

Sutura automatizada para una plataforma robótica de asistencia a la cirugía laparoscópica

Álvaro Galán-Cuenca, Duna De Luis-Moura, Juan M. Herrera-López, Marcos Rollón, Isabel García-Morales, Víctor F. Muñoz

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, C/ Severo Ochoa, 34, Parque tecnológico de Andalucía (PTA), 29071

To cite this article: Galán-Cuenca, A., De Luis-Moura, D., Herrera-López, J.M. Rollón, M., García-Morales, I., Muñoz, V.F. 2024A Automated suture for a robotic platform to assist laparoscopic surgery. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 21, 339-350. <https://doi.org/10.4995/riai.2024A20642>

Resumen

La cirugía laparoscópica es una cirugía mínimamente invasiva que hace reducidas incisiones en el tejido del paciente durante el procedimiento. Una de las tareas más desafiantes dentro de este campo es la sutura realizada con robots. Este artículo estudia el algoritmo de sutura automatizada por medio de visión y un controlador fuerza-posición para manejar la herramienta dentro del paciente. El algoritmo recoge una primera aproximación donde la herramienta se sitúa en el punto de sutura, pero no ejecuta la entrada y posterior salida de la aguja en la piel. Se usa una plataforma robótica formada por dos brazos manipuladores, uno para manipular un instrumento quirúrgico a través del punto de fulcro y otro intra-abdominal con cámara con dos grados de libertad, para realizar los experimentos de dicho algoritmo. El artículo aborda aspectos relativos al desarrollo de algoritmos de visión para detectar incisiones y localizar la ubicación de los puntos de sutura por medio de imágenes de profundidad, así como métodos de navegación para generar la trayectoria de la sutura, y técnicas de control para ubicar la herramienta en dichos puntos sin dañar la pared abdominal del paciente. Por último, tanto el sistema de navegación como el de control se validaron mediante pruebas in vitro.

Palabras clave: Sutura quirúrgica, Cirugía laparoscópica, Controlador, Asistente robótico, Punto de fulcro, Puntos de sutura

Automated suture for a robotic platform to assist laparoscopic surgery

Abstract

Laparoscopic surgery is a minimally invasive surgery that makes small incisions in the patient's tissue during the procedure. One of the most challenging tasks within this field is robotic suturing. This article studies the automated suturing algorithm using vision and a force-position controller to handle the tool inside the patient. The algorithm collects a first approximation where the tool is positioned at the suture point, but it does not execute the entry and subsequent exit of the needle into the skin. A robotic platform consisting of two manipulator arms, one to manipulate a surgical instrument through the fulcrum point and another intra-abdominal with a camera with two degrees of freedom, is used to perform the experiments of this algorithm. The paper develops vision algorithms for detecting wounds and locating the location of suture points using depth imaging, as well as navigation methods for generating the suture trajectory, and control techniques for positioning the tool at these points without damaging the patient's abdominal wall. Finally, both the navigation and control systems were validated by in vitro testing.

Keywords: Surgical suture, Laparoscopic surgery, Controller, Robotic assistant, Fulcrum point, Stitches

1. Introducción

La cirugía laparoscópica es una cirugía mínimamente invasiva ideada para reducir el daño en el tejido del paciente durante el procedimiento, lo que minimiza el dolor post-operatorio, baja el riesgo de infección, y proporciona un tiempo de recupe-

ración menor en comparación con las cirugías convencionales (cirugías abiertas) Tiwari et al. (2011), pero se encuentra limitada en otros aspectos (Leonard et al., 2014b), especialmente cuando se realiza con robots quirúrgicos debido a la limitada retroalimentación visual y háptica (Abiri et al., 2019), la pérdi-

da de percepción de profundidad (Tugal et al., 2022), la fatiga en el cirujano Pérez-Duarte et al. (2012) y el efecto espejo de los movimientos debido al punto de inserción del instrumento en el abdomen llamado punto de fulcro (F_p). A pesar de los avances en la robótica quirúrgica, la sutura laparoscópica sigue siendo una de las etapas más repetitivas y que consume más tiempo en esta tarea (Leonard et al., 2014a) conllevando fatiga muscular al cirujano o cirujana, por lo que constituye una tarea adecuada para ser automatizada (Pedram et al., 2021).

Los procesos RAS (por las siglas inglés *Robot Autonomous Suturing*) actuales presentan dos problemas principales a resolver que se detallan a continuación.

a) Planificador de suturas: consiste en localizar los puntos de sutura en el tejido y planificar el orden en el que se van a punzar, suturar, dichos puntos. Para eso, es necesario tener un conocimiento exacto del interior del abdomen y de la zona a suturar, mediante técnicas de visión, para poder detectar la herida a suturar y determinar donde se deben localizar los puntos de sutura. En este ámbito, (Leonard et al., 2014a) propone utilizar marcadores fluorescentes de infrarrojo cercano colocados por el cirujano en los sitios de sutura deseados y que el sistema de visión los segmente y use para guiar el movimiento del robot; (Leonard et al., 2014b) calcula automáticamente los puntos de sutura en el tejido en función del contorno de la herida que ha facilitado el cirujano; (Saeidi et al., 2019) propone una reconstrucción 3D de la imagen endoscópica. Las dos primeras propuestas dependen directamente del cirujano y no son completamente autónomas, mientras que la última, se ve limitada por el uso del endoscopio porque reduce el campo de visión y obliga a tener un asistente manejando el endoscopio (Rivas-Blanco et al., 2018).

b) Control Fuerza-Posición: para asegurar la posición de la herramienta de manera precisa, a la vez que se reducen las fuerzas ejercidas en la pared abdominal durante el movimiento, sin comprometer la destreza de los movimientos. Las propuestas de control actuales para sistemas robóticos en asistencia en cirugía laparoscópica se centran en el control de posición del laparoscopio que realiza la adquisición de imágenes en el procedimiento quirúrgico (Sonsilphong et al., 2022)(Kuo and Song, 2020) o realizan un control de fuerzas para ayudar a suplir la privación sensorial que tiene el cirujano durante el procedimiento (Tugal et al., 2018) (Tugal et al., 2022)(Deal et al., 2012). También se han realizado controles basados en visión para hacer operaciones tan delicadas como el nudo Lu et al. (2019), pero solo en cirugía superficial y no laparoscópica. A la par, se han desarrollado arquitecturas de control fuerza/posición para cirugía endonasal, pero aún no se han desarrollado para cirugía laparoscópica abdominal (Muñoz et al., 2021). Para asegurar que la cirugía laparoscópica sea precisa y segura, es importante la estimación precisa del punto de fulcro para la correcta estimación de la posición de la herramienta (Muñoz et al., 2009), ya que su imprecisión puede provocar fuerzas que dañen la pared abdominal del paciente (Bauzano et al., 2009).

Este artículo presenta un sistema robótico de sutura automatizada que aborda los problemas de detección de heridas, estimación de la cantidad y ubicación de los puntos de sutura necesarios en cirugía abdominal mediante un sistema novedoso de visión por medio de una cámara de profundidad RGB-D intra-abdominal sujeta con un soporte magnético y por último

la planificación de la sutura, teniendo en cuenta el orden en el que se debe suturar cada punto y las posiciones intermedias entre puntos para estirar el hilo durante la sutura, considerando el uso de dispositivos de sutura tales como el *Endo Stitch*. El sistema es capaz de moverse de manera autónoma dentro del abdomen del paciente para colocar el instrumental en los puntos de sutura estimados, evitando causar daño en la pared abdominal gracias a un controlador fuerza-posición que presenta un avance al estado del arte en las operaciones RAS.

El artículo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 plantea el problema a resolver, desde el escenario usado hasta la arquitectura funcional implementada. En la sección 3 se define el módulo de navegación que genera las trayectorias de sutura y la sección 4 el módulo de control para alcanzar los puntos destino dentro del abdomen sin ejercer fuerzas en el abdomen. La sección 5 describe el escenario diseñado para validar la arquitectura propuesta y el diagrama de ROS para comunicar los deferentes módulos con el escenario real. Después, en la sección 6 se muestran los experimentos realizados y los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y desarrollos futuros en la sección 7.

2. Planteamiento del problema

Con el objetivo de abordar el problema de la sutura robótica automatizada mediante visión, se presenta un escenario quirúrgico formado por un brazo manipulador encargado de sujetar una herramienta quirúrgica que será la encargada de hacer la sutura. Dicha herramienta se introduce en el abdomen por una pequeña incisión por medio de un trócar. También se cuenta con un soporte estático encargado de sujetar la cámara dentro del paciente por medio de un soporte magnético. El protocolo para este escenario consiste primero en la detección de una herida plana mediante visión y su posterior estimación de los puntos de sutura necesarios para cerrar dicha herida, información que es enviada al cirujano y al robot que manipula la herramienta, para que la posicione en dichos puntos, analizando la precisión de sus movimientos y las fuerzas que genera en el abdomen.

En el escenario propuesto, el sistema colabora con el cirujano para hacer la sutura, siendo el sistema de visión el que determina la posición de los puntos de sutura, el robot autónomo el que realizaría la sutura y el cirujano el que apoyaría a la sutura sujetando la piel mediante otras herramientas introducidas por otros dos trócares. En este desarrollo no se ejecuta la sutura en la piel mediante la aguja, sino el posicionamiento del instrumental dentro del paciente. Se hará un breve resumen de los trabajos previos del grupo de investigación para contextualizar este trabajo.

2.1. Trabajos previos

En el contexto de la investigación sobre cirugía laparoscópica robotizada, el laboratorio de Robótica Médica de la Universidad de Málaga ha realizado contribuciones notables a través de varios estudios previos, pero sin tratar el problema de la sutura y sin ejercer acciones autónomas. En (Rivas-Blanco et al., 2018) se expone un escenario quirúrgico donde se usa una cámara intra-abdominal sujeta con un soporte magnético a un brazo robótico, al igual que el planteado en este artículo para manejar la cámara, pero limitado al solo usar una cámara RGB y no tener percepción de la profundidad.

Por un lado, se han desarrollado enfoques de control del instrumental quirúrgico dentro del abdomen del paciente manteniendo el punto de fulcro fijo, como es el caso de (Muñoz et al., 2009), que se centra en el problema del control cartesiano de robots dotados con muñecas pasivas. Este forma de abordar el problema garantiza el movimiento del instrumental dentro del abdomen respetando el fulcro, pero no asegura que la posición final sea la deseada, por eso se usa en tareas de posicionamiento que no sean críticas, como los movimientos de navegación de la cámara laparoscópica. En otro enfoque, (Bauzano et al., 2016) presenta un sistema de control del robot quirúrgico asistente que se compone de tres capas: la capa de planificación, la capa de control de movimiento y la capa de control de fuerza. La capa de planificación se encarga de generar un plan de movimiento para el robot; la capa de control de movimiento se encarga de controlar el movimiento del robot en el escenario quirúrgico, utilizando un esquema de control de movimiento basado en el concepto de manipulabilidad; y la capa de control de fuerza se encarga de controlar la fuerza ejercida por el robot durante la sutura, utilizando un controlador de fuerza basado en un modelo de control de fuerza híbrido, es decir, controla la fuerza de la punta de la herramienta, pero no las posibles fuerzas ejercidas en el abdomen del paciente. Este procedimiento de controlar la punta de la herramienta y no la fuerza en el fulcro también se desarrolla en (Muñoz et al., 2021), donde el movimiento de las herramientas es teleoperado y no autónomo.

Por otro lado, presentado por (Bauzano and Garcia-morales, 2009), se ha progresado en técnicas de control donde no se asume como fijo el punto de fulcro. Se basa en posicionar el laparoscopio por medio de una muñeca activa, metodología que permite posicionar la herramienta correctamente pero pueden ejercer esfuerzos no deseables sobre el abdomen del paciente. Mediante una metodología de control en cascada trata de evitar dichas fuerzas en el abdomen, pero su desarrollo es complejo y su ley de control es altamente no lineal.

Para abordar el problema planteado en este artículo, se va a usar una metodología donde no se asuma fijo el punto de fulcro, por las pequeñas variaciones que este pueda tener durante la operación, que asegure la posición del instrumento pero sin ejercer fuerzas en el abdomen, y cuyos movimientos sean autónomos y planificados mediante visión para dirigirse a los puntos de sutura necesarios para cerrar una herida.

2.2. Descripción del sistema

Se propone un concepto de escenario quirúrgico para la sutura laparoscópica utilizando asistentes robóticos para reducir la carga de trabajo del cirujano y mejorar la precisión de sus movimientos. La Figura 1 muestra la propuesta de este trabajo, donde el paciente se coloca en posición decúbito supino con las extremidades inferiores separadas para permitir al cirujano operar desde el perineo, con el robot a la derecha del paciente. El monitor está en el lado opuesto del cirujano. El robot quirúrgico utiliza uno de los tres trócares, mientras que el robot con cámara dispone de un soporte magnético intra-abdominal para mantener la cámara dentro del paciente.

El interior escenario usado en este artículo se representa en la Figura 2, pero sin la incorporación de las pinzas manejadas por el humano. El interior del abdomen del paciente se representa en amarillo y el tejido que es sujeto de sutura en rojo

dentro del abdomen y cuyo sistema de referencia es $\{H\}$. Los sistemas de referencia asociados a la base del robot manipulador autónomo encargado de la herramienta, su efector final y el de la punta de la herramienta que manipulan, tienen como nombre respectivamente $\{R1\}$, $\{E1\}$ y $\{TTP\}$, donde $\{E1\}$ y $\{TTP\}$ presentan la misma orientación pero $\{TTP\}$ está desplazado sobre el eje Z del sistema de referencia del efector final una longitud igual al largo de la herramienta más el grosor del sensor de fuerza/momento. Dicho sensor se encuentra entre $\{E1\}$ y la herramienta quirúrgica. Además, para posicionar la punta $\{TTP\}$ en las posiciones deseadas, el robot debe pivotar en el fulcro, cuyo sistema de referencia es nombrado como $\{F_P\}$. Este sistema de referencia tiene la misma orientación que sistema de referencia de $\{R1\}$ pero se encuentra sobre el instrumental en la posición donde se introduce en el abdomen del paciente.

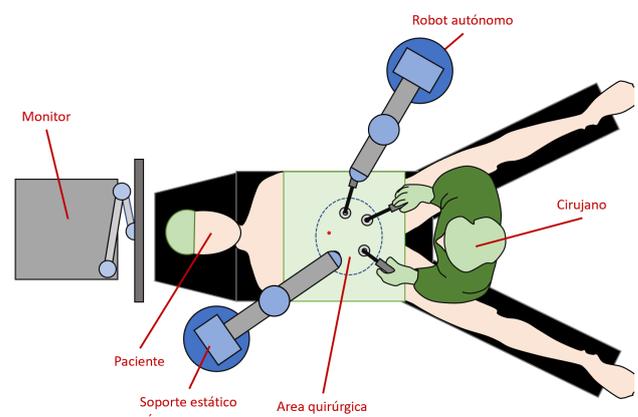


Figura 1: Concepto escenario quirúrgico.

Por otro lado, el sistema de referencia de la cámara se denomina por $\{C\}$ y el de la base del robot estático que lo soporta se nombra por $\{R2\}$. Con el objetivo de poder conocer las relaciones entre cada elemento del escenario, para este trabajo, se consideran conocidos las siguientes transformadas:

- ${}^{R1}T_{E1}$: Transformada del efector final del robot autónomo respecto a su base.
- ${}^{R1}T_{F_P}$: Transformada del punto de fulcro respecto a la base del robot autónomo.
- ${}^{R1}T_{TTP}$: Transformada de la punta de la herramienta del robot autónomo respecto a su base.
- ${}^{E1}T_{TTP}$: Transformada de la punta de la herramienta del robot autónomo respecto a su efector final.
- ${}^{R1}T_{R2}$: Transformada de la base del robot estático que sujeta la cámara respecto a la del robot autónomo.
- ${}^{R2}T_C$: Transformada de la cámara respecto a la base del robot estático.
- ${}^C T_H$: Transformada del tejido que es sujeto de sutura respecto a la cámara.

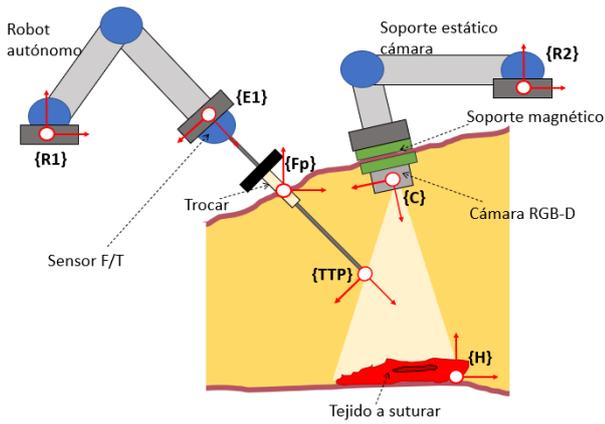


Figura 2: Interior escenario quirúrgico.

2.2.1. Escenario real usado

En los experimentos realizados se utilizan dos robots manipuladores UR3 de UniversalRobots®, un sensor de fuerza/torque de OnRobot®, una cámara Intel Real Sense Depth modelo D405, un soporte intra-abdominal impreso en 3D para la cámara, una herramienta quirúrgica, un trocár para introducir la herramienta en el abdomen y un pelvitruiner de Medical Simulator, todo recogido en la Figura 3. El sistema operativo utilizado para la implementación de la arquitectura funcional es Ubuntu 20 con ROS (*robot operating system*) Melodic y la filosofía de programación empleada es *Clean Architecture*, que permite la independencia entre los bloques y una jerarquía funcional.

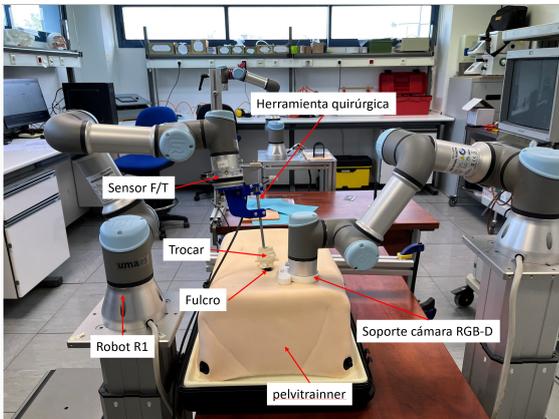


Figura 3: Escenario experimental para sutura robótica automatizada

2.3. Descripción de la arquitectura planteada

La arquitectura funcional implementada para el sistema robótico propuesto, se muestra en la Figura 4. Esta arquitectura presenta dos módulos principales que son el *Módulo de Navegación* y el *Módulo de control*, así como una área experimental que simula el abdomen del paciente. En sendos módulos se observan bloques verdes, que representan los sensores usados en este trabajo, siendo para el *Módulo de Navegación* una cámara RGB-D encargada de capturar la imagen intraoperatoria del paciente, quedándose únicamente para este trabajo con la imagen de profundidad captada, y para el *Módulo de control* un sensor fuerza/momento que se sitúa en el efector del robot para medir

las fuerzas y momentos realizadas. Estos bloques dotan al sistema de la capacidad de interactuar con el paciente supliendo algunas limitaciones de la cirugía laparoscópica robotizada, al dotar al sistema de la capacidad para tener profundidad y tener realimentación de fuerzas.

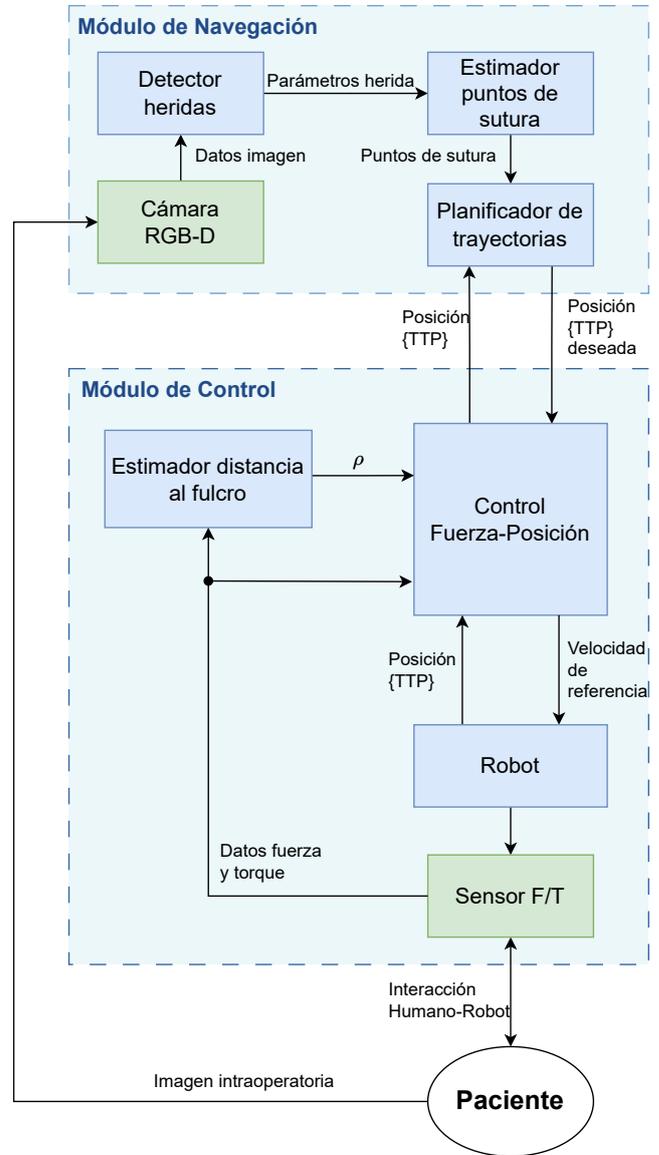


Figura 4: Arquitectura funcional implementada.

El flujo de trabajo parte de la adquisición de datos por la *Cámara RGB-D* dentro del abdomen, estos datos son recogidos y procesados por el *Detector de heridas* donde se detecta la ubicación de la herida y se parametriza, es decir, se describe la imagen con un conjunto de parámetros para poder ser utilizados en bloques siguientes. El *Estimador de puntos de sutura* hace uso de dichos parámetros para determinar las posiciones de los puntos de sutura en el tejido, que son coordenadas XYZ en el sistema de referencia de la base del robot autónomo, y le manda dicha información al *Planificador de trayectorias*. Este bloque, se encarga de facilitar al *Módulo de control* las posiciones deseadas a las que se debe mover la punta de la herramienta en cada momento, esto quiere decir, que planifica en que orden se debe abordar cada punto de sutura para cerrar la herida.

Por otro lado, el *Módulo de control* realiza el control de fuerza-posición del instrumental dentro del paciente, asegurando que la herramienta alcance las posiciones deseadas pero sin ejercer fuerzas no deseadas en el paciente que comprometan la salud del mismo. Para eso, conociendo los puntos objetivos y la distancia al punto de fulcro, ρ , el *Control Fuerza-Posición* genera las velocidades lineales y angulares para que el robot manipulador, que responde a un sistema de segundo orden, alcance los objetivos teniendo en cuenta el pivotaje. La distancia ρ se calcula con el *Estimador distancia al fulcro* haciendo uso de los datos del *Sensor F/T*, permitiendo que este parámetro se actualice si fuera necesario.

3. Módulo de navegación

El módulo de navegación es el encargado de generar las posiciones deseadas a las que se tiene que mover el robot de manera automática, es decir, sin la asistencia de un cirujano o cirujana. Con este propósito se debe realizar el procesamiento de la imagen de profundidad captada por la cámara RGB-D. Primero detecta la herida mediante el gradiente de profundidad de la imagen, luego determina la cantidad de puntos de sutura necesarios y sus posiciones respecto un sistema de referencia conocido, y por último, se utiliza un generador de trayectorias para determinar el orden de la sutura y los puntos intermedios por los que debe transitar el instrumental para estirar el hilo. Esta sección detallará el funcionamiento de los tres bloques del *Módulo de Navegación* que hacen esto posible.

3.1. Detección de la herida

Esta tarea se hace en el bloque *Detector heridas*. Para detectar la herida y caracterizarla se extrae una imagen de profundidad del tejido blando usando la cámara RGB-D. La Figura 5 muestra la imagen RGB de una herida en un tejido blando a la izquierda, y a la derecha la imagen de profundidad, donde los colores más cálidos representan distancias menores a la cámara y los fríos las distancias más alejadas.

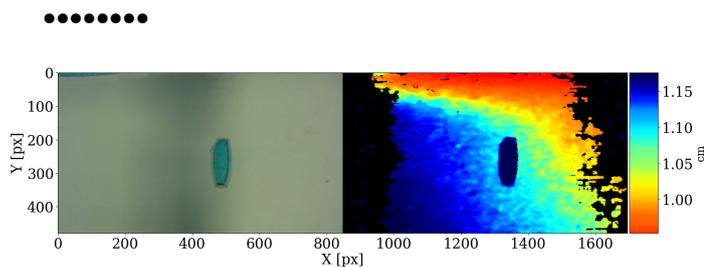


Figura 5: Imagen RGB y mapa de color

Para eliminar el ruido de la imagen de profundidad se aplica un filtrado de suavizado Gaussiano como se ve en la Figura 6a). Posteriormente, para obtener el borde de la herida se usa un gradiente de profundidad obteniendo un resultado como en de la Figura 6b). La imagen resultante se binariza de tal manera que se consigue el borde blanco sobre un fondo negro, y en el caso de que hubieran pequeñas regiones parásitas generadas por ruidos no filtrados, se eliminan quedándose con la región de mayor área. Posteriormente, haciendo un cierre morfológico, para asegurarse que el contorno del borde está cerrado, y

rellanando la forma, se consigue el resultado de la Figura 6c). Por último, los parámetros de la herida se obtienen mediante métodos de detección de contornos en la imagen binarizada, y se usan para caracterizar la herida tal que $H = \{d_m; d_n; c; \theta; q\}$ como se ve en 6d). Estos parámetros son: la diagonal mayor d_m y la diagonal menor d_n , donde entendiendo la incisión como una elipse, tal y como se ve en la Figura 7, d_m es un eje axial que se corresponde con el eje mayor de una elipse y es la dirección de la herida, y d_n es perpendicular a la diagonal mayor y se corresponde con el eje menor de una elipse, además d_m y d_n cortan en el centroide; el centroide c ; la orientación θ respecto al eje Y del sistema de referencia $\{C\}$, y el tipo de herida q , que se determina en función del valor de d_n y del ancho de la herramienta o aguja utilizada (dp). Si $d_n < dp$, se considera una herida fina, mientras que si no, se considera una herida gruesa. Entendiendo por fina aquella donde el instrumental y la aguja pueden alcanzar los dos extremos de la herida a la vez, y herida gruesa aquella donde el instrumental debe suturar los dos lados de la herida por separado para cerrarla. Los parámetros se proyectan en el tejido a suturar usando $({}^C T_H)^{-1}$.

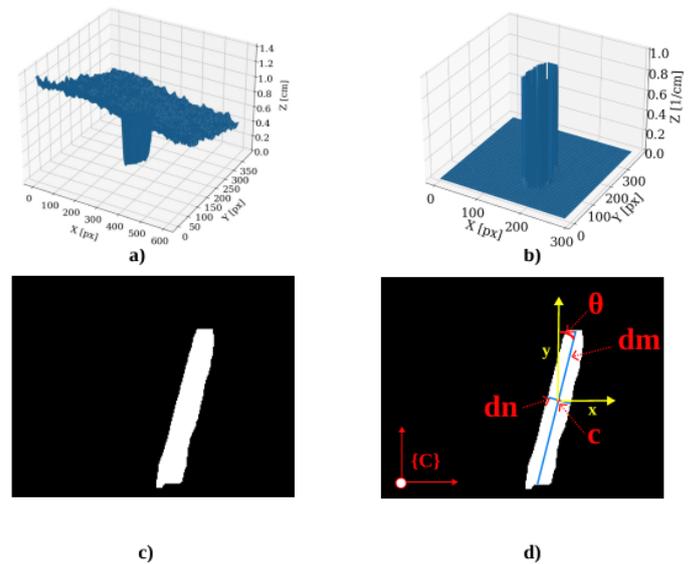


Figura 6: Representación de los pasos de detección y caracterización de la herida. a) Imagen de profundidad de la herida b) Gradiente de profundidad de la imagen. c) Herida binarizada d) Características de la herida

3.2. Estimación de los puntos de sutura

Un vez detectada la herida, en el bloque *Estimador puntos de sutura* se calcula la cantidad de puntos de sutura y su ubicación. El algoritmo usado se muestra a continuación y la Figura 7 sirve para ejemplificarlo.

1. Número de puntos de sutura (n): Definido de forma experimental un parámetro de separación entre puntos de sutura, σ , se calcula la cantidad de puntos de sutura como d_m/σ . De no tener como resultado un valor exacto, se redondea el resto a la alza para no dejar un región sin suturar.
2. Localización de los puntos de sutura: Para una herida fina, los puntos se distribuyen uniformemente en d_m . Para una herida gruesa, se necesitan puntos a ambos lados del borde de la herida, situados a una distancia γ del contorno

de H . Para ello, se dilata el borde de la herida una cantidad γ y se desplazan los puntos de la diagonal mayor a ambos lados de manera perpendicular a d_m . Los puntos se nombran por S_i y están definidos en el sistema de referencia de $\{C\}$, conteniendo las coordenadas $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ de cada punto.

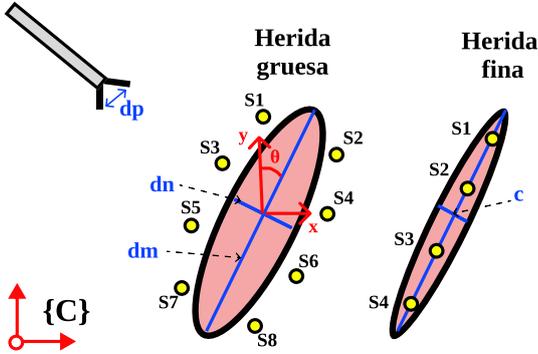


Figura 7: Representación de un herida gruesa y fina con sus respectivos puntos de sutura y parámetros

3.3. Planificador de trayectorias

El bloque *Planificador de trayectorias* es responsable de enviar al robot las posiciones de los puntos de sutura deseados. Para ellos se debe de seleccionar primero el tipo de sutura que se va a realizar, que en este trabajo es una sutura continua barbada. En este tipo de sutura solo se requiere el uso de un nudo al comienzo de la sutura, sin nudo final. Uno de los puntos cruciales en la sutura es el nudo, por su complejidad en operaciones de laparoscopia y por ser considerado el punto más débil de cualquier línea de sutura (Márquez and Belda, 2015), es por eso, que un planteamiento que reduzca el número de nudos es ventajoso. La sutura barbada es un tipo de sutura donde el hilo cuenta con pequeñas barbas en sentido helicoidal que permite que el movimiento de la sutura sea unidireccional, y la sutura continua es un tipo de sutura donde una vez realizado el primer punto de sutura y su nudo, se continúa introduciendo el hilo de forma constante a lo largo de toda la incisión. Por eso, lo primero es determina el orden de los puntos S_i para realizar la sutura de manera continua. A continuación se recogen los pasos para ordenarlos.

1. Rotación de los puntos de sutura un ángulo θ alrededor del eje Z del sistema de coordenadas $\{C\}$ para alinear la herida con el eje Y de la cámara:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R_Z(\theta) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. Selección del primer punto de sutura en función de las coordenadas X' e Y' :

$$S_1 = \max_{S_i} Y'_i, \text{ donde } X_{S_1} = \min_{S_i} X'_i | Y'_i = Y_{S_1} \quad (2)$$

3. Se organizan los puntos de izquierda a derecha y de arriba abajo en el sistema de coordenadas de $\{C\}$.

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i\} \quad (3)$$

4. Deshacer la rotación de los puntos de sutura:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_Z(-\theta) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (4)$$

5. Cambio de sistema de coordenadas para que los puntos S_i estén definidos en el sistema de referencia $\{R1\}$

$${}^{R1}S = {}^{R1}T_C \cdot {}^C S = \{{}^{R1}X, {}^{R1}Y, {}^{R1}Z\} \quad (5)$$

El siguiente paso, es calcular el conjunto de puntos S' . Estos puntos sirven para para alejar la aguja del tejido después de cada punzada en S_i para posicionar la herramienta y la aguja en un lugar seguro a la par que permite al hilo pasar entre punzadas, funcionando como puntos bias S'_i entre cada punto de sutura, para después acometer la punzada en el punto S_{i+1} . La Figura 8 muestra la sección del tejido a suturar en el plano XZ , donde en amarillo se encuentran los puntos de sutura obtenidos anteriormente y en azul, el punto bias situado entre ambos puntos y a una altura η sobre los otros.

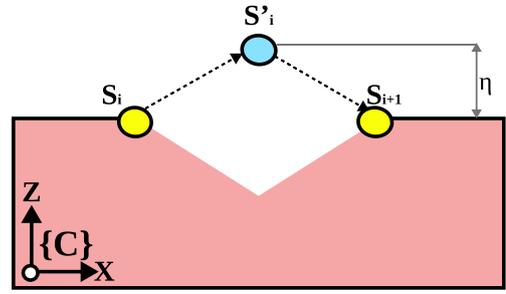


Figura 8: Representación puntos de sutura y de paso sobre la sección del tejido.

La ecuación para calcular estos puntos es:

$$S'_j = \left\{ \frac{S_i[0] + S_{i+1}[0]}{2}, \frac{S_i[1] + S_{i+1}[1]}{2}, \frac{S_i[2] + S_{i+1}[2]}{2} + \eta \right\} \quad (6)$$

donde η es la separación en Z al tejido. Teniendo en cuenta los puntos bias, el orden de la trayectoria de la sutura se establece como $X_{des} = \{S_1, S'_1, S_2, S'_2, \dots, S_i\}$ y el número total de puntos de sutura es $K = n + (n - 1)$, donde n es el número de puntos S_i . La Figura 9 ejemplifica dicha planificación de trayectorias, donde para una herida gruesa con 8 puntos de sutura, en amarillo, se colocan 7 puntos bias entre cada par de puntos, logrando un total de 15 puntos por los que el robot debe transitar.

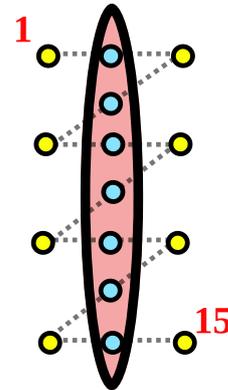


Figura 9: Representación de la trayectoria de una sutura para una herida gruesa

4. Módulo de control

Las referencias generadas por el *Módulo de navegación*, X_{des} , son las entradas del *Módulo de control* mostrado en la Figura 4, usado para que el robot autónomo alcance la consigna deseada sin ejercer fuerzas en la pared abdominal. Debido a las restricciones en el punto de inserción del abdomen, las referencias X_{des} solo dan información de posición y no de orientación. La orientación se debe calcular en función de la posición deseada y el punto de fulcro $\{Fp\}$ para que la herramienta pivote como se muestra en la Figura 10.

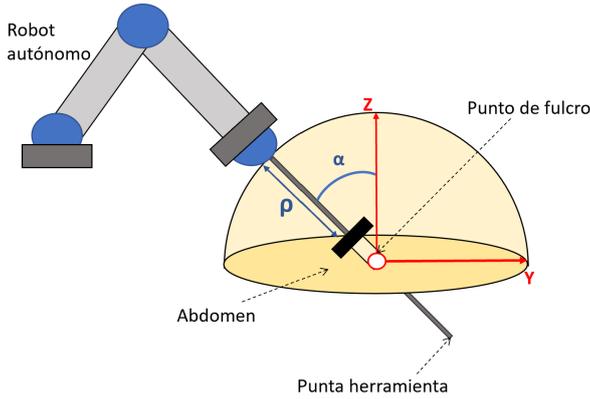


Figura 10: Movimiento del instrumento en el abdomen

En esta sección se presenta un *Estimador distancia al fulcro* que calcula la distancia ρ entre el efector final y la incisión en el abdomen ($\{Fp\}$), como se muestra en la Figura 10. Además, mediante un control de fuerzas se corrige la posición estimada del punto de pivote de la herramienta para evitar ejercer fuerzas no deseadas en el abdomen. Posteriormente, se calcula la pose (posición y orientación) deseada y el control de posición envía la consigna de velocidad al robot para alcanzar dicha pose.

El controlador es un esquema híbrido de fuerza-posición encargado de posicionar la punta de la herramienta en la consigna deseada enviada por el *Módulo de navegación* sin ejercer fuerzas no deseadas sobre el abdomen. La Figura 11 recoge la arquitectura de control que consta de dos bucles de retroalimentación, uno que maneja la retroalimentación de fuerza y momento, mientras que el otro bucle proporciona retroalimentación sobre la pose de herramienta. Además, cuenta con el *Estimador distancia al fulcro*, el *Pose deseada TTP* para calcular la pose deseada en función de X_{des} y el punto de fulcro $\{Fp\}$, y el bloque sensor de fuerza/momento.

El esquema de control de fuerzas consiste en una estructura de control puramente proporcional para evitar las fuerzas de interacción entre la herramienta y el abdomen en el punto de fulcro. Este punto es clave para estimar la orientación del robot que permita a la herramienta pivotar sobre el fulcro y alcanzar la posición deseada sin fuerzas en el abdomen. Para lograr este objetivo, se debe rectificar la posición del punto de fulcro en el plano XY del sistema de referencia de $\{Fp\}$, que se supone paralelo al sistema de referencia del robot base. Se asume el abdomen como un modelo elástico, tal que $\Delta X = \Delta F \cdot K_{abdomen}$, donde ΔF es la diferencia de fuerzas ejercidas en el abdomen,

$K_{abdomen}$ es la ganancia que modela la piel con un valor entre $5 \cdot 10^{-5}$ y $1 \cdot 10^{-5}$ (estimado empíricamente) y ΔX indica cuánto y en qué dirección debe moverse la herramienta para evitar las fuerzas en el sistema de referencia del efector final. Dicho desplazamiento se pasa posteriormente al sistema de referencia de la base del robot por medio de la transformada ${}^{R1}T_{E1}$, porque la lectura de fuerza se realiza en el sensor colocado en el efector final pero todas las consignas de movimiento se mandan respecto al sistema de referencia de la base del robot autónomo.

El *Estimador distancia al fulcro* calcula la distancia ρ desde el efector final al fulcro. El procedimiento consiste en dividir el momento medido por el sensor entre la fuerza medida en ese punto, cuyo resultado es igual a la distancia al punto donde se ejerce la fuerza. Despreciando las fuerzas en el eje Z, se calcula la distancia a F_p desde el sensor como se recoge en la ecuación 7. Se desprecian las fuerzas en Z debido a que el *Estimador distancia al fulcro* solo funciona cuando no se está en contacto con el tejido a suturar, para tener solo en cuentas las fuerzas en el abdomen.

$$\rho = \frac{|M_E|}{|F_E|} = \frac{|\sqrt{(M_x^2 + M_y^2)}|}{|\sqrt{(F_x^2 + F_y^2)}|}, \quad (7)$$

donde M_E es el momento medido en el efector final y F_E la fuerza. Para obtener la distancia a $\{E1\}$, se debe sumar este valor, ρ , a las dimensiones del sensor.

Conocido ρ y el efecto de la fuerza para corregir la estimación de la posición del fulcro, ΔX , se estima el punto de fulcro. El cálculo se compone de dos desplazamientos del sistema de referencia $\{E1\}$, uno para colocar la posición del punto de pivote a una distancia ρ de $\{E1\}$ que da como resultado F'_p , y otro para corregir su posición en el plano XY debido al efecto de las fuerzas medidas, obteniendo ${}^{R1}T_{Fp}$ como se puede ver en la Figura 11.

Después, en *Pose deseada TTP* se calcula la consigna de control deseada como se ve en la siguiente matriz, que se compone del desplazamiento para alcanzar el punto objetivo X_{des} , y las orientaciones para hacer el pivote en el fulcro, siendo α la rotación necesaria en el eje X para que la herramienta pase por el fulcro, y β el ángulo del eje Y. No hay rotación en el eje Z porque la herramienta coincide con el eje Z del efector final.

$${}^{TTP}F_{des} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) & \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) & X_{des}(0) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & X_{des}(1) \\ -\cos(\beta) & \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & X_{des}(2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Esta consigna se envía al robot manipulador usado, que es un UR3, un robot colaborativo de UniversalRobots®. Siguiendo la documentación proporcionada por el fabricante, la manera de controlar la posición y orientación de manera continua y que garantiza la actualización de las consignas a la velocidad más alta soportada (125 Hz) es por medio del comando de velocidad $SpeedL$. Por lo tanto, al robot se le mandará un vector de seis velocidades, tres para la velocidad lineal que controla la posición y otras tres para la velocidad angular que controla la orientación.

A través de un controlador proporcional integral (PI) se logra que el error en la pose, ΔP , obtenido entre la pose deseada y la actual, se reduzca a cero. El controlador PI se ha sintonizado

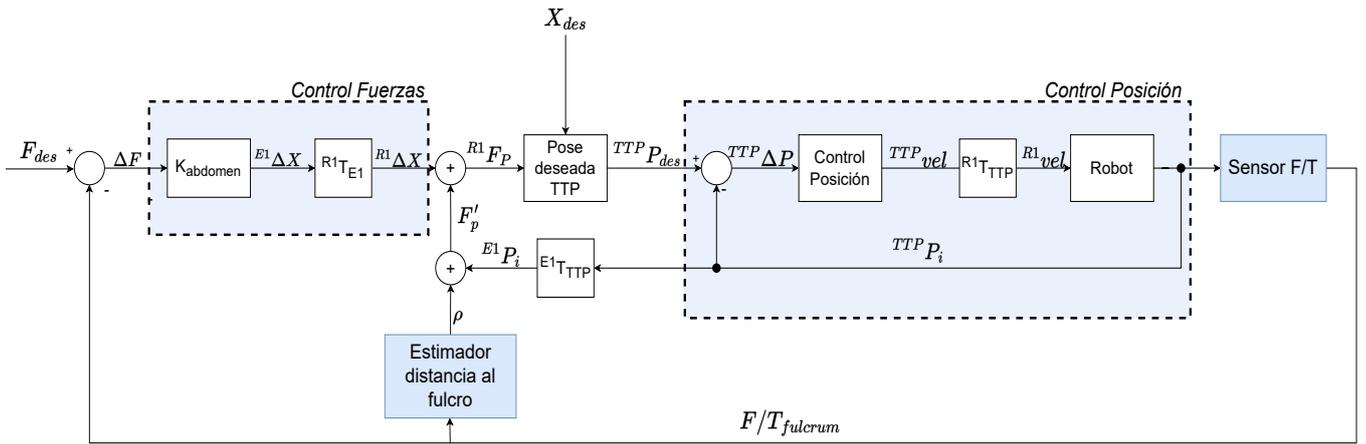


Figura 11: Arquitectura del Módulo de Control

utilizando el método del lugar de las raíces. Los valores para las ganancias proporcional e integral son $K_P = 1,8$ y $K_I = 0,3$, respectivamente, logrando una respuesta un segundo más rápida que el sistema sin control y sin sobre-oscilación. La consigna de velocidad se estima en el sistema de referencia de la punta de la herramienta, pero se debe mandar al robot en el sistema de referencia de la base del robot, por lo que se usa la transformada $R^1 T_{TTP}$, para lograr este cambio de base.

La Figura 12 muestra como funciona el control fuerza-posición. En la Figura 12a), la estimación previa del punto de fulcro es errónea, F'_p , por lo que cuando la herramienta trata de pivotar para alcanzar el punto deseado (en verde) se ejercen fuerzas en el abdomen no deseadas, $F_{Abdomen}$. En consecuencia, el control de fuerzas estima un desplazamiento horizontal ΔX de la posición del punto de fulcro en el mismo sentido que las fuerzas. Con la herramienta ahora pivotando en la posición correcta F_p , como se ve en 12b), se calcula la orientación necesaria para lograr la posición deseada, y el control de posición se asegura que la punta de la herramienta alcance dicha pose.

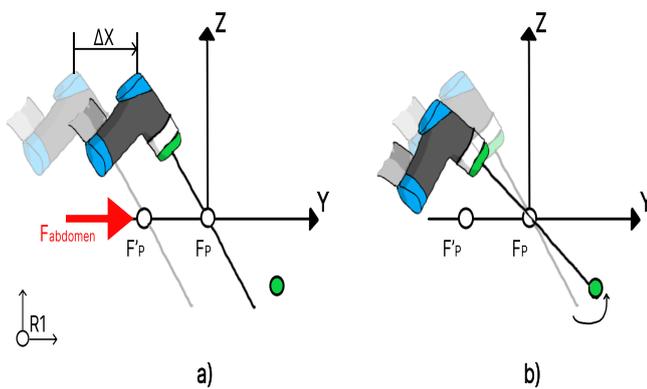


Figura 12: Ejemplo funcionamiento control fuerza-posición. a) Corrección posición del punto de fulcro. b) Corrección pivotaje en el fulcro

5. Integración

La Figura 13 muestra la arquitectura de ROS que implementa el flujo de datos entre todos los sistemas. Por un lado,

se cuenta con dos sistemas físicos representados por cajas lilas, que son, por un lado, la cámara RGB-D y por otro el brazo robótico con el sensor F/T incluido en el bloque. El *Módulo de navegación* recibe la imagen intraoperatoria de la cámara y hace todos los cálculos mostrados en la sección 3. Este módulo se conecta con un servidor de ROS, *servidor cámara*, encargado de realizar las comunicaciones entre este módulo y el *Módulo de control*. Para eso, el *Módulo de control* hace una petición al servidor para recibir cuál es el punto de sutura al que debe ir, el *Módulo de navegación* recibe esa petición y lo manda. Solo vuelve a pedir su estimación de nuevo en caso de que la piel se haya deformado, sino se asume que los puntos de sutura no han cambiado. El *Módulo de control* implementa las operaciones de la sección 4 y mediante topics y un nodo de ROS envía al robot las velocidades de referencia y recibe de este las posiciones del robot, y las fuerzas y los momentos leídas por el sensor.

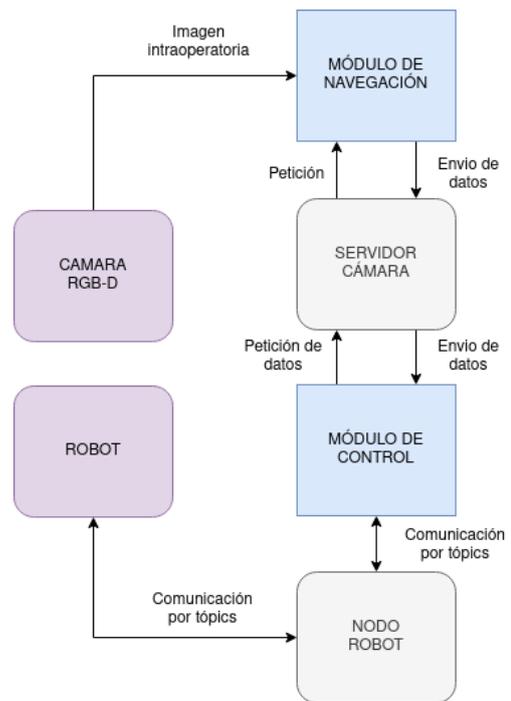


Figura 13: Arquitectura ROS implementada para la comunicación entre módulos

6. Resultados

A continuación se recogen los experimentos realizados para validar la detección de puntos de sutura mediante visión y el control fuerza-posición de la herramienta para alcanzar dichos puntos. Para ello se ha detectado los puntos de sutura tanto en una incisión fina como en una gruesa dentro del pelvitainer. La estimación de estos puntos ha sido evaluado con los puntos de sutura estimados para esas mismas incisiones por medio de humanos. Posteriormente se le ha comandado al robot moverse a algunos de esos puntos.

El movimiento del robot se ha realizado tanto para comprobar la eficacia del control de fuerzas, al tener que mover el instrumental dentro del abdomen del paciente partiendo de una estimación errónea del punto del fulcro, como para garantizar la eficacia del control de posición para alcanzar las posiciones y orientaciones deseadas.

6.1. Validación detección de puntos

Se dispone el escenario como en la Figura 3, con una almohadilla para sutura quirúrgica en el interior del pelvitainer que se puede observar en la Figura 14. El propósito de esta validación es comprobar si en este escenario el algoritmo es capaz de detectar de manera correcta la herida, estimar si se trata de una incisión fina o gruesa y, finalmente, estimar la ubicación de todos los puntos de sutura, tanto para una incisión gruesa como para una fina. Además, se planifica la trayectoria que debe seguir el robot para cerrar la incisión de forma precisa.

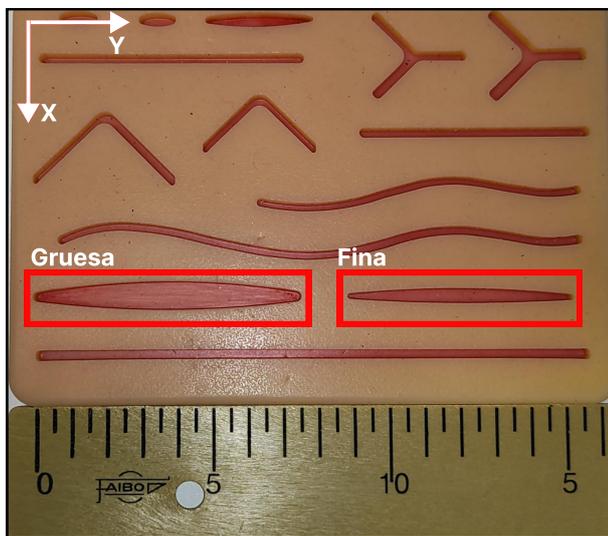


Figura 14: Almohadilla para sutura quirúrgica

Para el desarrollo de este experimento se han tomado los siguientes valores para las variables del algoritmo σ , γ y η siguiendo protocolos clínicos y con la ayuda de la experiencia de expertos. σ es la separación entre los puntos de sutura y su valor es de 1 cm; γ es la separación de los puntos de sutura al borde de una incisión gruesa y se ha determinado para este experimento un valor de 0.5 cm. Estos dos valores están abierto a cambio, ya que cuando el algoritmo determina la ubicación de los puntos de suturas los proyecta en el monitor para que el cirujano los visualice, en caso de no satisfacerle los valores puede cambiarlos. Por último, η , que es la separación en el eje Z de los puntos bias

S' tiene un valor de 2 cm para este experimento, pero también está abierto a cambio si el cirujano lo considera adecuado.

Se realizaron dos experimentos con una incisión de cada tipo, uno con solo la incisión gruesa y otro con solo la incisión fina, ambas presentes en la Figura 14. Estos experimentos se repitieron varias veces y con diferentes ángulos y alturas para garantizar la repetibilidad. En la Figura 15 se recoge la imagen captada por la cámara RGB-D de una incisión gruesa en el interior del pelvitainer iluminada artificialmente. En dicha incisión se han proyectado los diez puntos de sutura que el algoritmo ha estimado necesarios al igual que el orden de sutura, todo esto en amarillo. Al tratarse de una incisión gruesa, la ubicación de los puntos de sutura se encuentra en el borde de la incisión. En la representación visual de estos puntos no se han proyectado los puntos bias para facilitar la visualización de los puntos de sutura. Asimismo, se ha dibujado artificialmente el sistema de coordenadas de la cámara en blanco para ayudar al entendimiento

Por su parte, la Figura 16 representa la posición de los puntos de sutura de una incisión fina, que como tiene la misma longitud que la gruesa, su cantidad de punto de sutura es cinco, la mitad que para la gruesa, y estos se encuentran sobre la diagonal mayor de la incisión.

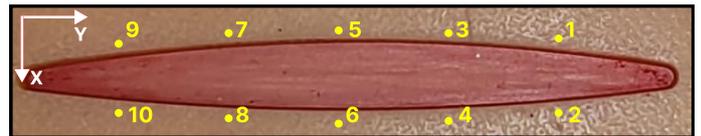


Figura 15: Colocación de los puntos de sutura para una herida gruesa



Figura 16: Colocación de los puntos de sutura para una herida fina

Para esas dos incisiones, se le pidió a diversas personas con diferentes conocimientos en sutura, que indicaran donde podrían ellos los puntos de sutura. Los resultados obtenidos de las pruebas con humanos comprobaron que los resultados obtenidos mediante el algoritmo de visión son correctos para suturar dichas incisiones. No hay métricas concretas para determinar y evaluar las ubicaciones de los puntos de sutura ni la cantidad de ellos, ya que depende de la persona que lo haga, por lo que solo se evaluó si los expertos consideraban que la cantidad de puntos de sutura y las ubicaciones de estos eran adecuadas para cerrar la incisión, dando como resultado que sí.

Si embargo, la estimación de los puntos de sutura usando el algoritmo de detección mediante el uso de la imagen de profundidad planteado en este trabajo ha presentado errores significativos cuando la incisión tiene alguna imperfección o cuando el gradiente de profundidad en la incisión no es suficientemente pronunciado, dando como resultados errores para detectar la herida o estimando menos puntos de sutura de los necesarios para dicha incisión. El algoritmo se desarrolló para incisiones laparoscópicas como las de la Figura 14, cualquier fuera de este contexto está sujeta a errores.

6.2. Validación control de fuerzas

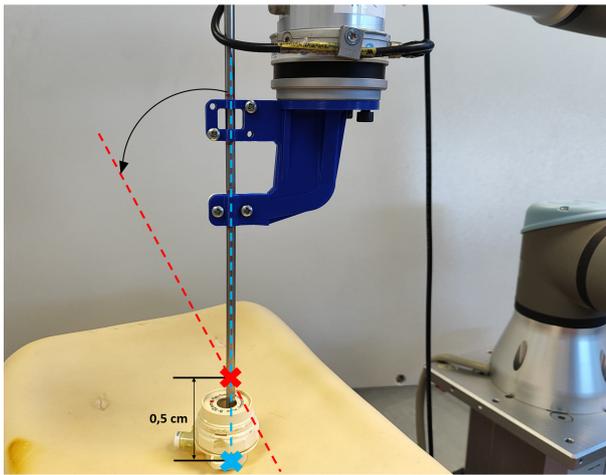


Figura 17: Resultados de las fuerzas medidas en el movimiento del instrumento

Para verificar el funcionamiento del controlador de fuerza, se han recogido los datos de fuerza al alcanzar los puntos de sutura detectados por visión en la Figura 16. Para garantizar la aparición de fuerzas en el abdomen, que no aparecerían si la estimación inicial del punto de fulcro fuerza exacta y dicha posición no estuviera sujeta a cambios, se realiza una estimación inicial de ρ que presenta un error de 0.5 cm con el valor real, como se representa en la Figura 17 donde el valor del fulcro real se representa en azul y el erróneo en rojo. Este error en la estimación del fulcro provoca, como se ve en la Figura 17, que la herramienta al pivotar en ese punto ejerza fuerzas en la pared abdominal del pelvitruiner.

Con el objetivo de comprobar si el control de fuerzas es capaz de corregir las fuerzas que este error de estimación puede generar, no se usa el bloque *Estimador distancia al fulcro* para mantener este error constante. La Figura 18 muestra las fuerzas medidas en el fulcro durante el movimiento tanto en X, F_X , como en Y, F_Y , obteniendo como resultado, que a pesar de encontrar fuerzas en el movimiento, éstas no superan los 0.4 Newton.

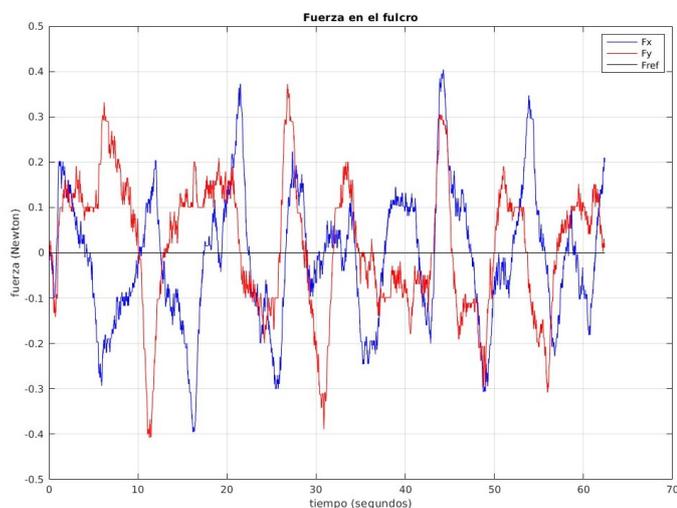


Figura 18: Resultados de las fuerzas medidas en el movimiento del instrumento

Debido al efecto del control de fuerzas, la posición del punto de fulcro en el plano XY se ve desplazada. El desplazamiento en cada eje se puede observar en la Figura 19. Aunque las variaciones son de centímetros, o hasta de milímetros en el eje X, es suficiente para mitigar el efecto de fuerzas en el abdomen debido a una mala estimación inicial de ρ .

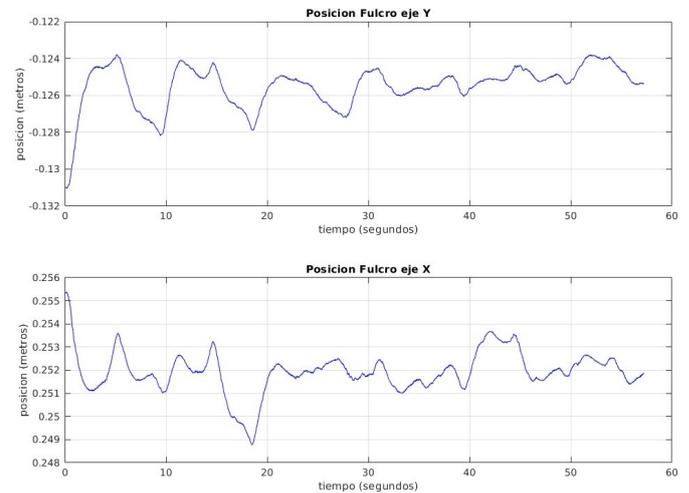


Figura 19: Resultados de las fuerzas medidas en el movimiento del instrumento

En la Figura 20 se aprecia el caso donde el error inicial del ρ es de entre 1 y 2 cm, pero ahora se usa el *Estimador distancia al fulcro* para mitigarlo, de esta manera se trata de evaluar el efecto tanto del controlador de fuerzas como del estimador al fulcro. La herramienta se mueve para alcanzar 4 puntos y en esta ocasión, se ve al inicio un pico de fuerza máxima superior de 1 Newton que luego se corrige hasta un valor inferior a las 0.4 Newton. La corrección repentina de las fuerzas se debe a la corrección del valor de ρ , con este valor del parámetros más cercano al valor real, el pivotaje en ese punto genera mucha menos fuerza en el abdomen.

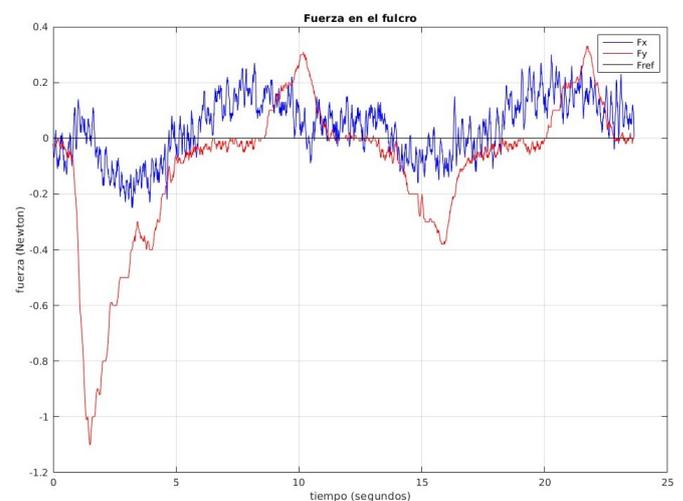


Figura 20: Resultados de las fuerzas medidas en el movimiento del instrumento usando el estimador de punto de fulcro

6.3. Validación control de posición

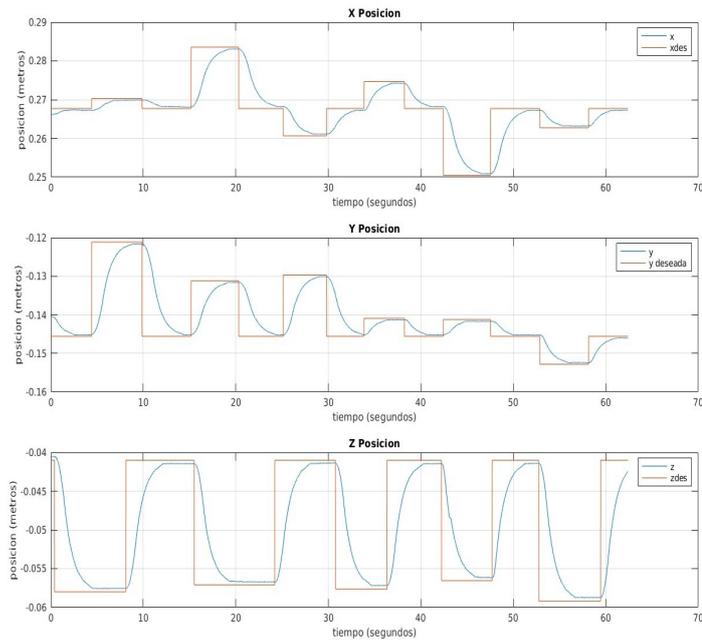


Figura 21: Resultado de la posición en X en el movimiento del instrumento

Por otro lado, para validar el comportamiento del control de posición, que se ocupa de garantizar tanto la posición como la orientación, se le ha mandado al robot moverse a 6 puntos dentro del pelvitainer. Considerando una estimación inicial del punto de fulcro con un error inferior a 5 cm, incluyendo en esta ocasión el control de fuerzas previamente validado, se calcula así la posición y orientación necesarias para alcanzar dichos puntos. La Figura 21 recoge la evolución de la posición, en las tres coordenadas del robot, para alcanzar los seis puntos de sutura objetivos así como para alcanzar los puntos de paso que genera el *Planificador de trayectorias*, es decir, se mueve a 11 puntos. La respuesta obtenida, en azul, es la de un sistema de segundo orden, donde se alcanzan las posiciones deseadas, en naranja, en las tres coordenadas. Esta respuesta no presenta ningún tipo de sobre-oscilación.

La Figura 22 muestra la evolución de la orientación, en el eje X y en el Y, que se han denominado respectivamente α y β . Observando la evolución de los ángulos en la Figura 22, se aprecia como los ángulos deseados (*des*), representados de color naranja, presentan cambios anómalos. Esto se debe al efecto del cambio de la estimación del fulcro (E_{CF}), debido a la aparición de fuerzas en el fulcro que superan un umbral. En este caso, el control de fuerzas desplaza de manera horizontal la herramienta en la plano del fulcro, lo que conlleva la modificación de la estimación de la orientación deseada, y por consecuencia, la orientación real del sistema, en azul, debe responder a esa nueva consigna. En la figura se han marcado dos de esos cambios en rojo por cada ángulo. Por el contrario, las posiciones se quedan estáticas a pesar del efecto del cambio de la estimación del fulcro, ya que este solo afecta a la orientación, la posición es inmutable y presenta un error por debajo del milímetro mientras la orientación varía.

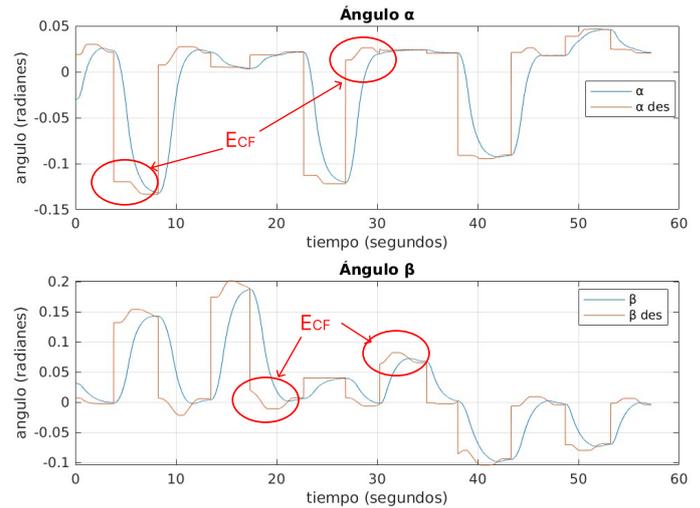


Figura 22: Resultado de los ángulos α y β en el movimiento del instrumento

7. Conclusiones y líneas futuras

Este artículo presenta un algoritmo de sutura robótica automatizada en cirugía laparoscópica mediante una plataforma robótica, para ello utiliza algoritmos de visión para localizar el tejido a suturar, caracterizada la herida en fina o gruesa, y en función de esa clasificación localizar los puntos de sutura necesarios. El algoritmo de visión presentado muestra un error inferior a las 3 mm a la hora de localizar los puntos de sutura respecto a los estimados por un humano, haciéndolo únicamente mediante la información de profundidad de la cámara RGB-D. Durante el movimiento de la herramienta, esta debe pivotar en el punto de fulcro del abdomen, logrando alcanzar la posición deseada de la punta y no ejercer fuerzas en la pared abdominal. Para eso, este artículo presenta un controlador fuerza-posición que por medio de comandos de velocidad garantiza que la punta de la herramienta alcance los puntos de sutura de manera eficiente, sin sobre-oscilaciones y teniendo unas fuerzas máximas en el abdomen de 0.4 N.

La localización deseada de la punta de la herramienta que porta el robot, orientación y posición, es controlada por un control de posición PI con ganancias $K_P = 1,8$ y $K_I = 0,3$, y por un control de fuerzas con ganancia proporcional de valor entre 10^{-5} y $1 \cdot 10^{-5}$ para que durante el movimiento no se ejerzan fuerzas no deseadas en el abdomen mediante una. De esta manera se logra alcanzar los puntos sin sobre-oscilación y con fuerzas en el abdomen inferiores a 0.4 N.

Este artículo aporta avances frente a trabajos previos en cirugía laparoscópica robotizada, al permitir que robot moverse en el interior del abdomen de forma autónoma, asumiendo que el punto de fulcro no es fijo ya que este puede presentar variaciones durante las operaciones, considerando las fuerzas en el abdomen para corregir el movimiento evitando dañar al paciente y asegurándose que alcanza los puntos deseados a la par que sigue la trayectoria generada autónomamente mediante visión para cerrar una herida plana.

Futuros avances en este trabajo incluirían un mecanismo para fusionar los datos de profundidad con los datos de color de

la imagen para ayudar a corregir los errores presentes cuando el gradiente de profundidad no es lo suficientemente significativo como para detectar la incisión; la implementación de un sistema de percepción capaz de rastrear objetos en condiciones más reales que las presentes en el pelvitraíner, como Schwaner et al. (2021) en donde detectan la aguja o en Kil et al. (2019) que estiman el ángulo de entrada óptimo de la aguja en la piel; elevación de métricas cualitativas para evaluar la calidad de la sutura como en Kil et al. (2018); implementar un controlador de fuerzas para la punta de la herramienta a la par que un separador de fuerzas para poder distinguir que fuerza se realiza en el fulcro y cual en el punto de sutura en la piel, permitiendo así hacer un control más preciso, y por último, hacer uso de una herramienta quirúrgica real, como puede ser un *Endo Stitch*, para realizar suturas.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación del proyecto "Planificador global de un sistema robótico para anastomosis", con identificador PID2019-111023RB-C31, y del proyecto "Sistema Quirúrgico Ciberfísico Para Abordaje Laparoscópico" con identificador PY20-00738. Proyectos a los que se encuentra adscrito el grupo de investigación de Robótica Médica del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga.

Referencias

- Abiri, A., Askari, S. J., Tao, A., Juo, Y.-Y., Dai, Y., Pensa, J., Candler, R., Dutton, E. P., Grundfest, W. S., 2019. Suture breakage warning system for robotic surgery. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 66 (4), 1165–1171.
DOI: 10.1109/TBME.2018.2869417
- Bauzano, E., Estebanez, B., García-Morales, I., Muñoz, V. F., 2016. Collaborative human-robot system for hals suture procedures. *IEEE Systems Journal* 10 (3), 957–966.
DOI: 10.1109/JSYST.2014.2299559
- Bauzano, E., García-morales, I., 2009. Esquema De Control En Cascada Para Muñecas Activas En La Robótica Quirúrgica. Conference: XXX Jornadas de Automática - Valladolid. (September).
- Bauzano, E., Muñoz-Martínez, V., García-Morales, I., Campos, B., 09 2009. Esquema de control en cascada para muñecas activas en la robótica quirúrgica.
- Deal, A., Chow, D.-L., Newman, W., 2012. Hybrid natural admittance control for laparoscopic surgery. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp. 1277–1283.
DOI: 10.1109/IR0S.2012.6385885
- Kil, I., Groff, R. E., Singapogu, R. B., 2018. Surgical suturing with depth constraints: Image-based metrics to assess skill. In: 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). pp. 4146–4149.
DOI: 10.1109/EMBC.2018.8513266
- Kil, I., Singapogu, R. B., Groff, R. E., 2019. Needle entry angle force: Vision-enabled force-based metrics to assess surgical suturing skill. In: 2019 International Symposium on Medical Robotics (ISMR). pp. 1–6.
DOI: 10.1109/ISMR.2019.8710175
- Kuo, J.-Y., Song, K.-T., 2020. Human interface and control of a robotic endoscope holder based on an ar approach, 1–6.
DOI: 10.1109/CACSS0047.2020.9289835
- Leonard, S., Shademan, A., Kim, Y., Krieger, A., Kim, P. C. W., 2014a. Smart tissue anastomosis robot (star): Accuracy evaluation for supervisory suturing using near-infrared fluorescent markers. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 1889–1894.
DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907108
- Leonard, S., Wu, K., Kim, Y., Krieger, A., Kim, P., 04 2014b. Smart tissue anastomosis robot (star): A vision-guided robotics system for laparoscopic suturing. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* 61, 1305–1317.
DOI: 10.1109/TBME.2014.2302385
- Lu, B., Chu, H. K., Huang, K. C., Cheng, L., 2019. Vision-based surgical suture looping through trajectory planning for wound suturing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 16 (2), 542–556.
DOI: 10.1109/TASE.2018.2840532
- Muñoz, V., García-Morales, I., Fraile-Marín, J., Pérez-Turiel, J., Muñoz-García, A., Bauzano, E., Rivas-Blanco, I., Sabater-Navarro, J., 2021. Collaborative robotic assistant platform for endonasal surgery: Preliminary in-vitro trials. *Sensors*,
DOI: <https://doi.org/10.3390/s21072320>
- Muñoz, V. F., García Morales, I., Pérez del Pulgar, C., Gómez de Gabriel, J. M., Fernández Lozano, J. J., García Cerezo, A., Vara, C., Toscano, R., 2009. Control cartesiano de un asistente robótico para cirugía laparoscópica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 3 (4), 63–74.
- Márquez, M., Belda, R., 04 2015. Uso de las suturas barbadas en cirugía general y digestiva. *revisión de conjunto. Cirugía Española* 94.
DOI: 10.1016/j.ciresp.2015.03.007
- Pedram, S. A., Shin, C., Ferguson, P. W., Ma, J., Dutton, E. P., Rosen, J., 2021. Autonomous suturing framework and quantification using a cable-driven surgical robot. *IEEE Transactions on Robotics* 37 (2), 404–417.
DOI: 10.1109/TR0.2020.3031236
- Pérez-Duarte, F., Sánchez-Margallo, F., Díaz-Güemes Martín-Portugués, I., Sanchez-Hurtado, M., Lucas-Hernández, M., Usón, J., 05 2012. Ergonomía en cirugía laparoscópica y su importancia en la formación quirúrgica. *Cirugía Española - CIR ESPAN* 90.
DOI: 10.1016/j.ciresp.2011.04.021
- Rivas-Blanco, I., López-Casado, C., Pérez-del Pulgar, C. J., García-Vacas, F., Fraile, J. C., Muñoz, V. F., 2018. Smart cable-driven camera robotic assistant. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 48 (2), 183–196.
DOI: 10.1109/THMS.2017.2767286
- Saeidi, H., Le, H. N. D., Opfermann, J. D., Leonard, S., Kim, A., Hsieh, M. H., Kang, J. U., Krieger, A., 2019. Autonomous laparoscopic robotic suturing with a novel actuated suturing tool and 3d endoscope. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 1541–1547.
DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794306
- Schwaner, K. L., Dall'Alba, D., Jensen, P. T., Fiorini, P., Savarimuthu, T. R., 2021. Autonomous needle manipulation for robotic surgical suturing based on skills learned from demonstration. In: 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). pp. 235–241.
DOI: 10.1109/CASE49439.2021.9551569
- Sonsilphong, S., Sonsilphong, A., Hormdee, D., Khampitak, K., 2022. A development of object detection system based on deep learning approach to support the laparoscope manipulating robot (lmr). In: 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON). pp. 1–4.
DOI: 10.1109/iEECON53204.2022.9741676
- Tiwari, M. M., Reynoso, J. F., High, R., Tsang, A. W., Oleynikov, D., 2011. Safety, efficacy, and cost-effectiveness of common laparoscopic procedures.
DOI: 10.1007/s00464-010-1328-z
- Tugal, H., Gautier, B., Kircicek, M., Erden, M. S., 2018. Hand-impedance measurement during laparoscopic training coupled with robotic manipulators, 4404–4410.
DOI: 10.1109/IR0S.2018.8593560
- Tugal, H., Gautier, B., Tang, B., Nabi, G., Erden, M. S., 2022. Hand-impedance measurements with robots during laparoscopy training. *Robotics and Autonomous Systems* 154, 104130.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104130>