

Utilidad del vídeo quirúrgico en las cirugías de mínima invasión

P. Sánchez-González^{1,2}, I. Oropesa García^{1,2}, E.J. Gómez Aguilera^{1,2}

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

² Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina, Zaragoza, España

Resumen

El vídeo quirúrgico es la principal fuente de información intraoperatoria para el seguimiento de la intervención quirúrgica. Actualmente, su uso como medio de análisis no se halla implantado. Este trabajo presenta su utilidad con casos de uso reales que explotan la información presente en los vídeos a través del procesamiento de los vídeos. Los algoritmos desarrollados permiten la segmentación y seguimiento de los elementos de la escena, la reconstrucción y la localización espacial de los trócares. Se presenta a modo de ejemplos un entorno de formación y un sistema de navegación quirúrgica que explotan la información presente en los vídeos captados por el endoscopio.

1. Introducción

La información que ofrece el vídeo quirúrgico se ha ido introduciendo gradualmente en los quirófanos para el seguimiento de las cirugías de mínima invasión (CMI), desde su papel original como visualización del proceso quirúrgico. El análisis de las imágenes de vídeo capturadas por el endoscopio se postula como alternativa de cara a mejorar las metodologías de formación, evaluación objetiva y CGI [1]. Procesando la imagen captada por el endoscopio es posible extraer datos de utilidad y recuperar la información 3D de la escena, reorientar al cirujano y ayudarlo en el posicionamiento del instrumental [2]. Concretamente, el uso de análisis de vídeo puede ser de gran utilidad en:

- La **formación de las habilidades cognitivas** mediante el diseño de nuevos entornos de teleformación basados en tecnologías web y en la interacción del usuario con el vídeo formativo.
- La **evaluación de habilidades motoras**, basada en métricas objetivas relacionadas con el movimiento del instrumental quirúrgico y el desplazamiento de las estructuras anatómicas.
- El **guiado quirúrgico** basado en sistemas de navegación que exploten la información, en tiempo real, del vídeo captado por el endoscopio, desarrollando nuevos sistemas de cirugía guiada por imagen y vídeo (CGIV).

Este trabajo de investigación recoge los principales aspectos metodológicos y resultados del uso del vídeo quirúrgico en las áreas de formación cognitiva y cirugía guiada, resumen de la tesis doctoral titulada “Análisis de vídeo laparoscópico para formación en cirugía de mínima invasión y cirugía guiada por imagen” [2]. Previamente se exponen los algoritmos de procesamiento de vídeo diseñados y desarrollados, con el fin de ayudar en la formación tanto inicial como continuada de los profesionales, y asistir al cirujano durante los

procedimientos quirúrgicos en el quirófano. Ambos campos de aplicación se describen en detalle en secciones posteriores de este trabajo.

2. Procesamiento de vídeo quirúrgico

Dadas las características de las imágenes de laparoscopia (iluminación no uniforme, bajo contraste de color, presencia de distorsiones radiales y tangenciales, alta presencia de brillos e interreflexiones, entre otras), se han de desarrollar algoritmos que lidien con (1) la segmentación y el seguimiento de los elementos de la escena, (2) la reconstrucción tridimensional de la misma, y (3) la localización de los puntos del trócar, como paso inicial hacia el registro intraoperatorio.

2.1. Segmentación y seguimiento de elementos de la escena

La segmentación de estructuras es un paso fundamental de cara a la reconstrucción tridimensional de la escena quirúrgica. Idealmente, la segmentación debería poder realizarse (1) de forma automática, (2) independientemente de las características de los distintos elementos de la escena, y (3) con la suficiente granularidad para poder distinguir tanto estructuras grandes (instrumental, órganos) como pequeñas (sistema circulatorio). En la práctica, esta aproximación presenta demasiadas dificultades, asociadas a la variabilidad de la escena quirúrgica y a las limitaciones del endoscopio. Es por eso que muchas de las soluciones son semiautomáticas (con una interacción inicial del cirujano/técnico) y centradas en un problema concreto.

La segmentación/seguimiento del instrumental en la imagen captada por el endoscopio se lleva a cabo mediante técnicas basadas en detección de color/marcadores, bordes o formas geométricas [3][4][5]. Por otra parte, el análisis del color, la iluminación y el movimiento del vídeo endoscópico han permitido diseñar nuevas metodologías de localización y seguimiento de estructuras anatómicas [6]-[8]. Su validación ha demostrado su utilidad en aplicaciones donde el tiempo real no sea un requisito, como es el caso de los entornos de formación de habilidades cognitivas. Su utilización en entornos de CGIV requiere mejoras en robustez, fiabilidad y tiempo de cálculo.

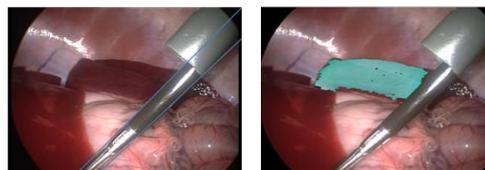


Figura 1. Ejemplos de segmentación de instrumental y órgano

2.2. Reconstrucción tridimensional de la escena

La información tridimensional, perdida por las características de la cirugía de mínima invasión y su seguimiento a través de un monitor monoscópico, puede ser proporcionada al cirujano mediante técnicas de reconstrucción 3D de la escena quirúrgica. En el trabajo de investigación se ha propuesto y validado un algoritmo fundamentado en una aproximación "shape-from-shading" [9] que, a través del análisis y procesamiento del vídeo quirúrgico, estima la información tridimensional de las estructuras anatómicas de la escena quirúrgica (Figura 2) [10]. El diagrama de cotas obtenido parte de la definición de un modelo de iluminación del escenario, basado en la hipótesis lambertiana y en que la fuente de luz y el sistema captador de la imagen coinciden en un mismo punto del espacio (endoscopio). Esta última característica imposibilita el cálculo de la profundidad absoluta de cada punto de la superficie. Sin embargo, esta limitación es solventable mediante la extracción de cotas a través del seguimiento del instrumental quirúrgico a partir de la información monoscópica del vídeo captado por el endoscopio.

Por otro lado, para la reconstrucción del instrumental quirúrgico, se ha diseñado y patentado un algoritmo en el que se realiza un análisis de la geometría cilíndrica del instrumental y su proyección en la imagen para determinar su orientación y profundidad [11].

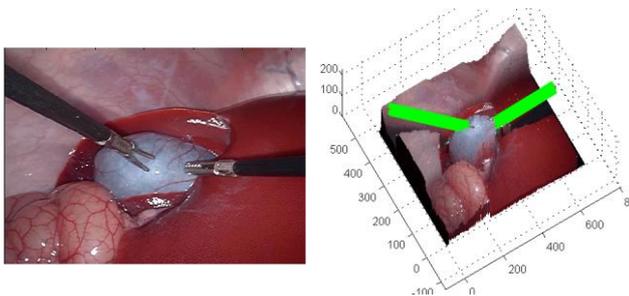


Figura 2. Ejemplo de reconstrucción de la escena quirúrgica

2.3. Registro intraoperatorio

El análisis del vídeo laparoscópico es una solución novedosa para llevar a cabo, entre otras tareas, el seguimiento de la óptica laparoscópica que simplifique el posterior registro intraoperatorio. Este trabajo propone una solución para la localización tridimensional de los trócares a partir del análisis de las secuencias de vídeo endoscópico, basada en la determinación del punto donde pivota la herramienta analizando parejas de fotogramas. Para ello, se emplea un umbral de calidad de la posición fundamentada en la ortogonalidad de las rectas. Los resultados muestran la viabilidad de emplear la localización de los trócares como un punto clave en el proceso de seguimiento de la óptica del laparoscópico [12].

La información de localización del punto de trócar se emplea tanto para definir y seguir la posición de la óptica laparoscópica, como para el registro intraoperatorio; o como información adicional a nuevas técnicas de

reconstrucción de la escena quirúrgica (metodología SLAM, fundamentalmente).

3. Entorno de formación

Los modelos de formación actuales pueden verse beneficiados por la incorporación de las tecnologías de *e-learning*. En el trabajo de investigación se ha definido un nuevo paradigma de formación basado en el uso de un entorno online colaborativo [13]. En este entorno se aumenta el valor didáctico de los vídeos quirúrgicos mediante la edición de los mismos, se dota al usuario de un papel más interactivo en su formación inicial o continuada y se fomenta la colaboración entre usuarios de diferente experiencia quirúrgica.

Dado el gran potencial didáctico de los vídeos quirúrgicos y la capacidad de grabación y almacenamiento digital de las intervenciones en los hospitales, la información del vídeo se postula como núcleo de los contenidos didácticos multimedia. Así, el vídeo juega un papel fundamental en este modelo de formación, siendo el eje principal de todo contenido didáctico presente en el entorno.

Para la creación del material didáctico, el entorno incorpora una herramienta de autoría [14] que, haciendo uso de los algoritmos de la sección 2, enriquece los vídeos quirúrgicos y desarrolla casos clínicos y unidades didácticas (Figura 3).



Figura 3. Entorno de autoría basado en el enriquecimiento de los vídeos quirúrgicos

El entorno de formación ha sido evaluado en una fase previa por 15 cirujanos expertos. Los resultados preliminares han mostrado una buena aceptación por parte de los cirujanos, alcanzando puntuaciones superiores al 4 en escala Likert (1-5) en la evaluación de usabilidad, diseño del entorno y contenidos del mismo. Sin embargo, los resultados también han mostrado la necesidad de mejorar la eficiencia del entorno, mejorando los tiempos de acceso, navegación y edición *online* de los contenidos.

4. Entorno de navegación quirúrgica

Los sistemas de planificación, navegación y cirugía guiada por imagen se introducen en la rutina clínica con el objetivo de ayudar al cirujano y apoyarle en la realización de las tareas quirúrgicas [15]. La dificultad en la identificación de estructuras ocultas dentro de un órgano sólido motiva la incorporación de sistemas de navegación en el quirófano, que ayuden al cirujano a transferir la información previamente planificada al quirófano de manera precisa y segura [16].

En este trabajo de investigación se ha conceptualizado un nuevo paradigma de navegación quirúrgica en tejidos blandos, que da lugar a técnicas quirúrgicas guiadas por

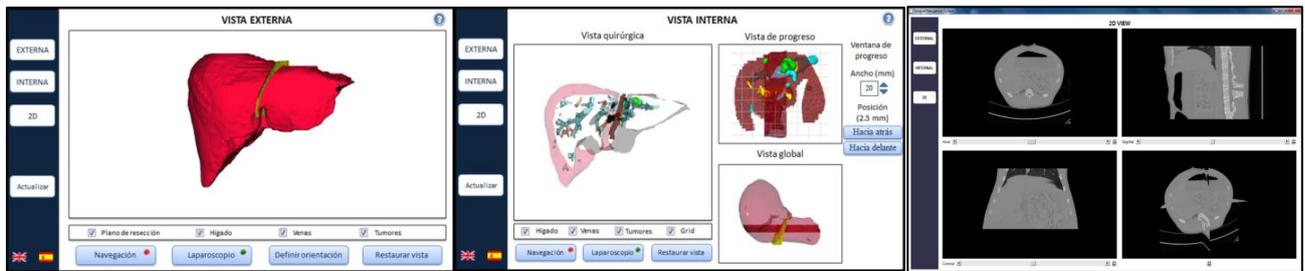


Figura 4. Sistema de navegación quirúrgica basado en el análisis del vídeo quirúrgico

imagen y vídeo (CGIV). El sistema explota la información del vídeo endoscópico para localizar y seguir los elementos presentes en la escena quirúrgica: estructuras anatómicas, instrumental quirúrgico y la óptica laparoscópica. Así, se aplican las metodologías de análisis de la imagen de vídeo endoscópico como principal fuente de información intraoperatoria, con las que llevar a cabo la extracción de información tridimensional del entorno de trabajo, en detrimento de otros sistemas de imagen durante la intervención. Por una parte, se aplican técnicas de detección, seguimiento y reconstrucción de objetos y por otra, de localización automática de trócares para seguimiento de la óptica laparoscópica y el registro intraoperatorio.

El modelo de navegación diseñado se ha simplificado en una prueba de concepto centrada en resecciones hepáticas (Figura 4) [17]. Se ha estudiado la viabilidad de aplicación del análisis del vídeo endoscópico en técnicas de CGI. En la prueba de concepto se procesa el vídeo quirúrgico para la extracción de la información tridimensional relativa al instrumental quirúrgico y a las estructuras anatómicas, además de estimar la localización tridimensional de los trócares. A partir de ella, se puede definir la posición de la óptica laparoscópica. Además, el resultado del análisis del vídeo puede utilizarse potencialmente para alimentar un modelo biomecánico que actualice sus condiciones de contorno a partir de los puntos de interés detectados en el procesamiento de la imagen de vídeo.

Los resultados actuales se han obtenido con una muestra poblacional reducida (7 cirujanos expertos), propia de un ciclo inicial de diseño. Es necesario ahora desarrollar las mejoras identificadas, y realizar nuevas validaciones extensas con prototipos revisados de manera continua. El próximo ciclo de diseño podría ya contar con la integración del navegador dentro del quirófano con el fin de valorar la confiabilidad y eficiencia del sistema en un entorno real y no meramente conceptual.

5. Discusión

El procesamiento de la imagen de vídeo quirúrgico puede ayudar a solventar algunas de las limitaciones de percepción visuales de la CMI.

La información extraída del análisis de los vídeos quirúrgicos resulta útil para la localización y seguimiento de los elementos que componen la escena (instrumental y estructuras anatómicas). Una clara ventaja de esta aproximación frente al uso tradicional de los sensores es que no requiere de sistemas adicionales que puedan

estorbar al cirujano durante la intervención quirúrgica. Además, no se producen modificaciones ni de la ergonomía ni de los flujos de trabajo dentro del quirófano. La contrapartida es la reducción en la precisión y robustez de la localización y seguimiento. Por otra parte, es importante tener en cuenta que no existe ningún algoritmo general capaz de llevar a cabo el análisis correcto de la información para todo tipo de vídeo laparoscópico.

Además, el análisis de los vídeos quirúrgicos depende de la calidad y contenido de la imagen. Por ejemplo, la información que se puede extraer de los vídeos viene restringida por el campo de visión de la cámara. Así, como es obvio, no se podrá obtener información de los objetos ocultos, no visibles por el endoscopio. Por otra parte, la presencia de oclusiones complica la detección y seguimiento de los elementos de la escena. La aparición de humo, debido a la cauterización de las estructuras, también dificulta esta tarea.

Los resultados alcanzados durante los procesos de validación de las herramientas [2] desarrolladas muestran el potencial que tiene el vídeo quirúrgico y la buena aceptación entre los profesionales de incorporarlo no sólo como medio de seguimiento de la intervención sino como herramienta de análisis de las intervenciones y extracción de información de utilidad. El análisis del vídeo endoscópico puede ser de utilidad en aplicaciones online u offline. En las primeras, destaca su empleo para guiado de las intervenciones y control de equipos quirúrgicos. En el segundo grupo, se encuentra la formación y evaluación objetiva de cirujanos, análisis de los procedimientos, anotación y recuperación inteligente de contenido.

La información que ofrece el vídeo quirúrgico se ha ido introduciendo gradualmente en los quirófanos para el seguimiento de las intervenciones desde su papel inicial como visualización del proceso quirúrgico. La familiarización previa en vídeo con las situaciones que deberán afrontar posteriormente en los quirófanos permite acortar las curvas de aprendizaje de los alumnos de cirugía. Además, el análisis y procesamiento de los vídeos posibilita el enriquecimiento de la información contenida en ellos, lo que aumenta considerablemente su capacidad formativa, a la luz de los resultados de cuestionarios y entrevistas realizadas a expertos cirujanos [2].

Respecto a la utilidad del vídeo quirúrgico en la creación de nuevos sistemas de navegación quirúrgica, éste permite actualizar los modelos virtuales de navegación, proporcionando de forma periódica y/o a demanda información intraoperatoria. Además, resulta fundamental la introducción de nuevas tecnologías que sean capaces de

seguir las estructuras (internas y externas) del paciente. Así, el vídeo captado por el endoscopio puede llegar a reemplazar el uso de otros sistemas de imagen dentro del quirófano. Las principales ventajas del empleo de vídeo endoscópico son: (1) su existencia como fuente de información que siempre está presente en las intervenciones de CMI y que no supone un cambio importante del flujo de operaciones dentro del quirófano y (2) su capacidad de ser un elemento transparente al cirujano que no introduce elementos adicionales en el quirófano que modifiquen la ergonomía de los equipos o perturben el trabajo del cirujano. Sin embargo, el desarrollo actual de la tecnología no está exento de limitaciones: el reto es conseguir alcanzar una precisión, robustez y tiempo de procesamiento suficientes para su uso en CGI.

6. Conclusiones

El análisis del vídeo endoscópico como fuente de información más allá de la mera visualización de las intervenciones permite el desarrollo de nuevas aplicaciones quirúrgicas tanto en el campo de la formación como la navegación intraoperatoria. En este trabajo se han presentado diversos algoritmos para la segmentación, seguimiento y reconstrucción de la escena quirúrgica, así como su aplicación a estas áreas de interés. Los trabajos de investigación incluidos en este trabajo corresponden esencialmente a los resultados de la tesis doctoral titulada “Análisis de vídeo laparoscópico para formación en cirugía de mínima invasión y cirugía guiada por imagen” [2]. Los resultados de validación de los algoritmos y de aceptación de las aplicaciones dan muestra de la viabilidad de y el interés por este nuevo paradigma. A pesar de todo, es necesario profundizar en la búsqueda de nuevas técnicas de análisis robustas y en tiempo real que permitan la consolidación de este tipo de sistemas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto Avanza I+D TELMA del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y por el proyecto intramural THEMIS del CIBER-BBN.

Referencias

[1] Sánchez-González P, Cano AM, Oropesa I, Sánchez-Margallo FM, del Pozo F, Lamata P, Gómez EJ. Laparoscopic Video Analysis for Training and Image Guided Surgery. *Minimally Invasive Therapies and Allied Technologies*, vol. 20 (6), pp. 311-20, 2011.

[2] Sánchez-González P. Análisis de vídeo laparoscópico para formación en cirugía de mínima invasión y cirugía guiada por imagen. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2011.

[3] Wolf R, Duchateau J, Cinquin P, Voros S. 3D tracking of laparoscopic instruments using statistical and geometric modeling. *14th International Conference of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, vol. 6891, pp. 201-209, 2011.

[4] Cano AM, Sánchez-González P, Sánchez-Margallo FM, Oropesa I, del Pozo F, Gómez EJ. Video-endoscopic image analysis for 3D reconstruction of the surgical scene. *4th*

European Conference of the Int. Federation for Medical and Biomedical Engineering, pp. 923-926, 2008.

- [5] Doignon C., Nageotte F., de Mathelin M. Segmentation and Guidance of Multiple Rigid Objects for Intra-operative Endoscopic Vision. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4358, pp. 314-327, 2007.
- [6] Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [7] Asari KV. A fast and accurate segmentation technique for the extraction of gastrointestinal lumen from endoscopic images. *Medical Engineering & Physics*, vol. 22(2), pp. 89-96, 2000.
- [8] Sánchez-González P, Luna Serrano M, Fernández Pérez A, Oropesa García I, Sánchez-Margallo JA, Sánchez-Margallo FM, Gómez Aguilera EJ. Métodos de segmentación y seguimiento de estructuras para vídeo laparoscópico. *XXIX Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, pp. 563-566, 2011.
- [9] Zhang R, Tsai PS, Cryer JE, Shah M. Shape from Shading: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21 (8), pp. 690-706, 1999.
- [10] Sánchez-González P, Gayá F, Cano AM, Gómez EJ. Segmentation and 3D reconstruction approaches for the design of laparoscopic augmented reality environments. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5104, pp.127-134, 2008.
- [11] Cano AM, Gayá F, Lamata P, del Pozo F, Sánchez-Margallo FM, Gómez EJ. Método de seguimiento 3D del instrumental quirúrgico mediante análisis de vídeo laparoscópico. *XXVI Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, 2008, pp. 257-260.
- [12] Sánchez-González P, Lamata de la Orden P, Oropesa García I, Gayá Moreno F, Sánchez-Margallo J, Sánchez-Margallo FM, Gómez Aguilera EJ. Localización del punto de trocar basada en análisis de vídeo laparoscópico. *XXVIII Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, 2010.
- [13] Sánchez-González P, Burgos D, Oropesa I, Romero V, Albacete A, Sánchez-Peralta LF, Noguera J, Sánchez-Margallo FM, Gómez E.J. TELMA: Technology enhanced learning environment for minimally invasive surgery. *Journal of Surgical Research*, 2012, (aceptado).
- [14] Fernández Pérez A, Sánchez-González P, Oropesa García I, Ortega-Morán JF, Sánchez-Margallo FM, Gómez-Aguilera EJ. Herramienta de autoría de contenidos didácticos multimedia para entorno de formación colaborativo en cirugía de mínima invasión. *XXIX Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, pp. 547-550, 2011.
- [15] Baumhauer M, Feuerstein M, Meinzer H, Rassweiler J. Navigation in Endoscopic Soft Tissue Surgery: Perspectives and Limitations. *Journal of Endourology*, vol. 22(4), pp. 1-16, 2008.
- [16] Peters TM. Image-guidance for surgical procedures. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 51 (14), pp. R505-540, 2006.
- [17] Sánchez-González P, Oropesa García I, Doblaré M, Peris JL, Sánchez-Margallo FM, Gómez Aguilera EJ. THEMIS: Sistema de navegación quirúrgica en cirugía laparoscópica del hígado. *XXIX Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, pp. 303-306, 2011.