



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIEROS INDUSTRIALES

MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA PROCESOS Y SISTEMAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA INVERSA Y
MINIMIZACIÓN DE ERRORES MEDIANTE
ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA UN ROBOT
HÍPER-REDUNDANTE**

Autor:

Muñoz González, Samuel

Tutores:

González Sánchez, José Luis

**Ingeniería de Sistemas y
Automática**

Herreros López, Alberto

**Ingeniería de Sistemas y
Automática**

SEPTIEMBRE — 2013

Agradecimientos, a mis tutores, familia y a todos los que me han apoyado y alentado, durante este tiempo, a llegar a la meta.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA INVERSA Y MINIMIZACIÓN DE
ERRORES MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA
UN ROBOT HÍPER-REDUNDANTE



ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	12
1.1 Introducción	12
1.2 Objetivos del trabajo	13
1.3 Estructura del trabajo	14
2 ESTADO DEL ARTE: SISTEMAS Y ROBOTS HÍPER-REDUNDANTES	16
2.1 Robots Híper-redundantes	16
2.2 Sistemas Endoscópicos	24
3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FUNCIONALES	30
3.1 Características generales de Robots Híper-Redundantes	30
3.2 Características geométricas	31
3.3 Descripción funcional	33
3.4 Espacio de trabajo	36
4 ANÁLISIS CINEMÁTICO	40
4.1 Planificación de movimientos	40
4.2 Análisis cinemático directo	42
4.2.1 Descripción de las variables internas	44
4.2.1.1 Ángulo alfa (α)	44
4.2.1.2 Ángulo theta (θ)	45
4.2.1.3 Altura (H)	46
4.2.1.4 Algoritmo implementado	47
4.3 Análisis cinemático inverso	50
4.3.1 Método Exhaustivo	51
4.3.2 Problemas NP-Hard	56
4.3.3 Robot híper-redundante 1D	57



5 MINIMIZACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACION	60
5.1 Método de error de optimización	60
5.1.1 Método de optimización continuos	63
5.1.1.1 Métodos de optimización continuos monobjetivo	63
a) Patternsearch	63
b) Globalsearch	66
c) GeneticAlgorithm	66
d) Multistart: fminunc	68
e) Simulannelbnd	69
5.1.1.2 Métodos de optimización continuos multiobjetivo	70
a) gaMO	70
b) NGSa	70
5.1.2 Método de optimización discretos	71
a) ACO	71
5.1.3 Método EOA dinámico	72
6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	76
6.1 Conclusiones	76
6.2 Futuras Líneas de Trabajo	77
7 BIBLIOGRAFÍA	80



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 robot de 6 grados de libertad</i>	16
<i>Figura 2.2 Robot manipulador Híper-redundante</i>	17
<i>Figura 2.3 Public Anemone</i>	18
<i>Figura 2.4 Snake Robot</i>	19
<i>Figura 2.5 Uncle Sam</i>	19
<i>Figura 2.6. Eslabón del robot serpiente</i>	20
<i>Figura 2.7 Serpiente robótica empleada en aplicaciones militares</i>	20
<i>Figura 2. 8 Robot biónico trompa de elefante</i>	21
<i>Figura 2.9 Robot bioinspirado</i>	21
<i>Figura 2. 10 a) mini-robot cámara b) mini-robot iluminación</i>	21
<i>Figura 2. 11 Brazo robótico sostiene el mini-robot pinza</i>	22
<i>Figura 2. 12 a) Modelado del robot-híper-redundante b) robot híper-redundante</i>	22
<i>Figura 2.13 Cápsula endoscópica intestinal</i>	24
<i>Figura 2.14 Sistema Da Vinci</i>	25
<i>Figura 2.15 Sistema endoscópico del Da Vinci</i>	26
<i>Figura 2.16 Sistema robótico Zeus</i>	26
<i>Figura 2.17 cápsula endoscópica robótica y su funcionamiento</i>	27
<i>Figura 2.18 robot endoscópico de patas ciliares</i>	28
<i>Figura 3.1 gusano de tierra</i>	30
<i>Figura 3.2 Configuración modular de un HRM</i>	31
<i>Figura 3.3 variables h y L del HRM</i>	32
<i>Figura 3.4 Diferentes relaciones entre h y L del HRM</i>	32
<i>Figura 3.5 Curva de histéresis</i>	34
<i>Figura 3.6 Repulsión y atracción de los módulos mediante EMAs</i>	34
<i>Figura 3.7 Numeración de los electroimanes en cada módulo</i>	35
<i>Figura 3.8 Diferentes configuraciones espaciales</i>	35
<i>Figura 3.9 grados de libertad de cada módulo</i>	36
<i>Figura 3.10 Área de trabajo creada por puntos aleatorios para diferentes HRRS según su tamaño</i>	37
<i>Figura 4.1 Diagrama de planificación de movimientos</i>	40
<i>Figura 4.2 Tabla de configuraciones posibles con 4 imanes</i>	42
<i>Figura 4.3 Tabla de configuraciones finalmente válidas</i>	43
<i>Figura 4.4 Distribución gráfica de las configuraciones válidas</i>	43
<i>Figura 4.5 descripción del ángulo alfa</i>	44
<i>Figura 4.6 descripción del ángulo Theta</i>	45
<i>Figura 4.7 Distribución gráfica de las configuraciones válidas</i>	46
<i>Figura 4.8 Diagrama de flujo de la cinemática directa</i>	49
<i>Figura 4.9 Ejemplos de robots VGT</i>	50
<i>Figura 4.10 Error normalizado de las diferentes configuraciones de un HRR (4gl) para el método exhaustivo</i>	52
<i>Figura 4.11 Diagrama de flujo para el método exhaustivo</i>	53
<i>Figura 4.12 Secciones de 45° sobre el plano XY</i>	54
<i>Figura 4.13 MCs para el primer módulo</i>	54
<i>Figura 4.14 Ejemplos de cinemática inversa: HRRSs mediante el método exhaustivo</i>	55



<i>Figura 4.15 La antena de coche se considera como dispositivo híper-redundante</i>	56
<i>Figura 4.16 Tabla comparativa de diferentes técnicas de resolución de cinemática inversa</i>	57
<i>Figura 4.17 Ejemplo de cinemática inversa de un robot 1D con el método exhaustivo</i>	58
<i>Figura 5.1 Pantalla principal del script EOA</i>	60
<i>Figura 5.2 Diagrama de flujo para el método EOA</i>	61
<i>Figura 5.3 Solución con Patternsearch para HRRs de 10 módulos</i>	63
<i>Figura 5.4 Solución con Patternsearch de 10 módulos con $\lambda=10$ y $\beta=1$</i>	64
<i>Figura 5.5 Solución con Patternsearch de 10 módulos con $\lambda=1$ y $\beta=10$</i>	65
<i>Figura 5.6 Solución con Patternsearch para HRRs de 30 módulos</i>	65
<i>Figura 5.7 Solución con globalsearch para 4(izq.) y 7(dcha) módulos</i>	66
<i>Figura 5.8 Solución con “ga” para 15 módulos</i>	67
<i>Figura 5.9 Solución con “ga” para 25 módulos</i>	67
<i>Figura 5.10 Solución con multistart para diferentes módulos y algoritmos</i>	68
<i>Figura 5.11 Solución con Simulannealbnd para robot de 10 módulos</i>	69
<i>Figura 5.12 Solución con NGSa II para robot de 10 módulos</i>	70
<i>Figura 5.13 Solución con gaMO para robot de 10 módulos</i>	71
<i>Figura 5.14 Solución con ACO para robot de 10 módulos</i>	71
<i>Figura 5.15 Solución con patternsearch para robot de 10 módulos</i>	72
<i>Figura 5.16 Solución con Simulannealbnd para robot de 10 módulos</i>	73

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



CÁPITULO 1.-

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.INTRODUCCIÓN

Los robots industriales tradicionales tienen una estructura antropomórfica que les permite realizar diversas tareas con los mínimos esfuerzos y una gran precisión en los movimientos y la aproximación al objeto deseado. Estos robots, muy extendidos en el mundo industrial, presentan limitaciones en sus movimientos derivados de la dificultad de esquivar ciertos obstáculos, realizar giros de gran amplitud o atravesar espacios de pequeñas dimensiones.

Con el fin de proponer soluciones tecnológicas válidas que superen las actuales limitaciones en este tipo de entornos y aplicaciones, se está trabajando en la mejora tecnológica de este tipo de robots mediante el empleo de técnicas de imitación del mundo animal.

Así, reproduciendo los movimientos de varios seres vivos, se están estudiando nuevos robots híper-redundantes capaces de realizar movimientos precisos y suaves en superficies irregulares y con obstáculos, mediante la reducción de los esfuerzos, evitando obstáculos ocasionales y eliminando singularidades indeseadas. Estos robots deben poseer también unas dimensiones reducidas para poder llegar a cualquier superficie por pequeña que sea, aspecto que los actuales robots son incapaces de cubrir.

Gracias a estas ventajas que presentan este tipo de robots, podrán ser empleados para la realización de movimientos en áreas de reducidas dimensiones con o sin obstáculos, como por ejemplo en cirugía médica, desastres naturales y operaciones de rescate e incluso en labores de exploración espacial.

Concretamente, en el campo de la medicina se han experimentado grandes avances tecnológicos relacionados con el empleo de sistemas robóticos, principalmente en el área de cirugía, rehabilitación, diagnóstico, tratamiento de enfermedades, toma medicamentos, prótesis y asistencia remota a los pacientes. Uno de ellos es el progreso en la imagen médica mediante la técnica de la endoscopia que permite la posibilidad de realizar un cribado, diagnóstico y en algunos casos tratamiento de ciertas amenazas para la salud.

El uso de este tipo de sistemas en la medicina ha introducido altas prestaciones con respecto a la reducción del trauma quirúrgico, los riesgos de infección y el tiempo de convalecencia. Sin embargo, esta técnica tiene todavía un gran margen de mejora siendo de gran interés el avance de sus capacidades de acceso, la óptica, la calidad de imagen y el desarrollo de nuevos materiales y métodos. Por lo tanto, una de las áreas de interés de investigación es el uso de endoscopios autónomos y semiautónomos. Estos pueden aportar grandes ventajas debido a su capacidad de moverse a lo largo de la cavidad hacia un punto de incomodidad del paciente para una observación más detallada, y también pueden reducir al mínimo el contacto con los tejidos y permitiendo una mejor orientación instrumento, superando con ello las limitaciones del endoscopio tradicional.



1.2.OBJETIVOS DEL TRABAJO

El trabajo que se presenta a continuación, forma parte un proyecto global para la obtención de un dispositivo robótico híper-redundante que permita llevar a cabo labores que a los robots tradicionales les serían imposibles, debido a sus limitaciones de tamaño, peso, rigidez, grados de libertad, etc., siendo especialmente apropiado para la realización de movimientos suaves en espacios reducidos.

El robot en cuestión debe moverse, partiendo de un extremo fijo, de forma que el extremo libre se posicione lo más cerca posible al punto deseado y a la orientación requerida. Por lo tanto, el sistema de control del robot debe ser capaz de determinar la ubicación espacial de su último componente a partir de los valores de los ángulos anteriores y de un punto conocido, haciendo uso de la cinemática directa. Además debe ser capaz de determinar los ajustes de cada elemento estructural con el costo mínimo de energía y mayor suavidad de movimientos, a fin de cambiar de la posición origen a la posición de destino mediante su cinemática inversa.

Los objetivos que se plantearon al comienzo de este trabajo fin de Máster, fueron los siguientes:

- Estudiar la definición del problema: relación entre mapeos y matrices de configuración.
- Revisar, analizar y mejorar la simulación de robots híper-redundante.
- Implementar un robot HRR unidimensional, de forma que permita la comprensión como problemas NP-duros y su posterior extrapolación al robot HRR de tres dimensiones.
- Implementar, estudiar y analizar el comportamiento del modelo HRR para métodos de optimización continuos y discretos.
- Aumentar la longitud del robot (incluyendo más módulos), manteniendo los requisitos equilibrados entre los errores de posicionamiento y de orientación.
- Implementar la función de coste óptima para algoritmos de minimización de error (EOAs).
- Emplear algoritmos de optimización multiobjetivo, desarrollando las funciones de coste más apropiadas, según se desee fomentar la precisión en el posicionamiento o en la orientación.
- Desarrollar métodos de optimización discretos (ACO).
- Testar el comportamiento del modelo HRR empleando una función de coste dinámica, entiendo en este sentido que los parámetros de ajuste alfa y beta son modificados en función de la variación del coste mínimo.
- Comparar todos los resultados de la cinemática inversa basándonos en el tiempo de procesamiento computacional, la posición y orientación.



1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Este documento asociado al trabajo fin de máster presente, consta de siete capítulos.

El primer capítulo es una breve introducción al problema, la motivación para el estudio y los objetivos propuestos para su consecución.

Posteriormente, en el capítulo dos, se detallan nociones básicas sobre robótica hiper-redundante y algunos prototipos y los sistemas endoscópicos, mediante el estudio del estado del arte.

Se describen, en el capítulo 3, las características geométricas, morfológicas y funcionales que relacionadas con este tipo de robots.

En el capítulo cuarto, se analiza ampliamente la cinemática de este tipo de robots. Comenzando por la planificación de movimientos, describiendo el problema del coste de la energía y la suavidad asociada con la selección de los movimientos realizados por el robot hiper-redundante. Siguiendo con la cinemática directa, que permite la simulación del robot para alcanzar un determinado punto final en el espacio, de acuerdo a las configuraciones de los módulos proporcionados por el usuario. También se aborda en este capítulo la resolución de la cinética inversa y especialmente el método exhaustivo, relacionando este último método con los problemas NP y los robots hiper-redundantes de una dimensión.

El estudio de la minimización de errores en posición y orientación de los HRRs se lleva a cabo en el capítulo 5 donde se analizan en detalle diferentes técnicas de optimización, tanto continuas como discretas. Además los resultados de estos métodos se comparan y se discuten en el propio capítulo.

Las conclusiones sobre los diferentes enfoques de cinemática inversa, su rendimiento y trabajo futuro se presentan en el capítulo 6.

Y finalmente, se aportan las referencias bibliográficas utilizadas para la realización del trabajo en el capítulo 7.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE: SISTEMAS Y ROBOTS HÍPER-REDUNDANTES



CAPÍTULO 2.-

ESTADO DEL ARTE: SISTEMAS Y ROBOTS HÍPER-REDUNDANTES

2.1. ROBOTS HÍPER-REDUNDANTES

Los robots híper-redundantes se basan en el principio mediante el cual se necesitan diseños con mayor número de grados de libertad (gl) para realizar una tarea concreta. El número de grados de libertad "necesarios" que hacen falta en un robot dependen de la tarea para la que fue diseñado originalmente. Por ejemplo, en un entorno de tres dimensiones, se requiere un robot de 6 grados de libertad (Figura 2.1) para llegar a un punto dado con una cierta orientación, mientras que un 6gl + robot (Figura 2.2) podría no sólo alcanzar el mismo punto con la misma orientación, sino también podría tener la capacidad de hacerlo de forma redundante, esto supone la posibilidad de hacerlo de más de una manera.

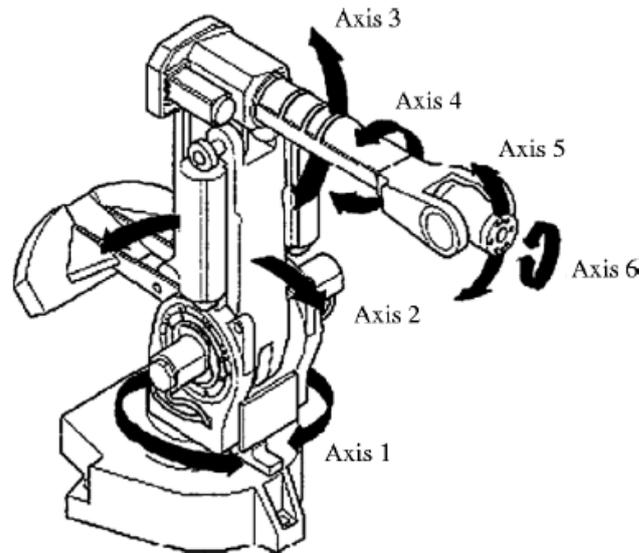


Figura 2.1 robot de 6 grados de libertad

La característica híper-redundante de este tipo de robots también proporciona una ventaja para el desplazamiento y la evitación de obstáculos en ambientes irregulares.

Los manipuladores híper-redundantes (HRMS) se pueden utilizar para muchas tareas de mantenimiento subterráneo como en tanques [SC01], ya que es más fácil para los robots con forma de serpiente inspeccionar/ reparar cualquier daño en componentes de estos escenarios. Se emplean también en cámaras cerradas de reactores nucleares [CB94], una vez más, debido a su flexibilidad para operar en entornos con limitaciones de espacio. Otras aplicaciones consisten en robots quirúrgicos con forma de serpiente [XS06], empleados también en la aeronáutica y la exploración espacial [WL02, SD04].

Por lo tanto, es de gran interés continuar el estudio y el desarrollo de nuevos métodos y aplicaciones para este tipo de robots, ya que las ventajas de moverse en ambientes

irregulares y con maniobrabilidad extrema es fundamental, entre otros, para el campo biomédico y más específicamente, para la endoscopia.

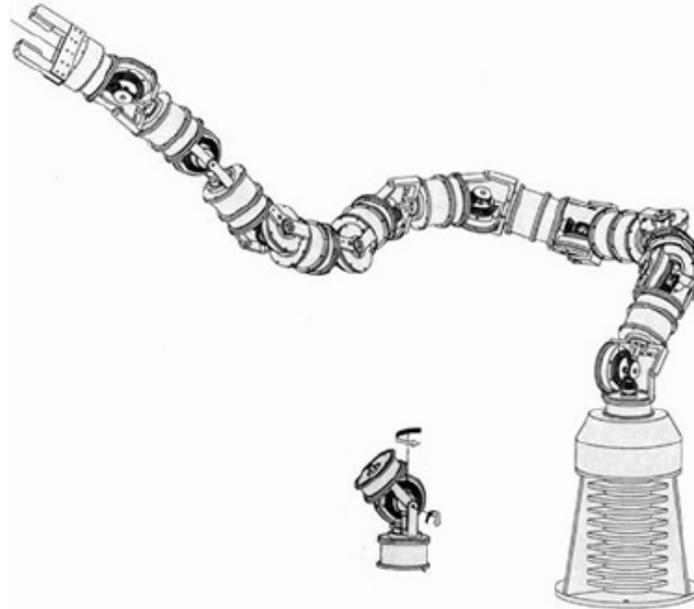


Figura 2.2 Robot manipulador Híper-redundante

Uno de los primeros intentos de incorporar los robots con forma de serpiente en aplicaciones endoscópicas se presentó por [SB95], que supuso un cierto éxito en la colonoscopia robótica: un robot gusano fue construido y ensayado en un tubo de uretano lubricado y flexible como un modelo de los intestinos humanos. Sin embargo, la rigidez de este tubo era mucho mayor que la que muestran los intestinos de cerdo en la fase de prueba de animales, por lo que el colonoscopio no pudo moverse hacia el tubo digestivo, según se deseaba.

Posteriormente, se propuso un control de orientación basado en sensores en un robot continuo para un colonoscópico semiautónomo [CP09]; que, de nuevo, tuvo poco éxito: sólo se probó en tubos y en 2012 estaba aún falta de probarse en animales. No obstante, estos dos casos son buenos ejemplos, del nivel de interés y de lo difícil que es implementar funciones endoscópicas en HRMS autónomos o semiautónomos.

Según [WL02]: "Las tareas para los futuros sistemas robóticos, van desde la exploración espacial a los dispositivos médicos, por lo que se requerirá de dispositivos y componentes simples y robustos, de peso ligero, de bajo coste, y fáciles de controlar. Se han propuesto sistemas binarios híper-redundantes para satisfacer esta necesidad. "

Tratando de cumplir con las características mencionadas en el párrafo anterior, se ha diseñado y desarrollado un robot híper-redundante modular controlado (HRRs) electromagnéticamente. El robot propuesto ha sido concebido teniendo en cuenta estas principales características:

- El manipulador híper-redundante debe ser modular, por lo que la adición o sustracción de módulos es relativamente fácil, permitiendo que el robot sea



escalable. Esta característica también proporciona la capacidad de alcanzar la longitud deseada.

- El modelo simulado debe ser capaz de operar con módulos de diferentes tamaños y mínimos parámetros entre módulos de distancia.
- Cuatro acoplamientos electromagnéticos se van a utilizar como actuadores para el control del HRM, ya que son una solución rentable energía y el problema de la conservación.

Los sistemas robóticos endoscópicos presentados en el apartado anterior son ejemplos de dispositivos que a día de hoy aún tienen fallos durante su movimiento en la superficie intestinal. La gran dificultad en la ejecución de los movimientos correctos y la obtención de dispositivos con dimensiones reducidas, son algunos de los conceptos más estudiados por los investigadores en los robots en desarrollo. Estos robots son capaces de reemplazar al endoscopio convencional y a la cápsula endoscópica. Sin embargo, ha habido problemas importantes en la creación de estos dispositivos robóticos debido a la naturaleza irregular, curvilínea y resbaladiza del intestino humano así como alrededor de la tripa. Sólo un dispositivo de peso ligero y tamaño pequeño es capaz de moverse a través de la superficie intestinal con suficiente habilidad para realizar movimientos angulares, es decir, garantizar una alta redundancia. Por lo tanto, la tendencia actual se refiere al estudio de robot endoscópico híper-redundante.

Los robots industriales tradicionales tienen una estructura antropomórfica que les permite realizar diversas tareas para las que fueron desarrollados. A pesar de su enorme importancia en el mundo industrial, tienen limitaciones en sus movimientos, incluso cuando se encuentran en lugares sin obstáculos. Con el fin de superar estas limitaciones actuales se desarrollan sistemas robotizados capaces de reproducir las características de los seres invertebrados que se encuentran en la naturaleza.

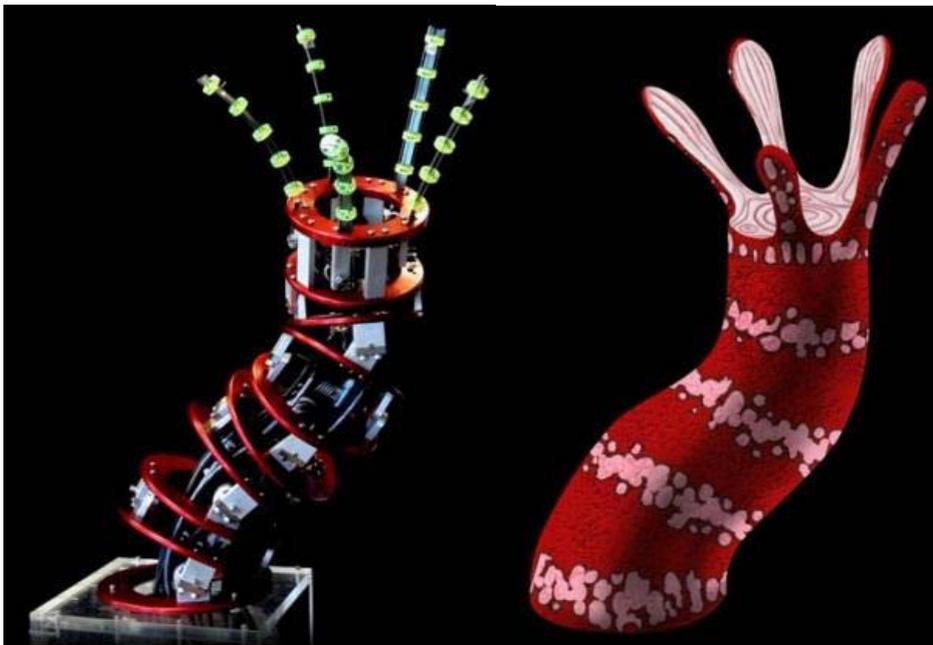


Figura 2.3 Public Anemone



Por lo tanto, se inició el estudio y desarrollo de robots inspirados en la biología, es decir, robots móviles basados en la imitación o la copia de la apariencia visual y el comportamiento de diferentes animales vertebrados o invertebrados. Hay algunos ejemplos bien conocidos, como el Sony Aibo perro robótico, robot escorpión, el robot serpiente, una salamandra robótica, el Public Anemone del MIT (Massachusetts Institute of Technology), entre muchos otros insectos y animales.

El Public Anemone del MIT (figura 2.3), inspirado en los primeros seres que habitaban la Tierra, es una criatura robótica que se ve que realizan movimientos orgánicos de una manera natural. Este dispositivo interactúa con el público a partir de un sistema de visión que cuando usted siente que su enfoque, retrocede como una serpiente.

Más allá de este tipo de seres bioinspirados hay una clase de robots desprovista de accesorios de movilidad (como las piernas, ruedas y otros miembros), designados apodos. Estos robots tienen características que les permiten moverse en superficies escarpadas, escalar, entrar en espacios confinados y agujeros, debido a su pequeño tamaño y la capacidad de adoptar múltiples formas. Tienen estructuras uniformes y un aspecto similar a los animales o insectos que carecen de los miembros, como las serpientes y gusanos. Los más conocidos son el "snake-robot", la "serpentina-robot", el "High-techAnakonda", el "OmniTread" y "elephanttrunk".

Estos robots tienen muchos grados de libertad redundantes, lo que les permite superar las limitaciones de los controladores convencionales en agujeros limitados y obstáculos. Un



robot es redundante si el número de grados de libertad es mayor que el valor mínimo para su funcionamiento. Por ejemplo, para posicionar la punta de la herramienta de un manipulador se requieren seis grados de libertad (tres grados a la posición y tres grados dirección) cuando el robot se excede este número mínimo de grados de libertad para la ejecución de una tarea se vuelve redundante.

Figura 2.4 Snake Robot

En este sentido, se han desarrollado varios sistemas híper-redundantes bioinspirados como los robots serpiente o los robots biónicos de trompa de elefante empleados en aplicaciones en las que la amplitud del movimiento y la flexibilidad son factores importantes.



El robot serpiente **Uncle Sam** [A] es un robot de movimientos suaves y complejos, que puede desplazarse a través de escombros y ubicar víctimas de un desastre. Este robot, trasladado y desplegado por un perro hasta un lugar conveniente, puede penetrar por las pequeñas aberturas y recovecos, posibilitando la ubicación de eventuales víctimas atrapadas entre los escombros.

Figura 2. 5. Uncle Sam



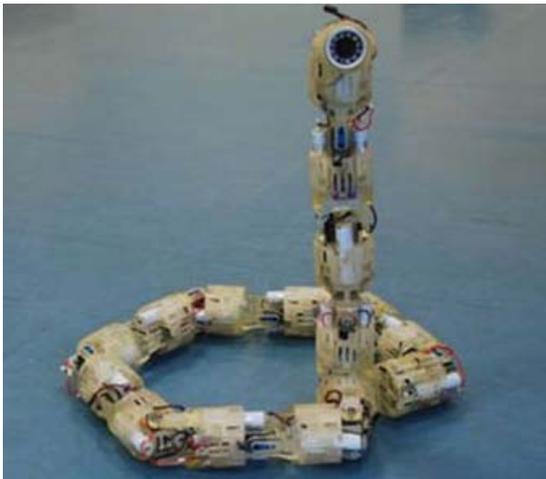
Está basado en los movimientos de una serpiente, movimientos de gran complejidad resultado de una serie de pequeños movimientos musculares sincronizados que permiten al animal desplazarse en todo tipo de terreno. El robot serpiente es una clase de mecanismo híper-redundante que consiste en eslabones con movimiento restringido, unidos en serie.



Figura 2. 6. Eslabón del robot serpiente

El movimiento se ha simplificado gracias a movimientos cíclicos de desplazamiento llamados gaits que ondulan las articulaciones del robot siguiendo un patrón de ondas sinusoidales. El robot puede seguir diversos gaits para que el robot sea capaz de atravesar una variedad de terrenos, incluyendo terreno plano, laderas, y tuberías.

La serpiente robótica [B] se ha desarrollado para aplicaciones militares como el rescate de rehenes o el acceso a zonas derruidas, dispone de la gran ventaja que el movimiento en forma de serpiente permite que el robot no sea detectado.



Imitando al movimiento natural de las serpientes se ha desarrollado un robot híper-redundante que, gracias a los enlaces que conforman su estructura puede realizar movimientos y giros de 360 grados, algo que otros robots no pueden realizar a la misma velocidad, mejorando una de las limitaciones de los actuales robots, la limitada maniobrabilidad que impide la no puedan recoger información de lugares de difícil acceso. Sin embargo, los robots serpiente permiten llevar a cabo estas tareas de modo sencillo.

Figura 2. 7. Serpiente robótica empleada en aplicaciones militares

Mediante la amplitud de movimiento y gracias a las cámaras que incorpora, una de alta definición y otra de infrarrojos, el robot puede transmitir imágenes y colocar sensores. Ambos aspectos permiten su aplicación para el control de la actividad en el interior de edificios o el seguimiento de cargas explosivas temporizadas.

Los robots biónicos que se asemejan a **la trompa de un elefante [C]**, han sido concebidos para su aplicación en aquellas situaciones en las que exista un contacto directo entre el brazo robótico y el ser humano, sin presentar ningún peligro para éste.

Este robot está basado en el empleo de nueve actuadores que mediante accionamiento neumático se desplazan a la longitud requerida, logrando que la herramienta de modelado y control llegue a la posición deseada. Gracias a este mecanismo de movimiento es posible lograr un alargamiento y una flexión de todo el brazo robotizado, de modo semejante al movimiento de la trompa del elefante. Con el fin de recuperar la forma inicial el robot posee unos potenciómetros de cable de acero que están unidos a la parte exterior de cada actuador.



Gracias a su estructura flexible y al reducido peso del diseño, el contacto directo entre el brazo robótico y el ser humano no representa peligro alguno para éstos. Para lograr este movimiento continuo y flexible se emplea una estructura con infinitos grados de libertad cinemáticos. Este hecho impide la actuación sobre grados de libertad individuales en estos robots.

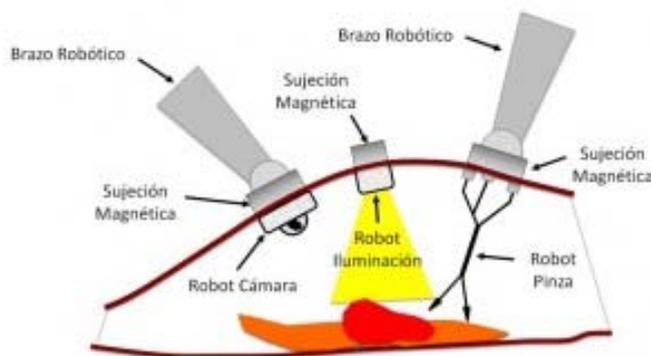
Con el fin de minimizar el número de actuadores, el brazo se ha diseñado de forma que la construcción permita disponer de varios grupos de grados de libertad mecánicamente acoplados. Estos grupos se denominan secciones y se emplean en lugar de los actuadores. Todo en su conjunto, el Robot biónico, consta de tres secciones dispuestas en serie con tres actuadores.



Figura 2. 8. Robot biónico trompa de elefante

Los brazos robóticos híper-redundantes, accionados por fuerzas electromagnéticas han sido desarrollados para su aplicación en intervenciones quirúrgicas en la región abdominal. Un ejemplo de ello es el robot del **proyecto Marcus** [D].

Este robot está compuesto por una serie de mini-robots quirúrgicos dirigidos desde el exterior del paciente con campos magnéticos controlados por brazos manipuladores. De



modo más concreto la plataforma robótica está compuesta por dos brazos robóticos y tres mini- robots: cámara iluminación y pinza, tal y como muestra la Figura 2.9. Dichos mini-robots están compuestos por una serie de imanes permanentes lo cuales, una vez dentro del abdomen, son sujetos a la pared abdominal gracias a los holder magnéticos que se encuentran situados en los extremos de los brazos robóticos.

Figura 2.9. Robot bioinspirado

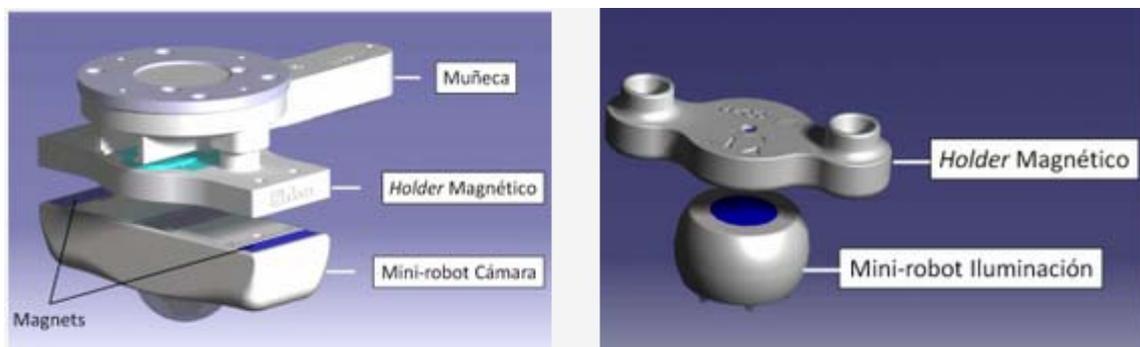


Figura 2. 10. a) mini-robot cámara b) mini-robot iluminación

Uno de los brazos robóticos es el encargado de manejar tanto el microrobot cámara como el de iluminación, de manera que puede cambiar de holder cada vez que el cirujano lo



requiera y llevar a cabo el guiado de los mini-robots a lo largo de la cavidad abdominal (ver Figura 2.10). Asimismo, la muñeca del brazo robótico está provista de un motor lineal el cual permite la reorientación de la cámara del mini-robot.

El segundo brazo robótico es el encargado de sostener el mini-robot pinza, brazo que también se encuentra provisto de una muñeca compuesta por dos motores los cuales permiten abrir y cerrar la pinza.

Con el fin de determinar el espacio intraoperatorio, se ha desarrollado un robot híper-redundante bioinspirado y accionado por fuerzas electromagnéticas, y de funcionamiento supervisado por un especialista capaz de analizar este espacio.



Figura 2. 11. Brazo robótico sostiene el mini-robot pinza

Estos robots se caracterizan por la realización de movimientos adaptados a las tareas necesarias para una intervención quirúrgica. Estos son:

- Movimientos hacia la izquierda, derecha, arriba y abajo de forma progresiva.
- Movimiento de barrido de la zona de trabajo.
- Movimiento hacia una posición de “home”.
- Parada del brazo híper-redundante durante el barrido.

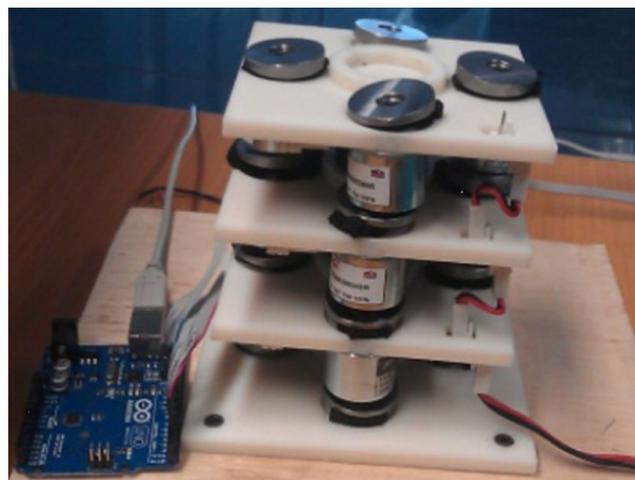
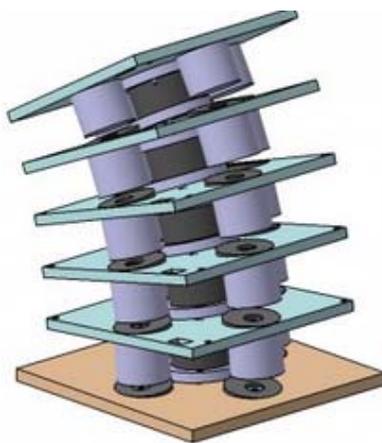


Figura 2. 12. a) Modelado del robot-híper-redundante b) robot híper-redundante

La realización de características modulares y comportamientos de la naturaleza permite un aumento considerable en el número de grados de libertad, haciendo que cada componente estructural sea redundante y por lo tanto el conjunto se llame híper-redundante.



Los robots híper-redundantes aparecieron por primera vez en los años 60 y así, varios estudios han tenido un desarrollo con un objetivo específico enfocándose hacia la tendencia de la conducta animal. Los sistemas robóticos híper-redundantes permitieron constituir robots más articulados operando en entornos más restringidos.

- La primera tendencia tiene que ver con la realización de tareas en el plano y en terrenos irregulares donde las serpientes eran la base de algunas de estas obras.
- El segundo enfoque señala características del tronco y de los tentáculos para aplicaciones industriales, ya que facilita que los robots tengan base fija o móvil para trabajar en cualquier entorno.

Estructuralmente, los robots híper-redundantes pueden proporcionar una estructura flexible continua, o una estructura que comprende módulos/vértebras. En el caso de estructura continua, el movimiento de la curva se produce en cualquier punto, ya que este espacio de la articulación del robot es infinito. Por lo general, estos robots están constituidos por un tubo elástico y secciones independientes de tendones en forma de disco que accionan el robot. Por el contrario los robots modulares, cuya curvatura se produce en varios puntos diferentes, soportan un gran número de articulaciones, unidas por ligamentos duros y pequeños. Algunos ejemplos son el robot serpiente, la trompa de elefante robot.

Para que los robots híper-redundantes ejecuten los movimientos que les permitan moverse, presentan en su composición actuadores de baja capacidad de carga, que a pesar de su elevado número, son económicas, proporcionando las competencias necesarias para el dispositivo robótico. El uso de actuadores de alta potencia optimizaría la capacidad de carga de un robot de este tipo, sin embargo, su gran número conduce a un alto coste, lo cual es poco ventajoso para aplicaciones en el dispositivo médico. Por esta razón, el modo de acción de tales sistemas de robot se puede realizar de dos maneras: por accionamiento a distancia o por accionamiento local de cada grado de libertad.

El accionamiento local hace que el sistema robotizado se convierta en un sistema muy pesado y voluminoso debido a la utilización de motores de servicio pesados como los actuadores hidráulicos lineales. La solución en este tipo de problemas es el uso de los músculos artificiales en los sistemas que no utilizan altas cargas, que contienen baja relación de fuerza-volumen. Sin embargo, la actividad de los robots híper-redundantes remotos y su utilización de motores eléctricos accionados por cables (tendones) que transmiten la fuerza a la estructura garantizando un mecanismo robótico de peso ligero, poco voluminoso y sin actuadores fijos. La complejidad de aumenta con el aumento del número de grados de libertad.

Una forma de reducir la limitación de carga de los robots híper-redundante es utilizar actuadores binarios simples, de bajo coste y alta capacidad de carga. Este tipo de operación es adecuada para robots tienen muchos grados de libertad, es decir, muchos actuadores, reduciendo así el coste del robot.

Desde el punto de vista cinemático los robots híper-redundantes presentan una gran versatilidad que permite resolver tareas mediante la reducción de los esfuerzos, evitando obstáculos ocasionales y eliminando singularidades indeseadas. El control de estos sistemas robóticos implica modelos matemáticos complicados, esta complejidad es directamente proporcional al número de grados de libertad.



[A] <http://www.chw.net/2013/04/disenan-robot-serpiente-para-labores-de-busqueda-y-rescate/>

[B] <http://www.elmundo.es/elmundo/2013/03/26/ciencia/1364298682.html>

[C] <http://www.isys.uni-stuttgart.de/forschung/mechatronik/fluid/BHA/index.en.html>

[D] <http://www.roboticamedica.uma.es/marcus/?project=robot-hiper-redundante>

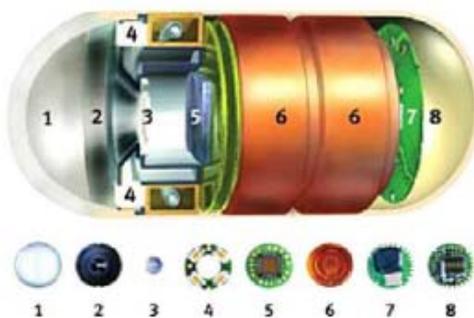
2.2.SISTEMAS ENDOSCÓPICOS

La endoscopia es un método que captura imágenes en el interior del cuerpo humano o animal, en un dispositivo electrónico para la realización y/o apoyo de diagnóstico. Este método se centra principalmente en su aplicación en el cuerpo humano, que a día de hoy es para muchos, un diagnóstico más que temido por los peligros que ello conlleva.

En este apartado se ha introducido el concepto de endoscopia y teniendo en cuenta la versatilidad que presentan los HRRs, un campo que se presenta como propicio para su empleo, es el médico y en concreto, el área endoscópica. Es por ello que a continuación, se comentan métodos existentes en la endoscopia tradicional aplicada a la medicina, más específicamente el intestino humano, y finalmente, se analizarán algunos de los sistemas robóticos endoscópicos más ampliamente utilizados, así como algunos prototipos en fase de desarrollo. Dentro del campo médico han surgido grandes avances para facilitar el diagnóstico y el tratamiento de patologías del interior de los órganos o cavidades, incluso con el trauma quirúrgico. La forma de intervención se lleva a cabo a través de la utilización de un instrumento, endoscopio, haciéndolo deslizar, esencialmente, por orificios naturales, y en algunos casos, es necesario realizar una o más incisiones en el tejido.

Las características requeridas para los robots endoscópicos pueden ser extrapolables a gran variedad de aplicaciones (desastres naturales, operaciones de rescate e incluso en labores de exploración espacial). Esto los convierte en una buena base de trabajo para el desarrollo de nuevos HRRs para estas o futuras necesidades. Por este motivo se ha incluido en este capítulo un estudio de los sistemas endoscópicos actuales, ya que el presente trabajo fin de Máster, puede trabajar en ambas vertientes en función del tamaño final del prototipo.

En línea con los citados avances, se dispone de la **cápsula endoscópica** como sistema robótico puede traer grandes beneficios a uno de los exámenes médicos más temidos y más difíciles de realizar debido a la naturaleza del tracto digestivo.



- 1- extremidad óptica
- 2- soporte de lente
- 3- lente óptica
- 4- LEDs
- 5- cámara CMOS
- 6- baterías
- 7- transmisor ASIC
- 8- antena.

Figura 2.13 Cápsula endoscópica intestinal



Los diagnósticos endoscópicos mediante sistemas robóticos están comenzando a ser utilizados como instrumentos quirúrgicos por profesionales de la salud. Estos sistemas pueden llevar a cabo exámenes laparoscópicos con un mínimo trauma para el paciente y también para reducir el riesgo de la fatiga del médico.

El **sistema Da Vinci** robótico se utiliza en un sistema que combina la cirugía robótica, cirugía mínimamente invasiva, con el uso de un dispositivo robótico. Esto permite que el cirujano trabaje en una consola que manipula los brazos robóticos del sistema y muestra las imágenes en alta definición y tridimensional (3D) del campo operatorio con un aumento de hasta 600 veces obtenidos a través del endoscopio. Estas características son prácticamente imposibles en la práctica de la cirugía mínimamente invasiva tradicional, donde el cirujano tiene una pérdida significativa de la sensación de profundidad, la sensibilidad al movimiento, y limitaciones en el número de movimientos.

El Hospital de la Luz fue pionero en el uso del sistema robótico en Portugal, actualmente se utiliza como plataforma para las cirugías robóticas mínimamente invasivas más avanzados en el mundo.



Figura 2.14 Sistema Da Vinci

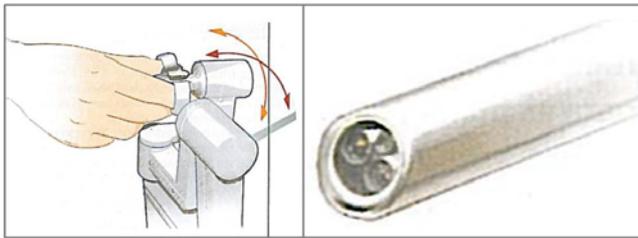
Este sistema robótico tiene cuatro componentes principales:

1. Una torre de control
2. Un sistema de imagen de alta definición en tres dimensiones
3. Un cuerpo con los brazos robóticos
4. Una consola quirúrgica en la que la operación se lleva a cabo mediante la manipulación de los mandos que dirigen los brazos robóticos.



Cabe destacar que después de la colocación de los brazos en el campo operatorio, éstos están sincronizados en tiempo real con los controles del cirujano. Por lo tanto, el sistema robótico realiza los movimientos del cirujano. Este sistema ayuda en la eliminación de la mano temblorosa, haciéndolos más precisos que los realizados con la mano del cirujano.

El sistema de imágenes de alta definición tridimensional utiliza un endoscopio con una cámara 3D, 12 mm, y un extremo vertical o en ángulo. El propio endoscopio del sistema se llama brazo endoscópico, ya que se encuentra en un brazo robótico. Estos brazos están articulados, interactivos y táctiles. Un sistema robótico táctil es un sistema sensible al tacto cuya función es la interfaz con el usuario a través del uso de fuerzas, vibraciones y desplazamientos.



Este sistema de imagen le permite hacer zoom y enfocar las imágenes con el fin de visualizar las estructuras en ángulos cercanos a 90°, lo que con la cirugía convencional sería imposible.

Figura 2.15 Sistema endoscópico del Da Vinci

Este sistema robótico tiene muchas ventajas, tanto para el paciente o para la entidad (hospital) con respecto a la cirugía convencional. Desde el punto de vista del paciente, el tiempo de recuperación es más rápido ya que existe una reducción de la zona de corte del tejido, los riesgos de infección y pérdida de sangre disminuyen lo que implica un trauma post-quirúrgico más corto. Adicionalmente, es más agradable estéticamente, porque las cicatrices son apenas visibles debido al pequeño tamaño y el número de cortes. Igualmente, consta de una mayor precisión y la seguridad de las suturas realizadas.

Desde el punto de vista del hospital, se traducirá en una reducción de la ocupación de camas en los hospitales, el cirujano menos fatiga y una mayor facilidad y mejora en la configuración durante la disección del tejido y el reconocimiento de planos anatómicos naturales. Los costes económicos son una gran desventaja de este sistema robot, ya que implica altos costos tanto para la preparación de la sala donde se requiera este sistema robot como para el mantenimiento del mismo.



Figura 2.16 Sistema robótico Zeus

Zeus (figura 2.16) es un sistema robótico que tiene las mismas características que el Da Vinci, pero es accionado por un comando de voz conferido por el sistema robótico AESOP (Automatizado Endoscópico para un Sistema de Óptimo de Posicionamiento), lo que le concede altas prestaciones en el medio óptico del dispositivo.

Este sistema presenta un puesto de trabajo informatizado, una pantalla y un manual de controles que se utilizan para mover los instrumentos quirúrgicos instalados en la mesa. Sus aplicaciones se resumen las pruebas clínicas y algunas cirugías más complejas, tales como paro cardíaco. En la figura anterior, se puede ver los dos últimos robots que se refiere el texto anterior. Estos resultados ponen de relieve la diferencia entre Zeus y el sistema robótico AESOP.

Recientemente, el desarrollo de la **cápsula endoscópica robótica**, capaz de atravesar el intestino mediante el control de los expertos médicos externos, se ha convertido en atractivo para muchos investigadores. Este objeto tiene como propósito desarrollar un dispositivo resistente a las fuerzas de la peristalsis, siendo capaz de fijarse a las paredes, utilizando para esto: las piernas, ganchos, adhesivos, garras o incluso, campos magnéticos. Una vez adherido a las paredes del tracto digestivo debe ser capaz de recoger tejido necesario para realizar una biopsia y también conseguir una vista más detallada de la zona de estudio.

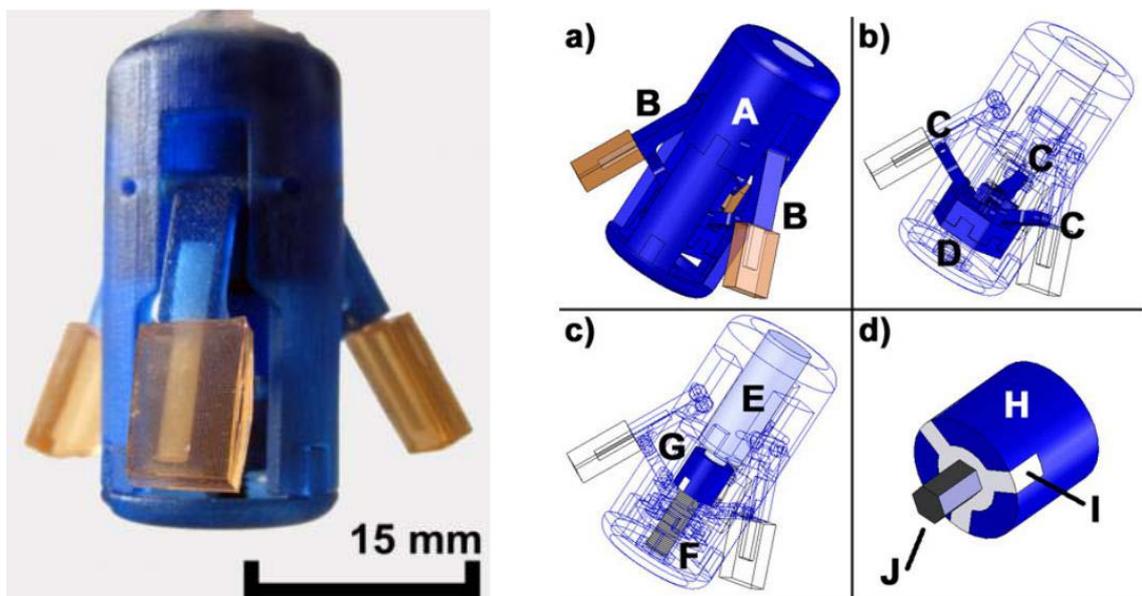


Figura 2.17 cápsula endoscópica robótica y su funcionamiento

El sistema robótico en desarrollo por el grupo liderado por Paul Glass cuenta con un mecanismo de bloqueo, sobre la base de tres patas alineadas con las áreas en las que se encuentra el adhesivo biomimético. Esta combinación se realizó con el fin de superar los inconvenientes encontrados en los métodos tradicionales aunando a su vez las ventajas en la utilización de la cápsula endoscópica robótica y el endoscopio tradicional. Para probar la eficacia bajo la acción de la peristalsis e incluso mejorar a través de este mecanismo, se realizó un estudio matemático, junto con su evaluación experimental en un esófago porcino. Este robot todavía no tiene en cuenta los sistemas de formación de imágenes o recogida de material para biopsia ya que se encuentra todavía en fase de desarrollo.



La cápsula robótica, como se puede ver por la imagen siguiente es un prototipo de 15 mm de diámetro y 32 mm de longitud (cabe señalar que este diámetro de las cápsulas es mayor que el de cápsula comercializable, 11mm).

El sistema robotizado tiene tres actuadores de poliuretano que realizan la presión en las paredes del esófago que se utilizan para fijar junto con el adhesivo micro-patrón de origen polimérico que contengan características biomiméticas en los lugares adecuados. El mecanismo de sujeción a través de los tres actuadores se logra debido a la existencia de un micromotor. La simulación del comportamiento del adhesivo del robot, así como el proceso de fijación a través de las piernas a medida que pasa a través del esófago de los cerdos, son factores a considerar en la elaboración de modelos matemáticos y la evaluación experimental.

La figura anterior ilustra el funcionamiento del dispositivo robótico. En pocas palabras, la cavidad cilíndrica representada en la figura anterior con la letra A, contiene un dispositivo de accionamiento, y en un futuro, el espacio restante del dispositivo será ocupado por sistemas para la captura de imágenes y hardware capaz de facilitar la realización de biopsias. Este dispositivo circula en el tracto digestivo, siempre con las piernas dibujadas en la cavidad D para evitar la adherencia no intencionada a la superficie del esófago y la causa de daño a los tejidos. Por ello se han tenido en cuenta en el diseño la ausencia de bordes afilados. Cuando se acciona la pieza de mano hace girar el tornillo de avance existente en D causando el movimiento de las piernas fuera de la cápsula. La activación de la pieza de mano en la dirección opuesta, se produce su contracción.

El robot endoscópico de patas ciliares desarrollado por Feng Yang et al. Tiene 35 mm de longitud y 15 mm de diámetro. Las estructuras ciliadas también presentan dimensiones reducidas, es decir, 15 mm de largo, 5,2 mm de ancho y 4,5 mm de alto. Las seis patas son las unidades responsables de los avances y retrocesos a lo largo del tracto gastrointestinal. También, en la superficie del robot se incorpora un actuador *Shape Memory Alloy* (SMA) utilizado en el impulso del robot lo que aumenta la fiabilidad del robot. El cuerpo está recubierto con aluminio para ser ligero y en su interior, en el futuro, se pretende integrar el sistema de control de vídeo y comunicaciones del robot.

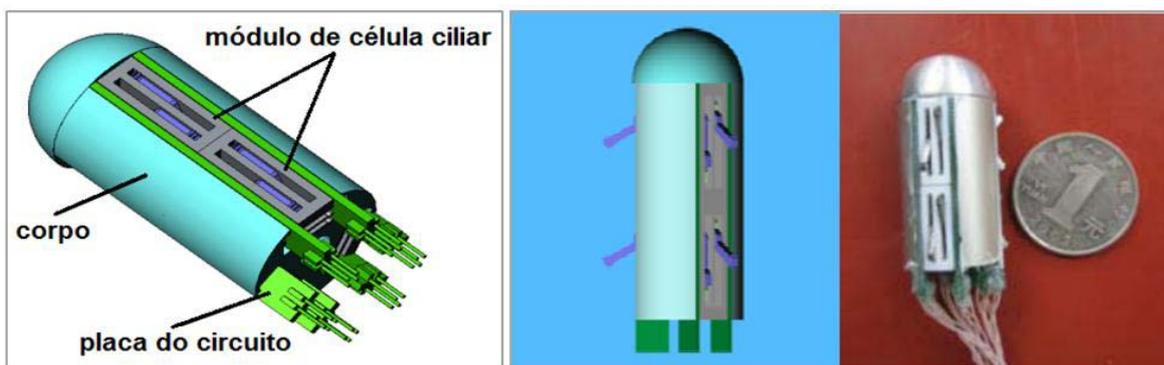


Figura 2.18 robot endoscópico de patas ciliares

En cada módulo las pestañas están dispuestas en direcciones opuestas con el fin de garantizar la eficacia del dispositivo si se desea detener su movimiento. Las pestañas pueden abrir y cerrar el control realizado por el actuador SMA a través de la fuente de alimentación o no.

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FUNCIONALES



CÁPITULO 3.-

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FUNCIONALES

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE ROBOTS HÍPER-REDUNDANTES

El robot de este trabajo fue inspirado por el movimiento y la estructura morfológica de un gusano sin estructuras de apoyo para el movimiento (clasificado como apodo). Además, su estructura está diseñada para constituir un pequeño tamaño y un gran número de grados de libertad como garantía de movimiento entre espacios reducidos e irregulares (característica redundante).

El invertebrado más similar a todas estas características es el gusano de la tierra (figura 3.1), ya que tiene un cuerpo cilíndrico segmentado, que se mueve a través de la contracción secuencial de todos los segmentos hacia la cabeza y encuentra una nueva posición, a través de la relajación.

Estos movimientos se logran debido a la disposición del tejido muscular en cada segmento que permite de forma extraordinaria su comunicación. El robot debe ser capaz de realizar movimientos en una estructura laberíntica, como el intestino humano. Para ello deberá presentar un cuerpo modular similar al gusano terrestre, donde cada segmento tiene características redundantes que permiten que se convierta el conjunto en una estructura híper-redundante.



Figura 3.1 gusano de tierra

El robot es capaz de moverse hacia adelante y hacia atrás sin causar lesiones en la pared intestinal, en posiciones que permiten la inspección de las paredes de la cavidad intestinal, así como la inserción de los instrumentos de recogida de tejido intestinal (biopsia). Su forma se asemeja a un gusano, tiene dos extremos iguales que permiten moverse en ambas direcciones sin ser obstaculizado. Esta característica contiene grandes ventajas, ya que ayuda a prevenir lesiones al permitir retrocesos para superar obstáculos que puedan surgir, como por ejemplo, el estrechamiento y estenosis de los vasos sanguíneos debido a la deposición de las grasas y otras sustancias.

La flexibilidad es conferida debido a su estructura anatómica, lo que permite una mayor precisión durante el movimiento y facilita la capacidad de análisis, detección e inspección requerida por el sistema de posicionamiento. Uno de los mayores avances en el desarrollo de este robot, en comparación con otros dispositivos endoscópicos, tales como el endoscopio cápsula, es la relación entre el tiempo/gasto de energía. Uno de los retos tecnológicos de estos dispositivos siempre ha estado en la búsqueda científica que obtuviese un alto grado de autonomía así como un sistema eficaz para la eliminación del



dispositivo en el caso de su retención dentro del cuerpo en el caso de que se agoten las reservas de energía.

3.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

La configuración modular es una de las principales características de la simulación de robots híper-redundantes porque simplifica el diseño, modelado y construcción de los manipuladores HRM.

No sólo permite al HRM disponer de la longitud que requiera sin tener que desarrollar un nuevo software para cada tipo de longitud, sino que también lo convierte es más flexible (dado que se considera cada módulo una etapa independiente), por lo que es posible seguir complejas configuraciones similares a las de los gusanos.

Una demostración de lo que puede lograrse con esta característica modular se puede ver en la figura siguiente, donde se ejecutó una simulación con 10 (izquierda) y 50 (derecha) módulos con diferentes configuraciones de posición.

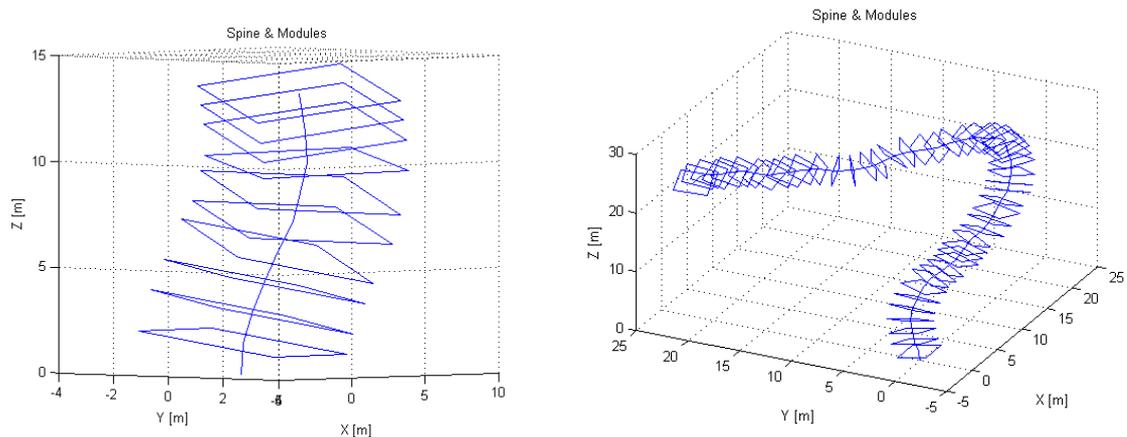


Figura 3.2 Configuración modular de un HRM

Es importante tener en cuenta que no hay diferencia destacable en el tiempo de procesamiento ni en los cálculos adicionales para los HRRs de 50 módulos frente al de 10, en lo que a cinemática directa se refiere. Esto se debe al hecho de que aumentar el número de módulos sólo aumenta el número de iteraciones que el código va a hacer, y ya que el bucle en la secuencia de comandos no incluye cálculos que consuman mucho tiempo, la diferencia de tiempo no es perceptible para el usuario final.

Uno de los objetivos más importantes para el HRM del proyecto es ser capaz de simular tanto de forma directa como inversa la cinemática para robots de tamaño variable. El mencionado "tamaño variable" está determinado por dos parámetros:

1. La distancia mínima entre el punto central de dos módulos adyacentes, denominado h .
2. La longitud de cada módulo cuadrado se denota por la variable L .

A continuación, en la Figura 3.2, se muestra la descripción gráfica de las longitudes características, h y L , que definen al robot híper-redundante.

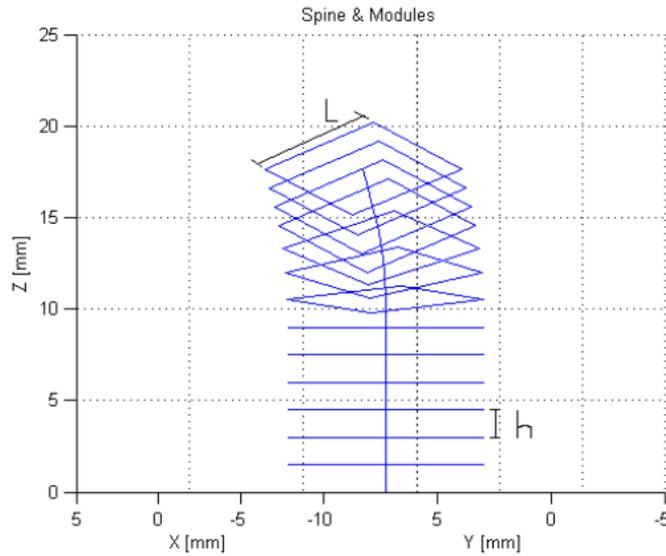


Figura 3.3 variables h y L del HRM

Estos dos parámetros pueden ser modificados por el usuario en cada simulación, proporcionando una gran flexibilidad para los HRRs: es posible simular cualquier tamaño de robot, siempre y cuando la relación expresada en la ecuación 3.1, es decir, en ningún caso la distancia entre módulos podrá ser superior al lado de cada módulo. En caso contrario, las soluciones contienen números complejos no pueden ser interpretadas en un entorno 3D regular.

(Ecuación 3.1)
$$\frac{h}{L} \leq 1$$

Tanto h como L son importantes para los HRRs porque tienen una relación directa sobre cómo se describe el ángulo de torsión para cada módulo. En otras palabras, cuanto mayor sea la relación h a L , más rígido es el robot. La Figura 2.3 muestra una comparación de "rigidez" gráfica.

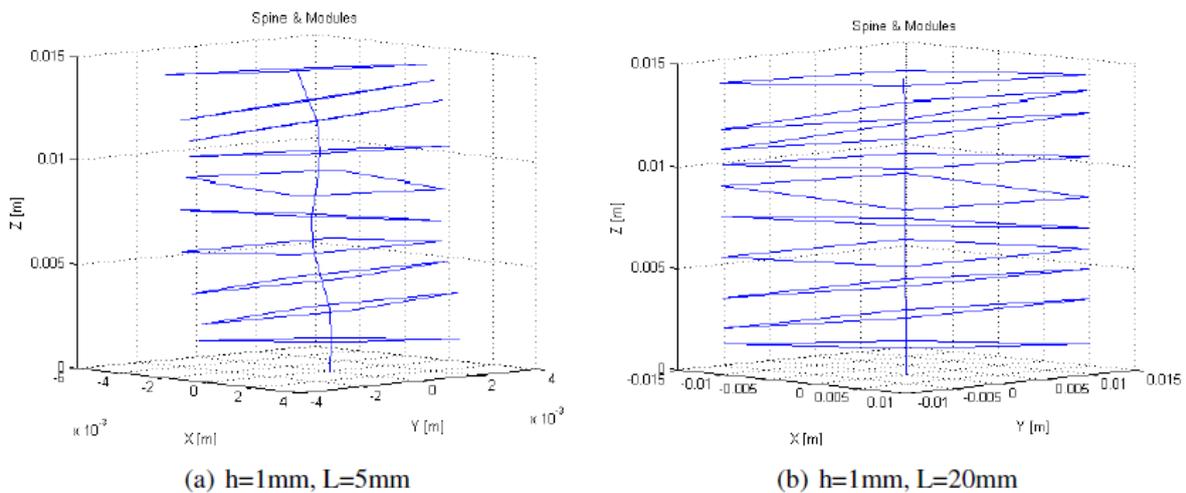


Figura 3.4 Diferentes relaciones entre h y L del HRM



3.3.DESCRIPCIÓN FUNCIONAL

Varios estudios han demostrado que el uso de robots híper-redundantes proporciona un mayor número de configuraciones posibles para una misma área de trabajo. La presencia de actuadores binarios se establece como un componente clave para dotar de movimiento y proporcionar un aumento de la redundancia en un sistema robótico. El hecho de que los robots híper-redundantes presenten módulos, implica el uso de actuadores discretos, compitiendo en igualdad con robots de actuadores continuos. Un robot accionado de forma discreta tiene un número finito de estados, pero si se tiene un alto número de actuadores binarios (unidad discreta), sus capacidades se puede comparar con actuadores continuos. Por lo tanto, el número de posibles configuraciones de un robot binario aumenta exponencialmente con el número de actuadores.

A través de la descripción técnica de los componentes y la base morfológica, se puede determinar que la base fundamental para la adquisición de las características híper-redundantes son cuatro actuadores binarios. Cada actuador binario está constituido por material ferromagnético y, por lo tanto, se comportan como electroimanes. Estos electroimanes son alimentados por la red y controlados desde la fuente de alimentación mediante cargas mayores o menores. A su vez el retroceso en la dirección del robot se obtiene mediante la implementación de dos estados magnéticos posibles en cada actuador, magnetización y desmagnetización.

La magnetización y desmagnetización dependen principalmente del tipo de estado 0 ó 1 del actuador adyacente. Esto es, cuando dos actuadores son módulos diferentes con el mismo tipo de estado, se produce la desmagnetización (repulsión) si el estado es diferente, se produce la magnetización (atracción). Cada módulo tiene cuatro actuadores electromagnéticos (solenoides). Cada uno de ellos tiene dos estados discretos, 0 y 1, lo que significa que cada módulo tiene 16 configuraciones posibles ($2^4 = 16$).

Una de las principales razones para el uso de ellos fue debida a la conservación de la energía y el problema de la entrega. La entrega de la energía a los electroimanes debe ser una tarea fácil teniendo en cuenta la modularidad HRM y la configuración geográfica de las EMAs (Actuadores Electromagnéticos): mediante la colocación de los cuatro actuadores uno en cada esquina la zona de vacío central puede ser usada para pasar todo el cableado necesario para suministrar corriente a través de una barra de alimentación

Una analogía se puede hacer con el ser humano y la médula espinal, que se extiende a lo largo del eje longitudinal entregando todos los impulsos-comandos eléctricos enviados por el cerebro a las otras partes del cuerpo. En esta analogía el cerebro sería el ordenador central, la médula espinal sería la fuente alimentación y el cableado de control y los miembros los actuadores.

En cuanto a la conservación de energía, EMA tienen una característica especial intrínseca a su naturaleza ferromagnética [CB94]: "Los materiales ferromagnéticos, bajo la influencia de un magnetización aplicada cambian su ruta de magnetización en función de si el campo magnético está aumentando o decreciendo, y por lo tanto presentan histéresis "(ver Figura 3.6).

La histéresis, juega un papel importante en la conservación de la energía: permitiendo que los materiales tengan una magnetización remanente. A continuación, se muestra claramente que una de las principales razones para utilizar electroimanes, en primer lugar,



debido a la propia histéresis y en segundo, debido a los ahorros de energía esta incurriría mientras que las EMAs mantienen su repulsión y atracción.

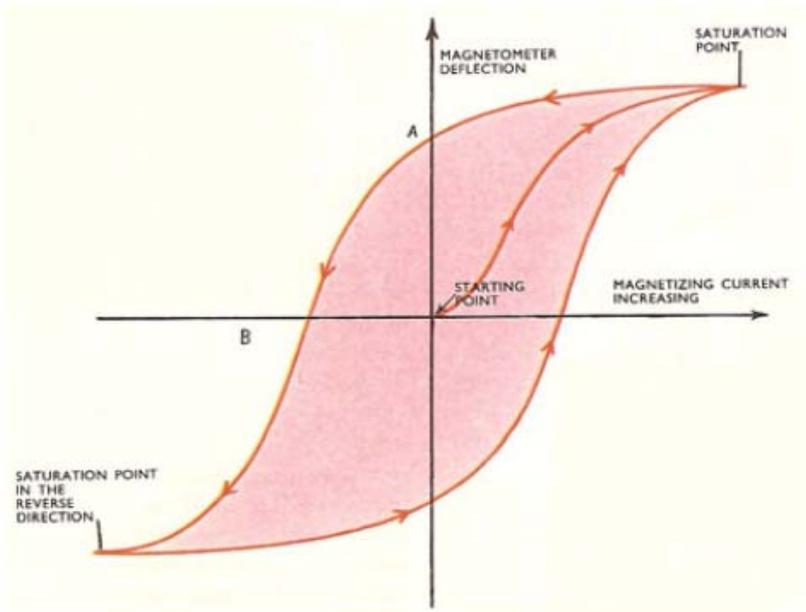


Figura 3.5 Curva de histéresis

Como parte de los esfuerzos preliminares para desarrollar un prototipo de gestión plenamente operativo, se construyó un banco de pruebas para electroimanes en el Centro de Automatización, Robótica, Tecnologías de la Información y Fabricación (CARTIF), en colaboración con la Universidad de Valladolid (UVa).

Una imagen de los EMAs que trabajan en la repulsión (izquierda) y la atracción (derecha) se puede ver en la Figura 3.7.



Figura 3.6 Repulsión y atracción de los módulos mediante EMAs

Puesto que se trata de diseño modular, dirigido por cuatro actuadores electromagnéticos, era necesario, seleccionar la distribución geográfica y la designación de cada uno de ellos sobre la zona de forma cuadrada de los módulos. Como se mencionó antes, estos electroimanes se encuentran uno en cada esquina, con la numeración a partir de la esquina



superior derecha hacia la izquierda al igual que los cuadrantes de un plano cartesiano (véase la Figura 3.8).

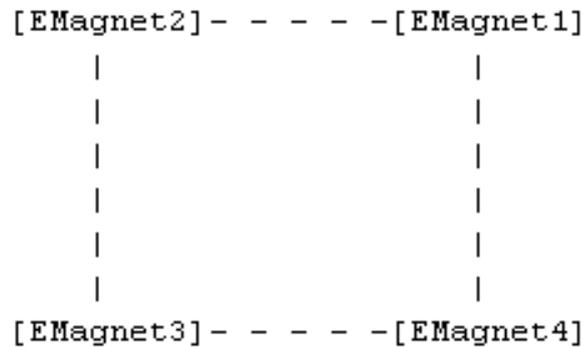


Figura 3.7 Numeración de los electroimanes en cada módulo

Las decisiones mencionadas anteriormente dan como resultado cuatro modos diferentes en la disposición espacial entre los módulos, que se pueden ver en la siguiente figura 3.9: la magnetización de un electroimán (D), la magnetización de los dos electroimanes (C), la ausencia de campo magnético (B) y magnetización de todos los electroimanes (A).

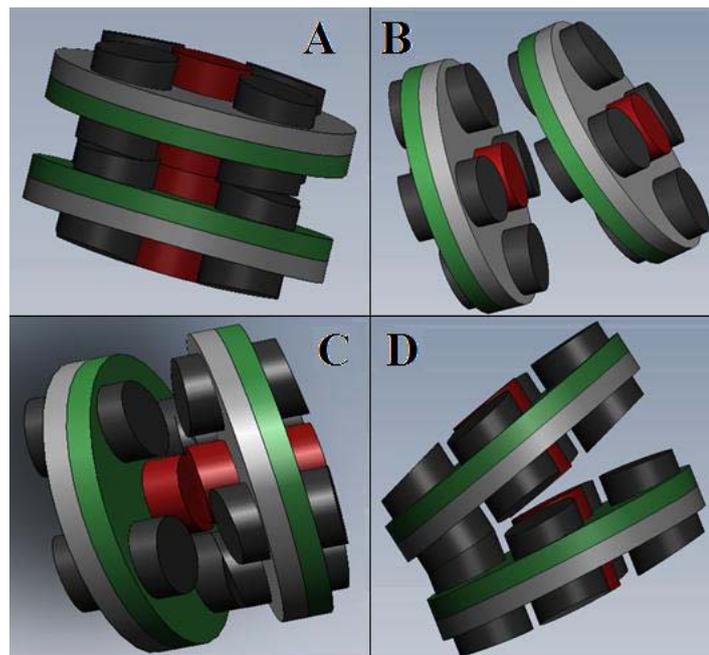


Figura 3.8 Diferentes configuraciones espaciales

Estos módulos en forma de disco pueden describir círculos cuasi perfectos en torno a un eje imaginario, lo que implica una gran capacidad para ejecutar ángulos que facilitan el paso del robot en curvas o zonas más estrechas. Esta capacidad desarrollada es conferida por los cuatro actuadores binarios en cada módulo, concluyendo en una estructura redundante y modular.

Las diferentes posiciones obtenidas a través de la interacción de electroimanes habilitan al robot a aproximarse a las características cinemáticas reales del gusano terrestre, lo que conlleva una mejor adaptación para su aplicación endoscópica. La hiper-redundancia del



robot endoscópico es la clave en el desarrollo de la capacidad de movimiento en localizaciones muy resbaladizas, irregulares y laberínticas, como es el caso del tracto digestivo humano.

Mediante el análisis cinemático de un módulo se puede deducir que dispone de tres grados de libertad, dos de la rotación y el resto de traslación.

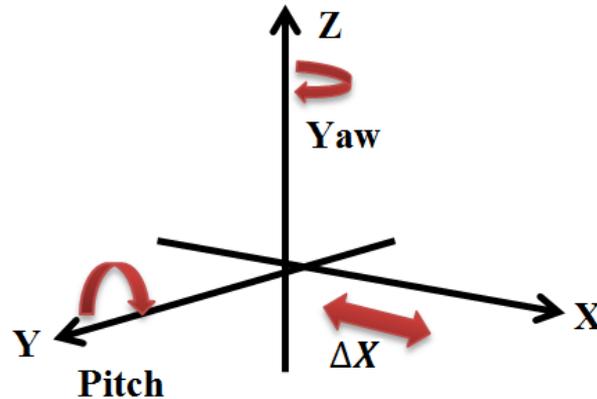


Figura 3.9 grados de libertad de cada módulo

En este sistema de referencia es posible mostrar dos estados de rotación, alrededor de Z ("Yaw") e Y ("pitch"), y un estado de la traslación X.

En otras palabras, si tenemos un robot con N módulos, el robot tendrá un número total de grados de libertad (gl) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$g.l. = N \times 3$$

3.4.ESPACIO DE TRABAJO

Otra característica a cumplir por los HRM es el área de trabajo casi continuo que deben crear (ver Figura 3.10). Esta característica se convierte en fundamental cuando se requiere que se muevan a través de obstáculos, teniendo que llegar a puntos difíciles.

Para las propuestas concretas de este proyecto, el área de trabajo tiene una forma de cúpula. Esta forma se debe a que una de las extremidades está fija a un cierto punto (para las simulaciones este punto es el origen: [0, 0, 0]) y el otro es un extremo "en movimiento" con un fin-actuador que podría; ser una lámpara, una cámara o cualquier otro dispositivo quirúrgico/endoscópico, según sea necesario.

El espacio de trabajo casi continuo y la naturaleza híper-redundante permiten llegar a puntos y/o obstáculos en el espacio de una forma más fácil, o al menos de mejor manera que los robots clásicos. Sin embargo, esto también implica que la cinemática directa, así como la cinemática inversa, ésta especialmente complicada desde el punto de vista computacional, (capítulo 4), sean más complicados de calcular suponiendo un compromiso entre la precisión y el tiempo de procesamiento.

La nube de puntos, espacio de trabajo/workspace, permite conocer los puntos alcanzables de cada HRRs en función del número de módulos que los compongan. Es decir, cualquier punto fuera de la cúpula no será alcanzable.



De forma práctica, el workspace puede servir como forma de calibración de un robot, tomando puntos “difíciles” del espacio de trabajo, se podrá observar la capacidad del método de optimización (cinemática inversa) para alcanzarlo. Además, los parámetros de ajuste de la función de coste podrán modificarse en función de esos resultados para mejorar el posicionamiento y/o la orientación.

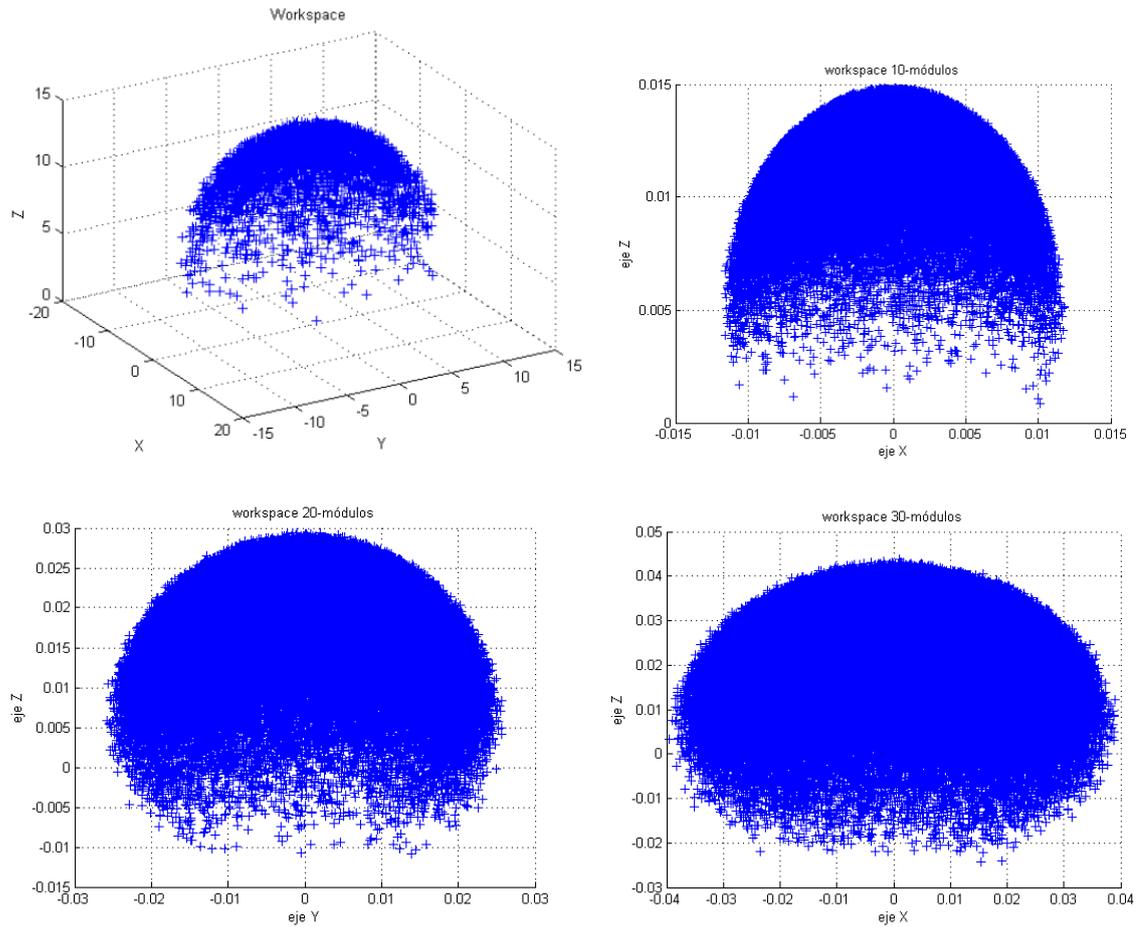


Figura 3.10 Área de trabajo creada por puntos aleatorios para diferentes HRRS según su tamaño

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS CINEMÁTICO



CÁPITULO 4.-

ANÁLISIS CINEMÁTICO

4.1.PLANIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS

La presencia de estructuras redundantes en un sistema robótico hace su análisis cinemático más complejo. La cinemática es la ciencia dedicada al estudio de cómo se comportan cuerpo en el espacio sobre el tiempo, la correlación de la posición y la orientación a través de las matrices de transformación homogénea.

En este capítulo se describe la planificación de los movimientos del robot hiper-redundante basado en el control de módulos cinemáticos. El objetivo de este estudio es el control espacial de todas las estructuras del robot, de modo que se mueva a través de una superficie compleja, mientras se fija uno de los dos extremos. Los movimientos del robot, en el caso de un robot endoscópico, deben ser suaves para evitar daños en los tejidos y facilitar su paso a través de las estructuras del tracto digestivo, que son irregulares, curvilíneos y resbaladizos. La siguiente ilustración muestra la estructura de la planificación de movimiento cinemático de robots hiper-redundantes.

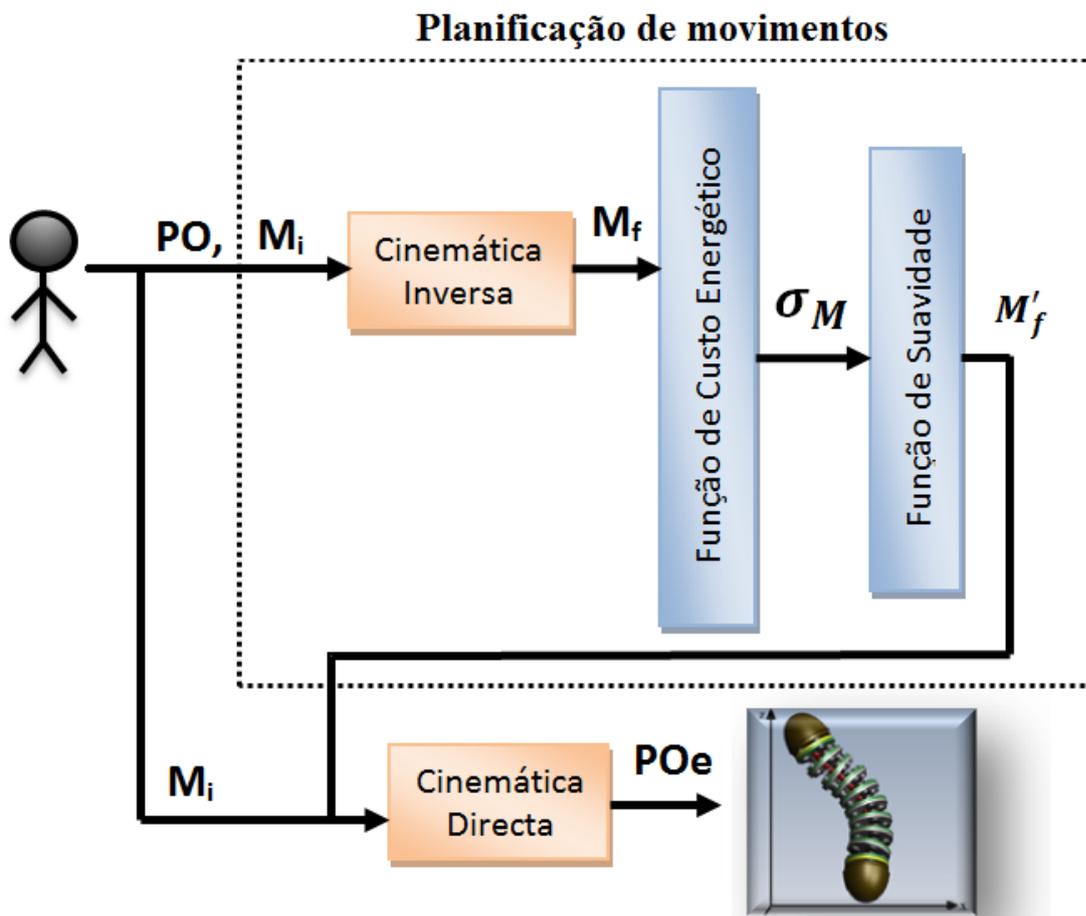


Figura 4.1 Diagrama de planificación de movimientos



En esta estructura, el sistema de componente externo proporciona los datos necesarios para iniciar la cinemática del proceso. Este proceso funciona de forma similar a como haría una máquina de, donde el bloque de cinemática inversa es responsable de la creación de secuencias las cuales son evaluadas en una etapa posterior por los bloques de coste de la energía y la suavidad. Como resultado de esta evaluación se obtiene una nueva secuencia de configuraciones. En la fase siguiente del proceso de planificación, esta secuencia se dirige al bloque de la cinemática directa, que evalúa la posición y orientación de cada módulo y lo representa gráficamente.

Supongamos que se desea mover el robot híper-redundante hacia una posición puntual, el primer paso que se realiza es el que corresponde a la cinemática inversa del bloque, que debe incluir el número de pasos que el robot tiene que realizar al punto deseado y la trayectoria a la que debe adaptarse, en cada paso, su cuerpo. Por lo tanto, el bloque de **cinemática inversa** recibe como entradas las posiciones y orientaciones de los módulos de robot secuencia de \mathbf{M}_i , además de la posición deseada \mathbf{PO} y la orientación, cuyo objetivo es generar una secuencia de configuraciones \mathbf{M}_f , que se aproxime a la posición y orientación deseada.

Cabe destacar que las configuraciones \mathbf{M}_f a la salida del bloque de la cinemática inversa, tienen que pasar a través de bloques de suavidad y costes energéticos, para garantizar movimientos suaves y de bajo coste.

La evaluación del coste se basa en el intercambio de energía mínima establecido entre los cuatro electroimanes de cada módulo con el fin de adquirir la configuración deseada. Por lo tanto, el bloque de función **coste energético** después de recibir la configuración inicial y final \mathbf{M}_i , \mathbf{M}_f obtiene todas las matrices relacionadas con el cambio de posición de cada módulo, con el menor coste posible (σ_M). Esta minimización energética conferida por la función de configuración de bloque, permite un aumento de la autonomía del dispositivo endoscópico.

En el apartado de la suavidad de los movimientos es necesario realizar la selección de valores intermedios para cada módulo, de acuerdo con los criterios establecidos. Su salida es un vector con una secuencia de configuraciones finales, \mathbf{M}'_f cuya orden de salida, fue establecida de acuerdo con su aproximación hasta el punto deseado en el bloque de cinemática inversa. Este bloque es muy importante porque permite obtener comportamientos del robot suaves, evitando posibles daños y perjuicios, como las perforaciones, la destrucción de los tejidos y los moratones.

De esta manera, el bloque de cinemática directa recibe el vector \mathbf{M}'_f y construye la representación gráfica. El módulo de función recibe los valores uno por uno y las convierte en valores angulares de rotación del eje del XX y ZZ. Seguidamente gira la función utilizando el valor de los ángulos y determina la matriz de orientación y posición del módulo respectivo. La siguiente fase se basa en la representación gráfica del módulo del robot utilizando los valores de la matriz de la posición y orientación, a través de la función cuadrado. El resultado final de este bloque es el conocimiento del valor de la posición y orientación del último módulo del robot \mathbf{POe} , así como toda su vista gráfica.



4.2. ANALISIS CINEMÁTICO DIRECTO

Atendiendo a la definición clásica y según [DB11] "El problema de la cinemática directa se refiere a la relación entre las articulaciones individuales del manipulador de robot y la posición y la orientación de la herramienta del extremo. Dicho de manera más formal, el problema de cinemática directa es determinar la posición y la orientación del efector final, teniendo en cuenta los valores de las variables conjuntas del robot".

Por lo tanto, el primer paso en relación a la cinemática directa para los HRRs consistió en el estudio de las consideraciones físicas. Como se ha mencionado con anterioridad, el robot es manipulado mediante cuatro electroimanes, cada uno situado en una esquina de cada módulo, por lo tanto existen distintas combinaciones posibles a tener en cuenta que deben ser analizadas y caracterizadas. Estas configuraciones se pueden ver en la figura 4.2.

Es importante resaltar que a pesar de tener 16 posibles configuraciones para cada electroimán, no todas ellas son válidas en el marco de este proyecto. Teniendo en cuenta un '1' lógico como la actuación del electroimán en la atracción y un '0' lógico actuación en repulsión, los otros tres electroimanes poseen la misma configuración y por tanto se pueden aproximar por un solo imán, con el consiguiente ahorro de energía simplificando así la simulación mediante la eliminación de la redundancia.

Por lo tanto, las combinaciones con código decimal 7, 11, 13 y 14 quedan excluidas como posibles configuraciones de electroimán, ya que el mismo efecto se puede conseguir con los códigos decimales 2, 1, 8 y 4 respectivamente.

Decimal Code	Magnet 4	Magnet 3	Magnet 2	Magnet 1	Binary Code
0	0	0	0	0	0000
1	0	0	0	1	0001
2	0	0	1	0	0010
3	0	0	1	1	0011
4	0	1	0	0	0100
5	0	1	0	1	0101
6	0	1	1	0	0110
7	0	1	1	1	0111
8	1	0	0	0	1000
9	1	0	0	1	1001
10	1	0	1	0	1010
11	1	0	1	1	1011
12	1	1	0	0	1100
13	1	1	0	1	1101
14	1	1	1	0	1110
15	1	1	1	1	1111

Figura 4.2 Tabla de configuraciones posibles con 4 imanes



También se excluyeron las Combinaciones con código decimal 5 y 10, ya que dichas configuraciones reflejan un escenario en el que los electroimanes sobre de la diagonal están actuando en la atracción, causando un efecto similar, pero inestable, como cuando se utiliza la configuración decimal 15. Las configuraciones finales posibles se pueden ver en la Tabla 4.3.

Decimal Code	Magnet 4	Magnet 3	Magnet 2	Magnet 1	Binary Code
0	0	0	0	0	0000
1	0	0	0	1	0001
2	0	0	1	0	0010
3	0	0	1	1	0011
4	0	1	0	0	0100
6	0	1	1	0	0110
8	1	0	0	0	1000
9	1	0	0	1	1001
12	1	1	0	0	1100
15	1	1	1	1	1111

Figura 4.3 Tabla de configuraciones finalmente válidas

Eliminando las combinaciones redundantes (códigos decimales 5, 7, 11, 13 y 14) los 4 actuadores operarían geográfica y numéricamente de acuerdo con la figura siguiente 4.4.

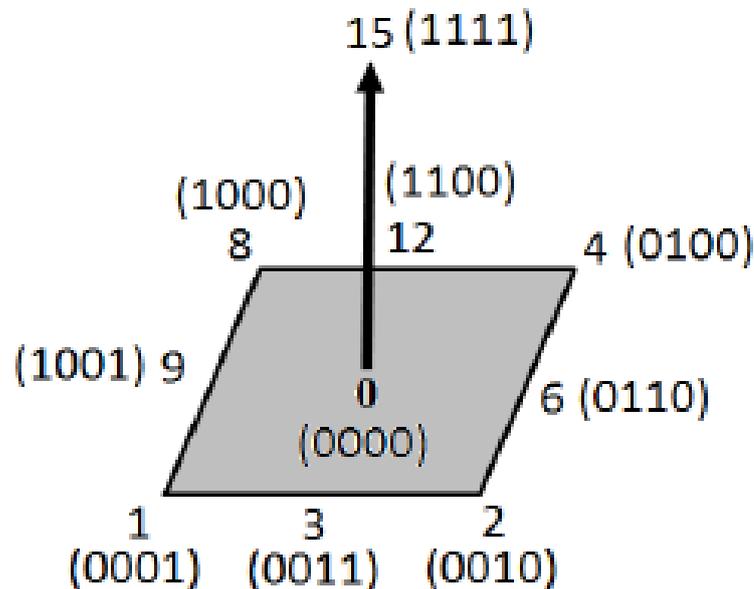


Figura 4.4 Distribución gráfica de las configuraciones válidas

Esta configuración final condujo a un código que permite cualquiera de estas configuraciones en una secuencia de módulos como vértebras en una columna, creando así una forma suave y una simulación de robots con forma de serpiente.



Una de las características que describe a los HRRs era que tenían que ser capaces de trabajar con diferentes tipos de valores de L (longitud de módulo) y h (espacio mínimo entre módulos). Esta limitación no tuvo ningún efecto sensible en el desarrollo de la cinemática hacia directa para la secuencia de comandos, ya que el código ha sido diseñado para tratar estos dos parámetros como variables de entrada dados por el usuario final. En otras palabras, el resultado de la cinemática directa es dependiente de h y L , pero no los cálculos realizados.

Con el fin de generar resultados válidos para la cinemática directa, es importante determinar primero los "ángulos de operación" de nombre α y θ , así como la altura (h) de los módulos que se acordará para cada configuración del módulo (MC).

4.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES INTERNAS

4.2.1.1. ÁNGULO ALFA (α)

Este ángulo describe la rotación a lo largo del eje perpendicular a la inmediata anterior al módulo del vector normal. En otras palabras, es el ángulo que gira la siguiente configuración del módulo respecto al módulo inmediatamente anterior (véase la Figura 4.4).

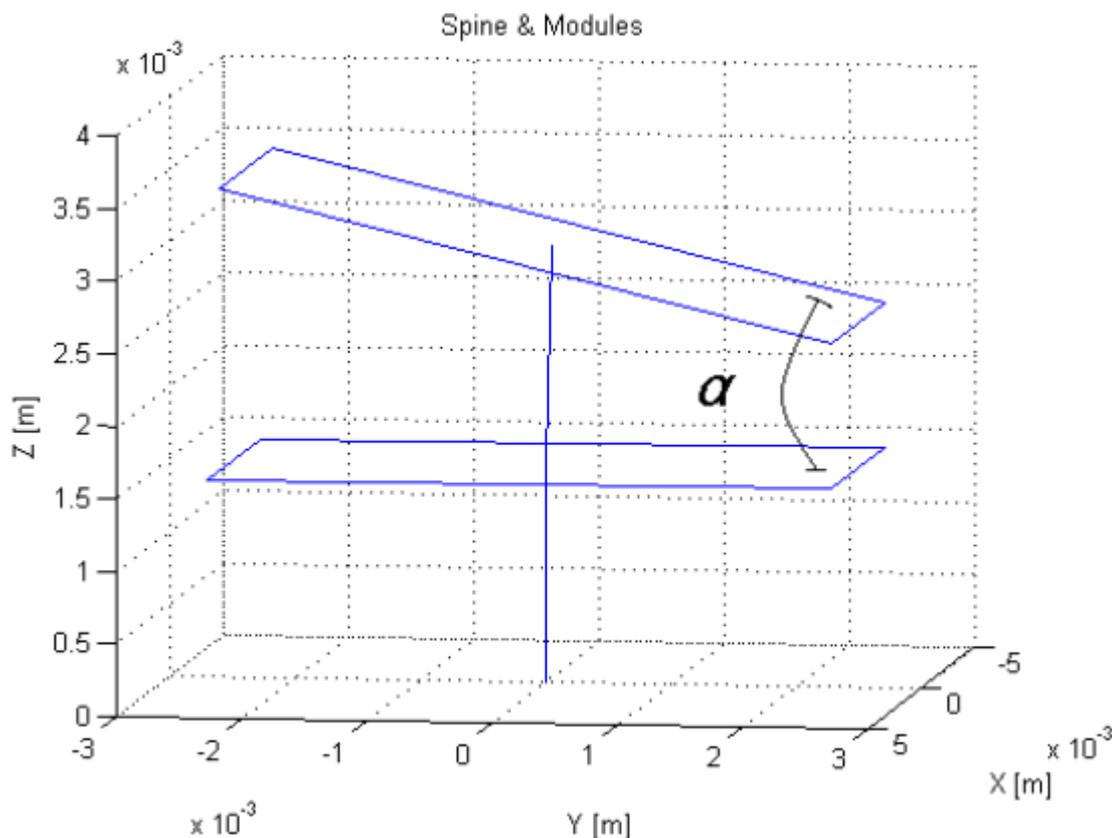


Figura 4.5 descripción del ángulo alfa



Se puede determinar la ecuación de la forma siguiente:

(Ecuación 4.1)
$$\alpha = a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$$

Donde h es la distancia mínima entre los puntos centrales de dos módulos adyacentes y L es la longitud ya conocida del módulo. La descripción de la distancia entre módulos será tratada en el punto 4.2.3.1

4.2.1.2. ÁNGULO THETA (θ)

Este ángulo es un código específico para cada uno de los MC permitidos. Describe cuántos radianes se necesitan para girar un módulo a lo largo del eje ZZ (véase la Figura 4.5) con el fin de obtener la "línea de gradiente" apuntando hacia la dirección del eje Y .

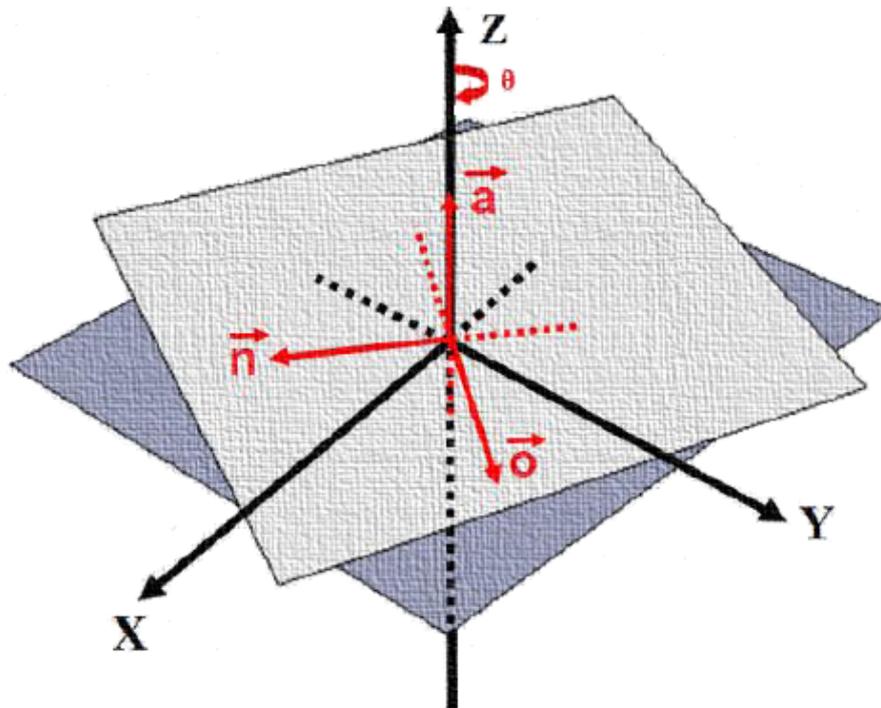


Figura 4.6 descripción del ángulo Theta

La "línea de gradiente" también es única para cada MC excepto para $MC=0$ y $MC=15$, que es la misma. Es la línea, proyectada sobre el plano XY , que describe la dirección de la inclinación del módulo respecto a la inmediatamente adyacente anterior.

Por ejemplo, si $MC=2$, entonces el gradiente de la línea pasa a través de los puntos $[0,0]$ y $[-1, -1]$. Por lo tanto, es necesario girar a lo largo del eje $\theta = \pi + 3\pi/4$ para alinearla con el eje Y

El ángulo θ que en sí no tiene ningún significado en la vida real o interpretación para el usuario, se utiliza simplemente como una variable interna de paso intermedio para obtener



una descripción completa de la traslación/rotación de un módulo de acuerdo con su MC, buscando simplificar los cálculos en las cinemáticas directa e inversa.

Como se ajustan todas estas variables el algoritmo de la cinemática directa se explica en el punto 4.2.3.4

4.2.1.3. ALTURA (H)

Este parámetro tiene en realidad sólo dos valores posibles dependiendo de si el MC es 0 o cualquier otro valor de las configuraciones permitidas descritas en la tabla de la figura 4.3. La Ecuación 4.2 demuestra que para cualquier valor permitido, esto es para $MC \neq 0$, el valor de la distancia entre el centro de dos módulos (H) coincide con lo introducido por el usuario con una distancia mínima (h), siendo $H = h$ en esos casos.

Por otro lado, cuando $MC = 0$, la ecuación 4.2 describe el comportamiento de H. Para este caso, H tiene un valor más grande porque todos los electroimanes están actuando en repulsión, creando así un escenario en el que aumenta la altura. El valor de la altura 'extra' con fuerza depende de los parámetros h y L definidos por el usuario, como se muestra en la ecuación 4.2.

(Ecuación 4.2)
$$H = h + L \left[\sin \left(\frac{a \sin \left(\frac{h}{L} \right)}{2} \right) \right]$$

En esta última ecuación, el valor añadido en el valor mínimo entre los módulos (h) es igual a la componente vertical L con un ángulo definido por la mitad del ángulo de rotación α .

Decimal Code	α	θ	H
0	0	0	$h + L \left[\sin \left(\frac{a \sin \left(\frac{h}{L} \right)}{2} \right) \right]$
1	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	$\pi + \frac{\pi}{4}$	h
2	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	$\pi + \frac{3\pi}{4}$	h
3	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	$\pi + \frac{\pi}{2}$	h
4	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	$2\pi + \frac{\pi}{4}$	h
6	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	2π	h
8	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	$2\pi + \frac{3\pi}{4}$	h
9	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	π	h
12	$a \sin \left(\frac{h}{L} \right)$	$2\pi + \frac{\pi}{2}$	h
15	0	0	h

Figura 4.7 Distribución gráfica de las configuraciones válidas

Este valor particular de H sólo se utiliza para describir mejor la simulación de robots híper-redundantes, por lo que es posible diferenciar alturas con $MC=0$ y $MC=15$. Por último, después de considerar α , θ y H , la tabla anterior, figura 4.6, recoge toda la información para cada MC .

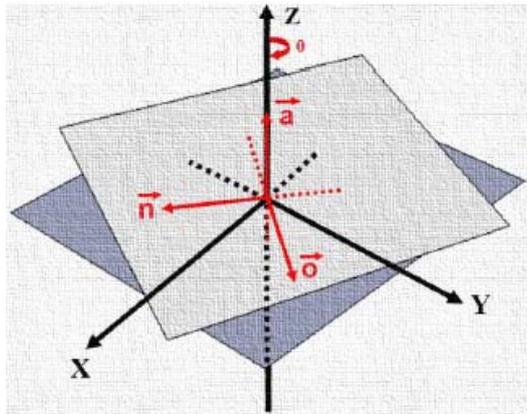
4.2.1.4. ALGORITMO IMPLEMENTADO

La secuencia de comandos desarrollado para simular la cinemática directa se basa en un algoritmo simple se muestra en la Figura 4.7). En primer lugar, los valores de h y L deben ser introducidos por el usuario. A continuación, una pequeña comprobación que se realiza con el fin de determinar si el usuario quiere introducir toda la configuración de los módulos, o si quiere que se haga al azar.

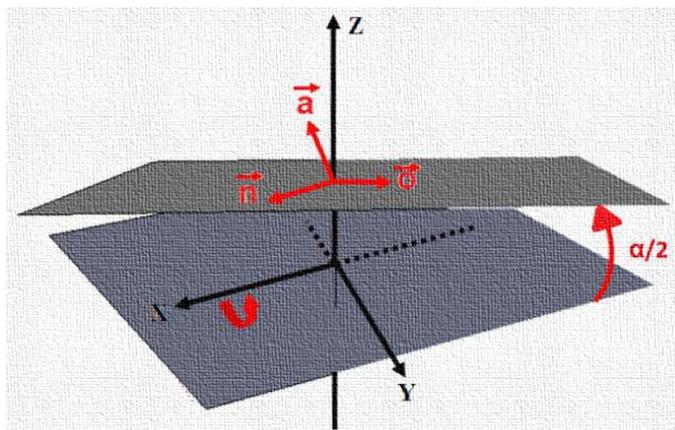
Entonces, si el usuario decide que introducir manualmente la secuencia de MC , el código se transforma en binario (en caso de que era el código decimal de entrada) y, a continuación, se comprueba si hay errores. Si no se encuentran errores, la "bandera go" se levanta y se permite que el programa continúe.

Luego, el script busca en cada secuencia del MC de sus correspondientes α , θ y H . Después de obtener los valores correspondientes, el bucle (archivo 'Calculate NOAP MSE') se ejecuta para cada secuencia tiene el MC . Los pasos a seguir en el bucle son:

1. Girar el plano a lo largo del eje ZZ θ Grados.

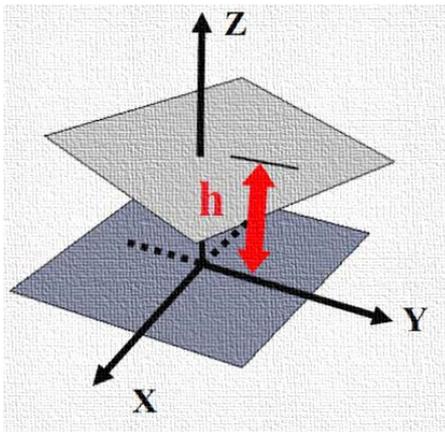


2. Girar sobre el eje XX $\alpha/2$ grados.

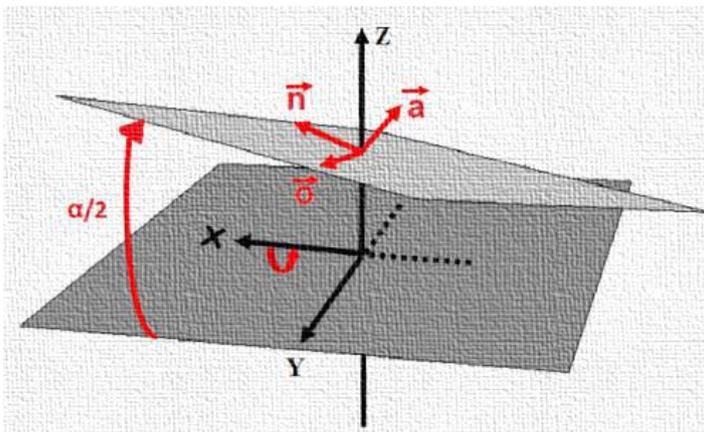




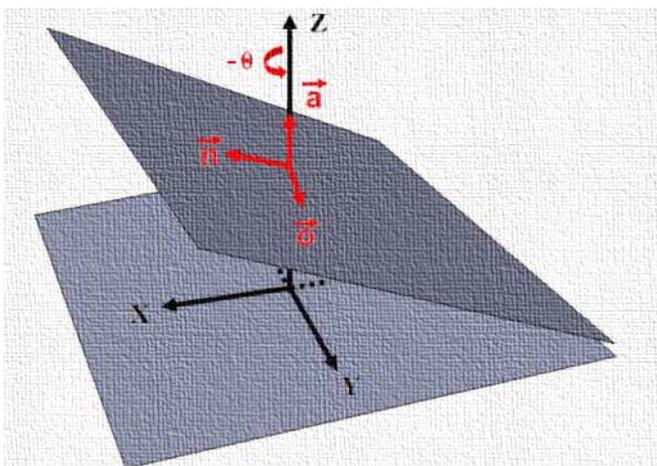
- Trasladar H hasta el eje ZZ.



- Girar el restante $\alpha/2$ sobre el eje XX.



- Girar el plano a lo largo del eje ZZ - θ grados.



- Obtener los resultados parciales de la posición y orientación
- Si el recuento de bucle es menor que el número de módulos, utilizar el resultado parcial el punto inicial para el siguiente bucle de ejecución.

Finalmente, el último resultado parcial del bucle se transforma en la posición final (P_MSE) y la orientación (N_MSE, O_MSE y A_MSE) de los vectores unitarios.

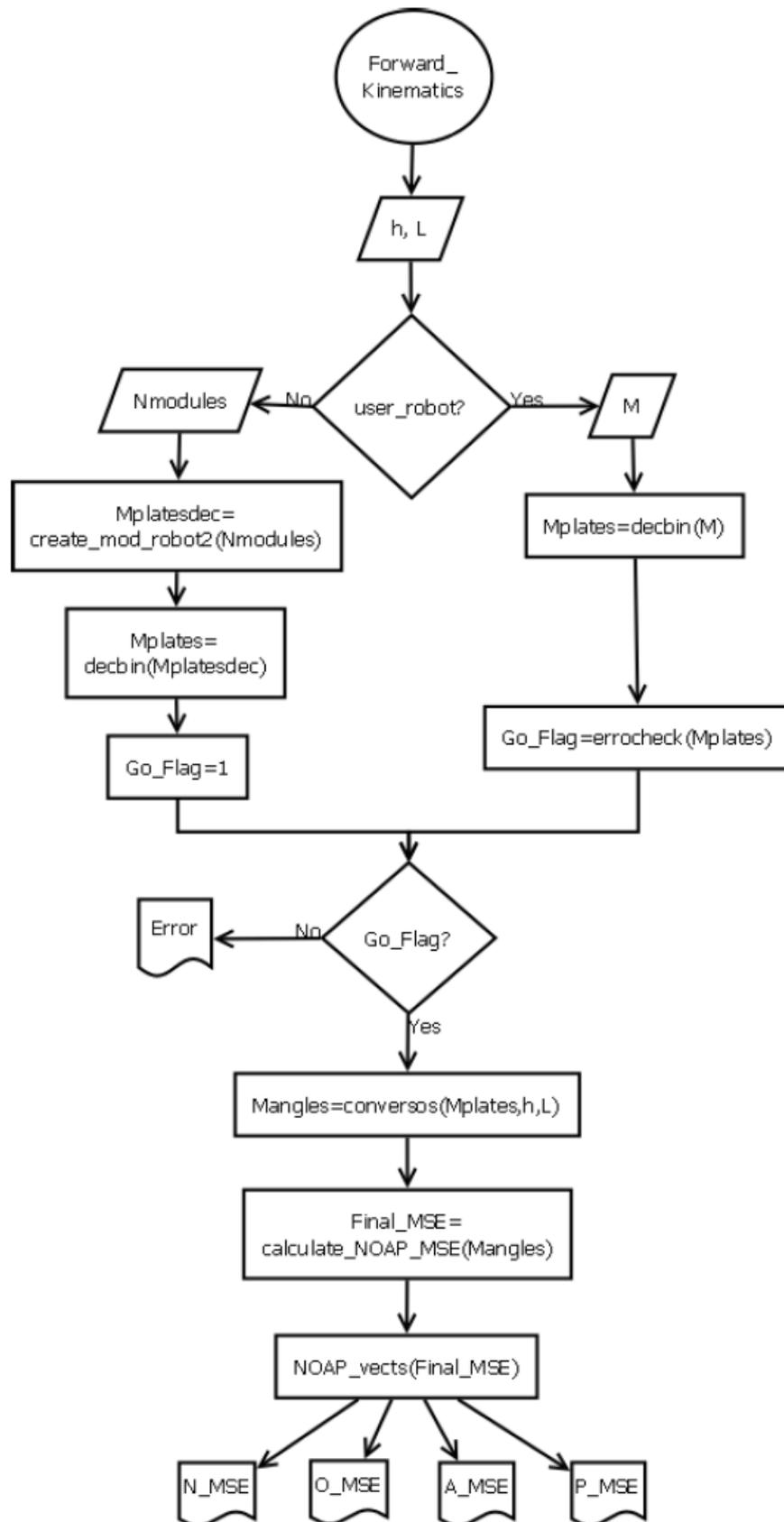


Figura 4.8 Diagrama de flujo de la cinemática directa



4.3. ANALISIS CINEMÁTICO INVERSO

El análisis de la cinemática inversa de un robot es la otra parte del estudio cinemático que se centra en el comportamiento de cada módulo del robot, teniendo en cuenta una posición objetivo y sabiendo desde el principio, todas las posiciones y orientaciones iniciales.

Cabe destacar la diferencia sustancial que presenta el tipo de robots híper-redundantes frente a los robots manipuladores y antropomorfos. En este sentido las razones principales son las siguientes:

1. Las técnicas cinemáticas estándar no han sido particularmente eficaces o no han sido muy adecuadas a las necesidades del modelado a la tarea híper-redundante del robot.
2. El diseño mecánico y la aplicación de robots híper-redundantes se ha considerado innecesariamente compleja.
3. Robots híper-redundantes no son antropomórficos, y plantean difíciles problemas de programación.

Pero sin duda, la mayor dificultad para realizar la cinemática inversa de los HRRs mencionados, es que su característica híper-redundante añade una alta complejidad en los cálculos cinemáticos inversos, haciendo que estos sean muy costosos desde el punto de vista computacional a medida que aumente el número de módulos que componen el HRRs.

Se llevó a cabo un análisis matemático riguroso de cinemática inversa para manipuladores híper-redundantes [GB95], haciendo uso de técnicas basadas en la geometría diferencial para describir la cinemática del robot ajustando los movimientos curvos en el espacio, y se propuso un nuevo tipo de robot híper-redundante conocido como robot de estructura de geometría variable (VGT).

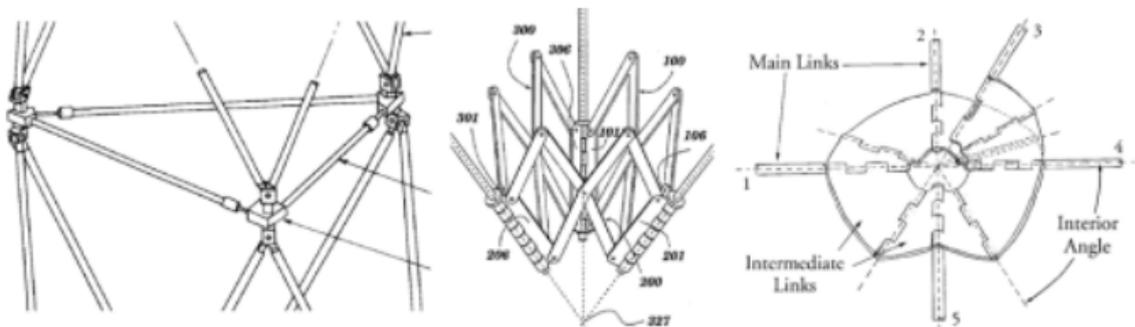


Figura 4.9 Ejemplos de robots VGT

El enfoque de la geometría diferencial describe una curva en el espacio como una serie de movimientos básicos que se originan en la base del manipulador, estos movimientos progresan a lo largo de la longitud y terminan en el efector final. Las curvas trazadas se toman de un conjunto de bases que tienden a formar curvas en forma de S. Una vez que se consigue un conjunto de curvas se determina el manipulador para aproximarse a la configuración deseada, ajustándose a ese conjunto de curvas. Lamentablemente se encontró que esta técnica es muy costosa computacionalmente para usar en cálculos de cinemática inversa en tiempo real.



Como resultado de los altos tiempos de procesamiento, se propuso un algoritmo combinatorio genético por la cinemática inversa de HRMS [GB95], basado en un método de optimización de error [LS02]. Aunque el trabajo que se presenta en es considerablemente antiguo, algunas de las últimas publicaciones (2011) siguen tratando con los mismos problemas.

De acuerdo con [YM11]: "En el caso de manipuladores híper-redundantes con altos grados de libertad, la carga computacional de Jacobiana pseudoinversa se convierte en ineficaz a pesar de las mejoras propuestas. Por otra parte, la mayor parte de los esquemas propuestos en la cinemática inversa se centran únicamente en el nivel de velocidad. Por lo tanto, entre estos sistemas, el método geométrico para planificación de trayectorias se prefiere debido a su simplicidad, ahorro de energía y reducción de cálculos en comparación con los demás". Sin embargo, no entrega un resultado definitivo ya que adolece de carencias en la minimización de errores y tiempos rentables de solución en el procesado.

A día de hoy, este problema computacional persistente para la obtención de una solución válida para la cinemática inversa. De acuerdo con los resultados que se presentan en este capítulo, el tiempo de procesamiento para un cálculo de cinemática inversa sometido a un método exhaustivo puede ir hasta un año para una configuración de 10 módulos de robot. El presente trabajo pretende introducir nuevas alternativas de errores de optimización, también otras posibles soluciones para minimizar tanto el tiempo de procesamiento y el error de la posición y orientación; así como un estudio mediante la comparación de ellos con el método exhaustivo.

4.3.1. MÉTODO EXHAUSTIVO

El método exhaustivo, prueba todas las combinaciones módulos válidas de MCs, calculando para cada una de ellas una función de error. Posteriormente, evalúa esos errores y devuelve el de menor valor, en este método exhaustivo el error será nulo, siendo esa combinación el mínimo global.

Por lo tanto este método siempre encontrará la combinación de módulos que consigue llegar sin error al destino deseado. Por el contrario, hay que destacar su elevado número de iteraciones que, suponiendo un robot de n módulos, el número mínimo de iteraciones a realizar será de 10^n .

Para poder acometer el estudio y comparar los resultados, especialmente en el siguiente capítulo con el error de optimización, el primer paso consistió en identificar una expresión capaz de describir el error por sí misma.

La ecuación (4.3) muestra cómo se ha calculado el último error de posición ϵ_p . Éste fue calculado mediante una simple distancia euclidiana, donde P_u es el vector posición "definido por el usuario" y P_c es el vector de posición final calculado. P_x , P_y y P_z representan las direcciones x , y y z del valor de la componente de los vectores de posición tanto del definido por el usuario y el calculado.

$$\epsilon_p = \sqrt{(P_{u_x} - P_{c_x})^2 + (P_{u_y} - P_{c_y})^2 + (P_{u_z} - P_{c_z})^2}$$

(Ecuación 4.3)



Esta forma de calcular el error de posición fue escogida porque atiende a un cálculo cuyo coste computacional es muy ligero y es también una manera práctica de ponderación del error en función de la distancia al objetivo. Cuanto más cerca del punto final del cálculo es a la posición definida por el usuario más bajo es el ϵ_p y, consecuentemente, el error final de la expresión.

La misma metodología se utilizó para calcular el error de orientación final ϵ_A (véase la ecuación 4.3). A , es un vector que indica la orientación del último plano al vector normal de HRRS. La única diferencia entre el error de posición es que, ambos vectores, A_u (especificado por el usuario) y A_c (calculado), son unitarios, y por lo tanto se ϵ_A varía entre parámetros limitados, siendo $0 < \epsilon_A < 2$.

(Ecuación 4.4)

$$\epsilon_A = \sqrt{(A_{u_x} - A_{c_x})^2 + (A_{u_y} - A_{c_y})^2 + (A_{u_z} - A_{c_z})^2}$$

Por último, es necesario disponer de una ecuación de error completo y definitivo para comparar los métodos, lo cual se logró mediante la aplicación de la ecuación 4.5. El parámetro λ se elige para hacer hincapié en la prioridad del tipo de error que el usuario desea reducir, mientras que el parámetro β es una constante para crear una expresión físicamente coherente, ya que ϵ_p se mide en unidades de longitud y ϵ_A es una transformación unitaria del vector dirección. A efectos comparativos de este proyecto se establecieron los siguientes valores para los parámetros de ajuste, $\lambda = 4$ y $\beta = 1$.

(Ecuación 4.5)

$$\epsilon = \frac{\epsilon_P^2}{\lambda} + \epsilon_A^2 + \frac{\epsilon_P \epsilon_A}{\beta}$$

Figura 4.10 Error normalizado de las diferentes configuraciones de un HRR (4gl) para el método exhaustivo

En la figura 4.9 se muestra un ejemplo de una distribución de error típico sobre diferentes combinaciones de módulos (MCs). Esta figura también proporciona que la función de reducción al mínimo está lejos de ser un error suave y fácil de trabajar con ella.

A continuación se muestra el diagrama de flujo para el método exhaustivo. Al igual que en la cinemática directa, se puede elegir una posición y una orientación deseadas, o bien elegirlas de forma aleatoria.

Además el algoritmo ofrece dos soluciones válidas en función de si se calcula el primer módulo o no. En este sentido, disponer del primer módulo supone un ahorro sustancial en el tiempo de cálculo.

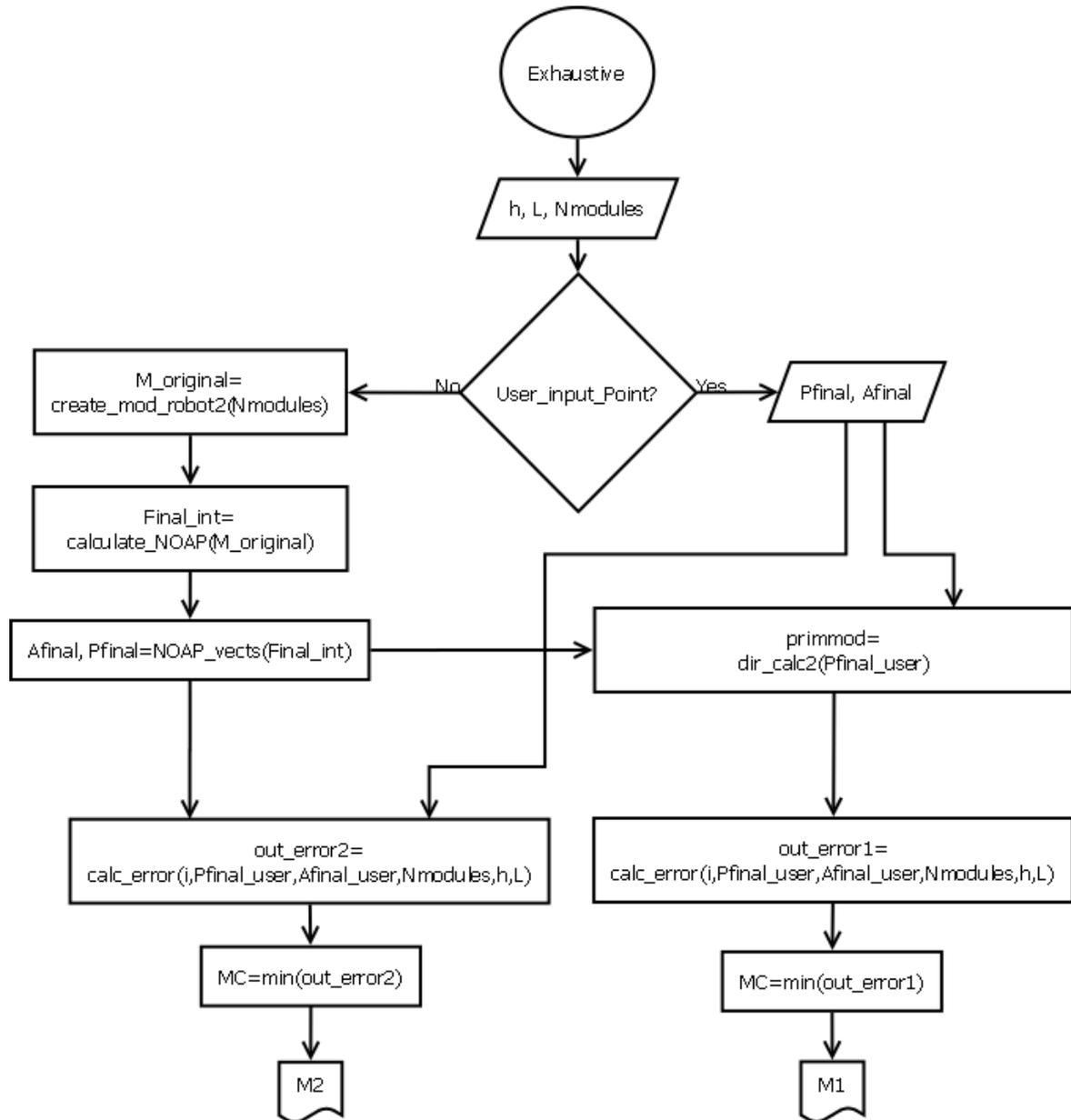


Figura 4.11 Diagrama de flujo para el método exhaustivo

Para ejecutar este algoritmo es necesario definir algunas variables de entrada del usuario:

- La distancia mínima entre los puntos centrales de dos módulos adyacentes: h
- Longitud de cada módulo cuadrado: L
- El número de módulos: $N\ modules$
- Punto final Posición: P_{final_user}
- Final de vector de orientación: A_{final_user}

El procedimiento para calcular el primer módulo se inicia mediante la proyección final de vector de posición definido por el usuario sobre el plano XY. Entonces el MC (figura 4.12) del primer módulo se elige en función del sector delimitado por los puntos



proyectados. Los sectores mencionados fueron creados por un ángulo $\pm 22,5^\circ$ entre cada eje principal (X e Y) y cada 45° del eje (en 45° y -45°) (figura 4.11).

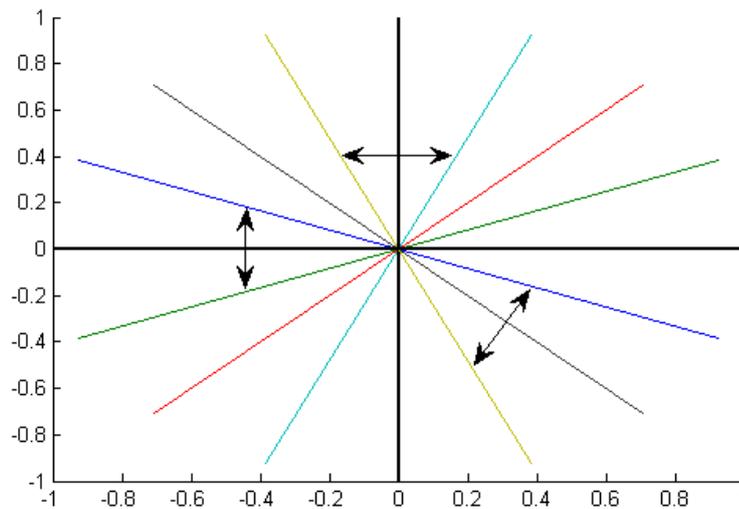


Figura 4.12 Secciones de 45° sobre el plano XY

Between colors	Axis	Quadrants	Considered degrees	MC
Blue & Green	X	I, IV	0°	12
Green & Cyan	45°	I	45°	8
Blue & Yellow	Y	I, II	90°	9
Yellow & Blue	-45°	II	135°	1
Blue & Green	X	II, III	180°	3
Green & Cyan	45°	III	225°	2
Cyan & Yellow	Y	III, IV	270°	6
Yellow & Blue	-45°	IV	315°	4

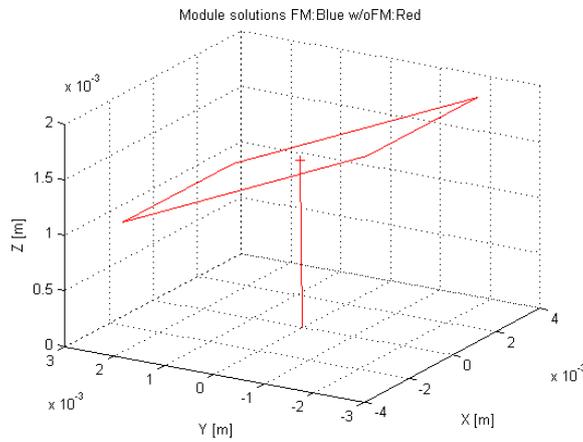
Figura 4.13 MCs para el primer módulo

La secuencia de realización del primer módulo de cálculo puede ser muy útil para reducir el CPT, pero en ocasiones puede convertirse en una compensación que se traduce en falta de exactitud de la solución.

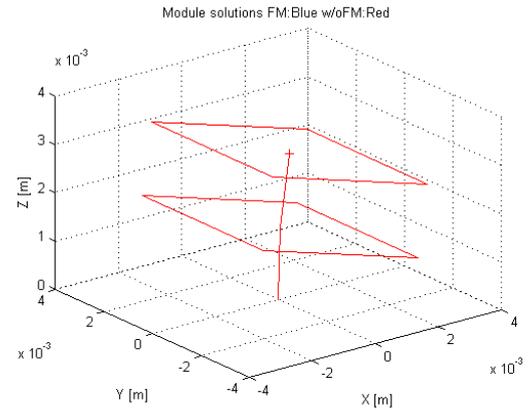
Algunos resultados demostrativos para el método exhaustivo se muestran a continuación:

Todos los ejemplos de esta sección se realizaron con el valor de parámetros $h=1$ mm y $L=5$ mm. La posición final y orientación de los vectores fueron dados mediante una selección aleatoria considerada como respuesta válida. En otras palabras, para el propósito de esta demostración de la función 'Calculate NOAP' se ejecutó una secuencia de MC al azar. El punto final y la orientación final de la secuencia son resultados derivados, del Script y de los valores introducidos por el usuario.

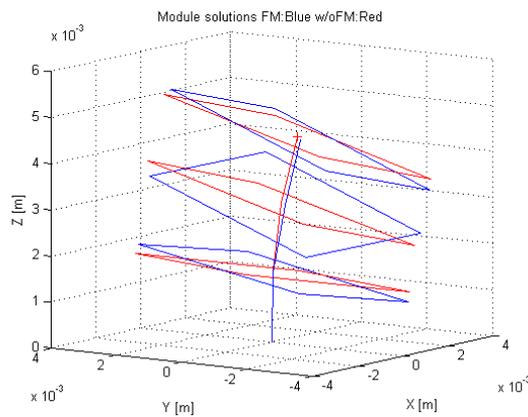
Es posible observar que las figuras 4.13 (a), 4.13 (b) y 4.13 (d) son muy similares. La principal diferencia se encuentra con la figura 4.13 (c), donde la solución obtenido con el primer cálculo del módulo no es el mismo que la solución sin él, siendo aún así una solución válida.



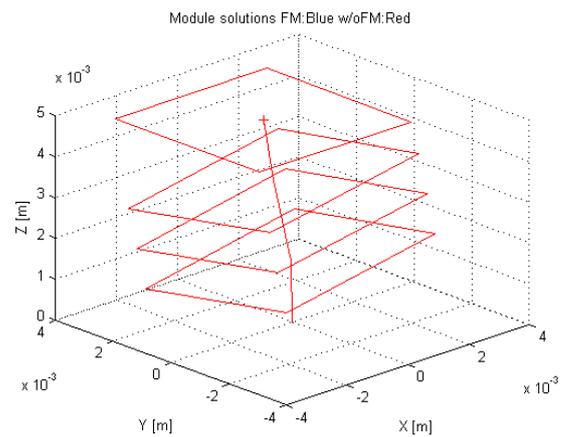
(a) $N_modules = 1$



(b) $N_modules = 2$



(c) $N_modules = 3$



(d) $N_modules = 4$

Figura 4.14 Ejemplos de cinemática inversa: HRRS mediante el método exhaustivo

Para todas las figuras, con excepción de la Figura 4.4 (c), es evidente que el error de posición y de orientación son iguales a cero, logrando de esta manera una solución perfecta: los HRRS se especifican hacia la resolución del punto final y la orientación especificada por el usuario.

Queda claro entonces que, a pesar de tener una gran mejora en el procesamiento computacional tiempo (CPT), el primer procedimiento de cálculo del módulo no garantiza la mejor respuesta, como el método exhaustivo completo normalmente hace.



4.3.2. PROBLEMAS NP-HARD

En teoría de la complejidad computacional, la clase de complejidad NP-hard (o NP-complejo, o NP-difícil) es el conjunto de los problemas de decisión que contiene los problemas H tales que todo problema L en NP puede ser transformado polinomialmente en H. Esta clase puede ser descrita como contenido de los problemas de decisión que son al menos tan difíciles como un problema de NP. Esta afirmación se justifica porque si podemos encontrar un algoritmo A que resuelve uno de los problemas H de NP-hard en tiempo polinómico, entonces es posible construir un algoritmo que trabaje en tiempo polinómico para cualquier problema de NP ejecutando primero la reducción de este problema en H y luego ejecutando el algoritmo A.

Para demostrar que el cálculo de la cinemática inversa mediante el método exhaustivo, en un robot híper-redundante con módulos de 3 grados de libertad, se trata de un problema NP-duro tipo H, y por tanto para resolverlo en tiempo polinomial para HRRs con más de cuatro módulos se hace necesario el uso de algoritmos de optimización, se utilizará un modelo de robot, también híper-redundante, pero de un solo grado de libertad por módulo como problema L.

Asumiendo por tanto que se dispone de un problema L, perteneciente al grupo NP, para la obtención de la cinemática inversa mediante el método exhaustivo, pudiendo este problema transformarse polinomialmente en H, si existe un algoritmo A que resuelve el problema L en tiempo polinómico, entonces se puede afirmar que sucederá lo propio con el problema H.

Se ha implementado un modelo Matlab que simula el comportamiento de un HRRs 1D (una dimensión), de forma que un mismo punto, elegido como final, puede ser alcanzado por diferentes configuraciones del robot, lo que le confiere la característica de híper-redundante.

El modelo implementado se asemeja a las antiguas antenas de coche, donde la posición del extremo final de la antena puede ser alcanzada por muchas configuraciones diferentes en función de que porción de cada uno de los cuerpos se desee sacar.

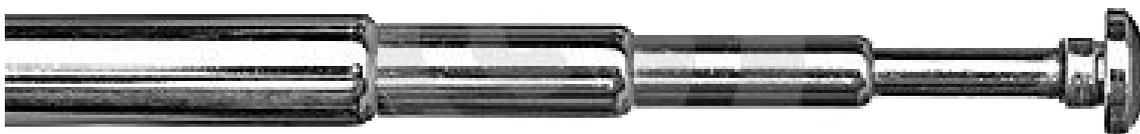


Figura 4.15 La antena de coche se considera como dispositivo híper-redundante

Para demostrar la complejidad computacional de este modelo 1D, se tratará de obtener la cinemática inversa para diferentes números de cuerpos, observando como el tiempo de ejecución aumenta exponencial como el incremento del número de módulos.

Otro ejemplo de un problema NP-duro es el problema de optimización para encontrar la ruta cíclica menos costosa a través de todos los nodos de un grafo ponderado, o también conocido comúnmente como el problema del viajante.



4.3.3. ROBOT HÍPER-REDUNDANTE 1D

Tal y como se ha mencionado en el punto anterior, un robot que trabaje en una sola dirección también puede ser un sistema híper-redundante.

Con el objetivo de demostrar las limitaciones que presenta el método exhaustivo para el cálculo de la cinemática inversa desde el punto de vista del cálculo computacional, y por ende, de su ineficacia para trabajar con equipos en tiempo real, se ha implementado, mediante Matlab, un prototipo de robot unidimensional híper-redundante.

En línea con lo expuesto en el punto anterior, y tomando como válida la teoría un problema NP-hard, si existe un algoritmo A que resuelve el problema L (1D) en tiempo polinómico, entonces se puede afirmar que sucederá lo propio con el problema H (3D) a través de una transformación polinómica.

Dado que se trata de un problema de optimización discreto, el nuevo robot 1D está compuesto por N cuerpos y cada cuerpo estará dividido en diez partes (x). La anchura de cada cuerpo (w) es elegida aleatoriamente para asegurar que todos los cuerpos sean diferentes.

Por lo tanto, y atendiendo a la ecuación 4.6, el punto del efector final (P) se encontrará como resultado del sumatorio de las anchuras de los cuerpos, multiplicadas por el punto x de partida.

$$(Ecuación 4.6) \quad P = \sum_{i=1}^N x_i \cdot w_i$$

Esa ecuación permite obtener la cinemática directa y mostrar la solución, pero el problema de la complejidad computacional surge cuando se ha de resolver la cinemática inversa, es decir, eligiendo un punto de destino, y a partir del número de cuerpos/módulos del robot y sus anchuras, obtener los valores de x que definen la configuración del robot.

N	MCs	Exhaustivo		pattersearch			SIMULANNEALBND		
		time	n feval	time	error	n feval	time	error	n feval
4	[1 4 9 12]	3,30	10.000	0,36	0	38	0,67	0	502
5	[2 0 8 4 9]	57,67	100.000	0,40	0	75	1,52	0	1.007
6	[2 6 6 0 12 6]	551,95	1.000.000	0,41	0	74	1,56	0	1.007
7	[4 15 15 1 15 15 4]	5969,82	10.000.000	4,15	0	66	2,65	0	1.007

Figura 4.16 Tabla comparativa de diferentes técnicas de resolución de cinemática inversa

Para demostrar las dificultades computacionales que presenta el método exhaustivo para el cálculo de la cinemática inversa, se ha establecido un estudio comparativo (tabla de la figura 4.14) entre dos técnicas de minimización del error por optimización (se explican detalladamente en el capítulo 5), pattersearch y simulannealed, y el método exhaustivo.

Como ejemplo gráfico que permita una mejor comprensión del estudio, se aporta la figura 4.15, la cual muestra la configuración del robot $X = [8 \ 9 \ 12 \ 8]$, necesaria para alcanzar el punto P situado en 2.3373 del eje de ordenadas, y obtenido a partir de la resolución de la



cinemática inversa con el método exhaustivo, siendo todas las anchuras (w) de cada módulo distintas.

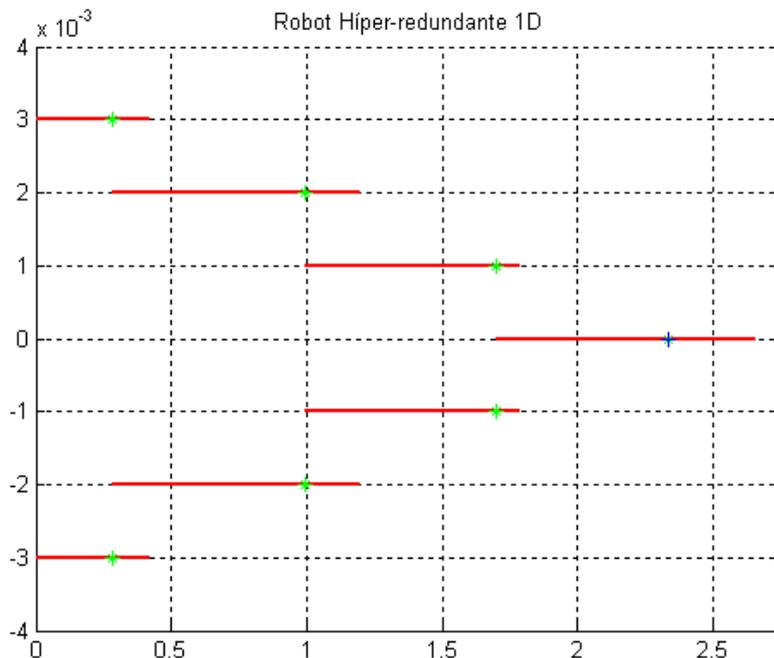


Figura 4.17 Ejemplo de cinemática inversa de un robot 1D con el método exhaustivo

Lo que se extrae del estudio comparativo mostrado en la tabla anterior es que, al igual que sucedía en robot 3D, el método exhaustivo es totalmente ineficaz para resolver robots con más de 4 módulos, el tiempo de operación alcanza el minuto para 5 módulos y aumenta sobremanera para los siguientes.

Los algoritmos de optimización del error (EOAs), alcanzan la solución correcta para todos los casos, utilizando tiempos muy bajos. Sin duda la clave radica en el número de funciones a evaluar, ya que el método exhaustivo evalúa todas las opciones posibles con el consiguiente gasto computacional.

Por lo tanto queda demostrado, mediante el robot hiper-redundante más simple, que las técnicas exhaustivas son totalmente inviables cuando deseamos trabajar con un número de módulos superior a 4. El número de evaluaciones se incrementa de la forma 10^N , lo cual ralentiza el proceso de la búsqueda de la inversa.

Finalmente, dado que los robots 1D y 3D pertenecen ambos al tipo NP, los algoritmos de optimización, válidos para el 1D, se emplearán para la inversa de HRRs de 3D.

CAPÍTULO 5

MINIMIZACIÓN DE ERRORES MEDIANTE ALGORITMOS DE
OPTIMIZACIÓN



CAPÍTULO 5.-

MINIMIZACIÓN DE ERRORES MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

5.1.MÉTODO ERROR DE OPTIMIZACIÓN

Se han propuesto algunas técnicas de cinemática inversa para HRMs, y muchos autores han trabajado con ellos a lo largo de los años, pero aún faltan por ser publicados enfoques simples para la minimización de errores mediante algoritmos de optimización (EOAs) para este tipo de problemas.

Como se comprobó en el capítulo anterior, el método exhaustivo está muy lejos de ser una técnica útil en tiempo real debido a su elevada carga computacional. En este sentido, las técnicas de optimización han ido ganando enteros en aplicaciones donde la precisión no sea un valor crítico.

Al igual que con el método exhaustivo, los algoritmos de optimización de errores (EOAs) también necesita variables de entrada, las cuales siguen siendo: h , L y $N_modules$. Una vez obtenidos estos parámetros, el EOA seleccionado puede encontrar una solución para las particularidades del problema propuesto. La solución dependerá fuertemente de las características geométricas del HRM, tal como se podrá ver más adelante.

```

Command Window
Do you want a random case(0) or user-input(1)?: 0

Number of Modules?: 10

Distancia entre módulos h(m)=0.001000
Longitud de cada módulo L(m)=0.003000
Punto de posicionamiento espacial(m) =0.005105 0.000818 0.013575
Orientación espacial (vectores unitarios) =0.014807 0.349274 0.936904

Code:

LOCAL:          1
PATTERNSEARCH:  2
GENETIC ALGORITHM: 3
GLOBALSEARCH:   4
MULTISTART:     5
SIMULANNEALBND: 6
NGSA_II:        7
GA MULTIOBJECTIVE: 8
ACO:            9
B&B:           10

Write down (as a vector) the codes for Global Optimizatон Algorithms to compare :

```

Figura 5.1 Pantalla principal del script EOA



La metodología para obtener los resultados del método de error de optimización se inicia mediante la solicitud al usuario de las condiciones físicas (geometría) del HRM. El usuario tiene la opción de elegir cualquiera de las entradas; la posición final y vectores de orientación o puede elegir que sean al azar de nuevo, a partir de una solución cinemática válida ya obtenida (figura 5.1).

Además, el script de Optimización calcula el primer módulo, al igual que el método exhaustivo. El cálculo del primer módulo no está dirigido en la reducción del tiempo de cálculo en sí, sino para dar a los EOAs un primer punto de búsqueda y de esta forma encontrar el mínimo global.

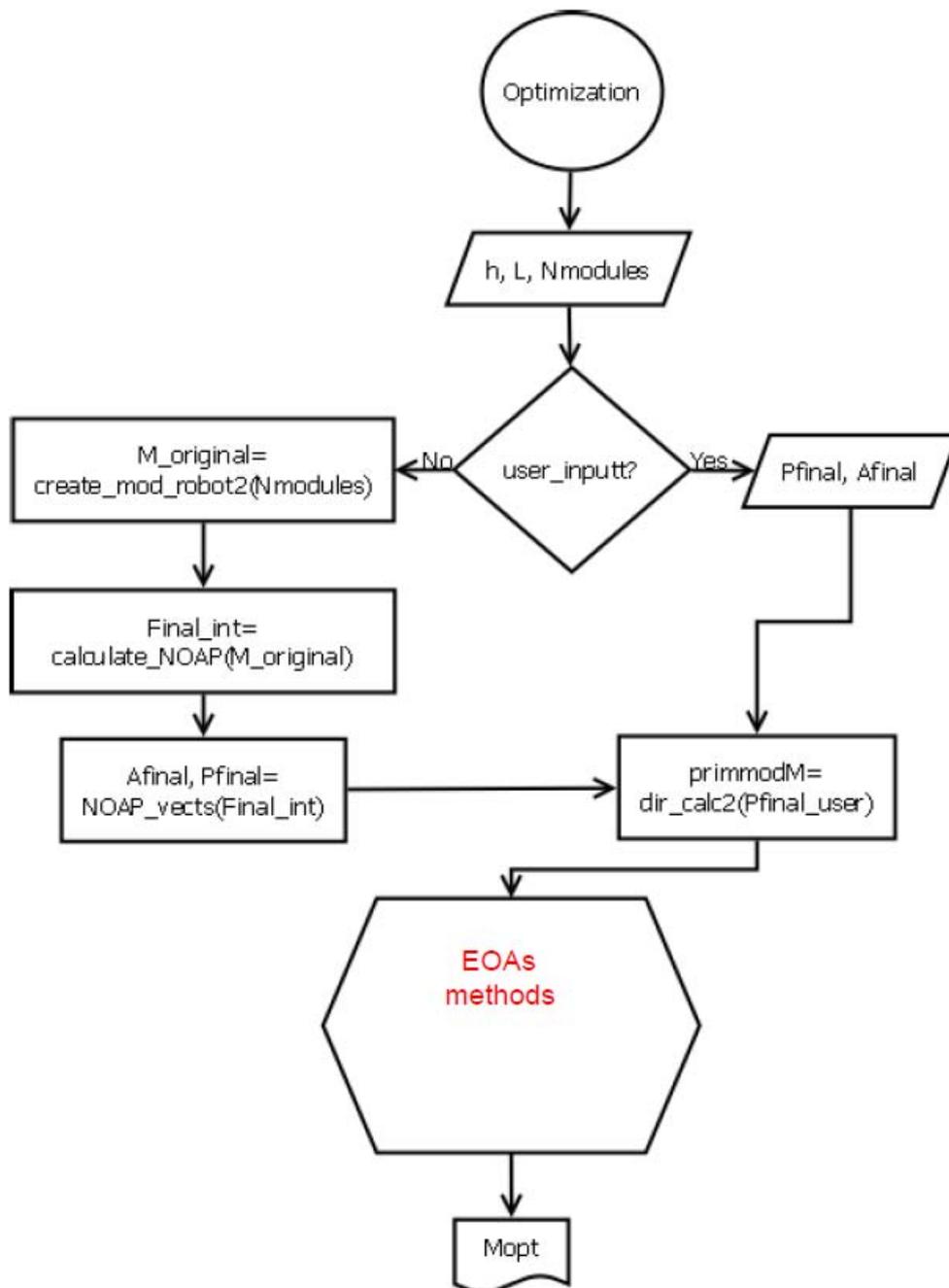


Figura 5.2 Diagrama de flujo para el método EOA



En otras palabras, los EOAs requieren un punto inicial para empezar a buscar la solución. Este punto podría ser elegido aleatoriamente, pero cuanto más cerca esté de la solución, más fácil, más rápido y posiblemente menos errores se cometerán para encontrar el mínimo global.

Después del cálculo del primer módulo, el usuario puede elegir entre los algoritmos de optimización de errores (EOAs).

Posterior a la ejecución de los algoritmos elegidos por el usuario, el resultado será una secuencia de MC que, idealmente, debería ser el mínimo global, y por lo tanto corresponde a la configuración de los módulos para lograr el destino final y la orientación deseada. La figura 5.2 muestra el nuevo diagrama de flujo diseñado para la aplicación de los EOAs.

Tal y como se comentó en el capítulo 4, la función de error utilizada para el método exhaustivo (ecuación 4.5) presentaba un perfil complicado para aplicar en métodos de optimización, debido a la cantidad de crestas y valles, ya que éstos que pueden dejar “atrapado” al algoritmo en un mínimo local.

Por ello se pensó en una función de coste más suave (ecuación 5.1), donde los parámetros de ajuste β y λ actúan sobre el error de posición y orientación respectivamente.

$$normP_u = \sqrt{(P_{u_x})^2 + (P_{u_y})^2 + (P_{u_z})^2} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

$$normP_c = \sqrt{(P_{c_x})^2 + (P_{c_y})^2 + (P_{c_z})^2} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

$$\varepsilon_p = \sqrt{\left(\frac{P_{u_x}}{normP_u} - \frac{P_{c_x}}{normP_c}\right)^2 + \left(\frac{P_{u_y}}{normP_u} - \frac{P_{c_y}}{normP_c}\right)^2 + \left(\frac{P_{u_z}}{normP_u} - \frac{P_{c_z}}{normP_c}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

$$\varepsilon_A = \sqrt{(A_{u_x} - A_{c_x})^2 + (A_{u_y} - A_{c_y})^2 + (A_{u_z} - A_{c_z})^2} - 1 \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

$$\varepsilon = \beta \cdot \varepsilon_p + \lambda \cdot e^{\varepsilon_A} \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Para el análisis de los diferentes métodos que se muestran a continuación, se ha elegido como valores de la geometría del HRR; $h=1\text{mm}$ y $L=3\text{mm}$. Destacar que las representan dos robots; uno en rojo, que se obtiene de la cinemática directa a partir de una configuración válida aleatoria, y uno en azul, que es el que se obtiene como resultado aplicar las técnicas EOAs a la cinemática inversa.

El tiempo de procesamiento computacional, así como un error de la posición y orientación para los EOAs se van a comparar y discutir más adelante.

5.1.1. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN CONTINUOS

5.1.1.1. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN CONTINUOS MONOBJETIVO

En este apartado se realizará un estudio comparativo entre los algoritmos de optimización globales más comunes: Patternsearch, GeneticAlgorithm, Globalsearch, Multistart y Simulannealbd. Estas funciones continuas, existentes en Matlab, tendrán como salida un valor real comprendido entre (0, 1). Para proceder a obtener la configuración del robot de menor error, se utilizó la ecuación (5.5) teniendo como objetivo minimizar la función monobjetivo. Las principales características del uso de los algoritmos globales de optimización se describen a continuación.

a) Patternsearch

Se encarga de realizar una búsqueda través de varias fuentes y comprobar la serie de puntos más cercanos antes de aceptar una de ellas. Este método es menos meticuloso, pero es robusto y, lógicamente, más eficiente que los solvers locales.

Para observar la potencia de este método y la rapidez del cálculo, se aporta la figura 5.3 la cual corresponde, en su imagen izquierda, a una de las soluciones del robot con 10 módulos y al valor medio del tiempo necesario para resolverlo, imagen derecha.

El estudio se realizó con 1000 iteraciones obteniendo un valor medio de 1,3 segundos en obtener una configuración MC óptima. En cuanto a los errores de posición y orientación se mantienen por debajo de la milésima y la décima de radián respectivamente.

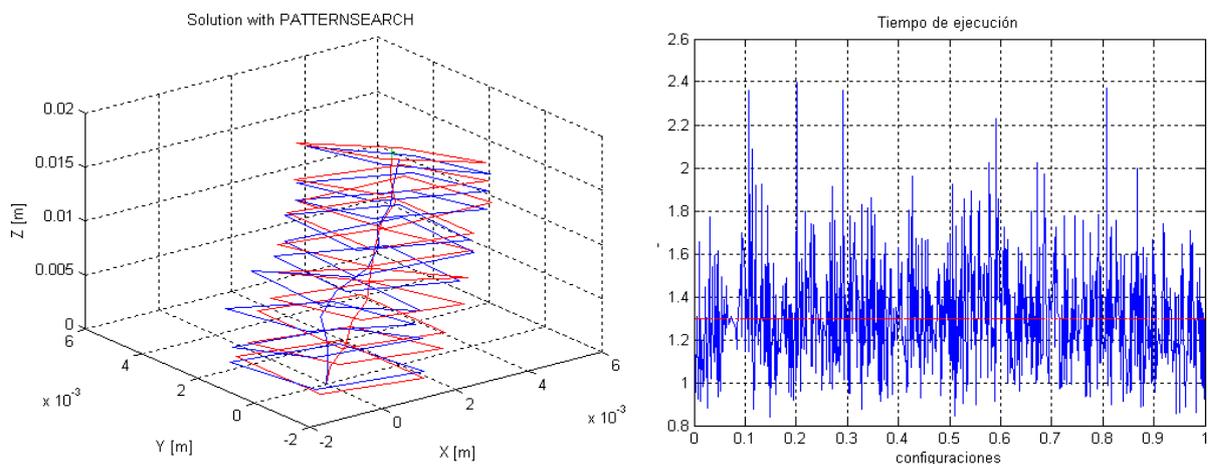


Figura 5.3 Solución con Patternsearch para HRRs de 10 módulos

Puesto que la función de error dispone de parámetros de ajuste, lambda relacionada con la orientación y beta con la posición. En los dos casos siguientes, se ha seguido trabajando con el mismo EOA y el mismo robot de 10 módulos. En el primero y durante 1000 iteraciones se premia la orientación con lambda diez veces mayor que beta, y en el segundo, justo lo contrario, se apuesta por la posición.



lambda = 10;
beta = 1;

PositionErrors =

1.0e-003 *

0.0863
0.8164
0.5989

OrientationErrors =

0.1206
0.0018
0.0609

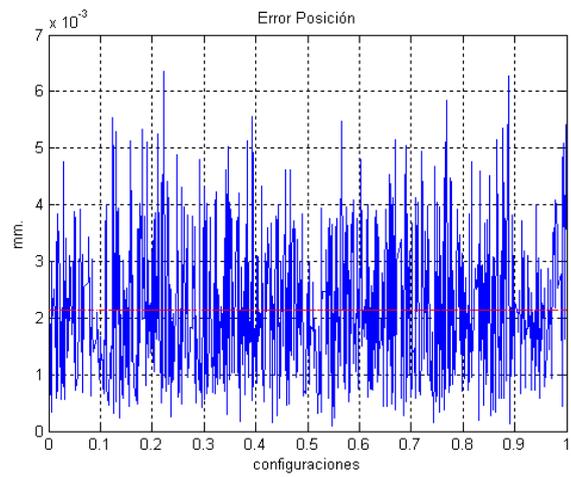
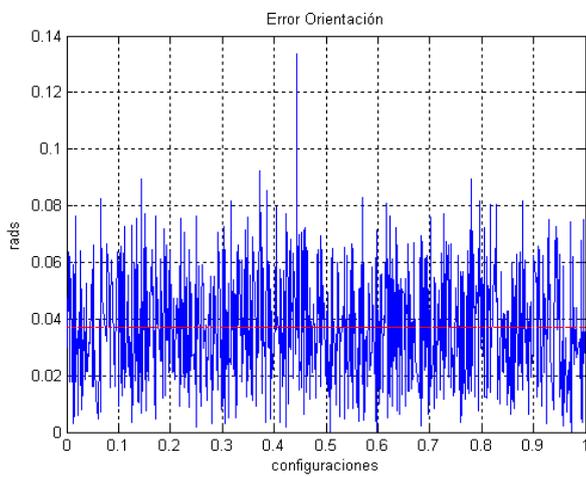
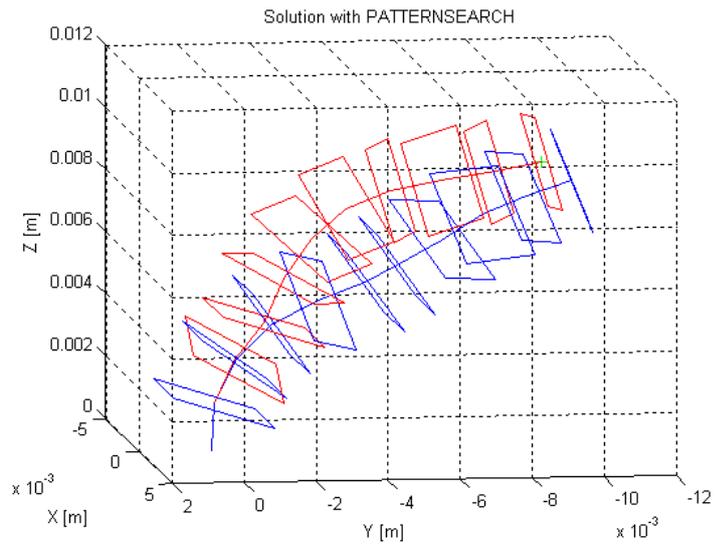


Figura 5.4 Solución con Patternsearch de 10 módulos con lambda=10 y beta=1

lambda = 1;
beta = 10;

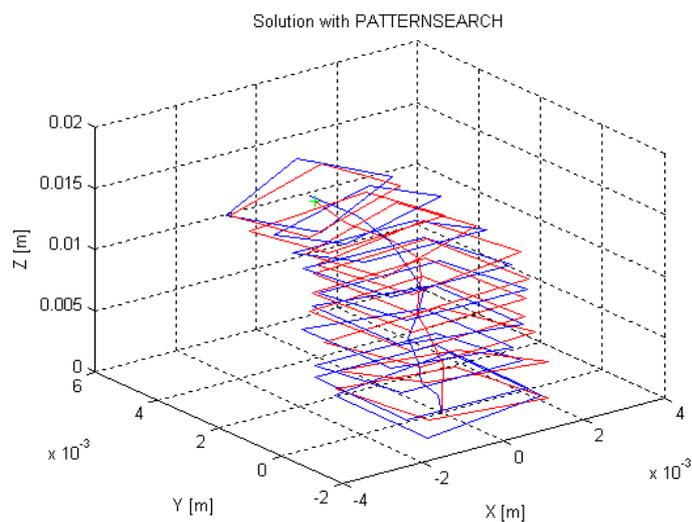
PositionErrors =

1.0e-003 *

0.1552
0.3963
0.1728

OrientationErrors =

0.0775
0.0762
0.0138



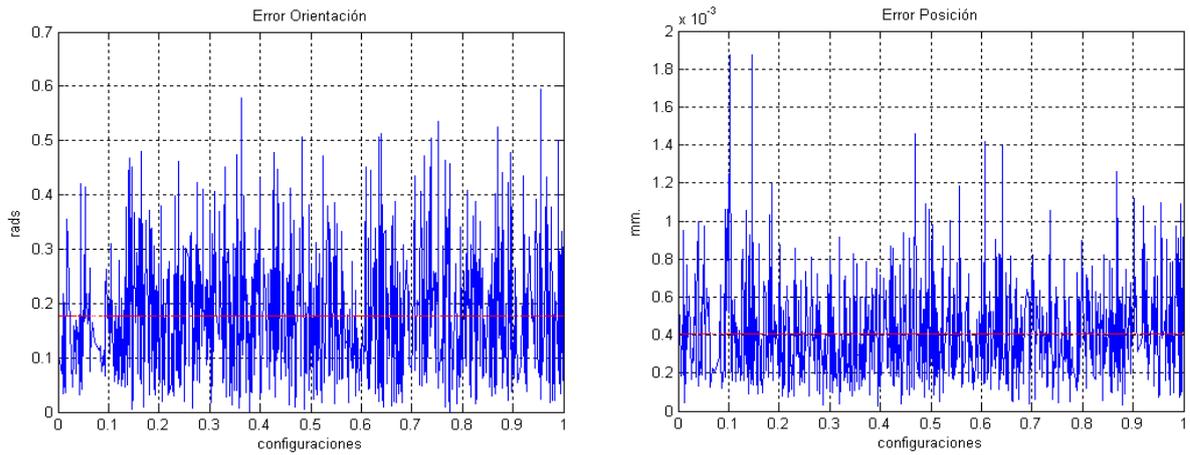


Figura 5.5 Solución con Patternsearch de 10 módulos con $\lambda=1$ y $\beta=10$

Como muestran las gráficas de los dos casos anteriores, gracias a la variación de los parámetros de ajuste se puede, con el mismo robot, disponer de dos funcionalidades según si nuestra aplicación requiere de mayor posicionamiento (coger un objeto) u de una mejor orientación (robot cámara o linterna).

Aprovechando los buenos resultados mostrados por patternsearch, se decidió triplicar el número de módulos del robot y observar si mantiene ese grado de precisión y orientación.

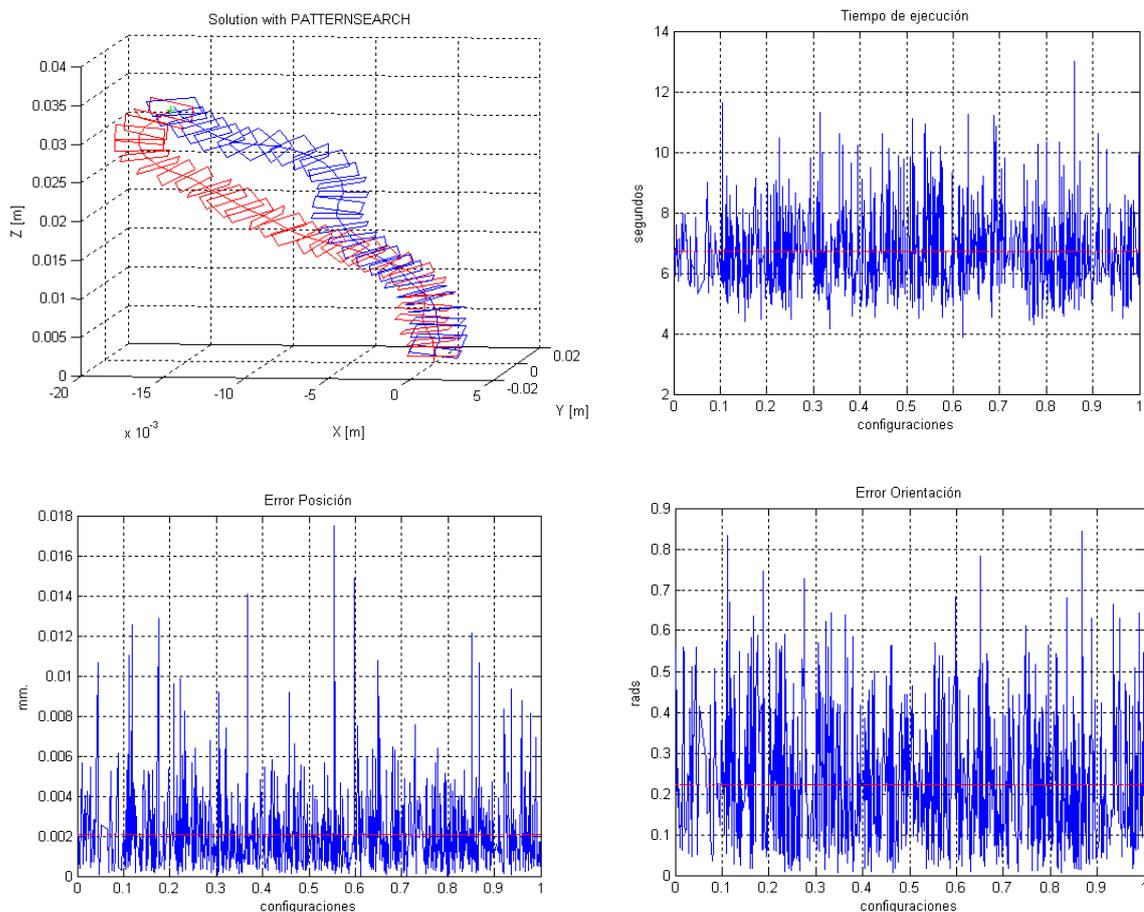


Figura 5.6 Solución con Patternsearch para HRRs de 30 módulos



b) Globalsearch

Es muy similar a Patternsearch, ya que toma un número de puntos de partida (más grande para GlobalSearch que para Patternsearch) y luego utiliza un solver local para encontrar los mínimos locales y así poder comparar al final. La diferencia entre estos dos es la cantidad de fuentes exploradas y, por lo tanto, GlobalSearch debería llegar, al menos teóricamente, a una solución mejor.

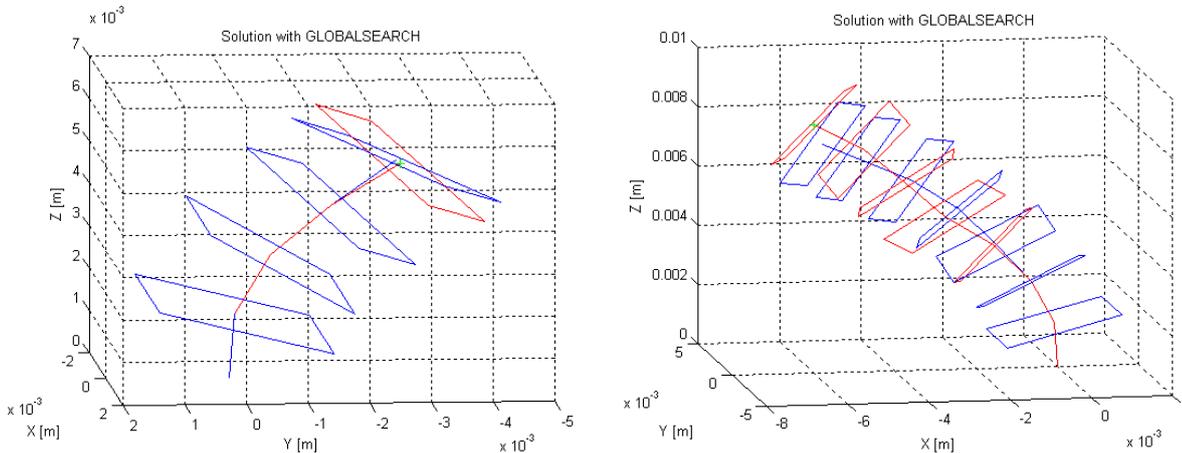
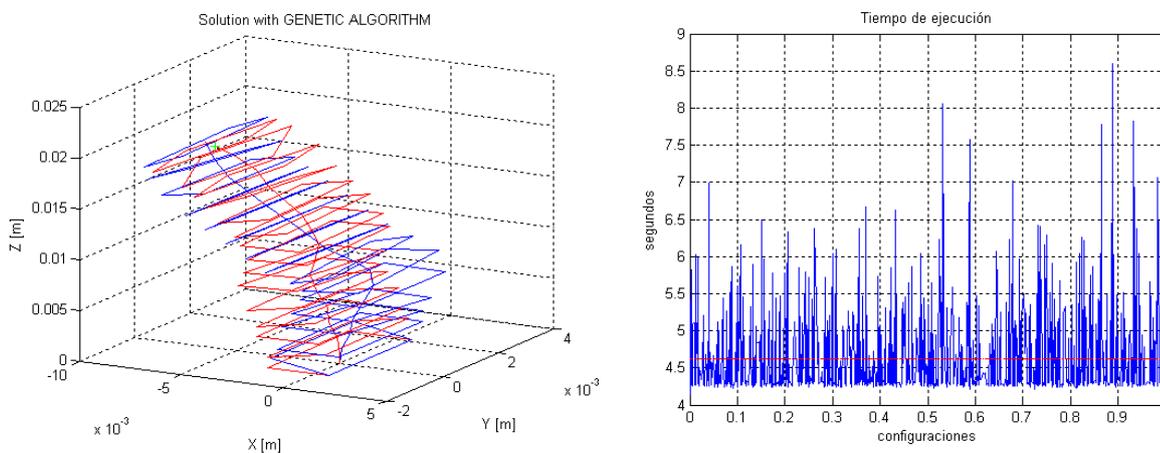


Figura 5.7 Solución con globalsearch para 4(izq.) y 7(dcha) módulos

Si bien la propia definición de la función mencionaba que podía llegar a mejorar a patternsearch, nada más lejos de la realidad, incluso para un modelo tan sencillo como es el robot de 4 módulos, presenta errores. Por lo tanto se rehúsa seguir realizando más estudios con ella debido a su alta tasa de errores.

c) GeneticAlgorithm

Los algoritmos genéticos se basan en métodos evolutivos naturales. Esto significa que la nueva generación de "hijos" tendría una mejor adaptación (menos errores) que sus "padres", que continuarán con la reproducción hasta que se conozcan los criterios de parada.



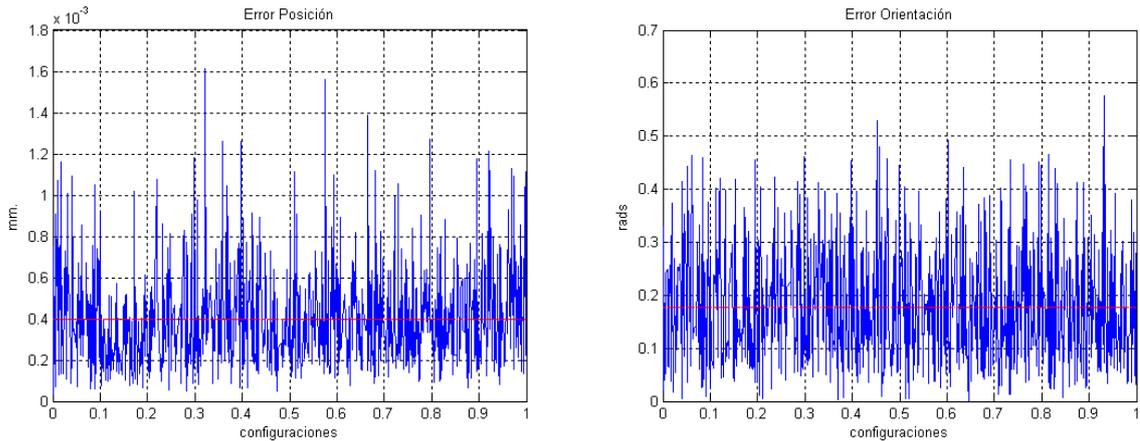


Figura 5.8 Solución con “ga” para 15 módulos

Para probar las capacidades que presenta para el cálculo de la inversa de nuestro modelo HRR, se optado porque “ga” (así se le denomina en Matlab), haga dos estudios de 1000 iteraciones cada uno para 15 y 25 módulos.

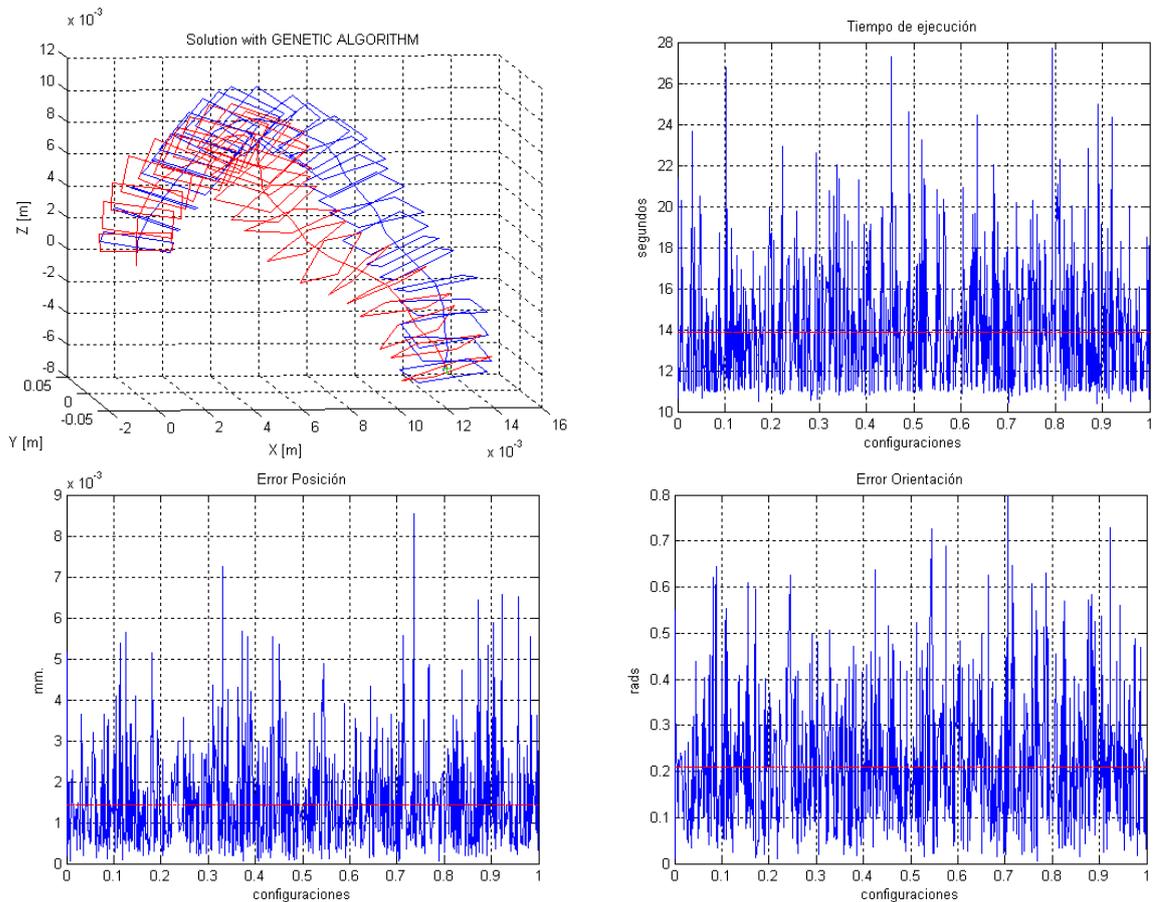


Figura 5.9 Solución con “ga” para 25 módulos

De las pruebas realizadas se puede decir, que el posicionamiento es bastante bueno, especialmente para el caso de 15 módulos donde el error es inferior a la milésima. Por otra parte, la orientación se mantiene prácticamente constante en torno a 0,2 radianes. Si lo



comparamos con los resultados de patternsearch, se observa como es el tiempo de operación el que marca las diferencias, siendo el algoritmo genético tres veces más lento.

d) Multistart

Utiliza 500 puntos seleccionados al azar (la cifra podría variar, ya que depende del usuario) pero la cantidad por defecto son 500 puntos entre los límites inferior y superior (también especificado por el usuario) y a continuación, utiliza una optimización local algoritmo (para este caso, 'fminunc') para encontrar los mínimos locales. Más tarde se compara los mínimos con el fin de dar al usuario la respuesta más ajustada al mínimo global.

Se muestran a continuación 3 imágenes para tres métodos distintos del optimizador local 'fminunc'; arriba a la izquierda, el método del gradiente para 10 módulos, arriba a la derecha, Algoritmo DFP (Davidon, Fletcher, Powell) para un robot de 15 cuerpos, abajo a la izquierda, Algoritmo BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shannon) para 20. Similar a fminunc es 'lsqnonlin'. La única diferencia es el algoritmo de optimización local que se utiliza. Por tanto es último caso está representado en la imagen inferior derecha.

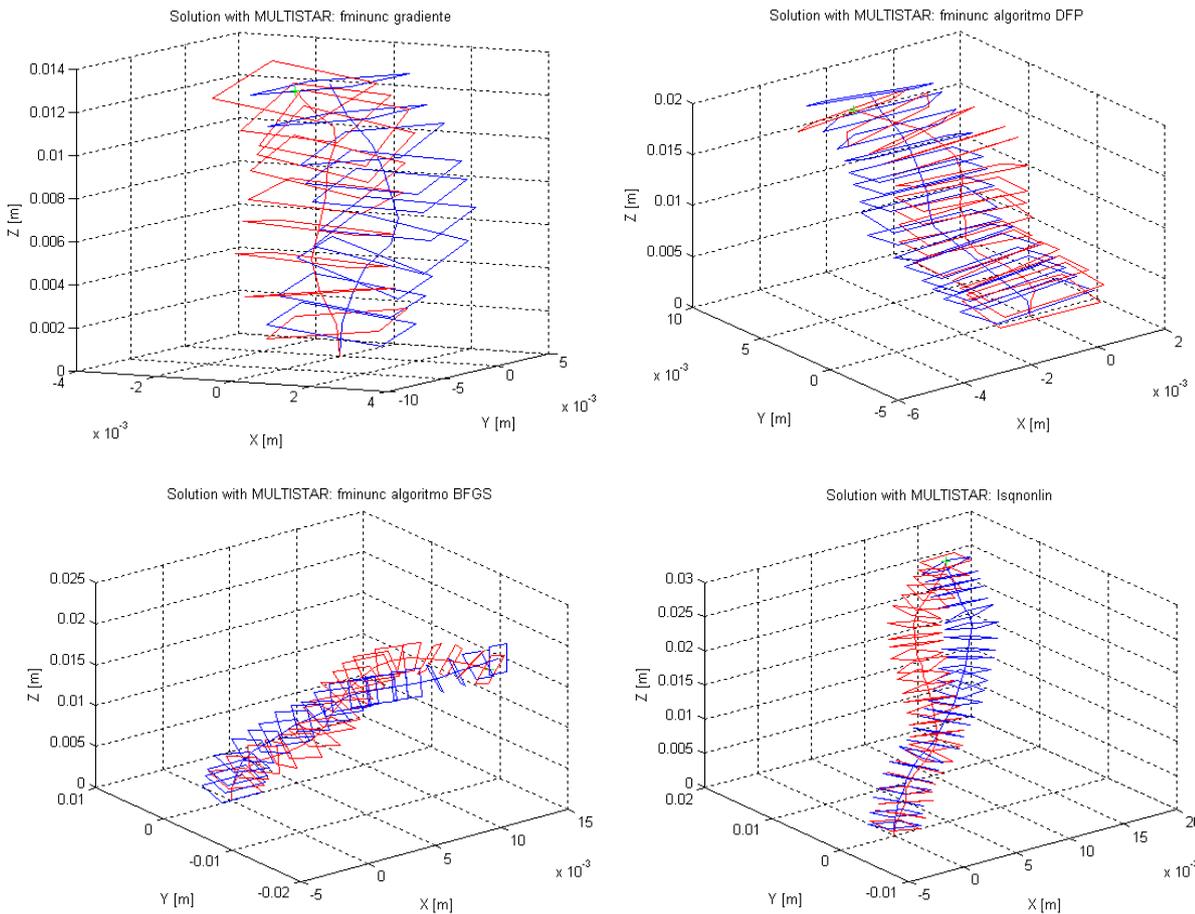


Figura 5.10 Solución con multistart para diferentes módulos y algoritmos

Desde el punto de vista del error de posición todos los algoritmos, exceptuando el método del gradiente que es demasiado tosco para estos sistemas, muestran unos resultados muy aceptables, posicionándose con errores inferiores a la milésima.



Infortunadamente los cuatro algoritmos sufren de la misma dolencia, el tiempo de ejecución, moviéndose en el entorno de los 10 segundos, lo cual les hace alejarse de las operaciones en tiempo real.

e) Simulannealbnd

Realiza una búsqueda al azar. Generalmente, simulannealbnd acepta un punto si es mejor que el punto anterior escogido. En ocasiones acepta un punto del peor con el fin de llegar a una fuente diferente. Por lo general, es el solver más lento.

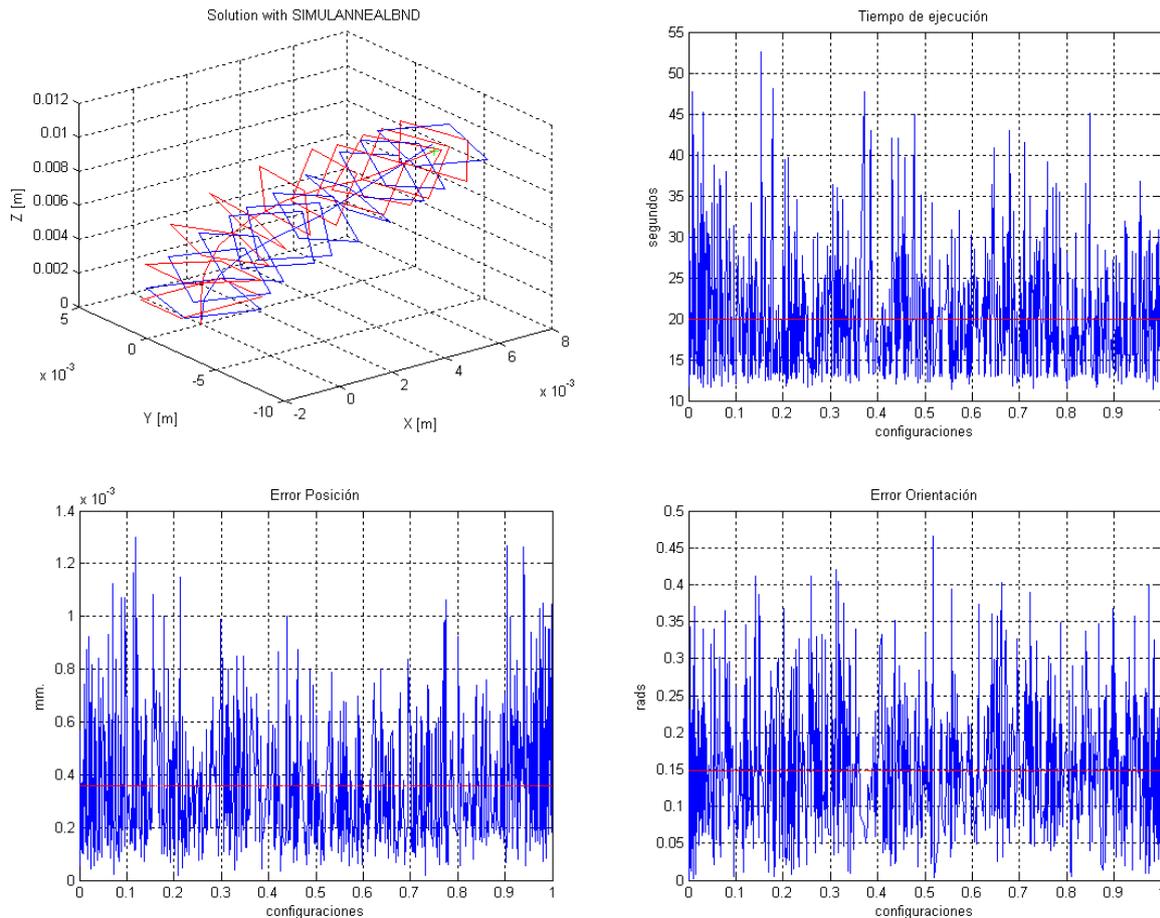


Figura 5.11 Solución con Simulannealbnd para robot de 10 módulos

Del estudio se desprende, tal y como adelantaba la definición de la función, que se trata de un método muy lento, necesitando 20 segundos de media para resolver la cinemática inversa de un robot de 10 módulos.

Si bien el tiempo de cálculo es el lastre de este EOA, la precisión es su gran virtud siendo uno de los métodos con menor error de posición. En tiempo real no es un método que se pueda aplicar, incluso con máquina muy potentes computacionalmente hablando, pero puede ser un método muy interesante para trabajos off-line.



5.1.1.2. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN CONTINUOS MULTIOBJETIVO

Si en el apartado anterior se han estudiado y analizado los EOAs más comunes con optimización monobjetivo, es en el presente se analizan los multiobjetivo, siendo una función objetivo la posición y la otra la orientación. La idea es “separar” en dos la función de coste utilizada anteriormente, y observar si ofrece mejoras respecto ella.

Tal y como se podrá ver en las figuras siguiente correspondientes a los métodos MOEAs, NGSAll y gaMO, son algoritmos que requieren de equipos potentes para manejarlos con soltura y aprovechar sus capacidades, si bien la precisión no alcanza los resultados obtenidos con los casos monobjetivo.

a) NGSAll

Es un popular algoritmo genético basado en la no-dominación para la optimización multiobjetivo. Es un algoritmo muy eficaz, pero en general ha sido criticado por su complejidad computacional, la falta de elitismo y la elección del valor del parámetro óptimo.

Para observar la relación entre los dos objetivos se añade, además, el frente de pareto para un robot de 10 cuerpos. Se han utilizado 100 generaciones y poblaciones de 20 individuos para no añadir mayor lentitud al cálculo.

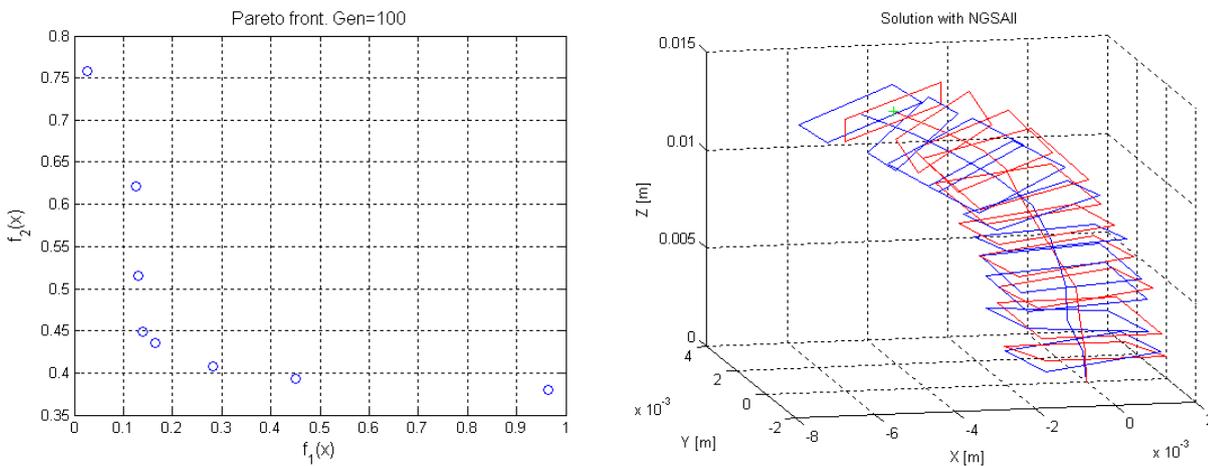


Figura 5.12 Solución con NGSAll para robot de 10 módulos

b) gaMO

Está basado en el algoritmo genético monobjetivo, y al igual que el con NGSAll se va a comprobar su posicionamiento y orientación con un robot de diez posiciones.

A simple vista se observa como aparte de ser métodos lentos, no se obtiene un buen posicionamiento con ellos, con errores muy por encima de la milésima.

En la figura siguiente se muestra el resultado obtenido de la cinemática inversa para el HRR de 10 módulos.

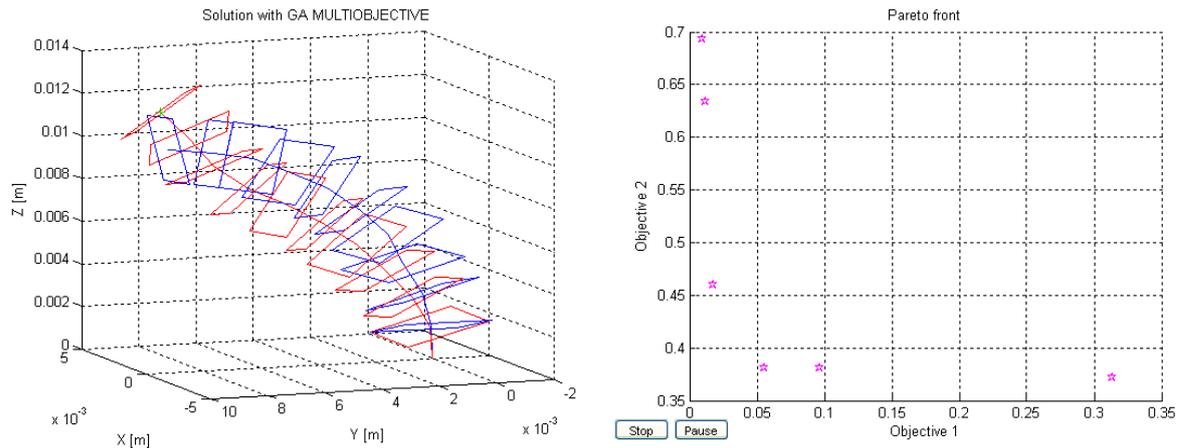


Figura 5.13 Solución con gaMO para robot de 10 módulos

5.1.2. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DISCRETOS

a) ACO (Ant Colony Optimization)

En la naturaleza, las hormigas vagan aleatoriamente en su búsqueda de alimento, y a lo largo de su camino de regreso a la colonia depositan una hormona denominada feromona. Si otras hormigas encuentran este rastro, lo más probable es que sigan este camino para depositar el alimento en la colonia. Con el paso del tiempo el rastro de la feromona comienza a evaporarse y se reduce su fuerza atractiva. Las hormigas que siguen el rastro aumentan la cantidad de la feromona, con lo que el rastro es más fuerte y dura más tiempo. Cuantas más hormigas recorran ese camino, más intenso será el olor de la feromona, lo que estimula a más hormigas a seguir esa trayectoria.

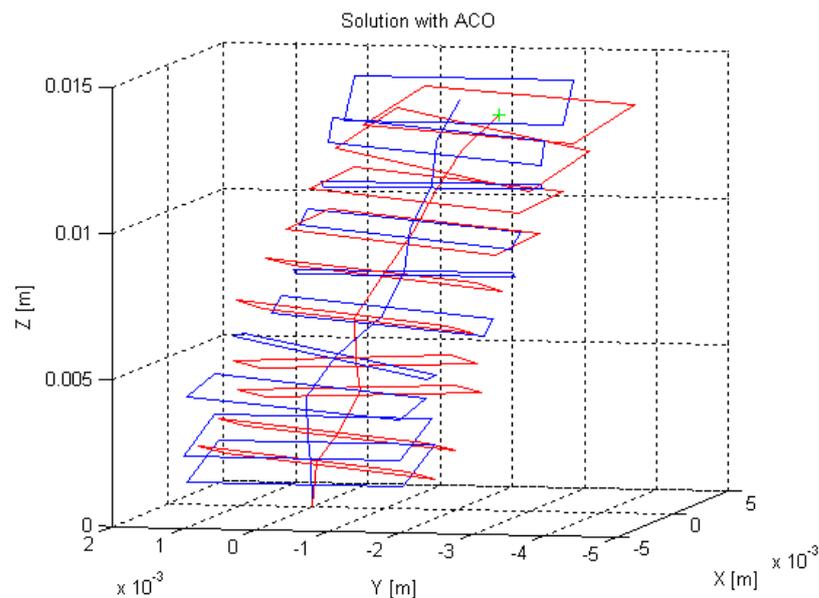


Figura 5.14 Solución con ACO para robot de 10 módulos

Desde el punto de vista algorítmico, la evaporación de la feromona tiene la ventaja de provocar la convergencia a una solución localmente óptima. Si no hubiera evaporación,



todas las trayectorias posibles serían igualmente atractivas para las hormigas. Esta situación haría que las trayectorias menos usadas por las hormigas, fueran igual de atractivas que las más utilizadas. Así, cuando una hormiga encuentra una buena trayectoria de la colonia a una fuente de alimento, es más probable que otras hormigas sigan esa trayectoria, y la regeneración de la feromona provoca que finalmente todas las hormigas sigan una sola trayectoria. Este comportamiento es la base para el diseño del algoritmo, donde las "hormigas simuladas" caminan alrededor del gráfico que representa el problema que solucionar.

La figura 5.14 muestra uno de los resultados obtenido de someter al algoritmo desarrollado a 200 iteraciones. De esta prueba se extrajo que el tiempo es prácticamente constante para todas las iteraciones, 10 segundos y que el error de posición medio es de 3 milésimas.

Por lo tanto, si bien la optimización discreta puede ser muy intuitiva y beneficiosa en según qué aplicaciones, hasta el momento no puede superar las prestaciones de los métodos continuos monobjetivo.

5.1.3. MÉTODO EOA DINÁMICO

Se ha estudiado como afecta la variación, durante el tiempo de ejecución, de los parámetros de ajuste de posición y orientación. Con ello se pretendía evitar que los EOAs quedaran atrapados en mínimos locales, además de mejorar el tiempo de respuesta.

La realidad tal y como muestran los ejemplo siguientes, es que la búsqueda de los supuestos “parámetros perfectos”, incrementa el número de iteraciones y por ende el tiempo computacional.

Se eligieron dos métodos EOAs ya tratados al principio del capítulo, pattersearch y simmulannelbnd, para poder comparar.

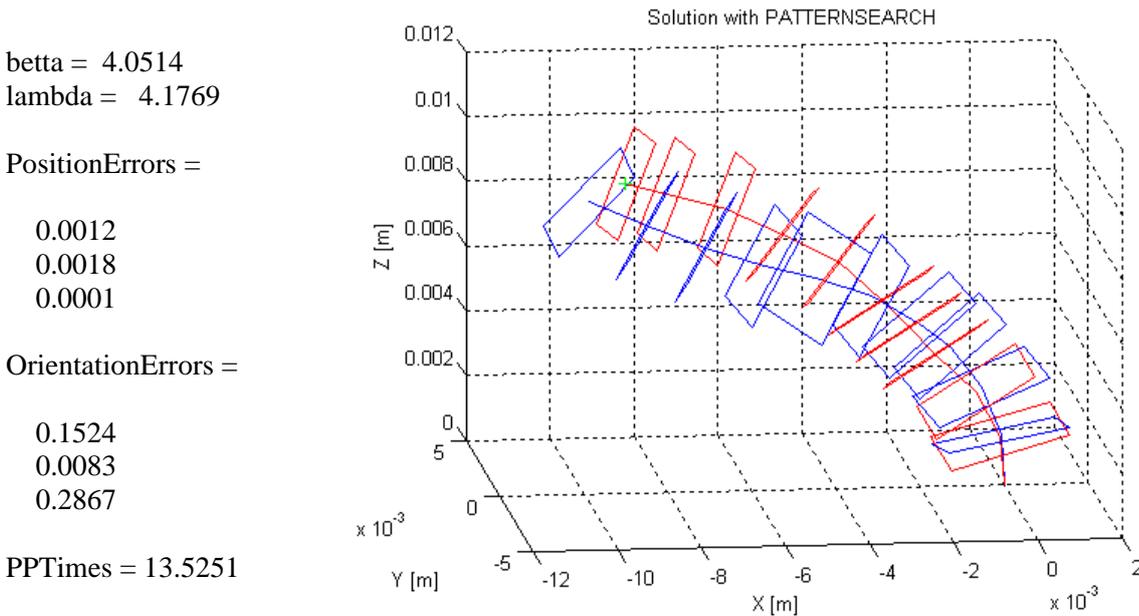


Figura 5.15 Solución con patternsearch para robot de 10 módulos



beta = 2.0412
lambda = 4.6371

PositionErrors =

0.0022
0.0006
0.0004

OrientationErrors =

0.6428
0.0886
0.5893

PPTimes = 293.7969

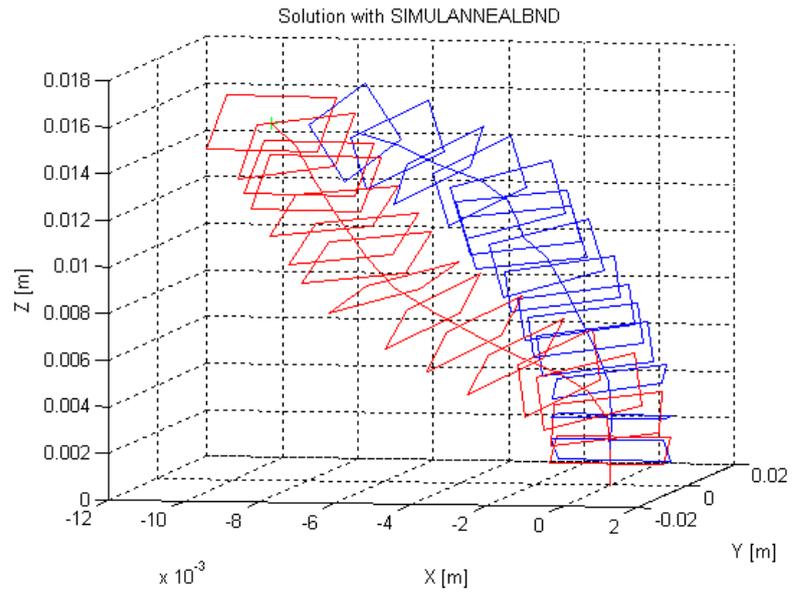


Figura 5.16 Solución con Simulannealbnnd para robot de 10 módulos

Los resultados muestran cómo los tiempos, en el mejor de los casos, se triplican y los errores no se ven reducidos, por lo que se anula el carácter con el que fue creado este algoritmo, huir de los mínimos locales.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO



CÁPITULO 6.-

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

6.1.CONCLUSIONES

En este documento se han mostrado los alcances y las acciones llevadas durante el presente trabajo fin de máster, para la obtención del citado título *Máster de Investigación en Ingeniería de Sistema y Procesos*, cuyo propósito está basado en la finalización del análisis de la cinemática inversa del robot HRR y la minimización de los errores de posicionamiento y orientación mediante distintas técnicas de optimización.

Este análisis cinemático hace referencia a la localización espacial de los robots endoscópicos hiper-redundantes con la variación del tiempo, mediante el uso de información con respecto a la posición y orientación de sus componentes.

El prototipo obtenido en Matlab, permitirá extraer conclusiones altamente valiosas para la posterior implementación en un prototipo real, hiper-redundante, accionado electromagnéticamente y que dispondrá de un extremo fijo y otro móvil para uso en diferentes aplicaciones.

En este trabajo, se han aplicado varios enfoques para calcular, presentar y comparar la cinemática inversa de un robot hiper-redundante, partiendo de 4 y llegando hasta 30 grados de libertad. Se observó que el método exhaustivo es una herramienta muy poderosa para un cálculo que contenga un número pequeño de módulos (menor o igual a 4), ya que calcula el error óptimo y mínimo de la posición y orientación en un periodo corto de tiempo (menos de 18 s). Sin embargo, la limitación radica en que ese pequeño número de módulos se hace inadecuado para las aplicaciones propias de la vida real. A diferencia del método exhaustivo, los algoritmos de optimización de errores no emplean tanto tiempo en su cálculo, pero penalizan con la ausencia de la solución óptima completamente garantizada.

Es evidente que algunas de las propiedades físicas de los HRR pueden tener un impacto en el comportamiento de las simulaciones, en especial los parámetros tales como el número de módulos, cuantos más módulos más complejo será el cálculo para el método exhaustivo y para el método de error de optimización, la relación entre h (distancia entre módulos) y L (dimensiones de cada módulo), ya que esta relación determina la "flexibilidad" del manipulador hiper-redundante.

Se ha conseguido delimitar los errores de posicionamiento en una horquilla que va desde valores inferiores a la milésima para HRM de 10 gdl hasta 3 milésimas para los de 30 gdl y además conseguirlo en tiempos razones en algunos de los EOAs estudiados. Por su parte los errores de orientación se encuentran delimitados en una horquilla que va desde valores inferiores a una décima de radián para HRM de 10 gdl hasta 3 décimas para los de 30 gdl.

Las técnicas multiobjetivo y discretas son a día de hoy demasiado pesadas para los equipos convencionales lo dificulta su uso para aplicaciones que requieran tiempo real. Por otra parte no se apreció una ventaja significativa entre utilizar una función de coste normal frente a una con pesos o ajustes dinámicos.



6.2.FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Un algoritmo de optimización global de problemas personalizados podría ofrecer una actualización del rendimiento al proyecto actual, y podría ser desarrollado desde el principio para tener en cuenta restricciones que dependen de la aplicación específica del HRM.

Además llevar a cabo un procesado de datos off-line con suficiente capacidad para aplicar técnicas de extracción de características y patrones, a fin de conseguir parámetros de ajuste “a medida” para cada problema y algoritmo.

También como trabajo futuro se puede señalar la mejora en el rendimiento computacional de las máquinas, es decir, las mejoras de las características hardware conllevarían una serie de ventajas que permitirían ambas soluciones más rápidas y una mejor gestión de los recursos. El procesamiento en paralelo también podría ser implementado con el fin de acelerar el tiempo de procesamiento.

Desde la presentación de un desarrollo de manipuladores híper-redundantes hasta llegar a la fase de prototipo caben aún mejoras tecnológicas como la incorporación de mejores materiales para la miniaturización en trabajos futuros. Todo ello permitiría a los HRM acceder, de forma más sencilla a las diferentes cavidades corporales y reducir las lesiones/molestias, en el caso de robot endoscópicos o adentrarse en espacios devastados como robot de salvamento, etc...

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA



CÁPITULO 7.-

BIBLIOGRAFÍA

Se expondrán en este capítulo las fuentes necesarias para la elaboración del presente trabajo y para la redacción de la memoria:

[CB94] Chirikjian, G. and Burdick, J. (1994). IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol. 10.

[DB11] Donald, B., Algorithms in Structural Molecular Biology, The MIT Press, 2011.

[LS02] Lichter, M., Sujan, V., and Dubowsky, S., Computational issues in the planning and kinematics of binary robots, in Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002.

[YM11] Yahya, S., Moghavvemi, M., and Mohamed, H., Scientific Research and Essays Vol. 6 (2011).

[SC01] Sofge, D. and Chiang, G., Design, implementation and cooperative coevolution of an autonomous/ teleoperated control system for a serpentine robotic manipulator, in *Proceedings of the American Nuclear Society Ninth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, 2001*.

[XS06] Xu, K. and Simaan, N., Actuation compensation for flexible surgical snake-like robots with redundant remote actuation, in *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006*.

[WL02] Wingert, A., Lichter, M., Dubowsky, S., and Hafez, M., Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary dielectric polymers, in *Smart Structures and Materials Symposium, 2002*.

[SD04] Sujan, V., Dubowsky, S., and Lichter, M., Journal of Mechanical Design Vol. 126 (2004).

[SB95] Stalkin, A. and Burdick, J., The development of a robotic endoscope, in *IROS '95 Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, volume Vol. 2, 1995*.

[CP09] Chen, G., Phamb, M., and Redarc, T., International Journal of Robotics and Autonomous Systems (2009).

