

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***PROPUESTA Y ANÁLISIS DE MANIPULADOR
PARALELO RECONFIGURABLE***

Alumno/Alumna: Deza, Díaz, Nicolás

Director/Directora (1): Urizar, Arana, Mónica

Curso: 2017-2018

Fecha: 26/06/2018

RESUMEN TRILINGÜE

RESUMEN

En este trabajo se propone y analiza un manipulador paralelo reconfigurable (MPR) concreto, que puede ser usado como mecanismo para la impresión 3D u operaciones de mecanizado. Un MPR es un tipo de robot que presenta una serie de ventajas, como mayor rigidez por ser paralelo y mayor flexibilidad al entorno de trabajo por ser reconfigurable.

El análisis se realiza mediante un software cinemático llamado GIM, en el cual se pueden secuenciar movimientos y obtener datos cinemáticos de interés. El objetivo principal del trabajo es mostrar la movilidad y capacidad de reconfiguración del manipulador propuesto, de modo que queden bien definidas las características más importantes del mismo.

LABURPENA

Lan honetan mekanizatu operazioak eta 3D imprimagailu egiteko erabili ahal den manipuladore paralelo birkonfiguragarri (MPB) bat proposatzen eta aztertzen da. MPB abantail batzuk dituen robot mota bat da. Adibidez, zurruntasuna paralelo izateagatik edo ingurumen batera egokitzeko gaitasun gehiago birkonfiguragarri izateagatik.

Manipuladorearen analisisia GIM software zinematikoan egiten da. Software honetan mugimenduak sekuentziatu ahal dira eta datu zinematiko interesgarri lortu. Lanaren helburu nagusia MPBaren mugikortasun eta birkonfiguratzeko ahalmena frogatzea da. Modu honetan argi geratzen dira manipuladorearen ezaugarri garrantzitsuenak.

ABSTRACT

In this work it is proposed and analyzed a parallel reconfigurable manipulator (PRM) which presents some advantages for certain operations, such as 3D print or CNC machine tool. A PRM is a specific kind of robot, which presents some key advantages, such as rigidity for being parallel and flexibility to the work environment for being reconfigurable.

The analysis of the manipulator is done with a kinematic software called GIM, in which there can be sequenced movements and obtain kinematic data of interest. The main objective of the work is to show the mobility and reconfiguration capacity of the proposed manipulator. This way, the most important characteristics of the PRM will be well defined.

ÍNDICE

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS..... | 7 |
| 1.1. | Lista de tablas..... | 7 |
| 1.2. | Lista de ilustraciones..... | 7 |
| 1.3. | Lista de acrónimos..... | 9 |
| 2. | INTRODUCCIÓN..... | 10 |
| 3. | CONTEXTO..... | 11 |
| 4. | OBJETIVOS Y ALCANCE..... | 12 |
| 4.1. | Estructura de desglose (WBS)..... | 13 |
| 5. | BENEFICIOS | 14 |
| 5.1. | Beneficios científicos..... | 14 |
| 5.2. | Plan de difusión y explotación..... | 15 |
| 6. | ESTADO DEL ARTE | 16 |
| 6.1. | Introducción..... | 16 |
| 6.2. | Manipuladores paralelos | 16 |
| 6.3. | Manipuladores reconfigurables..... | 20 |
| 6.4. | Conclusión..... | 25 |
| 7. | MODELO PROPUESTO | 26 |
| 7.1. | Familia Multipteron | 26 |
| 7.2. | Modelización en GIM | 29 |
| 7.3. | Aspectos de la modelización | 32 |
| 8. | APLICACIONES..... | 33 |
| 8.1. | Impresora 3D..... | 33 |
| 8.2. | Mecanizado..... | 36 |
| 9. | METODOLOGÍA..... | 38 |
| 9.1. | Análisis de reconfiguración | 38 |
| 9.2. | Análisis cinemático inverso | 41 |
| 9.2.1. | Tripteron | 41 |
| 9.2.2. | Hexapteron | 42 |
| 9.2.3. | Quadrupteron y Pentapteron | 45 |
| 9.2.4. | Manipulador serie (MS) | 46 |

| | | |
|--------|--|----|
| 9.3. | Análisis de movilidad | 48 |
| 9.3.1. | Tripteron | 48 |
| 9.3.2. | Hexapteron | 48 |
| 9.3.3. | Quadrupteron y Pentapteron | 52 |
| 10. | TAREAS Y DIAGRAMA GANTT | 56 |
| 10.1. | Tareas..... | 56 |
| 10.2. | Hitos..... | 60 |
| 10.3. | Diagrama Gantt..... | 62 |
| 11. | CONCLUSIONES..... | 63 |
| 11.1. | Conclusiones sobre el MPR propuesto..... | 63 |
| 11.2. | Líneas futuras | 64 |
| 12. | FUENTES DE INFORMACIÓN..... | 65 |
| 13. | ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE | 68 |
| 14. | ANEXO II: RESULTADOS..... | 69 |
| 14.1. | Tabla de configuraciones del MPR..... | 69 |
| 14.2. | Simulación de movimientos | 71 |
| 14.3. | Configuraciones del manipulador..... | 77 |

1. LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRÓNIMOS

1.1. Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tipos de configuración del MPR | 40 |
| Tabla 2. Giros restringidos en la configuración C1 | 54 |
| Tabla 3. Giros restringidos en la configuración C2 | 54 |
| Tabla 4. Lista de paquetes de trabajo, tareas e hitos | 61 |
| Tabla 5. Lista de configuraciones totales del MPR..... | 70 |

1.2. Lista de ilustraciones

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. WBS del estudio..... | 13 |
| Ilustración 2. Robot serie soldadura 6 GDL. Cortesía de FANUC robotics..... | 17 |
| Ilustración 3. Plataforma Gough-Stewart, 6 GDL..... | 18 |
| Ilustración 4. Robot Tricept para operaciones de limpieza en fundición de Aluminio, 6 GDL. Cortesía de ABB..... | 19 |
| Ilustración 5. Robot Delta para industria alimenticia, 4 GDL. Cortesía de Yasakawa | 19 |
| Ilustración 6. Módulo Pares activos..... | 21 |
| Ilustración 7. Módulo Pares pasivos..... | 21 |
| Ilustración 8. Módulo Elementos rígidos..... | 21 |
| Ilustración 9. Dos configuraciones de manipulador paralelo modular | 22 |
| Ilustración 10. Plataforma Gough-Stewart reconfigurable, 4 GDL variables | 23 |
| Ilustración 11. Dos configuraciones de manipulador Gantry-Tau, 3 GDL | 23 |
| Ilustración 12. Dos configuraciones de manipulador Remora, 6 GDL. Cortesía de Tecnalia..... | 24 |
| Ilustración 13. Manipulador Tripteron, 3 GDL..... | 27 |
| Ilustración 14. Manipulador Quadrupteron, 4 GDL..... | 28 |
| Ilustración 15. Manipulador Hexapteron, 6 GDL..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 16. Barra de comandos de GIM para generar modelos | 29 |
| Ilustración 17. Configuración C0 del MPR (Hesapteron). Designación de elementos principales del MPR..... | 30 |
| Ilustración 18. Patas del MPR. Cadena cinemática PRRS | 31 |
| Ilustración 19. Aspectos de la modelización en GIM..... | 32 |
| Ilustración 20. Impresora 3D, 3 GDL. Cortesía de Prussa Research..... | 34 |
| Ilustración 21. Esquema funcional de fabricación por adición..... | 34 |
| Ilustración 22. Fresa mecanizando pieza metálica..... | 36 |
| Ilustración 23. Máquina herramienta CNC de 5 ejes. Cortesía de Chaoda..... | 37 |
| Ilustración 24. Numeración de las patas del MPR..... | 38 |
| Ilustración 25. Configuración C11 del MPR. Patas 5 y 6 reconfiguradas..... | 40 |
| Ilustración 26. Parámetros de las juntas activas del MP de la configuración C3 | 42 |
| Ilustración 27. Parámetros de las juntas activas del MP de la configuración C0 | 43 |
| Ilustración 28. Notación vectorial para sistemas de coordenadas fijo y móvil | 44 |
| Ilustración 29. Ejemplo de sistema de coordenadas base y sistema de coordenadas herramienta ligado a la plataforma móvil. Configuración C0 | 45 |
| Ilustración 30. Notación vectorial y parámetros de las juntas activas del MS..... | 46 |
| Ilustración 31. Simulación de movimiento traslación en plano XY, configuración C0 | 49 |
| Ilustración 32. Simulación de movimiento de traslación vertical, configuración C0 | 49 |
| Ilustración 33. Designación de las rotaciones principales..... | 50 |
| Ilustración 34. Simulación de giro Roll, configuración C0 | 51 |
| Ilustración 35. Simulación de giro Pitch, configuración C0..... | 51 |
| Ilustración 36. Simulación de giro Yaw, configuración C0..... | 52 |
| Ilustración 37. Simulación de movimiento de traslación en plano YZ, configuración C1 | 53 |
| Ilustración 38. Giro restringido por la junta universal, en rojo | 55 |
| Ilustración 39. Giro restringido en posición con plataforma móvil inclinada, configuración C1 | 55 |
| Ilustración 40. Diagrama Gantt del proyecto | 62 |
| Ilustración 41. Traslación en X. Configuración C0 | 71 |
| Ilustración 42. Traslación en Y. Configuración C0..... | 72 |
| Ilustración 43. Traslación en Z. Configuración C0 | 72 |
| Ilustración 44. Traslación en plano YZ. Configuración C0 | 73 |
| Ilustración 45. Traslación en plano XY. Configuración C0..... | 73 |
| Ilustración 46. Traslación en plano XZ. Configuración C0 | 74 |
| Ilustración 47. Traslación espacial. Configuración C0..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 48. Simulación movimiento traslación MS..... | 75 |
| Ilustración 49. Simulación movimiento plano MS | 75 |
| Ilustración 50. Simulación movimiento genérico MS | 76 |
| Ilustración 51. C0..... | 77 |
| Ilustración 52. C1. Patas 5 y 6 reconfiguradas..... | 77 |
| Ilustración 53. C1. Patas 1 y 2 reconfiguradas..... | 78 |
| Ilustración 54. C1. Patas 3 y 4 reconfiguradas..... | 78 |
| Ilustración 55. C2. Patas 1, 2, 5 y 6 reconfiguradas | 79 |
| Ilustración 56. C2. Patas 3, 4, 5 y 6 reconfiguradas | 79 |
| Ilustración 57. C2. Patas 1, 2, 3 y 4 reconfiguradas | 80 |
| Ilustración 58. C3 | 80 |

1.3. Lista de acrónimos

| | |
|--|----|
| TFG: Trabajo Fin de Grado..... | 10 |
| MP: Manipulador Paralelo..... | 16 |
| MS: Manipulador Serie..... | 17 |
| MPR: Manipulador Paralelo Reconfigurable..... | 10 |
| GDL: Grado de Libertad..... | 10 |
| C0: Configuración 0 del manipulador propuesto..... | 41 |
| C1: Configuración 1 del manipulador propuesto..... | 41 |
| C2: Configuración 2 del manipulador propuesto..... | 41 |
| C3: Configuración 3 del manipulador propuesto..... | 41 |

2. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) recogido en esta memoria tiene por título: “Propuesta y Análisis de Manipulador Paralelo Reconfigurable”. Aborda el tema relativo al estudio cinemático de manipuladores y propone un nuevo modelo cinemático de manipulador paralelo reconfigurable (MPR) con una serie de ventajas para determinadas aplicaciones, como impresión 3D o mecanizado. Un MPR consiste en un robot de configuración variable con 6 o menos grados de libertad (GDL) de movimiento. Este tipo de robots tienen principalmente aplicaciones industriales, y presentan una serie de ventajas que se explicarán en el Estudio del Estado del Arte.

En primer lugar se expone el contexto del trabajo, para poder ubicar el mismo. Posteriormente, se presentan los objetivos y el alcance del trabajo, quedando definidas las tareas a realizar en el mismo. Y después, se recogen los beneficios principales que puede traer consigo, con un plan de difusión y explotación.

A continuación se estudia el estado del arte de los MPR. En este, se describen los manipuladores paralelos, con sus características, ventajas y desventajas más importantes, comparándolos con los manipuladores serie. Se mencionan los manipuladores paralelos con un presente más importante, y las aplicaciones principales que tienen hoy en día. También se exponen los manipuladores reconfigurables, los tipos de reconfiguración más comunes, y se dan algunos ejemplos de estos.

Tras el estado del arte, se expone el MPR propuesto y a continuación se dan dos ejemplos de aplicaciones donde puede tener ventajas competitivas frente a otros manipuladores. Más adelante, se expone la metodología, donde se lleva a cabo un análisis más exhaustivo del MPR. Para ello se hace un análisis de reconfiguración, donde se exponen las distintas configuraciones que puede abarcar. A continuación, se realiza un análisis cinemático inverso y de movilidad de cada configuración. Por último, se cierra el apartado con las conclusiones más importantes del análisis.

Por último, se detallan las tareas e hitos llevadas a cabo durante el desarrollo del trabajo, junto con su correspondiente diagrama Gantt. Y se cierra el trabajo con las conclusiones más importantes sobre el mismo.

3. CONTEXTO

El presente trabajo trata sobre el estudio cinemático de un manipulador paralelo reconfigurable. El estudio se realiza a través de un ordenador, bien el ordenador particular del alumno, o los ordenadores disponibles en la Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao. Además, parte del estudio conlleva la deducción de fórmulas analíticas, que en este caso se realizan a mano.

Gran parte del trabajo se lleva a cabo a través del programa cinemático GIM, desarrollado por el grupo CompMech. Dicho programa permite crear modelos de manipuladores, simular movimientos y obtener características cinemáticas de interés. Este programa software ha sido registrado para el análisis de mecanismos, tanto planos como espaciales. Para más información acerca del GIM acceder al link indicado en el siguiente párrafo.

El grupo CompMech, formado por parte del profesorado del departamento de Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, aborda el tema del estudio cinemático de manipuladores paralelos reconfigurables en algunas de sus líneas de investigación. (<http://www.ehu.eus/compmech/>).

El estudio se centra en el análisis de manipuladores paralelos reconfigurables de 6 o menos grados de libertad (manipulador de baja movilidad). Se busca un manipulador que permita obtener una amplia gama de patrones de movimientos puros con un bajo coste operacional, que tiene como objetivo la ejecución de tareas de carácter industrial. Por este motivo, varias empresas punteras en I+D+i han mostrado interés en esta línea de investigación. Estas empresas son Aernnova, Gamesa, Idom y Sener.

4. OBJETIVOS Y ALCANCE

El principal objetivo de este trabajo es proponer un modelo concreto de manipulador paralelo reconfigurable que pueda presentar una serie de ventajas clave frente a otro tipo de manipuladores en determinados ámbitos, como son en este caso la impresión 3D u operaciones de mecanizado. De este modo quedan demostradas, a través de un ejemplo, las ventajas que ofrece la capacidad de reconfiguración de un manipulador, paralelo en este caso.

Se toman como punto de partida para el diseño de dicho modelo las siguientes tecnologías:

- Por un lado, se elige una familia de manipuladores paralelos. Se trata de un grupo de manipuladores con topologías cinemáticas semejantes, pero con ciertas diferencias entre ellos (en este caso los GDL). La familia de manipuladores escogida, los Multipteron, de la que se hablará en el apartado de Modelo Propuesto, presenta entre otras una ventaja clave, que es su cinemática fuertemente desacoplada.
- Por otro lado, para conseguir que el manipulador propuesto se pueda reconfigurar, se utilizan tecnologías de reconfiguración ya existentes, y utilizadas en determinados modelos de manipuladores reconfigurables propuestos por otros autores. Se hace una clasificación de las principales tecnologías de reconfiguración en el apartado Estudio del Estado del Arte.

Por tanto, el objetivo es el diseño de un manipulador que, utilizando algunas de dichas tecnologías de reconfiguración, sea capaz de reconfigurarse en cualquier manipulador de la familia Multipteron. Esto ofrece la posibilidad de elegir una configuración u otra en función del movimiento que se quiera generar, permitiendo así al manipulador adaptarse a distintos entornos y necesidades. Por otro lado, una vez se modelizan cada una de las configuraciones del MPR en el programa software GIM, se hace un estudio cinemático de estas, así como un estudio de reconfiguración. Es por esto que, a pesar de no ser el objetivo principal del trabajo, también puede ser de interés proponer un método para realizar un primer análisis cinemático de manipuladores paralelos reconfigurables.

El análisis cinemático realizado en el presente trabajo tiene como objetivo determinar:

- Capacidad de reconfiguración del manipulador.

- Análisis cinemático inverso de todas las configuraciones, con el objetivo de obtener las relaciones cinemáticas fundamentales. Dicho análisis no se lleva a cabo en el software GIM, sino que se hace a mano, y los resultados se contrastan con movimientos generados en el programa.
- Análisis de movilidad de todas las configuraciones, con el objetivo de determinar qué movimientos puede generar cada configuración.

Cabe recordar que el estudio cinemático realizado no abarca todos los aspectos necesarios, como son working space, posiciones de indeterminación, optimización de parámetros, etc. Esto se sale del alcance de este trabajo, que propone un modelo que sirva como base para un diseño detallado de un MPR para un entorno de trabajo bien definido.

4.1. Estructura de desglose (WBS)

En el WBS se muestran las distintas tareas que se llevan a cabo en el presente trabajo, para modelizar y analizar el MPR. Se trata de un primer paso de cara a planificar el mismo y facilita la comprensión del desarrollo del trabajo.

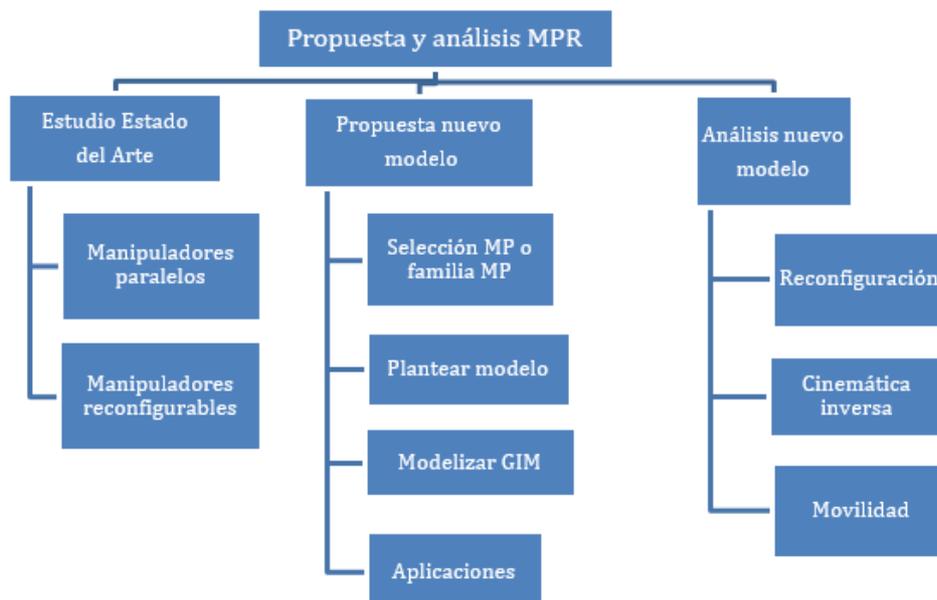


Ilustración 1. WBS del estudio

5. BENEFICIOS

En este apartado se exponen los beneficios que puede conllevar este proyecto y se propone un plan de explotación y difusión.

5.1. Beneficios científicos

El presente trabajo, no sólo propone un modelo cinemático de un nuevo MPR con ventajas para ciertas aplicaciones, sino que además expone un análisis cinemático del mismo, donde se estudian sus características más importantes. Por tanto, el análisis propuesto, que se divide en análisis de reconfiguración, análisis cinemático inverso y análisis de movilidad, puede servir como ejemplo o referencia para el análisis de manipuladores reconfigurables de baja movilidad, de cara al diseño de un producto realista y con vistas a su implementación industrial. Los aspectos cinemáticos no considerados (workspace, singularidades, etc.) son mencionados en el apartado “2.4.2. Plan de difusión y explotación”.

Por otro lado, quedan demostradas las ventajas que puede presentar la capacidad de reconfiguración de un manipulador, a través de un ejemplo. El manipulador propuesto es adecuado para ciertas aplicaciones, y esto es debido en parte a su configuración inicial, que fue propuesta en su día por otro autor. Sin embargo, la capacidad de reconfiguración aquí planteada le confiere una flexibilidad de operación que lo hace aún más competitivo.

5.2. Plan de difusión y explotación

La difusión de los resultados obtenidos en el presenta trabajo se puede llevar a cabo a través de dos vías:

- Transmisión del conocimiento hacia las empresas.

El grupo de investigación CompMech, mencionado en el Contexto del proyecto, está formado por profesores que imparten clases en el Máster Universitario de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU. Las empresas están interesadas en las líneas de investigación de dicho grupo, una de las cuales abarca el tema relativo a manipuladores paralelos reconfigurables. Entre estas se encuentran AERNNOVA Y GAMESA, que buscan una mayor flexibilidad en la fabricación de pequeñas series de componentes. Por otro lado se encuentran SENER e IDOM, que tienen como objetivo avanzar en el conocimiento de nuevos sistemas de apunte y despliegue de antenas, estructuras espaciales o innovaciones en el campo de la biomedicina.

- Publicación de artículo en alguna revista de prestigio.

Algunos resultados del presente trabajo, pueden contribuir a la publicación de artículos en revistas como Mechatronics, Journal of Mechanical Design, Journal of Mechanisms and Robotics, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Mechanism and Machine Theory, Precision Engineering, Advanced Robotics, IEEE Transactions on Robotics y Robotica. Se trata de revistas internacionales y con reconocimiento en el campo de la robótica.

En caso de que el MPR propuesto quiera ser explotado y se quiera desarrollar un producto que tenga como base el modelo cinemático propuesto, las vías de estudio cinemático que quedan aún por realizar son:

- Definir un entorno de trabajo concreto, con los requerimientos que debe cumplir el manipulador.
- Análisis de aspectos cinemáticos no considerados en este trabajo. Estos son workspace, singularidades y optimización de parámetros geométricos (dimensiones de elementos rígidos del MPR).
- Análisis dinámico directo e inverso, para conocer los esfuerzos que van a soportar los distintos elementos del manipulador. De este modo se puede proceder al dimensionamiento del mismo en un archivo CAD.
- Construcción de un prototipo en una impresora 3D, para poder validar los resultados esperados tras el análisis.

6. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se hace una revisión del estado del arte de los manipuladores paralelos y los manipuladores reconfigurables. Se comparan los manipuladores paralelos con los manipuladores serie, dando las ventajas y desventajas de cada uno. Se exponen también los manipuladores paralelos con un presente más importante. Por último, se citan algunas tecnologías de reconfiguración habituales y se exponen las conclusiones obtenidas a partir de la revisión.

6.1. Introducción

Los manipuladores son sistemas mecánicos, con varios grados de libertad de movimiento, cuya finalidad es mover un elemento terminal para la realización de tareas diversas. Se trata de mecanismos, controlados por programas de control numérico, sobre los que actúan distintos tipos de actuadores, como motores eléctricos o pistones hidráulicos, entre otros. Su diseño requiere de la actividad conjunta de distintas disciplinas y conocimientos de ingeniería, como mecánica estructural, dinámica, cinemática, sistemas de control, electrónica y actuadores.

Su demanda crece año a año debido a la creciente necesidad de automatizar procesos y a las continuas mejoras técnicas en el campo de la robótica industrial. Sus aplicaciones más comunes son soldadura, manipulación, carga/descarga de máquinas, montaje y desmontaje, entre otros [1].

6.2. Manipuladores paralelos

Un manipulador paralelo (MP a partir de ahora) es un tipo concreto de manipulador. Puede definirse como un mecanismo de cadena cerrada, cuyo elemento terminal está unido al elemento fijo mediante más de una cadena cinemática independiente. Este tipo de manipuladores está ganando popularidad durante los últimos años frente a los manipuladores serie.

Los manipuladores serie (MS a partir de ahora), o manipuladores de cadena abierta, se caracterizan por tener el elemento terminal unido al elemento fijo mediante una única cadena cinemática. A pesar del amplio espacio de trabajo en relación al tamaño en los manipuladores serie, estos tienen el elemento terminal y algunos actuadores, en voladizo. Presentan poca rigidez, lo que los hace poco precisos a la hora de manejar cargas relativamente pesadas, y sufren vibraciones a altas velocidades. Además, el error de posicionamiento se amplifica de actuator en actuator, al estar estos dispuestos en serie entre el elemento terminal y la base [2]. En la siguiente imagen se muestra un manipulador serie de soldadura.



Ilustración 2. Robot serie soldadura 6 GDL. Cortesía de FANUC robotics

No puede afirmarse que los manipuladores paralelos sean mejores, en general, que los manipuladores serie, ya que tienen algunas desventajas, como un menor espacio de trabajo o un fuerte acoplamiento entre las relaciones cinemáticas.

Sin embargo, en determinadas aplicaciones, como aquellas que demandan la manipulación de objetos pesados a altas velocidades y el posicionamiento con cierta precisión, son una mejor alternativa. A pesar de ello, muchos de estos nuevos robots quedan limitados a la realización de estudios teóricos o simplemente experimentales, debido a que la complejidad de sus cinemáticas, la dificultad de su control en tiempo real, la ausencia de técnicas de calibración totalmente sistematizadas, etc., hacen que la industria sea todavía reticente a utilizar este tipo de mecanismos [3]. Son utilizados en el desarrollo de máquinas herramienta de alta precisión [4], simuladores de vuelo [5] u orientación de plataformas (microscopios, antenas) [6]. Y los tipos de manipuladores paralelos con un presente más importante son los siguientes [7]:

La **plataforma Gough-Stewart** (ilustración (3)) fue propuesta por primera vez en 1965 como simulador de vuelo. Se trata de una plataforma móvil unida mediante 6 cadenas cinemáticas independientes a la plataforma fija, con 6 GDL. El mecanismo es accionado por actuadores prismáticos (normalmente pistones hidráulicos o actuadores eléctricos) [8]. A día de hoy se utilizan manipuladores de este tipo para simulaciones de vuelo y máquinas herramienta, entre otros.



Ilustración 3. Plataforma Gough-Stewart, 6 GDL

El **Tricept robot** es un manipulador paralelo con 3 GDL de traslación, los encargados de determinar la posición en el espacio del elemento terminal. Además, el elemento terminal suele tener otros 3 GDL de rotación, de modo que también se puede controlar su orientación. Se utiliza en máquinas herramienta de media precisión y se está empezando a utilizar en el campo de la medicina [9]. En la siguiente imagen se muestra un robot Tricept que se comercializa actualmente para operaciones de limpieza en la fundición de Aluminio.



Ilustración 4. Robot Tricept para operaciones de limpieza en fundición de Aluminio, 6 GDL. Cortesía de ABB

Los robots **Delta** son manipuladores con 3 o 4 GDL. Los actuadores son rotacionales (par de rotación) o lineales (par prismático) según el tipo de aplicación. Se caracterizan por su capacidad para realizar tareas a gran velocidad, y se utilizan principalmente para aplicaciones de empaquetado. En la imagen (5) se muestra el Motoman MPP3H desarrollado por Yasakawa. Los actuadores son de tipo rotacional. Se utiliza para la manipulación de medicamentos, alimentos o componentes electrónicos [10].



Ilustración 5. Robot Delta para industria alimenticia, 4 GDL. Cortesía de Yasakawa

Las líneas actuales de investigación sobre manipuladores paralelos, con el objetivo de solucionar problemas aun presentes, tratan el diseño mecánico, la cinemática directa e inversa, el espacio de trabajo, el análisis de singularidades, la dinámica, el control y el análisis de precisión.

Sobre el estudio cinemático inverso y directo de manipuladores paralelos se han presentado algoritmos por autores como Merlet [11]. Ku [12], propone el método de Newton-Raphson para en análisis del modelo cinemático directo de la plataforma Stewart. Soluciones analíticas solo se han presentado en arquitecturas especiales. En conclusión, las características de cada tipo de manipulador requiere de un análisis cinemático determinado, no existe una metodología universal.

6.3. Manipuladores reconfigurables

El presente TFG va a tratar sobre el estudio cinemático de un manipulador paralelo reconfigurable. Los manipuladores reconfigurables se caracterizan por su capacidad de reconfiguración. Esto es, se pueden reconfigurar, de modo que se obtenga una topología cinemática diferente. Para cada reconfiguración, el manipulador podrá generar distintos tipos de movimientos. En función del tipo de reconfiguración se podrán alterar sus gdl, su espacio de trabajo, sus posiciones de bloqueo, o cualquier característica cinemática que se desee.

Esta flexibilidad que presentan les permite ser implementados en procesos en los que realicen tareas que de otro modo sería necesario más de un manipulador. Esto supone un potencial ahorro económico en determinados procesos, como es el caso de manufacturación. Además, tienen la capacidad de adaptarse a nuevos entornos de trabajo.

No existe una clasificación normalizada de los distintos tipos de manipuladores reconfigurables, según el modo de reconfiguración. Sin embargo, según la bibliografía presente sobre análisis de distintos tipos de manipuladores reconfigurables, he considerado que la siguiente clasificación puede ser apropiada.

Manipulador Modular

Son manipuladores constituidos por módulos que se ensamblan entre sí (elementos rígidos, pares cinemáticos pasivos y pares cinemáticos activos o actuadores). Se

pueden ensamblar de tantas formas como se desee, consiguiendo manipuladores con geometrías y topologías cinemáticas diferentes [13]. En el presente trabajo, no se contempla este tipo de reconfiguración para el modelo de MPR propuesto. En las siguientes imágenes (6) (7) (8) y (9) se muestran los distintos módulos y una configuración concreta de un manipulador paralelo modular.

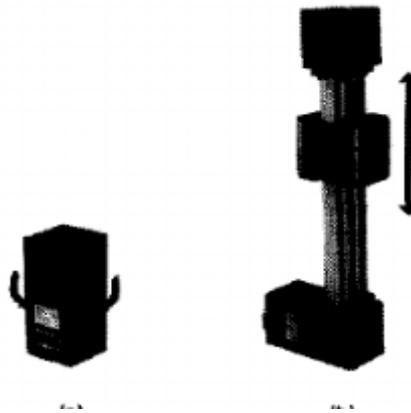


Ilustración 6. Módulo Pares activos

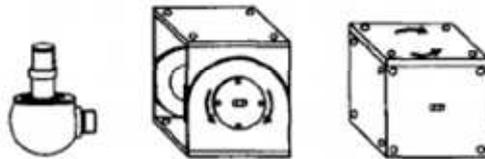


Ilustración 7. Módulo Pares pasivos

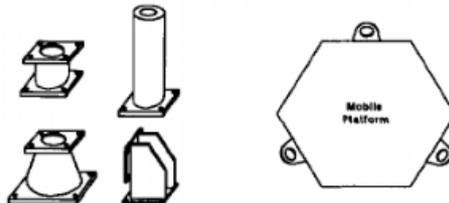


Ilustración 8. Módulo Elementos rígidos

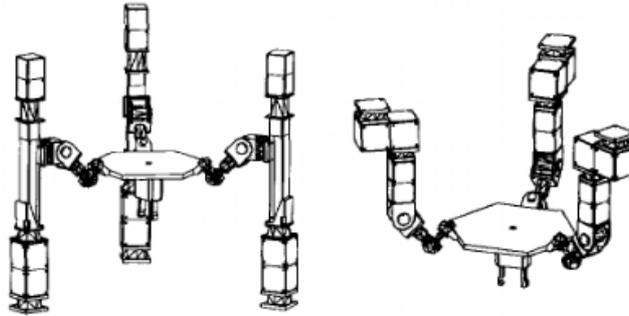


Ilustración 9. Dos configuraciones de manipulador paralelo modular

Manipulador Reconfigurable

En este caso hago referencia al resto de manipuladores reconfigurables. Presentan una gran variedad y un mismo manipulador puede tener varios tipos de reconfiguración. Se diferencian de los modulares porque no están formados por unidades independientes ensambladas entre sí de forma distinta para cada configuración, sino que se obtiene una configuración u otra actuando sobre las juntas cinemáticas, una vez el manipulador ya ha sido ensamblado. A continuación, se exponen algunos de los ejemplos de reconfiguración más recurridos por los autores:

- **Bloqueo de juntas:** El método consiste en la posibilidad de bloqueo y desbloqueo de distintas juntas cinemáticas del manipulador, de modo que tiene un número de GDL variable. De esta forma se pueden conseguir movimientos concretos que requieren un menor número de GDL que los del manipulador, sin la necesidad de actuar sobre todos ellos. En la siguiente imagen (10) se muestra una plataforma Stewart con juntas de revolución bloqueables [14], activada por actuadores prismáticos. Se trata de un manipulador paralelo con 4 GDL. Sin embargo, debido a su capacidad de reconfiguración, puede simular movimientos de 6 GDL (3 gdl de rotación + 3 gdl de traslación), mediante el bloqueo y desbloqueo sucesivo de distintas juntas de revolución.

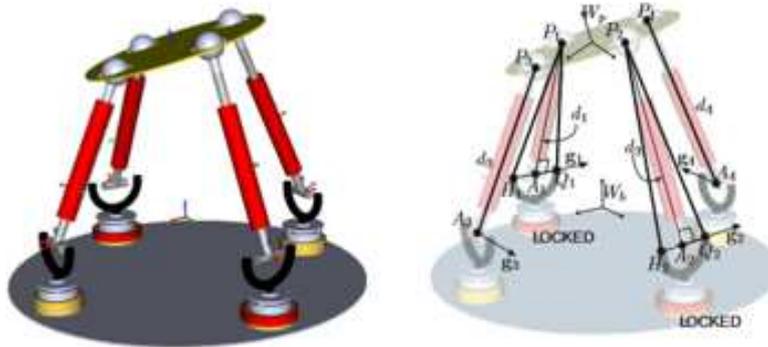


Ilustración 10. Plataforma Gough-Stewart reconfigurable, 4 GDL variables

- Variación de parámetros geométricos:** Variando la distancia entre distintos elementos del manipulador se puede modificar su espacio de trabajo y otras características cinemáticas. Este tipo de reconfiguración presenta la desventaja de tener que ser calibrado cada vez que se reconfigure, para un correcto control. Sin embargo, dota al manipulador de una flexibilidad que le permite adaptarse a distintos entornos y condiciones. A continuación se muestra el manipulador paralelo reconfigurable Gantry-Tau. Consta de 3 GDL y actuadores tipo prismáticos. Las pistas fijas de deslizamiento, sobre las cuales van montados los pares prismáticos sobre los que se actúa, tienen posiciones variables [15], de forma que se puede variar el espacio de trabajo del manipulador.

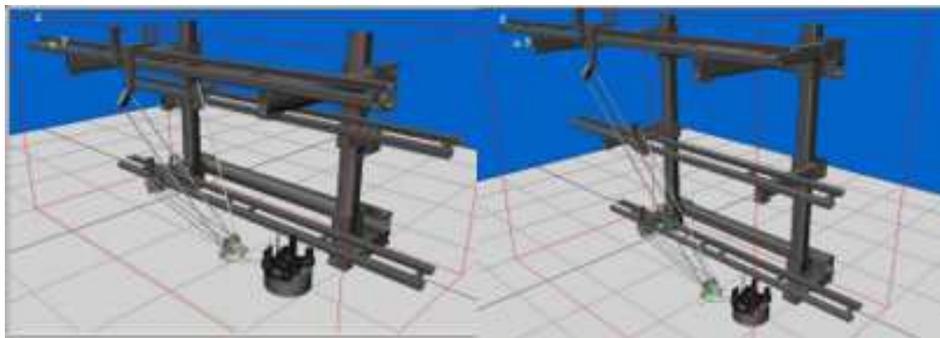


Ilustración 11. Dos configuraciones de manipulador Gantry-Tau, 3 GDL

- **Cadenas cinemáticas desacoplables:** Este método de reconfiguración consiste en el acoplamiento y desacoplamiento de partes móviles del manipulador entre sí, o de partes móviles a partes fijas. Una de las ventajas que presenta este tipo de reconfiguración es la posibilidad de pasar de un manipulador con un mayor número de GDL, a dos o más manipuladores con un número menor de GDL. Además, también pueden alterarse otras características cinemáticas, como su espacio de trabajo. A continuación, se muestran imágenes del manipulador Remora. Se trata de una plataforma Stewart cuyas patas pueden desacoplarse de la base y acoplarse en distintos puntos de la misma, de modo que se modifica el espacio de trabajo del manipulador. Consta de 8 actuadores y la plataforma móvil de 6 GDL de movimiento.

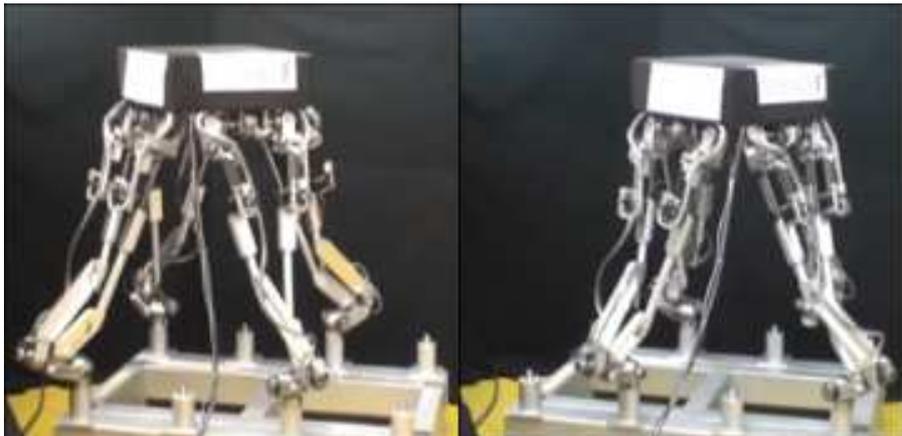


Ilustración 12. Dos configuraciones de manipulador Remora, 6 GDL. Cortesía de Tecnalia

6.4. Conclusión

Los manipuladores paralelos presentan ciertas ventajas frente a los manipuladores serie, sobre todo para aplicaciones en las que se requiere una gran precisión o soportar altas cargas. A pesar de todo, son poco utilizados a día de hoy debido a la falta de técnicas de calibración normalizadas, y al amplio conocimiento y experiencia que se tiene con los manipuladores serie. Es por ello que, es de interés comprender y saber analizar la cinemática de los manipuladores paralelos, para poder extender su uso a nuevas aplicaciones.

Por otro lado, un manipulador reconfigurable posee una gran flexibilidad debido a su capacidad de adaptarse a distintos entornos de trabajo, y realizar tareas que de otro modo serían necesarios más de un manipulador. Por estos motivos, los manipuladores paralelos reconfigurables tienen un gran potencial.

Una de las complejidades que conlleva el diseño de un MPR es su análisis cinemático, ya que se pueden tener un número muy elevado de configuraciones y los manipuladores paralelos muchas veces tienen los GDL cinemáticamente muy acoplados. Por lo tanto, un MPR con una cinemática desacoplada y una amplia gama de configuraciones puede tener un gran potencial para ciertas aplicaciones.

7. MODELO PROPUESTO

Algunos manipuladores paralelos presentan el inconveniente de tener una cinemática inversa relativamente compleja de resolver. Esto se traduce en un alto coste operacional de cara a obtener movimientos concretos en aplicaciones industriales. Sin embargo, este no es el caso de la familia de Manipuladores Multipteron. Se trata de un grupo de manipuladores paralelos, que se caracterizan por tener una cinemática especialmente simple, además de un amplio espacio de trabajo si son diseñados correctamente, en comparación a otros manipuladores paralelos.

En este apartado, se propone un MPR que tenga la capacidad de reconfigurarse en cualquier manipulador de dicha familia. De este modo, se consigue un manipulador con todas las ventajas que presentan los manipuladores Multipteron, y la capacidad de reconfigurarse en un manipulador u otro, en función de la necesidad.

Se recuerda que para poder diseñar un mecanismo que realice una función concreta, es necesario realizar un estudio cinemático más exhaustivo que el realizado en la metodología de este trabajo. Sin embargo, esto se sale del alcance del mismo, que tiene como objetivo proponer un modelo que sirva como base para el diseño detallado de un manipulador concreto. Para ello, se analizan las características esenciales del MPR, pero no todas ellas.

7.1. Familia Multipteron

El MPR propuesto se inspira en una familia de manipuladores, los Multipteron, formada por 4 manipuladores paralelos de 3, 4, 5 y 6 GDL, y tiene como objetivo recoger la familia entera en un solo manipulador. Los manipuladores Multipteron, que se describen más adelante, presentan las siguientes ventajas:

- Mayor rigidez, lo que se traduce en mayor precisión y mejor comportamiento ante vibraciones mecánicas. Esto se debe a que son paralelos.
- Relaciones cinemáticas muy desacopladas y cinemática muy sencilla, lo que se traduce en una ventaja de cara al control.

- Amplio espacio de trabajo, si se diseñan correctamente, en comparación a otros manipuladores paralelos [19].
- Juntas activas prismáticas, que son en general más precisas que las juntas activas de rotación [19].

El **Tripteron** (o manipulador cartesiano), fue el primer manipulador de la familia y consta de 3 GDL de traslación. El elemento terminal, o plataforma móvil, del manipulador se puede desplazar en cualquier dirección, dentro de su espacio de trabajo, sin tener la posibilidad de rotar. Este está conectado a 3 pistas de deslizamiento perpendiculares entre sí, mediante 3 cadenas cinemáticas independientes cuya configuración es \underline{PRRR} .

El manipulador es bien conocido por ser el manipulador paralelo más simple, desde un punto de vista cinemático [16]. Los 3 GDL están totalmente desacoplados, y cada uno se controla directamente por una sola junta prismática. El análisis cinemático se resume en las siguientes expresiones:

$$x = \rho_1$$

$$y = \rho_2$$

$$z = \rho_3$$

Siendo x, y, z las coordenadas de posición de la plataforma móvil, y ρ_1, ρ_2, ρ_3 variables de las juntas activas. La propiedad de cinemática desacoplada está presente en todas las configuraciones del MPR, como se verá más adelante, por lo que es sumamente sencillo controlar el movimiento de traslación de cualquiera de sus configuraciones. En la siguiente imagen se muestra un prototipo del Tripteron.



Ilustración 13. Manipulador Tripteron, 3 GDL

El **Quadrupteron** [17], **Pentapteron** [18] y **Hexapteron** [19] son evoluciones sucesivas del Tripterón. Son manipuladores similares a este, pero con 4,5 y 6 GDL, respectivamente (3 GDL de traslación, y 1,2 y 3 GDL de rotación). Tienen 4,5 y 6 patas, respectivamente, que unen la plataforma móvil al elemento fijo, y son actuados mediante juntas prismáticas. El Quadrupteron consta de 4 pistas de deslizamiento (elemento fijo a través del cual se mueven las juntas prismáticas) en las 3 direcciones cartesianas (2 de ellas paralelas). El Pentapteron consta de 5 pistas en las 3 direcciones (2 parejas de pistas paralelas). El Hexapteron consta de 6 pistas en las 3 direcciones (3 parejas de pistas paralelas).

En la siguiente imagen se muestran un prototipo del Quadrupteron (izquierda) y un prototipo del Hexapteron (derecha). El Pentapteron sería similar, pero con 5 patas.



Ilustración 14. Manipulador Quadrupteron, 4 GDL



Ilustración 15. Manipulador Hexapteron, 6 GDL

7.2. Modelización en GIM

Para realizar el modelo en el GIM se utiliza la siguiente barra de comandos, que permite introducir puntos, barras, elementos rígidos y distintos tipos de juntas. Además, el propio programa calcula los GDL del mecanismo o sistema de mecanismos que se crean.

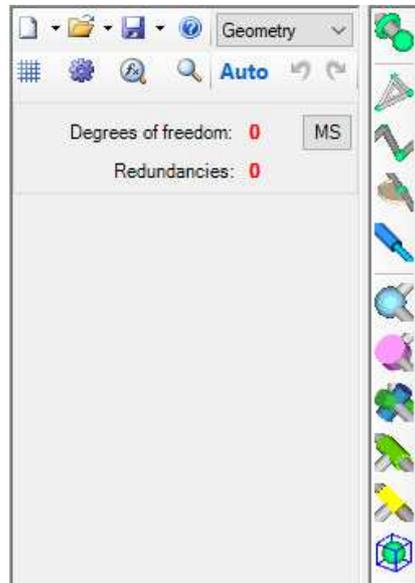
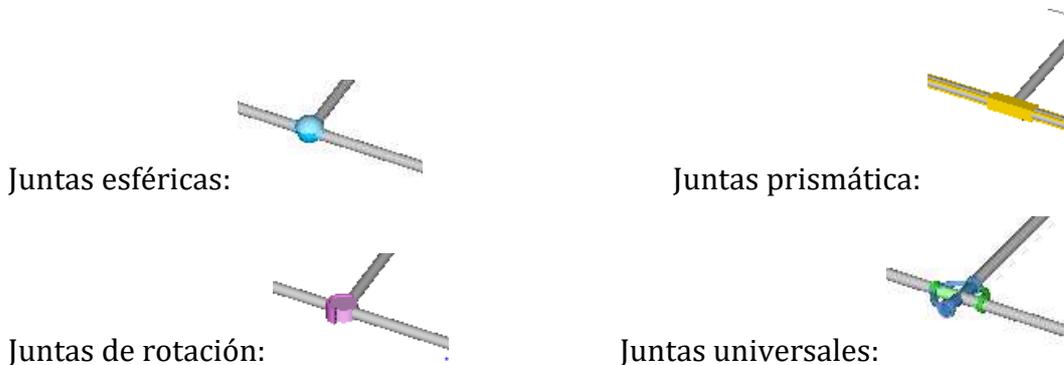


Ilustración 16. Barra de comandos de GIM para generar modelos

Las juntas cinemáticas que se utilizan en el modelo son:



El modelo propuesto, sin haber sido reconfigurado, es el Hexapteron. Por tanto, consta en principio de 6 GDL, que permiten desplazar o hacer rotar la plataforma móvil como se desee, actuando sobre 6 juntas prismáticas. Como se puede apreciar en la imagen, donde se muestra la configuración Hexapteron, el modelo está compuesto por una plataforma móvil, con forma de Hexaedro, unida a 6 pistas de deslizamiento por 6 cadenas cinemáticas (patas a partir de ahora). Cada pata controla 1 GDL de la plataforma.

En la siguiente imagen se muestra el modelo completo, donde se indican las partes fundamentales que componen el MPR: plataforma móvil, patas y pistas de deslizamiento.

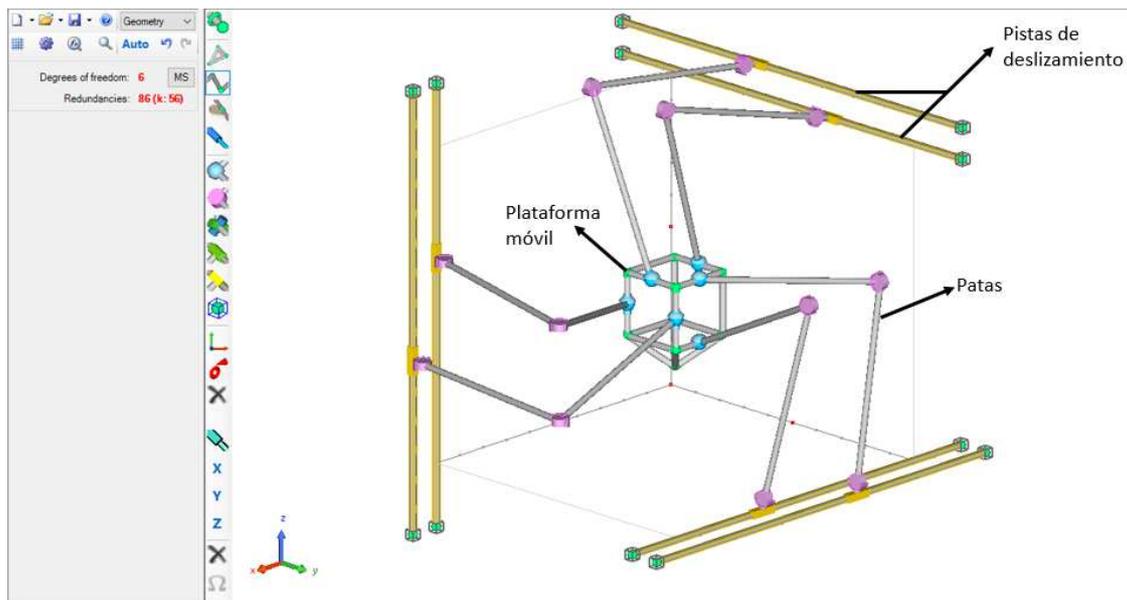


Ilustración 17. Configuración C0 del MPR (Hexapteron). Designación de elementos principales del MPR

Cada pata está formada por 2 barras rígidas, unidas entre sí por una junta de rotación. Una de las barras se une a la plataforma mediante una junta esférica. La otra barra se une a la pista fija mediante una junta prismática en serie con una junta de rotación.

El MPR puede reconfigurarse bloqueando juntas de rotación. De este modo, la junta esférica (se trata en realidad de una junta de rotación en serie con una junta universal) se convierte en una junta universal, se disminuye en 1 los GDL de la

plataforma móvil y se puede desacoplar una pata haciendo que se convierta en un MS colaborativo. Por tanto, bloqueando 0, 1, 2 o 3 juntas se obtienen los manipuladores Multipteron de 6, 5, 4 o 3 GDL, respectivamente. Los GDL que se anulan al bloquear las juntas son GDL de rotación. El manipulador siempre tiene 3 GDL de traslación, tal como se mostrará en el análisis de movilidad.

En la siguiente imagen se muestra la cadena cinemática que une la plataforma móvil con las pistas de deslizamiento.

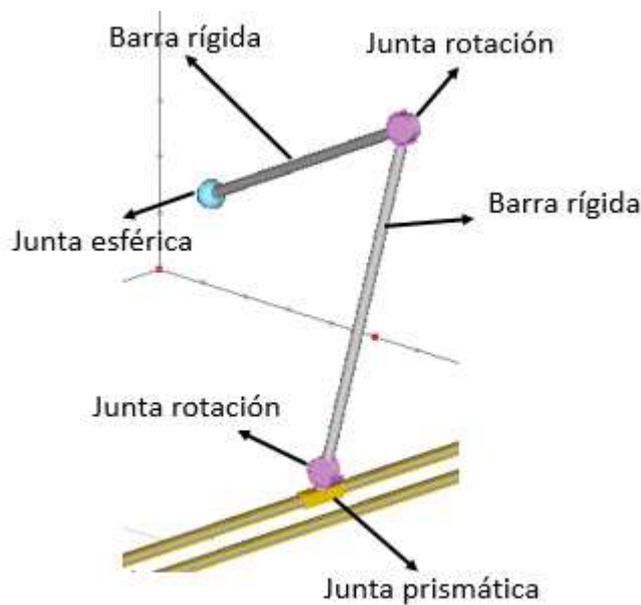


Ilustración 18. Patas del MPR. Cadena cinemática PRRS

7.3. Aspectos de la modelización

En el modelo del GIM, se ha realizado un cambio por una cuestión de estética y simplicidad, que se describe a continuación.

La mitad de las juntas esféricas (las indicadas en la siguiente imagen) son en realidad una junta de rotación en serie con una junta universal. De este modo, se puede bloquear o desbloquear la junta de rotación, obteniendo así una junta universal o una junta esférica, respectivamente, tal como se ha explicado anteriormente. En el modelo se representa el conjunto mediante una junta universal o esférica, en función de si la junta de rotación está bloqueada o desbloqueada.

En la siguiente imagen se muestra dicho aspecto de la modelización.

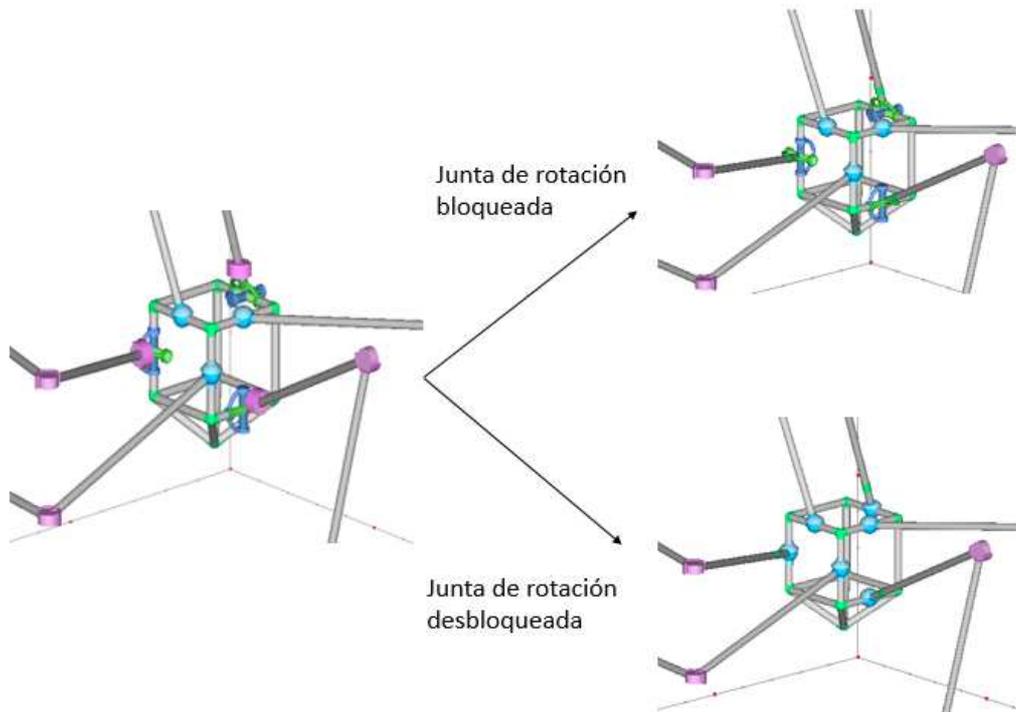


Ilustración 19. Aspectos de la modelización en GIM

Por otro lado, la junta prismática en serie con la junta de rotación, es equivalente a una junta cilíndrica. En este caso no se ha utilizado una junta cilíndrica, ya que en algunas configuraciones va a ser necesario actuar sobre la junta prismática y cilíndrica simultáneamente.

8. APLICACIONES

Como se ha explicado en la Introducción, los principales campos de aplicación que se contemplan para el MPR propuesto son la impresión 3D y el mecanizado. Estos se describen a continuación, así como las características del MPR propuesto que lo hacen adecuado para llevar a cabo dichas tareas.

De este modo, se da un ejemplo de como la capacidad de reconfiguración de un manipulador lo puede hacer más apto para realizar determinadas tareas, que de otro modo sería necesario el uso de más de un manipulador.

8.1. Impresora 3D

Una impresora 3D es una máquina capaz de generar elementos tridimensionales a partir de una maqueta hecha por ordenador. Esto se hace acumulando secuencialmente material en una cama o plataforma, de modo que se van superponiendo capas, hasta formar el objeto deseado. Normalmente se utilizan plásticos o resinas, aunque también hay impresoras que imprimen en materiales metálicos. Se utilizan comúnmente para la prefabricación de piezas o componentes en sectores como arquitectura, diseño industrial, prótesis médicas, etc.

En las siguientes imágenes se muestran una impresora 3D imprimiendo una pieza con un material polimérico y un esquema representativo de cómo se conforman las capas mediante un método de adición.

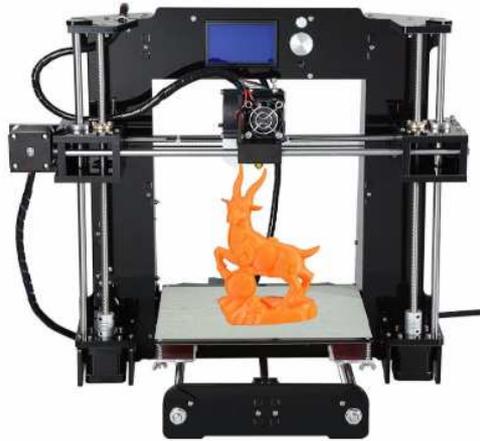


Ilustración 20. Impresora 3D, 3 GDL. Cortesía de Prussa Research

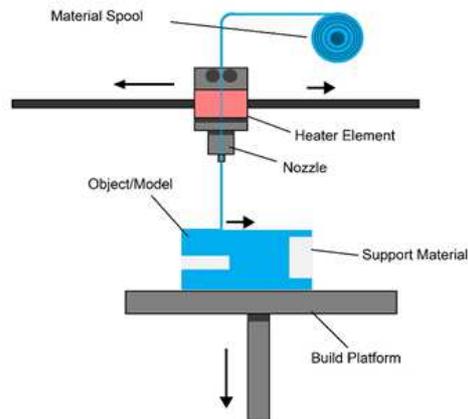


Ilustración 21. Esquema funcional de fabricación por adición

Uno de los elementos principales que componen las impresoras 3D son los mecanismos o manipuladores encargados desplazar la boquilla. El manipulador es responsable de conferir la forma al componente.

En el Modelado por Deposición Fundida (MDF), que es el nombre que se le da a uno de los métodos de impresión 3D, el material inicialmente enrollado en forma de filamento, pasa a través de la boquilla, que se encuentra a la temperatura de fusión del material. Sin embargo, este procedimiento tiene un límite a la hora de fabricar componentes con capas en voladizo con una determinada pendiente.

Ventajas del MPR propuesto para la impresión 3D

La mayoría de impresoras 3D utilizadas actualmente tienen un manipulador de 3 GDL de traslación que permite posicionar la boquilla. Es por ello, por la imposibilidad de hacerla rotar, que las capas que conforman el componente son horizontales.

Se ha demostrado que en la fabricación mediante el método MDF existe un límite de 45° en la inclinación de la superficie del componente fabricado, con respecto a las capas generadas [19].

La configuración C0 del MPR propuesto solventa este problema, ya que tiene 6 GDL, por lo que puede inclinar la boquilla. De este modo, las capas que conforman la pieza no tienen por qué ser horizontales y se pueden generar capas curvas o inclinadas. Además, de esta forma se puede imprimir sobre moldes curvos con geometrías complejas.

Por otro lado, si se desea fabricar una pieza que no necesite utilizar GDL de rotación, el MPR ofrece la posibilidad de reconfiguración. Así, reconfigurando el manipulador se anulan dichos GDL (se pueden elegir sólo las rotaciones que sean necesarias) y se pueden obtener 1,2 o 3 MS colaborativos que pueden realizar diferentes funciones, como por ejemplo:

- Mecanizado de detalles sobre el componente fabricado, de modo que se reducirían los tiempos de operación si actúan el MP, imprimiendo la pieza, y el MS, mecanizando, simultáneamente.
- Agarrar el componente que se está fabricando para desplazarlo o girarlo. De este modo, se pueden crear componentes de mayor tamaño que se salgan del espacio de trabajo del MP.
- Realizar operaciones adicionales a la adición sobre el componente generado, como pintarlo, hacer grabados, etc.

Es por esto que el MPR propuesto ofrece una serie de ventajas clave para ser utilizado como mecanismo de guía para la boquilla de impresoras 3D.

8.2. Mecanizado

El mecanizado es un proceso de fabricación que comprende una serie de operaciones mediante las cuales se conforma la pieza eliminando material. Esto se realiza mediante la herramienta pertinente, que gira a gran velocidad (en algunas operaciones gira la pieza) y va cortando trozos de material, hasta que el componente obtenga la forma deseada. En la siguiente imagen se muestra una fresa mecanizando.



Ilustración 22. Fresa mecanizando pieza metálica

Para esto, es necesario un mecanismo que sea capaz de guiar la cabeza de la herramienta, de modo que genere la pieza con la geometría deseada. Todo esto se hace mediante máquinas controladas por programas de control numérico. En algunos casos, son necesarias máquinas de 5 ejes (5 GDL) para generar geometrías complejas, de modo que el cabezal de la herramienta pueda rotar en el espacio. Sólo se necesitan 2 GDL de rotación porque un giro lo hace la propia herramienta a muy alta velocidad para cortar material, mediante un mecanismo adicional. En la siguiente imagen se muestra una máquina CNC de 5 ejes.



Ilustración 23. Máquina herramienta CNC de 5 ejes. Cortesía de Chaoda

Ventajas del MPR propuesto para el mecanizado

El MPR propuesto, en la configuración inicial, es un manipulador paralelo con 6 GDL y una cinemática muy simple y desacoplada. Como ya se ha mencionado, es un manipulador rígido (por ser paralelo), adecuado para operaciones de mecanizado donde se generan altas cargas. Su cinemática hace que tenga un bajo coste operacional. Además, las juntas activas son guías que se deslizan sobre una pista fija, lo que se traduce en una alta precisión.

En caso de que la operación de mecanizado no requiera que la herramienta rote, se puede reconfigurar el manipulador. De este modo se obtienen MS colaborativos que pueden disminuir los tiempos de operación realizando tareas adicionales. A continuación se exponen algunos ejemplos de dichas tareas:

- Taladrado u otro tipo de operaciones que se puedan realizar con un robot serie.
- Cambio de herramienta de la máquina, para pasar de una operación a otra.
- Desplazar o rotar la pieza a mecanizar, en caso de que su tamaño haga que se salga del espacio de trabajo del MPR.

Es por esto que el MPR propuesto también ofrece una serie de ventajas clave para ser utilizado como máquina herramienta.

9. METODOLOGÍA

En la Metodología se lleva a cabo un análisis del MPR propuesto. De este modo, se pretende estudiar la capacidad de reconfiguración del mismo, identificando todas las configuraciones que puede abarcar, y definiendo las tecnologías de reconfiguración utilizadas para ello. También se pretenden determinar las ecuaciones que relacionen los parámetros de las juntas activas con el movimiento de la plataforma móvil o con el movimiento del extremo del MS, mediante el análisis cinemático inverso. Por último, se hace un estudio de movilidad, con el fin de analizar qué movimientos puede efectuar y qué movimientos tienen restringidas las distintas configuraciones del MPR.

9.1. Análisis de reconfiguración

En este apartado, se exponen los métodos o tecnologías utilizadas para hacer posible la reconfiguración del manipulador. Además, se recogen y designan en una tabla los tipos de configuración posibles que puede abarcar el MPR. En este caso, se han utilizado 2 mecanismos de reconfiguración. Antes de describirlos, se designa con un número a cada pata del MPR, para poder referirnos a ellas con mayor facilidad. La designación de cada pata se muestra en la siguiente imagen.

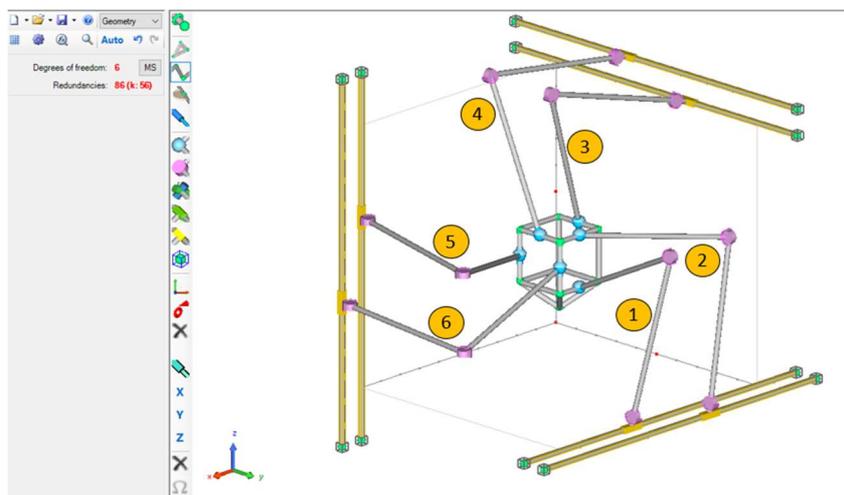


Ilustración 24. Numeración de las patas del MPR

Los mecanismos de reconfiguración son los siguientes:

- **Bloqueo de 1 GDL de junta esférica:** Un GDL de rotación de las juntas esféricas de las patas 1,3 y 5 puede bloquearse. Esto es posible debido a que dichas juntas son en realidad una junta universal en serie con una junta de rotación, tal como se ha explicado en el apartado anterior. El bloqueo se lleva a cabo mediante un freno eléctrico conectado a la junta de rotación, convirtiéndose la junta esférica en una junta universal cuando se activa dicho freno.
- **Desacople de junta esférica:** Las juntas esféricas de las patas 2,4 y 6, pueden desacoplarse de la plataforma móvil. De este modo, dichas patas se convierten en un robot serie, que puede actuar de forma colaborativa con la plataforma móvil. El desacople se logra mediante juntas esféricas magnéticas.

Para reconfigurar el manipulador se procede de la siguiente manera:

- 1- Se seleccionan las dos patas conectadas a las pistas que siguen una de las 3 direcciones. Por ejemplo las patas 1 y 2 (pistas en dirección X), las patas 3 y 4 (pistas en dirección Y), o las patas 5 y 6 (pistas en dirección Z).
- 2- Se activa el freno eléctrico en la pata impar (bloqueando la junta de rotación del conjunto $R+U=S$, convirtiéndose en una junta U), y se desacopla la junta esférica de la pata par (el desacople es voluntario y permite obtener un MS colaborativo). Por ejemplo, si seleccionamos la dirección Y, la junta esférica de la pata 3 se convierte en junta universal, y la pata 4 se desacopla de la plataforma, convirtiéndose dicha pata en un manipulador serie.

Mediante este procedimiento, se disminuyen en 1 los GDL de la plataforma móvil, y se obtiene un manipulador serie de 3 GDL adicional. Por ejemplo, partiendo de la configuración inicial de 6 GDL, y realizando este procedimiento sobre las patas 5 y 6 (dirección Z), se obtiene lo siguiente: un MP de 5 GDL (Pentapteron) y 1 MS colaborativo de 3 GDL. Se muestra dicha configuración en la siguiente imagen.

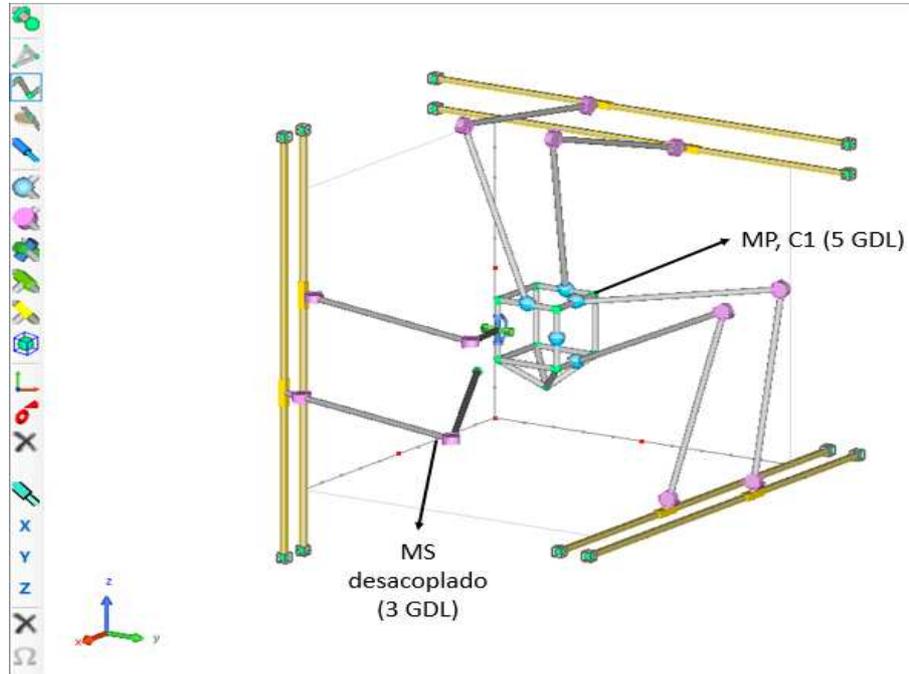


Ilustración 25. Configuración C1₁ del MPR. Patas 5 y 6 reconfiguradas.

En la siguiente tabla se recogen todas las configuraciones, que se agrupan en 4 tipos, y se muestra el número de juntas de rotación que hay que bloquear, el número de juntas esféricas que hay que desacoplar, los GDL del manipulador paralelo de la reconfiguración y el número de manipuladores series colaborativos. Además, existen varias formas de obtener una configuración, por eso hay varias combinaciones posibles en algunas configuraciones.

| Tipo de Configuración | Nº de juntas R bloqueadas | GDL del MP (3 GDL traslación) | MS colaborativos (opcional) | Nº de posibles combinaciones |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| C0 | 0 | 6 | 0 | 1 |
| C1 | 1 | 5 | 1 | 6 |
| C2 | 2 | 4 | 2 | 12 |
| C3 | 3 | 3 | 3 | 8 |

Tabla 1. Tipos de configuración del MPR

El número de combinaciones se debe a las distintas formas de obtener una misma configuración, dependiendo de qué patas se bloqueen y qué patas se desacoplen. Esto da lugar a un total de 27 posibles configuraciones para el MPR propuesto. Aunque de cara a posibles aplicaciones, uno de los intereses principales de poder reconfigurar el manipulador es contar con un MS colaborativo, por lo que algunas de las 27 configuraciones no tienen tanto interés como otras.

9.2. Análisis cinemático inverso

En este apartado se lleva a cabo un análisis cinemático inverso de los distintos tipos de configuración del MPR (C0, C1, C2 y C3) y del MS colaborativo que surge de desacoplar una pata. De este modo, se definen las relaciones fundamentales entre los parámetros de las juntas activas y la posición o movimientos deseados.

Una de las grandes ventajas que presentan la familia de manipuladores Multipteron es la enorme simplicidad de su análisis cinemático inverso. El Tripteron y el Hexapteron, son conocidos por ser algunos de los manipuladores de 3 y 6 GDL, respectivamente, más sencillos de resolver cinemáticamente. A continuación, se exponen los análisis de cada uno de los 4 manipuladores, por separado.

9.2.1. Tripteron

Este manipulador, como ya se ha mencionado, tiene 3 GDL de traslación. Cada coordenada de la plataforma móvil se controla directamente por la posición de una junta prismática. Por tanto, el problema cinemático inverso se resume en las siguientes expresiones (de forma general se expresan como función del tiempo, para referirse así a movimientos y no a posiciones concretas):

$$\rho_1(t) = x_1(t) - x_{10}$$

$$\rho_2(t) = y_2(t) - y_{20}$$

$$\rho_3(t) = z_3(t) - z_{30}$$

Siendo $(x_i \ y_i \ z_i)$ las coordenadas de posición ciertos puntos de la plataforma móvil (concretamente los puntos donde la plataforma se une con las patas, esto es, las juntas Universales en este caso), ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 variables de las juntas activas prismáticas y $(x_{i0} \ y_{i0} \ z_{i0})$ las coordenadas iniciales de dicho puntos.

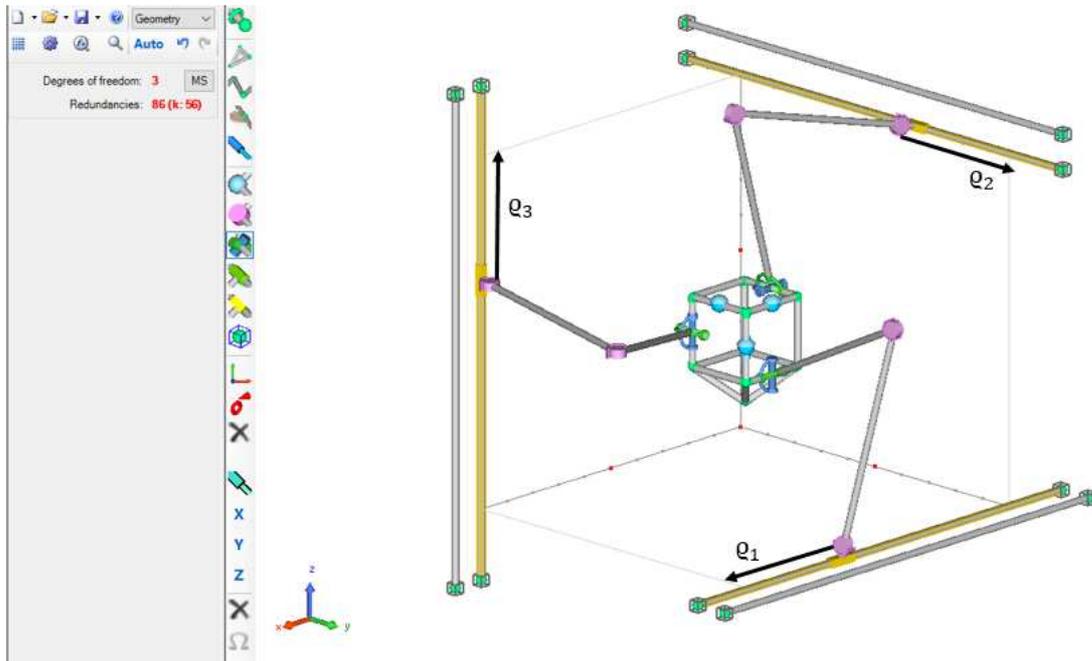


Ilustración 26. Parámetros de las juntas activas del MP de la configuración C3

9.2.2. Hexapteron

En este caso hay 6 juntas prismáticas que permiten controlar la posición del manipulador. La posición de cada junta prismática determina una coordenada de un punto de la plataforma.

En el modelo, se controlan directamente algunas coordenadas de las juntas esféricas de la plataforma móvil. De modo que, siendo ρ_i los parámetros de las juntas prismáticas de cada pata i , $(x_i \ y_i \ z_i)$ las coordenadas de las juntas esféricas de cada pata i , y $(x_{i0} \ y_{i0} \ z_{i0})$ las coordenadas iniciales de dichas juntas, se tiene que:

$$\rho_1(t) = x_1(t) - x_{10}$$

$$\rho_2(t) = x_2(t) - x_{20}$$

$$\rho_3(t) = y_3(t) - y_{30}$$

$$\rho_4(t) = y_4(t) - y_{40}$$

$$\rho_5(t) = z_5(t) - z_{50}$$

$$\rho_6(t) = z_6(t) - z_{60}$$

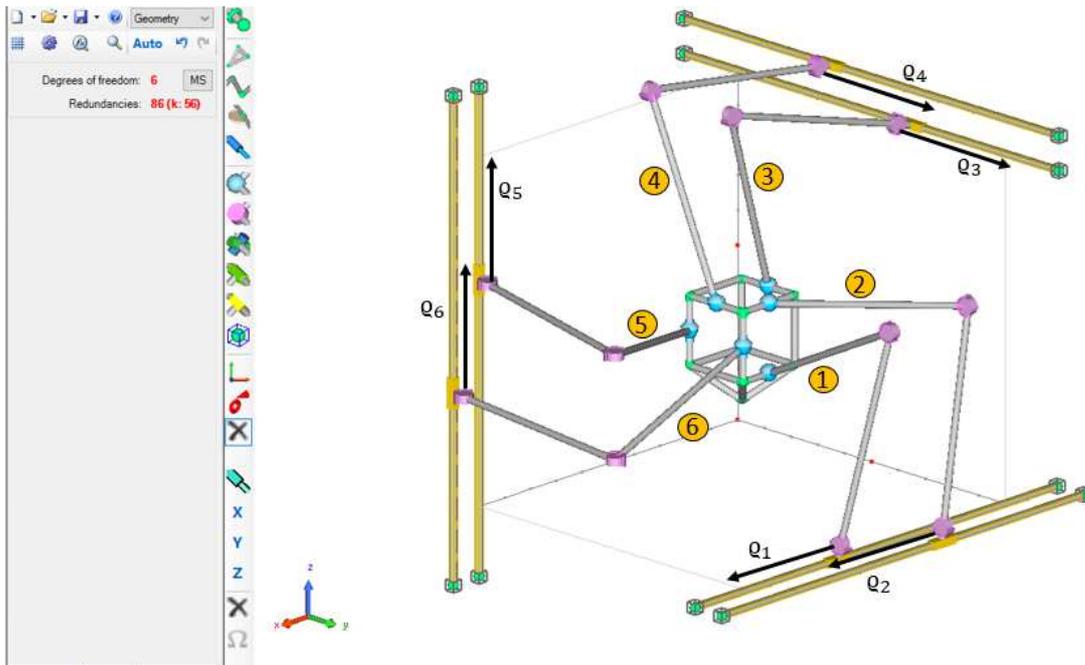


Ilustración 27. Parámetros de las juntas activas del MP de la configuración C0

Por tanto, para calcular los parámetros de las juntas activas en función de una posición y orientación dadas de la plataforma móvil, basta con calcular ciertas coordenadas de las juntas esféricas de la plataforma, que determinan completamente el movimiento de esta: $x_1(t)$, $x_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$, $z_5(t)$ y $z_6(t)$.

Para ello, se define un sistema de coordenadas de la herramienta (sistema de referencia solidario a la plataforma móvil) $(UVW)_2$, y un sistema de coordenadas base $(XYZ)_1$ (sistema de referencia fijo). En función de la posición del sistema móvil, definida por un vector ${}^2_1\vec{d}(t)$, y su orientación, definida por una matriz de rotación 2_1R , una vez se han definido los vectores de posición de las juntas esféricas en el sistema móvil, se pueden calcular dichos vectores en el sistema fijo [20]:

$${}^1\vec{r}(t) = {}^2_1R(t) * {}^2\vec{r}(t) + {}^2_1\vec{d}(t)$$

Una forma compacta de expresar cualquier movimiento de la plataforma móvil es utilizando la matriz de transformación 1_2T [20]:

$$\begin{bmatrix} {}^1\vec{r}(t) \\ 1 \end{bmatrix} = {}^1_2T(t) * \begin{bmatrix} {}^2\vec{r}(t) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T(t) = \begin{bmatrix} {}^1_2R(t) & {}^1_2\vec{d}(t) \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

Una vez calculados los vectores de posición (función del tiempo para describir un movimiento) de las juntas esféricas en el sistema base, ${}^1\vec{r}(t)$, se obtienen a partir de estos las coordenadas $x_1(t)$, $x_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$, $z_5(t)$ y $z_6(t)$. Una forma compacta de expresar esto es:

$$\rho_1(t) = i^T * ({}^1_2R(t) * {}^2r_1(t) + {}^1_2d(t))$$

$$\rho_2(t) = i^T * ({}^1_2R(t) * {}^2r_2(t) + {}^1_2d(t))$$

$$\rho_3(t) = j^T * ({}^1_2R(t) * {}^2r_3(t) + {}^1_2d(t))$$

$$\rho_4(t) = j^T * ({}^1_2R(t) * {}^2r_4(t) + {}^1_2d(t))$$

$$\rho_5(t) = k^T * ({}^1_2R(t) * {}^2r_5(t) + {}^1_2d(t))$$

$$\rho_6(t) = k^T * ({}^1_2R(t) * {}^2r_6(t) + {}^1_2d(t))$$

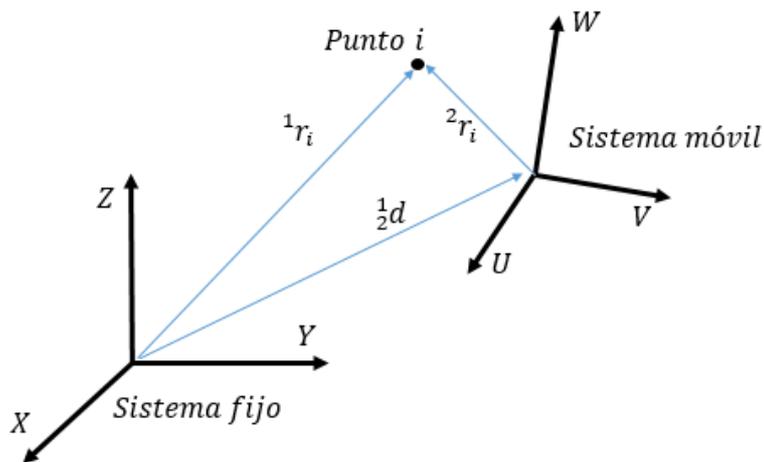


Ilustración 28. Notación vectorial para sistemas de coordenadas fijo y móvil

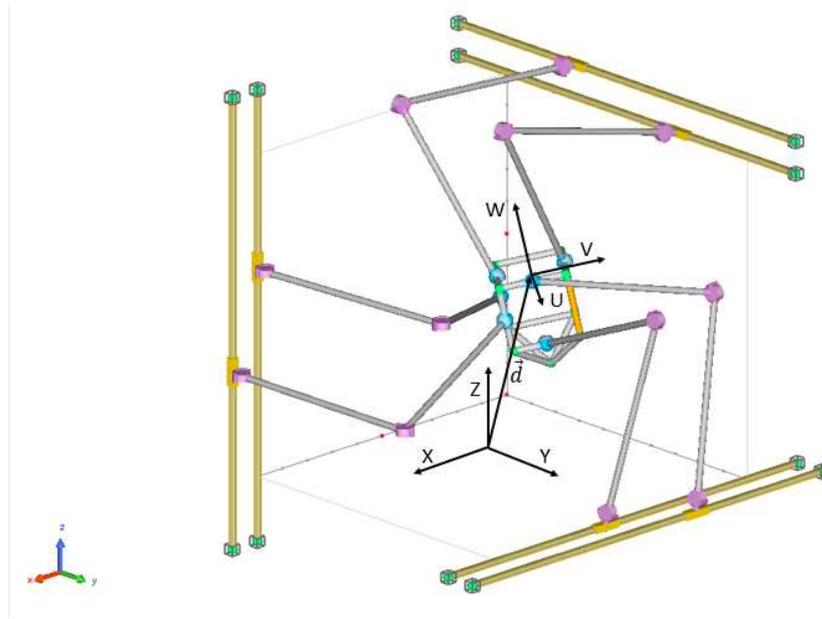


Ilustración 29. Ejemplo de sistema de coordenadas base y sistema de coordenadas herramienta ligado a la plataforma móvil. Configuración C0

Por tanto, la única dificultad que alberga el problema cinemático inverso es definir un movimiento, posición o sucesión de posiciones mediante la correspondiente matriz de transformación (o matriz de rotación y vector de desplazamiento). El resto del procedimiento es directo.

9.2.3. Quadrupteron y Pentapteron

Estas configuraciones son en realidad casos particulares del Hexapteron. Es decir, el procedimiento para calcular los parámetros de las juntas activas sería exactamente el mismo. Sin embargo, albergan una dificultad extra.

El Quadrupteron tiene 3 GDL de traslación y 1 GDL de rotación. Por tanto, no se podrá seleccionar una matriz de rotación cualquiera, ya que hay 2 GDL de rotación restringidos. Para esto, será necesario estudiar que movimientos de rotación puede ejecutar.

Ocurre lo mismo con el Pentapteron. Sólo que este tiene 3 GDL de traslación y 2 GDL de rotación. Por tanto, en este caso, se tiene 1 GDL de rotación restringido, y del

mismo modo será necesario estudiar qué rotaciones puede efectuar en las distintas posiciones.

Dichos estudios se llevan a cabo en el apartado “3.3. Análisis de Movilidad”. Como se mostrará, dependiendo de qué giros quieran restringirse, se deberá aplicar la reconfiguración sobre unas patas u otras.

9.2.4. Manipulador serie (MS)

El MS que resulta de desacoplar una pata de la plataforma móvil, puede actuar de forma colaborativa con esta. Lo que en un principio interesa controlar del MS es el posicionamiento del extremo libre del mismo, que puede tener una función útil, como la de agarrar y desplazar elementos, o realizar operaciones de ensamblaje.

Tiene 3 GDL, los cuales permiten posicionar el extremo del manipulador en cualquier punto dentro de su espacio de trabajo. Las juntas activas son una junta prismática en serie con dos juntas de rotación. La cinemática inversa se resume en las expresiones que se muestran más adelante, que relacionan los parámetros de las juntas activas con la posición del extremo del MS. Como se puede apreciar, la junta prismática controla directamente una coordenada del extremo libre, y las dos juntas de rotación controlan conjuntamente las otras dos coordenadas. Tomando un sistema de referencia fijo (XYZ).

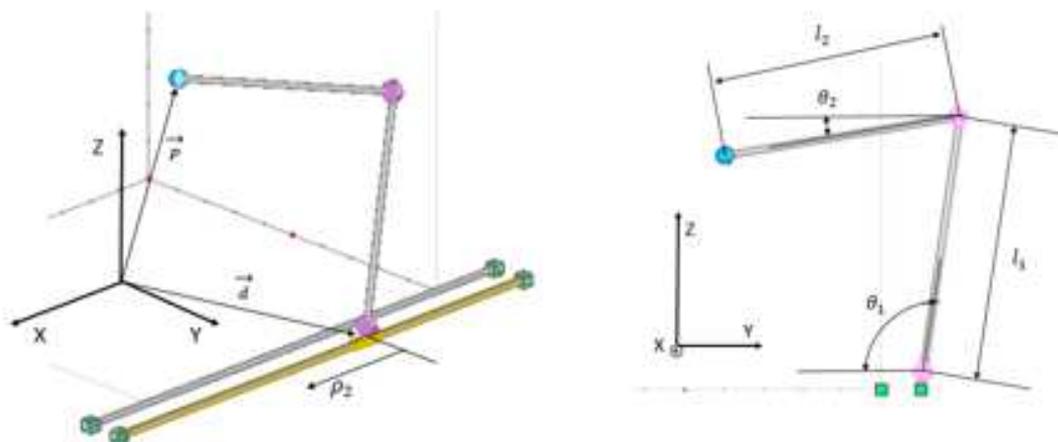


Ilustración 30. Notación vectorial y parámetros de las juntas activas del MS

Siendo θ_1 y θ_2 los parámetros de las juntas de rotación, ρ_1 el parámetro de la junta prismática, $\vec{d}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ el vector de posicionamiento inicial de la junta prismática, y $\vec{p}(t) = (x_p(t), y_p(t), z_p(t))$ el vector de posicionamiento del extremo libre, se obtiene lo siguiente (a_0 es la distancia en dirección X que hay de la junta prismática al extremo libre. No es nula por que la barra rígida de la pata que contiene el extremo libre no está contenida en el plano YZ):

$$\begin{aligned}
 x_p(t) &= x_0 + \rho_2(t) + a_0 \\
 z_p(t) &= l_1 * \sin \theta_1(t) - l_2 * \sin \theta_2(t) \\
 y_p(t) &= -l_1 * \cos \theta_1(t) - l_2 * \cos \theta_2(t)
 \end{aligned}$$

La primera ecuación es directa. Sin embargo, para obtener θ_1 y θ_2 es necesario operar la segunda y tercera ecuación, llegando a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 K(t) &= \frac{l_1^2 - l_2^2 - z_p(t)^2 - y_p(t)^2}{2 * l_2} \\
 \sin \theta_2(t) &= \frac{2 * K(t) * z_p(t) \pm \sqrt{4 * K(t)^2 * z_p(t)^2 - 4 * (z_p(t)^2 + y_p(t)^2) * (K(t)^2 - y_p(t)^2)}}{2 * (z_p(t)^2 + y_p(t)^2)} \\
 \sin \theta_1(t) &= \frac{z_p(t) + l_2 * \sin \theta_2(t)}{l_1}
 \end{aligned}$$

Como se puede apreciar, existen en principio hasta 4 soluciones para una posición (x_p, y_p, z_p) dada. De estas soluciones se escogerá la que interese y determine una posición real.

9.3. Análisis de movilidad

En este apartado se estudia la movilidad de cada una de las configuraciones por separado. Tiene como objetivo determinar qué movimientos puede ejecutar cada configuración, y qué movimientos están restringidos.

9.3.1. Tripteron

Como ya se ha mencionado en el Análisis cinemático inverso, la configuración C3 del manipulador, donde la plataforma móvil tiene 3 GDL de traslación, puede trasladarse en cualquier dirección dentro de su espacio de trabajo. No tiene la posibilidad de rotar, por lo que su orientación permanece invariable.

Además, por tener una cinemática totalmente desacoplada, cada junta activa controla directamente una coordenada de la plataforma.

9.3.2. Hexapteron

Como ya se ha mencionado, esta configuración tiene total libertad de movimiento, 3 GDL de traslación y 3 GDL de rotación.

Para obtener movimientos de traslación pura en el manipulador basta con sincronizar las juntas prismáticas de las pistas paralelas. Esto se podría hacer mediante una transmisión mecánica en cada pareja de pistas que imponga dicho sincronismo, y así solo sería necesario actuar sobre 1 junta de las 2 acopladas. De esta forma se comporta como un Tripteron, y el manipulador se traslada. La cinemática inversa se resumiría en este caso en las siguientes expresiones:

$$\rho_1 = \rho_2 = x_1 - x_{10}$$

$$\rho_3 = \rho_4 = y_3 - y_{30}$$

$$\rho_5 = \rho_6 = z_5 - z_{50}$$

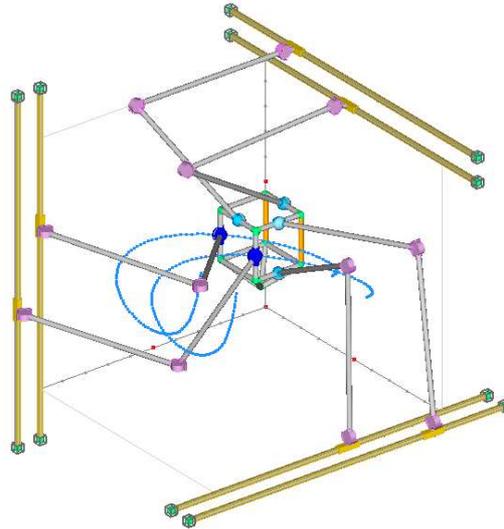


Ilustración 31. Simulación de movimiento traslación en plano XY, configuración C0

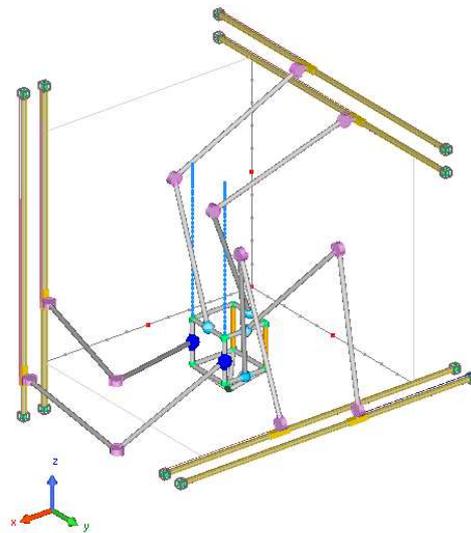


Ilustración 32. Simulación de movimiento de traslación vertical, configuración C0

Para obtener movimientos de rotación, es necesario definir primero la matriz de rotación correspondiente (estas se recuerdan más adelante). Una vez se ha definido el giro mediante su correspondiente matriz, se calculan las coordenadas de las juntas esféricas de la plataforma móvil y por último, se calculan los parámetros de las juntas activas, tal como se ha explicado en el apartado “1.4. Análisis cinemático inverso”.

Existen tres tipos de giros, Roll, Pitch y Yaw. Cualquier rotación se puede obtener como una sucesión de estos, y la matriz de rotación mediante una composición de sus matrices, premultiplicándolas si los giros están referidos al sistema de referencia fijo, y postmultiplicándolas si están referidos al sistema de referencia móvil. Por tanto, para una serie de movimientos sucesivos, (referidos en este caso al sistema de referencia fijo), la matriz de transformación correspondiente se calcula:

$${}^mT_i = {}^mT_k * {}^kT_j * {}^jT_i$$

En la siguiente imagen se recuerdan los 3 giros principales, a partir de los cuales se puede definir cualquier rotación u orientación respecto a un sistema fijo. Más adelante, se recuerdan las matrices de rotación correspondientes a cada giro.

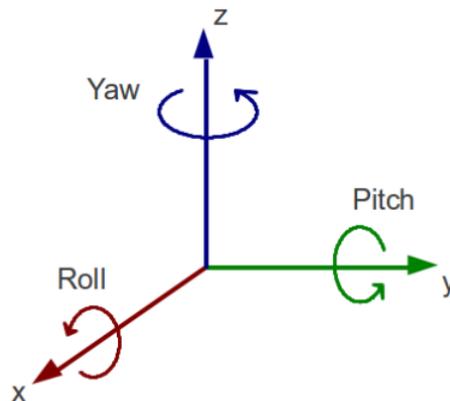


Ilustración 33. Designación de las rotaciones principales

Roll

La matriz de rotación correspondiente a un giro tipo Roll de un ángulo $\alpha(t)$ es la siguiente:

$${}^1_2R(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha(t) & -\sin \alpha(t) \\ 0 & \sin \alpha(t) & \cos \alpha(t) \end{pmatrix}$$

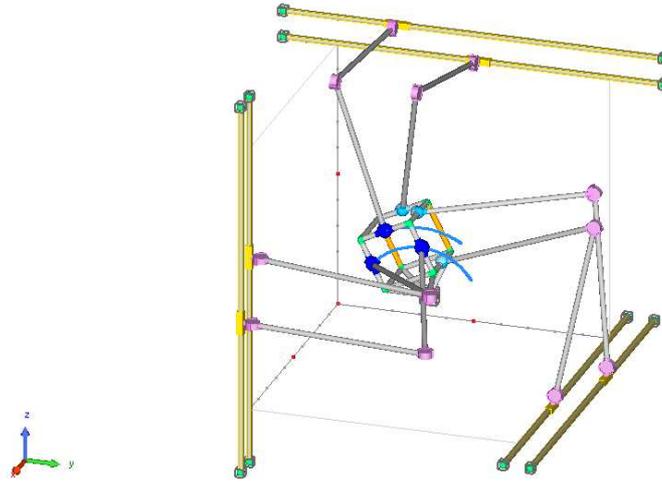


Ilustración 34. Simulación de giro Roll, configuración C0

Pitch

La matriz de rotación correspondiente a un giro tipo Pitch de un ángulo $\varphi(t)$ es la siguiente:

$${}^1_2R(t) = \begin{pmatrix} \cos \varphi(t) & 0 & \sin \varphi(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi(t) & 0 & \cos \varphi(t) \end{pmatrix}$$

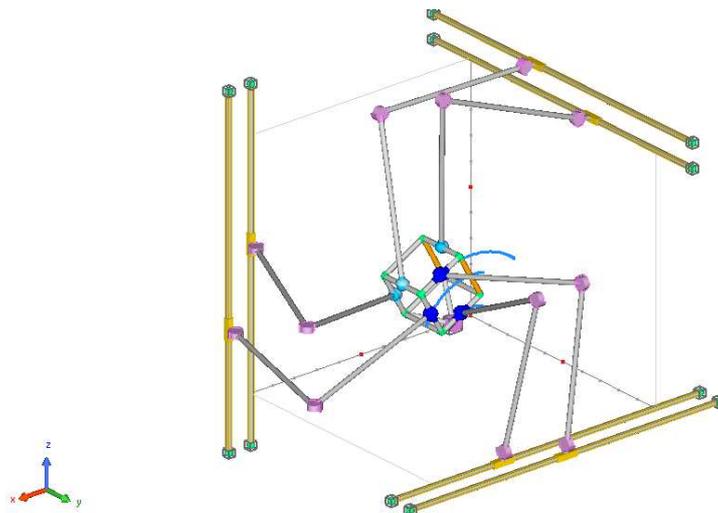


Ilustración 35. Simulación de giro Pitch, configuración C0

Yaw

La matriz de rotación correspondiente a un giro tipo Pitch de un ángulo $\theta(t)$ es la siguiente:

$${}^1_2R(t) = \begin{pmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) & 0 \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

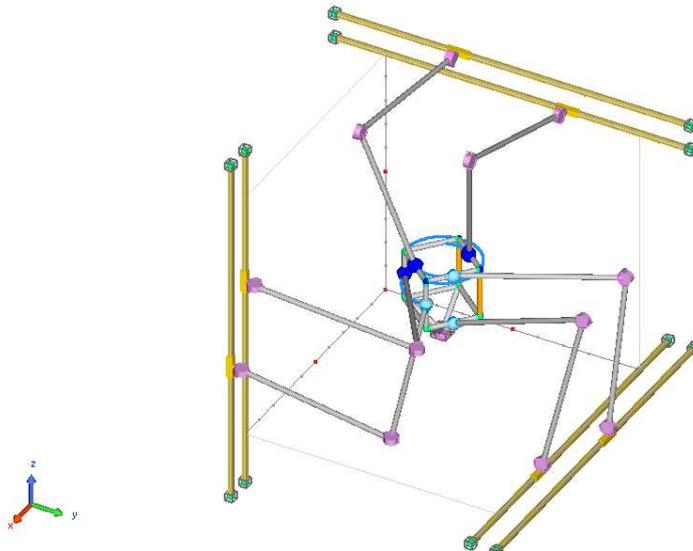


Ilustración 36. Simulación de giro Yaw, configuración C0

9.3.3. Quadrupteron y Pentapteron

Como ya se ha mencionado en el análisis de reconfiguración, existen 3 modos de obtener la configuración Pentapteron, C1, y 3 modos de obtener la configuración Quadrupteron, C2 (sin tener en cuenta si se desacoplan o no las patas desacoplables). El modo de reconfiguración depende cuáles sean las patas en las que se bloquea la junta de rotación.

Ambas configuraciones, C1 y C2, tienen 3 GDL de traslación, y el modo de obtener movimientos de traslación pura es igual que en la configuración C0. Hay que sincronizar el movimiento de las patas conectadas a pistas paralelas, que en este caso serían 2 parejas de patas conectadas a pistas paralelas en la C1, y 2 patas conectadas a pistas paralelas en la C2. Por ejemplo, tomando el C1, si

reconfiguramos las patas de la dirección Z, bloqueando la junta de rotación de la pata 5 y desacoplando la pata 6, habría que sincronizar el movimiento de las juntas prismáticas 1 y 2, de las juntas 3 y 4, y actuar sobre la junta 5. El resultado sería el siguiente.

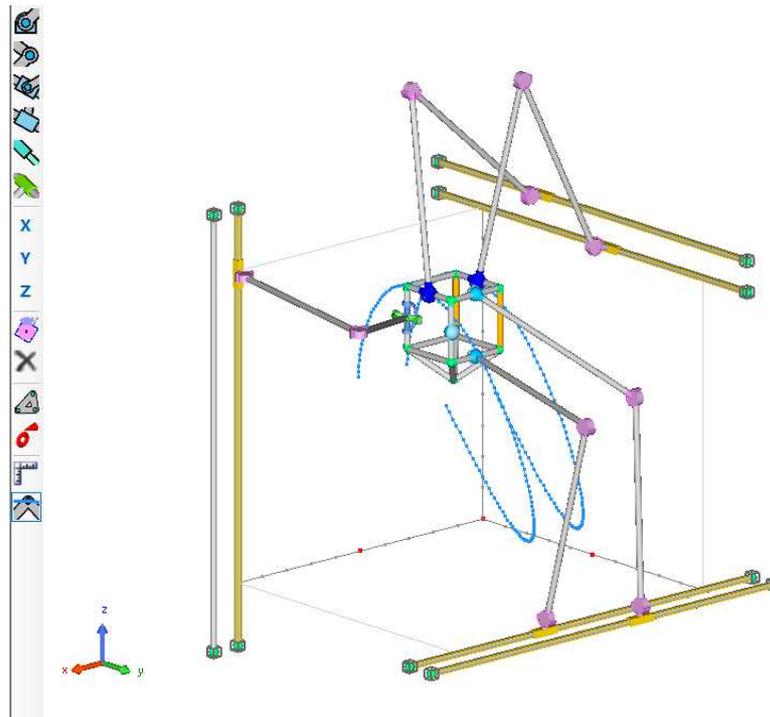


Ilustración 37. Simulación de movimiento de traslación en plano YZ, configuración C1

La C1, que tiene 2 GDL de rotación, y la C2 tiene 1 GDL de rotación. En función de qué modo de configuración se elija, quedará restringido 1 GDL de rotación u otro. En las siguientes tablas se recogen los giros permitidos en función del modo de configuración, para la C1 y C2, estando el hexaedro (plataforma móvil) con sus aristas paralelas a las pistas de deslizamiento, siendo la matriz de rotación que define la posición inicial la matriz identidad:

$${}^1_2T_{inicial} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \overrightarrow{\frac{1}{2}d} \\ 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

| Modo de configuración de C1 | Pitch | Roll | Yaw |
|-------------------------------------|-------|------|-----|
| Patas en dirección Z reconfiguradas | Sí | No | Sí |
| Patas en dirección Y reconfiguradas | Sí | Sí | No |
| Patas en dirección X reconfiguradas | No | Sí | Sí |

Tabla 2. Giros restringidos en la configuración C1

| Modo de configuración de C2 | Pitch | Roll | Yaw |
|---|-------|------|-----|
| Patas en dirección Z e Y reconfiguradas | Sí | No | No |
| Patas en dirección Z y X reconfiguradas | No | No | Sí |
| Patas en dirección X e Y reconfiguradas | No | Sí | No |

Tabla 3. Giros restringidos en la configuración C2

Para estudiar los GDL de rotación en una posición genérica, con la plataforma móvil inclinada, hay que tener en cuenta que la junta que restringe una rotación es la junta universal. En la siguiente imagen se muestran los GDL de rotación permitidos en azul y el GDL de rotación restringido en rojo por dicha junta.

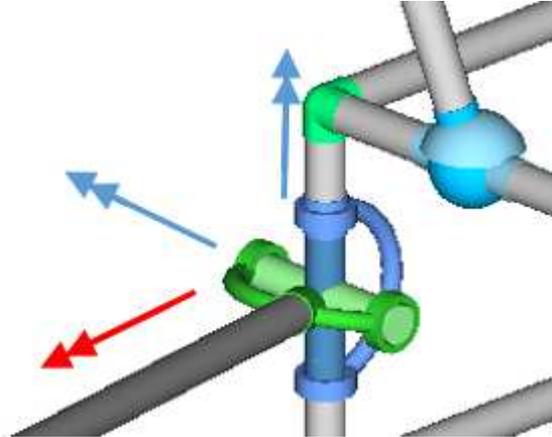


Ilustración 38. Giro restringido por la junta universal, en rojo

El vector de rotación correspondiente al giro restringido es perpendicular a la misma. Por tanto, para hacer un análisis de movilidad en una posición cualquiera, será necesario obtener la orientación de dicha junta. De este modo, se obtiene de forma directa la capacidad de giro de la plataforma en la posición deseada. En la siguiente imagen, se muestra en rojo el GDL de rotación restringido, en una posición genérica con la plataforma móvil inclinada.

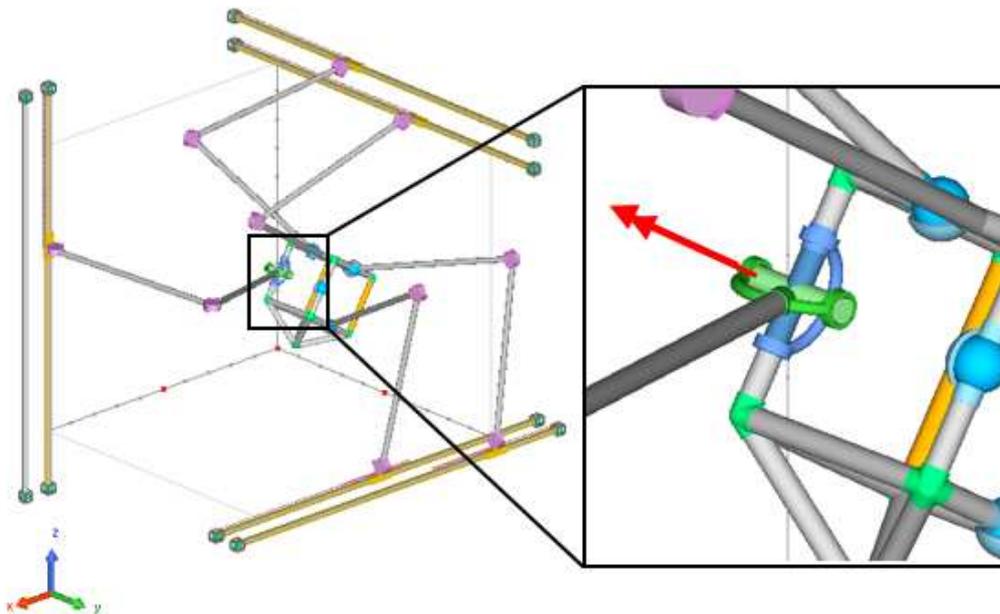


Ilustración 39. Giro restringido en posición con plataforma móvil inclinada, configuración C1

10. TAREAS Y DIAGRAMA GANTT

10.1. Tareas

En este apartado se definen detalladamente las tareas llevadas a cabo para la ejecución del presente trabajo. Por tanto, partiendo de las fases de trabajo expuestas en el WBS, se determinan las diferentes tareas (T) y paquetes de trabajo (PT) necesarias para la propuesta y el análisis del MPR.

PT.1. Estudio Estado del Arte

El estudio del estado del arte constituye la primera tarea a realizar en el proyecto, antes de diseñar ni analizar ningún modelo. A pesar de todo, a lo largo del trabajo se va haciendo una revisión continua, atendiendo a nuevas publicaciones en la línea del trabajo.

T.1.1. Manipuladores paralelos

- Descripción: Se recopila información acerca de los manipuladores paralelos, y se clasifica en función del enfoque del trabajo. Finalmente, se hace una síntesis de la misma.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (8h), Ingeniero Senior. (1h)
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Estado del Arte sobre manipuladores paralelos.

T.1.2. Manipuladores reconfigurables

- Descripción: Se recopila información acerca de los manipuladores reconfigurables, y se clasifica en función del enfoque del trabajo. Finalmente, se hace una síntesis de la misma.

- Recursos humanos: Ingeniero Junior (8h), Ingeniero Senior (1h)
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Estado del Arte sobre manipuladores reconfigurables.

T.1.3. Conclusión

- Descripción: Se hace una síntesis de las conclusiones obtenidas a partir del estudio del estado del arte de manipuladores paralelos y manipuladores reconfigurables.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (4h)
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 semana.
- Entregables: Conclusión sobre MP y MR.

PT.2. Propuesta de nuevo modelo

Una vez se ha recopilado y sintetizado información sobre los MP y MR, se propone un modelo de MPR que presente ventajas competitivas.

T.2.1. Selección de MP o familia de MP

- Descripción: Primero se toma como base, para el diseño del MPR, un MP o familia de MP estudiados en el estado del arte. Para ello, se hace una revisión y clasificación de estos.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (5h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 semana.
- Entregables: Clasificación en grupos de MP. Selección y descripción de MP o familia de MP escogida.

T.2.2. Planteamiento de nuevo modelo

- Descripción: Tras seleccionar el MP o familia de MP, se plantea un modelo de MPR basado en este, utilizando tecnologías de reconfiguración recopiladas en el estudio del estado del arte

- Recursos humanos: Ingeniero Junior (3h).
- Recursos humanos: Ordenador, GIM.
- Duración: 2 días.
- Entregables: Propuesta nuevo modelo.

T.2.3. Modelización en GIM

- Descripción: Modelización del MPR, con los aspectos pertinentes del modelo, en GIM.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (5h).
- Recursos materiales: Ordenador, GIM.
- Duración: 1 semana.
- Entregables: Archivo GIM.

T.2.4. Aplicaciones

- Descripción: Se hace un estudio de las posibles aplicaciones en las que puede presentar ventajas competitivas el MPR propuesto. Para ello, se hace una revisión del estado del arte del grupo de MP seleccionado para su diseño.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (5h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 semana.
- Entregables: Aplicaciones del MPR.

PT.3. Análisis del nuevo modelo

Tras realizar un modelo de cada configuración del MPR en GIM, se hace un análisis del mismo para conocer sus propiedades cinemáticas más en detalle.

T.3.1. Análisis de reconfiguración

- Descripción: Se definen las posibles configuraciones que puede abarcar el MPR. También se detallan las técnicas de reconfiguración empleadas.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (10h).

- Recursos materiales: Ordenador, GIM.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Tabla de configuraciones del MPR.

T.3.2. Análisis cinemático inverso

- Descripción: Se analizan, a mano, las ecuaciones cinemáticas de todas las configuraciones.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (10h).
- Recursos materiales: Boli y calculadora.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Ecuaciones de cinemática inversa.

T.3.3. Análisis de movilidad

- Descripción: Se hace un estudio de movilidad de todas las configuraciones por separado, para determinar la posibilidad de movimiento de cada una. También se verifican los resultados esperados del análisis cinemático inverso, simulando movimientos en GIM.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (15h).
- Recursos materiales: Ordenador, GIM.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Movilidad de cada configuración. Tablas de movilidad si fuese necesario.

T.4. Presentación de los resultados

- Descripción: Se seleccionan los resultados de la propuesta y análisis del MPR, y junto con el estudio del estado del arte se recopilan en el presente trabajo.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior (10h), Ingeniero Senior (1h).
- Recursos materiales: Ordenador, GIM.
- Duración: 1 semana.
- Entregables: Memoria y Metodología del presente TFG.

10.2. Hitos

Una vez se ha realizado cada paquete de trabajo, se ratifica su finalización mediante el hito correspondiente. El presente trabajo cuenta con los siguientes hitos.

Hito 1: Redacción del Estado del Arte. Se realiza tras finalizar las tareas T.1.1., T.1.2. y T.1.3. Se recopila en un documento la síntesis del estudio.

Hito 2: Propuesta de MPR y sus Aplicaciones. Se realiza tras finalizar las tareas T.2.1., T.2.2., T.2.3. y T.2.4. Se recopilan los archivos GIM con las distintas configuraciones, así como un documento con la descripción del nuevo modelo y sus ventajas para ciertas aplicaciones.

Hito 3: Redacción de los resultados del Análisis. Se realiza tras finalizar las tareas T.3.1., T.3.2. y T.3.3. Se realiza para verificar los resultados del análisis.

Hito 4. Entrega del trabajo. Se realiza tras finalizar la tarea T.4. Se presentan los resultados.

| | Identificación | Tarea | Predecesora | Duración |
|--|----------------|--|-------------------|----------|
| | PT.1. | Estudio del Estado del Arte | | |
| | T.1.1. | A Manipuladores paralelos | | 1 mes |
| | T.1.2. | B Manipuladores Reconfigurables | | 1 mes |
| | T.1.3. | C Conclusión | A, B | 1 sem |
| | H1 | Redacción del Estado del Arte | A, B, C | 0 d |
| | PT.2. | Propuesta de nuevo modelo | | |
| | T.2.1. | D Selección de MP o familia MP | A, B, C | 1 sem |
| | T.2.2. | E Planteamiento nuevo modelo | D | 2 días |
| | T.2.3. | F Modelización GIM | E | 1 sem |
| | T.2.4. | G Aplicaciones | E | 1 sem |
| | H2 | Propuesta de MPR y sus Aplicaciones | D, E, F, G | |
| | PT.3. | Análisis nuevo modelo | | |
| | T.3.1. | H Análisis de reconfiguración | E, F | 1 sem |
| | T.3.2. | I Análisis cinemático inverso | E, F | 1 sem |
| | T.3.3. | J Análisis de movilidad | E, F | 2 sem |
| | H3 | Redacción resultados del Análisis | H, I, J | |
| | T.4. | K Presentación de los resultados | H, I, J | 1 sem |
| | H4 | Entrega del trabajo | H1, H2, H3 | |

Tabla 4. Lista de paquetes de trabajo, tareas e hitos

10.3. Diagrama Gantt

En este apartado se plantea el diagrama Gantt de los paquetes de trabajo realizados en el presente trabajo. La duración estimada del trabajo es de 20 semanas, con fecha de inicio el 05 de Febrero de 2018, y fecha prevista de finalización el 19 de Junio de 2018.

Como se puede apreciar en el diagrama, todos los paquetes de trabajo son críticos. Esto se debe a que la ejecución de unas tareas requiere la finalización de otras. Además, sólo se dispone de un ordenador.

Las tareas iniciales de recopilación de información sobre manipuladores paralelos y manipuladores reconfigurables es más lenta debido a que supone una primera toma de contacto en el ámbito de este tipo de manipuladores.

El periodo de tiempo donde no se trabaja en el TFG se debe a fechas en las cuales no hay disposición de tiempo para ello (desde finales de Abril hasta principios de Junio).

En el diagrama se han indicado las fechas de inicio y fin, así como el código de cada paquete de trabajo.

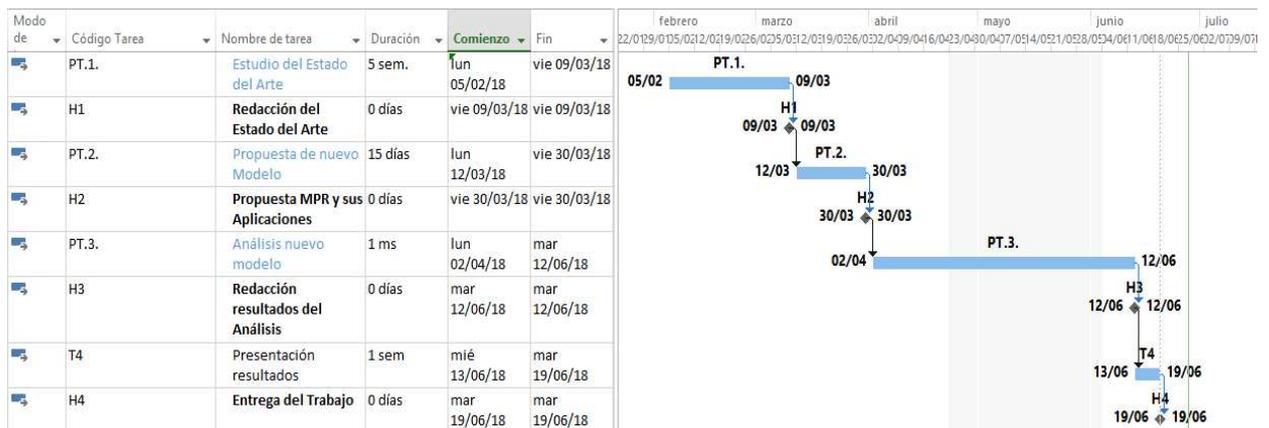


Ilustración 40. Diagrama Gantt del proyecto

11. CONCLUSIONES

11.1. Conclusiones sobre el MPR propuesto

En este apartado se exponen las conclusiones obtenidas a partir del análisis del MPR. Para ello, se hace un resumen de las características más importantes del mismo en 5 puntos, que se detallan a continuación.

- El MPR propuesto tiene la capacidad de reconfigurarse en cualquier manipulador de la familia de manipuladores paralelos Multipteron.
- Se trata de un MPR que tiene 4 tipos de configuración y 27 configuraciones en total. La reconfiguración se logra mediante el bloqueo de juntas de rotación, y el desacople de juntas esféricas. En la configuración original, C0, el elemento terminal del MP tiene 6 GDL (Hexapteron). Total libertad para rotar y desplazarse en cualquier dirección, dentro de su espacio de trabajo.
- Bloqueando 1,2 o 3 juntas de rotación, se logran las configuraciones C1,C2 o C3, respectivamente, que tienen 5, 4 o 3 GDL, respectivamente. Por cada junta de rotación bloqueada, se anula 1 GDL de rotación y se puede desacoplar 1 pata (restricción redundante), obteniéndose un MP de 5, 4 o 3 GDL, además de 1 MS, 2 MS o 3 MS, respectivamente, todos ellos de 3 GDL y con un amplio espacio de trabajo. Se puede restringir el GDL de rotación deseado, seleccionando las patas que se bloquean y/o desacoplan.
- El MPR tiene una cinemática fuertemente desacoplada. Cada GDL de traslación es controlado de forma independiente. Además, el problema cinemático inverso se resuelve directamente. Sólo hay que calcular las

coordenadas de 6 puntos de la plataforma móvil, para lo que es necesario definir una posición o movimiento mediante su correspondiente matriz de transformación.

- El manipulador es adecuado para operaciones como impresión 3D y mecanizado, por su capacidad de anular GDL de rotación a costa de obtener MS colaborativos. Además es relativamente rígido por ser paralelo, y preciso por ser actuado por juntas prismáticas. Su cinemática hace que tenga un bajo coste operacional, de cara al control del mismo.

11.2. Líneas futuras

El presente trabajo pone de manifiesto el gran potencial que tienen los MPR mediante un ejemplo.

Durante el desarrollo inicial del modelo no se ha contemplado ninguna aplicación en concreto, sino que se ha buscado una máxima capacidad de reconfiguración con el mínimo número de juntas bloqueables o desacoplables. Sin embargo, una vez se desarrolla el modelo, haciendo una revisión del estado del arte de los MP y sus aplicaciones, enseguida se identifican campos de aplicación donde puede presentar ventajas competitivas claras.

Esto tiene como objetivo demostrar que la flexibilidad para adaptarse a distintos entornos de trabajo y necesidades que ofrece a un manipulador la capacidad de reconfiguración, es un punto clave a estudiar.

Tal como se ha mencionado en el apartado del Estado del Arte, la industria requiere minimizar tiempos de operación y costes, una meta alcanzable por un MPR, por su capacidad de realizar tareas que de otro modo sería necesario más de un manipulador. Por tanto, se cree que merece la pena no sólo el considerar el MPR aquí propuesto para un futuro desarrollo del mismo, sino que invertir más en investigación sobre la capacidad de reconfiguración de manipuladores paralelos.

Y en concreto, se propone y recomienda introducir la capacidad de reconfiguración mediante las tecnologías ya mencionadas en manipuladores paralelos actuales, que ya hayan sido objeto de estudio y cuyas características y ventajas sean conocidas.

12. FUENTES DE INFORMACIÓN

[1] Estadística 2016 AER-ATP.

[2] Y. D. Patel¹, P. M. George. "Parallel Manipulators Applications—A Survey". Department of Mechanical Engineering, A. D. Patel Institute of Technology, New Vallabh Vidyanagar, India. Publicado online, 2 de Agosto de 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.23008>

[3] D. Oscar Salgado Picón. Tesis Doctoral. "Síntesis, Análisis y Diseño de Manipuladores Paralelos de Baja Movilidad". Universidad del País Vasco, pp. 42-52. Enero de 2008.

[4] S. M. Wang and K. F. Ehmann, "Error Model and Accuracy Analysis of a Six-Dof Stewart Platform," ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, No. 2, 2002, pp. 286-295.

[5] Justin Pradipta, Mario Klünder, Martin Weickgenannt, Oliver Sawodny "Development of a pneumatically driven flight simulator Stewart platform using motion and force control". Publicado en 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.

[6] C. Gosselin and J. F. Hamel, "The Agile Eye: A HighPerformance Three-Degree-of-Freedom Camera-Orienting Device," IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, 8-13 May 1994, pp. 781-786.

[7] Christine Connolly, (2007) "ABB high-speed picking robots establish themselves in food packaging", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 34 Issue: 4, pp.281-284.

[8] BhaskarDasgupta "Mechanism and Machine Theory". Volume 35, Issu 1, January 2000, Páginas 15-40.

[9] Olazagoitia, J. and Wyatt, S., "New PKM Tricept T9000 and Its Application to Flexible Manufacturing at Aerospace Industry," SAE Technical Paper 2007-01-3820, 2007, <https://doi.org/10.4271/2007-01-3820>.

[10] Salvador Botello-Aceves, S. Ivvan Valdez, Hector M. Becerra, "Concurrent design optimization of the Delta manipulator Sign In or Purchase" 2016 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI), 27 March 2017.

[11] Patrick Grosch, Raffaele Di Gregorio, Javier López. "Motion planning for a novel reconfigurable parallel manipulator with lockable revolute joints". Publicado en 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation.

[12] Iman Kardan, Alireza Akbarzadeh. "An improved hybrid method for forward kinematics analysis of parallel robots". Publicado el 09 de Enero de 2014.
<https://doi.org/10.1080/01691864.2014.994034>

[13] Guiling Yang. "Design and kinematic analysis of modular reconfigurable parallel robots". Publicado en Mayo de 1999, IEEE International Conference on Robotics and Automation.

[14] Patrick Grosch, Raffaele Di Gregorio, Javier Lo'pez, and Federico Thomas, "Motion Planning for a Novel Reconfigurable Parallel Manipulator with Lockable Revolute Joints". Publicado en Mayo de 2010, IEEE International Conference on Robotics and Automation.

- [15] Mathias Haage, Isolde Dressler, Anders Robertsson, Klas Nilsson, Torgny Broga°rdh, Rolf Johansson. “Reconfigurable Parallel Kinematic Manipulator for Flexible Manufacturing”. Volume 42, Issue 4, 2009, pp. 145-150.
- [16] X. Kong and C. M. Gosselin, “Kinematics and singularity analysis of a novel type of 3-CRR 3-DOF translational parallel manipulator,” The International Journal of Robotics Research, Vol. 21, No. 9, Septiembre 2002, pp. 791–798.
- [17] P.-L. Richard, C.M. Gosselin and X. Kong, “Kinematic analysis and prototyping of a partially decoupled 4-DOF 3T1R parallel manipulator,” Proceedings of the 2006 ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Philadelphia, USA, 10-13 Septiembre 2006.
- [18] X. Kong and C.M. Gosselin, “Type synthesis of 5-DOF parallel manipulators based on screw theory,” Journal of Robotic Systems, Vol. 22, No. 10, 2005, pp. 535–547.
- [19] Nicholas Seward, Ilian A. Bonev, Senior Member, IEEE, “A new 6-DOF parallel robot with simple kinematic model”. Publicado en Junio de 2014. IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- [20] Alfonso Hernández. “Cinemática de mecanismos. Análisis y diseño”. Publicado en 2014.

13. ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE

De cara al diseño y análisis de manipuladores, como es el caso del presente trabajo, la normativa que debe seguirse es la **ISO 9787**.

En dicha norma se trata lo referente a sistemas de referencia robóticos. Además, aporta la nomenclatura necesaria para definir los movimientos básicos de los robots. Tiene como objetivo facilitar las tareas de alineamiento, programación y ensayo. Se describen los principios generales de la robótica y los fundamentos de los movimientos. Se aplica para todos los robots según la norma **ISO 8373**.

Algunos de los términos y definiciones indicados en esta norma, y que han sido utilizados en el desarrollo del presente trabajo, son configuración, plataforma móvil, sistema de coordenadas base, sistema de coordenadas de la herramienta, working space o punto de referencia de la plataforma móvil.

Desde mayo de 2013 está en vigor la norma ISO 9787:2013-05 (Robots y aparatos robóticos. Sistemas de coordenadas y nomenclaturas de movimientos). En la última revisión, ISO 8373:2012, se ha extendido el alcance de la norma incluyendo los robots operando tanto en entornos industriales como en no industriales.

14. ANEXO

RESULTADOS

II:

14.1. Tabla de configuraciones del MPR

En la siguiente tabla se recogen todas las configuraciones que puede abarcar el MPR propuesto, en función de qué patas son desacopladas y en qué patas se bloquea la junta de rotación pertinente.

| Configuración | Junta R bloqueada | | | Junta S desacoplada | | | Nº de MS | GDL del MP |
|---------------|-------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|----------|------------|
| | Pata 1 | Pata 3 | Pata 5 | Pata 2 | Pata 4 | Pata 6 | | |
| C0 | No | No | No | No | No | No | 0 | 6 |
| C1 | Si | No | No | No | No | No | 0 | 5 |
| C1 | No | Si | No | No | No | No | 0 | 5 |
| C1 | No | No | Si | No | No | No | 0 | 5 |
| C1 | Si | No | No | Si | No | No | 1 | 5 |
| C1 | No | Si | No | No | Si | No | 1 | 5 |
| C1 | No | No | Si | No | No | Si | 1 | 5 |
| C2 | No | Si | Si | No | No | No | 0 | 4 |
| C2 | No | Si | Si | No | Si | No | 1 | 4 |
| C2 | No | Si | Si | No | Si | Si | 2 | 4 |
| C2 | No | Si | Si | No | No | Si | 1 | 4 |
| C2 | Si | No | Si | No | No | No | 0 | 4 |
| C2 | Si | No | Si | Si | No | No | 1 | 4 |
| C2 | Si | No | Si | Si | No | Si | 2 | 4 |
| C2 | Si | No | Si | No | No | Si | 1 | 4 |
| C2 | Si | Si | No | No | No | No | 0 | 4 |
| C2 | Si | Si | No | Si | No | No | 1 | 4 |
| C2 | Si | Si | No | Si | Si | No | 2 | 4 |
| C2 | Si | Si | No | No | Si | No | 1 | 4 |
| C3 | Si | Si | Si | No | No | No | 0 | 3 |
| C3 | Si | Si | Si | No | No | Si | 1 | 3 |

| | | | | | | | | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|---|---|
| C3 | Si | Si | Si | No | Si | Si | 2 | 3 |
| C3 | Si | Si | Si | No | Si | No | 1 | 3 |
| C3 | Si | Si | Si | Si | No | No | 1 | 3 |
| C3 | Si | Si | Si | Si | No | Si | 2 | 3 |
| C3 | Si | Si | Si | Si | Si | No | 2 | 3 |
| C3 | Si | Si | Si | Si | Si | Si | 3 | 3 |

Tabla 5. Lista de configuraciones totales del MPR

14.2. Simulación de movimientos

En este apartado se simulan distintos movimientos para verificar los resultados esperados tras el análisis del MPR. En concreto, se simulan movimientos de traslación sobre el MP de la configuración C0 para verificar el desacoplamiento cinemático y sobre el MS para mostrar su amplio espacio de trabajo, y verificar el desacoplamiento de 1 de los GDL del mismo.

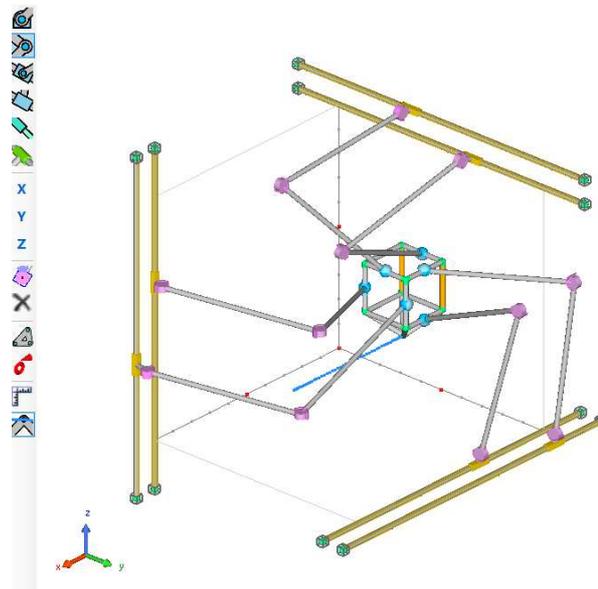


Ilustración 41. Traslación en X. Configuración C0

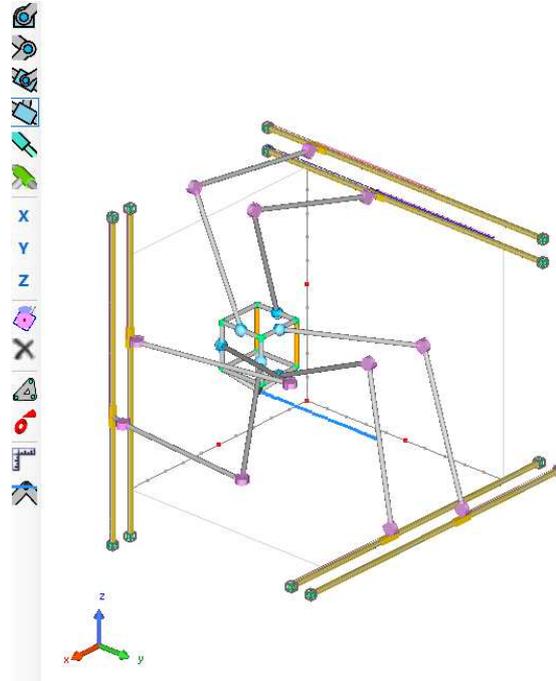


Ilustración 42. Traslación en Y. Configuración C0

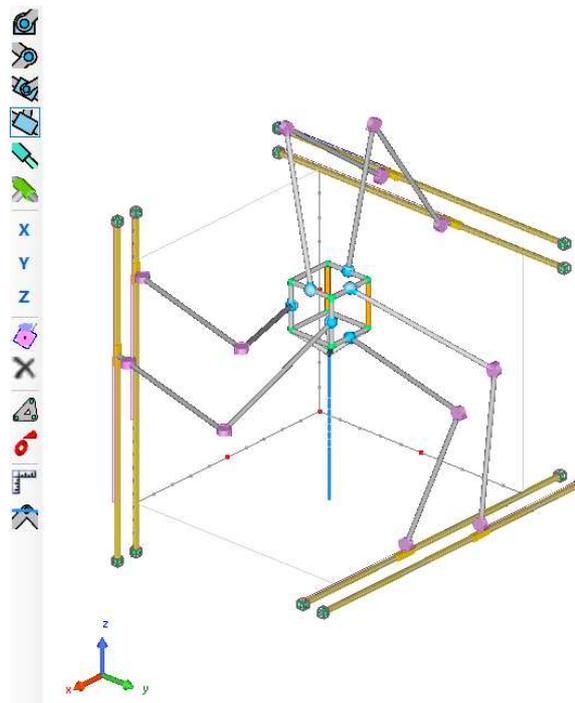


Ilustración 43. Traslación en Z. Configuración C0

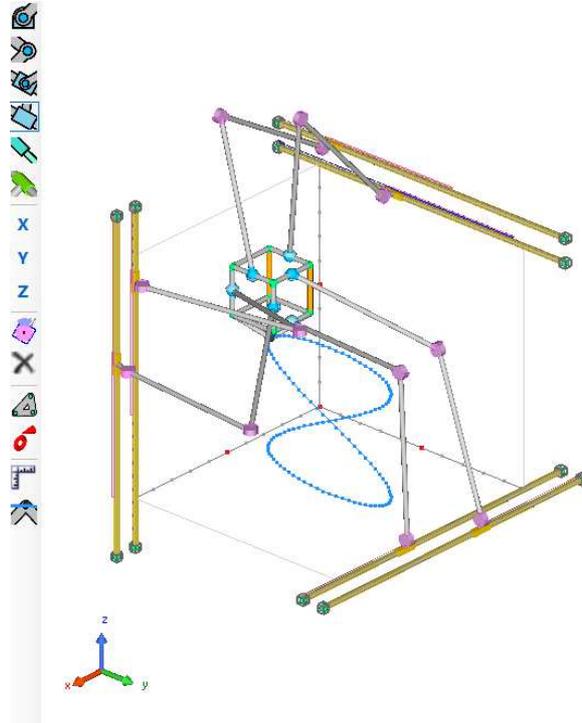


Ilustración 44. Traslación en plano YZ. Configuración C0

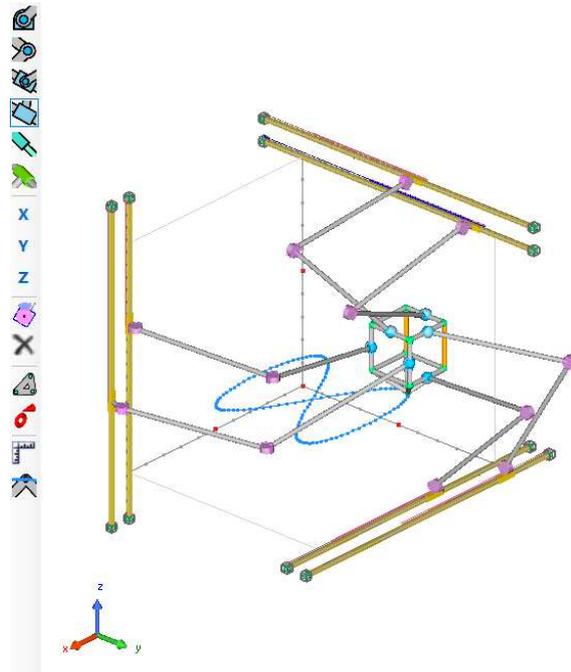


Ilustración 45. Traslación en plano XY. Configuración C0

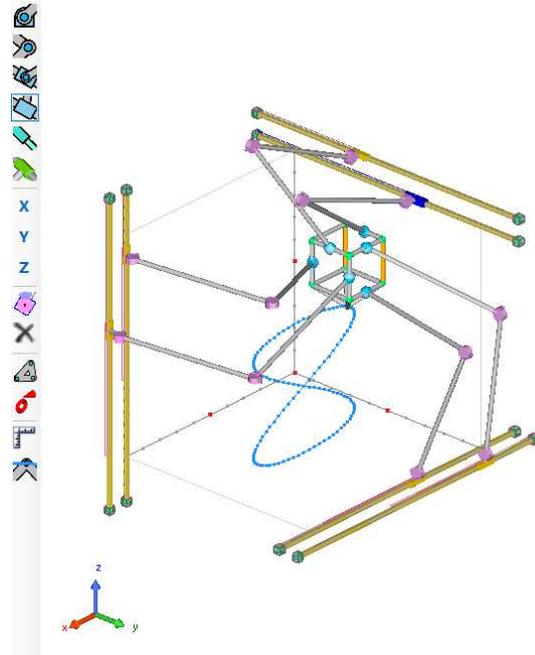


Ilustración 46. Traslación en plano XZ. Configuración C0

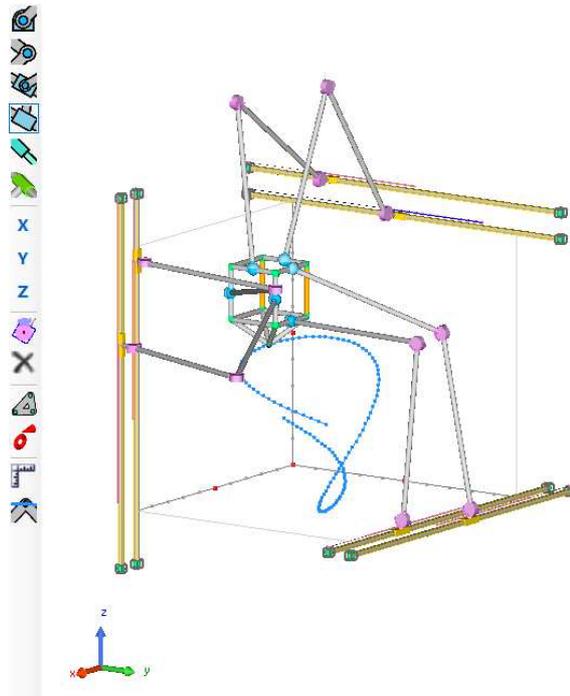


Ilustración 47. Traslación espacial. Configuración C0

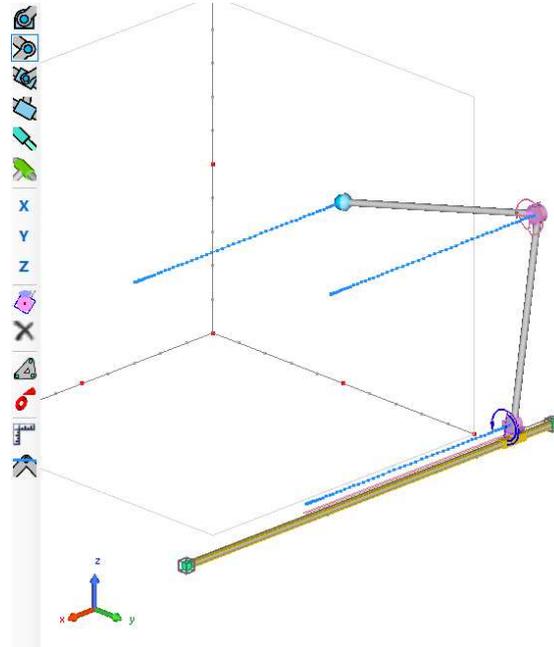


Ilustración 48. Simulación movimiento traslación MS

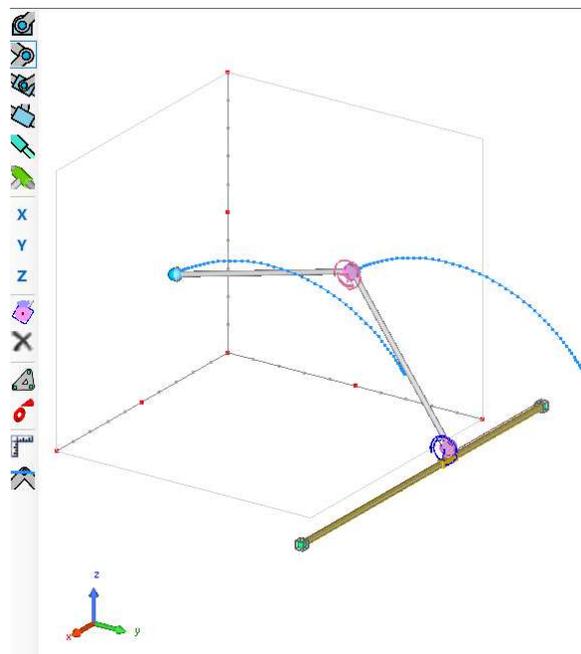


Ilustración 49. Simulación movimiento plano MS

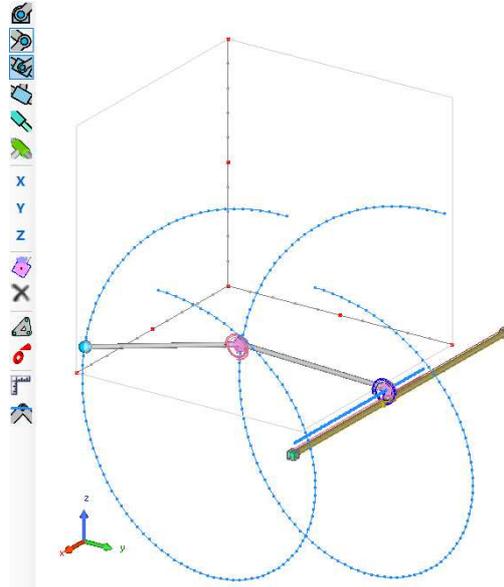


Ilustración 50. Simulación movimiento genérico MS

14.3. Configuraciones del manipulador

En este apartado se muestran todas las configuraciones del MPR. Las patas desacopladas no están representadas.

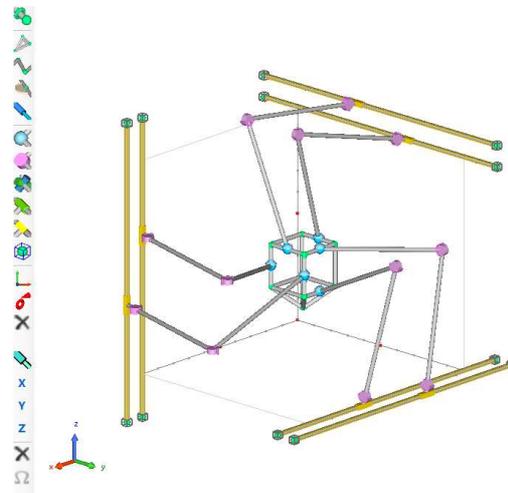


Ilustración 51. CO

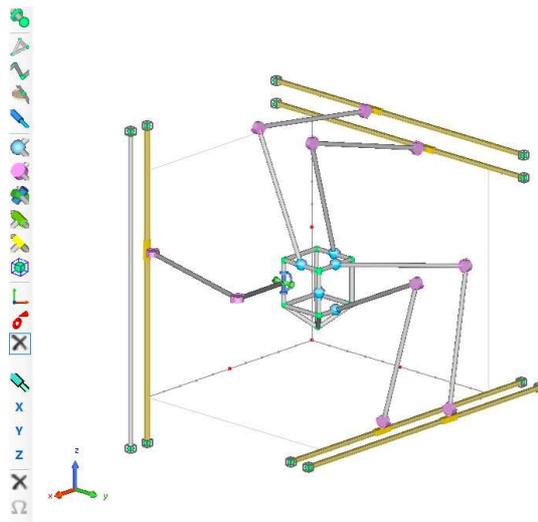


Ilustración 52. C1. Patas 5 y 6 reconfiguradas

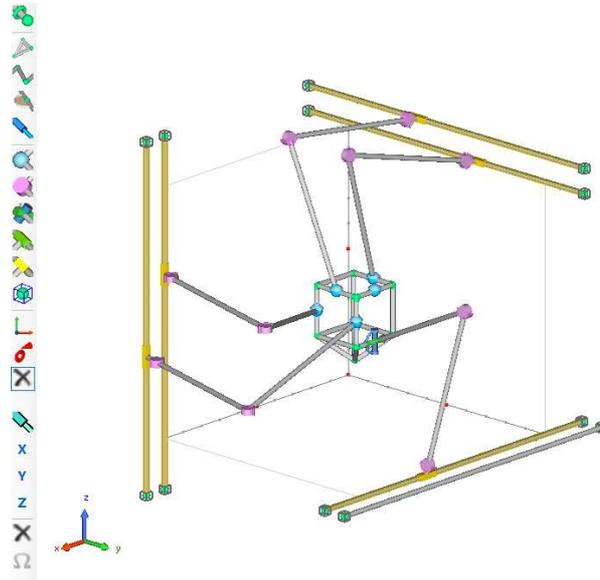


Ilustración 53. C1. Patas 1 y 2 reconfiguradas

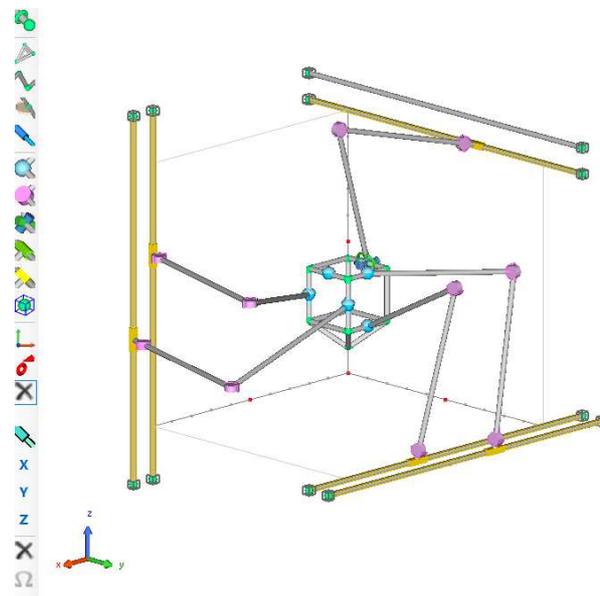


Ilustración 54. C1. Patas 3 y 4 reconfiguradas

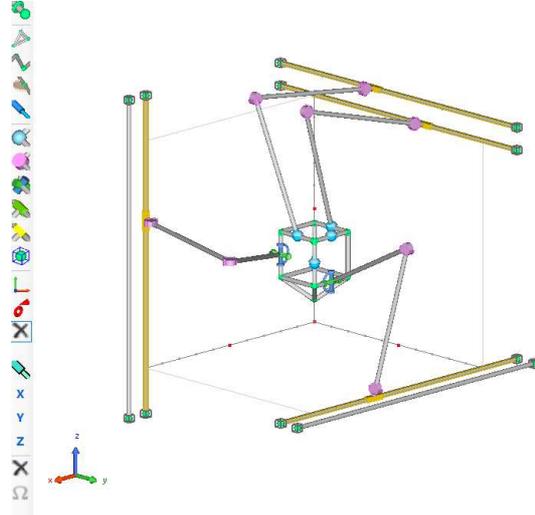


Ilustración 55. C2. Patas 1, 2, 5 y 6 reconfiguradas

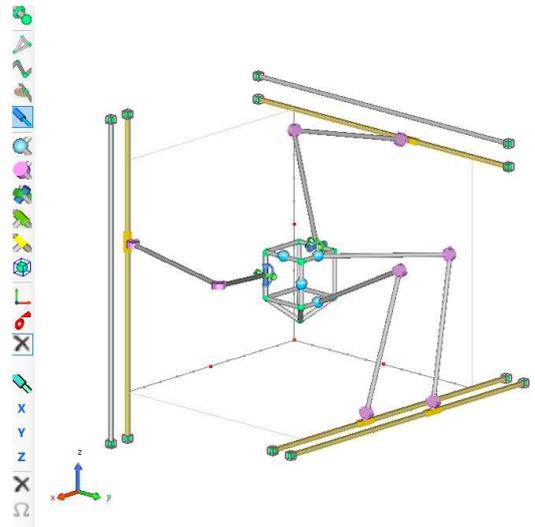


Ilustración 56. C2. Patas 3, 4, 5 y 6 reconfiguradas

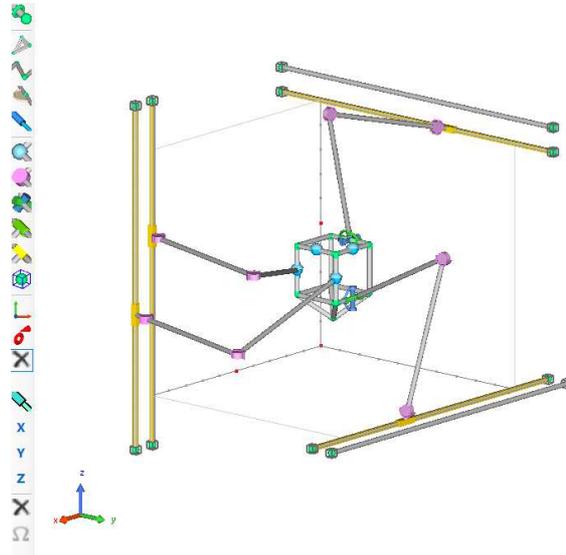


Ilustración 57. C2. Patas 1, 2, 3 y 4 reconfiguradas

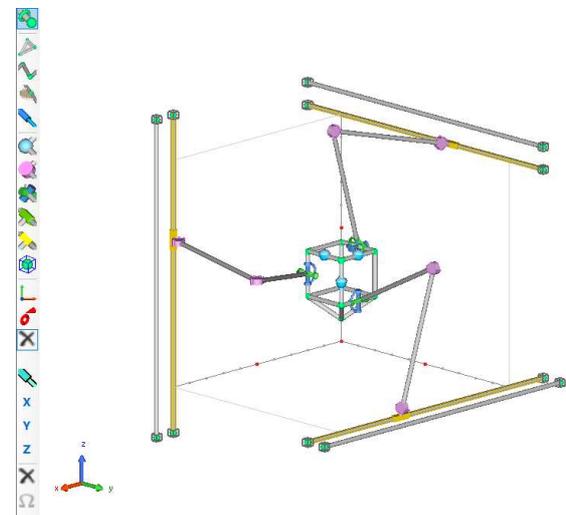


Ilustración 58. C3