

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
BIOMÉDICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS
COMPONENTES MECÁNICOS, MOTRICES Y
ESTRUCTURALES DE UN SISTEMA DE CONTROL
HÁPTICO PARA SU APLICACIÓN EN CIRUGÍA.**

ALBERTO INDARTE GARCÍA

2017

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

para juzgar el Trabajo Fin de Máster titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES
MECÁNICOS, MOTRICES Y ESTRUCTURALES DE UN
SISTEMA DE CONTROL HÁPTICO PARA SU APLICACIÓN
EN CIRUGÍA.**

del alumno D. Alberto Indarte García
dirigido por D. Álvaro Gutiérrez Martín
del Departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería

Acuerdan otorgar la calificación de: _____

Y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal, la presente diligencia

Madrid, de de

El Presidente

El Vocal

El Secretario

Fdo: _____ Fdo: _____ Fdo: _____

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
BIOMÉDICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS
COMPONENTES MECÁNICOS, MOTRICES Y
ESTRUCTURALES DE UN SISTEMA DE CONTROL
HÁPTICO PARA SU APLICACIÓN EN CIRUGÍA.**

ALBERTO INDARTE GARCÍA

2017

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Máster consiste en el diseño e implementación de un manipulador para un sistema de realimentación háptica accesorio al dispositivo Novint Falcon que añade tres grados de libertad para una posterior utilización en simulación quirúrgica.

Dicho manipulador será diseñado mediante el software CAD SolidEdge de Siemens y será impreso en 3D en PLA con una impresora Prusa i3. Seguidamente se formularán las ecuaciones de cinemática directa e inversa y se obtendrán las ecuaciones de los pares de fuerzas de los motores que se utilizarán en futuras aplicaciones. La estructura diseñada pretende ser lo más cómoda para el usuario final y está fundamentada en diversos dispositivos hápticos presentes en el mercado.

Los motores implementados añadirán tres grados de libertad al sistema Falcon-Estructura ofreciendo una realimentación de seis grados de libertad en total para el usuario.

Abstract

The aim of this project is to design and implement a manipulator for a haptic feedback system being an accessory to the Novint Falcon device. It adds three degrees of freedom for a further use in surgical simulation.

The manipulator will be designed via the CAD software SolidEdge from Siemens and will be 3D-printed in PLA with a Prusa i3 printer. In addition, the forward and inverse kinematics of the manipulator together with the equations of the motor torques will be established. The designed structure pretends to be as comfortable as possible for the user and it is based on a series of haptic devices that already exist in the market.

The implemented engines in the structure will add three degrees of freedom to the system Falcon-Structure, yielding a total of six degrees for the user.

Agradecimientos

Quiero aprovechar para darle las gracias a mi tutor Álvaro Gutiérrez por toda la ayuda y la guía que me ha brindado en la realización de este proyecto, sin la cual sin ninguna duda no habría conseguido llevarlo a cabo y también por toda la paciencia que ha tenido conmigo, sin ninguna experiencia en lo tratado aquí cuando comencé a trabajar en el Robolabo.

También quiero darle las gracias a Miguel Martín Abadal, por su inestimable ayuda al comienzo de este proyecto con todos los aspectos técnicos tratados y por las risas a la hora de explicármelos.

Índice general

Resumen	v
Abstract	v
Agradecimientos	vi
Índice General	vii
Índice de Figuras	viii
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Introducción a la Simulación Quirúrgica	1
1.2. Estado del Arte en Simulación Quirúrgica	2
1.3. Sistemas de Realimentación Háptica	5
1.4. Motivación	7
1.5. Objetivos	7
2. Diseño del Manipulador	9
2.1. Sistema Novint Falcon	9
2.2. Dispositivos Actuales	9
2.3. Estructura Propuesta	10
2.4. Estudio de los Grados de Libertad y Rangos de Movimiento	12
3. Estudio Cinemático del Controlador Háptico	15
3.1. Cinemática Directa de Posición	15
3.2. Cinemática Inversa de Posición	19
3.3. Cinemática Directa de Velocidad	21
3.3.1. Cinemática Directa de Velocidad Lineal	22
3.3.2. Cinemática Directa de Velocidad Angular	23
3.4. Cinemática Inversa de Velocidad	24
3.5. Pares de Fuerzas de los Motores	26

4. Conclusiones y Líneas Futuras	27
4.1. Conclusiones	27
4.2. Líneas Futuras	27
5. Anexo	31
Bibliografía	36

Índice de figuras

1.1. Imágenes de uso del simulador Da Vinci	3
1.2. Hardware del simulador RoSS	3
1.3. Hardware del sistema UROMENTOR	4
1.4. Hardware del simulador PROMIS	5
1.5. Phantom Omni® Haptic Interface	6
1.6. Brazo robótico Hapticmaster	6
2.1. Dispositivo Novint Falcon	9
2.2. Sistema háptico Omega.6, Force Dimension	10
2.3. Vista isométrica de la estructura	11
2.4. Convenio de nombres para las distintas partes de la estructura	11
2.5. Localización de los ejes de rotación y del extremo terminal	12
2.6. Rotación alrededor del eje X	13
2.7. Rotación alrededor del eje Y	13
2.8. Rotación alrededor del eje Z	14
3.1. Ejes de rotación acordados para el cálculo de la cinemática directa	16
3.2. Variación de las coordenadas generalizadas con respecto a la posición inicial	19
3.3. Geometría para la obtención de q_1	20
A1. Planta, vista general, perfil y alzado del vástago	32
A2. Planta, vista general, perfil y alzado del primer encaje	33
A3. Planta, vista general, perfil y alzado del primer brazo	34
A4. Planta, vista general, perfil y alzado del segundo encaje	35
A5. Planta, vista general, perfil y alzado del controlador	36

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Introducción a la Simulación Quirúrgica

La cirugía es una de las disciplinas médicas más exigentes en lo que a preparación para la misma se refiere. Los profesionales médicos dedicados a este campo son capaces de llevar a cabo sus trabajos tras años de entrenamiento y experiencia que les capacitan para ejecutar dicha actividad. Tanto es así que es una de las ramas de la medicina más susceptibles a complicaciones posteriores debido a su invasividad intrínseca. Además, no solo se debe considerar el trauma que sufre el paciente al ser operado, sino que es necesario considerar el postoperatorio, la posibilidad de infección, etc. Otra de las complicaciones añadidas a esta disciplina médica es el coste que lleva asociado, ya que hay que considerar el instrumental quirúrgico empleado, los sueldos de los cirujanos y anestelistas, el coste de la sala y el postoperatorio del paciente [1, 2]. Es por esto que la Cirugía de Mínima Invasión (CMI) ha venido cobrando cada vez más protagonismo a lo largo de los últimos años.

Esta disciplina consiste en llevar a cabo la actividad quirúrgica mediante la realización de unas pocas y pequeñas incisiones en el paciente por las cuales se introduce el instrumental necesario para la operación y la cámara para la visualización de las estructuras fisiológicas del paciente. Para ello, el cirujano debe estar preparado y entrenado en la realización de esta disciplina, para evitar complicaciones asociadas a la ausencia de una visión completa de la situación en el paciente conforme se lleva a cabo la práctica. Es por tanto en estos casos cuando resulta de interés el desarrollo de metodologías para llevar a cabo dicho entrenamiento y ejecutar este tipo de operaciones.

Es precisamente aquí donde el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones cobran especial relevancia, ya que mediante las mismas se ha venido desarrollando en los últimos años nuevas herramientas de diagnóstico, análisis y entrenamiento para los profesionales médicos. En este último apartado, posibilitando la creación y simulación de entornos virtuales que ofrecen la interacción de una persona con lo dispuesto en el entorno, para la adquisición de la experiencia necesaria para llevar a cabo la cirugía [3].

En estos entornos deben disponerse las estructuras fisiológicas que se encontrará el cirujano en la práctica, tejidos, órganos, etc, y la interacción con los mismos por parte de la interfaz, es decir, la respuesta sensorial debe ser suficientemente veraz como para simular un entorno real. Esto hace alusión a dos sentidos principales, vista y tacto,

por lo que la realimentación visual debe plantearse como una situación en tiempo real con una actualización de al menos quince veces por segundo. En cuanto al sentido del tacto, dicha realimentación se considera satisfactoria cuando hay una frecuencia de actualización de al menos 500 veces por segundo. Además, todas las estructuras tratadas en el entorno virtual deben responder fidedignamente a las deformaciones mecánicas pertinentes, lo cual resulta una tarea difícil de simular eficientemente y de forma realista.

Es aquí donde el uso de simuladores quirúrgicos cobra protagonismo, sistemas que incluyen software y hardware de tal forma que el aprendiz interactúa con el primero a través del segundo. De esta forma, el estudiante adquiere destrezas y habilidades que le son de ayuda en un entorno quirúrgico real, pero sin someter al paciente a la práctica de unas manos inexpertas y eliminando por tanto la tensión en el aprendizaje por parte del estudiante. Por otro lado, estos sistemas están disponibles en todo momento, posibilitando una práctica y aprendizaje continuos por parte de los estudiantes.

Los simuladores quirúrgicos pueden catalogarse en tres generaciones diferentes sucesivas, a saber:

- Simuladores de primera generación: Únicamente tienen en cuenta la geometría, textura y posición de la estructura tratada.
- Simuladores de segunda generación: En este caso, además de las características anteriores, las estructuras responden a una interacción, visualizándose deformaciones, devolviendo fuerza que el usuario percibe y pudiendo ejecutar acciones como la modificación de dichas estructuras.
- Simuladores de tercera generación: Además de todas las características mencionadas anteriormente, tienen en cuenta aspectos funcionales de las estructuras encontradas.

Si bien actualmente la mayor parte de estos simuladores se clasifican dentro de la segunda generación, la falta de rigurosidad a la hora de imitar el comportamiento real y biomecánico de los tejidos mostrados en el entorno virtual dificulta en gran medida la posibilidad de llevar a cabo un entrenamiento efectivo, siendo a día de hoy más eficiente el entrenamiento con animales que con simuladores. Como se ha mencionado previamente, los dos aspectos fundamentales a tratar a la hora de lidiar con simuladores quirúrgicos son la vista y el tacto, siendo este último especialmente importante, ya que la sensibilidad de este sentido es mayor que la del primero. Por tanto, uno de los requisitos fundamentales que deben tener los simuladores es una respuesta háptica satisfactoria [4, 5].

1.2. Estado del Arte en Simulación Quirúrgica

Los simuladores quirúrgicos, aunque puede darse el caso de que sean generalistas, suelen estar enfocados a ciertas patologías o características a tratar concretas. Esto restringe su uso a cierto aspecto a entrenar o imitar, de tal forma que hay multitud de plataformas de simulación dedicadas al mismo fin pero distintas entre sí. A continuación se muestran ejemplos de algunos simuladores y sus aplicaciones.

- Sistema de simulación Da Vinci: A cargo de la empresa Sionix asociada con Intuitive Surgical® es uno de los simuladores en cirugía más extendidos, ya que prepara al profesional médico para el uso de este sistema de cara a la cirugía robotizada (ver Figura 1.1).

Las actividades que ofrece hacen especial hincapié en la adquisición de destreza en el uso de las herramientas que incluye el Sistema Da Vinci, como actividades de clampado, sutura, disección, manejo de agujas, etc. La complejidad de estas actividades puede aumentarse mediante la adición de un cuarto brazo robótico en el simulador. Al tener tantos ámbitos de aplicación, este simulador está destinado para profesionales médicos de cualquier especialidad [6, 7].



Figura 1.1: Imágenes de uso del simulador Da Vinci [8, 9]

- Simulador RoSS II: Destinado también a operar con el sistema Da Vinci, este simulador comercializado por Simulated Surgical Systems permite el entrenamiento de aprendices en actividades que van desde suturar y atar nudos a tareas complejas como prostatectomías e hysterectomías. El sistema de realidad virtual está integrado en una plataforma móvil que incluye cuatro módulos de entrenamiento diferentes que se centran en actividades de orientación, habilidades motoras, habilidades quirúrgicas básicas y habilidades quirúrgicas intermedias. Como es común, el sistema incluye un algoritmo de evaluación del desempeño del estudiante (ver Figura 1.2).

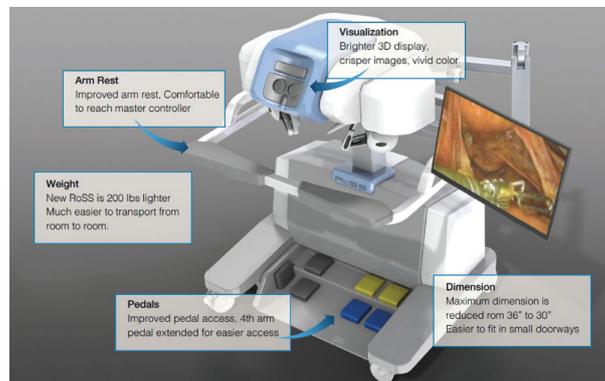


Figura 1.2: Hardware del simulador RoSS [10]

- Simulador URO MENTOR para entrenamiento en endourología: Desarrollado por Symbionix, este simulador combina hardware y software específicamente diseñados para imitar procedimientos de endourología (ver Figura 1.3).

Incluye herramientas que imitan los utensilios empleados en quirófano, como cistoscopios y ureteroscopios intentando simular de la forma más realista posible la situación dada en el entorno quirúrgico

La metodología de entrenamiento se divide en una serie de módulos, a saber los módulos de ciberescopia y de tareas básicas para la adquisición de destreza con el instrumental, módulo de manipulación de piedras (con 10 pacientes virtuales) y módulo de tratamiento de constricciones (con 8 pacientes virtuales) [11].



Figura 1.3: Hardware del sistema UROMENTOR [12]

- Simulador PROMIS para CMI: Este simulador permite un entrenamiento con modelos físicos y con modelos virtuales en una misma unidad mediante el uso de instrumentos quirúrgicos reales integrados en un entorno virtual. De nuevo, este simulador divide el entrenamiento en módulos de dificultad creciente y evalúa el desempeño del alumno en términos de lo erráticos que han sido sus movimientos, el tiempo empleado, etc (ver Figura 1.4).

El elemento físico es un maniquí al cual se le practican operaciones abdominales de tal forma que una vez los instrumentos están insertados en el mismo, hay una serie de cámaras que muestran la situación en pantalla. Dichas cámaras pueden modificarse para adquirir distintos puntos de vista. Este simulador tiene la particularidad de que permite el entrenamiento no solo de un estudiante, sino de varios, ya que es capaz de realizar un seguimiento de hasta cinco instrumentos quirúrgicos, posibilitando la simulación de una situación de cirugía real incluyendo al cirujano y a los asistentes [13].



Figura 1.4: Hardware del simulador PROMIS
[14]

1.3. Sistemas de Realimentación Háptica

Los sistemas de realimentación háptica tienen como finalidad reproducir las características de un entorno virtual en un entorno físico en términos del sentido del tacto. Esta reproducción de las fuerzas de contacto mejora la relación entre la interfaz y el usuario ya que se asemeja más a la percepción del mundo físico, adquiriendo un manejo con mayor destreza de los objetos virtuales dispuestos [15].

En cuanto a los tipos de sistemas, se distinguen dos principalmente:

- **Dispositivos hápticos pasivos:** Son sistemas de lazo abierto, por lo que no tienen realimentación. La respuesta de fuerza es programada y función de la posición y el tiempo
- **Dispositivos hápticos activos:** En este caso, la energía intercambiada entre el usuario y la máquina es una función del control de realimentación que se aplica, siendo por tanto de lazo cerrado. Dentro de este grupo se distinguen dos subcategorías:
 - **Isotónicos:** Los actuadores se comportan como una fuente de fuerza (variación del esfuerzo) y se mide la posición, es decir, la fuerza no varía con la posición. Un lazo cerrado en este tipo de sistemas se corresponde con especificar una impedancia para generar la simulación; el usuario mueve el dispositivo y este reacciona con una fuerza. Los robots de impedancia se corresponden con la mayoría de dispositivos hápticos y se consideran fuentes de fuerza. No es imprescindible que el dispositivo tenga sensores de fuerza, ya que se puede modelizar el comportamiento en un entorno virtual.

Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el Phantom Omni® Haptic Interface (ver Figura 1.5), desarrollado por el MIT Artificial Intelligence Laboratory y comercializado por Geomagic®. Posee tres grados traslacionales y rotacionales y se considera un dispositivo háptico profesional dentro de su campo. [16]



Figura 1.5: Phantom Omni® Haptic Interface
[17]

- **Isométricos:** Los actuadores funcionan como una fuente de posición y mide la fuerza. En este caso, la posición no cambia con la fuerza. Un lazo cerrado en este tipo de sistemas se corresponde con especificar una admitancia para generar la simulación. Este tipo de dispositivos hápticos miden las fuerzas ejercidas sobre los mismos y generan un cambio en el movimiento a raíz de cambios en la posición, la velocidad o la aceleración. Se controla su movimiento, se les considera fuentes de velocidad. Hay pocos ejemplos de este tipo de sistemas debido a la complejidad que deriva del uso de sensores de fuerza, aunque su uso en la industria está relativamente extendido.

Un ejemplo de este tipo de robots, fundamentados en el control de admitancia, es el brazo robótico Hapticmaster desarrollado por la empresa FCS robotics (ver Figura 1.6). Posee tres grados de libertad, siendo dos traslacionales. [18]

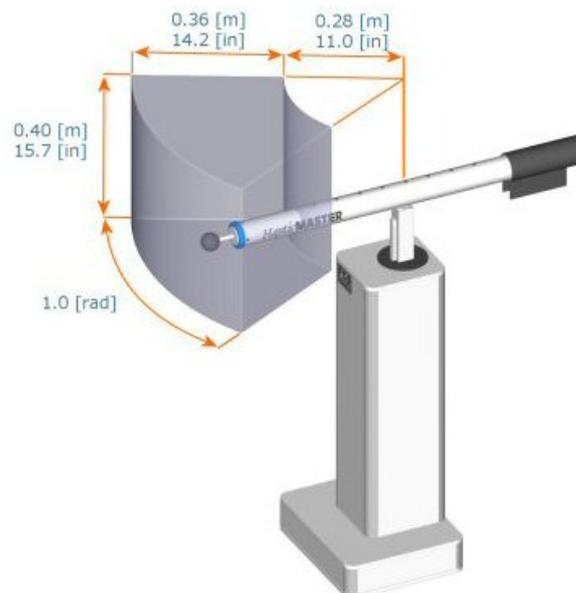


Figura 1.6: Brazo robótico Hapticmaster
[19]

1.4. Motivación

Si bien el punto de vista actual para el entrenamiento de personal médico pasa por el uso de personas fallecidas, animales, etc, los problemas éticos y morales que se plantean con esta aproximación son las suficientes como para llevar a cabo la consideración del entrenamiento de profesionales mediante la simulación quirúrgica virtual. Sin embargo, pocos dispositivos actualmente utilizados son capaces de proveer de suficientes recursos en términos de usabilidad y operabilidad para llevar a cabo un entrenamiento a un coste razonable. La precisión en el tacto es uno de los elementos fundamentales con los que debe lidiar un profesional médico, por lo que un aprendizaje óptimo pasa por incluir inevitablemente una realimentación háptica en el dispositivo empleado para dicho entrenamiento. Es por tanto indispensable el uso de realimentación de fuerza en dispositivos de simulación quirúrgica para adiestramiento. Estas son las motivaciones para este Trabajo de Fin de Máster.

1.5. Objetivos

Los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster son los siguientes:

- Diseñar un manipulador accesorio al dispositivo Novint Falcon que añada tres grados de libertad rotacionales a los tres traslacionales del mismo.
- Fabricar, mecanizar y ensamblar el manipulador.
- Desarrollar la cinemática directa e inversa del dispositivo para su posterior uso

Capítulo 2

Diseño del Manipulador

2.1. Sistema Novint Falcon

El controlador Novint Falcon es un dispositivo de realimentación háptica concebido para un uso principalmente en videojuegos. Desarrollado por la empresa Novint Technologies, es un dispositivo háptico por USB configurado para proporcionar tres grados de libertad traslacionales en el efector final (ver Figura 2.1). Está compuesto por tres brazos, los cuales tienen cada uno asociado un motor responsable de la realimentación háptica. Estos convergen en un punto de unión en el cual hay un soporte donde pueden conectarse diversos elementos, como puede ser un manipulador esférico. La estructura fue diseñada para que pudiera ser insertada como una prolongación de este soporte. La tasa de actualización de los motores del sistema es un 1 KHz, lo que se traduce en una realimentación háptica satisfactoria según la percepción del usuario. Los motores actúan cada uno bajo un encoder axial de 320 pulsos por revolución para proporcionar la respuesta háptica [20, 21].



Figura 2.1: Dispositivo Novint Falcon
[22]

2.2. Dispositivos Actuales

El diseño de la estructura está basado e inspirado en los modelos estrella de la empresa sueca Force Dimension, cuyos productos se centran principalmente en

el desarrollo de tecnologías hápticas para aplicaciones en la industria aeroespacial, robótica, médica y de entretenimiento audiovisual. Se distinguen diversas gamas en cuanto a estado del arte se refiere, con distintas prestaciones (como el número de grados de libertad), siendo los productos principales aquellos pertenecientes a las gamas Omega y Delta (ver Figura 2.2). Estos dispositivos hápticos se caracterizan por tener una resolución en lo que a realimentación de fuerzas se refiere de 4 KHz, siendo ésta superior a la proporcionada por el Novint Falcon y más que suficiente para una experiencia háptica satisfactoria. A esto se le añade una gran transparencia háptica (ausencia de fuerzas experimentadas por el usuario si éste no está realizando ningún movimiento) para proporcionar una compensación de gravedad apropiada [23].



Figura 2.2: Sistema háptico Omega.6, Force Dimension [23]

Estos sistemas se utilizan principalmente en aplicaciones de ingeniería e investigación, pero han venido experimentando una presencia cada vez más creciente en cuanto a su uso en simulación quirúrgica y cirugía robotizada.

2.3. Estructura Propuesta

Como se ha mencionado previamente, la estructura propuesta ha sido concebida para actuar como una prolongación del extremo terminal inicial del Novint Falcon. Como si se tratara de un accesorio, el comienzo de la estructura está compuesta por un vástago que se une solidariamente a los tres brazos iniciales del Falcon aprovechando el elemento conector de accesorios del mismo. Para llevar a cabo el diseño de la estructura se ha utilizado el programa de uso libre para estudiantes SolidEdge de Siemens y se ha fabricado con una impresora Prusa i3 en PLA. Si bien la estructura propuesta sólo proporciona tres grados de libertad rotacionales, en combinación con el Falcon consigue los tres grados traslacionales más los tres rotacionales. La estructura, como se ha mencionado, está inspirada en los dispositivos hápticos de la gama Omega de la empresa Force Dimension, principalmente en el Omega.6, y se ha concebido como principal elemento manipulador del controlador. Globalmente, la estructura tiene el aspecto mostrado en la Figura 2.3.

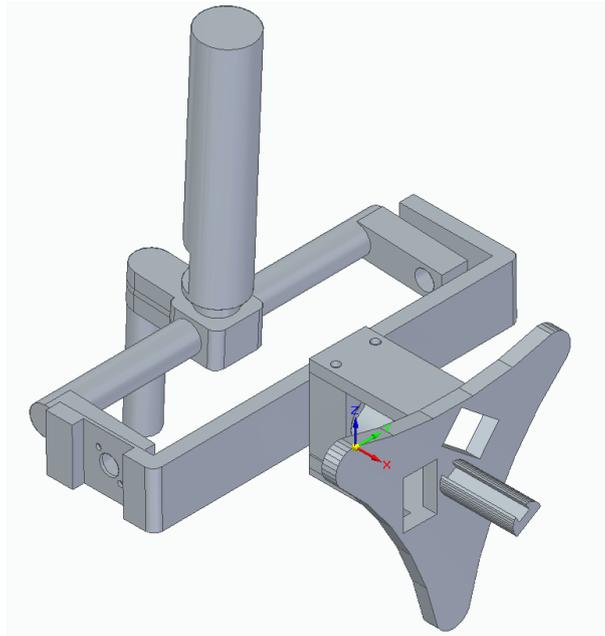


Figura 2.3: Vista isométrica de la estructura

Si bien la base de coordenadas que se muestra en la figura es la que se ha tenido en consideración para llevar a cabo la explicación de las rotaciones a continuación, en apartados sucesivos se considerarán otros ejes de coordenadas por simplicidad. La unión pretende ser lo más solidaria posible para evitar cualquier tipo de variación en la traslación. Por tanto, se distinguen únicamente tres uniones clave, que son aquellas donde están localizadas los motores. Para posteriores consideraciones se han establecido los siguientes nombres para cada una de las partes de la estructura (ver Figura 2.4)

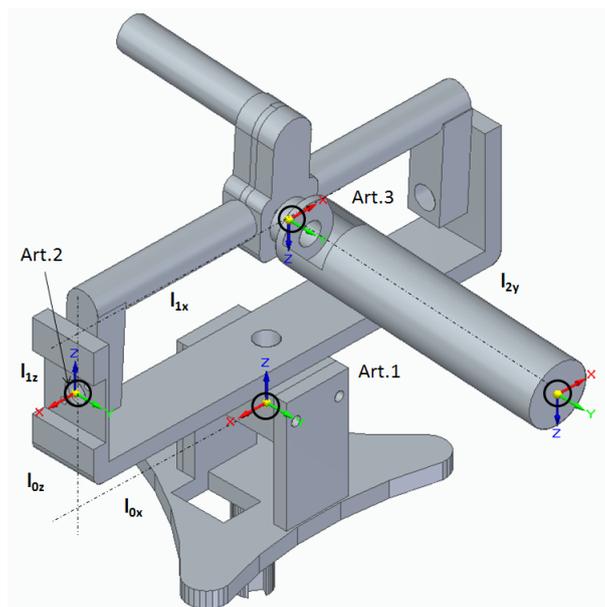


Figura 2.4: Convenio de nombres para las distintas partes de la estructura

En el Capítulo 5 se muestran las dimensiones de las piezas separadamente.

2.4. Estudio de los Grados de Libertad y Rangos de Movimiento

El controlador está conformado por tres motores, por lo que únicamente permite movimientos en tres direcciones del espacio, a saber las rotaciones alrededor de cada eje cartesiano.

En la siguiente figura se muestran las rotaciones de la estructura de acuerdo con cada motor y eje de coordenadas (siendo los movimientos en y y z definidos en sistemas de referencia relativos a la base inicial). Todos los movimientos llevados a cabo se pueden realizar sin afectar a ninguno de los otros cinco movimientos espaciales (ver Figura 2.5).

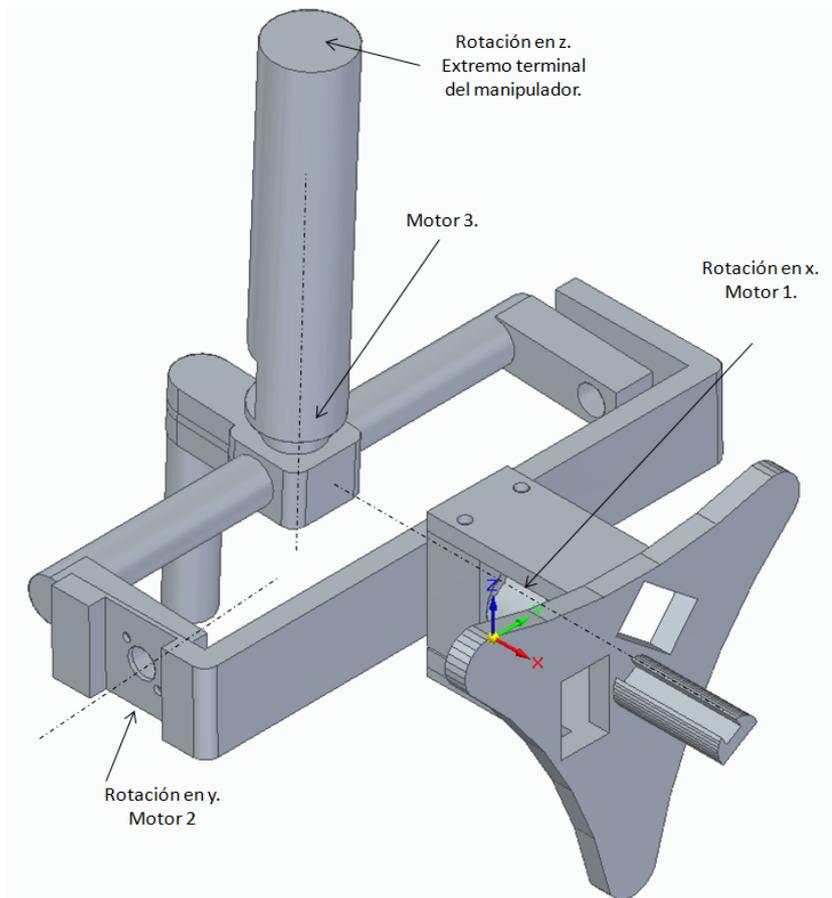


Figura 2.5: Localización de los ejes de rotación y del extremo terminal

- **Movimiento alrededor del eje X:** Llevado a cabo por la primera unión con el motor 1, el movimiento que permite es de rotación con respecto al eje frontal del vástago. El arco que se puede realizar con el controlador es de 360° , lo que permite una rotación completa alrededor de este eje (ver Figura 2.6).

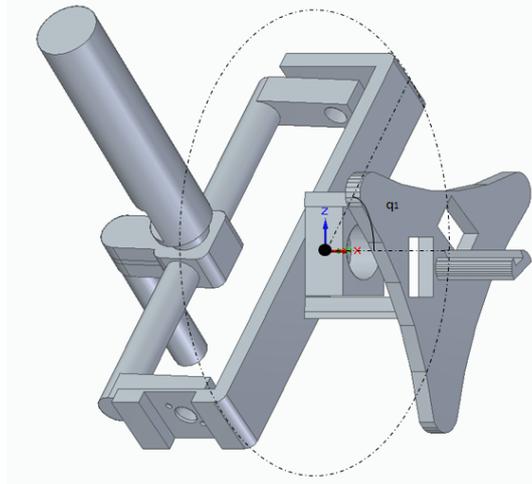


Figura 2.6: Rotación alrededor del eje X

- **Movimiento alrededor del eje Y:** Llevado a cabo por la segunda unión con el motor 2, es un movimiento de rotación respecto al eje horizontal del vástago. Debido al diseño de la estructura, el arco que se realiza es el menor de los tres, ya que está limitado superiormente por la pieza cilíndrica. Por esa razón, el movimiento está restringido a un arco de aproximadamente 180° (ver Figura 2.7).

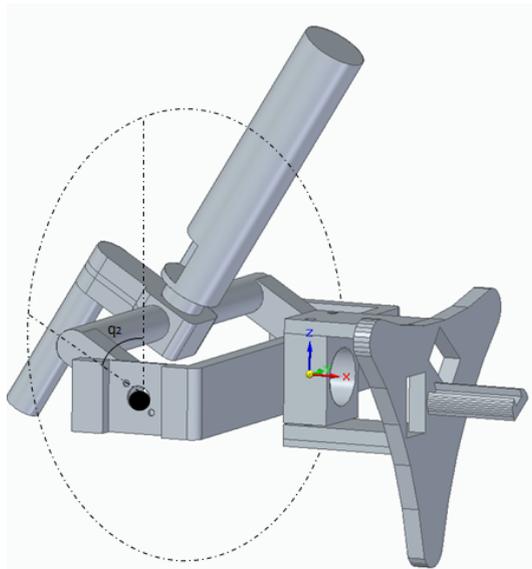


Figura 2.7: Rotación alrededor del eje Y

- **Movimiento alrededor del eje Z:** Esta llevado a cabo por la que es la pieza donde se considera que está el extremo terminal del manipulador. Se mueve sobre el propio eje del motor 3, por lo que no varía la posición del punto final. Puede describir una rotación de 360° (ver Figura 2.8).

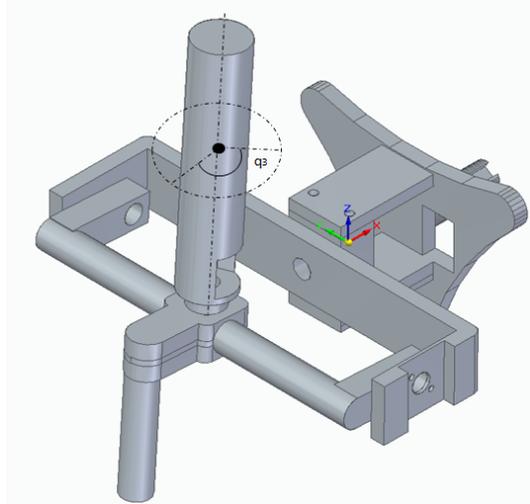


Figura 2.8: Rotación alrededor del eje Z

Capítulo 3

Estudio Cinemático del Controlador Háptico

3.1. Cinemática Directa de Posición

El concepto de cinemática directa hace referencia a la obtención de las coordenadas espaciales en un espacio cartesiano de un punto a definir del controlador (generalmente se considera el extremo del mismo) a partir de las coordenadas generalizadas. Esto se refleja en la expresión

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}$$

Donde A es la matriz de transformación que rinde las coordenadas x , y y z en función de q_4 , q_5 y q_6 . Como se ha explicado previamente, el controlador está diseñado para la obtención de la variación de los ángulos en el espacio α , β y γ en función de las coordenadas generalizadas q_4 , q_5 y q_6 (que por simplificación se hará referencia a las mismas como q_1 , q_2 y q_3) y, por tanto, de la orientación del objeto dispuesto en pantalla [24, 25].

El resultado final depende de la combinación de todas las articulaciones del controlador y, por tanto, la estructura del mismo afecta al problema en sí. Para plantear el problema de cinemática directa, hay que considerar que el punto de origen del sistema global no está ahora localizado en el manipulador del Novint Falcon, sino que se desplaza hasta el extremo terminal de la estructura diseñada.

Así pues, la transformación completa comprende una traslación y una rotación de un punto de tal forma que

$$P_1 = Tras_0^1 + R_0^1 P_0 \quad (3.1)$$

Donde P_1 es el punto en el sistema de coordenadas final, P_0 es el punto en el sistema de referencia inicial, $Tras_0^1$ es el vector de traslación entre entre P_0 y P_1 y R_0^1 es la rotación experimentada por el punto.

Para el cálculo de estos elementos de transformación, es necesario representar la figura sin ninguna variación en las coordenadas generalizadas en un sistema de coordenadas inicial e ir estableciendo nuevos sistemas de referencia en función del número de articulaciones que presenta la estructura. Esto es útil para hallar los vectores de traslación de una articulación a otra (concluyendo en la traslación final)

y para el cálculo de la matriz final de rotación. Previamente al cálculo de estos elementos, es necesario establecer dos relaciones fundamentales, a saber

$$Tras_a^c = Tras_a^b + R_a^b Tras_b^c \quad (3.2a)$$

$$R_a^c = R_a^b R_b^c \quad (3.2b)$$

En ellas se puede distinguir que la posición y la orientación del punto final dependen de cada una de las articulaciones y de sus correspondientes sistemas de coordenadas.

El vector $Tras_a^b$ surge por la propia geometría de la estructura, ya que es el vector que desplaza al punto inicial a en el sistema de coordenadas S_0 al punto b en el sistema S_1 , mientras que las matrices de rotación R_a^b surgen de acuerdo a la asignación de los sistemas de coordenadas y muestran el cambio de orientación que tiene lugar en el sistema S_1 con respecto al sistema S_0 . Tras considerar diversas combinaciones de sistemas de referencia en las tres articulaciones, se ha convenido que la disposición óptima de los mismos sea la mostrada en la Figura 3.1.

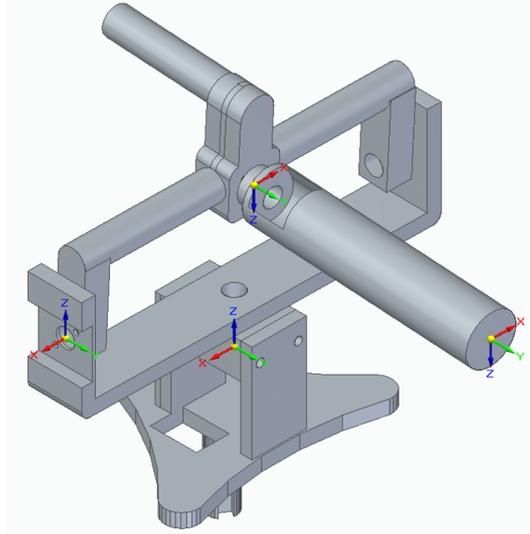


Figura 3.1: Ejes de rotación acordados para el cálculo de la cinemática directa

Los ejes de rotación que se distinguen son, por tanto, el conjunto

$$U = \{z_0, -x_1, y_2\} \quad (3.3)$$

debido a que, de acuerdo a los sistemas establecidos, las rotaciones que tienen lugar en la propia estructura ocurren en torno a dichos ejes. Por otro lado, las traslaciones de los puntos entre ejes de coordenadas consecutivos se dan de acuerdo a las partes de la estructura nombradas en la Figura 2.4. Las traslaciones entre los ejes de coordenadas tienen que darse de una en una, es decir, de la articulación 1 a la 2, de la 2 a la 3 y de la 3 al extremo terminal, teniendo en cuenta las longitudes de las distintas partes de la estructura y de acuerdo a los ejes de coordenadas establecidos en dichas

articulaciones. Los desplazamientos de una articulación a otra son los siguientes:

$$\begin{aligned}\vec{Art}_1^2 &= l_{0x}x_0 + l_{0z}z_0 \\ \vec{Art}_2^3 &= -l_{1x}x_1 + l_{1z}z_1 \\ \vec{Art}_3^{E.T.} &= l_{2y}y_2\end{aligned}$$

Por tanto, el conjunto de traslaciones viene dado por

$$O = \{l_{0x}x_0 + l_{0z}z_0, -l_{1x}x_1 + l_{1z}z_1, l_{2y}y_2\} \quad (3.4)$$

Usando las relaciones establecidas en las expresiones (3.2a) y (3.2b) se obtienen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}Tras_0^1 &= R_0^1 \begin{bmatrix} l_{0x} \\ 0 \\ l_{0z} \end{bmatrix} \\ Tras_0^2 &= Tras_0^1 + R_0^1 R_1^2 Tras_1^2 \\ Tras_0^3 &= Tras_0^2 + R_0^2 R_2^3 Tras_2^3\end{aligned}$$

De donde se concluye

$$Tras_0^3 = R_0^1 Tras_0^1 + R_0^1 R_1^2 Tras_1^2 + R_0^2 R_2^3 Tras_2^3 = R_0^1 Tras_0^1 + R_0^2 Tras_1^2 + R_0^3 Tras_2^3 \quad (3.5)$$

Los elementos que restan hallar son las matrices de rotación de una a otra articulación, ya que las traslaciones de uno a otro punto ya están definidas en el conjunto O . La matriz de rotación resultante surge como rotaciones alrededor de los ejes z_0 , $-x_1$ e y_2 y es el resultado de la sucesión de tres rotaciones distintas en función del ángulo girado, que en este caso son las coordenadas generalizadas q_1 , q_2 y q_3 respectivamente. Cabe destacar que el punto terminal del manipulador es el considerado como el destino para todas las transformaciones. Por tanto, las matrices a distinguir son

$$R_{z_0} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_{-x_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad R_{y_2} = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_3 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

Estas matrices de rotación vienen dadas por definición para las rotaciones entre ejes cartesianos dependiendo del eje en torno al cual se rota ¹. El cálculo de las matrices de rotación entre distintos sistemas de coordenadas se lleva a cabo mediante la multiplicación consecutiva de dichas matrices de forma que

$$R_0^2 = R_{z_0} R_{y_1} \quad (3.6a)$$

$$R_0^3 = R_{z_0} R_{y_1} R_{y_2} \quad (3.6b)$$

$$\begin{aligned}R_0^2 &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 c_2 & -s_1 s_2 \\ s_1 & c_1 c_2 & c_1 s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{bmatrix} \\ R_0^3 &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 c_2 & -s_1 s_2 \\ s_1 & c_1 c_2 & c_1 s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_3 & 0 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 & c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3 \\ s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 & s_1 s_3 + c_1 s_2 c_3 \\ -c_2 c_3 & -s_2 & c_2 c_3 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

¹se representa el seno del ángulo i como s_i y su coseno como c_i

De nuevo, esta matriz hace referencia a la orientación del punto final en el sistema de coordenadas final. Una vez conseguidas las matrices de rotación R_0^2 y R_0^3 , la fórmula establecida en la ecuación (3.5) para obtener la posición final se utiliza de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{0_x} \\ 0 \\ l_{0_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 c_2 & -s_1 s_2 \\ s_1 & c_1 c_2 & c_1 s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -l_{1_x} \\ 0 \\ l_{1_z} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 & c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3 \\ s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 & s_1 s_3 + c_1 s_2 c_3 \\ -c_2 c_3 & -s_2 & c_2 c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ l_{2_y} \\ 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} l_{0_x} c_1 \\ l_{0_x} s_1 \\ l_{0_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{1_x} c_1 - l_{1_z} s_1 s_2 \\ -l_{1_x} s_1 + l_{1_z} c_1 c_2 \\ l_{1_z} c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{2_y} s_1 c_2 \\ l_{2_y} c_1 c_2 \\ -l_{2_y} s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{0_x} c_1 - l_{1_x} c_1 - l_{1_z} s_1 s_2 - l_{2_y} s_1 c_2 \\ l_{0_x} s_1 - l_{1_x} s_1 + l_{1_z} c_1 c_2 + l_{2_y} c_1 c_2 \\ l_{0_z} + l_{1_z} c_2 - l_{2_y} s_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Concluyendo en

$$\begin{bmatrix} (l_{0_x} - l_{1_x})c_1 - l_{1_z} s_1 s_2 - l_{2_y} s_1 c_2 \\ (l_{0_x} - l_{1_x} s_1) + l_{1_z} c_1 c_2 + l_{2_y} c_1 c_2 \\ l_{0_z} + l_{1_z} c_2 - l_{2_y} s_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

De esta última expresión puede remarcarse el hecho de que la coordenada q_3 no afecta, como cabría esperar, a la posición del punto final, pero sí a la orientación del mismo como se aprecia en la matriz R_0^3 . Esta expresión proporciona la información relativa a las coordenadas x , y y z en el espacio cartesiano en función de las coordenadas generalizadas.

A modo de conclusión, la cinemática directa de posición se traduce en la matriz

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_{0_x} - l_{1_x})c_1 - l_{1_z} s_1 s_2 - l_{2_y} s_1 c_2 \\ (l_{0_x} - l_{1_x} s_1) + l_{1_z} c_1 c_2 + l_{2_y} c_1 c_2 \\ l_{0_z} + l_{1_z} c_2 - l_{2_y} s_2 \end{bmatrix}$$

y la de orientación en la matriz de rotación

$$R_0^3 = \begin{bmatrix} c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 & c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3 \\ s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 & s_1 s_3 + c_1 s_2 c_3 \\ -c_2 c_3 & -s_2 & c_2 c_3 \end{bmatrix}$$

Ésta última matriz de orientación, referida al sistema inercial principal, está formada por tres vectores columna ortogonales entre sí llamados vector de avance (a), vector normal (n) y vector de deslizamiento (s), respondiendo a la matriz de fórmula

$$R_0^3 = \begin{bmatrix} a_x & -n_x & -s_x \\ a_y & -n_y & -s_y \\ a_z & -n_z & -s_z \end{bmatrix}$$

Este planteamiento será posteriormente útil para desarrollar la cinemática inversa de posición.

3.2. Cinemática Inversa de Posición

Así como la cinemática directa proporciona información acerca de las coordenadas en el espacio cartesiano, la cinemática inversa proporciona las coordenadas generalizadas a partir de aquellas del espacio cartesiano, es decir,

$$q_n = Df(x, y, z, a_x, a_y, a_z)$$

Con q_n la coordenada generalizada de interés, f una función que contiene las coordenadas espaciales y de orientación y D la función que relaciona ambos. En el entorno virtual en el que se moverá el objeto controlado por el manipulador no sólo se conocerán las coordenadas cartesianas que definen la posición del extremo terminal, sino que también se conocerán las coordenadas del vector de avance, necesario para conocer la orientación de dicho extremo. Se conocerán por tanto seis coordenadas: tres definiendo la posición en el espacio en el sistema cartesiano y tres definiendo la orientación.

La resolución de la cinemática inversa puede llevarse a cabo mediante métodos geométricos, es decir, de acuerdo con la estructura propuesta y su variación en el espacio con respecto a su posición inicial se obtienen las coordenadas q_1 , q_2 y q_3 en función de las coordenadas conocidas x , y , z , a_x , a_y y a_z . Otra forma de proceder es a partir de las ecuaciones obtenidas en la cinemática directa. Al ser estas expresiones que rinden las coordenadas x , y , z a partir de las coordenadas generalizadas, basta con despejar dichas ecuaciones para la coordenada generalizada de interés.

Se ha procedido mediante el método geométrico para la coordenada q_1 y despejando las ecuaciones obtenidas para la coordenada q_2 . Finalmente para la coordenada q_3 se ha utilizado el vector de avance con la matriz R_0^3 para su cálculo. En la Figura 3.2 se distingue un esquema de la variación de las tres coordenadas:

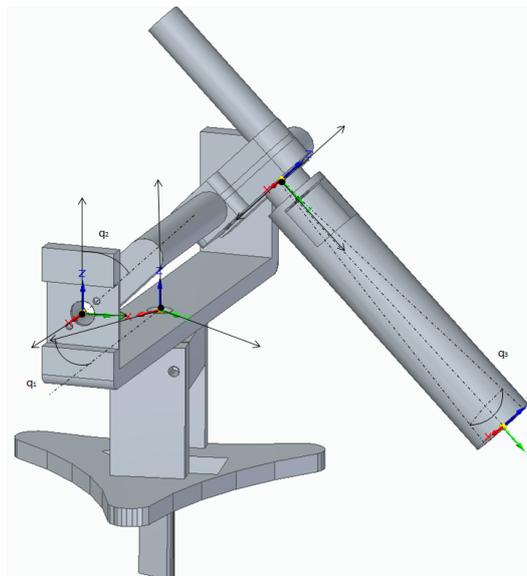


Figura 3.2: Variación de las coordenadas generalizadas con respecto a la posición inicial

La coordenada q_1 es fácilmente distinguible, ya que surge a partir de x_c e y_c , que

son las coordenadas conocidas del punto terminal del manipulador en los ejes x e y , como se aprecia en la figura 3.3.

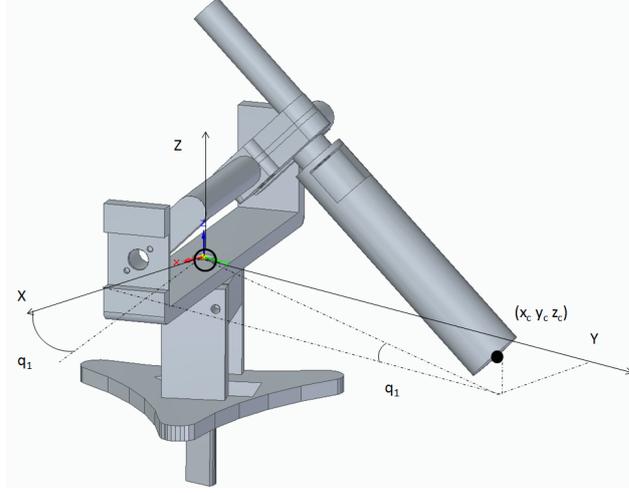


Figura 3.3: Geometría para la obtención de q_1

Dada la geometría vista en la Figura 3.3, la obtención de la coordenada q_1 respondería por tanto a

$$q_1 = \arctan\left(\frac{y_c}{x_c}\right) \quad (3.8)$$

Seguidamente, la resolución de la coordenada q_2 se ha llevado a cabo de manera distinta debido a la complejidad de la expresión matemática obtenida mediante métodos geométricos.

Habiendo obtenido en el capítulo de la cinemática directa que la coordenada z es igual a $z = l_{0z} + l_{1z}c_2 - l_{2y}s_2$,

$$\begin{aligned} z_c &= l_{0z} + l_{1z}c_2 - l_{2y}\sqrt{1 - c_2^2} \\ z_c - l_{0z} - l_{1z} &= -l_{2y}\sqrt{1 - c_2^2} \\ [(z_c - l_{0z}) - l_{1z}]^2 &= [(-l_{2y}\sqrt{1 - c_2^2})]^2 \\ (z_c - l_{0z})^2 - 2(z_cl_{0z})l_{1z}c_2 + l_{1z}^2c_2^2 &= l_{2y}^2(1 - c_2^2) \\ z_c^2 - 2z_cl_{0z} + l_{0z}^2 - 2l_{1z}c_2z_c + 2l_{1z}c_2l_{0z} + l_{1z}^2c_2^2 &= l_{2y}^2 - l_{2y}c_2^2 \end{aligned}$$

Reordenando los términos, se llega a la expresión

$$-c_2^2(l_{1z}^2 + l_{2y}^2) + c_2(2l_{1z}z_c - 2l_{1z}l_{0z}) - z_c^2 + 2z_cl_{0z} - l_{0z} + l_{2y}^2$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado se obtiene

$$q_2 = \arccos \left[\frac{2l_{1z}l_{0z} - 2l_{1z}z_c \pm \sqrt{(2l_{1z} - 2l_{1z}l_{0z})^2 - 4(l_{1z}^2 + l_{2y}^2)(z_c^2 + 2z_cl_{0z}z_c - l_{0z} + 2l_{2y}^2)}}{-2(l_{1z}^2 + l_{2y}^2)} \right] \quad (3.9)$$

La coordenada q_3 no puede obtenerse de nuevo por métodos geométricos ya que el punto considerado está en el extremo terminal del manipulador y éste rota en torno al eje del motor, que coincide con el eje de giro de dicho punto. Por tanto, para el

cálculo de q_3 es necesario utilizar la matriz de rotación y el vector de avance. Como se estableció anteriormente, la matriz de rotación se corresponde con la matriz ans de la forma:

$$\begin{bmatrix} c_1c_3 + s_1s_2s_3 & -s_1c_2 & c_1s_3 - s_1s_2c_3 \\ s_1c_3 - c_1s_2s_3 & c_1c_2 & s_1s_3 + c_1s_2c_3 \\ -c_2c_3 & -s_2 & c_2c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & -n_x & -s_x \\ a_y & -n_y & -s_y \\ a_z & -n_z & -s_z \end{bmatrix}$$

El vector de avance $a = (a_x, a_y, a_z)$ es el que define la orientación del extremo terminal de la pieza y, como se ha mencionado, es conocido. Por tanto para el cálculo de q_3 se ha procedido como sigue. Teniendo

$$a_x = c_1c_3 + s_1s_2s_3 \quad (3.10a)$$

$$a_y = s_1c_3 - c_1s_2s_3 \quad (3.10b)$$

se puede despejar (3.10a) como

$$s_2s_3 = \frac{a_x - c_1c_3}{s_1}$$

e insertando esta expresión en (3.10b)

$$a_y = s_1c_3 - c_1 \frac{a_x - c_1c_3}{s_1}$$

$$a_y = s_1c_3 - \frac{a_x c_1^2 + c_1^2 c_3}{s_1}$$

$$a_y s_1 = s_1^2 c_3 - a_x c_1^2 + c_1^2 c_3$$

$$a_y s_1 + a_x c_1^2 = (s_1^2 + c_1^2) c_3$$

Concluyendo en

$$q_3 = \arccos(a_y s_1 + a_x c_1^2) \quad (3.11)$$

Finalizando el cálculo de la cinemática inversa de posición.

3.3. Cinemática Directa de Velocidad

El estudio de la cinemática directa de velocidad hace referencia al cálculo de las variaciones que experimentan los diferentes puntos del sistema considerado en el espacio con respecto al tiempo. Al haber cambios traslacionales y rotacionales que afectan a todos los puntos del sistema, es necesario considerar dichos cambios con respecto al tiempo de cara a la programación. Es así como aparecen los conceptos de cinemática directa de velocidad angular y de velocidad lineal, atribuidas cada una a las rotaciones y a las traslaciones que ocurren en el sistema, respectivamente. Para el cálculo de estas ecuaciones es necesario trabajar con las matrices Jacobianas de velocidad lineal J_v y angular J_w , ya que dichas matrices operan de la forma

$$\dot{Tras}_0^n(t) = J_v(q(t))\dot{q}(t) \quad (3.12a)$$

$$w_0^n = J_w(q(t))\dot{q}(t) \quad (3.12b)$$

Donde $\dot{Tras}_0^n(t)$ hace referencia a la derivada del vector de traslación con respecto al tiempo. Al ser las velocidades lineal y angular magnitudes vectoriales que nacen

de derivar las expresiones de traslación y rotación, dichas magnitudes serán funciones tanto de las coordenadas generalizadas q_n como de sus derivadas con respecto al tiempo \dot{q}_n . Es necesario llevar a cabo este cálculo debido a que la realimentación háptica proviene directamente de estas relaciones. El par de fuerza generado por los motores en las articulaciones responde a

$$\tau(t) = J(q_n(t))^T F_e(t) \quad (3.13)$$

Donde $J(q_n)^T$ es el Jacobiano que incluye el de velocidad lineal y angular y $F_e(t)$ es la matriz de fuerzas externas que incluye las fuerzas en las tres dimensiones del espacio (por la contribución del Jacobiano de velocidad lineal) y momentos de fuerzas de nuevo en las tres direcciones (por la contribución del Jacobiano de velocidad angular). La expresión (3.13) deriva del principio de los trabajos virtuales de D'Alembert, cuya idea es considerar el caso de una situación estática del mecanismo sobre el que se realiza un desplazamiento infinitesimal o virtual por la acción de la fuerza externa y compatible con las ligaduras existentes en el mecanismo, las cuales, por la hipótesis de rigidez, no realizan trabajo. [26]

3.3.1. Cinemática Directa de Velocidad Lineal

De la cinemática clásica se tiene que la derivada con respecto del tiempo de la posición rinde la velocidad. En el caso que se ocupa, se tiene un vector de posición que varía en función de las coordenadas generalizadas por lo que la derivada temporal del vector de traslación respondería a

$$\frac{\partial \text{Tras}_0^3}{\partial t} = \frac{\partial \text{Tras}_0^3}{\partial q_n} \frac{\partial q_n}{\partial t}$$

Esta expresión se corresponde con la mostrada en la ecuación (3.12a). Por tanto, para el cálculo de la matriz Jacobiana de velocidad lineal es necesario derivar la expresión (3.7) con respecto a cada una de las coordenadas generalizadas. De esta forma, se procede como sigue:

$$\nabla \text{Tras}_0^3 = \frac{\partial^3 \text{Tras}_0^3}{\partial q_1 \partial q_2 \partial q_3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^3 [(l_{0_x} - l_{1_x})c_1 - l_{1_z}s_1s_2 - l_{2_y}s_1c_2]}{\partial q_1 \partial q_2 \partial q_3} \\ \frac{\partial^3 [(l_{0_x} - l_{1_x}s_1) + l_{1_z}c_1c_2 + l_{2_y}c_1c_2]}{\partial q_1 \partial q_2 \partial q_3} \\ \frac{\partial^3 [l_{0_z} + l_{1_z}c_2 - l_{2_y}s_2]}{\partial q_1 \partial q_2 \partial q_3} \end{bmatrix}$$

Obteniendo la matriz

$$J_v = \begin{bmatrix} -(l_{0_x} - l_{1_x})s_1 - l_{1_z}c_1s_2 - l_{2_y}c_1c_2 & -l_{1_z}s_1c_2 + l_{2_y}s_1s_2 & 0 \\ -l_{1_x}c_1 - l_{1_z}s_1c_2 - l_{2_y}s_1c_2 & -l_{1_z}c_1s_2 - l_{2_y}c_1s_2 & 0 \\ 0 & -l_{1_z}s_2 - l_{2_y}c_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Que se corresponde con la matriz Jacobiana de velocidad lineal.

De nuevo volviendo a la expresión (3.12a), la expresión general para la velocidad lineal se refleja como sigue:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(l_{0_x} - l_{1_x})s_1 - l_{1_z}c_1s_2 - l_{2_y}c_1c_2 & -l_{1_z}s_1c_2 + l_{2_y}s_1s_2 & 0 \\ -l_{1_x}c_1 - l_{1_z}s_1c_2 - l_{2_y}s_1c_2 & -l_{1_z}c_1s_2 - l_{2_y}c_1s_2 & 0 \\ 0 & -l_{1_z}s_2 - l_{2_y}c_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

Concluyendo en

$$\dot{x} = [-(l_{0_x} - l_{1_x})s_1 - l_{1_z}c_1s_2 - l_{2_y}c_1c_2]\dot{q}_1 + [-l_{1_z}s_1c_2 + l_{2_y}s_1s_2]\dot{q}_2 \quad (3.15a)$$

$$\dot{y} = [-l_{1_x}c_1 - l_{1_z}s_1c_2 - l_{2_y}s_1c_2]\dot{q}_1 + [-l_{1_z}c_1s_2 - l_{2_y}c_1s_2]\dot{q}_2 \quad (3.15b)$$

$$\dot{z} = [-l_{1_z}s_2 - l_{2_y}c_2]\dot{q}_2 \quad (3.15c)$$

3.3.2. Cinemática Directa de Velocidad Angular

Como se ha mencionado, las rotaciones que experimentan los puntos del manipulador son las responsables de que aparezcan velocidades angulares que considerar. Considerando cada sistema de coordenadas separadamente, las velocidades angulares existentes responden a la variación con respecto al tiempo de la coordenada generalizada a la que hace referencia ese sistema de rotación multiplicada por el vector unitario del eje en torno al cual se efectúa la rotación respondiendo a la forma

$$w = \dot{q}_n \vec{u} \quad (3.16)$$

De forma similar a la expresión (3.2a), la expresión para la velocidad angular responde también a una relación recursiva similar de la forma

$$w_a^c = w_a^b + R_a^b w_b^c$$

Donde R hace referencia a las matrices de rotación obtenidas en el capítulo de cinemática directa. Siguiendo esta ecuación, se puede observar cómo hay relación entre la velocidad angular de un punto en un sistema de coordenadas $x_1y_1z_1$ con un sistema $x_2y_2z_2$ por medio de su matriz de rotación. Por tanto, si se quisiera considerar la velocidad angular en el extremo terminal del manipulador considerado, la expresión se correspondería con

$$w_0^3 = R_0^1 w_0^1 + R_0^2 w_1^2 + R_0^3 w_0^3$$

y teniendo en cuenta (3.16) se obtiene la expresión

$$w_0^3 = R_0^1 \dot{q}_1 \vec{z}_0 + R_0^2 \dot{q}_2 (-\vec{x}_1) + R_0^3 \dot{q}_3 \vec{y}_2 \quad (3.17)$$

Esta expresión puede expresarse en forma matricial de la forma

$$w_0^3 = \begin{bmatrix} R_0^1 \vec{z}_0 & R_0^2 (-\vec{x}_1) & R_0^3 \vec{y}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

Así pues, los vectores unitarios considerados en la matriz Jacobiana propuesta son el conjunto $U = \{\vec{k}, -\vec{i}, \vec{j}\}$. Por tanto, la matriz Jacobiana respondería a

$$J_w = \begin{bmatrix} R_0^1 \vec{k} & R_0^2 -\vec{i} & R_0^3 \vec{j} \end{bmatrix}$$

Donde

$$\begin{aligned}
 u_{11,21,31} &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 u_{12,22,32} &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 c_2 & -s_1 s_2 \\ s_1 & c_1 c_2 & c_1 s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ -s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 u_{13,23,33} &= \begin{bmatrix} c_1 c_3 + s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 & c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3 \\ s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 & s_1 s_3 + c_1 s_2 c_3 \\ -c_2 c_3 & -s_2 & c_2 c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1 c_2 \\ c_1 c_2 \\ -s_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Obteniendo finalmente

$$J_w = \begin{bmatrix} 0 & -c_1 & -s_1 c_2 \\ 0 & -s_1 & c_1 c_2 \\ 1 & 0 & -s_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Quedando definida la matriz Jacobiana de velocidad angular. Como conclusión,

$$w_{0_x}^3 = -c_1 \dot{q}_2 - s_1 c_2 \dot{q}_3 \quad (3.19a)$$

$$w_{0_y}^3 = -s_1 \dot{q}_2 + c_1 c_2 \dot{q}_3 \quad (3.19b)$$

$$w_{0_z}^3 = \dot{q}_1 - s_2 \dot{q}_3 \quad (3.19c)$$

3.4. Cinemática Inversa de Velocidad

De forma similar a la obtención de la posición, la cinemática inversa de velocidad responde al planteamiento de la ecuación

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

Es decir, conocidos los valores de las componentes de los vectores de velocidades angular y lineal se obtienen las derivadas temporales de las coordenadas generalizadas. La particularidad que tiene el planteamiento de este problema es que, al poder obtener las velocidades mediante el planteamiento de una expresión matricial (ver expresión (3.12b)) basta con resolver dicha expresión para calcular \dot{q}_1 , \dot{q}_2 y \dot{q}_3 . Dicha resolución respondería a la forma

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_n &= J_v^{-1} \text{Tras}_0^n \\
 \dot{q}_n &= J_w^{-1} w_0^n
 \end{aligned}$$

Las coordenadas q_1 y q_2 se han obtenido a partir de la cinemática directa de velocidad lineal, mientras que la coordenada q_3 se ha obtenido a partir de la cinemática directa de velocidad angular debido a que la última columna de la matriz Jacobiana de velocidad lineal es nula. Así pues, para la resolución de las coordenadas q_1 y q_2 se procede como sigue.

Partiendo de las expresiones (3.15b) y (3.15c) se tiene que

$$\begin{aligned}
 \dot{y} &= \left[-l_{1_x} c_1 - l_{1_z} s_1 c_2 - l_{2_y} s_1 c_2 \right] \dot{q}_1 + \left[-l_{1_z} c_1 s_2 - l_{2_y} c_1 s_2 \right] \dot{q}_2 \\
 \dot{z} &= \left[-l_{1_z} s_2 - l_{2_y} c_2 \right] \dot{q}_2
 \end{aligned}$$

Si se despeja la ecuación (3.15c) se obtiene la coordenada q_2 de forma directa:

$$\dot{q}_2 = \frac{\dot{z}}{[-l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2]} \quad (3.20)$$

Insertando esta expresión en la ecuación (3.15b) se obtiene la expresión

$$\begin{aligned} \dot{y} &= [-l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2]\dot{q}_1 + [-l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2] \frac{\dot{z}}{[-l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2]} \\ \dot{y} - [-l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2] \frac{\dot{z}}{[-l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2]} &= [-l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2]\dot{q}_1 \end{aligned}$$

Concluyendo en

$$\dot{q}_1 = \frac{\dot{y} - [-l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2] \frac{\dot{z}}{[-l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2]}}{[-l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2]} \quad (3.21)$$

Quedando definidas las coordenadas generalizadas \dot{q}_1 y \dot{q}_2 . Para la resolución de \dot{q}_3 basta con utilizar la expresión definida en (3.19c), siendo

$$w_{0z}^3 = \dot{q}_1 - s_2\dot{q}_3$$

Y utilizando la resolución de la coordenada \dot{q}_1 , se procede como sigue

$$\dot{q}_3 = \frac{w_{0z}^3 - \frac{\dot{y} - [-l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2] \frac{\dot{z}}{[-l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2]}}{[-l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2]}}{-s_2} \quad (3.22)$$

3.5. Pares de Fuerzas de los Motores

De cara a llevar a cabo la realimentación háptica, se va a considerar que se realiza una fuerza virtual en el extremo del manipulador cuando este entra en contacto con un objeto en el entorno simulado, al cual responden los motores con la expresión (3.13) definida previamente.

Como se ha mencionado previamente, la matriz $\tau(t)$ es una de 3x1 que incluye los pares de fuerza producidos por cada motor. La matriz $F_e(t)$ es una matriz columna 6x1 que incluye las fuerzas y los momentos en los tres ejes de coordenadas de la forma

$$F_e(t) = \begin{bmatrix} F_{ex}(t) \\ F_{ey}(t) \\ F_{ez}(t) \\ \eta_{ex}(t) \\ \eta_{ey}(t) \\ \eta_{ez}(t) \end{bmatrix}$$

Seguidamente, la matriz $J(q_n(t))^T$ es la traspuesta de la matriz Jacobiana de velocidades angular y lineal, de la forma

$$J(q_n(t))^T = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -(l_{0x} - l_{1x})s_1 - l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1c_2 & -l_{1z}s_1c_2 + l_{2y}s_1s_2 & 0 \\ -l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2 & -l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2 & 0 \\ 0 & -l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2 & 0 \\ 0 & -c_1 & -s_1c_2 \\ 0 & -s_1 & c_1c_2 \\ 1 & 0 & -s_2 \end{bmatrix}^T$$

Por tanto, la expresión (3.13) respondería globalmente a

$$\tau(t) = \begin{bmatrix} -(l_{0x} - l_{1x})s_1 - l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1c_2 & -l_{1z}s_1c_2 + l_{2y}s_1s_2 & 0 \\ -l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2 & -l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2 & 0 \\ 0 & -l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2 & 0 \\ 0 & -c_1 & -s_1c_2 \\ 0 & -s_1 & c_1c_2 \\ 1 & 0 & -s_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_{ex}(t) \\ F_{ey}(t) \\ F_{ez}(t) \\ \eta_{ex}(t) \\ \eta_{ey}(t) \\ \eta_{ez}(t) \end{bmatrix}$$

Rindiendo finalmente

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_{q_1} = F_{ex}(t)(-(l_{0x} - l_{1x})s_1 - l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1c_2) + F_{ey}(t)(-l_{1x}c_1 - l_{1z}s_1c_2 - l_{2y}s_1c_2) + \\ \quad + \eta_{ez}(t) \\ \tau_{q_2} = F_{ex}(t)(-l_{1z}s_1c_2 + l_{2y}s_1s_2) + F_{ey}(t)(-l_{1z}c_1s_2 - l_{2y}c_1s_2) - + F_{ez}(t)(-l_{1z}s_2 - l_{2y}c_2) \\ \quad - \eta_{ex}(t)c_1 - \eta_{ey}(t)s_2 \\ \tau_{q_3} = -\eta_{ex}(t)s_1c_2 + \eta_{ey}(t)c_1c_2 - \eta_{ez}(t)s_2 \end{cases}$$

Capítulo 4

Conclusiones y Líneas Futuras

4.1. Conclusiones

En el presente Trabajo de Fin de Máster se ha llevado a cabo el diseño y la fabricación de un manipulador como interfaz de realimentación háptica, cumpliendo por tanto con los objetivos mencionados anteriormente. Los materiales y equipamiento necesarios utilizados para llevar a cabo este proyecto son relativamente asequibles económicamente, de ahí la posibilidad de reproducibilidad.

El programa de uso libre SolidEdge ha permitido llevar a cabo el diseño de esta estructura de forma eficiente y cómoda, y los archivos se dejan disponibles para posteriores modificaciones si fueran necesarias.

Las ecuaciones planteadas estableciendo la cinemática directa e inversa, así como los pares de fuerzas dejan abierta la posibilidad de un posterior trabajo en línea con este TFM. La estructura es accesible y agradable al uso en combinación con el sistema Novint Falcon, si bien es cierto que hay ciertos elementos y conexiones susceptibles de rotura a la hora de utilizar el manipulador en comparación con la robustez del Falcon.

El resultado obtenido es similar a los manipuladores fabricados por la empresa Force Dimension, ampliamente utilizados en simulación y cirugía robotizada, por lo que puede considerarse que el resultado es más que satisfactorio.

4.2. Líneas Futuras

Como líneas futuras para la mejora del sistema actual se proponen las siguientes mejoras:

- **Mejora ergonómica del manipulador:** Los diseños planteados pueden modificarse, entre otras cosas, para disminuir el momento gravitatorio con respecto a los anclajes del Novint Falcon o mejorar la estructura de agarre del manipulador para un uso más cómodo.
- **Aumento de la robustez del manipulador:** De obtener una realimentación háptica satisfactoria, la estructura es susceptible de rotura en caso de que los motores ejerzan un par demasiado alto, por lo que es de interés el refuerzo de las conexiones para evitar el fallo en servicio.

- **Modificación del manipulador para tener un mayor espacio de trabajo en la segunda coordenada generalizada:** Como se ha mencionado previamente, la aplicación de la segunda coordenada generalizada está limitada a un arco de aproximadamente 180° , por lo que el diseño del controlador en el cual está localizado el extremo terminal puede modificarse para subsanar este problema.
- **Simulación en un entorno virtual:** Es de especial interés, ya que esta es la finalidad última de este proyecto, el uso de este manipulador en un entorno virtual para su uso efectivo en simulación quirúrgica.

Capítulo 5

Anexo

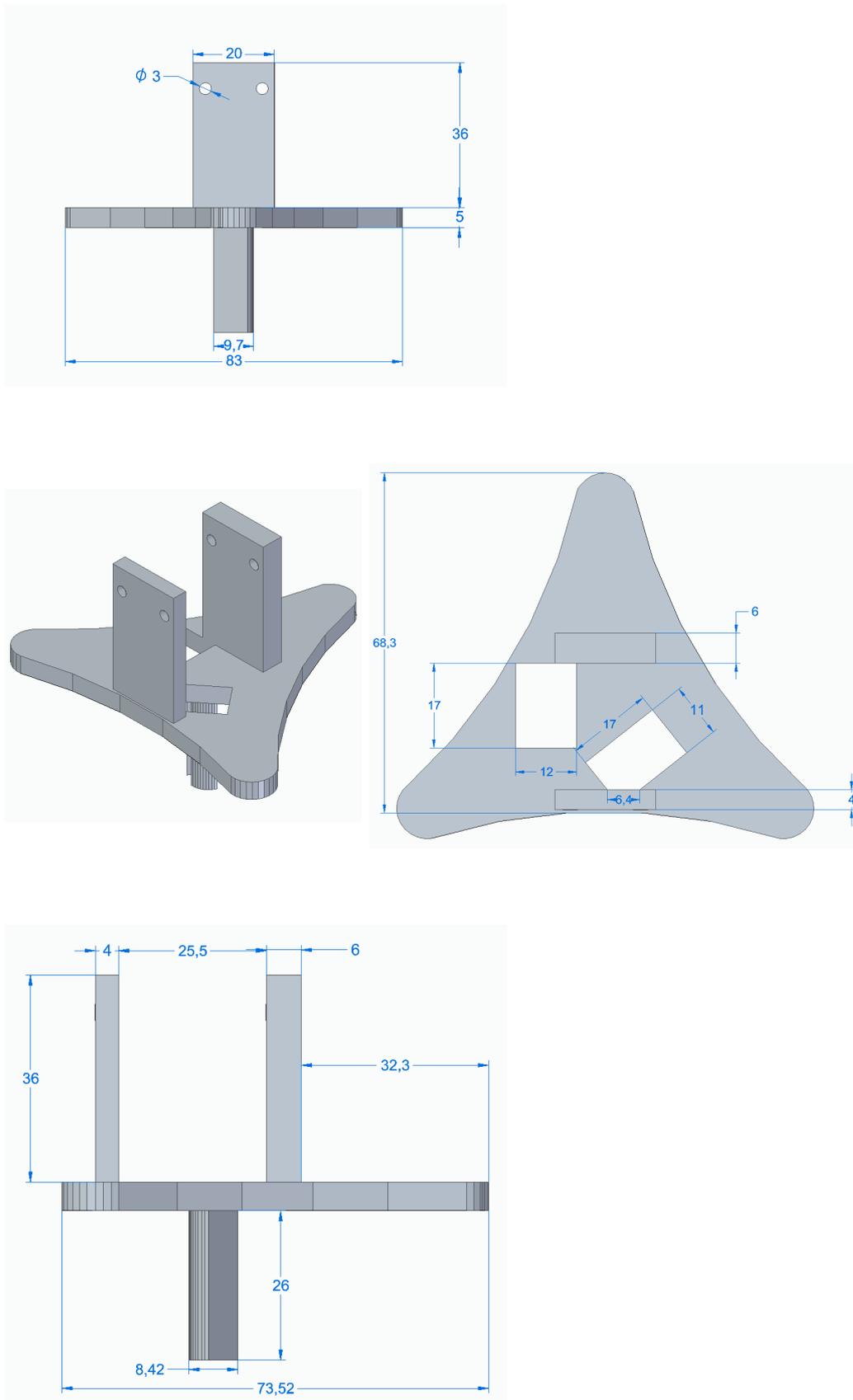


Figura A1: Planta, vista general, perfil y alzado del vástago

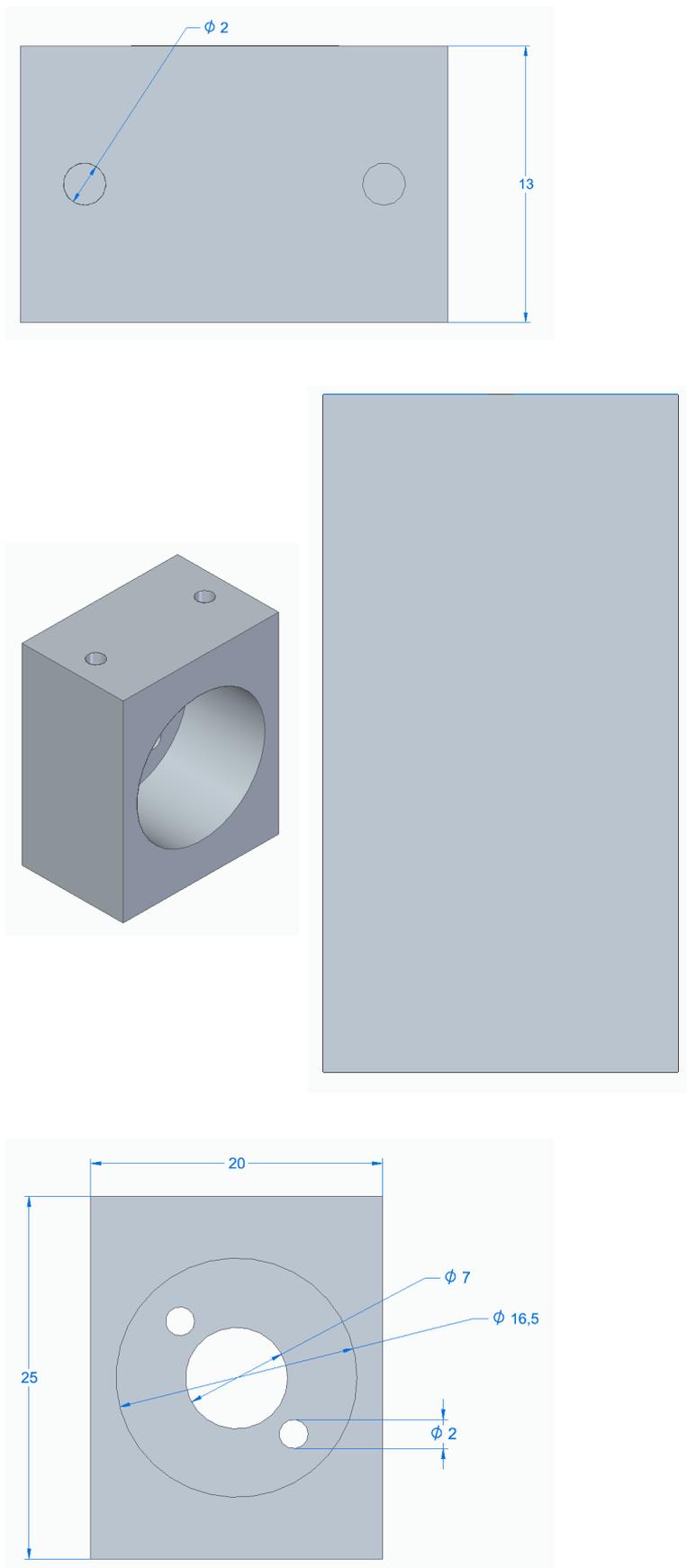


Figura A2: Planta, vista general, perfil y alzado del primer encaje

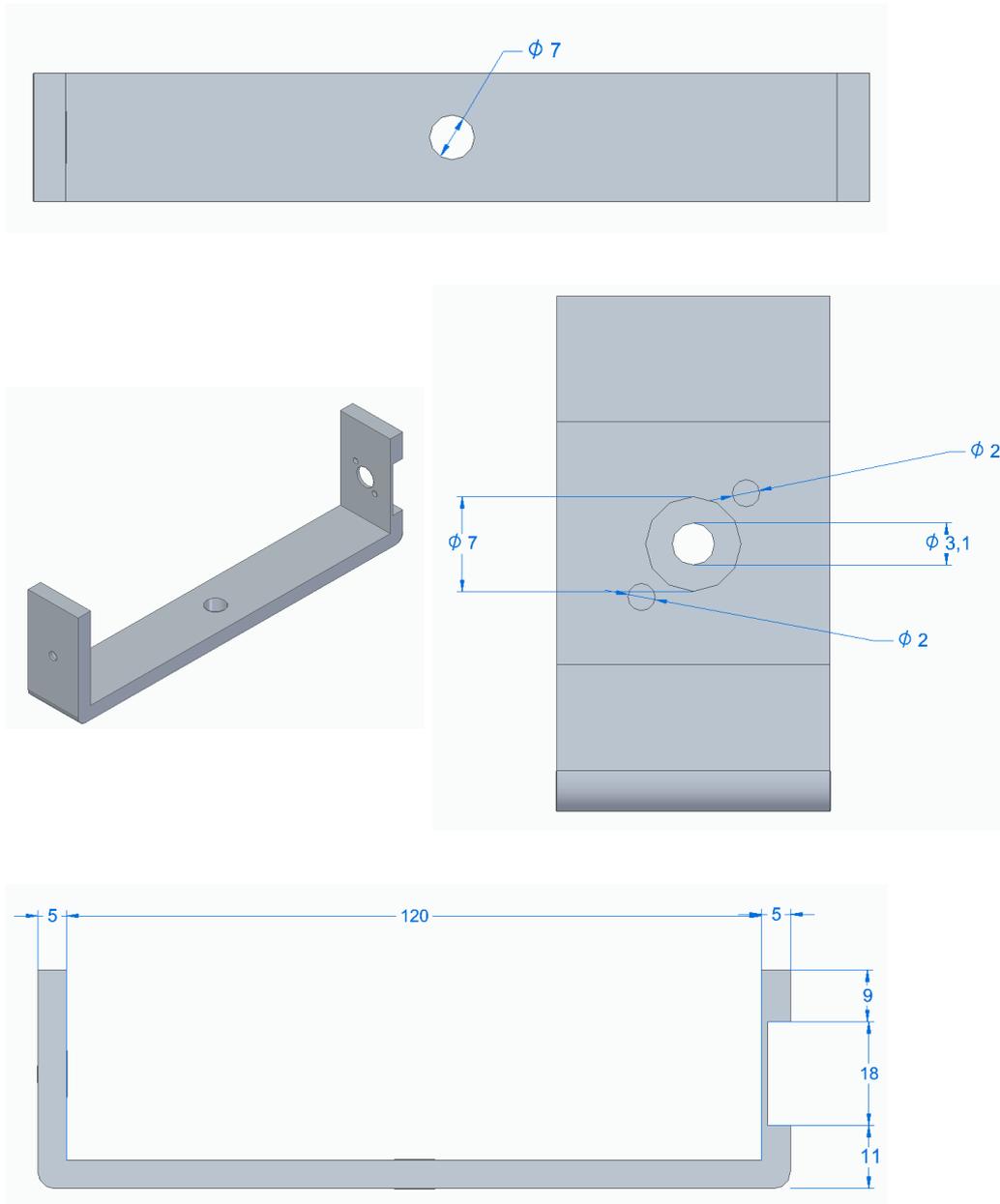


Figura A3: Planta, vista general, perfil y alzado del primer brazo

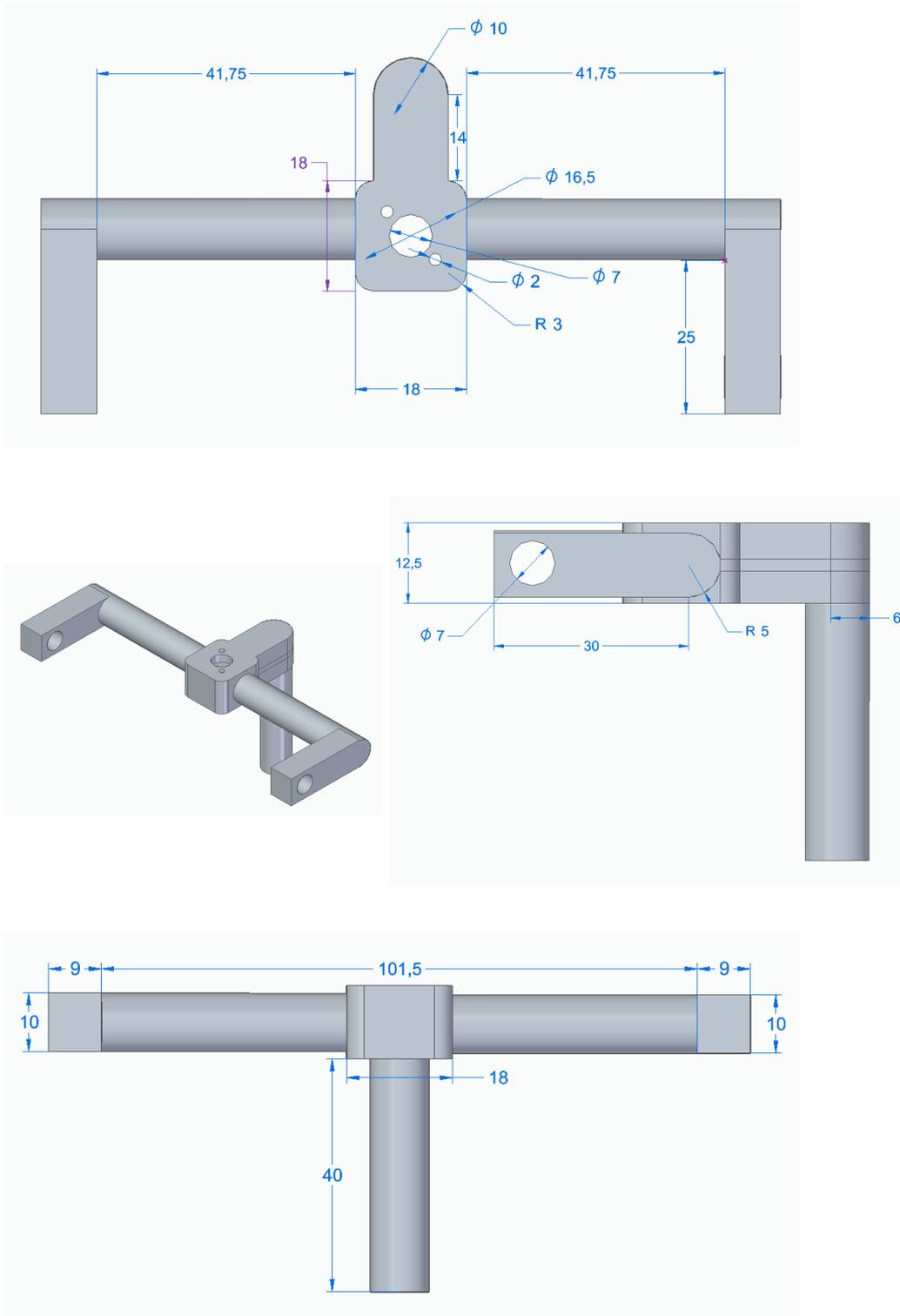


Figura A4: Planta, vista general, perfil y alzado del segundo encaje

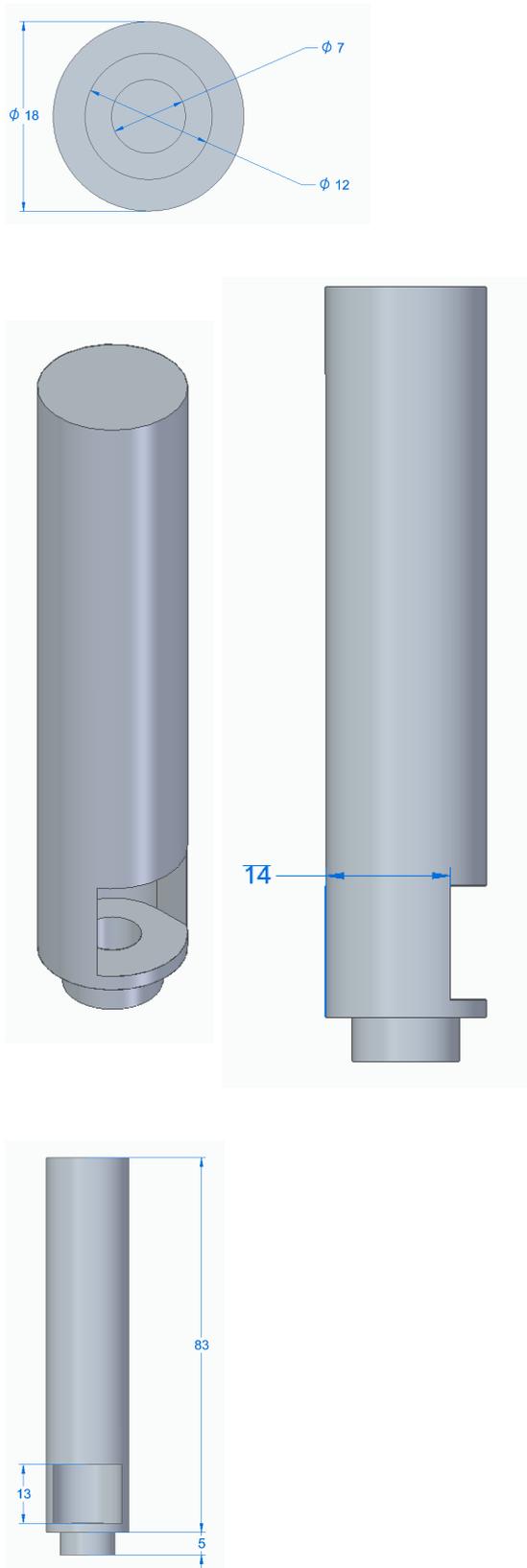


Figura A5: Planta, vista general, perfil y alzado del controlador

Bibliografía

- [1] Costanza Chiapponi, Christine Y Meyer, Silvia Heinemann, Frank Meyer, Peter Biberthaler, Christiane J Bruns, and Karl-Georg Kanz. Stress-related job analysis for medical students on surgical wards in germany. *Journal of surgical education*, 74(1):145–153, 2017.
- [2] Nirav Shah and Mark Hamilton. Clinical review: Can we predict which patients are at risk of complications following surgery? *Critical Care*, 17(3):226, 2013.
- [3] Leanne M Sutherland, Philippa F Middleton, Adrian Anthony, Jeffrey Hamdorf, Patrick Cregan, David Scott, and Guy J Maddern. Surgical simulation: a systematic review. *Annals of surgery*, 243(3):291, 2006.
- [4] Carlos Monserrat, O López, and Mariano Alcañíz. Estado del arte en simulación quirúrgica. *Informática y Salud*, 47:15–22, 2004.
- [5] Delia Sepúlveda Muñoz. Diseño e implementación de un sistema de realimentación háptica para formación en cirugía laparoscópica. *Trabajo de Fin de Grado, Robolabo, ETS Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid*, 2017.
- [6] Michelle A Lerner, Mikias Ayalew, William J Peine, and Chandru P Sundaram. Does training on a virtual reality robotic simulator improve performance on the da vinci® surgical system? *Journal of Endourology*, 24(3):467–472, 2010.
- [7] Justin M Albani and David I Lee. Virtual reality-assisted robotic surgery simulation. *Journal of Endourology*, 21(3):285–287, 2007.
- [8] Intuitive Surgical®, da Vinci Skills Simulator, <https://intuitivesurgical.com/products/skills-simulator/>, Consultado el 20/06/2017.
- [9] da Vinci® Surgery, The da Vinci® Surgical System, <http://www.davincisurgery.com/da-vinci-surgery/da-vinci-surgical-system/>, Consultado el 20/06/2017.
- [10] Simulated Surgical Systems, LLC, Robotic Surgery Simulator <http://www.simulatedsurgicals.com/ross2.html>, Consultado el 19/06/2017.
- [11] Maurice Stephan Michel, Thomas Knoll, Kai Uwe Köhrmann, and Peter Alken. The uro mentor: development and evaluation of a new computer-based interactive training system for virtual life-like simulation of diagnostic and therapeutic endourological procedures. *BJU international*, 89(3):174–177, 2002.

- [12] 3D Systems, uro mentor, <http://symbionix.com/simulators/uro-mentor/>, Consultado el 12/06/2017.
- [13] Martin N Jonsson, Mahmood Mahmood, Tomas Askerud, Henrik Hellborg, Stig Ramel, N Peter Wiklund, Magnus Kjellman, and Gunnar Ahlberg. Promis™ can serve as a da vinci® simulator—a construct validity study. *Journal of endourology*, 25(2):345–350, 2011.
- [14] Medline®, Symulator Laparoskopowy ProMIS, <http://www.symulacjamedyczna.pl/laparoskopowe/>, Consultado en 13/06/2017.
- [15] Vincent Hayward, Oliver R Astley, Manuel Cruz-Hernandez, Danny Grant, and Gabriel Robles-De-La-Torre. Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1):16–29, 2004.
- [16] Alejandro Jarillo Silva, Omar A Domínguez Ramirez, Vicente Parra Vega, and Jesus P Ordaz Oliver. Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability. In *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009. CERMA '09.*, pages 193–198. IEEE, 2009.
- [17] Geomagic®, Los Dispositivos Hápticos de Geomagic®, <http://www.geomagic.com/es/products/phantom-omni/overview>, Consultado en 13/06/2017.
- [18] Richard Q Van der Linde, Piet Lammertse, Erwin Frederiksen, and B Ruiter. The hapticmaster, a new high-performance haptic interface. In *Proc. Eurohaptics*, pages 1–5, 2002.
- [19] Open Source Haptics, MOOG FCS HapticMaster, <http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/moogfchapticmaster>, Consultado el 13/06/2017.
- [20] Steven Martin and Nick Hillier. Characterisation of the novint falcon haptic device for application as a robot manipulator. In *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, pages 291–292, 2009.
- [21] Aman Shah, Scott Teuscher, Eric McClain, and Jake Abbott. How to build an inexpensive 5-dof haptic device using two novint falcons. *Haptics: Generating and perceiving tangible sensations*, pages 136–143, 2010.
- [22] Novint Technologies, <http://www.novint.com/index.php/novintfalcon>, Consultado en 14/06/2017.
- [23] Force Dimension, Omega.6 Brochure, <http://www.forcedimension.com/products/omega-6/overview>, Consultado el 04/04/2017.
- [24] F. Monasterio-Huelin. Cinemática, www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/rob/apuntes/cinematica-v1.pdf, Consultado el 29/05/2017.
- [25] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. *Robot modeling and control*. Wiley, 2005.

- [26] F. Monasterio-Huelin. Introducción a los Sistemas Hápticos, www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/rob/apuntes/sistemashapticos-v1.pdf, Consultado en 08/06/2017.