar trabajando en esta línea del aprendizaje experimental, en el que el alumno aprende haciendo.

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por el proyecto de innovación educativa EDUCIR de la Universidad Politécnica de Madrid.

Referencias

- [1] Güler Ö, Yaniv Z. Image-guided navigation: a cost effective practical introduction using the Image-Guided Surgery Toolkit (IGSTK). Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2012;2012:6056-9. doi: 10.1109/EMBC.2012.6347375. [PubMed: 23367310]
- [2] Kim M, Ni T, Cendán JC, Kurenov S, Peters J. A Haptic-enabled toolkit for illustration of procedures in surgery (TIPS). Stud Health Technol Inform 2007;125:209. [PubMed: 17377268]
- [3] Yeo YI, Dindar S, Sarosi G, Peters J. Enabling surgeons to create simulation-based teaching modules. Stud Health Technol Inform. 2011;163:723-9. [PubMed: 2133588]
- [4] Cendan J, Kim M, Kurenov S, Peters J. Developing a multimedia environment for customized teaching of an adrenalectomy. Surg Endosc. 2007 Jun;21(6):1012-6. Epub 2006 Dec 16. [PubMed: 17180260]
- [5] Alexander Dawson-Elli, Michael Potter, Alexander Bensch, Cristian A. Linte, "An integrated "plug & play" 3D Slicer module for image-guided navigation for training simulation and guidance", Image and Signal Processing Workshop (WNYISPW) 2014 IEEE Western New York, pp. 23-26, 2014.
- [6] Khunger N, Kathuria S. Mastering Surgical Skills Through Simulation-Based Learning: Practice Makes One Perfect. Journal of Cutaneous and Aesthetic Surgery. 2016;9(1):27-31. doi:10.4103/0974-2077.178540.
- [7] G. S. Ruthenbeck and K. J. Reynolds, Virtual reality surgical simulator software development tools. Journal of Simulation. 7(2), 2013, pp. 101-108.
- [8] Página web del "Image-Guided Surgery Toolkit" <http://www.igstk.org/> (Consultada: Septiembre 2017).
- [9] Página web del programa "3D Slicer" <https://www.slicer.org/> (Consultada: Septiembre 2017).
- [10] Página web de "ITK Snap" <http://www.itksnap.org/> (Consultada: Septiembre 2017).
- [11] Página web del programa "Chai 3D" <http://www.chai3d.org/> (Consultada: Septiembre 2017).