

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE UN ACTUADOR PARA UN BRAZO ROBOT DE APOYO EN ARTROSCOPIA DE RODILLA PARA DIAGNÓSTICO DE LESIONES

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el alumno:

Roberto de la Torre Zevallos

ASESOR: Rocío Liliana Callupe Pérez

Lima, Noviembre del 2009

RESUMEN

El presente trabajo de tesis aborda el tema de cirugía robótica, una tecnología aplicada en países extranjeros y ausente en el Perú. Se busca aplicar la tecnología robótica a la técnica quirúrgica endoscópica en las ramas de laparoscopia y artroscopia.

La endoscopia es una técnica que permite al cirujano ver al interior del paciente usando una microcámara que es insertada a través de una pequeña incisión hecha al paciente. Esta técnica puede aplicarse a diferentes partes del cuerpo, cuando se aplica al estómago es llamada laparoscopia y cuando se aplica a la rodilla se le conoce como artroscopia.

En Lima, los cirujanos tienen experiencia en la aplicación de laparoscopia y artroscopia aunque su número es reducido debido a la complejidad de aprendizaje y realización de estas técnicas. Por otra parte la tecnología robótica no es aplicada en los hospitales de la capital, a pesar de ello existen nacientes líneas de investigación impulsadas por universidades de las principales ciudades del país.

El propósito del presente trabajo de tesis es iniciar una línea de trabajo en cirugía robótica mediante el estudio de los asistentes robóticos para cirugía y el uso de la tecnología robótica disponible en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Se han planteado dos objetivos principales: el diseño de un circuito de control para un actuador de un asistente robótico para artroscopia y la simulación del control de un artroscopio usando un brazo robot industrial. El trabajo está dividido en tres partes: investigación de la problemática en robótica, laparoscopia y artroscopia de Lima, diseño del circuito de control de un actuador para un asistente robótico para artroscopia y simulación del control de un artroscopio usando un brazo robot usado en manufactura.

La importancia del diseño del circuito de control radica en el control del movimiento de la cámara que explora la articulación de la rodilla, por otra parte la simulación busca obtener datos que muestren las ventajas de usar tecnología robótica para movimientos precisos de cirugía.

Índice

Pág.

ÍNDICE	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1	
PROBLEMÁTICA DE LA CIRUGÍA ROBÓTICA EN EL PERÚ.....	4
1.1 <i>Introducción</i>	4
1.2 <i>Problemática de cirugía laparoscópica</i>	4
1.3 <i>Problemática de artroscopia</i>	5
1.4 <i>Cirugía con tecnología robótica</i>	6
1.5 <i>Problemática de la cirugía robótica en el Perú</i>	7
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO	8
2.1 <i>Introducción</i>	8
2.2 <i>Laparoscopia</i>	8
2.3 <i>Artroscopia</i>	11
2.4 <i>Robótica y el brazo robot SCORBOT</i>	13
2.5 <i>Análisis cinemático del brazo robot SCORBOT ER V plus</i>	19
2.6 <i>Procesos actuales de laparoscopia y artroscopia</i>	20
2.7 <i>Modelo teórico</i>	23
CAPÍTULO 3	
DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y SELECCIÓN DEL ACTUADOR PARA EL BRAZO ROBOT.....	26
3.1 <i>Introducción</i>	26
3.2 <i>Hipótesis y objetivos</i>	27
3.3 <i>Metodología</i>	28
3.4 <i>Selección del actuador del brazo robot para artroscopia</i>	29
3.5 <i>Diseño del circuito de control</i>	30
CAPÍTULO 4	
SIMULACIÓN DEL CONTROL DEL ARTROSCOPIO USANDO EL BRAZO ROBOT SCORBOT	33
4.1 <i>Sistema de mando del brazo robot SCORBOT ER V plus aplicado al control del artroscopio</i>	33
4.2 <i>Algoritmo de la simulación</i>	33
4.3 <i>Simulación del control del artroscopio usando el brazo robot SCORBOT ER V plus</i>	37
CAPÍTULO 5	
RESULTADOS	57
5.1 <i>Resultados de la simulación del circuito de control</i>	57
5.2 <i>Resultados de la simulación del movimiento del artroscopio</i>	58
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES	62
GLOSARIO	63
FUENTES	64

Introducción

El presente trabajo presenta el diseño de un circuito de control para un actuador, el cual está orientado a formar parte de un asistente robótico para artroscopia; se presenta también la simulación del control de un artroscopio usando el brazo robot SCORBOT ER V plus, el cual es usado en aplicaciones industriales.

La organización de los capítulos incluye: la definición de la problemática de cirugía robótica en el Perú, la revisión de la teoría involucrada en robótica y cirugía, el modelo teórico planteado para un asistente robótico, el diseño del circuito de control de un actuador, la simulación del control del artroscopio y el análisis de los resultados obtenidos.

El capítulo uno presenta la problemática de la cirugía robótica en el Perú abordando la problemática actual de los procedimientos cirugía mínimamente invasiva como laparoscopia y artroscopia, y presentando la cirugía robótica como una tecnología emergente en países como Brasil y México. En ambos casos, en cirugía actual y cirugía robótica, se realiza un contraste entre los beneficios y desventajas de estas tecnologías.

El capítulo dos presenta el modelo teórico planteado sobre la construcción de un brazo robot para cirugía, enfatizando la selección de un actuador y el circuito de control correspondiente. Se presenta el fundamento teórico correspondiente a los asistentes robóticos, la tecnología del brazo robot SCORBOT ER V plus que será usado en la simulación de control de un artroscopio y los procedimientos de cirugía mínimamente invasiva a los cuales se orienta la robótica en este trabajo: la cirugía laparoscópica y la artroscopia de rodilla.

En el capítulo tres se realiza el diseño del circuito de control. Se selecciona el actuador basado en las características del brazo robot SCORBOT y se realiza el diseño del circuito de control, el cual incluye la etapa de potencia para alimentar el actuador y la interfaz digital hacia el controlador.

El capítulo cuatro corresponde al proceso de simulación del control del artroscopio. En la simulación realizada en el laboratorio del CETAM, se describe del sistema de mando del brazo robot SCORBOT ER V plus, luego se muestra la definición del algoritmo de artroscopia para el brazo robot y finalmente se presenta la simulación realizada.

En el capítulo 5 se presentan el análisis de los resultados de la simulación del circuito de control y de la simulación de los movimientos de artroscopia, con ello se busca comprobar que las características del brazo y el control de las articulaciones son los apropiados para una aplicación de cirugía endoscópica como la artroscopia de rodilla.

Capítulo 1

Problemática de la cirugía robótica en el Perú

1.1 Introducción

En este capítulo se tratan dos problemáticas: la tecnología usada en procedimientos quirúrgicos en la ciudad de Lima y el uso de tecnología robótica en cirugía. Los procedimientos quirúrgicos tratados en este trabajo son la cirugía laparoscópica y la artroscopia de rodilla. Adicionalmente, se expone la problemática de cirugía robótica en nuestro país a través de la tecnología usada en hospitales de la ciudad de Lima.

La cirugía laparoscópica y la artroscopia son procedimientos de cirugía mínimamente invasiva, lo cual quiere decir que ambos usan la técnica endoscópica al introducir una microcámara e instrumentos al interior del paciente a través de pequeñas incisiones.

La cirugía robótica explota las características de la cirugía mínimamente invasiva a través de sistemas que recrean el interior del paciente, o al emplear brazos robóticos que reemplazan a los del cirujano proporcionando mayor precisión y control a distancia.

1.2 Problemática de cirugía laparoscópica

Para definir la problemática de laparoscopia se realizó una encuesta en el Hospital Nacional Cayetano Heredia, la Clínica Angloamericana y el Hospital Dos de Mayo y se obtuvo el siguiente conjunto de datos: el Hospital Nacional Cayetano Heredia usa tres sistemas de video para cirugía laparoscópica: el primero, en casos de abdomen, tórax, gastroenterología, neumología, cardiovascular y oncología; el segundo pertenece al área de urología; y el tercero al área de ginecología. En promedio los sistemas se usan mínimo en tres operaciones al día y un máximo de 192 por mes. En el caso de la clínica Angloamericana se usan tres sistemas de video para laparoscopia, con ellos se realizan en una semana por lo menos tres cirugías de banda gástrica, una cirugía en el área de urología, y algunas de neurología y cardiología al mes; por otra parte la duración promedio de estas intervenciones es de cinco horas y su costo supera los 2000 dólares. Finalmente la información del Hospital Nacional Dos de Mayo muestra

que cuentan con cuatro sistemas de video para laparoscopia: para cirugía, neurología, cardiovascular y urología [Anexo 1].

La información obtenida indica que existe una demanda alta de cirugía endoscópica y la versatilidad con la que se aplica dicha tecnología en Lima, a pesar de su elevado costo.

1.3 Problemática de artroscopia

El progreso de la artroscopia ha sido particularmente rápido durante las últimas décadas. El artroscopio ha cambiado sorprendentemente la forma en la cual el cirujano ortopedista plantea el diagnóstico y tratamiento de una variedad de lesiones articulares en la rodilla. Una historia clínica y un examen físico suplementado por la visión de la articulación permiten un alto grado de seguridad diagnóstica, así como posibilidades terapéuticas con cirugía mínimamente invasiva. La baja morbilidad asociada a la artroscopia justifica el procedimiento en una variedad de enfermedades articulares, tanto para determinar el diagnóstico y pronóstico como para el tratamiento. Debe enfatizarse que el procedimiento artroscópico sirve como ayuda diagnóstica y no reemplaza la adecuada evaluación clínica [1].

Ha habido mejoras continuas al artroscopio desde el año 1918, cuando Takagi inició la visión de la articulación de la rodilla usando un cistoscopio. La refinación del artroscopio vino acompañado con la extensión del procedimiento a articulaciones como la cadera, tobillo, hombro, codo y muñeca. Las empresas proveedoras de estos instrumentos aportaron con un progresivo refinamiento del artroscopio, además de otros instrumentos relacionados, que fueron mejorados durante las siguientes décadas debido al interés de los médicos por este tipo de tecnología. Numerosos trabajos de los años 70 y 80 establecieron el valor de la artroscopia, tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de una variedad de enfermedades, especialmente de la articulación de la rodilla. Un ejemplo de esto es Chile, donde la artroscopia se inició en 1980 y se difundió ampliamente entre los años 1985-1990, siendo actualmente una técnica habitual en sus hospitales [1].

En el Perú la artroscopia es realizada en varios hospitales, tales como el Hospital Daniel Alcides Carrión, el Hospital Militar, entre otros. De acuerdo a la información obtenida del Hospital Carrión la artroscopia es un procedimiento sencillo para los cirujanos expertos de nuestro país, el cual dura entre 30 a 40 minutos dependiendo de

la complejidad del caso y la pericia del cirujano. En el caso de los equipos utilizados, no hay una gran variedad debido al costo de estos, sin embargo esto no impide que un equipo de endoscopia sea usado en procedimientos de laparoscopia, artroscopia de rodilla, de cadera, de hombro, de muñeca y otros. La frecuencia con que se realizan procedimientos es de 5 a 7 artroscopias por semana, incluyendo tratamientos de hombro, muñeca o rodilla.

1.4 Cirugía con tecnología robótica

Los últimos avances en cirugía robótica aplicada a laparoscopia, tratados por Córdova y Garth son los del AESOP (*Automated Endoscopic System for Optimal Positioning*) desarrollado por *Computer Motion Incorporated, Santa Barbara, California* que permite un mejor control de la cámara del endoscopio usando un sistema de reconocimiento de voz que es usado por el cirujano a través de una computadora; el sistema Da Vinci (*Intuitive Surgical, Mountain View, California*), capaz de crear un espacio virtual de operación usando un laparoscopio e instrumentos automatizados con el fin de permitir que un solo cirujano realice la operación; y el Endoassist (*Armstrong Health Limited, High Wycombe, Reino Unido*) que consta de un sistema de video-endoscopia posicionado por láser. Las ventajas de estos nuevos sistemas son la mayor precisión de movimientos y la reducción de errores humanos, así como la posibilidad de realizar la cirugía a distancia [2].

Desde el punto de vista económico se puede hacer una comparación de precios entre las diferentes alternativas de cirugía robótica como muestra la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Comparación de precios entre tecnologías robóticas para cirugía

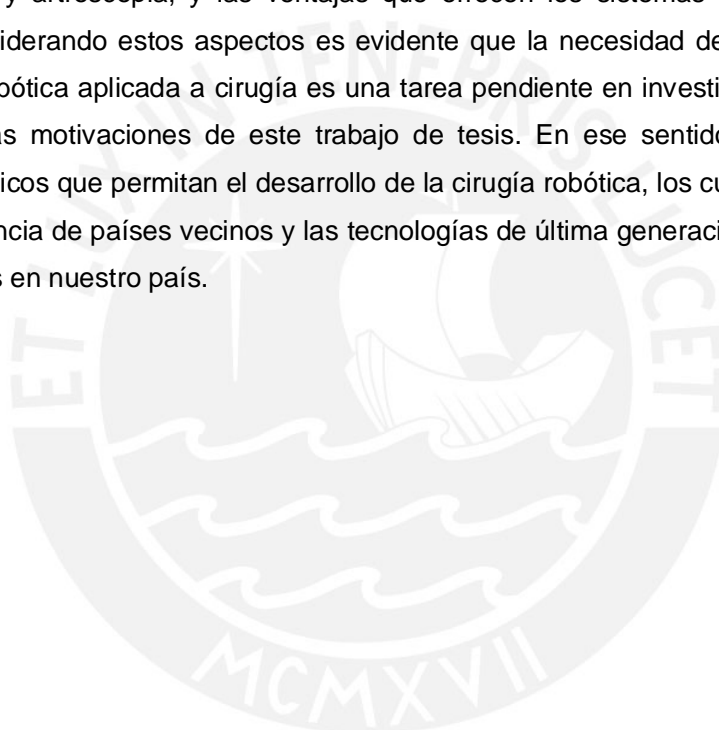
Método	Sistema Da Vinci [2]	Brazo robot industrial [3]	Asistente robótico para cirugía [4]
Precio (\$)	1 millón	50 mil	6500

Uno de los mejores trabajos en cirugía robótica es el realizado por Nabil Simaan en "*Analysis and synthesis of parallel robots for medical applications*" [5] en el cual muestra el uso de brazos robóticos paralelos como la mejor opción para desempeñar funciones de un cirujano, sin embargo tiene un punto débil en su elevado costo como se ha visto en la tabla anterior.

1.5 Problemática de la cirugía robótica en el Perú

Actualmente, el desarrollo de la tecnología en aplicaciones biomédicas en el Perú cuenta con el apoyo de universidades, algunas empresas o centros de salud. Un ejemplo de esto son los diversos proyectos de investigación en la Pontificia Universidad Católica [6], Universidad de Piura [7], Universidad Nacional de San Agustín [8], etc. Estos proyectos de investigación son desarrollos tecnológicos que alcanzan hasta un grado de prototipos.

Para realizar desarrollos en cirugía robótica, se ha presentado la problemática de laparoscopia y artroscopia, y las ventajas que ofrecen los sistemas robóticos para cirugía. Considerando estos aspectos es evidente que la necesidad de desarrollar la tecnología robótica aplicada a cirugía es una tarea pendiente en investigación, la cual es una de las motivaciones de este trabajo de tesis. En ese sentido, se definirán aspectos teóricos que permitan el desarrollo de la cirugía robótica, los cuales se basan en la experiencia de países vecinos y las tecnologías de última generación que aún no son aplicadas en nuestro país.



Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Introducción

La cirugía robótica se viene desarrollando en el mundo proporcionando beneficios en las diversas áreas en las que se aplica. Nuestro país está en la etapa inicial del desarrollo de esta tecnología, esta corresponde al análisis de distintas tecnologías donde se podría incursionar, tomando en cuenta los requerimientos de nuestros cirujanos.

Para entender la tecnología de cirugía robótica se tratan los conceptos básicos de laparoscopia y automatización. También se presenta la tecnología del robot SCORBOT, un brazo robot del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Se analiza su adaptación a un sistema de cirugía laparoscópica y la información de las variables de control de este brazo. Finalmente se presenta el modelo del asistente para cirugía laparoscópica que se desea diseñar.

2.2 Laparoscopia

La cirugía clásica consiste en la realización de cortes lo suficientemente grandes para brindar al cirujano el espacio suficiente para observar directamente el órgano enfermo; de esta manera el cirujano puede usar sus manos en la manipulación y examen del espacio de trabajo. La realización de este tipo de cortes ocasiona heridas de diferente tamaño dependiendo del órgano que se quiere tratar. Además se dañan otros órganos aparte del órgano enfermo para proporcionar un espacio de trabajo adecuado [10].

Con el avance de la tecnología se realizan hoy en día cirugías de acceso mínimo (MAS o *Minimum Access surgery*) como la cirugía laparoscópica. En este tipo de cirugía el tratamiento de los órganos se lleva a cabo a través de pequeñas incisiones realizadas al cuerpo del paciente, en ellos se instalan puertos de acceso llamados trocares. Los trocares sirven como entradas para insertar instrumentos diseñados especialmente para este tipo de cirugía, además se usan telescopios (como un

laparoscopia) para obtener información de la anatomía interna del paciente y monitores para su visualización [9].

2.2.1 Cirugía laparoscópica tradicional

Actualmente son muchas las aplicaciones en laparoscopia, una de ellas es la cirugía endoscópica en el tratamiento de sangrado activo por várices. Este método consiste en utilizar el método de la ligadura de bandas elásticas (STIEGMAN Y COL. 1986) y especialmente un video-endoscopio, a través del cual se visualiza el área de operación para el procedimiento de ligaduras. Una ventaja de este procedimiento frente a otros que suministran sustancias esclerosantes al paciente, es el menor número de sesiones para erradicar las várices, tema expuesto por José Zevallos en la revista de gastroenterología del Perú [10].

Según la revista de gastroenterología del Perú, la laparoscopia aplicada a casos de apendicitis, un caso muy común al largo del mundo, es una alternativa a la cirugía abierta propuesta por MC BURNEY en 1889, y es un método que es usado actualmente y que recomienda la intervención temprana y que por su simplicidad y bajo costo es la más usada en nuestro país [10].

2.2.1 Instrumentos en cirugía laparoscópica

A continuación se presentan los la tecnología de los diferentes instrumentos usados en una cirugía laparoscópica en la ciudad de Lima, luego se detalla el procedimiento que se sigue en este tipo de intervenciones.

a. Laparoscopia

La cirugía laparoscópica utiliza una microcámara de televisión compuesta de un telescopio llamado laparoscopia, con el cual se visualiza el espacio de trabajo; este dispositivo permite una magnificación de la imagen de 20 veces, con lo cual se obtiene nitidez en la imagen de los monitores.

Debido a que es necesario iluminar el interior del abdomen se debe agregar luz usando una fuente de luz fría en el mismo laparoscopia, la cual se transmite a través de una fibra óptica [11].

En la figura 2.1 se muestra un conjunto de artroscopios, el extremo delgado es introducido al espacio de trabajo y el otro extremo se conecta a la fuente de luz.



Figura 2.1. Laparoscopios [12]

b. Insuflador

Otro instrumento usado en la cirugía laparoscópica es el insuflador, un dispositivo electrónico y automático para insuflar CO₂ por medio de una aguja de Verres (una aguja que al ingresar al realizar la perforación retrae la punta para evitar dañar otros órganos internos) dentro de la cavidad donde se realizará la operación, el gas se acumula en la cavidad peritoneal proporcionando un espacio de trabajo de mayor tamaño [11]. En la figura 2.2 se observa como se introduce el artroscopio al interior del paciente, a este se conectan la manguera del insuflador y el cable de luz.

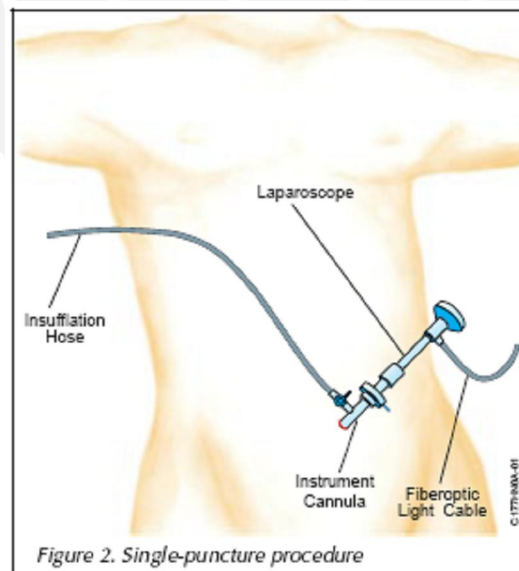


Figura 2.2. Inserción de un insuflador junto al laparoscopio [12]

c. Trocar

Los trocares son instrumentos que permiten la entrada y salida de los diversos instrumentos quirúrgicos, su longitud es de 33-40cm y su diámetro es de 5-10mm.

Estos constan de dos partes: el punzón que atraviesa la pared abdominal y la camiseta o funda que queda para la parte operativa y que permite la inserción de instrumentos sin perder la presión del gas dentro del paciente [11]. En la siguiente figura se ve como se introducen el artroscopio y otro instrumento a través de los trocares.

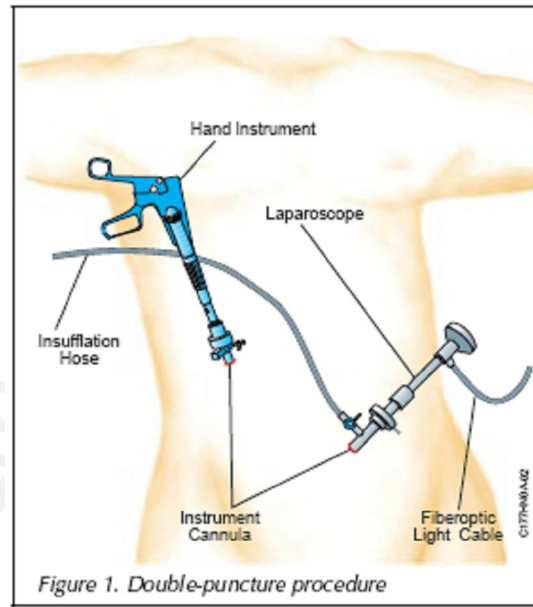


Figura 2.3. Inserción del laparoscopio y un instrumento a través de los trocares (cannula) [12]

2.3 Artroscopia

2.3.1 La articulación de la rodilla

Los extremos de los dos huesos opuestos en una articulación están recubiertos con un amortiguador natural denominado cartílago. Este tiene una superficie lisa y viscosa que facilita el movimiento de los huesos. La rodilla es la articulación más grande del cuerpo y está dotada de dos amortiguadores suplementarios, pequeños anillos de cartílago en forma de media luna, que se denominan meniscos.

Cada articulación está envuelta y protegida por una cápsula externa resistente. En la superficie interna de esta cápsula articular se encuentra una membrana denominada

membrana sinovial, que produce el líquido sinovial. Dicho líquido lubrica la articulación, contribuyendo a la nutrición del cartílago y a mantenerlo viscoso.

Los huesos se mantienen fijos en su lugar por los ligamentos. Estos son gruesas cintas de tejido, que sirven como medio de unión de los huesos dentro o fuera de la cápsula. Su función es la de evitar el movimiento excesivo o la dislocación de los huesos. Los músculos también contribuyen a mantener las articulaciones en su lugar. Están insertados en los huesos por los tendones. Cuando un músculo se contrae, se acorta, produciéndose la tracción sobre el hueso y, por consiguiente, el movimiento y la flexión de la articulación. La siguiente figura muestra las partes de la rodilla.

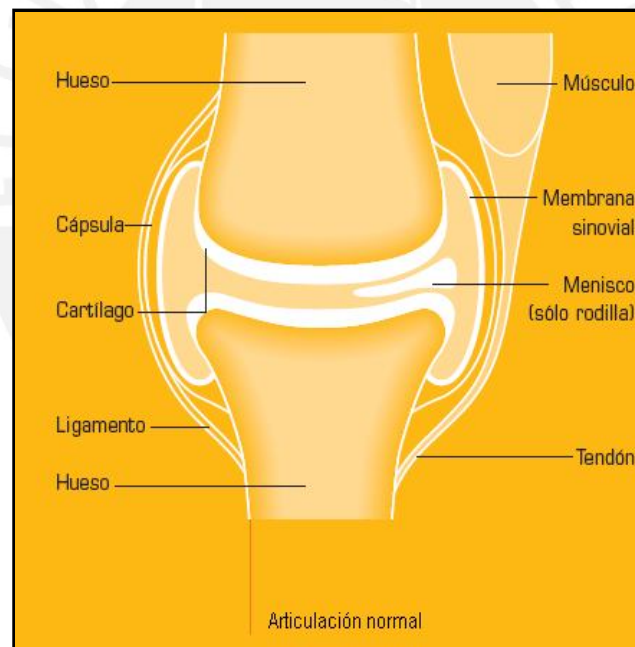


Figura 2.4. Articulación de la Rodilla

2.3.2 Artroscopia de rodilla

Es un procedimiento quirúrgico en el cual se realizan pequeñas incisiones en la articulación de la rodilla para manipular una microcámara (artroscopio) y otros instrumentos como pinzas o bisturís. Con la artroscopia es posible obtener diagnósticos correctos a través de la visualización de la articulación o tomando

muestras del tejido interno, además se pueden reparar los ligamentos o meniscos de la rodilla con un tiempo de recuperación más corto al de una cirugía abierta [13] [11].

Las lesiones más comunes de rodilla son: fracturas, luxaciones, enfermedades congénitas, lesiones ligamentarias y meniscales, procesos degenerativos, infecciosos y tumorales, lesiones neurológicas y lesiones ligamentosas.

2.3.3 Artroscopio

Es la microcámara usada en la artroscopia de rodilla, tiene un diámetro de 4mm, la cámara tiene un inclinación de 30° respecto al eje del instrumento. En la siguiente figura se muestran los instrumentos usados para introducir el artroscopio: el artroscopio y la camiseta o funda del artroscopio, el artroscopio encaja en la camiseta, la cual tiene el propósito de conducir fluido para evitar el estancamiento de los fluidos internos de la articulación lo cual causaría obstrucción en la visión del artroscopio.



Figura 2.5. Artroscopio (izquierda), detalle de la inclinación de la microcámara del artroscopio (centro), camiseta conductora del fluido hacia el espacio de trabajo (derecha). (Visita al Hospital D. A. Carrión. 2008).

2.4 Robótica y el brazo robot SCORBOT

2.4.1 Automatización con robots

La automatización es la sustitución del hombre en trabajos, que antes parcial o totalmente debía realizar por mecanismos que actúan sin poder de decisión y según una planificación previamente planeada [14].

A continuación se presentan las definiciones necesarias para entender el concepto de cirugía robótica.

2.4.2 Robot

La automatización se logra usando un robot, el cual es un manipulador re-programable, multifuncional, controlado automáticamente, que puede estar fijo en un sitio o moverse, y que está diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, por medio de movimientos variables programados para realizar diversas tareas o trabajos.

El robot es manipulador porque es un mecanismo consistente en un conjunto de segmentos y uniones para mover objetos normalmente en varios grados de libertad.

Es re-programable porque los movimientos programados o funciones auxiliares pueden modificarse sin que se realicen alteraciones en la estructura mecánica o en el sistema de control, excepto aquellas que suponen cambios de programas y memorias. Es multifuncional porque es posible que sea adaptado a diferentes aplicaciones con alteraciones en la estructura mecánica o en el sistema de control [3].

2.4.3 Sensor

Un robot requiere información de su entorno, el cual es proporcionado por el sistema usando diferentes sensores. Un sensor es un dispositivo eléctrico o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, magnetismo, calor, presión, movimiento, etc.) a valores medibles de dicha magnitud. En robótica se emplea la medición de: proximidad o desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza, luz, neumáticos, táctiles y cámaras de video. Por lo tanto una aplicación sensorial tiene varias disciplinas implicadas como la informática, acondicionamiento de la señal, electrónica, etc. [3].

2.4.4 Actuador o accionador

Los movimientos que realiza el robot son debido a actuadores o accionadores, que son elementos encargados de transformar una señal de control o la salida de un microprocesador en acciones controladas de una máquina o dispositivo. Transforma las señales de control de velocidad y posición en un movimiento de cada una de las articulaciones del robot. Pueden ser de tres tipos: eléctricos, neumáticos e hidráulicos.

Un sistema eléctrico puede considerarse accionador cuando produce una determinada acción: conmutadores tipo on-off (como relés, diodos, transistores), solenoides donde la corriente es usada para producir movimiento de un núcleo de hierro, motores

eléctricos. En robótica interesan aquellos capaces producir movimiento capaz de mover una articulación, es decir los motores eléctricos [3].

2.4.5 El brazo robot SCORBOT

El laboratorio del CETAM en la PUCP cuenta con un brazo robot SCORBOT del fabricante ESHED ROBOTEC. El controlador de este robot tiene las siguientes funciones: dar instrucciones de los movimientos del brazo robot y otros dispositivos que compongan el sistema robótico, monitorear estos movimientos y hacer ajustes automáticos para corregir cualquier error [15].

2.4.6 Control del brazo robot SCORBOT

Servo control

En lazo abierto el sistema no necesita revisar si la salida actual (posición o velocidad) es igual a la salida deseada. La señal de salida es determinada únicamente por la señal de entrada. Con este tipo de control no es posible detectar errores, tampoco se puede predecir la trayectoria o la velocidad del movimiento.

En lazo cerrado el sistema mide la señal de salida y la compara con la señal de entrada para detectar errores. Para este tipo de sistemas se puede usar un sensor óptico para medir la salida y un comparador entre las señales de entrada y salida para obtener el error.

Control digital

En este caso se pueden tener señales discretas también, debido a la presencia de microprocesadores. En este caso es común usar convertidores análogo-digital. Los microprocesadores son usados para calcular el error y la señal de control que será enviada a los motores

Parámetros de control en control PID

El parámetro proporcional es el que actúa más rápido para reducir el error especialmente en movimiento. Mientras mayor sea este parámetro mayor será la velocidad con que se reduce el error; sin embargo, en un límite puede llegar a

oscilaciones. La mayor desventaja es que este parámetro no puede eliminar por completo el error.

En control diferencial la salida es una función del cambio del error, mientras más rápido cambia este, mas rápido cambiara la salida. El parámetro diferencial es responsable de reducir la velocidad del error. La mayor desventaja es que si el error es constante este tipo de control no tomara ninguna acción.

En control integral la salida reduce la señal de error a cero en una tasa proporcional al tamaño del error, mientras mayor sea el error mayor es la salida. Su mayor ventaja es que el error en estado estable siempre es cero [15].

2.4.7 El robot SCORBOT en cirugía

El control PID es preciso y se usa actualmente en cirugía robótica pues es también fácil de controlar usando como accionadores motores eléctricos, por ello los movimientos tienen poco error. El robot SCORBOT tiene estas características y por ello es factible su uso en cirugía, lo cual se comprobará a partir de las simulaciones realizadas.

2.4.8 Simulación de una cirugía

Se pueden simular los movimientos del artroscopio en una cirugía usando el robot SCORBOT debido a sus características de alcance. Se realizarán los movimientos necesarios en una cirugía, con lo cual se comprobará que es posible su uso en cirugía.

2.4.9 Descripción del brazo robot SCORBOT-ER V plus

Parte de este trabajo de tesis es seleccionar lo actuadores del brazo robot, selección que considera la estructura del brazo robot SCORBOT- ER V plus.

En la figura 2.6 se muestra la estructura del robot SCORBOT-ER V plus, el cual será usado en la simulación de control del artroscopio y sobre el cual se basa el diseño de la estructura del brazo robot para artroscopia.

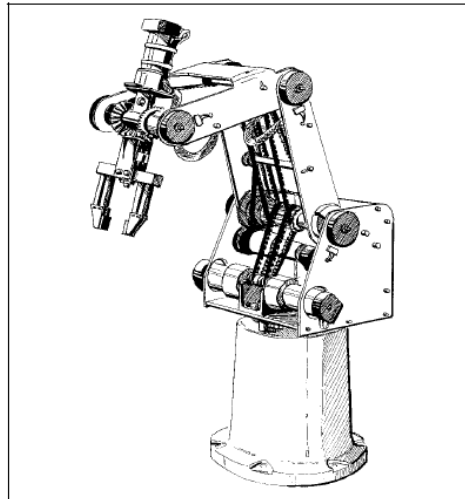


Figura 2.6. Estructura del robot SCORBOT-ER V plus [15]

La estructura mecánica está articulada verticalmente, consta de 5 ejes o grados de libertad: rotación de la base, rotación del hombro, rotación del codo, rotación de la muñeca y giro de la muñeca, esto se muestra en la figura 2.7.

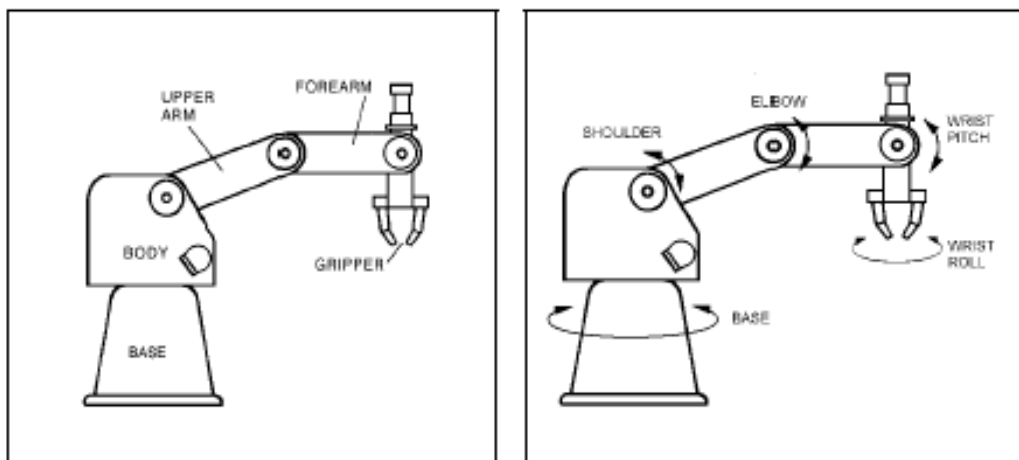


Figura 2.7. Ejes o grados de libertad del brazo robot SCORBOT-ER V plus [15]

Al final del brazo tiene una pinza accionada por un servomotor que usa un encoder óptico. El movimiento de los dedos de la pinza es paralelo y la fuerza de presión de ellas se determina con sensores y software.

El movimiento de los ejes está limitado por micro-switches. Además se tiene una realimentación del movimiento de cada eje dado por encoders ópticos. Cada eje es accionado por un servomotor de 12VDC, torque de 15oz.in con 70W de potencia.

Otras especificaciones del brazo robot que también se ven en la tabla 2.1 son: la transmisión del movimiento de los motores a cada articulación se realiza con fajas, el máximo peso que lleva el brazo es de 1kg, la máxima velocidad de movimiento es de 600mm/sec.

Tabla 2.1. Especificaciones del brazo robot SCORBOT-ER V plus [15]

SCORBOT-ER Vplus Specifications	
Mechanical Structure	Vertical articulated
Number of Axes	5 axes plus servo gripper
Axis Movement	
Axis 1: Base rotation	310°
Axis 2: Shoulder rotation	+130° / -35°
Axis 3: Elbow rotation	±130°
Axis 4: Wrist pitch	±130°
Axis 5: Wrist roll	Unlimited (mechanically); ±570° (electrically)
Maximum Operating Radius	610mm (24.4")
End Effector	DC servo gripper, with optical encoder, parallel finger motion; Measurement of object's size/gripping force by means of gripper sensor and software.
Maximum Gripper Opening	75 mm (3") without rubber pads 65 mm (2.6") with rubber pads
Hard Home	Fixed position on each axis, found by means of microswitches
Feedback	Optical encoder on each axis
Actuators	12VDC servo motors
Motor Capacity (axes 1-6)	15 oz. in Peak Torque (stall) 70 W Power for Peak Torque
Gear Ratios	Motors 1, 2, 3: 127.1:1 Motors 4, 5: 65.5:1 Motor 6 (gripper) 19.5:1
Transmission	Gears, timing belts, lead screw
Maximum Payload	1 kg (2.2 lb.), including gripper
Position Repeatability	±0.5 mm (0.02") at TCP (tip of gripper)
Weight	11.5 kg (25 lb)
Maximum Path Velocity	600 mm/sec (23.6"/sec)
Ambient Operating Temperature	2°-40°C (36°-104°F)

2.5 Análisis cinemático del brazo robot SCORBOT ER V plus

El análisis cinemático es necesario en todo diseño de brazo robot. Existen dos tipos de análisis cinemático: la resolución del problema cinemático directo y la del inverso. El problema cinemático directo permite conocer la posición en coordenadas del efector final dadas las posiciones de las articulaciones y la geometría del brazo robot. La resolución del problema cinemático inverso permite conocer las posiciones de las articulaciones a través de las coordenadas del efector final del brazo robot.

El análisis del problema cinemático directo resuelve el problema de la posición de un efector final de un brazo robot, para lograrlo se usan las posiciones de los actuadores del brazo robot. Usando el procedimiento explicado por Fu [16] para el análisis cinemático directo se definen los ejes coordenados para cada articulación. Hay dos opciones para resolver el problema cinemático directo, usando el método de Euler o usando la representación de Denavit – Hartenberg. En este caso se presenta el procedimiento descrito para la representación Denavit – Hartenberg. Esta representación busca obtener una matriz de transformación homogénea 4x4 que permite transformar las coordenadas del efector final en coordenadas de la base.

El algoritmo propuesto es el siguiente:

- D1 Establece el sistema de coordenadas de la base
- D2 Inicializar y repetir
- D3 Establecer los ejes de la articulación
- D4 Establecer el origen del sistema de coordenadas iesimo
- D5 Establecer el eje xi
- D6 Establecer el eje yi
- D7 Establecer ele eje de coordenadas de la mano
- D8 Encontrar los parámetros de la articulación y del elemento
- D9 Encontrar di
- D10 Encontrar ai
- D11 Encontrar Oi
- D12 Encontrar Qi

En nuestro caso de estudio se tienen los parámetros de coordenadas de las articulaciones del brazo robot SCORBOT ER V plus (tabla 2.2).

Tabla 2.2. Parámetros de coordenadas del brazo robot SCORBOT

Parámetros de coordenadas					
Articulación	Θ	A	A	D	Rango
0	90	-90	0	0	-155 a 155
1	0	0	220mm	0	-35 a 130
2	90	90	220mm	0	-130 a 130
3	0	-90	0	220mm	-130 a 130

En la siguiente figura se muestran las articulaciones y sus respectivos ejes coordenados.

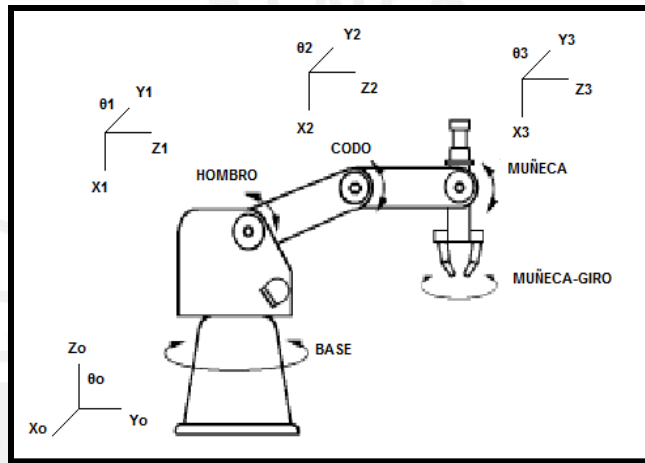


Figura 2.8. Ejes coordenados del brazo robot SCORBOT ER V plus

Usando los ejes definidos se obtienen las matrices de transformación que resuelven el problema cinemático directo, es decir se pueden definir coordenadas del efector final en función de la posición de cada articulación.

2.6 Procesos actuales de laparoscopia y artroscopia

2.6.1 Proceso actual de la cirugía laparoscópica

El proceso de una cirugía laparoscópica consta de cuatro partes: la preparación del paciente; la preparación y reconocimiento del espacio de trabajo; y la cirugía de los órganos enfermos y el lavado del espacio de trabajo.

La preparación del paciente es una etapa común en las diferentes cirugías, se acondiciona al paciente de acuerdo a los órganos que se quieren tratar.

La preparación y reconocimiento del espacio de trabajo consiste en usar un insuflador para llenar la cavidad donde se encuentra el órgano a tratar con un gas, este procedimiento debe mantener el espacio de trabajo constante mientras dure la cirugía, sin afectar ningún otro órgano. Además se instalan los trocares, por donde ingresarán los diversos instrumentos usados en la cirugía, incluyendo el laparoscopio. El primer trocar se instala a través del ombligo para comprobar la salida del gas, los demás se instalan en orificios hechos de acuerdo a la ubicación del órgano que se quiere tratar, es necesario que los trocares sean instalados precisamente y que permanezcan estáticos durante el resto de la cirugía. Después se procede con la laparoscopia de rutina, donde se realiza una evaluación del espacio de trabajo, visualizándolo usando un laparoscopio para adquirir imágenes desde dentro del paciente, este procedimiento se realiza siempre antes de iniciar el tratamiento de los órganos enfermos.

Durante la cirugía de los órganos enfermos se insertan los instrumentos necesarios para la cirugía usando los trocares, mientras se observa el espacio de trabajo por medio del laparoscopio, esta etapa requiere gran coordinación entre el equipo de cirujanos principalmente entre el control de los instrumentos y el del laparoscopio.

Finalmente, se realiza el lavado de la cavidad, aspirando el líquido y gas remanentes, se retiran los trocares y se suturan los orificios hechos al paciente.

2.6.2 Procedimiento actual de artroscopia

De acuerdo a la información proporcionada por el doctor José Cortez Soto (ver Anexo 2), un cirujano del Hospital Rebagliati con 4 años de experiencia en artroscopia, realizar una artroscopia es un proceso complejo de aprender y realizar. A pesar de ello es un procedimiento realizado frecuentemente, según señala respecto al número de artroscopias realizadas en un mes:

“En el Hospital Nacional Edgardo Rebagliati Martins 40 al mes en la unidad de artroscopía (cuando hice mi residencia) y por médico traumatólogo artroscopista en la parte privada varía de acuerdo a la cantidad de pacientes desde 2 a 12 en promedio”.

2.6.3 Procedimiento de artroscopia de rodilla

La artroscopia consiste en la visualización interna de cualquier articulación, en este caso se tratará la articulación de la rodilla. En la artroscopia se usa anestesia local, ambulatoria u otro tipo necesario. Esta cirugía se realiza en salas de buena esterilidad.

No es posible limitar la artroscopia a una secuencia de movimiento, respecto a este punto el Dr. Cortez explica que las maniobras realizadas dependen de la contextura del paciente, ya que ello afecta el espacio de trabajo en el cual se moverá el artroscopio, “las maniobras se basan en los barorreceptores de los cirujanos” añade y comenta que es debido a la experiencia que el cirujano puede medir la fuerza con la cual mover el artroscopio para evitar rayar la lente o quebrar el artroscopio además de dañar al paciente (ver Anexo 2).

Aunque las maniobras durante una artroscopia dependen de muchos factores externos, como la contextura del paciente y el punto de quiebre del artroscopio, es posible delimitar los movimientos en una secuencia basada en la exploración de los compartimentos de la articulación de la rodilla, los cuales son: compartimento medial, lateral y suprarrotular.

Los pasos seguidos en la artroscopia diagnóstica son:

1. Tomar medidas de asepsia y antisepsia: es decir se debe tener un ambiente apropiado para una cirugía en sala de operaciones.
2. Colocación de la articulación: en este paso se coloca la rodilla flexionada a 40 grados aproximadamente, para permitir la inserción del líquido para la distensión de la articulación, a través de un área a 1cm por encima del platillo tibial lateral.
3. Distensión de la articulación con solución salina: se realiza a través de una aguja número 15 se vierten aproximadamente 60-100mL de solución en la articulación.
4. Inserción del artroscopio: se realiza una incisión en el mismo lugar por donde se insertó la aguja por donde se introduce el artroscopio.
5. Conexión de fibra óptica: se conecta el cable de fibra óptica para la visualización en pantalla.
6. Empezar el recorrido: se inicia el movimiento del artroscopio.

La siguiente figura muestra el diagrama de flujo del procedimiento de artroscopia descrito previamente.

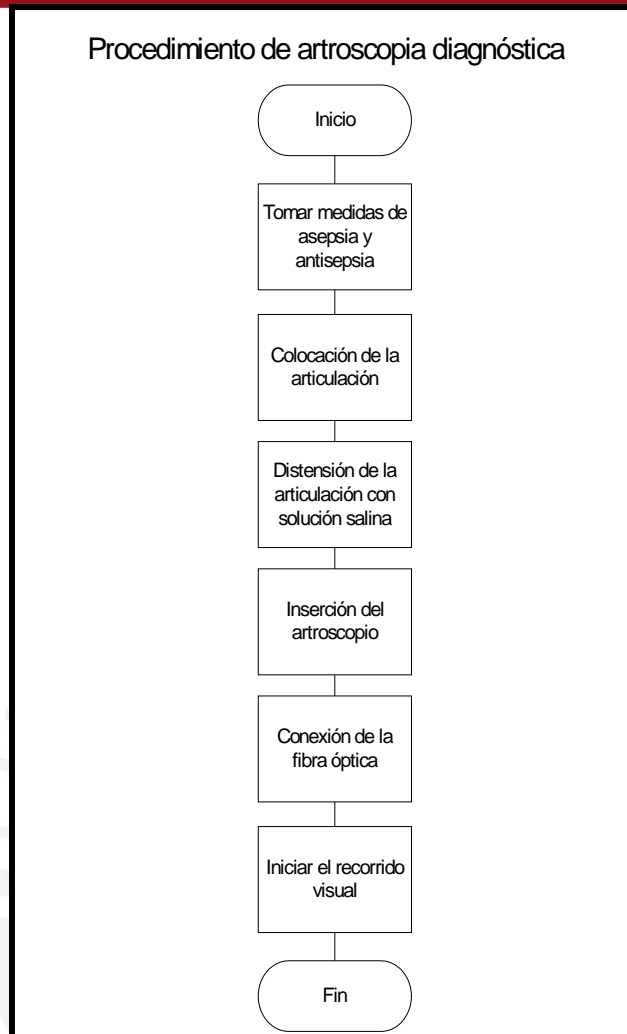


Figura 2.9. Procedimiento de artroscopia diagnóstica

2.7 Modelo teórico

Actualmente la artroscopia es usada en Perú con una demanda creciente de parte de los pacientes con problemas de rotura de ligamento cruzado. El problema principal que se quiere solucionar en cirugía artroscópica es la falta de precisión y exactitud de los médicos al realizar estas intervenciones.

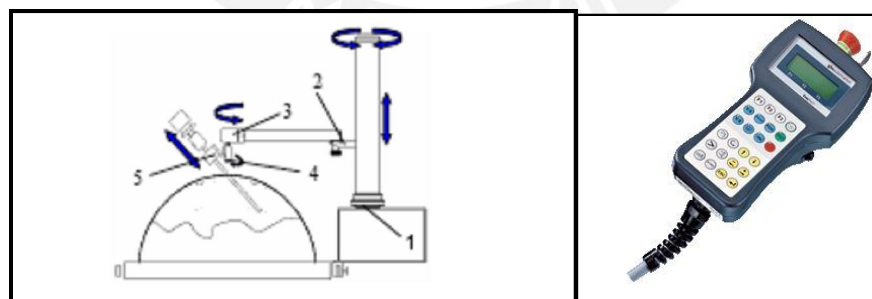
El especialista en artroscopia José Cortez, afirma que es complicado aprender artroscopia y que la pericia se logra con la experiencia, señala que una mejora de gran ayuda sería que el artroscopio sea flexible y así facilitar las maniobras con el y así llegar a espacio más reducidos, “definitivamente es complicado navegar dentro de la rodilla”, añade. Respecto a la automatización él manifiesta que debe hacerse de tal

manera que se pueda operar a una persona con rodilla estrecha, que sea posible identificar el punto de quiebre del artroscopio y conocer las maniobras en la rodilla (ver Anexo 2).

Una solución que permitiría a los médicos realizar una operación más precisa y más rápida es la automatización de alguna parte del proceso de cirugía. En este caso una alternativa es la automatización del sistema de visión, con lo cual es más fácil para el médico realizar la cirugía dentro del espacio de trabajo.

El sistema de visión para cirugía artroscópica tiene dos partes principales: la parte de control del sistema y el brazo robot encargado del control del artroscopio.

Las órdenes del cirujano se transmiten al brazo robot usando una paleta de programación, la cual, a través de un microcontrolador y actuadores eléctricos (que proporcionan mayor precisión), se encarga de llevar a cabo el movimiento del brazo robot. El brazo robot debe contar con al menos cinco grados de libertad, lo cual permitiría el movimiento dentro del espacio de trabajo, área de la articulación de la rodilla, donde el uso de los sensores de posición, proximidad, velocidad y cámara de video permiten la realimentación y control del sistema. Especialmente se deberá usar un sensor de fuerza para evitar el quiebre de la cámara debido a excesiva fuerza. Los elementos del sistema de artroscopia planteado se muestran en la siguiente figura.



a) Vista del sistema y grados de libertad b) Paleta de programación

Figura 2.10. Elementos del sistema de artroscopia planteado

El diagrama de bloques del sistema de artroscopia se muestra en la figura 2.11.

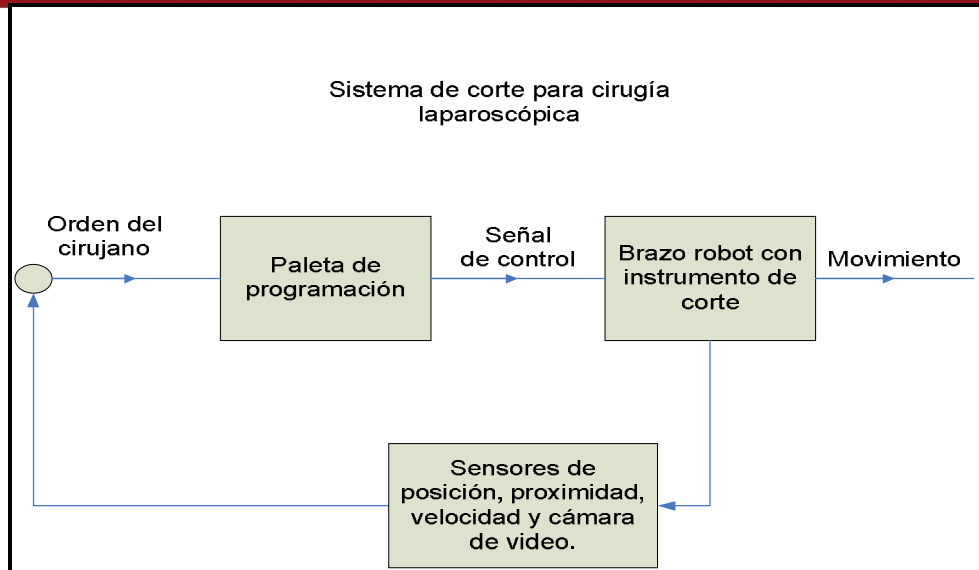


Figura 2.11. Representación gráfica del modelo teórico para artroscopia con asistente robótico

Este sistema es la solución planteada frente a la problemática de la cirugía robótica y la artroscopia, sin embargo un proyecto de tal envergadura escapa de los objetivos de este trabajo de tesis, los cuales son la simulación del procedimiento de artroscopia y el diseño del circuito que moverá un actuador del sistema.

2.7.1 Definiciones operativas

Para el control del sistema se debe proporcionar al robot variables que le permitan realizar el control de los movimientos que realiza, estas variables son:

- **Posición:** se usan dispositivos de realimentación para determinar si se ha conseguido la posición deseada o es necesaria una rectificación.
- **Velocidad:** permite controlar el comportamiento dinámico de los actuadores eléctricos del robot.
- **Proximidad:** indican la presencia del objeto y permiten medir distancias entre objeto y sensor.
- **Visión artificial (cámaras de video):** pueden detectar defectos superficiales, permiten el guiado del robot, así como la identificación de objetos.

Capítulo 3

Diseño del circuito de control y selección del actuador para el brazo robot

3.1 Introducción

En los capítulos anteriores se ha mostrado que la cirugía laparoscópica es una buena opción para los pacientes, ya que permite una recuperación post-operatoria más rápida debido al mínimo daño hecho al paciente. Sin embargo, la cirugía laparoscópica es un procedimiento complejo, principalmente por la observación indirecta del espacio de trabajo y el manejo restringido de los instrumentos de operación. También se ha mostrado otra forma de cirugía endoscópica: la artroscopia, que actualmente ayuda en el diagnóstico y tratamiento del problema de ligamento cruzado anterior y que desde los años 80 ha incrementado el uso de reconstrucción de este ligamento con técnicas mínimamente invasivas [1].

La necesidad de los pacientes de contar un servicio de cirugía de calidad, costo accesible y rápida recuperación motiva el presente trabajo de tesis. Por ello es importante plantear nuevas soluciones que cubran estos requerimientos. Según la teoría de cirugía robótica es posible confiar la complejidad de la cirugía en un robot, con lo cual la operación sería una mejor opción para pacientes y cirujanos. La robótica ya ha sido aplicada en cirugía en países de Europa y también en Los Estados Unidos con buenos resultados [2]. Sin embargo, las tecnologías desarrolladas tienen un costo elevado y no pueden ser usadas en nuestro país. En los países latinoamericanos como México ó Brasil se están desarrollando estas tecnologías en centros de investigación reconocidos, con un costo menor [17] [4], por ello es posible aplicarlas en Perú.

La cirugía robótica en el Perú está en su etapa inicial, un ejemplo de esto es la adquisición de un brazo robot cirujano por la Universidad Ricardo Palma. Además existen diferentes investigaciones en otras universidades, donde se desarrollan herramientas para diversas cirugías o para el entrenamiento de nuevos cirujanos. [18].

Por lo tanto, el primer objetivo de este trabajo de tesis es contribuir a la construcción de un asistente robótico para artroscopia. Este objetivo se realiza a través del diseño del circuito de control de un actuador para un brazo robótico capaz de manipular un artroscopio. De esta manera se busca mostrar la importancia del aporte de la

tecnología en el sector salud, para mejorar su calidad y disponibilidad para más personas. Además, se desea contribuir con el inicio de una nueva línea de investigación y desarrollo en cirugía robótica.

3.2 Hipótesis y objetivos

3.2.1 Hipótesis general

1. Dada la naturaleza de una cirugía artroscópica, donde los instrumentos deben ser usados con delicadeza y precisión a través de una pequeña incisión en la piel del paciente, se pueden satisfacer mejor sus exigencias automatizando el control del artroscopio en una artroscopia de diagnóstico.

3.2.2 Hipótesis secundarias

1. Dado que el artroscopio se manipula introduciéndolo por un agujero pequeño, se pueden programar movimientos para que el brazo pase por el punto de la incisión sin afectar la pared dérmica.
1. Dada la necesidad de un control preciso se seleccionan actuadores de acuerdo a las exigencias de artroscopia.
2. Dada la necesidad del control de los actuadores se diseñará un circuito de control para uno de ellos.

3.2.3 Objetivo general

1. El objetivo de este trabajo de tesis consiste en diseñar el circuito de control de un actuador del brazo robot que manipule un artroscopio para diagnóstico de lesiones en rodilla y simular el control de un artroscopio usando el brazo robot SCORBOT-ER V plus del laboratorio del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

3.2.4 Objetivos específicos

1. Identificar la problemática de la cirugía robótica en el Perú.
2. Estudiar del procedimiento de artroscopía diagnóstica
3. Analizar el procedimiento de artroscopía diagnóstica
4. Realizar una evaluación de actuadores del brazo robot para el control del artroscopio basado en las exigencias de cirugía artroscópica y el funcionamiento del robot SCORBOT-ER V plus y seleccionar los actuadores adecuados.
5. Diseñar un circuito de control para los actuadores seleccionados en este trabajo de tesis.

6. Simular el control de un artroscopio, durante una artroscopia de diagnóstico, usando el brazo robot SCORBOT-ER V plus.

3.3 Metodología

Este capítulo presenta la evaluación y selección de actuadores del brazo robot, los cuales se usan para el control del artroscopio. Se basa la selección en las exigencias de cirugía artroscópica y el funcionamiento del robot SCORBOT-ER V plus. Además, se presenta el diseño de un circuito de control para los actuadores seleccionados en este trabajo de tesis.

Se da inicio a este estudio primero definiendo las exigencias del proceso de artroscopia y definiendo el espacio de trabajo de un modelo de rodilla, para luego estudiar la estructura y finalmente diseñar el circuito de control de una de las articulaciones para el brazo robot para artroscopia.

La implementación de un brazo robot involucra un trabajo intenso de ingeniería mecánica, informática y electrónica; tal y como se expone en los trabajos: “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: control y potencia” [6], “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: modelado cinemática y dinámico” [18] y “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: diseño y selección” [19].

En los tres trabajos mencionados se exponen los métodos seguidos en la fabricación de un brazo robot, de igual manera este trabajo de tesis está orientado a ese mismo objetivo, por lo cual se enfoca en el diseño y selección de los actuadores (motores) del brazo robot. Para este fin se exponen los requerimientos de la artroscopia de rodilla y con ello se definen las exigencias del brazo robot en un procedimiento de diagnóstico artroscópico. Con los requerimientos bien definidos se puede realizar el diseño correspondiente a este trabajo de tesis diseño del control cinemático del brazo robot para artroscopia de rodilla.

Por otra parte, este trabajo de tesis también incluye una simulación del uso de un artroscopio, la cual se realiza utilizando el brazo robot SCORBOT-ER V plus en el laboratorio del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM). El objetivo de esta simulación es el de comprobar el cumplimiento de los requerimientos

de artroscopia de rodilla usando un brazo robot industrial, esta investigación servirá para definir las exigencias del brazo robot tales que cumplan los requerimientos de la artroscopia de rodilla.

3.4 Selección del actuador del brazo robot para artroscopia

Los parámetros que determinan la selección del actuador son mecánicos, de acuerdo al estudio de Barriga [18], en el cual se diseña la estructura de un brazo robot y se calcula el peso que el actuador moverá y la aceleración a la cual se desea que el robot se mueva, con lo cual se define el torque mínimo que el actuador debe tener. Sin embargo este trabajo de tesis no esta orientado al diseño de la estructura mecánica del brazo sino al diseño del circuito de control de un actuador para un brazo robot, además en vista de que no se cuenta con un diseño de la estructura no es posible definir el torque adecuado. Por esta razón se usan las características del brazo robot SCORBOT ER V plus como una referencia de las características del motor y luego se elige un motor del mercado con similares capacidades para realizar el diseño para dicho actuador seleccionado.

Por otra parte es necesario definir la articulación para la cual se elegirá el actuador, por ello se opta por la articulación de la muñeca, debido a que esta mueve la menor parte del brazo, lo cual facilita su adaptación a posibles cambios que se hagan al momento de diseñar la estructura del brazo robot para artroscopia.

3.4.1 Características del actuador del brazo robot SCORBOT

Los valores adecuados de las características del actuador del brazo robot SCORBOT se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Características del actuador del brazo robot SCORBOT [15]

Torque pico con el motor frenado mínimo	15 oz.in (1.0802 kgf.cm)
Potencia en torque pico mínimo	70W
Voltaje DC nominal	12

3.4.2 Actuadores del mercado

En el mercado se encontraron los distribuidores SUPERROBOTICA, LINXMOTION y HENNKWELL de los siguientes motores que cumplen con los requerimientos y cuyas características se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 3.2. Motores del distribuidor Superrobótica

	Torque pico con el motor frenado	Potencia en torque pico	Voltaje DC	Precio euros
S330120 MOTOR DC REDUCTOR 12V 120 RPM	8,87 kgf.cm	1500mA*12= 18W	12	22.46
S330125 MOTOR DC REDUCTOR 12V 200 RPM	8,87 kgf.cm	1500mA*12= 18W	12	20.65
S330142 MOTOR DC REDUCTOR 12V 253 RPM	10 kgf.cm	3800mA*12= 45.6W	12	27.46

Tabla 3.3. Motores del distribuidor Hennkwell

	Torque pico con el motor frenado	Potencia en torque pico	Voltaje DC	Precio
HG42KD - 3600rpm	1.1 kgf.cm	3.4A*12=40.8W	12	
HG42KD - 5000rpm	1.706 kg.cm	3.9mA*12=46.8W	12	
HG42KD - 10000rpm	3.040 kg.cm	27.7 ^a *12=332.4W	12	
HG42KD - 15000rpm	3.2 kgf.cm	46mA*12=552W	12	

Tabla 3.4. Motores del distribuido Linxmotion

	Torque pico con el motor frenado	Potencia en torque pico	Voltaje DC	Precio \$
PGHM01	8 kgf.cm	24W	12	36.95
GHM01	4.6 kgf.cm	1.4*12=16.8W	12	21.95
GHM02	8.8 kgf.cm	1.6*12=19.2 W	12	21.95
GHM12	10 kgf.cm	3.3*12=39.6 W	12	29.95
GHM16	5 kgf.cm	1.4*12=16.8 W	12	21.95

3.4.3 Descripción del actuador seleccionado

En la comparación se ve una gran variación en el torque de parada, se eligió el motor HG42KD de 3600 RPM cuyas características se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.5. Características del actuador seleccionado

Torque pico con el motor frenado	1.1 kgf.cm
Potencia en torque pico	3.4A*12=40.8W
Voltaje DC	12

3.5 Diseño del circuito de control

3.5.1 Circuito de control del actuador del brazo robot

De acuerdo a la aplicación para la cual se usará el motor, este circuito debe ser capaz de proporcionar un movimiento preciso y con un error mínimo al motor, por ello el circuito debe cumplir con los parámetros de la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Parámetros del motor seleccionado

1. Control del motor seleccionado.	Voltaje = 12V Corriente máxima=3.4A Potencia máxima=40,8W Torque=1.1kgf.cm
2. Precisión del movimiento del motor.	Tiempo de conmutación=2-100ms

Según los requerimientos del diseño y el trabajo titulado “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: control y potencia” [7] se presenta el diseño del circuito de control del actuador del brazo robot de este trabajo de tesis. Este diseño se basa en el uso de un puente H para controlar el giro del motor seleccionado anteriormente. Este circuito permite invertir el giro del motor a través del cambio de la polaridad del voltaje aplicado al motor. La siguiente figura muestra el circuito de control del actuador.

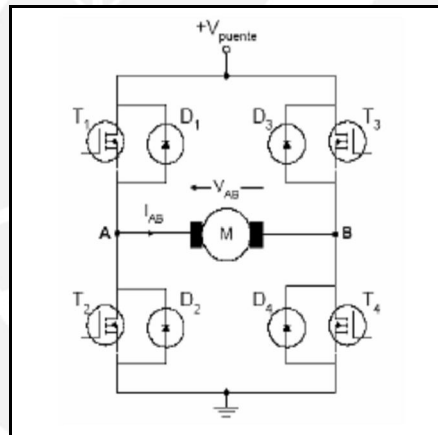


Figura 3.1. Circuito de control para el actuador seleccionado [6]

El diagrama esquemático correspondiente se muestra en la figura 3.2, en primer lugar se diseña el puente h para este actuador dada la corriente de 3.4A del motor seleccionado, por esta misma razón se eligen transistores IRF540. El circuito consta de dos partes principales: aislamiento entre las etapas digital y de potencia, y la etapa de potencia. La etapa de aislamiento consta de dos optoacopladores del circuito integrado ILD621 con tiempo de conmutación de 2 a 100ms adecuada para conseguir la precisión adecuada de un asistente robótico de cirugía [4] y para proteger la etapa de control, mientras en la etapa de potencia se encuentran los transistores y el actuador. Las resistencias de 1KΩ se eligen para el control del estado de los MOSFET y para la protección de exceso de corriente en los optoacopladores.

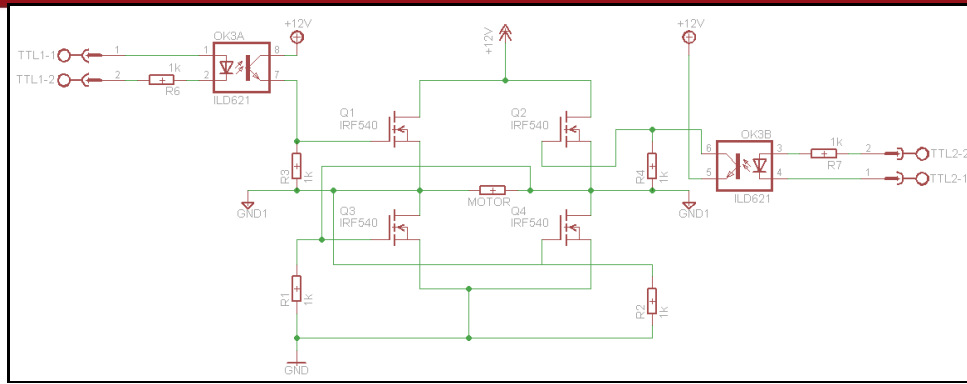


Figura 3.2 Diagrama esquemático del circuito de control para el actuador

En la siguiente tabla se detalla la lista de componentes del circuito de control.

Tabla 3.7. Lista de componentes del circuito de control

Cantidad	Descripción
4	Transistores tipo MOSFET IRF540
1	Circuito integrado ILD621
6	Resistencias de 1k para activación de los MOSFET y para los protección de los optoacopladores



Capítulo 4

Simulación del control del artroscopio usando el brazo robot

SCORBOT

4.1 Sistema de mando del brazo robot SCORBOT ER V plus aplicado al control del artroscopio

El sistema de mando brazo robot es el programa que es usado para controlar el brazo robot SCORBOT ER V plus, cuyo funcionamiento se resume en el diagrama de bloques de la siguiente figura.

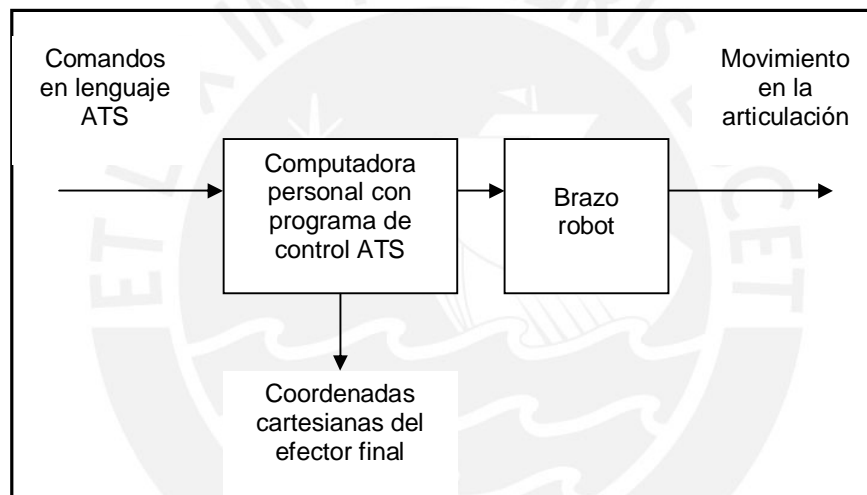


Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema de mando del brazo robot SCORBOT ER V plus usado en la simulación.

La razón para el uso de este sistema es la de programar los movimientos basados en trayectorias definidas por coordenadas, además de obtener los datos de posición del brazo robot SCORBOT para cada movimiento que se haga, de esta manera se puede verificar la precisión en el control del artroscopio.

4.2 Algoritmo de la simulación

La simulación busca comprobar que el brazo SCORBOT sea capaz de realizar el control de un artroscopio, y así validar el diseño de un brazo robot con similares características.

En la simulación del procedimiento de diagnóstico artroscópico el brazo robot SCORBOT realizará los movimientos del artroscopio durante la cirugía, cuyo procedimiento está basado en la experiencia expuesta por Jorge González Griego [11]. También se definirá el espacio de trabajo (dimensiones de la articulación de la rodilla) y se usarán herramientas que representan al artroscopio y al trocar (punto de entrada para el artroscopio).

El procedimiento de artroscopia diagnóstica se divide en cuatro partes: exploración de la bolsa supra-patelar, del compartimento medial, de la escotadura intercondílea y del compartimento lateral. En la simulación estas cuatro etapas serán: movimiento en la bolsa supra-patelar, en el compartimento medial, en la escotadura intercondílea y en el compartimento lateral.



La figura 4.2 muestra la simulación del procedimiento de artroscopia que se realizará.

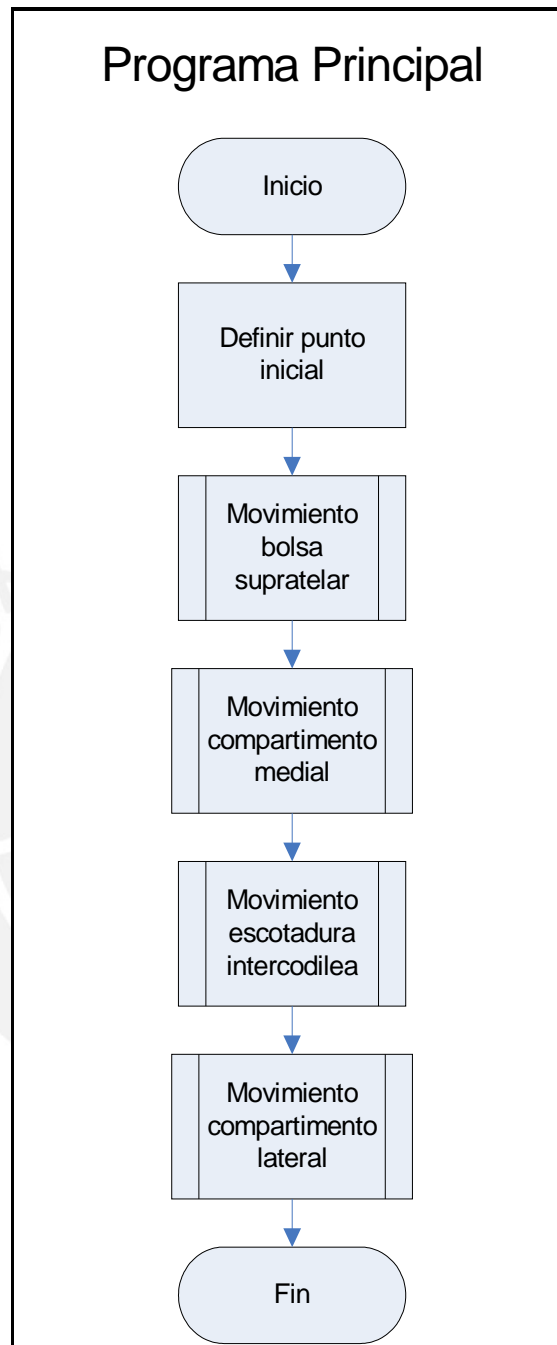


Figura 4.2. Diagrama de flujo del programa principal de la simulación del procedimiento de artroscopia diagnóstica

Además se ve en la figura 4.3 los diagramas de flujo correspondientes a los 4 movimientos de artroscopia que realizará el brazo robot.

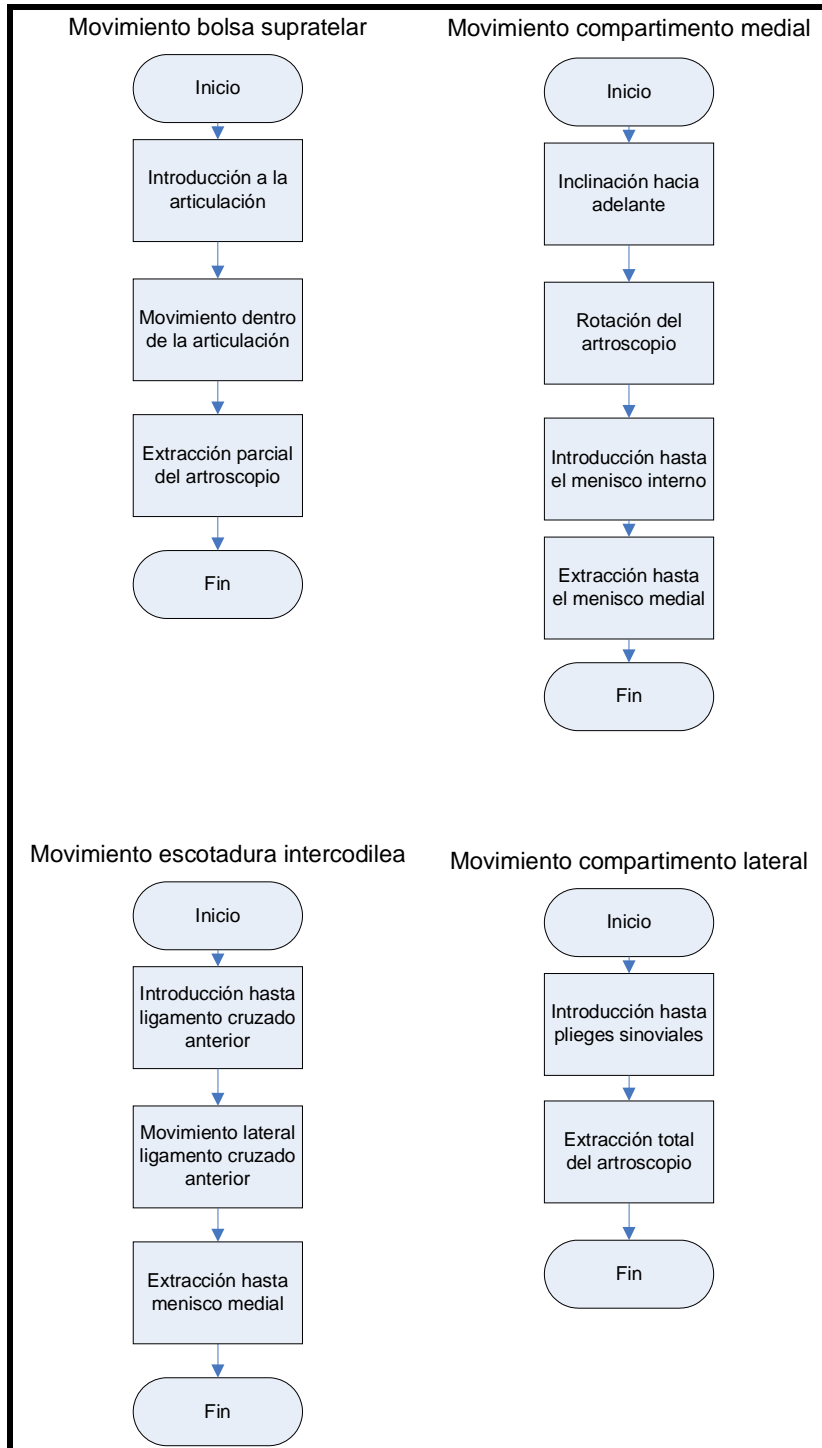


Figura 4.3. Diagrama de flujo de las subrutinas de la simulación del procedimiento de artroscopia diagnóstica

4.3 Simulación del control del artroscopio usando el brazo robot SCORBOT ER V plus

Espacio de trabajo de la simulación de control del artroscopio

Para realizar la simulación usando el brazo robot SCORBOT se define el espacio de trabajo donde se moverá el artroscopio controlado por el brazo. Se usa el trabajo realizado por el Grupo de Bioingeniería de la Universidad de Leeds (Inglaterra), de este estudio de articulaciones humanas sobre las dimensiones de la rodilla se toman medidas promedio, con las cuales se define el espacio de trabajo para la simulación [20]. En la figura 4.4 se muestran las dimensiones de distancia dentro de la articulación de la rodilla.

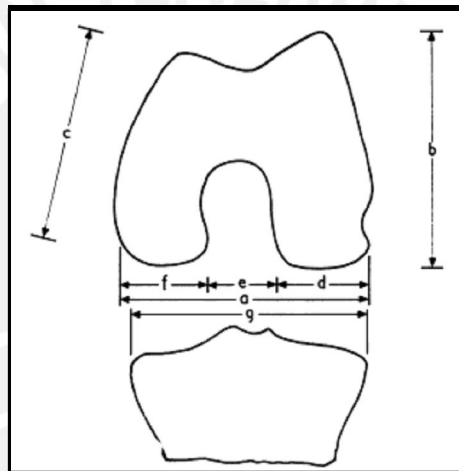


Figura 4.4. Dimensiones de la articulación de la rodilla [20]

Las dimensiones tomadas para la simulación son valores medios de las mediciones hechas en el trabajo mencionado, estos valores son presentados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Dimensiones de la articulación de rodilla

Parámetro	Medida [mm]
A	77
B	66.99
C	66.22
D	28.721
E	20.174
F	27.874
G	76

Modelo simplificado del espacio de trabajo y simulación del algoritmo de artroscopia diagnóstica

Para realizar la simulación de artroscopia diagnóstica el algoritmo de la simulación se simplifica definiendo tres movimientos: ingreso, horizontal y vertical, se asigna a cada movimiento un algoritmo programado en el brazo robot en base a estos tres movimientos.

En las siguientes tablas (4.2, 4.3, 4.4, 4.5) se muestran los algoritmos de cada etapa de movimiento: bolsa suprapatelar, compartimento medial, escotadura intercodilea y compartimento lateral. La descripción del movimiento es la forma descrita por el cirujano, mientras que el tipo de movimiento es la forma del movimiento programado con el brazo robot.

Tabla 4.2 Algoritmo del movimiento en la bolsa suprapatelar

Descripción del movimiento	Tipo de movimiento
1. Se introduce el artroscopio en la articulación	movimiento de ingreso
2. Introducción a la bolsa suprapatelar	movimiento vertical
3. Se mueve el artroscopio dentro de la bolsa suprapatelar	movimiento horizontal movimiento vertical movimiento vertical movimiento vertical
4. Se retira el artroscopio parcialmente de forma gradual hasta que se observa la superficie de la patela (rótula)	movimiento de ingreso

Tabla 4.3 Algoritmo del movimiento en el compartimento medial

Descripción del movimiento	Tipo de movimiento
1. Luego de observar la superficie de la patela se inclina el artroscopio hacia delante en busca del compartimento medial	movimiento horizontal movimiento vertical
2. Se introduce el artroscopio hasta visualizar el menisco interno	movimiento de ingreso movimiento de ingreso
3. Se retira el artroscopio hasta visualizar el menisco medial	movimiento de ingreso

Tabla 4.4 Algoritmo del movimiento en la escotadura intercondílea

Descripción del movimiento	Tipo de movimiento
1. Se introduce el artroscopio hasta visualizar el ligamento cruzado anterior	movimiento de vertical movimiento de ingreso
2. Se mueve el artroscopio lateralmente para ver completamente el ligamento cruzado anterior	movimiento horizontal movimiento horizontal
3. Se retira el artroscopio hasta visualizar el menisco medial	movimiento de ingreso movimiento vertical

Tabla 4.5 Algoritmo del movimiento en el compartimento lateral

Descripción del movimiento	Tipo de movimiento
1. Se introduce el artroscopio hasta visualizar los pliegues sinoviales	movimiento vertical movimiento de ingreso
2. Se retira gradualmente el artroscopio mientras se visualiza el resto del compartimento lateral	movimiento de ingreso movimiento vertical movimiento de ingreso

Para realizar la simulación se ha simplificado el espacio de trabajo para limitar el movimiento del brazo robot de acuerdo a las dimensiones de la articulación de la rodilla. Se realizó una consulta con el especialista en artroscopia Dr. José Cortez (ver Anexo 2), sobre el espacio de trabajo de la rodilla, revelando que este varía de paciente en paciente, es decir que el espacio de trabajo es variable. Con los datos anteriores se define el modelo simplificado en la siguiente figura:

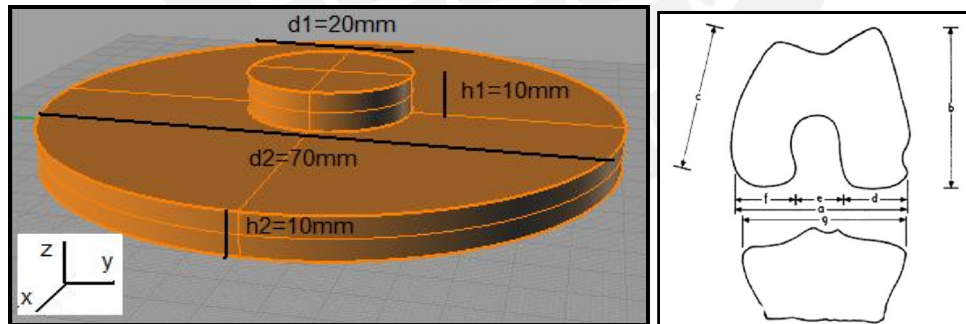


Figura 4.5. Modelo simplificado del espacio de trabajo

Usando este modelo los movimientos anteriormente definidos en el algoritmo se representan usando las coordenadas cartesianas con origen en el centro de la base del cilindro 2 ($d_2=70\text{mm}$).

Entonces se definen las coordenadas de la simulación en el modelo simplificado del espacio de trabajo, y usando los movimientos programados en la simulación 1 de

control del artroscopio se consigue realizar cada una de las etapas del algoritmo definido.

Primero se definió el punto de entrada para el artroscopio en la coordenada (0, 35, 0), a partir de donde se definen los movimientos del artroscopio realizados por el brazo robot usando los puntos por los cuales pasa el artroscopio. Las tablas (4.6, 4.7, 4.8, 4.9) muestran las coordenadas de la trayectoria de los movimientos en cada etapa del algoritmo descrito.

Tabla 4.6 Coordenadas para el movimiento en la bolsa suprapatellar

P0	(0,35,0)
P1	(20,0,10)
P2	(20,0,15)
P3	(20,0,5)
P4	(20,0,10)
P5	(20,10,10)

Tabla 4.7 Coordenadas para el movimiento en el compartimento medial

P0	(20,10,10)
P1	(0,10,10)
P2	(0,10,5)
P3	(0,0,5)
P4	(0,-10,5)
P5	(0,5,5)

Tabla 4.8. Coordenadas para el movimiento en la escotadura intercodilea

P0	(0,5,5)
P1	(0,5,15)
P2	(0,0,15)
P3	(-5,0,15)
P4	(0,0,15)
P5	(0,5,15)
P6	(0,5,5)

Tabla 4.9. Coordenadas para el movimiento en el compartimento lateral

P0	(0,5,5)
P1	(0,5,0.5)
P2	(0,-20,0.5)
P3	(0,5,0.5)
P4	(0,5,0)
P5	(0,35,0)

Finalmente usando estas coordenadas y los movimientos programados correspondientes se realiza la simulación del control del artroscopio con el objetivo de comprobar la precisión de un brazo robot de tipo serial al realizar esta tarea.

Simulación de control del artroscopio con el brazo robot SCORBOT

Para realizar la simulación usando el brazo robot SCORBOT, en la cual se realizarán movimientos propios de una artroscopia de diagnóstico, se debe utilizar la definición del espacio de trabajo del brazo que controlará el artroscopia vista en el apartado (3.1). En la siguiente figura se visualiza el sistema usado para la simulación, el cual esta compuesto del brazo robot y una computadora personal para usar el programa de control ATS.



Figura 4.6. Sistema usado en la simulación del control del artroscopio

Se verifica además que dadas las dimensiones del alcance del brazo robot (tabla 4.10) y el espacio de trabajo del modelo simplificado definido, este brazo debe ser capaz de realizar los movimiento dentro del espacio de trabajo; se enfocará la simulación en que los movimientos realizados puedan realizarse usando un artroscopio que pase por un punto fijo, tal como sería en una artroscopia real.

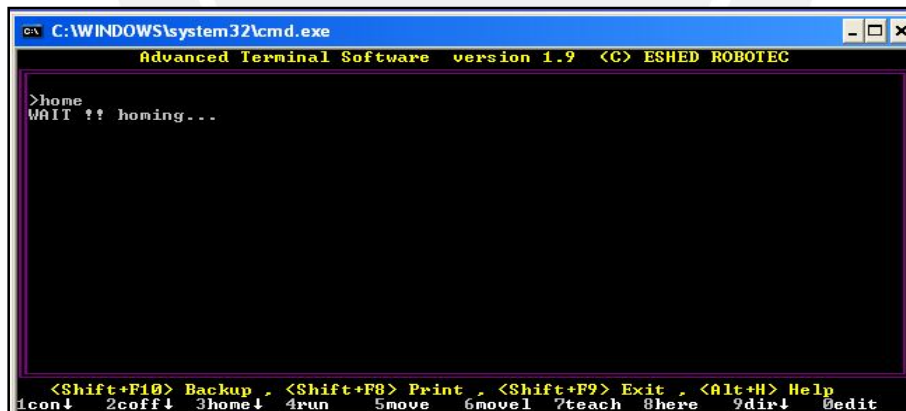
Tabla 4.10. Dimensiones de alcance del brazo robot SCORBOT que simula el espacio de trabajo del modelo de la articulación de rodilla

Parámetro	Medida [mm]
A	77
B	66.99
C	66.22
D	28.721
E	20.174
F	27.874
G	76

4.3.1 Descripción de la simulación y datos obtenidos

Para la simulación se manipuló el robot SCORBOT por medio del programa ATS, debido a que con él es posible obtener datos de la posición actual del brazo, y así comprobar la precisión de los movimientos durante la simulación.

El movimiento que el brazo robot realiza se enfoca en la punta del brazo (TCP o *tip of griper*) donde se ubicará el artroscopio. La figura 4.7 muestra la ventana del ATS al momento de iniciarla, así como la ejecución de la instrucción `home` para hacer que el brazo se ubique en su posición inicial.



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Advanced Terminal Software version 1.9 <C> ESHED ROBOTEC

>home
WAIT ?? homing...

<Shift+F10> Backup , <Shift+F8> Print , <Shift+F9> Exit , <Alt+H> Help
1con↓ 2coff↓ 3home↓ 4run 5move 6move1 7teach 8here 9dir↓ 0edit
  
```

Figura 4.7. Ventana de inicio de ATS. Comando `home` ejecutado.

En la figura 4.8 se muestra el brazo robot SCORBOT en su posición inicial

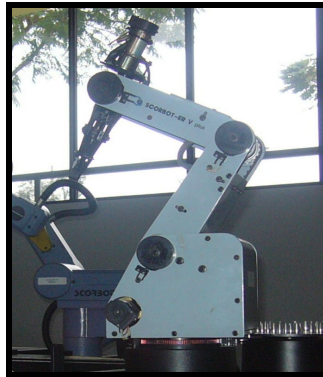


Figura 4.8. Posición inicial del brazo robot.

4.3.2 Movimiento del efector final del brazo robot

Dado que se quiere simular la manipulación de un artroscopio, los resultados del movimiento deben ser iguales a los movimientos realizados en una artroscopia realizada por un cirujano y con una precisión mayor que él.

Para verificar que en la simulación se cumplan estas exigencias se usan dos características del brazo robot SCORBOT ER V plus: el movimiento en coordenadas cartesianas y la información de posición de los actuadores.

El movimiento en coordenadas cartesianas es una característica del brazo que permite mover la punta del efector final en un sistema de coordenadas cartesianas. Para hacer uso de esta característica se usa el programa ATS en modo manual y en coordenadas XYZ (coordenadas cartesianas), cuyos ejes coordenados se muestran en la figura 4.9.

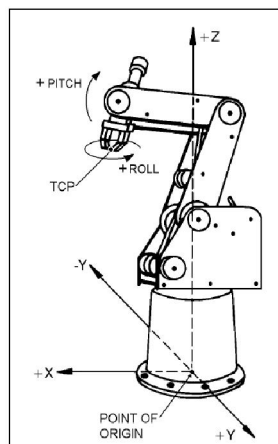


Figura 4.9. Sistema de coordenadas cartesianas del brazo robot SCORBOT ER V plus

El efector final del brazo robot SCORBOT ER V plus es la pinza, la cual se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10. Efector final del brazo robot SCORBOT: pinza

En la simulación se usará como herramienta el artroscopio, en este caso este está representado por un lapicero. Por otra parte la entrada a la articulación se representa con un anillo hecho de alambre, estas herramientas de modelamiento se ven en la siguiente figura.



Figura 4.11. Artroscopio y trocar simulados y modelados con un lapicero y un anillo de alambre.

Se usa el programa ATS para hacer que el brazo SCORBOT se mueva en el eje deseado usando los modos manual y edit del programa.

La información de posición de los actuadores se obtiene usando el comando `listpv` del programa ATS, con el cual se obtienen las posiciones de cada articulación y las coordenadas cartesianas XYZ del efector final del brazo. La información mostrada usando el comando `listpv` se muestra en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Información de coordenadas del brazo robot SCORBOT usando el comando `listpv`

Coordenadas de articulación (unidades de paso de cada motor)				
1: 0	2: 1791	3: 2746	4: 0	5: -1
Coordenadas cartesianas				
X: 1690	Y: 0	Z: 6011	P: -636	R: -1

Se usará la información en coordenadas cartesianas la cual se muestra en la tabla con ejemplos de valores para cada eje, donde los ejes X, Y, Z tienen unidades de décimas de milímetro y los ejes P, R de décimas de grado. De igual manera se usaron las coordenadas articulares para definir los programas en el modo edit.

4.3.3 Simulación realizada

Dado que el control del artroscopio lo realiza un cirujano, quien se guía de su experiencia para mover el artroscopio, no existen movimientos definidos para cada tipo de intervención quirúrgica sino que los movimientos se adaptan a la naturaleza de la cirugía. Por esta razón se define una secuencia de movimientos dentro del espacio de trabajo simplificado con la cual se realizará la simulación.

Una vez definidas las dimensiones y las partes se tiene un espacio de trabajo definido, entonces se pueden determinar movimientos simples, que permitan que el artroscopio explore la articulación formando movimientos más complejos. Se realizan simulaciones en modo manual (1 a 3) para definir los puntos inicial y final de los movimientos vertical, horizontal y de ingreso; además se realizan simulaciones en modo edit (4 a 6) para mover el artroscopio en una trayectoria definida. Luego de las simulaciones de movimientos básicos se pueden simular los movimientos de artroscopia usándolos para mover el artroscopio a través de la trayectoria definida por el algoritmo definido anteriormente.

Los instrumentos usados en la simulación son: artroscopio, trocar y el software Advanced Terminal Software version 1.9 (C) ESHED ROBOTEC. Los movimientos realizados son: ingreso, horizontal y vertical.

Simulación 1: ingreso en modo manual

Se logró hacer pasar el instrumento a través de un agujero, el instrumento debe estar en ángulo de 90 grados con la pinza, la pinza se mueve en línea recta. Las

articulaciones usadas son la 2 y la 3 (hombro y codo). La posición inicial ART0 se muestra en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Coordenadas de la posición inicial de la simulación 1.

ART0				
Coordenadas articulares				
1:21759	2:5086	3:-3920	4:-710	5:696
Coordenadas cartesianas				
X:-2616	y:1313	z:3823	p:-888	r:-3

Y la posición final ART1 es la mostrada en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Coordenadas de la posición final de la simulación 1.

ART1				
Coordenadas articulares				
1:21759	2:7976	3:-2722	4:-710	5:696
Coordenadas cartesianas				
X:-3415	y:1714	z:3783	p:-888	r:-3

Simulación 2: movimiento horizontal en modo manual

Se hace que el lapicero se mueva en el plano x, la pinza realiza un movimiento en línea recta, haciendo girar la cintura y la muñeca (articulaciones 1 y 5).

Las posiciones inicial ART2 y final ART3 se muestran en las tablas 4.14. y 4.15.

Tabla 4.14. Coordenadas de la posición inicial de la simulación 2.

ART2				
Coordenadas articulares				
1:21311	2:7152	3:-3190	4:-96	5:1289
Coordenadas cartesianas				
X:-3127	y:1791	z:3790	p:-884	r:213

Tabla 4.15. Coordenadas de la posición final de la simulación 2.

ART3				
Coordenadas articulares				
1:22274	2:7152	3:-3190	4:-1728	5:-343
Coordenadas cartesianas				
X:-3316	y:1409	z:3790	p:-884	r:-372

Simulación 3: movimiento vertical en modo manual

Para ver hacia arriba y hacia abajo se usan la articulaciones 2, 3 y 4, correspondientes al hombro, el codo y la muñeca del brazo.

La posición inicial ART4 se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.16. Coordenadas de la posición inicial de la simulación 3.

ART4				
Coordenadas articulares				
1:21762	2:5550	3:-4678	4:39	5:-137
Coordenadas cartesianas				
X:-3314	y:1661	z:3716	p:-604	r:-18

La siguiente tabla muestra la posición final ART5:

Tabla 4.17. Coordenadas de la posición final de la simulación 3.

ART5				
Coordenadas articulares				
1:21762	2:7582	3:-2872	4:-1185	5:962
Coordenadas cartesianas				
X:-3025	y:1516	z:3846	p:-1021	r:-40

Las simulaciones anteriores sirvieron para comprobar la realización de los movimientos requeridos, las siguientes simulaciones automatizan cada movimiento al crear trayectorias definidas por los cuales pasará el artroscopio, estas simulaciones son movimientos automatizados básicos usados para lograr los movimientos definidos de la simulación del control del artroscopio.

Simulación 4: movimiento de ingreso a la rodilla con trayectoria definida

Se define el vector de posiciones INGRESO [I] con el comando DIMP (modo editor) para grabar las posiciones de la trayectoria. Este es un comando de definición, cuando se escribe se ejecuta el comando pero no se crea línea de programa, ni en modalidad de edición.

El ingreso del artroscopio será de 8cm (800 unidades en coordenadas del brazo probablemente muy grande si se toma en cuenta que el movimiento será dentro de una rodilla, pero es una dimensión adecuada para visualizar el movimiento). La variación del movimiento en el eje X será de 80 para 10 pasos.

Las articulaciones modificadas en este movimiento son: el hombro (2) y el codo (3). El programa que guarda las posiciones en el vector es MOV1A

```

;----Program MOV1A----
SET      PIN = -2626
FOR      I = 1 TO 10
SET      PIN=PIN - 80
SETP     ING[I]=ART0
SETPVC   ING[I] X  PIN
SETPVC   ING[I] Y  1318
SETPVC   ING[I] Z  3824
SETPVC   ING[I] P  -883
SETPVC   ING[I] R  322
ENDFOR(2864)
PRINTLN  "vector creado"
END
  
```

El siguiente programa realiza el movimiento completo de ingreso y salida moviendo la pinza por la trayectoria definida.

```

;----Program INGR3----
SPEED    25
MOVED    ART0
MPROFILE PARABOLE
MOVES    ING 1 10
MOVES    ING 9 1
MOVED    ART0
END
  
```

Simulación 5: movimiento horizontal con trayectoria definida

Las articulaciones usadas son la cintura (1) y la muñeca (5). El movimiento es una línea recta en el eje Y del brazo robot. Las posiciones inicial y final son las mostradas en las tablas 4.18 y 4.19:

Tabla 4.18. Coordenadas de la posición inicial de la simulación 5.

ART2				
Coordenadas articulares				
1:21311	2:7152	3:-3190	4:-96	5:1289
Coordenadas cartesianas				
X:-3127	y:1791	z:3790	p:-884	r:213

Tabla 4.19. Coordenadas de la posición final de la simulación 5.

ART3				
Coordenadas articulares				
1:22274	2:7152	3:-3190	4:-1728	5:-343
Coordenadas cartesianas				
X:-3316	y:1409	z:3790	p:-884	r:-372

Se define el vector HOR[I] para grabar las posiciones de la trayectoria. El número de posiciones será variable pues depende de la diferencia entre los puntos inicial y final obtenidos de la simulación en modo manual.

Diferencia en la articulación 1: (Inicial-final) = 21311-22274 = -963

Diferencia en la articulación 5: (Inicial-final) = 1289-(-343) = 1632

Diferencia en la articulación 4: (Inicial-final) = -96-(-1728) = 1632

En esta simulación se usará el comando SETPV, y no el comando SETPVC, ya que se modificarán las coordenadas de articulación (*Joint coordinates*) del brazo robot y no las cartesianas. Se definirán 20 puntos para la trayectoria horizontal, el incremento en cada articulación será:

Articulación 1: +48

Articulación 2: -81

Articulación 4: -81

Haciendo esto se obtiene un punto final de la trayectoria diferente al obtenido en la simulación manual, lo cual no afecta la simulación por ser una diferencia mínima.

El programa que crea la trayectoria se llamará MOV2A, se usan dos variables para dar el valor actualizado para las articulaciones 1 y 5: H01 para la articulación 1 y H05 para la articulación 5.

```

;----Program MOV2A----
;Definición de posiciones para movimiento horizontal
DIMP     HOR[19]
;definición de variables locales
DEFINE   H01
DEFINE   H04
DEFINE   H05
DEFINE   IH
;proceso
SET      H01 = 21311
SET      H04=-96
SET      H05 = 1289
FOR      I H= 1 TO 19
SET      H01=H01+48
SET      H04=h04-81
SET      H05=H05-81
SETP     HOR[IH]=ART2
SETPV    HOR[IH] 1  H01
SETPV    HOR[IH] 2  7152
SETPV    HOR[IH] 3  -3190
SETPV    HOR[IH] 4  H04
SETPV    HOR[IH] 5  H05
ENDFOR
PRINTLN  "vector HOR creado"
END
    
```

El siguiente programa realiza el movimiento completo horizontal

```

;----Program HORI1----
SPEED    25
MOVED    ART2
MPROFILE PARABOLE
MOVES    HOR 1 19
MOVES    HOR 18 1
MOVED    ART2
END
    
```

Simulación 6: movimiento vertical con trayectoria definida

Los puntos inicial y final obtenidos con la simulación manual se muestran en las tablas 4.20 y 4.21:

Tabla 4.20. Coordenadas de la posición inicial de la simulación 6.

ART4				
Coordenadas articulares				
1:21762	2:5550	3:-4678	4:39	5:-137
Coordenadas cartesianas				
X:-3314	y:1661	z:3716	p:-604	r:-18

Tabla 4.21. Coordenadas de la posición final de la simulación 6.

ART5				
Coordenadas articulares				
1:21762	2:7582	3:-2872	4:-1185	5:962
Coordenadas cartesianas				
X:-3025	y:1516	z:3846	p:-1021	r:-40

El movimiento involucra los ejes 2, 3, 4 y 5. En este caso la trayectoria será de 39 puntos, definidos en el vector VER[39].

La variación en cada eje es:

Articulación 2: (Inicial-final) = 5550-7582 = -2032

Articulación 3: (Inicial-final) = -4678-(-2872) = -1806

Articulación 4: (Inicial-final) = 39-(-1185) = 1224

Articulación 5: (Inicial-final) = -137-962 = -1099

La magnitud de los pasos será

Articulación 2: +50

Articulación 3: +45

Articulación 4: -30

Articulación 5: +27

Para definir la trayectoria se usa el programa mov3a

```

;----Program MOV3A----
;posiciones
DIMP      VRT[ 39 ]

;var locales
DEFINE    V02
DEFINE    V03
DEFINE    V04
DEFINE    V05
DEFINE    IV

;proceso
SET       V02=5550; valores iniciales de art4
SET       V03=-4678
SET       V04=39
SET       V05=-137
FOR       IV=1 TO 39
SET       V02=V02+50
SET       V03=V03+45
SET       V04=V04-30

```

```

SET      V05=V05+27
SETP     VRT[IV]=ART4
SETPV    VRT[IV] 1 21762
SETPV    VRT[IV] 2 V02
SETPV    VRT[IV] 3 V03
SETPV    VRT[IV] 4 V04
SETPV    VRT[IV] 5 V05
ENDFOR
PRINTLN  "Vector VRT creado"
END
  
```

El programa que ejecuta el movimiento a través de la trayectoria definida es:

```

;----Program Vert0----
SPEED    25
MOVED    ART4
MPROFILE PARABOLE
MOVES    VRT 1 39
MOVES    VRT 38 1
MOVED    ART4
END
  
```

Luego de realizar las simulaciones de los movimientos básicos del algoritmo de artroscopia, se usan estos movimientos con trayectorias definidas para conseguir los movimientos de la simulación del control del artroscopio, estos movimientos se especifican en las siguientes figuras, las cuales representan el modelo de rodilla simplificado. En la figura 4.12 se muestran las partes de la rodilla en el modelo de rodilla simplificado usado en la simulación.

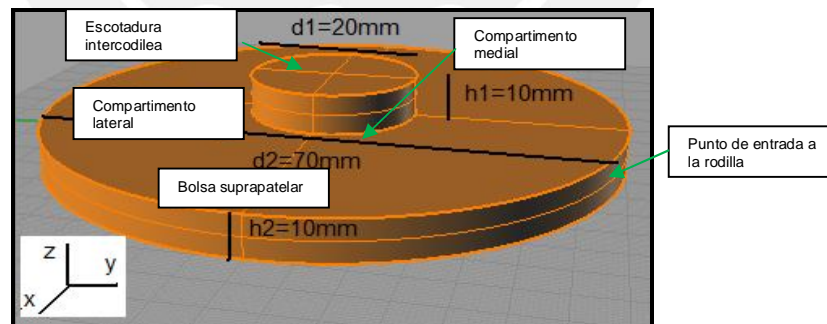
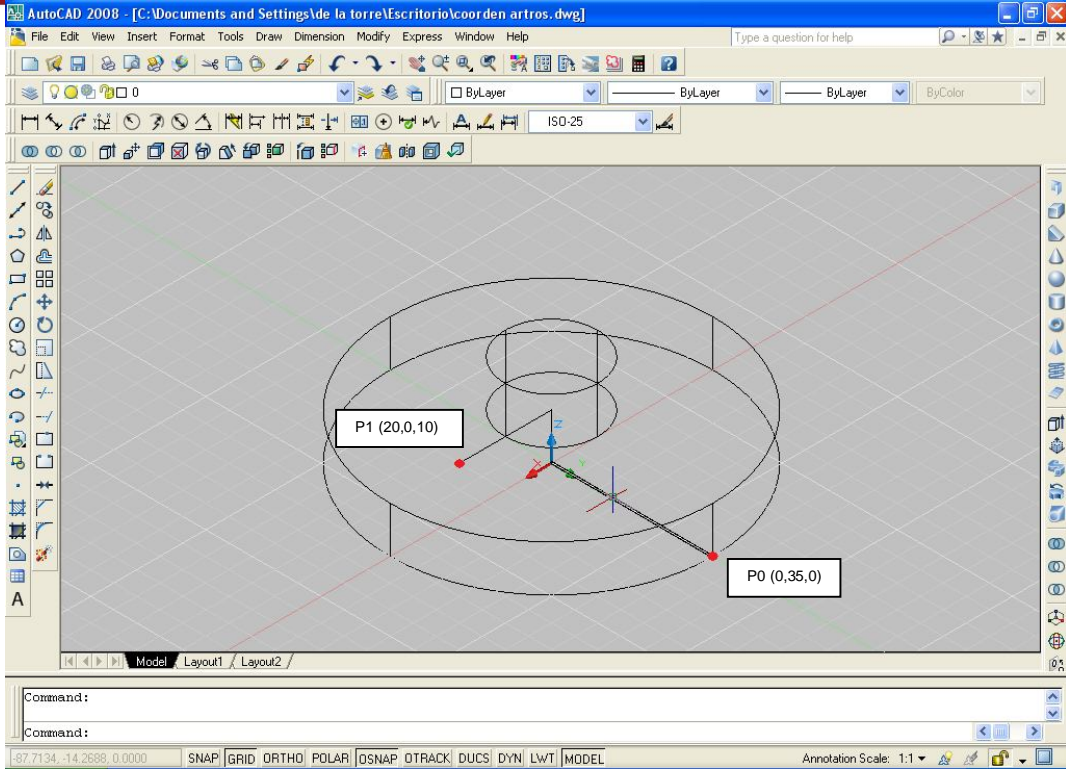
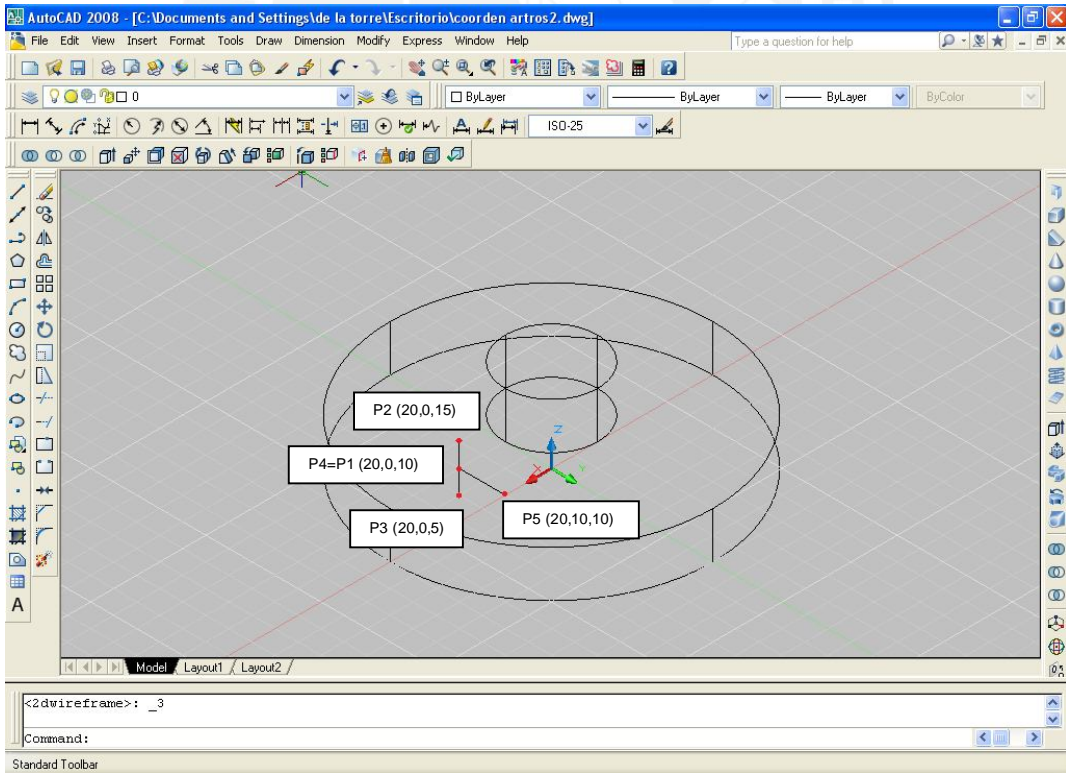


Figura 4.12. Modelo simplificado del espacio de trabajo.

Las coordenadas para el movimiento en la bolsa suprapatelar se muestran en la figura 4.13.



a)



b)

Figura 4.13. Trayectoria del movimiento en la bolsa suprapatelar. a) P0-P1. b) P1-P5

Las coordenadas para el movimiento en el compartimento medial se muestran en la siguiente figura:

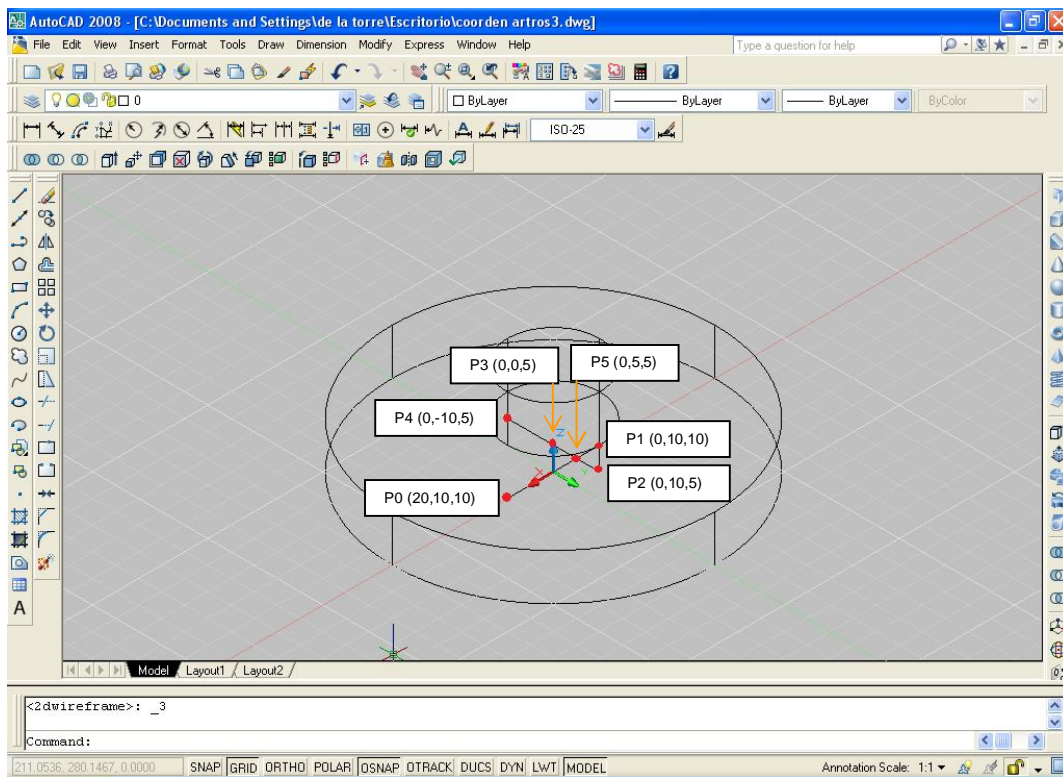


Figura 4.14. Trayectoria en el compartimento medial

Las coordenadas para el movimiento en la escotadura intercodilea se muestran en la figura 4.15.

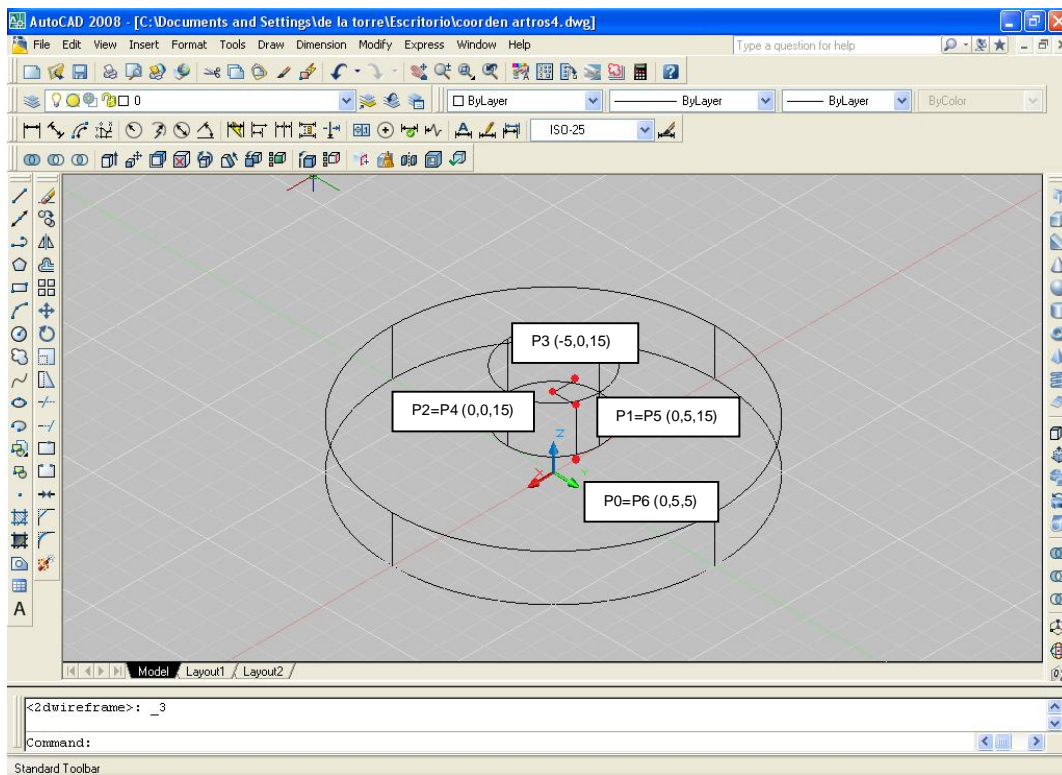


Figura 4.15. Trayectoria en la escotadura intercodilea

Las coordenadas en el compartimento lateral se muestran en la siguiente figura:

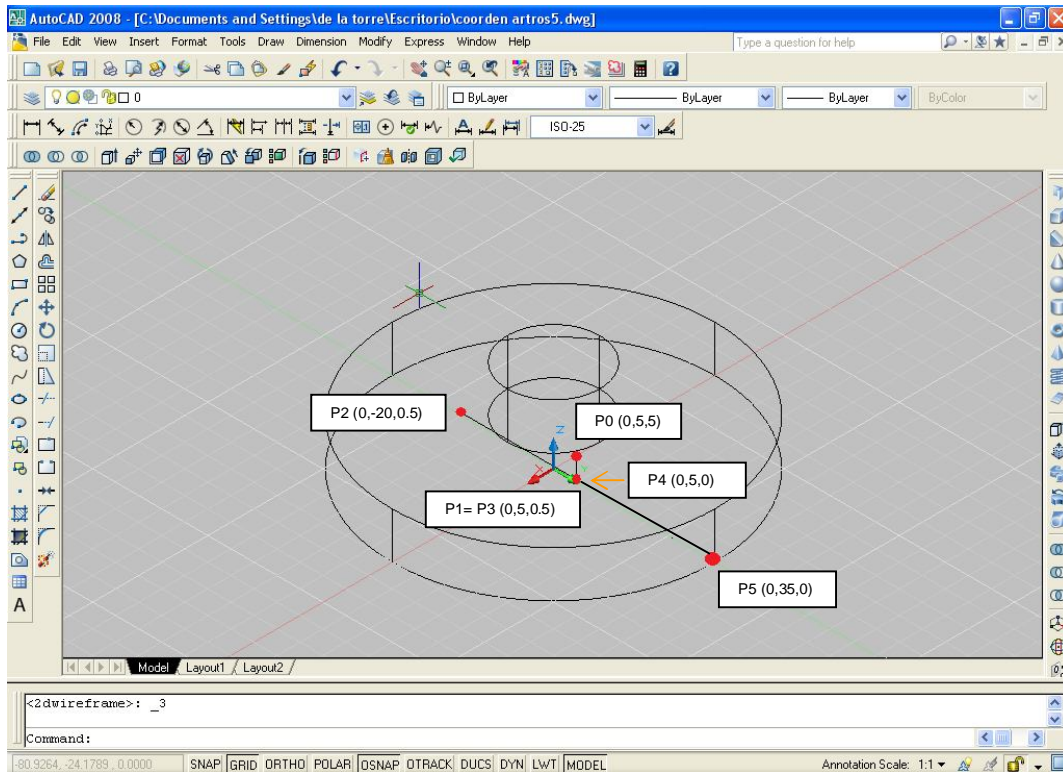


Figura 4.16. Trayectoria del movimiento en el compartimento lateral

Finalmente se usan estas coordenadas junto a los programas definidos anteriormente, con lo cual se tiene la simulación del movimiento de artroscopia. En el siguiente capítulo se exponen los resultados obtenidos con la simulación.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Resultados de la simulación del circuito de control

El objetivo del diseño del circuito de control es iniciar el diseño de la etapa electrónica del brazo robot definiendo una orientación para futuros trabajos, el diseño del circuito se probó usando el software SPICE. En la siguiente figura se muestra el diagrama esquemático del circuito creado usando SPICE:

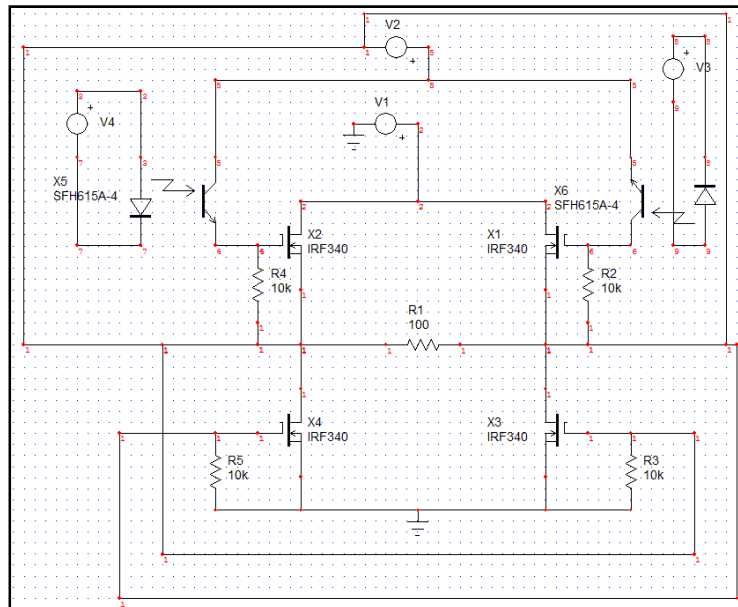


Figura 5.1: Circuito usado en la simulación del circuito de control diseñado.

La simulación proporcionó los siguientes resultados: en la tabla 5.1 se muestra el comportamiento del motor de acuerdo a las entradas digitales.

Tabla 5.1 Resultados del comportamiento del motor

TTL IN1	TTL IN2	MOTOR
0	0	Apagado
0	1	Giro
1	0	Giro inverso

Al realizar la simulación en SPICE se obtuvo la siguiente gráfica del comportamiento del motor:

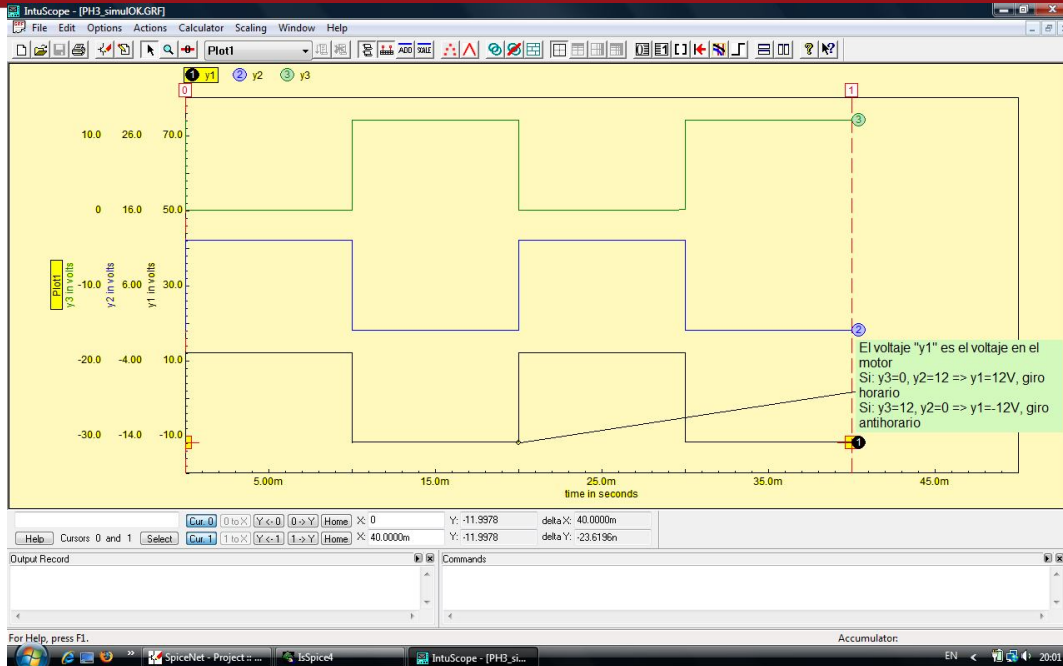


Figura 5.2 Simulación en SPICE del circuito de control de giro del motor

En la figura anterior la curva (1) es el voltaje que se aplica al motor y que depende de las entradas dadas por las curvas (2) y (3) de la forma señalada en la tabla 5.1. En la figura se aprecia que el voltaje en el motor cambia de +12V a -12V, lo cual indica la inversión de giro por cambio de polaridad del voltaje en el motor.

Se comprueba que el circuito hace posible controlar el giro del motor invirtiendo la corriente en el motor, el siguiente paso sería usar este circuito para el control de cada articulación, luego de lo cual se debe realimentar al controlador los datos de posición y velocidad de giro para comprobar la precisión del movimiento de la articulación.

5.2 Resultados de la simulación del movimiento del artroscopio

Los resultados de la simulación buscan justificar el uso de un brazo robot serial en una aplicación que exige precisión del movimiento, así como repetibilidad de movimiento con el mínimo error. Se realizaron los movimientos vertical, horizontal y de ingreso con el objetivo de medir la variación real que existe entre las coordenadas alcanzadas por el brazo luego de repetir 10 veces el movimiento. Las coordenadas registradas son las de la posición final en cada movimiento para 10 ocasiones, luego se toma el promedio de estos valores para cada articulación con lo que se obtiene el error de repetibilidad, es decir cuanto varía la posición final para una serie de movimientos de 10. La

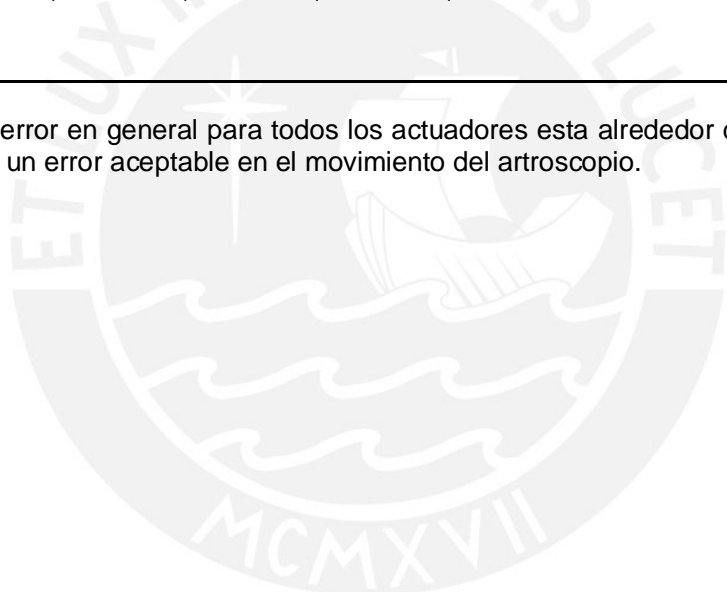
siguiente tabla muestra los datos obtenidos, el promedio y el error de repetibilidad en cada articulación. Las medidas son en unidades de encoder.

Tabla 5.2. Datos de las pruebas de repetibilidad.

Movimiento horizontal					
1	2	3	4	5	
22274	7152	-3190	-1728	-343	
22273	7155	-3190	-1722	-344	
22277	7152	-3199	-1723	-344	
22281	7153	-3193	-1726	-345	
22276	7152	-3192	-1719	-343	
22274	7156	-3190	-1727	-346	
22270	7157	-3196	-1728	-344	
22273	7155	-3193	-1727	-343	
22275	7154	-3192	-1728	-342	
22274	7153	-3190	-1727	-342	
22274,7	7153,9	-3192,5	-1725,5	-343,6	Promedio
2,907843798	1,791957	2,990726	3,100179	1,264911	Error
Movimiento vertical					
1	2	3	4	5	
21762	7582	-2872	-1185	962	
21766	7582	-2872	-1183	966	
21762	7582	-2870	-1183	964	
21763	7583	-2872	-1184	964	
21760	7580	-2873	-1185	963	
21764	7583	-2871	-1180	960	
21762	7583	-2871	-1182	961	
21763	7581	-2873	-1183	962	
21763	7582	-2170	-1183	964	
21764	7584	-2872	-1186	962	
21762,9	7582,2	-2801,6	-1183,4	962,8	Promedio
1,595131482	1,14	221,9235	1,712698	1,75119	Error

Movimiento de ingreso						
	1	2	3	4	5	
	21759	7976	-2722	-710	696	
	21755	7977	-2723	-710	696	
	21756	7978	-2722	-711	697	
	21757	7977	-2721	-712	696	
	21759	7978	-2720	-709	695	
	21758	7978	-2723	-710	694	
	21758	7978	-2721	-709	695	
	21757	7977	-2722	-711	697	
	21756	7975	-2723	-711	695	
	21759	7976	-2722	-710	697	
	21757,4	7977	-2721,9	-710,3	695,8	Promedio
	1,429840706	1,054093	0,994429	0,948683	1,032796	Error

Se ve que el error en general para todos los actuadores esta alrededor de 1%, lo cual representaría un error aceptable en el movimiento del artroscopio.

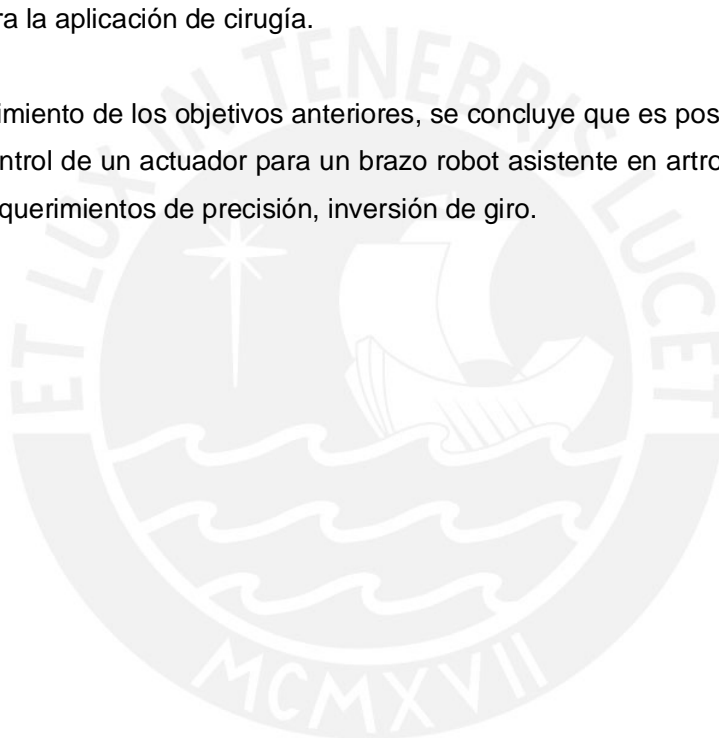


Conclusiones

En relación al objetivo del diseño de un circuito de control para un actuador del brazo robot, se comprobó que es posible controlar el giro de un actuador eléctrico, usando un circuito de inversión de giro basado en MOSFETS.

En relación a la simulación del procedimiento de artroscopia usando el brazo robot SCORBOT ER V plus, se comprobó que un robot de tipo serial puede ser usado como un modelo de asistente robótico para cirugía, debido a que el error obtenido al realizar los movimientos con el brazo robot SCORBOT es menor al 1%, una precisión adecuada para la aplicación de cirugía.

Con el cumplimiento de los objetivos anteriores, se concluye que es posible diseñar un circuito de control de un actuador para un brazo robot asistente en artroscopia, el cual cumpla los requerimientos de precisión, inversión de giro.



Recomendaciones

1. Al realizar un estudio de tecnología robótica como la automatización de artroscopia, es primordial definir completamente el proceso que se desea automatizar para definir las exigencias concretas del proceso.
2. Se debe realizar un estudio de la cinemática y dinámica del brazo robot SCORBOT, para determinar que tipo de control es necesario utilizar.
3. En este trabajo de tesis se presentan los procedimientos de cirugía artroscópica diagnóstica para poder analizar los subprocedimientos incluidos, que demostraron que en el diseño de un brazo robot es importante un trabajo interdisciplinario de ingeniería, donde ingenieros y médicos aporten con su experiencia para el diseño del robot de cirugía artroscópica.
4. Para escoger un determinado actuador en el diseño del brazo robot para cirugía artroscópica es necesario realizar un levantamiento de información de los diferentes actuadores en el mercado, de esta manera se puede elegir el más adecuado en función de las características del actuador de brazo robot SCORBOT. En este trabajo se eligió en base a una evaluación el actuador HG42KD de 3600 RPM de la marca HENNKWELL, debido principalmente a sus características de Torque pico con el motor frenado y Potencia en torque pico adecuados.
5. Además, de escoger el actuador ideal se debe prestar mucha atención en el diseño de un circuito de control, que será utilizado en conjunto con el actuador.
6. Para simular el control de un artroscopio, durante una artroscopia de diagnóstico, usando el brazo robot SCORBOT-ER V plus, fue necesario conocer antes el espacio de trabajo requerido y esto solo puede ser reconocido con apoyo de un especialista médico para validarlo.
7. La estructura del brazo robot SCORBOT-ER V plus determinó que tipo de actuadores y que tipo de simulación debían ser realizados, considerando la manipulación de la velocidad del robot manipulador.

Glosario

Artroscopia

1. f. Med. Exploración de las cavidades articulares mediante un artroscopio.

Artroscopio

1. m. Med. Endoscopio especial que se utiliza para explorar las cavidades articulares.

Pronóstico

4. m. Med. Juicio que forma el médico respecto a los cambios que pueden sobrevenir durante el curso de una enfermedad, y sobre su duración y terminación por los síntomas que la han precedido o la acompañan.

Robótica

f. Técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales.

Endoscopia

(De endo- y -scopia).

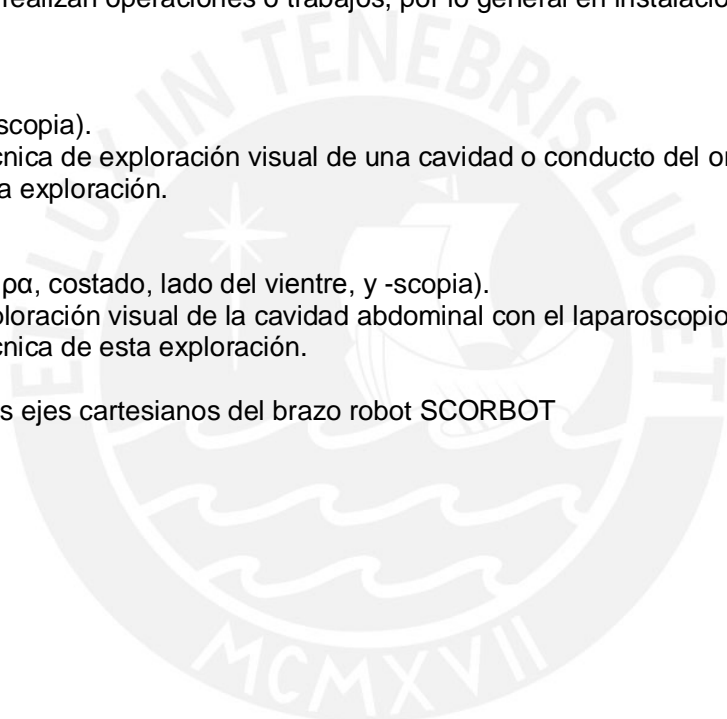
1. f. Med. Técnica de exploración visual de una cavidad o conducto del organismo.
2. f. Med. Esta exploración.

Laparoscopia

(Del gr. λαπαρά, costado, lado del vientre, y -scopia).

1. f. Med. Exploración visual de la cavidad abdominal con el laparoscopio.
2. f. Med. Técnica de esta exploración.

X, Y, Z son los ejes cartesianos del brazo robot SCORBOT



Fuentes

- [1] J. PAULOS ARENAS, D. FIGUEROA POBLETE. Cirugía Artroscópica, Boletín Esc. de Medicina, P. Universidad Católica de Chile, 1994
- [2] ALFREDO CÓRDOVA DUPEYRAT, GARTH H. BALLANTYNE, "Sistemas quirúrgicos robóticos y telebóticos para cirugía abdominal", Revista de gastroenterología del Perú, Vol. 23, Núm. 1, pp. 58-66, 2003.
- [3] TORRES, F.; POMARES, J.; GIL, P.; PUENTE, S. T., y ARACIL, R. Robots y sistemas sensoriales. Pearson Educación, S.A., Madrid, 2002
- [4] LORIAS E. D., A. MINOR M., "Asistente laparoscopico robótico", Centro de investigación y estudios avanzados del IPN. Departamento de Eléctricas Sección Bioelectrónica. XIII Taller IBERCHIP, pp. 129-130, 2007.
- [5] SIMAAN N., "Analysis and synthesis of parallel robots for medical applications", Master thesis. Israel. 1999.
- [6] MADRID, ERICKA P., TAFUR, JULIO C., ROBLES, SANDRA C., CURAY JULIO C. Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: control y potencia. Octavo congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. 2007.
- [7] DIRECCIÓN DE COMUNICACIÓN. Universidad de Piura. 1972.
- [8] NUÑEZ RIVERA, WALTER. Telemedicina. Universidad Nacional de San Agustín. 2000.
- [9] A. CUSCHIERI, T. G. FRANK, J.R. HEWIT, A.P. SLADE, "Intelligent interface considerations for surgical assist robotics", 1997 IASTED International conference on intelligent information systems (IIS '97), p. 75 - 79, 1997.
- [10] JOSÉ ZEVALLOS. "Ligadura endoscópica de várices de esófago con recursos de tecnología". Revista de gastroenterología del Perú, Vol 20, Núm. 1 (2000)
- [11] GONZÁLEZ GRIEGO, JORGE. Artroscopia de la rodilla: experiencia de un reumatólogo. La Habana. 1991.
- [12] HEALTHCARE PRODUCT COMPARISON SYSTEM."Laparoscopes", ECRI, 2001.
- [13] THE BRITISH UNITED PROVIDENT ASSOCIATION LIMITED,
http://hcd2.bupa.co.uk/fact_sheets/html/arthroscopy.html. ©1996-2008
- [14] Manual de mecánica industrial: autómatas y robótica, Tomo 3, 2002.

- [15] ESHED ROBOTEC INC., "Controller B ACL version 2.28 User's manual", ESHED ROBOTEC INC., 1999.
- [16] FU, K. S., Robótica: control, detección, visión e inteligencia, 1988.
- [17] A. MINOR, JL. MOSSO, A. DOMÍNGUEZ, RC. MARTINEZ, R. MUÑOZ, V.LARA, "Robot para cirugía laparoscópica", Revista mexicana de ingeniería biomédica, Vol. 23, Núm. 1 (2002), pp. 27-32.
- [18] UTILI, LUIGI; BARRIGA, BENJAMIN; DOMINGUEZ, DANIEL. Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: diseño y selección. Octavo congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. 2007.
- [19] NAVARRO, NADIA P., ROBLES, SANDRA C., PAULSEN, KURT F. Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: modelado cinemático y dinámico. Octavo congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. 2007.
- [20] B. B. SEEDHOM, E. B. LONGTON, V. WRIGHT AND D. DOWSON. Dimensions of the Knee. Radiographic and autopsy study of sizes required for a knee prosthesis. Bioengineering Group for the study of human joints, University of Leeds. 1972.

