

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DEL ESPACIO DE TRABAJO DE MANIPULADORES PARALELOS

Alumno/Alumna: Moreno, Estébanez, Jon

Directora: Urizar, Arana, Mónica

Curso: <2018-2019>

Fecha: 22/07/2019

Resumen trilingüe

RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio y análisis del espacio de trabajo de varios manipuladores paralelos, en concreto los robots: 5R, Delta y Stewart; además, se ha procedido a realizar una modelización de una posible aplicación para cada uno de estos robots.

El análisis se ha llevado a cabo mediante el software GIM, creado por el grupo CompMech, que permite la modelización de los manipuladores, el estudio de su cinemática y dinámica y el espacio de trabajo. El objetivo principal del proyecto es ampliar el desarrollo de los manipuladores paralelos y la optimización de su espacio de trabajo.

LABURPENA

Gradu Amaierako Lan honetan maneigailu paralelo batzuen lan espazioaren analisia eta ikerketa egin da, zehazki 5R, Delta eta Stewart robotak. Horrez gain, robot bakoitzarentzako erabil daitekeen aplikazioa modelatu egin da.

Analisisa GIM softwarearen bidez (CompMech taldeak sortuta) burutu da. Software honi esker maneigailuen ereduak egin ahal dira, baita zinematika, dinamika eta lan espazioarena ere. Lan honen helburu nagusia maneigailu paraleloen garapena gehitzea da eta lan espazioa optimizitzea ere bai.

ABSTRACT

This Final Degree Project provides the research and analysis of several parallel manipulators' working area, 5R, Delta and Stewart robots in particular. In addition, the modelling for a possible implementation for each of these robots has been carried out.

The analysis has been accomplished by using GIM software (created by CompMech group) which allows the manipulators' modelling, their kinematics, dynamics and working area's research. The main goal of this project is to expand the development of parallel manipulators and to optimize their working area.

Índice

Resumen trilingüe	2
Tabla de contenidos	5
Tablas	5
Ilustraciones	5
Memoria	7
Introducción	7
Contexto	8
Objetivos y alcance.....	9
Estructura del desglose (WBS).....	9
Beneficios del trabajo.....	10
Estado del arte	11
Introducción	11
Manipuladores paralelos.....	11
Problema cinemático inverso	12
Espacio de trabajo	12
Historia de los manipuladores paralelos	12
Aplicaciones	14
Metodología	17
Introducción	17
El manipulador paralelo 5R	17
Problema cinemático inverso	19
Análisis del espacio de trabajo	21
Aplicaciones	25
El manipulador paralelo Delta	28
El problema cinemático inverso	29
Análisis del espacio de trabajo	30
Aplicaciones	37
Manipulador paralelo Gough-Stewart.....	42
Problema cinemático inverso	44
Análisis del espacio de trabajo	45
Aplicaciones	61
Tareas y diagrama Gantt	63
Tareas.....	63

Hitos	67
Diagrama Gantt	67
Aspectos económicos	69
Análisis de riesgos	70
Conclusiones	72
Referencias	73
Anexo I: Normativa	75
Anexo II: Manual de usuario de GIM	76

Tabla de contenidos

Tablas

Tabla 1. Modos de trabajo 5R	21
Tabla 2. Tabla de las combinaciones posibles de los pares en el robot Delta	31
Tabla 3. Posibles combinaciones de los pares en la plataforma Gough-Stewart.....	47
Tabla 4. Agrupación de las combinaciones que dan lugar al mismo espacio de trabajo	47
Tabla 5. Tabla de tareas de la planificación	66
Tabla 6. Análisis económico	69
Tabla 7. Matriz probabilidad-impacto del análisis de riesgos.....	71

Ilustraciones

Ilustración 1.WBS	10
Ilustración 2. Primer diseño de Manipulador Paralelo [16]	13
Ilustración 3. Primer diseño industrial para un manipulador paralelo [5]	13
Ilustración 4. Diseño de robot para operaciones vitreo-retinales [10]	16
Ilustración 5. Manipulador paralelo 5R	18
Ilustración 6. Problema cinemático inverso 5R.....	19
Ilustración 7. Explicación de los modos de trabajo [11]	21
Ilustración 8. Workspace de los modos de trabajo 1 y 2	22
Ilustración 9.Espacio de trabajo de los modos de trabajo 1 y 2 simultaneamente.	22
Ilustración 10.Singularidad 1 del espacio de trabajo en el modo de trabajo 3	23
Ilustración 11. Posición por la que el manipulador debería reconfigurarse	24
Ilustración 12. Representación 3D del espacio de trabajo del manipulador 5R	25
Ilustración 13. Simulación impresión 3D para el robot 5R	26
Ilustración 14. Impresora 3D con robot 5R [12]	27
Ilustración 15. Manipulador paralelo Delta	28
Ilustración 16. Problema cinemático inverso Delta	29
Ilustración 17. Espacio de trabajo de la combinación 1 en el robot Delta	31
Ilustración 18. Posición final del manipulador paralelo Delta en la combinación 1	32
Ilustración 19. Posición inicial del robot Delta en la combinación de los pares 8.....	33
Ilustración 20. Posición final del robot Delta en la combinación de los pares 8.....	33
Ilustración 21. Espacio de trabajo de la combinación de los pares A	34
Ilustración 22. Espacio de trabajo del robot Delta en la combinación B	35
Ilustración 23. Inicio del choque de las barras durante el movimiento en la combinación B	36
Ilustración 24. Posición en la que termina el choque en la combinación B.....	36
Ilustración 25.Posición inicial 1º movimiento en pick and place	38
Ilustración 26.Posición final 1º movimiento en pick and place	38
Ilustración 27. Traslación del objeto, posición inicial	39
Ilustración 28. Traslación del objeto, posición final	39
Ilustración 29. Posición inicial del último movimiento	40
Ilustración 30. Posición final para dejar el objeto en su destino	40
Ilustración 31. Posición inicial del pick and place en 1 solo movimiento.....	41
Ilustración 32. Posición final del pick and place en 1 solo movimiento.....	42
Ilustración 33. Robot Delta cortesía de ABB [13]	42
Ilustración 34. Plataforma Gough-Stewart	43

Ilustración 35. Problema cinemático inverso plataforma Gough-Stewart.....	44
Ilustración 36. Espacio de trabajo A	48
Ilustración 37. Espacio de trabajo B	48
Ilustración 38. Singularidad del espacio de trabajo B	49
Ilustración 39. Espacio de trabajo C	49
Ilustración 40. Espacio de trabajo D	50
Ilustración 41. Espacio de trabajo E.....	50
Ilustración 42. Espacio de trabajo F.....	51
Ilustración 43. Singularidad 1 del espacio de trabajo F	52
Ilustración 44. Singularidad 2 del espacio de trabajo F	52
Ilustración 45. Espacio de trabajo G	53
Ilustración 46. Espacio de trabajo H.....	53
Ilustración 47. Espacio de trabajo I	54
Ilustración 48. Espacio de trabajo J	54
Ilustración 49. Espacio de trabajo K	55
Ilustración 50. Espacio de trabajo L.....	55
Ilustración 51. Espacio de trabajo M	56
Ilustración 52. Espacio de trabajo N	56
Ilustración 53. Espacio de trabajo O	57
Ilustración 54. Espacio de trabajo P	57
Ilustración 55. Espacio de trabajo Q.....	58
Ilustración 56. Singularidad espacio de trabajo Q	58
Ilustración 57. Espacio de trabajo R	59
Ilustración 58. Espacio de trabajo S.....	59
Ilustración 59. Espacio de trabajo T.....	60
Ilustración 60. Espacio de trabajo U	60
Ilustración 61. Simulador de vuelo Indra [14]	61
Ilustración 62. Modelización del despegue	62
Ilustración 63. Modelización de la estabilización tras el despegue	62
Ilustración 64. Diagrama Gantt	68

Memoria

Introducción

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como título “Estudio del espacio de trabajo de manipuladores paralelos”. Como el propio nombre del trabajo indica, el estudio se ha basado en analizar el espacio de trabajo de varios manipuladores paralelos de 2, 3 y 6 grados de libertad (GDL). Por lo tanto, se ha realizado un estudio de la cinemática de cada manipulador. De forma que se han estudiado cada uno de los modos de trabajo posibles, cuyo número es función del número de GDL del propio manipulador.

Un manipulador paralelo consiste en una cadena cinemática cerrada que posee una plataforma fija y una plataforma móvil. Los actuadores se encuentran conectados con el elemento fijo, y pueden llegar de forma directa o a través de pares pasivos hasta el elemento móvil. Son más rígidos que los brazos robóticos por lo que pueden soportar cargas más elevadas, además, debido a su estructura cinemática pueden obtener mayor precisión con unas velocidades y aceleraciones superiores.

El espacio de trabajo de un manipulador paralelo es la zona del espacio que el punto terminal, o el elemento móvil, del manipulador puede alcanzar. Para poder determinarlo se deben considerar las soluciones del problema cinemático inverso que nos dan las posibles singularidades que puede llegar a tener el manipulador, también hay que cuenta las posibles colisiones que puede haber entre los elementos del propio manipulador.

En primer lugar, se ha expuesto el contexto del trabajo de forma que pueda ubicarse el estudio. Después se ha tratado de desarrollar los objetivos y el alcance del propio trabajo. Así, se han podido analizar también los beneficios que puede traer el trabajo.

A continuación, se ha realizado un estudio del estado del arte de los manipuladores paralelos. Aquí, se describen los manipuladores paralelos con sus características, ventajas y desventajas más importantes, realizando también una comparativa con los manipuladores serie.

Tras el desarrollo del estado del arte, se ha desarrollado el estudio de cada uno de los manipuladores paralelos que han sido objeto de estudio. En primer lugar, se ha realizado una breve descripción de cada uno de ellos, también se han planteado las ecuaciones del problema cinemático inverso y posteriormente se ha realizado el estudio del espacio de trabajo a través del software GIM, dentro de los módulos *Kinematics* y *Workspace*. Por último, se ha alguna de las posibles aplicaciones que podría tener cada uno y se ha modelizado también en GIM como sería el espacio de trabajo del manipulador en ese caso. Los manipuladores estudiados son: 5R, Delta y Gough-Stewart.

El trabajo termina con una serie de conclusiones en las que se valoran las posibles ventajas y desventajas que pueden tener este tipo de robots.

Contexto

El trabajo se basa en el estudio de la cinemática de varios manipuladores paralelos, teniendo como objetivo el estudio del espacio de trabajo de cada uno de ellos. Este estudio se ha realizado a través de un software informático, pero también se han tratado de deducir las fórmulas y las soluciones del problema cinemático inverso para cada manipulador.

El estudio del espacio de trabajo se ha realizado a través del programa GIM, software informático desarrollado por el grupo de investigación CompMech perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. El programa permite: crear los modelos a través del módulo '*Geometry*', simular todos los movimientos y obtener las características cinemáticas en el módulo '*Kinematics*', en el cual también se ha realizado un estudio del espacio de trabajo aproximado a través del comando '*Swept*' para los manipuladores paralelos espaciales. También existe el módulo '*Workspace*', en el que se puede realizar únicamente el estudio del espacio de trabajo. Y, por último, está el módulo '*Dynamics*', que no ha sido utilizado, pero puede ser de gran utilidad para realizar el análisis dinámico de los manipuladores.

Este grupo CompMech es un grupo de investigación creado por varios miembros del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco, su ámbito de trabajo se sitúa dentro del campo de la teoría de Máquinas, Mecanismos y de la Robótica. En este grupo se ha creado el software GIM como se ha mencionado anteriormente y además, hay varias líneas de investigación en torno al estudio de los manipuladores paralelos.

Los manipuladores paralelos tienen un gran abanico de aplicaciones, este es el motivo por el cual se ha elegido realizar un estudio en torno a ellos. Éstos presentan varias ventajas respecto a los manipuladores serie, pero son menos utilizados. Por eso es interesante realizar un estudio de los mismos, con el objetivo de optimizar su espacio de trabajo para que sean utilizados con más normalidad.

Además, en estos tiempos nos situamos en lo que se podría denominar una cuarta revolución industrial (Industria 4.0), en la que se está buscando como llegar a la mayor automatización posible dentro el ámbito industrial. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio en torno a los manipuladores, ya que permiten una mayor automatización, mayor velocidad en los procesos y mayor precisión, lo que beneficia a la propia Industria 4.0.

Objetivos y alcance

Los objetivos principales del trabajo son ampliar el desarrollo de los manipuladores paralelos y el estudio y optimización del espacio de trabajo de manipuladores paralelos de 2, 3 y 6 grados de libertad de forma que se pueda llegar a optimizar el mismo y poder hacer un uso más amplio de este tipo de manipuladores tanto en la industria como en usos médicos o biomédicos.

En primer lugar, se ha seleccionado un robot de 2 GDL, en este caso el manipulador paralelo 5R, ya que es uno con un gran desarrollo en la industria y tiene un gran número de aplicaciones. Primero se ha realizado una breve descripción de este robot, se ha planteado la solución del problema cinemático inverso, se ha hecho un estudio del espacio de trabajo mediante el módulo *'Workspace'* de GIM y por último se ha modelizado una posible aplicación de este robot: la impresión 3D.

En segundo lugar, se ha realizado el mismo estudio con un robot de 3 GDL: el manipulador paralelo Delta. Éste tiene también una amplia gama de operaciones posibles, pero se ha seleccionado el desarrollo de una de las más populares: *'pick & place'*, que consiste en el traslado de piezas u objetos de una sección a otra. En este caso el estudio del espacio de trabajo se ha llevado a cabo a través del módulo *'Kinematics'*, mediante el cual es posible hacerse una idea del espacio de trabajo aproximado de cada modo de trabajo.

Por último, se ha estudiado un robot de 6 GDL, el manipulador paralelo Gough-Stewart, que tiene un espacio de trabajo más reducido, pero también tiene muchas aplicaciones. Se ha seleccionado la modelización para un simulador de vuelo, ya que es el uso para el que está optimizado. En este manipulador el estudio del *'Workspace'* trabajo también se ha realizado mediante el módulo de trabajo *'Kinematics'*, y cabe destacar la dificultad para el estudio debido a el número tan alto de modos de trabajo que posee el manipulador (64). Por eso, se ha tratado de agrupar modos de trabajo entre sí, para que pueda ser apreciado de una forma más sencilla y comprensible.

Estructura del desglose (WBS)

El diagrama WBS se trata de un organigrama en el que se representan las actividades que se han llevado a cabo para la selección del manipulador, su estudio y la modelización de una aplicación.

El WBS es una forma de organizar y definir los objetivos y el alcance del trabajo, de forma que permite identificar cuáles son los *'Paquetes de trabajo'* del estudio o de cualquier proyecto.

En este trabajo, los paquetes de trabajo principales son el estado del arte y cada uno de los robots seleccionados. Los secundarios hacen referencia al desarrollo del estado del arte de los manipuladores paralelos y a los robots que finalmente han sido estudiados. Por último, se encuentra el estudio del problema inverso, del espacio de trabajo y de las aplicaciones.

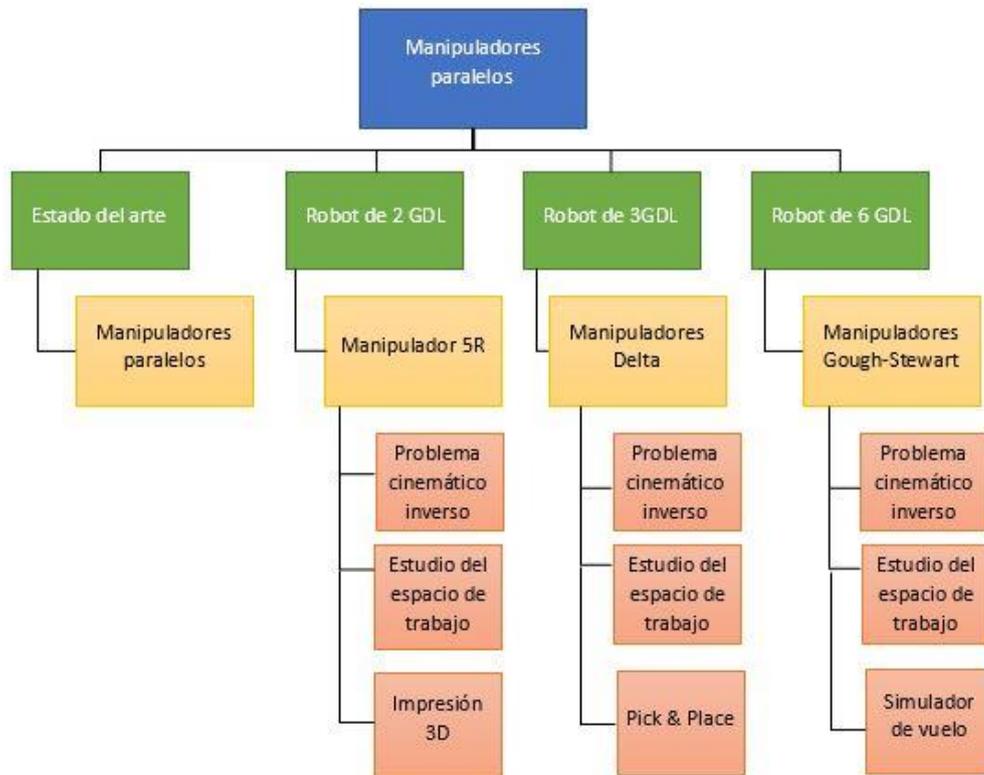


Ilustración 1.WBS

Beneficios del trabajo

Los manipuladores paralelos son unas máquinas que pueden ser de gran utilidad en un gran número de aplicaciones, desde su utilización en la industria para máquinas de mecanizado, para operaciones de pick and place o para la impresión 3D que se encuentra en auge.

También tienen es aplicable para usos médicos, por ejemplo, en los últimos años se ha desarrollado un robot para su uso durante operaciones quirúrgicas, por otra parte, también pueden ser utilizados como prótesis, un caso en el que los actuadores se conectarían a través de los propios tendones y músculos en lugar de utilizar un actuador.

Por otra parte, también tienen una aplicación aeronáutica en los simuladores de vuelo que sirven para que los pilotos puedan entrenar y se pueda comprobar si la electrónica diseñada para el avión está correctamente diseñada.

Por lo tanto, el estudio del espacio de trabajo de estos manipuladores beneficia al desarrollo de los mismos y a la posibilidad de considerar nuevas aplicaciones, ya que es un campo sobre el cual hay un número considerable de investigaciones, pero aún queda un gran espacio de conocimiento que cubrir.

Los manipuladores paralelos también amplían el desarrollo de la Industria 4.0, ya que ayudan a la automatización de los procesos, de forma que la mano de obra humana disminuye. Además, estos permiten que las operaciones se realicen de una forma más rápida y, aún más importante, más precisa. Esto se traduce en un aumento de la capacidad de producción y también en una producción con un número más reducido de defectos. Por lo tanto, esto también lleva a un aumento de los beneficios.

Teniendo en cuenta este aspecto desde un punto de vista social, se genera una desventaja importante. Esto se debe a que, si se aumenta la automatización en las fábricas, el número de operarios disminuye. Es cierto que desde una perspectiva económica beneficia a la empresa porque hace bajar a los costes, pero esto haría aumentar el desempleo de la población. Por eso, las empresas que decidan implantar este tipo de medidas también deberían tener en cuenta el impacto social de su decisión.

Estado del arte

En este apartado denominado 'Estado del arte' se pretende realizar una investigación sobre cómo se ha tratado el objeto del estudio en otras investigaciones y en qué situación se encuentra en este momento.

Introducción

Un manipulador es una estructura mecánica que funciona mediante un control por ordenador para llevar a cabo la realización de una tarea. Estos robots han llegado a utilizarse en un gran número de aplicaciones, desde ámbitos industriales hasta médicos y de ocio.

Manipuladores paralelos

Un manipulador paralelo es un tipo particular de mecanismo que consiste en una cadena cerrada con varios grados de libertad en la que cada actuador se apoya en el elemento fijo y se conecta con una plataforma o elemento móvil. Al menos tiene dos cadenas cinemáticas independientes. [1]

Comparándolos con los robots serie, se puede decir que al ser más rígidos pueden soportar cargas superiores. Además, debido a su estructura cinemática pueden alcanzar más precisión y una capacidad de movimiento mayor, haciendo referencia a la velocidad y a la aceleración.

Los robots serie son un tipo de mecanismo espacial que derivan de una cadena cinemática abierta. Se denominan robots serie porque sus elementos están conectados en serie por pares generalmente de clase I (de rotación o prismáticos). Popularmente son conocidos como brazos mecánicos por su aspecto similar al brazo humano.

Es cierto que los manipuladores paralelos tienen una serie de ventajas en comparación con los robots serie, pero la desventaja más significativa es que el espacio de trabajo de un manipulador paralelo generalmente es muy reducido en comparación con los otros.

Además, su cinemática es más compleja y la calibración aún no ha sido capaz de resolverse de una forma satisfactoria. [2]

Problema cinemático inverso

El problema cinemático inverso tiene como objetivo hallar los valores que debe adoptar cada grado de libertad para que el punto terminal que sitúe y se oriente en una determinada localización. La resolución de este problema es algo básico para el control de los manipuladores paralelos.

A la hora de obtener las ecuaciones del problema cinemático inverso se puede observar que estas dependen fuertemente de la configuración del robot. A pesar de esto, la mayoría de manipuladores tienen una cinemática simple que no dificulta en exceso el planteamiento de las ecuaciones. [3]

Espacio de trabajo

Las soluciones del problema cinemático inverso nos llevan a la definición del espacio de trabajo, el objeto de estudio de este trabajo. Como ya se ha mencionado anteriormente, el estudio de esta región es de alto interés por lo reducido que es en comparación con los manipuladores serie.

Este espacio de trabajo puede definirse como la región del espacio accesible al elemento terminal del manipulador. El cálculo de esta región es una tarea necesaria para la resolución del problema de posición de los robots. [2]

Generalmente, el espacio de trabajo de los manipuladores paralelos se ve restringido por [4]:

- Limitaciones en los actuadores
- Limitaciones en las juntas pasivas durante el rango de movimiento
- Interferencias entre los elementos del manipulador

Historia de los manipuladores paralelos

El primer diseño de un manipulador paralelo no se trató de un invento enfocado a un uso industrial para la fabricación, si no que fue diseñado para el entretenimiento por James E. Gwinnett en 1928 y patentado en Estados Unidos en 1931. Este dispositivo posee una arquitectura en la que cada cadena cinemática restringe el movimiento del elemento móvil, de forma que el movimiento es de tipo esférico.

En la siguiente imagen se muestra este primer diseño obtenido de esta primera patente US Patent No. 1,789,680. [16]

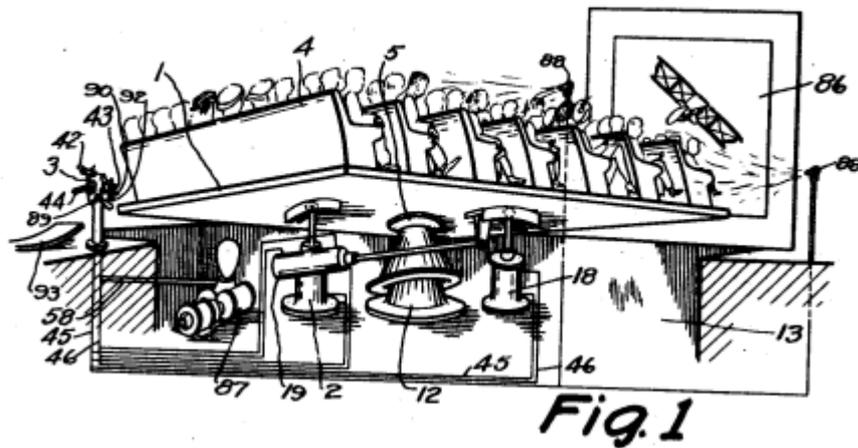


Ilustración 2. Primer diseño de Manipulador Paralelo [16]

Aproximadamente una década más tarde, se realizó el que se considera como el primer manipulador paralelo enfocado para una aplicación industrial. Este diseño fue realizado por Willard L. V. Pollard y lo inventó con el objetivo de automatizar las operaciones de pintado con spray, pero finalmente nunca llegó a construirse. En la siguiente imagen se muestra este primer diseño obtenido de Pollard, W.L.G., "Spray painting machine," US Patent No. 2,213,108, August 26, 1940 [5]

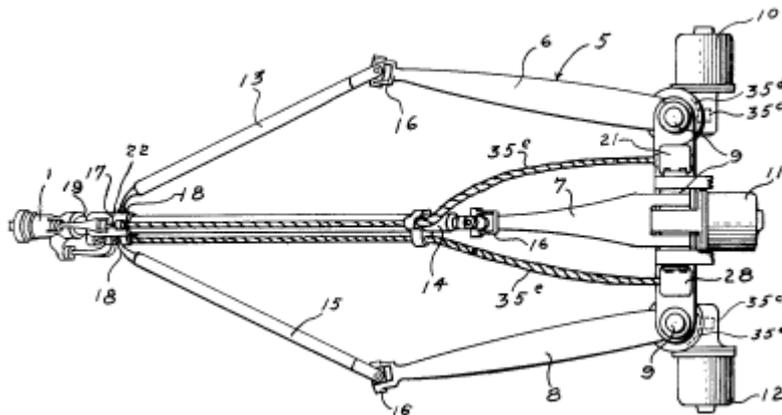


Ilustración 3. Primer diseño industrial para un manipulador paralelo [5]

En 1947 se creó el robot que se convirtió en el más popular y el que mayor reconocimiento ha obtenido en el ámbito de los manipuladores paralelos: la plataforma Gough. Es una plataforma de tipo octaedro hexápodo con lados de longitud variable. El sistema se creó para probar mecánicamente los neumáticos aplicándoles cargas combinadas. [6]

En 1967, a partir del manipulador creado por Gough, Cappel realizó un desarrollo para optimizar la plataforma para las simulaciones de vuelo, no solo para el aterrizaje o el

despegue, si no para la simulación de la totalidad del vuelo. Por esto, este robot está optimizado para la simulación de vuelo y lo utilizan empresas como Airbus o Boeing. [7]

Debido a la gran importancia que tienen estos manipuladores dentro de la industria y el gran desarrollo que se les ha dado, ha sido uno de los manipuladores seleccionados para realizar el estudio.

Varios años más tarde, hacia los años 80, Reymond clavel, profesor de la École Polytechnique Fédérale de Laussane diseño una estructura de tres grados de libertad con una estructura paralela a partir de paralelogramos. A este robot lo nombró robot DELTA. El diseño permite que la salida tenga una orientación fija con respecto a la entrada, debido a los paralelogramos la orientación de la plataforma móvil queda restringida y solo puede desplazarse a través de los tres ejes cartesianos. [8]

Aplicaciones

Los manipuladores paralelos, gracias a las ventajas que proveen, pueden ser utilizados en una amplia gama de operaciones. En este apartado, las aplicaciones seleccionadas harán referencia a procesos industriales.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la primera aplicación para la que fue concebido el primer manipulador paralelo fue para crear una plataforma destinada al ocio y al entretenimiento.

Años más tarde se diseñó el primer robot paralelo con aplicaciones industriales, con la finalidad de automatizar el proceso de pintura con spray. Fue patentado, pero jamás llegó a ser construido. Y como ya se ha dicho, poco después el ingeniero Gough inventó una plataforma para la realización de ensayos a neumáticos y poco a poco fue desarrollándose su plataforma para una gran cantidad de aplicaciones.

La aplicación más conocida de los manipuladores paralelos es la simulación de vuelo, además hay un gran número de estudios en torno a la plataforma Gough para esta aplicación y además se ha conseguido optimizar el robot al máximo para llevar a cabo este proceso.

Tras la simulación de vuelo, la aplicación más conocida y desarrollada es la operación de 'pick and place'. El primer robot que se constituyó para esta aplicación fue el robot DELTA, el cual ha sido seleccionado para hacer el estudio del espacio de trabajo. Este manipulador fue creado con el objetivo de manipular objetos de poco peso a muy altas velocidades.

Un manipulador DELTA permite posicionar el elemento terminal en el punto y con la orientación deseada, por eso es de gran interés para esta aplicación. Una de las ventajas que aporta este manipulador es que incorpora la posibilidad de incorporar un grado de libertad más, además del de los actuadores, en la plataforma móvil. Esto aporta mayor

libertad de movimiento para poder situar el objeto o la pieza que está siendo manipulada en el lugar exigido con la orientación deseada.

Más allá de las aplicaciones de ‘pick and place’, el robot DELTA es ampliamente utilizado en la industria de empaquetado, en el manejo de células fotovoltaicas, manejo de instrumentos quirúrgicos o corte por láser.

Otra de las aplicaciones más destacadas de los manipuladores paralelos es su implementación en los centros de mecanizado. Esto se debe a que presentan una ventaja respecto los robots serie, y es que cada “pierna” trabaja a tracción o compresión, de forma que no se ven sometidas a un momento flector, al contrario de los robots serie. Esto ayuda a mecanizar con mayor precisión piezas de mayor dureza. Pero se le resta mucha capacidad al espacio de trabajo del manipulador, por eso, se están desarrollando manipuladores híbridos serie-paralelos con el objetivo de encontrar un equilibrio de todas las ventajas y propiedades que ofrece cada dispositivo individualmente.

Por último, en los últimos tiempos se está observando una tendencia a la implementación de la robótica en la cirugía, ya que se aumenta la precisión del cirujano y se elimina el movimiento errático del pulso de la mano. Actualmente solo se puede encontrar en el mercado un robot: el sistema Da Vinci, que se trata de un robot serie que consta de varios brazos mecánicos. Pero hay varias investigaciones abiertas en torno a la aplicación de los manipuladores paralelos. [9]

Uno de estos desarrollos es un robot de 6 grados de libertad basado en una plataforma Gough que permite una precisión micrométrica para operaciones vitreo-retíneas. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de estos robots. [10]



Ilustración 4. Diseño de robot para operaciones vitreo-retinales [10]

Metodología

Introducción

En este apartado se va a realizar el análisis del espacio de trabajo de varios manipuladores paralelos. Para ello, en un primer lugar se explicará la cinemática del robot seleccionado y después el análisis se centrará en el objeto del estudio: el espacio de trabajo. Para ello, primero se plantean las soluciones del problema cinemático inverso que se utiliza para poder calcular matemáticamente el espacio de trabajo.

Por último, se realizará la modelización de una aplicación práctica de cada uno de los manipuladores. Además, también se hará un estudio del espacio de trabajo y del movimiento de cada una de las aplicaciones

El manipulador paralelo 5R

En primer lugar, se va a estudiar el manipulador paralelo 5R debido a que es un mecanismo plano, lo que facilita el estudio de su espacio de trabajo. Además, es un mecanismo de solo dos grados de libertad, y es de mayor facilidad para el estudio al tener únicamente cuatro modos de trabajo. Otra razón de peso es que se trata de un robot con un amplio uso en la industria y con una gran serie de aplicaciones.

El manipulador paralelo 5R es un mecanismo plano de dos grados de libertad en el que todos los pares son de rotación y se mueve en el plano X-Y. Está compuesto por 5 barras, en este caso una de las barras es el sistema fijo dónde se sitúan los motores del actuador.

Los actuadores se sitúan en los puntos A_1 y A_2 , de forma que las variables de entradas serían los ángulos θ_1 y θ_2 . Los pares ubicados en B_1 , B_2 y P son pasivos. Las variables de salida son las coordenadas x e y del punto P, el elemento terminal. En la siguiente figura se muestra un manipulador paralelo 5R modelo simétrico.

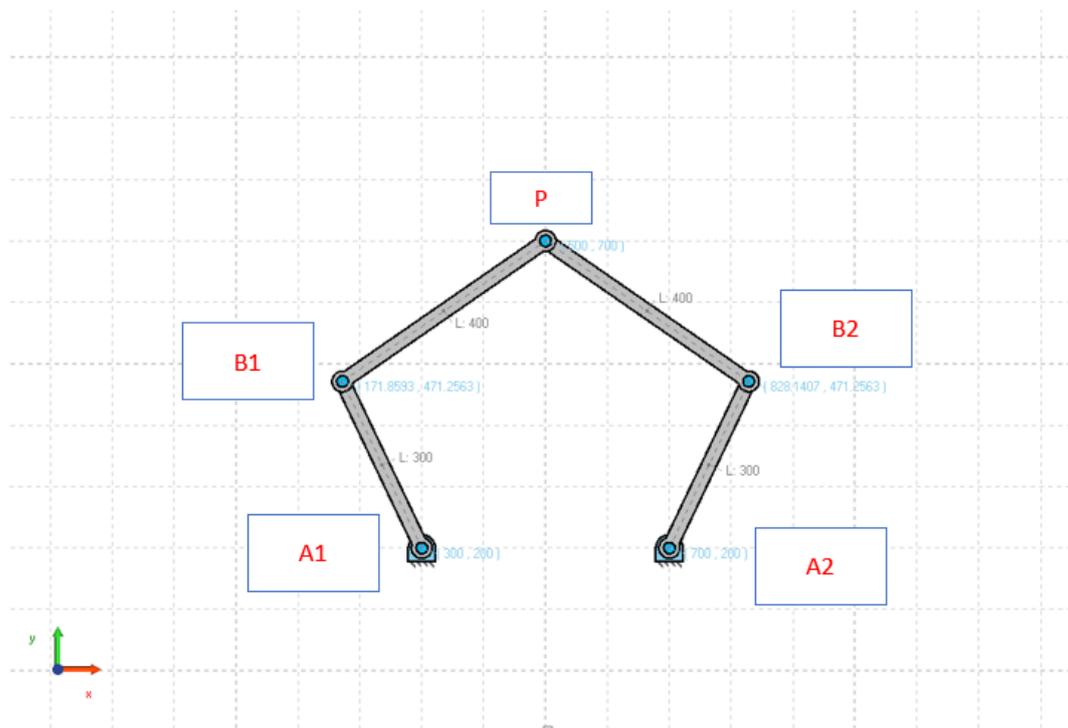


Ilustración 5. Manipulador paralelo 5R

Problema cinemático inverso

El objetivo del trabajo es poder alcanzar un espacio de trabajo máximo. Para poder conseguir esto es necesario estimar como va a ser dicho espacio de trabajo, para ello se deben desarrollar las ecuaciones de la cinemática inversa.

La cinemática inversa es básica para poder calcular el espacio de trabajo, ya que a través de las soluciones del mismo podemos obtener los puntos que forman las singularidades de tipo 1. Éstas se alcanzan cuando A_1B_1 es paralelo a B_1P , o bien cuando A_2B_2 es paralelo a B_2P , es decir, cuando se alinean las barras. A través de estas singularidades podemos delimitar el espacio de trabajo del manipulador.

Además, cualquier transición del punto P de un modo de trabajo a otro implica que dicho punto pasará a través de una de estas singularidades.

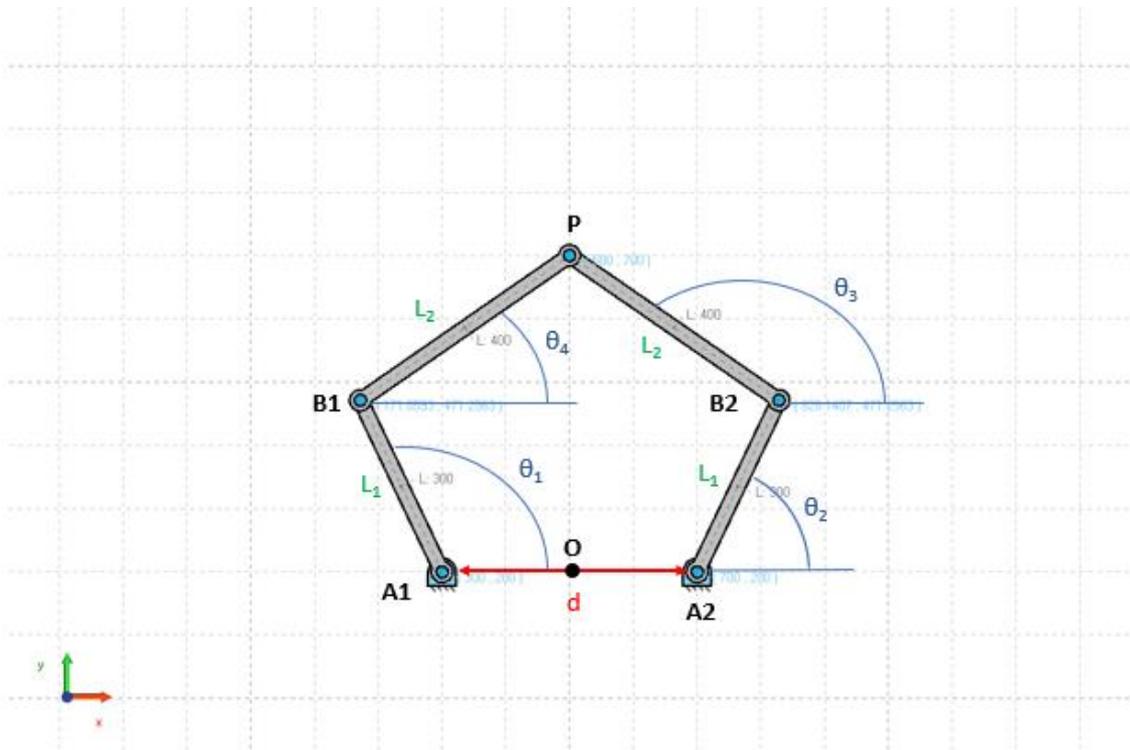


Ilustración 6. Problema cinemático inverso 5R

A la hora de plantear las ecuaciones, se supone que las barras son rígidas y que las uniones de los pares son ideales, además en este caso las distancias A_1B_1 y A_2B_2 son la misma, al igual que B_1P y B_2P . Se parte de dos ecuaciones [1] y [2] del lazo cerrado definidas por:

$$OP=OA_1+A_1B_1+B_1P$$

Ecuación 1

$$OP=OA_2+A_2B_2+B_2P$$

Ecuación 2

Desarrollando la ecuación para poder resolver el problema de posición obtenemos las ecuaciones [3] y [4] que plantea los lazos:

$$x = l_1 \cos(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_3) + d/2$$

Ecuación 3

$$y = l_1 \sin(\theta_2) + l_2 \sin(\theta_3)$$

Ecuación 4

Las variables que realmente interesa conocer son θ_1 y θ_2 , ya que es donde van colocados los actuadores del manipulador. De forma que se ha de simplificar la ecuación para dejarla solo en función de θ_2 , por tanto, sumamos ambas ecuaciones y elevamos la ecuación resultante al cuadrado de forma que podemos despejar θ_2 prescindiendo de θ_3 a través de la relación trigonométrica: $\cos^2(\theta_3) + \sin^2(\theta_3) = 1$. Por tanto, la ecuación resultante depende solo de las variables: x , y , θ_2 . De esta forma, se puede calcular el valor del ángulo θ_2 despejando la ecuación [5].

$$x^2 + y^2 + d^2/4 - dx + l_1^2 + (dl_1 + 2xl_1) \cos(\theta_2) - 2yl_1 \sin(\theta_2) - l_2^2 = 0$$

Ecuación 5

Siguiendo el mismo procedimiento se llega a obtener la ecuación [6] dependiente únicamente de las variables: x , y , θ_1 . Por lo que también se puede obtener a partir de ahí el valor del ángulo θ_1 correspondiente al otro actuador.

$$x^2 + y^2 + d^2/4 - dx + l_1^2 - (dl_1 + 2xl_1) \cos(\theta_1) - 2yl_1 \sin(\theta_1) - l_2^2 = 0$$

Ecuación 6

Análisis del espacio de trabajo

A la hora de estudiar el espacio de trabajo del manipulador hay que tener en cuenta todos los modos de trabajo que puede tener. En este caso, como hay dos actuadores rotacionales hay cuatro posibles modos de trabajo: + +, - -, + -, - +. Es decir, existen 4 posibles configuraciones de los pares pasivos, que hace referencia a las 4 posibles soluciones del problema cinemático inverso, como puede comprobarse en la imagen siguiente. [11]

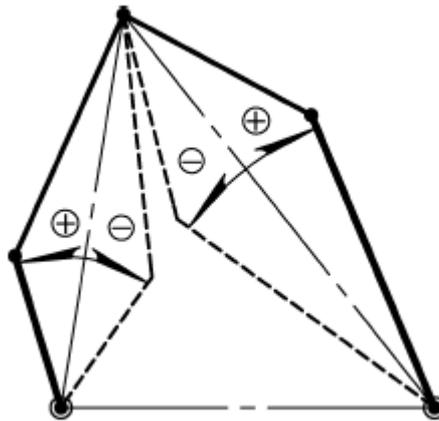


Ilustración 7. Explicación de los modos de trabajo [11]

Para este robot se ha llevado a cabo el estudio a través del módulo Workspace de el programa GIM, que es un módulo distintivo en el que se muestra el espacio de trabajo del manipulador y se puede observar de forma visual a que zonas del espacio puede llegar el manipulador sin tener que reconfigurar sus juntas.

En el caso del manipulador 5R, podemos observar que al poseer tan solo 2 GDL, el espacio de trabajo de los modos de trabajo 1 y 2 será simétrico y por tanto el de los modos de trabajo 3 y 4 también. En la tabla adjunta se representan los modo de trabajo en el que se puede encontrar el manipulador.

Modo de trabajo	Par 1	Par 2
1	+	+
2	-	-
3	+	-
4	-	+

Tabla 1. Modos de trabajo 5R

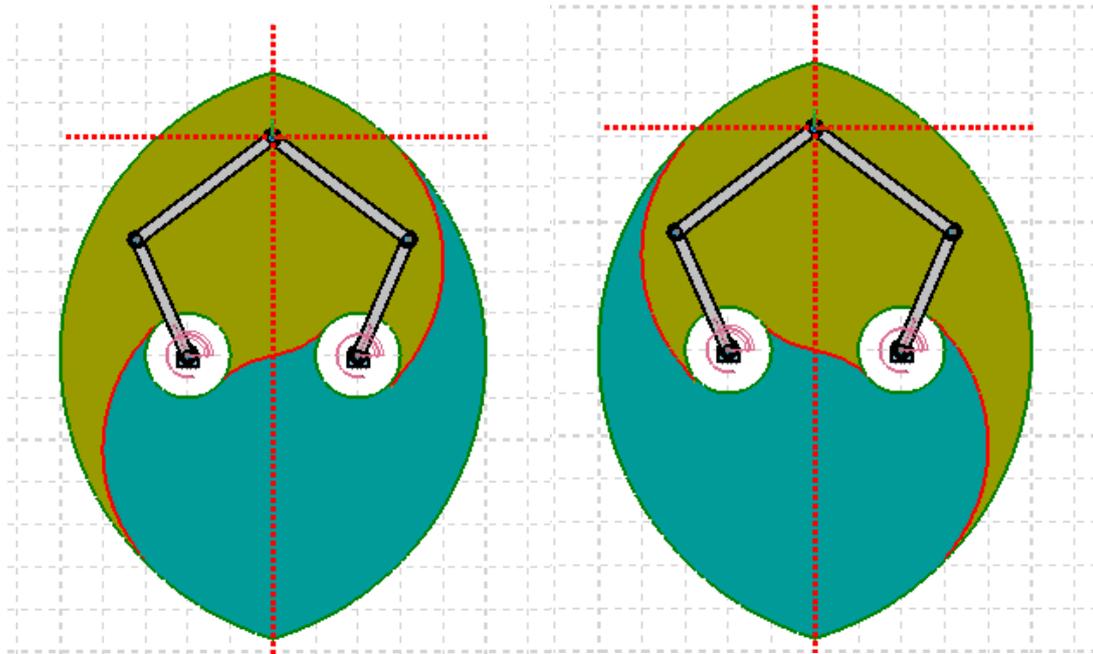


Ilustración 8. Workspace del modo de trabajo 1

Además, esta opción también nos permite mostrar la combinación de los espacios de trabajo de varios modos de trabajo simultáneamente. De esta forma, podemos hacernos la idea de cómo se va a comportar el manipulador en función de los modos de trabajo en los que los podemos utilizar y a que zonas del espacio podemos acceder sin que sea necesario realizar una reconfiguración de sus juntas.

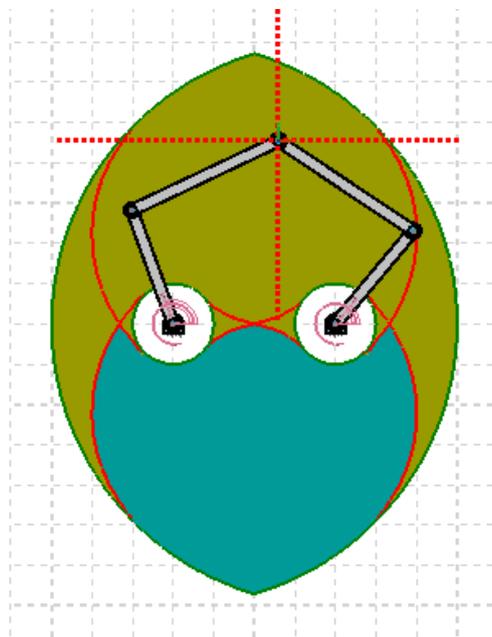


Ilustración 9. Espacio de trabajo de los modos de trabajo 1 y 2 simultáneamente.

La curva de color verde nos marca propiamente el espacio de trabajo del manipulador, es decir, es el lugar geométrico de los puntos en los que el manipulador posee singularidades del problema cinemático inverso. Como muestra de visión gráfica, en la siguiente figura se ve como se realiza la iteración de los puntos al formar curva, en este caso se observa la alineación de las barras 1 y 2 del manipulador y como el robot no puede llegar a un punto exterior de la zona de trabajo.

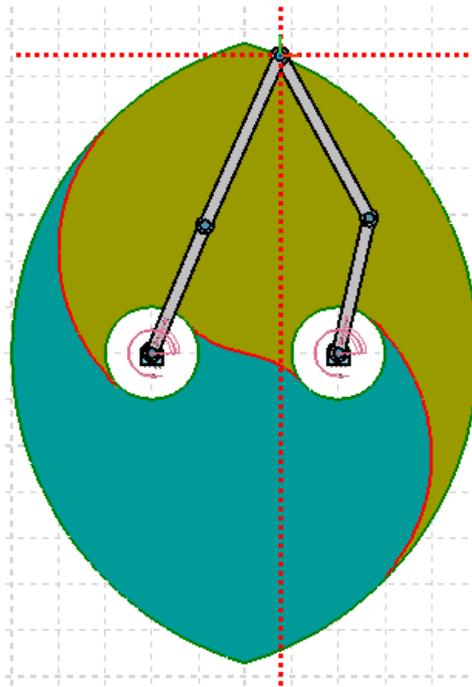


Ilustración 10. Singularidad 1 del espacio de trabajo en el modo de trabajo 3

Por otra parte, se puede observar también una curva de color rojo. A diferencia de la anterior, que nos delimita los puntos del espacio a los que no puede llegar el robot, esta se encuentra dentro del propio espacio de trabajo. Esta curva representa el lugar geométrico de los puntos que pertenecen al espacio de trabajo pero que, para poder desplazarse de la zona coloreada en azul a la zona amarilla, el manipulador debe ser reconfigurado. Es decir, el manipulador no puede pasar directamente de una zona a otra sin hacer un cambio en su configuración.

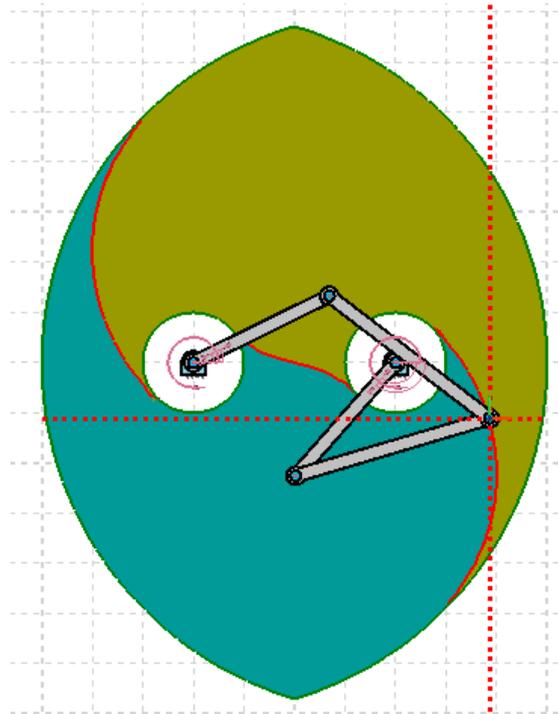


Ilustración 11. Posición por la que el manipulador debería reconfigurarse

El manipulador paralelo 5R es un robot que solo tiene la posibilidad de realizar un movimiento plano, por eso su espacio de trabajo se encuentra en el mismo plano. Pero el módulo Workspace nos da una herramienta extra para poder analizarlo, de forma que se puede observar la distribución del espacio de trabajo en tres ejes cartesianos. En estos se definen las variables de entrada: los ángulos θ_1 y θ_2 desde -180° hasta 180° , así podemos ver en qué posición se encuentra el manipulador. En el tercer eje se puede observar la variable X del punto terminal o bien la variable Y. De esta forma podemos mover el punto terminal P a lo largo del espacio de trabajo y observar en qué situación del espacio se va a encontrar.

En este módulo también podemos superponer los espacios de trabajo de los 4 diferentes espacios de trabajo que disponemos.

En el caso que se va enseñar se ve la situación de los actuadores, la posición en el eje X del punto terminal P en caso de seleccionar los modos de trabajo 1 y 4 (++ y --). También podemos observar al igual que en el módulo anterior las curvas verde y roja que delimitan el espacio de trabajo y la zona en la que habría que reconfigurar las juntas porque no se puede acceder de forma continua, que separa las zonas sombreadas en azul y amarillo.

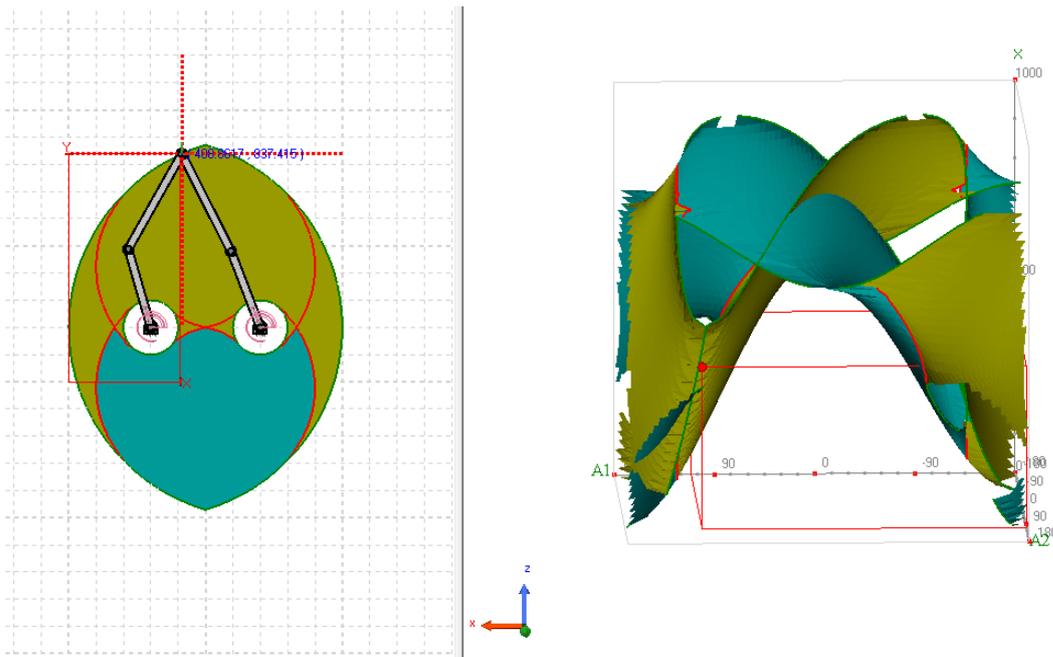


Ilustración 12. Representación 3D del espacio de trabajo del manipulador 5R

Aplicaciones

El manipulador paralelo 5R es ampliamente utilizado en la industria, ya que posee unas muy buenas propiedades, por ejemplo, puede trabajar a altas velocidades con una alta precisión y, además, es barato de construir.

Como aplicación para este tipo de manipulador paralelo se ha elegido su implementación en una impresora 3D, ya que el robot responde a las exigencias que puede tener una máquina de este tipo: precisión, estética, acabado, economía, fácil manejo y adaptabilidad.

Una impresora 3D es una máquina capaz de realizar piezas tridimensionales a partir de un diseño previo realizado por ordenador. Hoy en día la impresión 3D es una tecnología que está en auge y se está implementando su uso en numerosos sectores, desde la industria de la automoción hasta en la medicina, ya que la impresión 3D permite adaptar cada pieza a las características exactas de cada paciente en el uso de prótesis tanto dentales como articulares. Además, está comenzando a utilizarse también en la construcción de forma más rápida y económica.

Para poder utilizar este manipulador en la impresión 3D habría que implementar unos actuadores que permitieran el movimiento del manipulador en el eje Z, ya que una impresora 3D no trabaja únicamente en el plano, por lo tanto, aumenta el número de grados de libertad del mecanismo. Por otra parte, habría que incluir también la salida del extrusor en el punto terminal P.

Por tanto, para modelizar en GIM el manipulador paralelo a utilizar en la impresión 3D habría que utilizar un sistema espacial y añadir un elemento en el punto terminal, este elemento haría referencia al extrusor y los carriles por los que se trasladaría el propio manipulador sobre el eje Z, para poder acceder a las 3 dimensiones. El espacio de trabajo del manipulador sería el mismo que se ha calculado en el plano, pero distribuido a lo largo de todo el eje Z. En la siguiente figura se muestra como ejemplo la modelización en GIM, de forma que también se muestra en azul la trayectoria que seguiría el punto terminal y el en verde la superficie que barrería el elemento que hace referencia al extrusor.

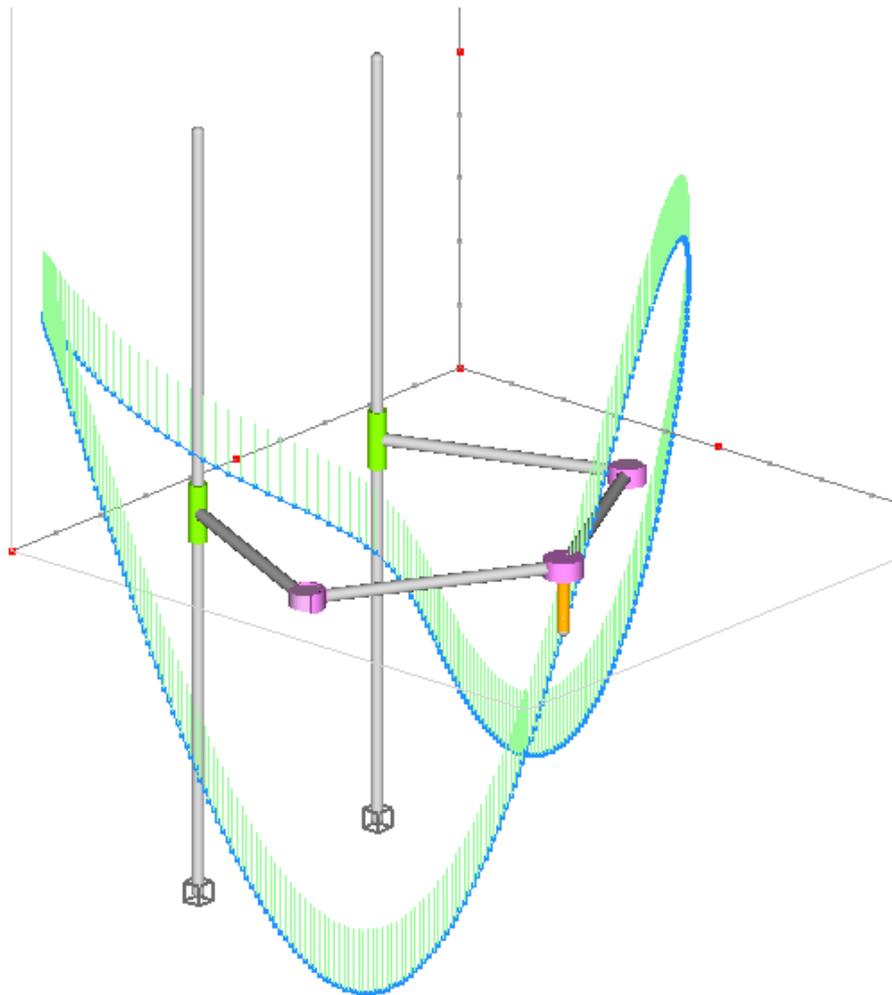


Ilustración 13. Simulación impresión 3D para el robot 5R

En la siguiente imagen se muestra la implementación de este manipulador para el diseño de una impresora 3D por parte de la Universidad de Pamplona, Colombia. [12]

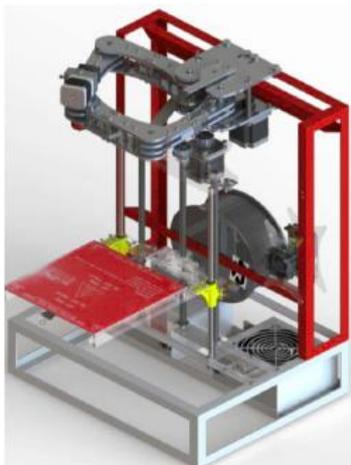


Ilustración 14. Impresora 3D con robot 5R [12]

El manipulador paralelo Delta

Se va a proceder al estudio del espacio de trabajo de manipuladores paralelos espaciales, de forma que el número de grados de libertad aumenta y, en consecuencia, la complejidad del estudio del movimiento. En primer lugar, se va a estudiar el robot Delta, ya que es un robot con un gran número de aplicaciones dentro de toda la industria.

El robot Delta fue desarrollado a lo largo de la década de 1980 por Reymond Clavel en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suiza. Por eso, debido a su amplia historia es un robot con un gran número de estudios. [8]

Un manipulador paralelo Delta es un mecanismo de tres grados de libertad compuesto por varias cadenas cinemáticas cerradas en una plataforma móvil final. La base fija y la base móvil se unen a través de estas cadenas cinemáticas y son simétricas entre sí, lo que simplifica el estudio. La particularidad del robot Delta es que esta unión se realiza mediante 3 “piernas” donde cada una de ellas presenta un mecanismo de paralelogramo que permite balancear el centro de gravedad de cada una de ellas.

Todos los pares son de rotación, los tres pares de la plataforma fija corresponden a los actuadores (A_1 , A_2 , A_3) y el resto son pares pasivos. En la siguiente figura se muestra la modelización en GIM, se ve que las plataforma fija y móvil son triangulares, siendo la base fija 1.5 veces más grande que la móvil, lo que produce una mayor precisión en los movimientos de la plataforma fija y del punto terminal P.

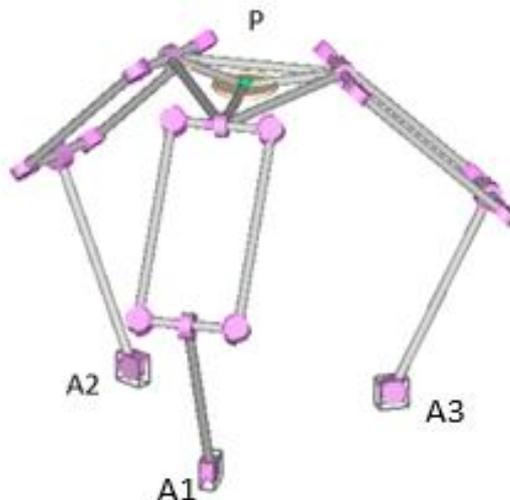


Ilustración 15. Manipulador paralelo Delta

El problema cinemático inverso

Al igual que en el manipulador paralelo 5R, lo que interesa del estudio es maximizar el espacio de trabajo y una herramienta útil es la resolución del problema cinemático inverso, de forma que se calculan los ángulos θ_{11} , θ_{21} y θ_{31} , los cuales se corresponden a las posiciones que deben adoptar los motores o actuadores que llevan a cabo el control del manipulador.

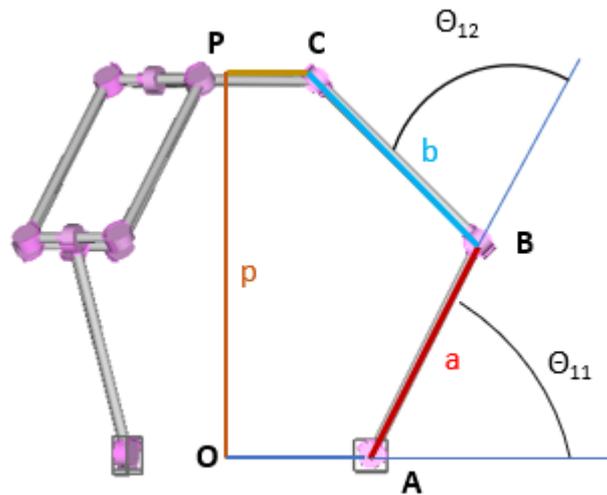


Ilustración 16. Problema cinemático inverso Delta

Para llevar esto a cabo se plantean las ecuaciones [7] y [8] del lazo cerrado:

$$OA + AB + BC = OP + PC$$

Ecuación 7

$$AB + BC = OP + PC - OA$$

Ecuación 8

Cada uno de estos términos se escribe de forma matricial, utilizando la notación que $\cos \theta = c\theta$ y $\sin \theta = s\theta$ para simplificar las ecuaciones.

Para poder obtener los valores de los ángulos hay que definir las coordenadas del punto c (c_x , c_y , c_z). Las podremos obtener relacionando las igualdades de la ecuación [9] y [10]:

$$\begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a c\theta_{11} + b c(\theta_{11} + \theta_{21})s\theta_{31} \\ b c\theta_{31} \\ a s\theta_{11} + b s(\theta_{11} + \theta_{21})s\theta_{31} \end{bmatrix}$$

Ecuación 9

$$\begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x + r_2 - r_1 \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

Ecuación 10

El ángulo θ_{31} se obtiene de forma muy sencilla, ya que igualando c_y se obtiene directamente [11].

$$\theta_{31} = \arcsin(p_y/b)$$

Ecuación 11

En cambio, el cálculo de θ_{11} y θ_{21} , es mucho más complejo, solo se pueden obtener a partir de la suma de los cuadrados de c_x , c_y , c_z y se utiliza para el cálculo de θ_{21} en la ecuación [12].

$$\theta_{21} = \arcsin\left(\frac{(c_x^2 + c_y^2 + c_z^2 - a^2 - b^2)}{2ab \sin \theta_{31}}\right)$$

Ecuación 12

Una vez hallados θ_{21} y θ_{31} , se resuelve de forma sencilla el ángulo θ_{11} a través de una serie de manipulaciones matemáticas y despejando los ángulos θ_{21} y θ_{31} . De nuevo, sería necesario realizar la suma de c_x , c_y , c_z .

Análisis del espacio de trabajo

El estudio del espacio de trabajo se complica, ya que, en el caso de este manipulador, el análisis del espacio de trabajo es más complejo porque posee un número mayor de modos de trabajo, que en este caso y como se verá a continuación, es un total de 8 modos, ya que como en el manipulador paralelo 5R, en este caso cada pierna del robot puede adquirir 2 posiciones una vez se alinea.

En el caso de los manipuladores paralelos espaciales no se va a utilizar el módulo 'Workspace' de GIM. Esto se debe a la gran complejidad del estudio. Por este motivo se ha decidido hacer únicamente uso del módulo de 'Kinematics', en el que podemos simular todas las posibles combinaciones de los sentidos de los pares en la entrada del robot y, con la trayectoria del elemento terminal y el barrido del espacio de todos los puntos por los que pasa nos permite hacernos una idea del espacio de trabajo del robot. Es una aproximación bastante acertada, a pesar de que no se la pura realidad.

Debido a esto no es posible estudiar en este módulo cada modo de trabajo en particular, si no el espacio de trabajo resultante para cada una de las combinaciones posibles que existen en los pares. Así, haciendo una superposición de todos los espacios de trabajo particulares se puede aproximar como es el espacio de trabajo del robot en general.

La entrada se da en los pares rotacionales de la base fija, por tanto, las variables de entrada serán los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 , por lo tanto, hay $2^3=8$ posibles combinaciones en la distribución de los pares. Estas combinaciones se representan en la tabla de la misma

forma que en el robot anterior, representando el + al sentido positivo de giro y al – al sentido contrario. Además, también cabe destacar que cada fila con el mismo color de fondo significa que el espacio de trabajo resultante del movimiento es igual en esa distribución de los pares, esto se debe a la geometría característica del manipulador y a la simetría, así es posible simplificar el estudio.

Combinación de los pares	Par 1	Par 2	Par 3
1	+	+	+
2	+	-	+
3	+	-	-
4	+	+	-
5	-	+	-
6	-	+	+
7	-	-	+
8	-	-	-

Tabla 2. Tabla de las combinaciones posibles de los pares en el robot Delta

En el caso de la primera combinación, en el que todos los actuadores funcionan en el sentido positivo de giro solo nos encontramos con una singularidad debida a las limitaciones geométricas del manipulador. Es decir, la longitud y la disposición de las barras no permiten que el robot siga el movimiento con normalidad.

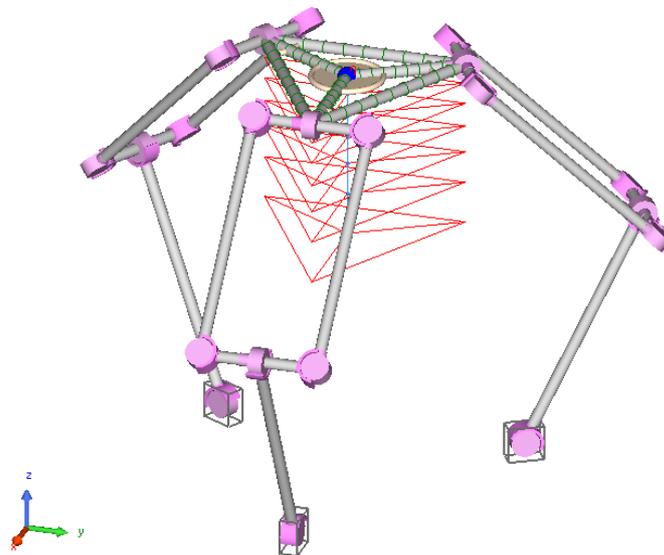


Ilustración 17. Espacio de trabajo de la combinación 1 en el robot Delta

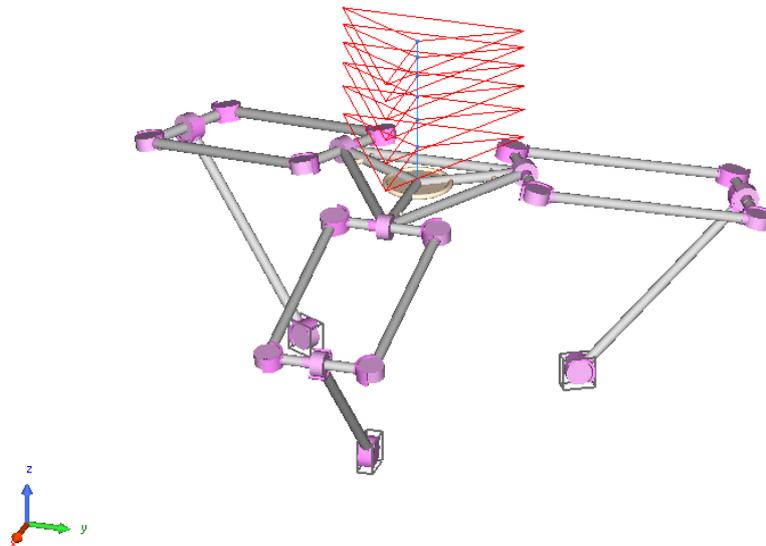


Ilustración 18. Posición final del manipulador paralelo Delta en la combinación 1

En el caso en el que los actuadores giran en el sentido negativo de giro, a priori parece que no hay ninguna singularidad extra a las limitaciones geométricas al observar la trayectoria y el espacio de trabajo simplificado. Pero una vez inicia el movimiento observamos que en la realidad el movimiento se ve interrumpido mucho antes de lo que la simulación predice. Esto se debe a que a partir de un punto concreto los elementos del manipulador chocan entre sí, por lo tanto, a pesar de que en la simulación el movimiento continúa y nos marca una barrida del espacio de trabajo mucho más amplia que en el caso anterior, la realidad es que se ve reducida tres cuartas partes. En primer lugar, la base móvil del manipulador tiene un movimiento en el sentido positivo del eje z, y una vez comienza a desplazarse en el sentido contrario se encuentra la singularidad.

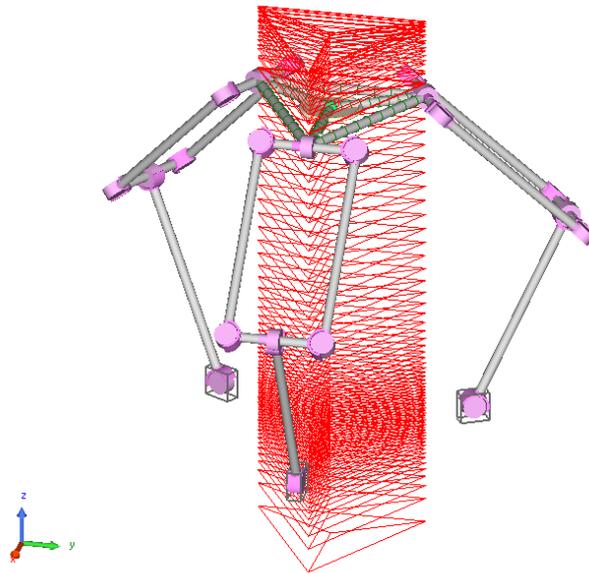


Ilustración 19. Posición inicial del robot Delta en la combinación de los pares 8

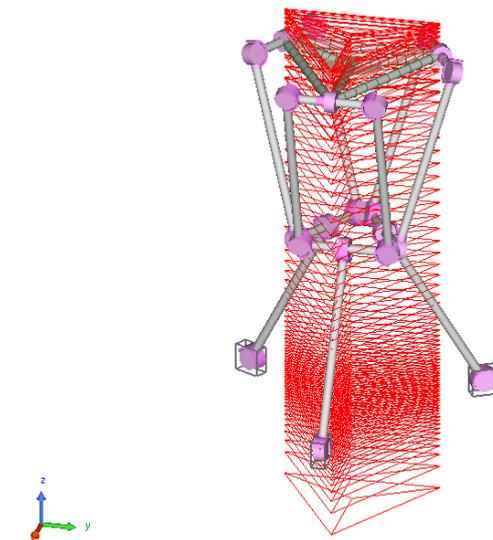


Ilustración 20. Posición final del robot Delta en la combinación de los pares 8

Ahora se va a proceder a analizar el espacio de trabajo cuando se alternan los sentidos del actuador, es decir, las combinaciones que no son 1 o 8. Llevando a cabo este análisis se ha podido observar que los espacios de trabajo de las combinaciones 2, 4 y 6, a los que se llamará A, son iguales, pero poseen una disposición distinta en el espacio como es lógico. Con las combinaciones 3, 5 y 7 ocurre lo mismo, a estos se les denominará B.

En primer lugar, debido a la sencillez, se analizará A. Al igual que en la primera combinación de los pares en los que el sentido de giro es positivo, no se halla ninguna singularidad más allá que las propias del análisis cinemático inverso, es decir, singularidades debidas a la propia geometría y dimensión del manipulador. Como en las combinaciones anteriores, se observa el espacio de trabajo aproximado en color rojo y la trayectoria del punto terminal P en azul.

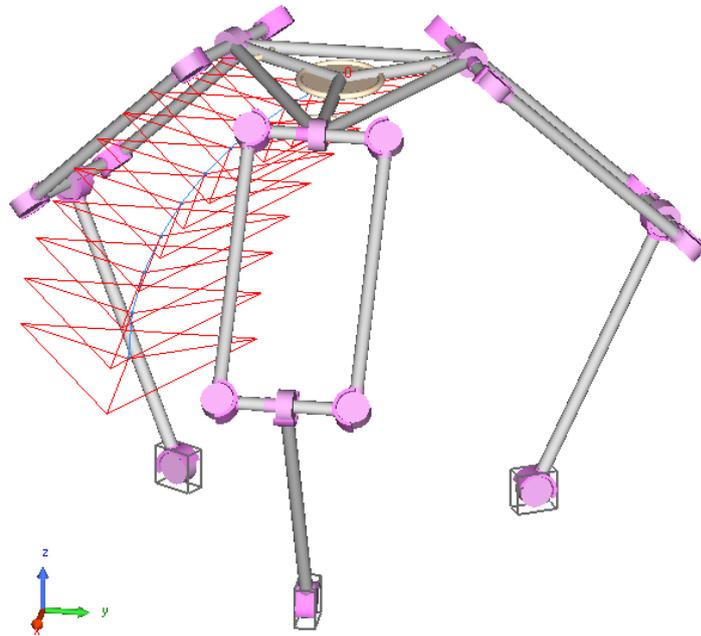


Ilustración 21. Espacio de trabajo de la combinación de los pares A

Se procede ahora a analizar B. Al igual que cuando todos los actuadores giran en el sentido negativo de giro, nos encontramos con varias singularidades a pesar de que en el momento de fijar los actuadores se fija la trayectoria del punto terminal P y el barrido de la plataforma sin singularidades aparentes.

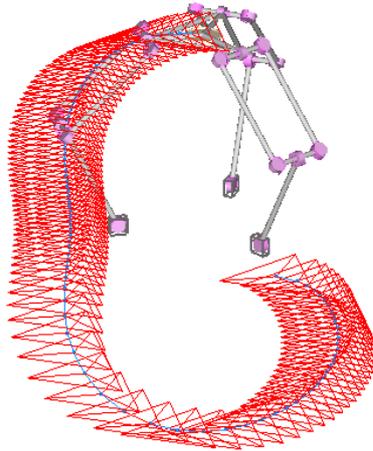


Ilustración 22. Espacio de trabajo del robot Delta en la combinación B

Pero bien, una vez se inicia el movimiento, se observa un problema similar: las barras del manipulador Delta chocan entre sí durante una parte de la secuencia del movimiento. Por tanto, a pesar de que el simulador GIM nos permita realizar el movimiento, en la realidad no es viable. Por otra parte, también se puede ver que a partir de un punto concreto de la trayectoria los elementos dejan de chocar entre sí, así que a pesar de que el movimiento no es realizable de forma continua, se sabe cómo se va a comportar el manipulador a partir de ese instante. Por eso, se podría hacer uso del manipulador configurándolo en ese punto y ya se conocería su movimiento.

En las siguientes imágenes se muestran los puntos a partir de los cuales las barras del manipulador comienzan a chocar entre sí, es decir, se muestra el punto a partir del cual las barras empiezan a chocar y el punto a partir del cual deja de existir el choque.

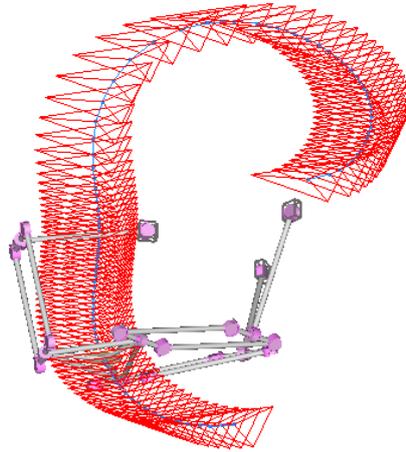


Ilustración 23. Inicio del choque de las barras durante el movimiento en la combinación B

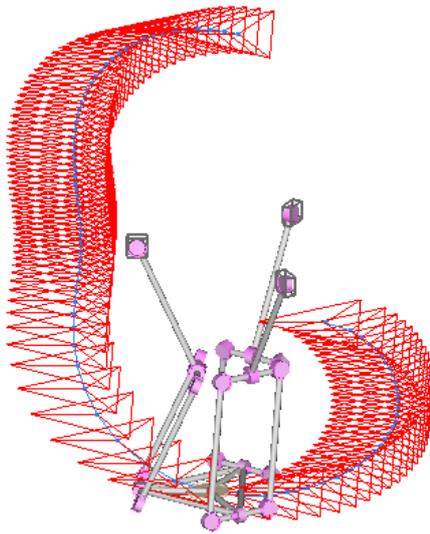


Ilustración 24. Posición en la que termina el choque en la combinación B

Aplicaciones

El manipulador paralelo Delta es un robot que se utiliza en multitud de trabajos dentro de la industria, sobre todo operaciones de pick and place o de mecanizado y en los últimos tiempos está empezando a llegar a la medicina para la realización de operaciones quirúrgicas, ya que con este robot se obtiene mayor precisión. Pero, al fin y al cabo, la aplicación más conocida y desarrollada es la operación de pick and place. Esta es la razón por la que se ha escogido esa operación como objeto de estudio para este tipo de robot.

La operación de pick and place consiste en elegir un objeto, cogerlo del lugar en el que se ubica y colocarlo en el lugar que se desee. Todo esto está programado, de forma que el robot además incluye en la base móvil un sensor visual que permite determinar previamente dónde se encuentra cada objeto y así poder seleccionar qué objeto se encuentra más cerca y así poder realizar la operación de una forma rápida y precisa.

Esta operación la podemos encontrar dentro de toda la industria, desde las cadenas de montaje en la automoción hasta en el proceso de rellenado de cajas, como las de bombones por ejemplo, en la industria alimentaria.

Como en estas operaciones es de vital importancia que se hagan con gran velocidad y con buena precisión, se utiliza ampliamente del robot Delta ya que aporta exactamente todas las solicitaciones que se le exige. Además, es una operación sencilla y eficiente que acerca a la industria a la automatización y a la Industria 4.0, ya que realiza trabajos que de otra forma tendrían que llevarse a cabo por operarios de una manera más lenta y con más tendencia a imprecisiones y defectos.

A la hora de realizar la modelización en GIM, al igual que en la impresión 3D con el robot 5R, se añade un grado de libertad más al mecanismo, ya que en la plataforma móvil se ubicaría un elemento más que haría referencia a la garra con la que se cogerían los objetos situados en la cinta o en la cajonera que se ubiquen.

Al realizar la simulación de una operación de pick and place en GIM se ha llevado a cabo a través de 4 pasos.

En primer lugar, se ha simulado el movimiento correspondiente a la acción de coger el producto y sacarlo del lugar en el que se encuentra, a la hora de realizar esta acción no se halla singularidad alguna, pero el robot no se le permite al robot realizar el movimiento completo para el que está capacitado. En este primer modo de trabajo el actuador 1 es de tipo sinusoidal y los actuadores 2 y 3 son de velocidad estacionaria con un giro positivo y negativo respecto a la rotación respectivamente. Esto se debe a que el objetivo de esta operación es que se realice de una forma rápida y eficiente, por lo tanto, realizar el movimiento completo no tendría sentido porque se perdería tiempo. En las siguientes imágenes se observa de qué punto a qué punto debe moverse la plataforma móvil.

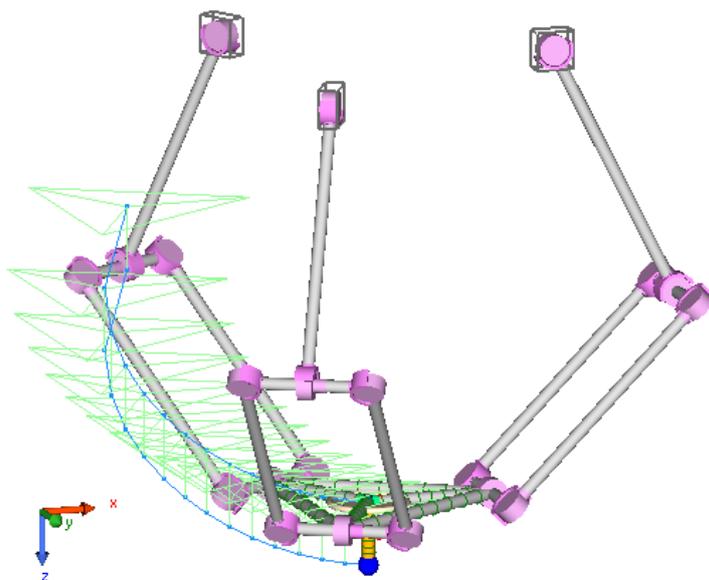


Ilustración 25. Posición inicial 1º movimiento en pick and place

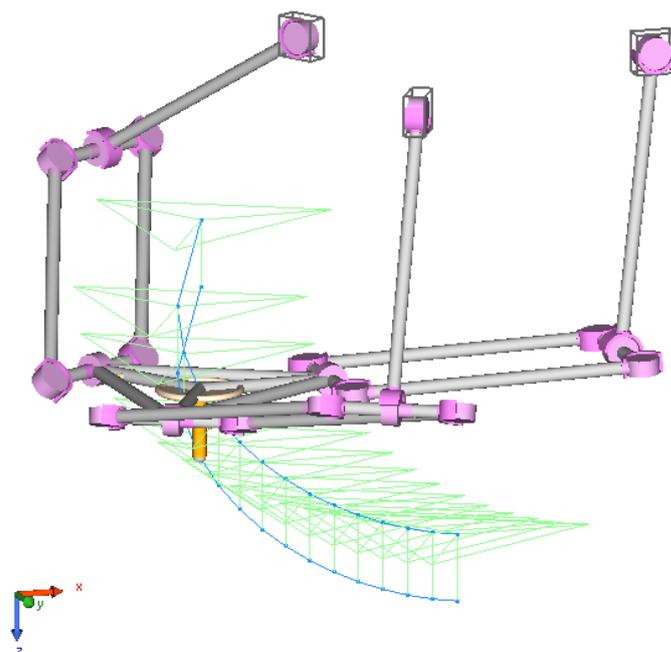


Ilustración 26. Posición final 1º movimiento en pick and place

En segundo lugar, se realiza el movimiento que correspondería a desplazar la garra, al lugar de destino del objeto que se ha cogido previamente. Para este caso, hay que cambiar los sentidos del par aplicado en los actuadores. En este segundo caso, a partir del punto final del movimiento del anterior modo de trabajo, el actuador 1 permanece de tipo sinusoidal y los actuadores 2 y 3 cambian su sentido de giro, pero siguen siendo del tipo de velocidad estacionaria. En este caso, tampoco se observa singularidad alguna, pero sí se permite al robot el movimiento completo.

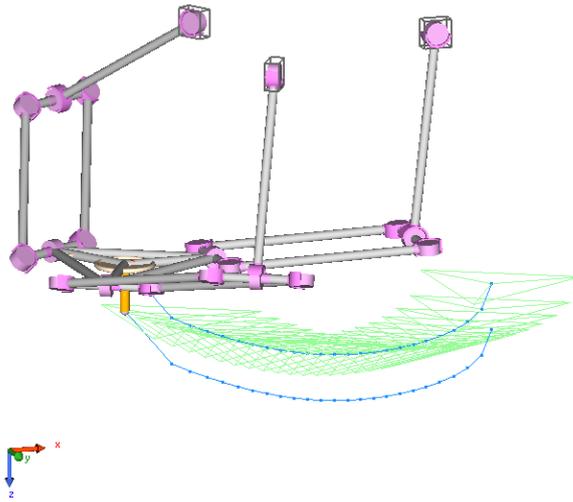


Ilustración 27. Traslación del objeto, posición inicial

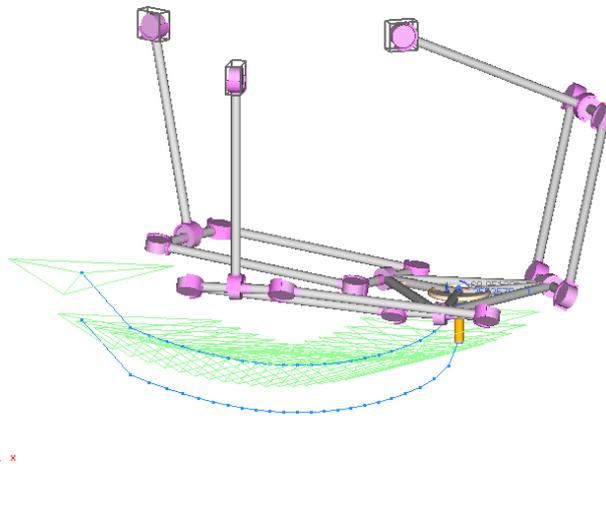


Ilustración 28. Traslación del objeto, posición final

Por último, se llevaría a cabo el movimiento final, que corresponde a que la garra deje el objeto en el lugar deseado, bien sea un depósito de piezas u otra máquina que vaya

a llevar a cabo un proceso sobre la pieza. Para ello se deben cambiar los actuadores 1 y 2 a un sentido de giro contrario, y al actuador 3 a un motor sinusoidal.

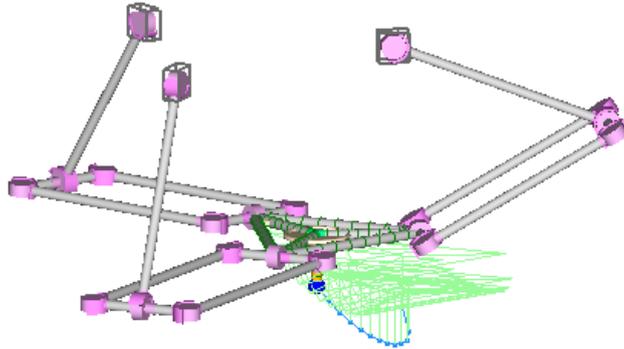


Ilustración 29. Posición inicial del último movimiento

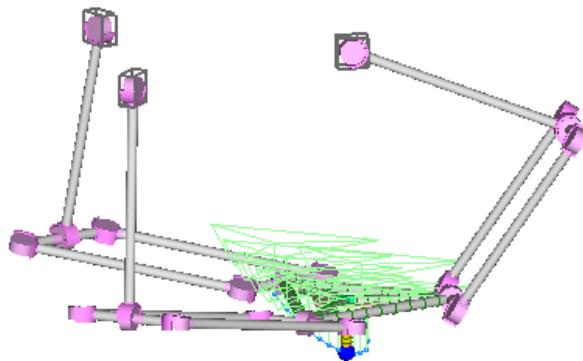


Ilustración 30. Posición final para dejar el objeto en su destino

Cabe aclarar que el giro del motor situado en los actuadores 1, 2 y 3 es siempre a velocidad constante a no ser que se deba realizar un giro sinusoidal.

Por otra parte, se ha podido conseguir simular todo el movimiento de pick and place sin tener que realizar cambios en los actuadores de una posición a otro, de esta forma se consigue realizar la operación de una forma aún más rápida y con un menor deterioro de los motores colocados en los actuadores, ya que el hecho de tener que cambiar la dirección de su sentido de giro varias veces dentro de una sola operación provoca un gran desgaste y un coste extra, ya que habría que cambiar los actuadores en cortos periodos de tiempo.

El movimiento de pick and place al que se ha conseguido llegar parte una posición concreta y la solución encontrada solo nos permite salvar distancias cortas sin grandes cambios de altura de una posición a otra del objeto sujetado por la garra. Esto se ha conseguido partiendo de la posición inicial y actuando en los pares de la siguiente forma:

- Actuador 1: tipo velocidad estacionaria sentido negativo del par de rotación
- Actuador 2: tipo sinusoidal
- Actuador 3: tipo velocidad estacionaria sentido positivo del par de rotación

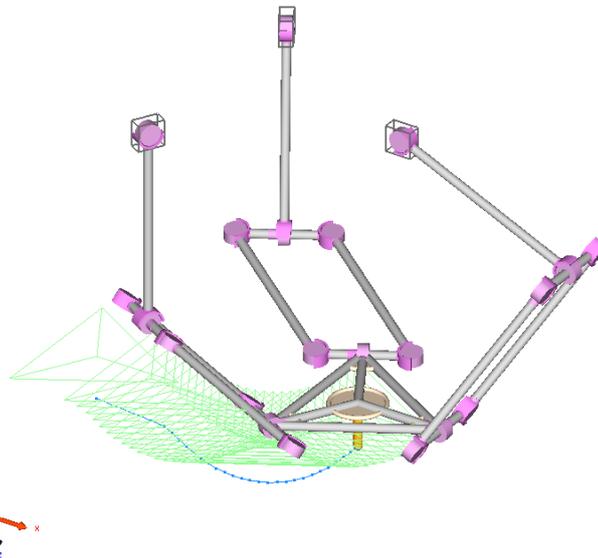


Ilustración 31. Posición inicial del pick and place en 1 solo movimiento

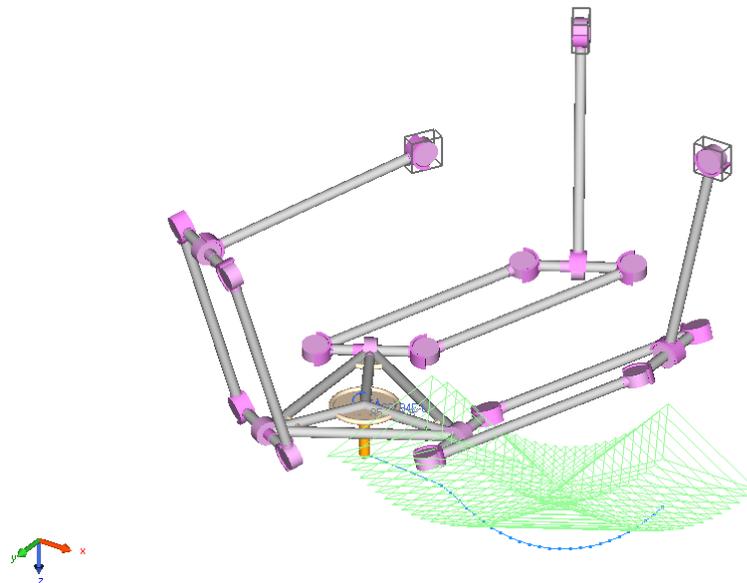


Ilustración 32. Posición final del pick and place en 1 solo movimiento

Por último, se va a mostrar un robot Delta fabricado por la empresa ABB, ya que es una empresa puntera en la fabricación de este tipo de robots y tienen más de 15 años de experiencia en el desarrollo de los mismos. [13]

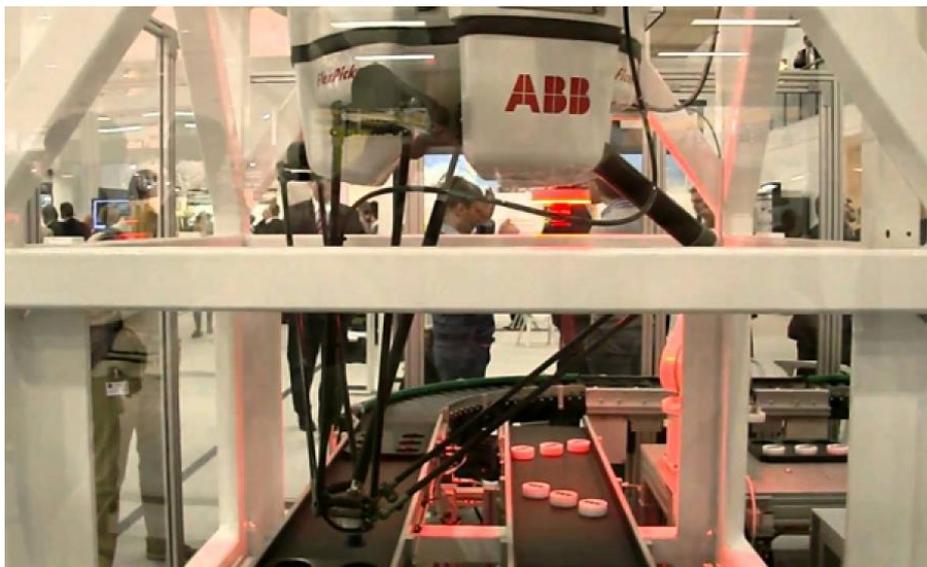


Ilustración 33. Robot Delta cortesía de ABB [13]

Manipulador paralelo Gough-Stewart

Este manipulador es conocido popularmente por el nombre de los dos ingenieros que se encargaron de crearlo y optimizarlo: Gough, ingeniero que estableció las primeras

ideas para un manipulador de estas características y el que construyó el primer prototipo en 1955; y también por Stewart, ingeniero que colaboró al desarrollo del mismo. [7]

El manipulador paralelo Gough-Stewart es un robot de 6 grados de libertad compuesto por 6 cadenas cinemáticas cerradas, con 2 plataformas triangulares, una fija a la que se encuentran conectados los actuadores y una móvil, cuyo estudio de movimiento es el que resulta de alto interés. Como se puede observar en la imagen, el manipulador posee 6 pares esféricos pasivos, 3 en la plataforma fija y 3 en la plataforma móvil. Estas plataformas se unen a través de 6 pares de traslación, en este caso pistones, los cuáles salen de la plataforma fija 2 a 2 y se conectan en la móvil de la misma forma.

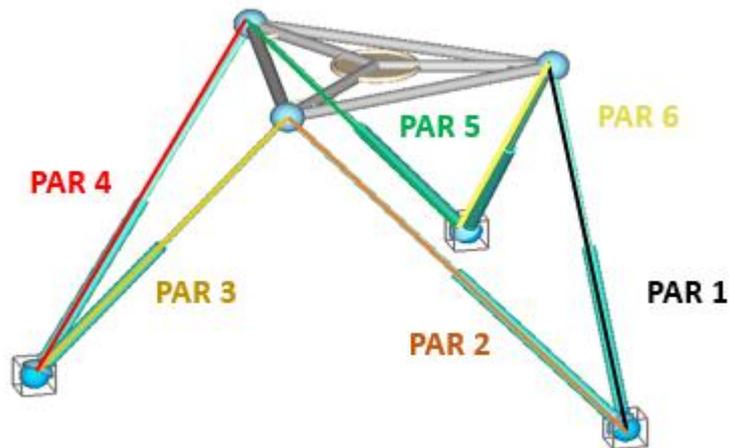


Ilustración 34. Plataforma Gough-Stewart

La aplicación de estructuras de este tipo da una serie de ventajas para sus aplicaciones. Por ejemplo, permite que el manipulador pueda manipular cargas muy superiores a su propio peso, de forma que la carga situada en el plano móvil se reparte entre los 6 actuadores y es más manipulable. Sin embargo, el espacio de trabajo útil de este tipo de robots es mucho menor que en otros tipos, por eso es de gran interés su estudio y tratar de optimizarlo para su uso.

Problema cinemático inverso

Como ya se ha comentado en anteriores casos, el objeto del trabajo es el estudio del espacio de trabajo de los manipuladores paralelos, por lo tanto, en este caso también nos resulta de especial importancia la resolución del problema cinemático inverso. En este caso, el problema es determinar la longitud de los pistones.

Para poder llevar a cabo este cálculo se deben establecer dos sistemas de coordenadas, uno fijo A (x,y,z) y otro móvil B (u,v,w). Así, se puede establecer la posición de cada punto en función del sistema de coordenadas fijo.

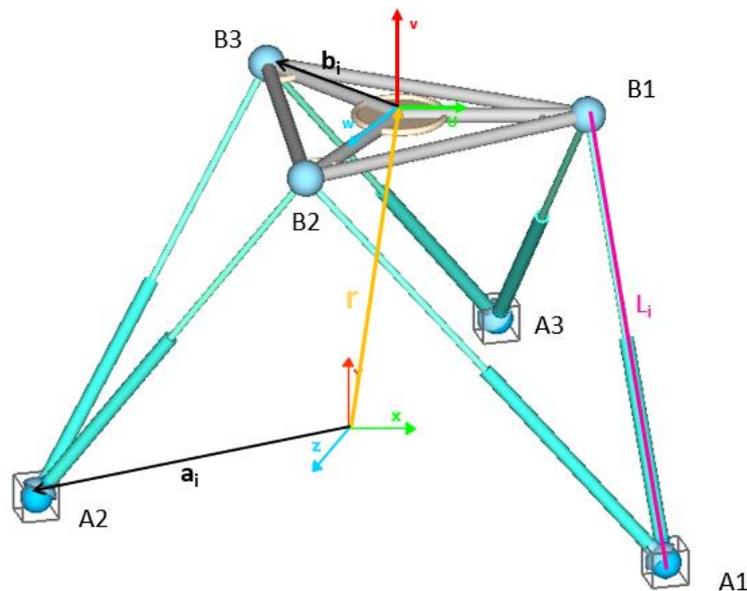


Ilustración 35. Problema cinemático inverso plataforma Gough-Stewart

De esta forma obtenemos la ecuación [13] mediante la cual podemos averiguar la longitud L_i necesaria de cada cadena cinemática cerrada. Donde \mathbf{a}_i es el vector posición de cada uno de los puntos en los que se colocan los pares pasivos de la placa fija respecto al sistema de coordenadas fijo, \mathbf{r} el vector que representa la posición del sistema fijo respecto del móvil, \mathbf{b}_i es el vector de posición de cada uno de los puntos en los que se colocan los puntos pasivos de la placa móvil. Y por último \mathbf{R} es la matriz de rotación.

$$L_i = \mathbf{r} + \mathbf{R} * \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i$$

Ecuación 13

Análisis del espacio de trabajo

En este caso el estudio del movimiento se complica aún más, ya que el manipulador posee 6 grados de libertad, pero debido a la simetría del manipulador se puede simplificar el estudio. Los actuadores se sitúan en los pistones, donde el par aplicado es a velocidad constante para poder observar el comportamiento general del manipulador.

En este caso, existe un único modo de trabajo fijado por la longitud de los pares prismáticos, calculado en la resolución del problema cinemático inverso.

Al igual que en el manipulador Delta, para este robot también se ha decidido hacer el cálculo aproximado del espacio de trabajo con el comando 'Swept' (en el módulo 'Kinematics' de GIM), en el que se va realizando un barrido de las posiciones que va ocupando la plataforma móvil y ayuda a hacerse una idea de cómo será el espacio de trabajo real superponiendo los "subespacios" de trabajo de cada combinación de los pares.

En el caso de este manipulador como tiene 6 grados de libertad tiene 64 posibles combinaciones de los sentidos del par, es decir que la distancia entre los puntos que distan de la entrada aumente o disminuye. Al igual que en el manipulador Delta se ha creado una tabla en la que se pueda ver cada una de estas combinaciones posibles. También se ha tratado de realizar una distribución por colores que fijan los modos de trabajo que posee el mismo *Workspace*.

Combinación en los pares	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6
1	+	+	+	+	+	+
2	-	-	-	-	-	-
3	+	+	-	-	+	+
4	+	+	+	+	-	-
5	-	-	+	+	+	+
6	-	-	-	-	+	+
7	-	-	+	+	-	-
8	+	+	-	-	-	-
9	+	-	+	+	+	+
10	+	+	+	-	+	+
11	+	+	+	+	+	-
12	-	+	+	+	+	+
13	+	+	+	+	-	+
14	+	+	-	+	+	+
15	+	-	+	-	+	+
16	+	+	+	-	+	-
17	+	-	+	+	+	-
18	-	+	-	+	+	+
19	-	+	+	+	-	+

20	+	+	-	+	-	+
21	+	-	+	-	+	-
22	-	+	-	+	-	+
23	+	+	+	-	-	-
24	+	-	+	+	-	-
25	+	+	-	-	+	-
26	+	+	-	+	-	-
27	-	+	+	+	-	-
28	+	+	-	-	-	+
29	-	-	+	-	+	+
30	+	-	-	-	+	+
31	-	-	+	+	+	-
32	-	-	-	+	+	+
33	-	+	-	-	+	+
34	-	-	+	+	-	+
35	+	-	-	-	-	-
36	-	-	+	-	-	-
37	-	-	-	-	+	-
38	-	+	-	-	-	-
39	-	-	-	+	-	-
40	-	-	-	-	-	+
41	+	-	+	-	-	-
42	-	-	+	-	+	-
43	+	-	-	-	+	-
44	-	+	-	+	-	-
45	-	+	-	-	-	+
46	-	-	-	+	-	+
47	+	-	+	+	-	+
48	+	+	+	-	-	+
49	-	+	+	-	+	+
50	+	-	-	+	+	+
51	+	+	+	-	-	+
52	+	+	-	+	+	-
53	+	-	-	-	-	+
54	+	-	-	+	-	-
55	-	-	+	-	-	+
56	-	+	-	-	+	-
57	-	+	+	-	-	-
58	-	-	-	+	+	-
59	-	+	+	-	+	-
60	+	-	+	-	-	+
61	+	-	-	+	+	-

62	+	-	-	+	-	+
63	-	+	-	+	+	-
64	-	+	+	-	-	+

Tabla 3. Posibles combinaciones de los pares en la plataforma Gough-Stewart

Debido a la geometría y a la simetría del manipulador y a que los pares aplicados avanzan a una velocidad constante e igual en cada actuador, es posible agrupar las combinaciones de los pares que dan lugar al mismo espacio de trabajo para poder realizar el estudio de una forma más simple, y de una forma clara y ordenada. De forma que quedan 21 agrupaciones en las que se genera un espacio de trabajo igual.

Espacio de trabajo	Combinación en los pares	Espacio de trabajo	Combinación en los pares
A	1	L	29 30 31
B	2	M	32 33 34
C	3 4 5	N	35 36 37
D	6 7 8	O	38 39 40
E	9 10 11	P	41 42 43
F	12 13 14	Q	44 45 46
G	15 16 17	R	47 48 49 50 51 52
H	18 19 20	S	53 54 55 56 57 58
I	21 22	T	59 60 61
J	23 24 25	U	62 63 64
K	26 27 28		

Tabla 4. Agrupación de las combinaciones que dan lugar al mismo espacio de trabajo

En primer lugar, se mostrará el espacio de trabajo de en el cual todos los pares son positivos, el denominado espacio de trabajo A. Se puede ver que en este caso la única limitación se debe a que la longitud de los pistones no es infinita, por lo que termina el movimiento.

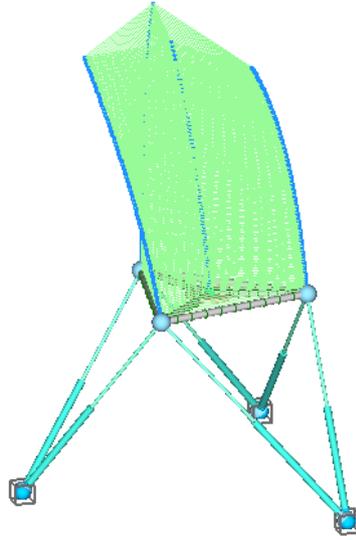


Ilustración 36. Espacio de trabajo A

En caso en el que todos los pares son negativos (espacio de trabajo B), se puede observar que el espacio de trabajo es más reducido, pero es interesante ver que el bloqueo del manipulador se debe a una singularidad de tipo 1, es decir, se produce un alineamiento de las barras, además, en estas barras se sitúan los pares de traslación. Si dejamos que continúe el movimiento y observamos el robot desde una perspectiva cenital, se ve perfectamente el alineamiento.

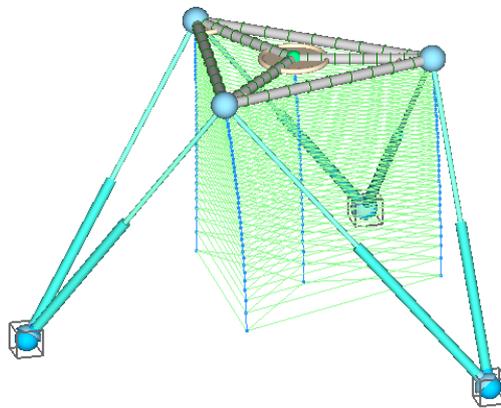


Ilustración 37. Espacio de trabajo B

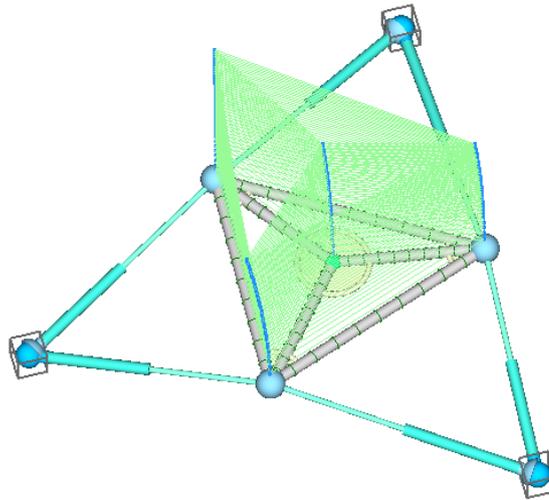


Ilustración 38. Singularidad del espacio de trabajo B

Una vez realizado el estudio de las combinaciones en las que todos los actuadores trabajan en el mismo sentido, se mostrará el espacio de trabajo denominado C.

En este caso, se puede observar que el espacio de trabajo es mayor. Y se puede ver como se llega al límite del movimiento debido a que los pares no tienen más recorrido, llegan a su límite y el movimiento no puede continuar.

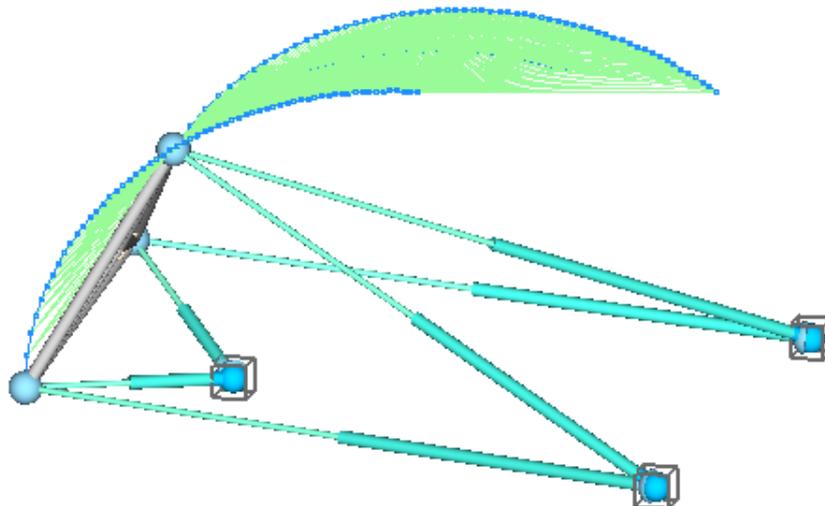


Ilustración 39. Espacio de trabajo C

Teniendo en cuenta el caso D, vemos como la singularidad que provoca la limitación del movimiento se debe a que los pares se alinean entre sí en la última posición.

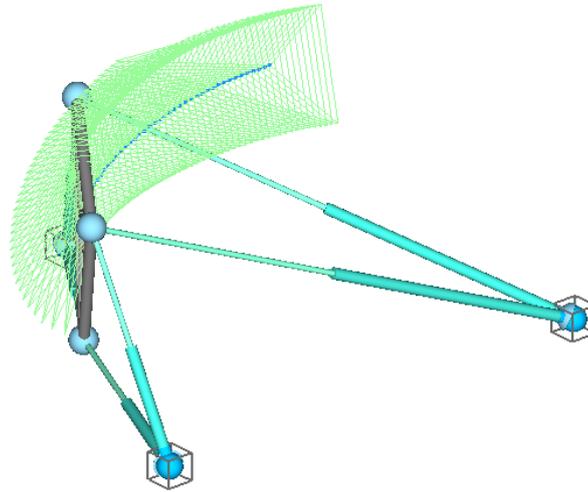


Ilustración 40. Espacio de trabajo D

Al igual que en el modo de trabajo anterior, en el modo E se da un movimiento similar al anterior, pero la singularidad se da mucho antes, por lo que el espacio de trabajo es mucho menor. En este caso, la singularidad se debe a que los pares llegan a un punto de alineamiento con la plataforma superior.

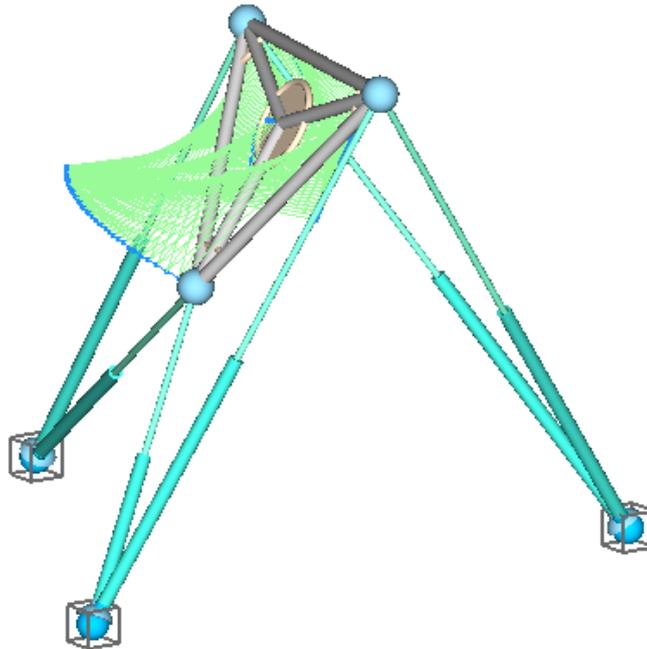


Ilustración 41. Espacio de trabajo E

En el espacio de trabajo F se puede ver que es mucho más reducido, esto se debe a que se observan 2 singularidades por alineamiento de las barras como se mostrará a continuación. Por tanto, las barras se bloquean mucho antes y el movimiento de la placa móvil es mucho menor.

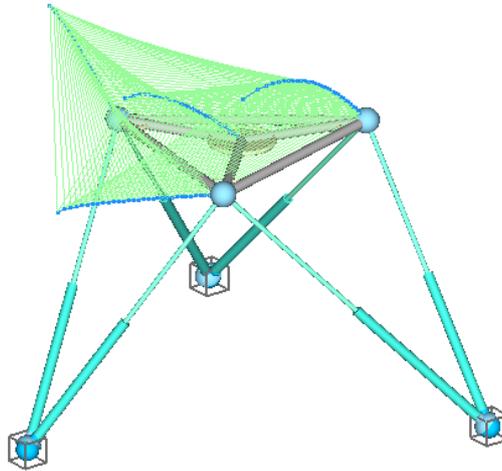


Ilustración 42. Espacio de trabajo F

En las siguientes imágenes se puede ver como se produce un alineamiento de las barras en las que se sitúan los pistones hidráulicos, combinado con la singularidad en la que se alinean las barras en las que se sitúan los actuadores con la plataforma móvil. Así, es imposible que el movimiento continúe. En la segunda imagen, se ha quitado el 'Swept' que nos ayuda a hacernos una idea aproximada del espacio de trabajo, para poder observar mejor este alineamiento.

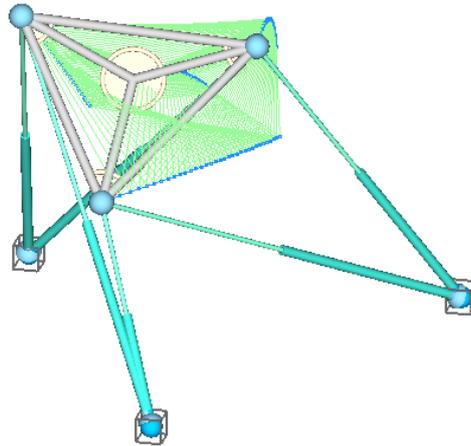


Ilustración 43. Singularidad 1 del espacio de trabajo F

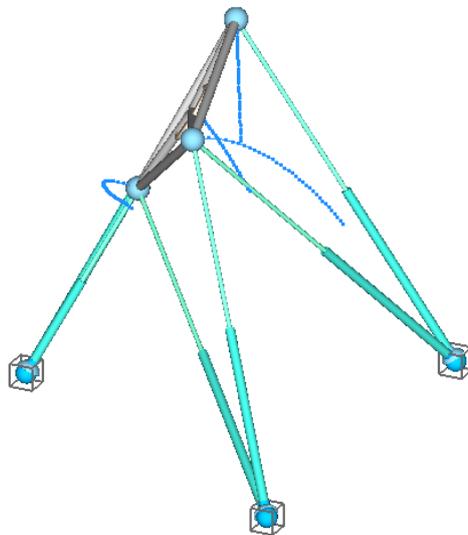


Ilustración 44. Singularidad 2 del espacio de trabajo F

En el espacio de trabajo G , también se puede ver que es muy reducido, y en la imagen se observa como el movimiento termina debido a la singularidad que viene dada por el alineamiento de las barras en los que se sitúan los pares motores.

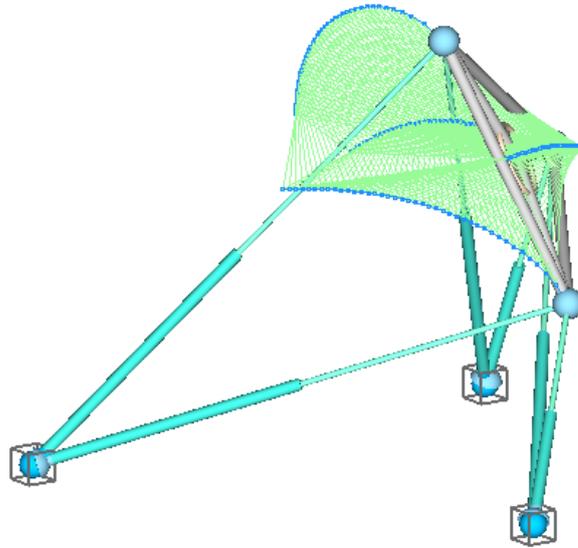


Ilustración 45. Espacio de trabajo G

Por lo tanto, en la combinación de los pares H, vuelve a ocurrir lo mismo. Pero en este caso, se puede observar que el espacio de trabajo se ve limitado por dos singularidades. La primera, se debe al alineamiento de los actuadores y, la otra se basa en el alineamiento de los actuadores con las barras que componen la plataforma móvil.

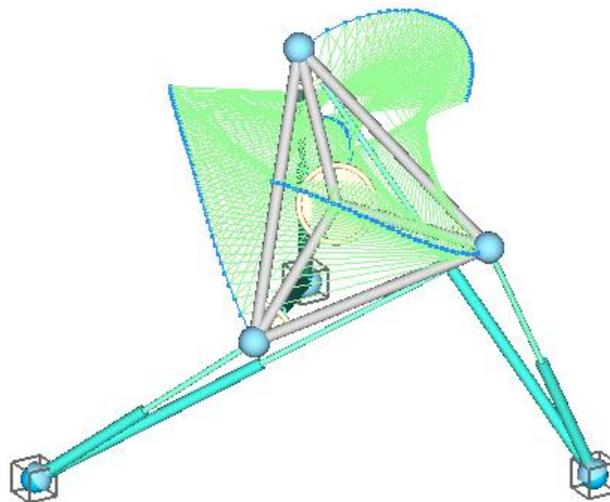


Ilustración 46. Espacio de trajo H

En el espacio de trabajo I se ve que la plataforma móvil toma un movimiento helicoidal. Así que se concluye que el Workspace se ve limitado porque de continuar el movimiento

habría un choque entre las barras de los actuadores. Por lo tanto, en este caso, no se trata de ninguna singularidad cinemática, si no de una singularidad física. Ya que, es imposible que el movimiento, antes chocan las barras entre sí y se bloquea el manipulador para no dañarse.

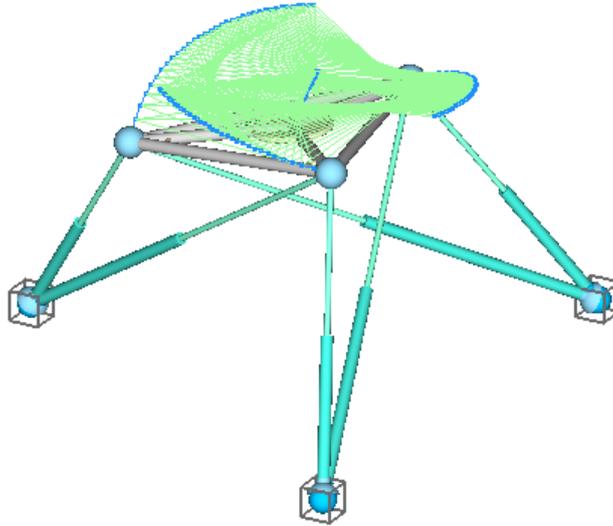


Ilustración 47. Espacio de trabajo I

A la hora de analizar el espacio de trabajo J, se ve que es muy similar al G y que, además, la singularidad que delimita el Workspace es la misma. A pesar de que el espacio de trabajo sea prácticamente el mismo no lo es, porque la trayectoria que siguen los puntos de la plataforma móvil es diferente. Aun así, se podría simplificar y considerarlos igual.

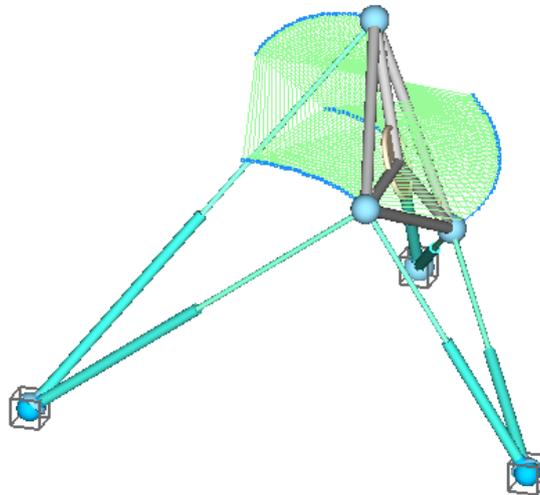


Ilustración 48. Espacio de trabajo J

La combinación K está limitada por una singularidad de tipo 1, producida por el alineamiento de las barras en las que se sitúan los actuadores y que además también se

tienden a alinearse con la barra situada en la plataforma móvil. Por eso, el movimiento para previamente a que se produzca el bloqueo.

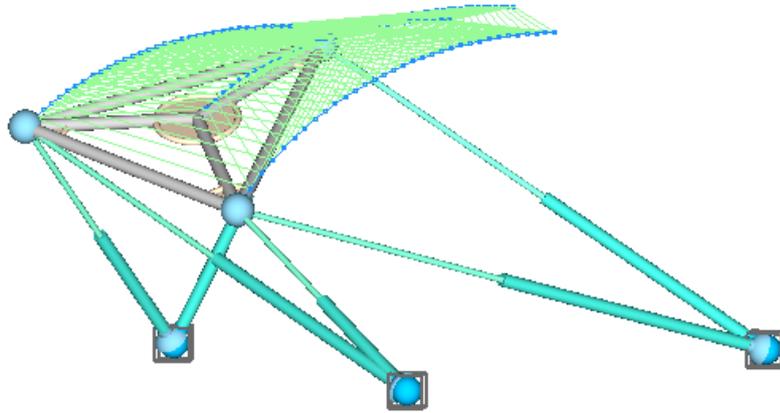


Ilustración 49. Espacio de trabajo K

En el espacio de trabajo L se da la misma singularidad, pero en cambio se puede percibir un Workspace mucho más amplio en comparación con los de los el resto de combinaciones de los pares.

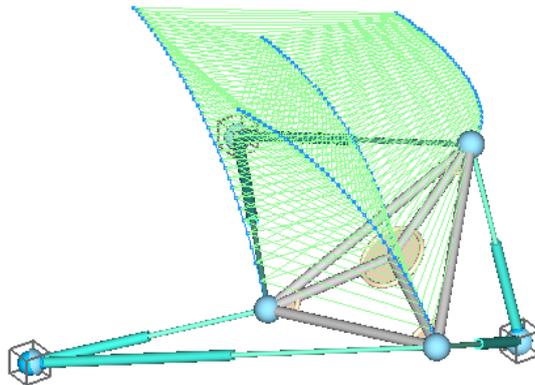


Ilustración 50. Espacio de trabajo L

En el espacio de trabajo M, se llega a la misma posición terminal que en los modos de trabajo G y J y que la razón por la que se llega al bloqueo del movimiento es la misma, pero la trayectoria que siguen los puntos de la plataforma móvil es muy diferente y por lo tanto el modo de trabajo también es distinto.

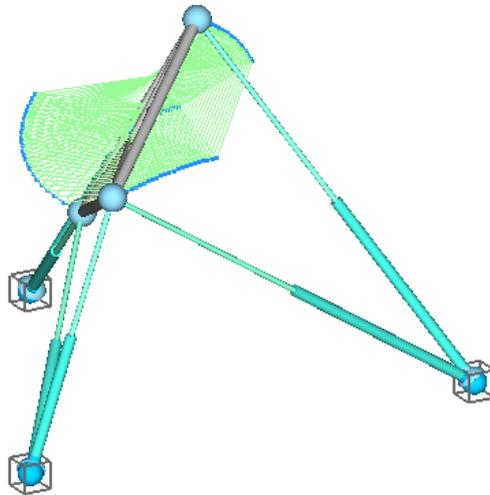


Ilustración 51. Espacio de trabajo M

En N, se observa perfectamente el alineamiento de una de las barras en la que se sitúa el actuador con una de las barras de la plataforma móvil. Esta es la razón por la que se bloquea el manipulador.

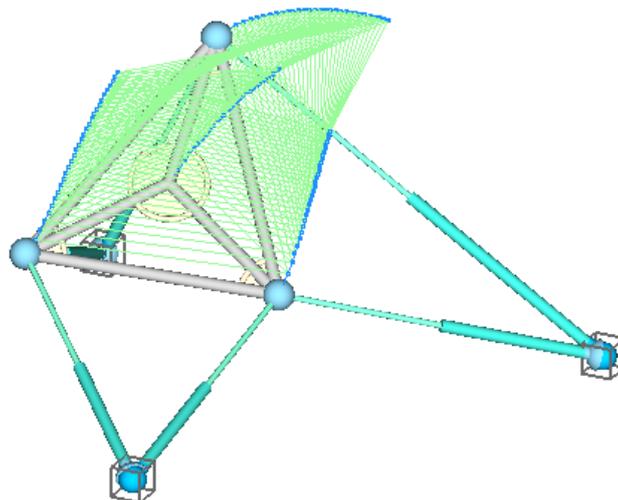


Ilustración 52. Espacio de trabajo N

En la combinación O se llega a la misma posición y se obtiene el mismo modo de trabajo. Teóricamente el Workspace no debería ser el mismo, pero en este caso debido al diseño del manipulador se llega a lo mismo, con las mismas posiciones, la misma singularidad y el mismo espacio de trabajo.

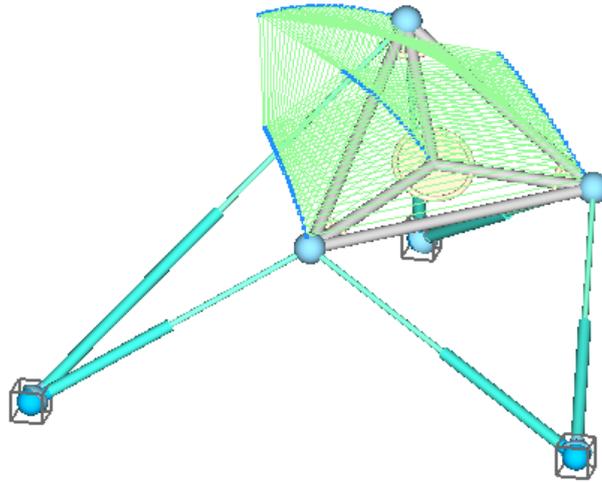


Ilustración 53. Espacio de trabajo O

En el siguiente, P, al igual que en los espacios de trabajo anteriores se llega a la misma posición singular y se obtiene un Workspace similar.

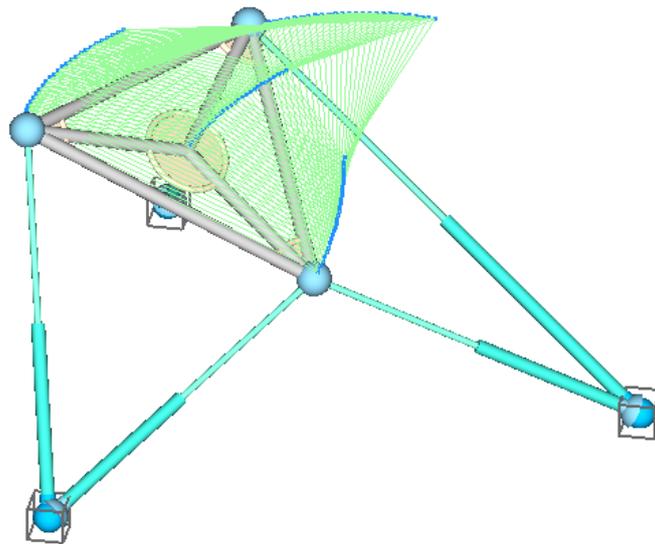


Ilustración 54. Espacio de trabajo P

El espacio de trabajo Q, es muy diferente a los anteriores, también es reducido, pero se llegan a una serie de singularidades muy diversas. En las imágenes siguiente podemos observar el espacio de trabajo aproximado con el barrido del movimiento del elemento móvil. Pero en este caso hay varias singularidades, al igual que en muchos otros de

trabajo se llega a una posición en la que tiende a que se alineen los actuadores que salen de dos de los puntos fijos de la plataforma fija.

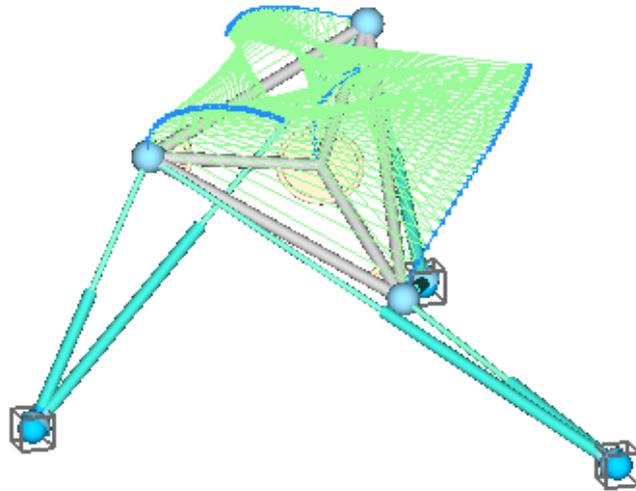


Ilustración 55. Espacio de trabajo Q

Pero en este caso no llega a producirse el bloqueo por la razón anterior. Si se observa la posición terminal desde una perspectiva favorable y eliminando el barrido para poder apreciarlo mejor, se ve como si el movimiento continuara los actuadores del otro punto fijo chocarían con la plataforma móvil, de forma que se rompería el manipulador.

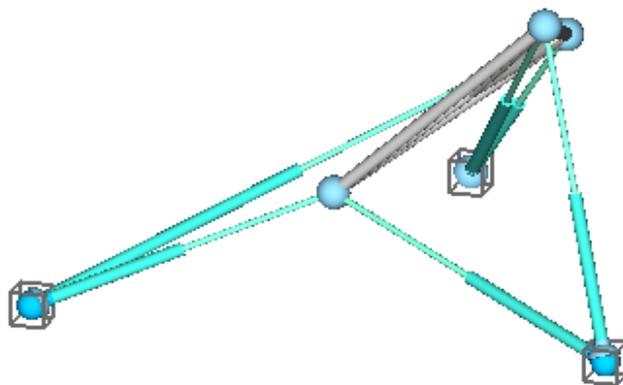


Ilustración 56. Singularidad espacio de trabajo Q

El siguiente, R, tiene una forma totalmente diferente a los anteriores y se llega a una posición terminal también muy distinta. En este caso, el bloqueo se produce debido a

que si el movimiento continúa se llegaría a un alineamiento de dos de las barras actuadoras que salen del mismo punto fijo con toda la plataforma móvil.

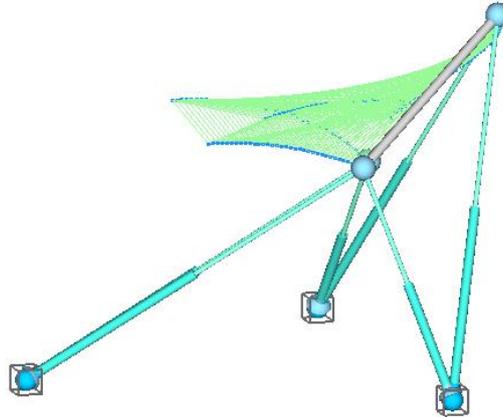


Ilustración 57. Espacio de trabajo R

El espacio de trabajo S da lugar a un Workspace que recuerda a varios de los que ya han sido analizado. Además, la razón de la singularidad es la misma que en muchos de esos casos: alineamiento del actuador con la plataforma móvil.

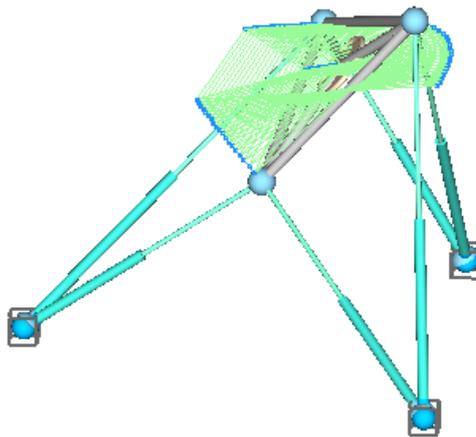


Ilustración 58. Espacio de trabajo S

El Workspace T tiene el mismo motivo por el que se llega al bloqueo, pero el espacio de trabajo es algo mayor que en el caso anterior.

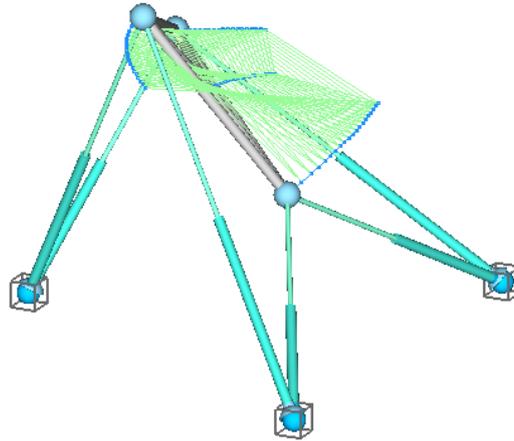


Ilustración 59. Espacio de trabajo T

El último “subespacio” es U , en el que se observa un espacio de trabajo también muy reducido y el bloqueo se debe a que la plataforma móvil tiende a quedarse en una posición completamente vertical y se observa que los pares también tienden a cruzarse entre sí lo que más tarde también ocasionaría el bloqueo del movimiento.

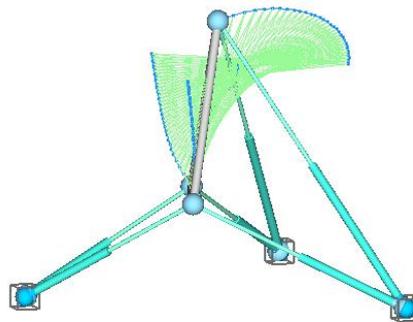


Ilustración 60. Espacio de trabajo U

Aplicaciones

El manipulador paralelo Gough-Stewart tiene un número de aplicaciones muy amplio, desde robots ensambladores hasta simuladores de conducción de automóviles e incluso para usos biomédicos como prótesis en determinadas articulaciones como rodillas o tobillos.

Pero como se ha comentado anteriormente, el diseño del manipulador se ha optimizado para su utilización en la simulación de vuelo. La empresa de ingeniería aeronáutica Airbus realiza sus simulaciones con este tipo de robots. Estos simuladores ayudan tanto a el aprendizaje de los pilotos para ganar horas de vuelo simulado como a la propia empresa que ha diseñado el avión en sí para hacer un control de los sistemas electrónicos y de control integrados en la cabina de vuelo.

En la siguiente imagen se muestra una cabina de simulación de vuelo fabricada por la empresa Indra. [14]



Ilustración 61. Simulador de vuelo Indra [14]

Teniendo en cuenta la gran aplicación que tienen estos robots en el sector, se ha realizado una modelización en GIM como debería actuar el robot y cuál es su espacio de trabajo para el despegue.

Para esto se ha partido del modo de trabajo U, sin que llegue a completarse el movimiento de forma que este movimiento haría referencia al momento propio del despegue en el que el avión tome la inclinación óptima para poder despegar.

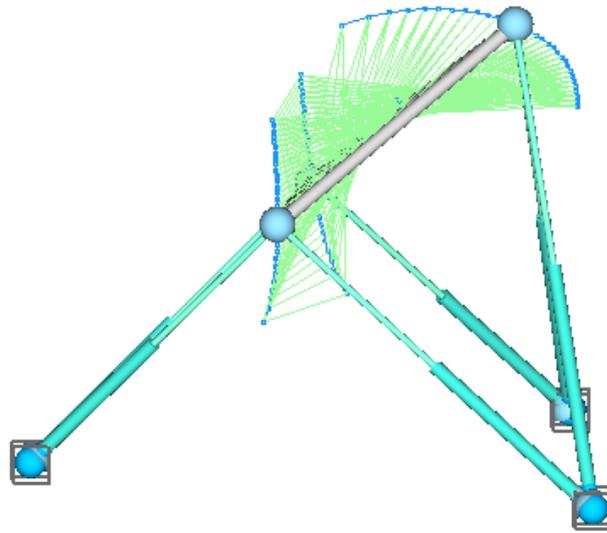


Ilustración 62. Modelización del despegue

Cuando el avión ya ha alcanzado una altura determinada, debe estabilizarse ocupando una posición horizontal. Por lo tanto, también se ha modelizado el movimiento que debe realizar también el avión.

Este movimiento es de alto riesgo, ya que, si el movimiento pasa de la posición estable horizontal, el avión tendería a caer y a bajar, por lo tanto, es un movimiento crítico. Además, en la simulación se observa que movimiento continuaría y tendería a esto mismo.

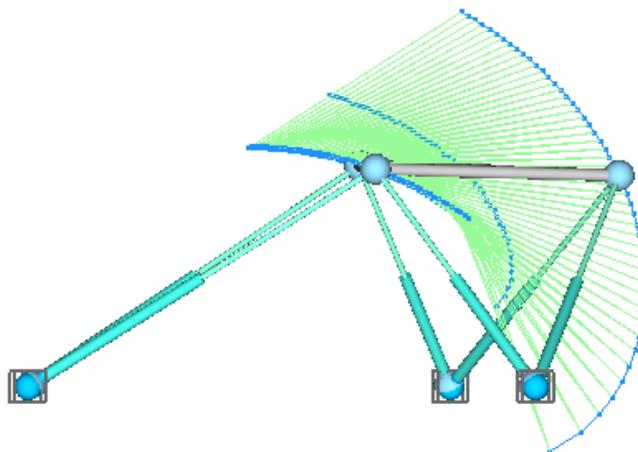


Ilustración 63. Modelización de la estabilización tras el despegue

Tareas y diagrama Gantt

En este apartado se van a definir las tareas que han sido llevadas a cabo para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado. Para ellos se va explicar el contenido de cada tarea, se aproximará la duración de la tarea y se tendrán en cuenta los recursos utilizados. Cada tarea ha sido desarrollada por un Ingeniero Junior y supervisada por una Ingeniera Senior.

Tareas

1. Paquete de trabajo 1: Estudio del estado del arte

El estudio del estado del arte consiste en recopilar información sobre el tema que va a ser estudiado y ver cual es la situación de los estudios en torno al mismo. Esta tarea se lleva a cabo durante todo el proceso, se inicia con ella y se va revisando continuamente.

a. Tarea 1.1 Manipuladores paralelos

- Descripción: Consiste en buscar información acerca de los manipuladores paralelos y su historia.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(16h), Ingeniera Senior(1h)
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Estado del arte de manipuladores paralelos.

b. Tarea 1.2: Problema cinemático inverso y espacio de trabajo

- Descripción: Consiste en recopilar información sobre la resolución del problema cinemático inverso y como calcular el espacio de trabajo a través de ella.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(8h), Ingeniera Senior(1h).
- Recursos materiales: Ordenador, material de oficina.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Estado del arte del problema cinemático inverso y del espacio de trabajo.

c. Tarea 1.3: Aplicaciones

- Descripción: Se trata de recopilar información acerca de las posibles aplicaciones de los manipuladores paralelos tanto en la industria como fuera del ámbito industrial.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(8h), Ingeniera Senior(1h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Estado del arte de las aplicaciones.

2) Paquete de trabajo 2: Estudio de GIM

Este paquete de trabajo consiste en aprender a manejar el programa con el que se va a realizar el estudio, y en llevar a cabo el estudio del movimiento y de los espacios de trabajo de cada manipulador y de la aplicación de cada uno de ellos.

a. Tarea 2.1 Manejo del programa

- Descripción: Se trata de aprender a utilizar el programa GIM y cada uno de los módulos que se va a utilizar, sobre todo los módulos Geometry, Kinematics y Workspace.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(23h), Ingeniera Superior(3h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 mes.

b. Tarea 2.2 Manipulador 2 GDL

- Descripción: Consiste en la elección de un manipulador paralelo de 2 GDL, estudiar su espacio de trabajo y desarrollar una aplicación del mismo, en este caso se seleccionó el robot 5R.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(35h), Ingeniera Senior(4h).
- Recursos materiales: Ordenador, material de oficina.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Entrega de archivos GIM y desarrollo de la metodología.

c. Tarea 2.3 Manipulador 3 GDL

- Descripción: Se basa en seleccionar un manipulador paralelo de 3 GDL, estudiar su Workspace y buscar una aplicación del mismo, en este caso se seleccionó el robot Delta.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(42h), Ingeniera Senior(5h).
- Recursos materiales: Ordenador, material de oficina.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Entrega de archivos GIM y desarrollo de la metodología.

d. Tarea 2.4 Manipulador 6 GDL

- Descripción: Se trata de elegir un manipulador paralelo de 6 GDL, estudiar su espacio de trabajo y seleccionar una aplicación del mismo, en este caso se seleccionó el manipulador Gough Stewart.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(32h), Ingeniera Senior(5h).
- Recursos materiales: Ordenador, material de oficina.
- Duración: 1 mes.
- Entregables: Entrega de archivos GIM y escritura de la metodología.

3) Paquete de trabajo 3: Elaboración del documento final

Este paquete de trabajo consiste en llevar a cabo la escritura del proyecto final con el objetivo de hacer un desarrollo correcto del TFG y realizar las correcciones necesarias.

a. Tarea 3.1: Elaboración de la memoria

- Descripción: Consiste en escribir la introducción, el contexto, los objetivos y el alcance del proyecto y llevar a cabo las correcciones una vez supervisado.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(10h), Ingeniera Senior(1h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 1 semana.
- Entregables: Documento con la memoria.

b. Tarea 3.2: Escribir la metodología

- Descripción: Se trata de llevar a cabo el desarrollo del estudio del espacio de trabajo, la resolución del espacio de trabajo de cada manipulador y una aplicación.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(20h), Ingeniera Senior(3h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: 2 semanas.
- Entregables: Documento con la metodología.

c. Tarea 3.3: Escribir las conclusiones

- Descripción: Consiste en escribir las conclusiones a las que se ha llegado una vez finalizado el proyecto.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(2h), Ingeniera Senior(1h).
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: Media semana.
- Entregables: Documento con las conclusiones.

d. Tarea 3.4: Dar el formato adecuado al documento

- Descripción: Se trata de dar al trabajo consistencia y dar un formato adecuado para que pueda entenderse de forma clara y sencilla. También consiste en elaborar el índice del trabajo, de las ilustraciones y de las tablas.
- Recursos humanos: Ingeniero Junior(4h)
- Recursos materiales: Ordenador.
- Duración: Media semana.
- Entregables: TFG finalizado.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de cómo se ha estructurado cada paquete de trabajo con sus tareas y sus subtareas.

Código	Nombre de tarea
P.T.1	Estudio del estado del arte
T.1.1	Manipuladores paralelos
T.1.2	Problema cinemático inverso y workspace
T.1.3	Aplicaciones
P.T.2	Estudio de GIM
T.2.1	Manejo del programa
T.2.1.1	Módulo Geometry
T.2.1.2	Módulo Kinematics
T.2.1.2	Estudio del espacio de trabajo
T.2.2	Robot 5R
T.2.2.1	Modelización en GIM
T.2.2.2	Estudio del movimiento
T.2.2.3	Estudio del espacio de trabajo
T.2.2.4	Aplicación
T.2.3	Robot Delta
T.2.3.1	Modelización en GIM
T.2.3.2	Estudio del movimiento
T.2.3.3	Estudio del espacio de trabajo
T.2.3.4	Aplicación
T.2.4	Robot Gough-Stewart
T.2.4.1	Modelización en GIM
T.2.4.2	Estudio del movimiento
T.2.4.3	Estudio del espacio de trabajo
	Aplicación
P.T.3	Elaboración del documento final
T.3.1	Memoria
T.3.2	Metodología
T.3.3	Conclusiones
T.3.4	Dar formato al documento

Tabla 5. Tabla de tareas de la planificación

Hitos

- Hito 1: Redacción del estado del arte al finalizar la tarea 1.3
- Hito 2: Borrador del estudio espacio de trabajo del manipulador 5R al terminar la tarea T.2.2.3.
- Hito 3: Borrador del estudio espacio de trabajo del robot Delta al terminar la tarea T.2.3.3.
- Hito 4: Borrador del estudio espacio de trabajo de la plataforma Gough-Stewart 5R al terminar la tarea T.2.4.3.
- Hito 5: Entregar el TFG, al completar cada uno de los paquetes de trabajo.

Diagrama Gantt

En este apartado se puede observar el diagrama Gantt que nos permite hacer una representación en la escala del tiempo de los paquetes de trabajo y de las tareas que se han llevado a cabo. Es una herramienta que permite desarrollar una buena planificación del proyecto en la cual se puede observar que tareas son dependientes entre sí y, por tanto, ser consciente de que no pueden demorarse en exceso para no convertirse en críticas.

En el diagrama se puede ver cada paquete de trabajo en color salmón, cada tarea en azul y cada subtarea en un azul más claro, de forma que puedan ser diferenciadas sencillamente. Por otra parte, se puede observar cómo algunas de las tareas son más largas de lo habitual, por ejemplo, el estudio del robot 5R o de la plataforma Stewart, esto se debe a no disponer de tiempo suficiente debido a las convocatorias de exámenes de la escuela.

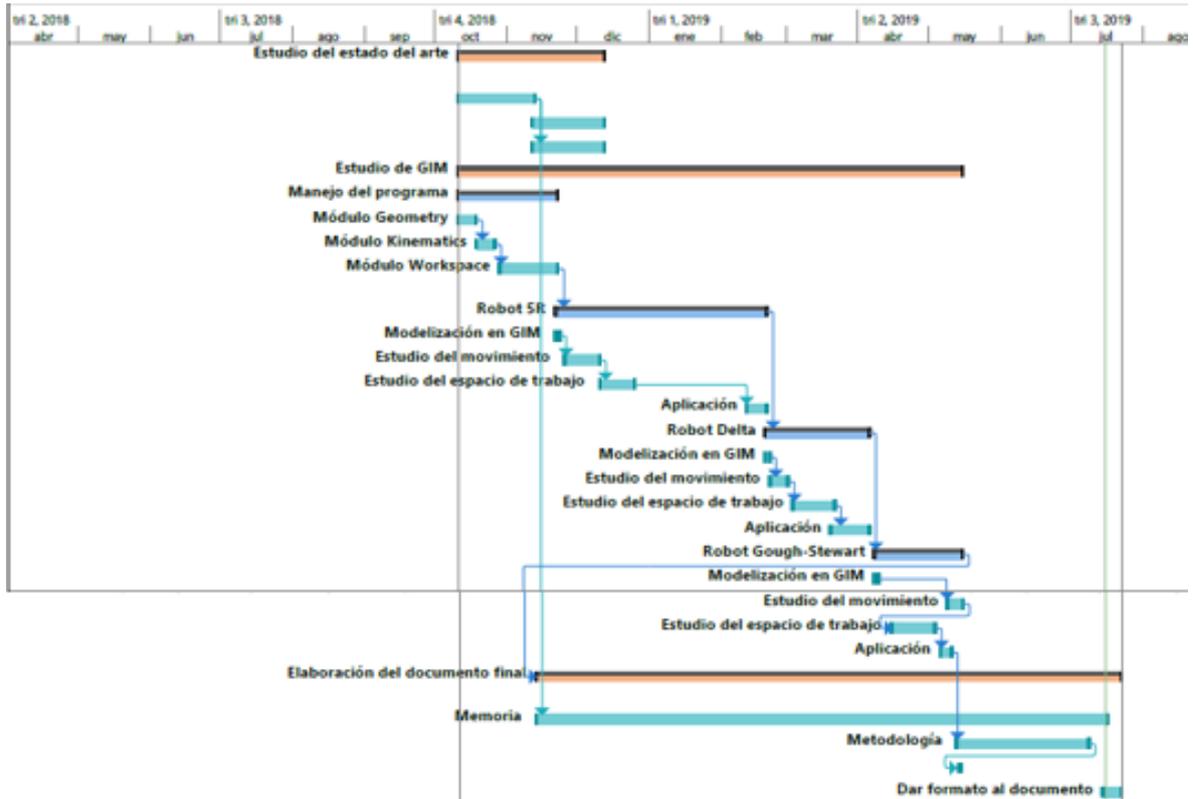


Ilustración 64. Diagrama Gantt

Aspectos económicos

En este apartado se va a proceder a hacer un cálculo del coste económico de la ejecución del proyecto. Para ello hay que tener en cuenta los recursos que han sido utilizados, tanto materiales como humanos.

En la siguiente tabla se realiza el cálculo de los costes finales del proyecto teniendo en cuenta las horas internas como las horas invertidas por el estudiante y las horas invertidas por la tutora del TFG para la supervisión y guía del mismo. Las amortizaciones hacen referencia al ordenador y a las licencias, ya que no solo se adquiere para la realización del proyecto y pueden ser utilizados en otros trabajos. Los gastos para los artículos o libros adquiridos y el material de oficina utilizado.

Cabe destacar que el concepto en el que hay que desembolsar una mayor cantidad de dinero es “Horas internas”. Esto se debe a que el proyecto se centra en realizar un estudio por ordenador y no es necesaria la fabricación de ningún componente, que sin duda encarecería el coste del trabajo.

Concepto	Unidades	N.º de unidades	Coste unitario	Coste total
<i>Horas internas</i>				6.125,00 €
Ingeniero Junior	h	200	25,00 €	5.000,00 €
Ingeniera Senior	h	25	45,00 €	1.125,00 €
<i>Amortizaciones</i>				1.250,00 €
Ordenador	año	1	300,00 €	300,00 €
Licencia Microsoft Office	año	1	100,00 €	100,00 €
Licencia Microsoft Project	año	1	850,00 €	850,00 €
Licencia GIM	año	1	0,00 €	0,00 €
<i>Gastos</i>				300,00 €
Bibliografía		1	200,00 €	200,00 €
Material de oficina		1	100,00 €	100,00 €
Costes directos				7.675,00 €
Costes indirectos	7%			537,25 €
Subtotal				8.212,25 €
Imprevistos	10%			821,23 €
TOTAL				9.033,48 €

Tabla 6. Análisis económico

Análisis de riesgos

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis de los posibles riesgos a los que puede se tenga que enfrentar el proyecto. Para llevar este proceso a cabo se han de identificar los riesgos y ver los efectos que podría tener cada uno de ellos en la elaboración del proyecto.

Además, se tratará de evaluar también a través de una matriz probabilidad-impacto cada uno de los posibles riesgos para poder llevar a cabo un análisis más exhaustivo. Así se puede priorizar según la gravedad de las consecuencias y realizar una planificación de cómo actuar si se da alguno de los riesgos.

- Información incorrecta(A): Al realizar un repaso bibliográfico del tema del estudio es posible encontrarse información errónea o que no haya estado supervisada y por lo tanto no sea correcta. La probabilidad es baja porque al ir aprendiendo sobre el tema se puede evaluar la veracidad de los datos y podría tener un impacto menor.
- Riesgos técnicos(B): Dentro de estos riesgos se engloban todos los problemas que puede dar el software o el ordenador, ya que todo el proyecto ha sido desarrollado en un único ordenador. Esto incluye averías en el ordenador o dificultades para el aprendizaje y manejo de los programas informáticos que han sido utilizados, también incluye posibles fallos del ordenador que no guarde los datos o que se borren por accidente. Tiene una probabilidad media, pero podría acarrear problemas catastróficos, por lo que tiene un impacto muy alto.
- Pérdida de datos(C): Durante el tiempo en el que se ha llevado a cabo el TFG se han acumulado muchos datos, artículos e información que puede perderse, también es posible la pérdida de los borradores o de los estudios del movimiento realizados con el software GIM. Este riesgo tiene una probabilidad muy alta ya que ha llegado a darse y un impacto muy alto, induce retrasos y pérdidas de tiempo en repetir análisis que ya habían sido realizados con anterioridad. Una posible solución es guardar archivos en la nube, en plataformas como Google Drive o One Drive
- Riesgos ajenos al proyecto(D): Consisten en riesgos externos al proyecto, es decir, riesgos que no se deben al propio desarrollo del proyecto. Incluye fenómenos de la naturaleza como incendios o inundaciones, fallos eléctricos y problemas de salud. Estos podrían provocar retrasos y pérdidas de datos. La probabilidad es muy baja, pero podría tener consecuencias graves.

		Impacto				
		<i>Insignificante</i>	<i>Menor</i>	<i>Leve</i>	<i>Grave</i>	<i>Catastrófico</i>
Probabilidad	<i>Imposible</i>					
	<i>Raro</i>		A		D	
	<i>Posible</i>					
	<i>Probable</i>				C	
	<i>Casi seguro</i>			B		

Tabla 7. Matriz probabilidad-impacto del análisis de riesgos

Conclusiones

En este apartado se va a proceder a la exposición de las conclusiones a las que se ha llegado una vez realizado el estudio del espacio de trabajo de los tres manipuladores paralelos y sus posibles aplicaciones.

Los manipuladores paralelos son un tipo de robots que comenzó a desarrollarse hace varias décadas, pero no ha llegado a tener un impacto en la industria tan grande como los robots serie, por lo tanto, con esto proyecto se pretende colaborar en el estudio y el desarrollo de estos robots para su utilización, la innovación y el desarrollo de los mismos.

Una de las razones por las que no se utilizan tanto se debe al reducido espacio de trabajo que tienen en comparación con otras clases de robots, por eso es muy importante realizar estudios en torno a él para la optimización de los Workspaces de los manipuladores paralelos como se ha realizado en este proyecto, así puedan ser utilizados en un número más amplio de aplicaciones, no solo industriales, si no también de ocio, para lo que primeramente fueron inventados, o para aplicaciones biomédicas o quirúrgicas.

Llevando a cabo el estudio del espacio de trabajo se ha llegado a la conclusión de que la complejidad de este no depende del número de modos trabajo ni de los GDL, esto complica el estudio del movimiento, pero no del espacio de trabajo. Al fin y al cabo, el workspace depende de la geometría del manipulador.

Por otra parte, también es importante comentar que a pesar de la desventaja que supone tener un espacio de trabajo reducido, los manipuladores paralelos tienen una serie de ventajas como la gran rigidez y, por tanto, mayor capacidad de soportar cargas altas o piezas robustas, además esto se ve potenciado por las altas velocidades a las que pueden trabajar y con la excelente precisión que lo hacen.

Estas ventajas producen que los robots paralelos sean utilizados en la simulación de vuelo o en el mecanizado de piezas, y están haciendo que se comience a aplicar en las impresoras 3D y se hagan estudios para su aplicación en la medicina.

Por último, también es de gran importancia el desarrollo de los manipuladores paralelos para la cuarta revolución industrial que se está dando en estos días llamada 'Industria 4.0', ya que ayudan a la automatización de los procesos y en la digitalización, que es en lo que se basa este concepto.

Referencias

- [1] J.-P. Merlet, Parallel manipulators: state of the art and perspectives, 2004.
- [2] A. Hernández, Cinemática de mecanismos, Análisis y diseño, Editorial Síntesis, S. A., 2014.
- [3] L. A. S. y. M. S. Saavedra, Matemáticas y robótica, 2005.
- [4] C. G. Jean-Pierre Merlet, Parallel Mechanisms and Robots, Springer Handbook of Robotics, 2008.
- [5] I. Bonev, The True Origins of Parallel Robots.
- [6] V. G. a. S. Whitetall, Universe tyre test machine, 1962.
- [7] K. Cappel, «Motion simulation». Us Patente RE27,051, 1971.
- [8] V. autores, «<https://www.milenio.com/opinion/varios-autores/universidad-politecnica-de-tulancingo/resena-historica-de-los-robots-parallel>,» 2017. [En línea].
- [9] H. F. Q.-R. L. A. M.-C. G. H. M. H.-L. C. M. G. D.-P. Miguel Díaz-Rodríguez, «Aplicación de los Robots Paralelos. Manipuladores Paralelos: Síntesis, Análisis y Aplicaciones,» 2018.
- [10] N. S. T. U. Y. T. M. M. Taiga Nakano, «A parallel robot to assist vitreoretinal surgery,»
] 2009.
- [11] O. A. C. P. a. A. H. Erik Macho, «Workspaces associated to assembly modes of the 5R
] planar parallel manipulator,» Bilbao, 2008.
- [12] E. A. R. G. C. A. P. C. Eliseo de Jesús Cortés Torres, «Desarrollo de un robot paralelo 5R
] para la impresión en 3D,» 2015.
- [13] ABB, «<https://new.abb.com/products/robotics/es/robots-industriales/irb-360>,» [En
] línea].
- [14] Indra,
] «https://www.indracompany.com/sites/default/files/indraa320_level_d_full_flight_simulator.pdf,» [En línea].
- [15] D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, 1965.
]
- [16] «US Patent no. 1,789,680».
]

[17 J. E. Gwinnett, «US Patent 1,789,680».
]

[18 J. E. Gwinnett, «US Patent 1,789,680».
]

Anexo I: Normativa

La normativa aplicable a los manipuladores paralelos es la norma *ISO 9787:2013* que define y especifica los sistemas de coordenadas, además provee de la nomenclatura y las notaciones para los manipuladores.

- <https://www.iso.org/standard/59444.html>

Por otra parte, la norma *ISO 8373:2012* define el vocabulario específico en relación con los robots y los aparatos robóticos tanto en aplicaciones industriales como en ambientes no industriales.

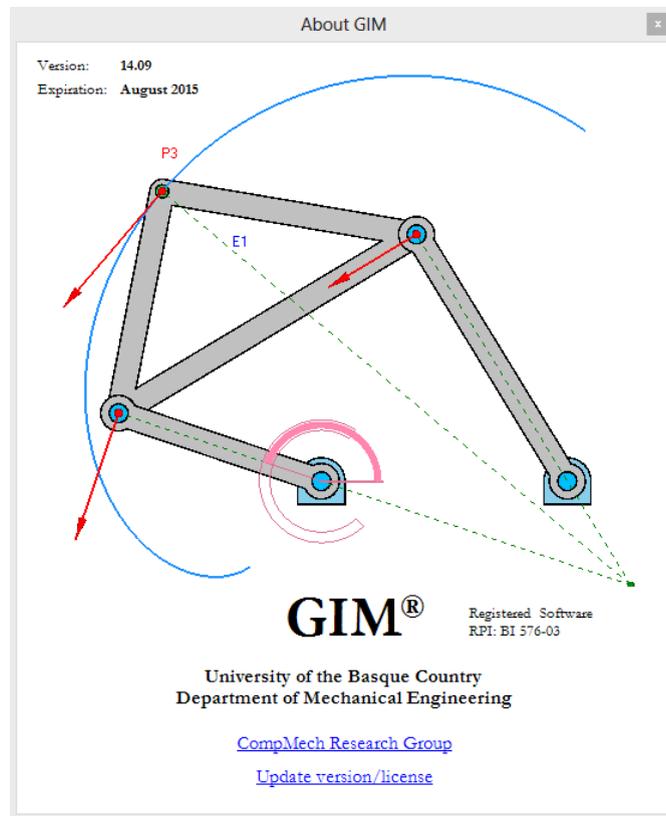
- <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>

Anexo II: Manual de usuario de GIM

En este anexo se va a adjuntar el manual de usuario de GIM, disponible también en la página web del grupo CompMech.

Tutorial of GIM Software

COMPMECH Research Group
www.ehu.es/compmech



Faculty of Engineering in Bilbao
Department of Mechanical Engineering
University of the Basque Country (UPV/EHU)

Contents

1 What is GIM?	3
1.1 Application of GIM software	4
1.2 Access to GIM software	4
2 Kinematic Analysis	5
2.1 Geometry module	5
2.1.1 Starting steps	5
2.1.2 Defining the geometry of the mechanism	7
2.1.3 Establishing rolling contact	8
2.1.4 Additional options	8
2.1.5 Library of mechanisms	9
2.2 Motion module	11
2.2.1 Defining the input conditions	12
2.2.2 Getting into the kinematics	13
2.2.3 Graphical plots	16
3 Dimensional Synthesis	18
3.1 First steps into Synthesis module	18
3.2 Dimensional synthesis methods	20
3.2.1 Precision points	20
3.2.2 Solid element guiding	21
3.2.3 Function generation	21
4 Statics	22
4.1 Main window of Statics module	22
4.2 Capacities of Statics module	24
5 Examples	26

1 What is GIM?

GIM is a registered software created by the COMPMECH Research Group, belonging to the Department of Mechanical Engineering of the University of the Basque Country (UPV/EHU). The software is intended for educational purposes, in particular destined to the field of kinematic analysis, motion simulation and synthesis of planar mechanisms, and also static analysis of mechanical structures.

This tutorial refers to GIM Software, Part I, which focuses on the kinematic analysis and motion simulation of mechanisms. Planar mechanisms with n -ary elements joined by revolute and prismatic pairs can be introduced. The position problem is solved iteratively using a numerical method, several of its conditions can be controlled and visualized. Inputs can be defined with a polynomial up to the quintic, so position, velocity and acceleration can be specified at motion extremes.

The program allows plotting the paths of points of interest, as well as the curvature center and curvature center locus of the trajectory, and also the area swept by specific elements of the mechanism can be depicted. Velocities and accelerations can be obtained and the corresponding vectors visualized as the motion is performed, also graphs and tables associated with this data can be plotted. Every kinematic construction can be represented: Instantaneous Center of Rotation (ICR), fixed and moving polodes, acceleration pole, main circles (inflection circle, return circle and Bresse circle), and so on (see illustrative example in Fig. 1).

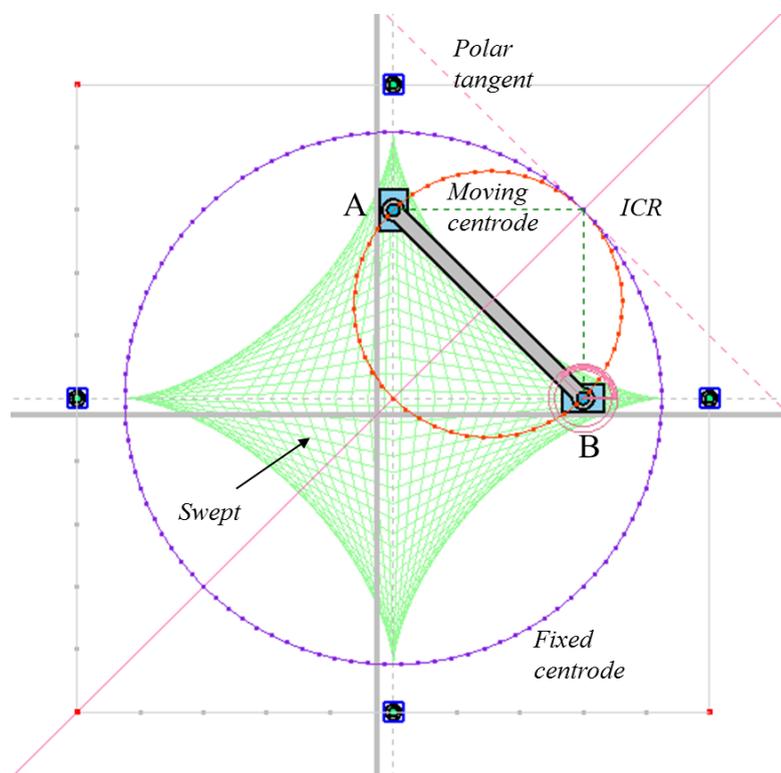


Figure 1: Illustrative example: PRRP mechanism

1.1 Application of GIM software

This software has been developed by COMPMECH Research Group with the aim of approaching the difficulties students usually encounter when facing up to kinematic analysis of mechanisms. A deep understanding of the kinematic analysis is necessary to go a step further into design and synthesis of mechanisms. In order to support and complement the theoretical lectures, GIM software is used during the practical exercises, serving as an educational complementary tool reinforcing the knowledge acquired by the students.

1.2 Access to GIM software

GIM software can be freely downloaded from the COMPMECH web site in the following link: <http://www.ehu.es/compmech/software/>

If you have used this software, please cite our ownership in any of your publications as follows:

1. In the bibliography cite:

Petuya, V., Macho, E., Altuzarra, O., Pinto, Ch. and Hernández, A. *Educational Software Tools for the Kinematic Analysis of Mechanisms*. Comp. Appl. Eng. Education. First published online: February 24, 2011. DOI: 10.1002 cae.20532. ISSN: 1061-3773.

2. In the acknowledgments cite:

The authors wish to acknowledge Alfonso Hernández, CompMech, Department of Mechanical Engineering, UPV/EHU, for the permission to use the GIM software. (www.ehu.es/compmech).

2 Kinematic Analysis

Regarding the kinematic analysis of planar mechanisms, GIM software has two main modules: **Geometry** and **Motion**.

- Geometry module is the one in charge of defining a specific design of the mechanism object of study.
- Motion module performs the kinematic analysis and motion simulation of the mechanism.

2.1 Geometry module

In Fig. 2 the starting main window associated with Geometry module is shown. In the following sections, the different options included in this module are explained in detail.

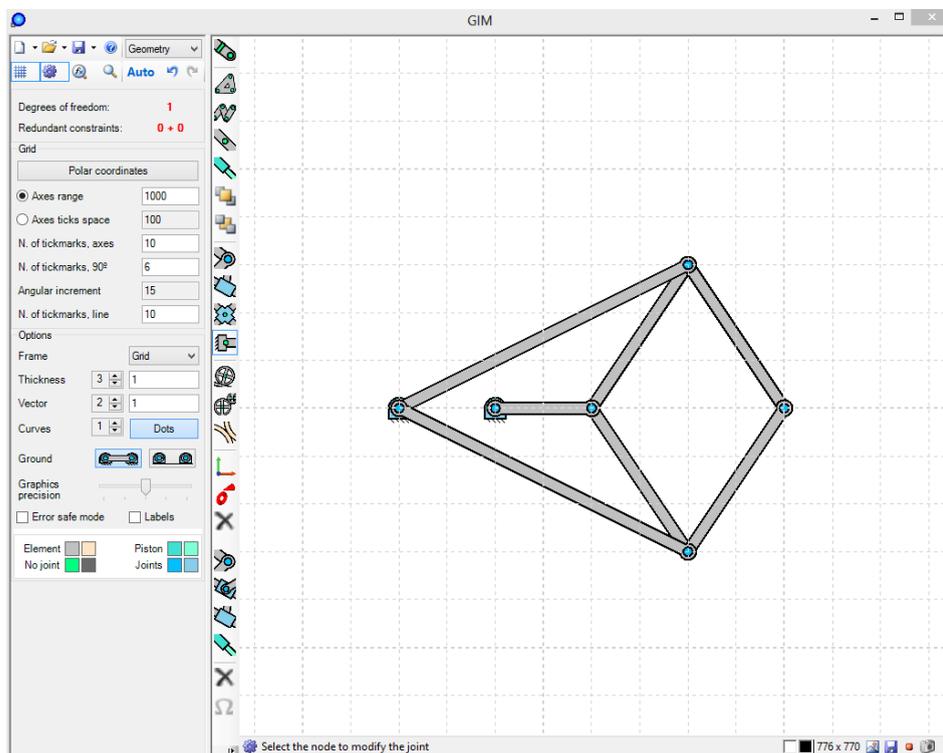


Figure 2: Main window of Geometry module

2.1.1 Starting steps

On the left-hand side of the main window several options appear. The icons located at the upper left-hand corner serve to perform common actions, such as creating a new document, open an existing document or saving the work. Just below, a second bar contains some other icons which display two specific menus, as shown in Fig. 3.

The first one, *Grid* menu (see Fig. 3 left), has the following options:

- *Polar coordinates*: serves to define the design of the mechanism using polar coordinates.
- *Axes range*: permits defining a specific range for the grid axes.
- *Axes ticks space*: serves to define the number of tickmarks appearing in the grid.

It also allows to vary the number of tickmarks appearing in the axes. If the Grid menu is selected the points that will serve to define the geometry of the mechanism will be adjusted to the axes of the grid.

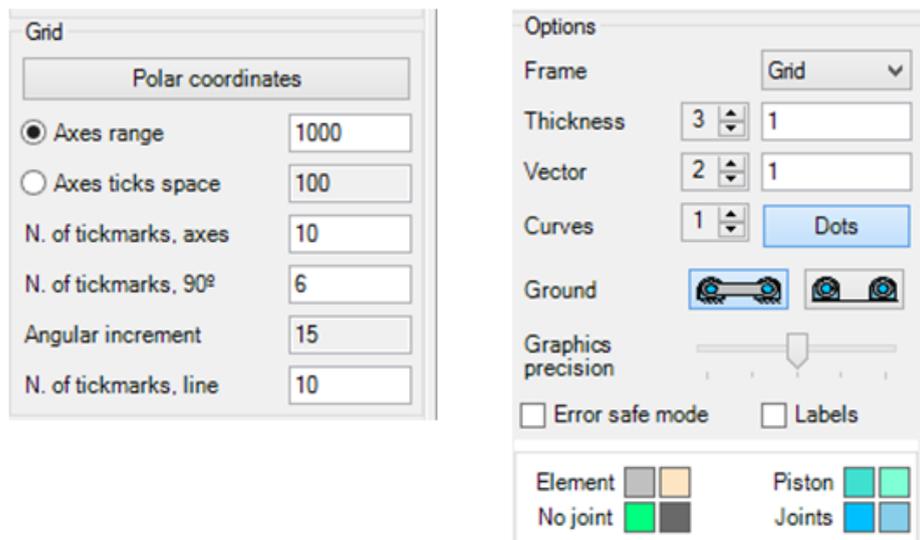


Figure 3: *Grid* and *Options* menus of Geometry module

The second menu, *Options* menu, (see Fig. 3 right), adds the following possibilities:

- *Frame*: it includes three possibilities. The default one, *Grid*, displays a full grid all over the drawing window. Another option is *Axes*, which displays the two principal axes XY of the grid. Finally, if *None* is selected no grid is shown.
- *Thickness factor*: it permits modifying the thickness of the elements.
- *Graphics precision*: it permits modifying the precision of the graphics displayed.
- *Error safe mode*: it avoids closing the program if some error occurs.
- *Ground*: it offers two possibilities to visualize the ground.
- *Labels*: selecting this option enables displaying the labels of each node, element and joint of the mechanism.
- *Colors*: it shows the color legend of each elements and joint type.

2.1.2 Defining the geometry of the mechanism

In this section, it is explained how to define a specific design of a mechanism under study. To do so, the designer will use the icons included in the vertical bar on the left-hand side of the drawing screen. As shown in Fig. 4, these icons serve for: creating the nodes of the mechanism, creating the elements, defining the type of joints (revolute or prismatic joints can be established), establish the fixed joints, modifying or deleting elements, etc.

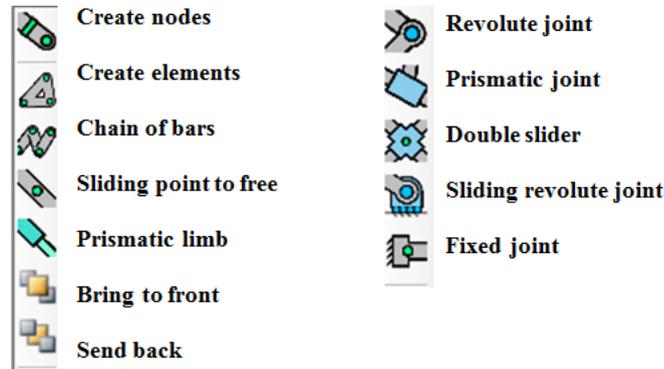


Figure 4: Icons included in Geometry module to design a mechanism

The process to depict the mechanism is very simple: select the desired icon and locate the cursor mouse on the drawing screen. In general, the basic design process consists in: *first*, create the nodes of the mechanism; *second*, define the elements between the established nodes and *finally*, define all the joint types.

- **Nodes:** To create the nodes just select the corresponding icon named *Create nodes*, and then, having the mouse cursor on the drawing screen, just click on the desired location. Note that it is also possible to define specific (x,y) coordinates of the node by writing the numerical values on the boxes that appear at lower left-hand corner once the *nodes* icon has been selected.
- **Elements:** Once the nodes have been depicted, the elements can be created. To do so, select the *Create elements* icon, and again move the mouse cursor to the drawing screen. Click once on the first node forming the element, and click **twice** on the last node of the element.
- **Kinematic joints:** To define the kinematic joints of the mechanism just select the corresponding icon (revolute joint, prismatic joint, double slider or fixed joint) and, having the mouse located on the drawing screen, click on the corresponding node. It must be taken into account that to establish a double slider joint it is necessary to previously define two bars. Then, once the double slider icon is selected, click on the bars and the slider will be automatically created in the intersection point between the bars.

As it can be seen in Fig. 4 there exist other options such as bring to front or back any element, establish a prismatic limb, create a chain of bars, etc.

2.1.3 Establishing rolling contact

The software permits the user to analyze a special case consisting in the rolling contact between two elements, these being a disk and a line or between two disks. Besides, it is also possible to transform the rolling contact into a cam joint. For that, the three icons appearing in Fig. 5a must be used.

One important thing is that the first action is to define two elements, in particular two bars. Then, once the bars have been created, the user has to select the icon associated with the case he/she is interested in. For example, if we are interested in studying the rolling contact between a disk and a line, the first icon of Fig. 5a has to be selected. By following the instructions indicated in the lower part of the window, the user first has to click on one of the bars (that will be transformed into a disk) and then clicks on the other bar (which will constitute the line). The radius of the disk will be automatically established by the program in order to achieve the contact among the two elements. An example of this type of contact is shown in Fig. 5b.

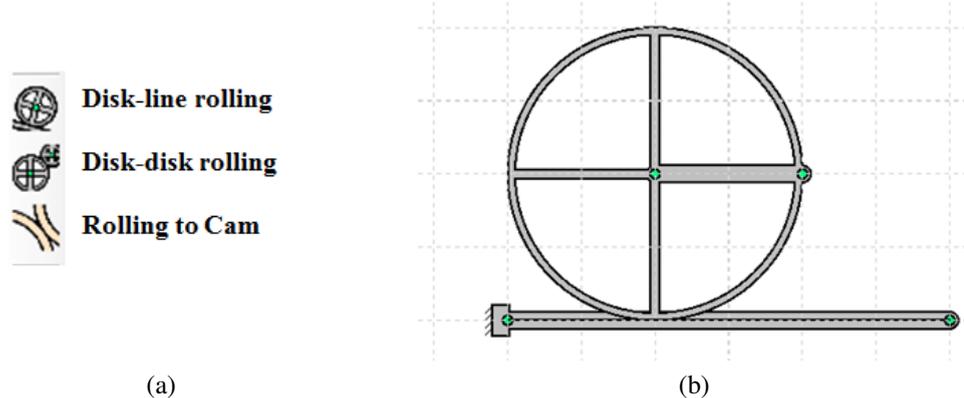


Figure 5: (a) Options of rolling contact; (b) Example of disk-line rolling

As said, the software offers two additional possibilities. One of them is to establish a disk-disk rolling contact. The steps for doing that are the same ones that have been previously explained but selecting the corresponding icon (the second icon in Fig. 5a). The second option is to transform the rolling contact into a cam contact. First, follow the steps to achieve a disk-line or a disk-disk contact, and second, select the last icon of Fig. 5a. Notice that the color of the disk will change into orange, which indicates that the cam contact has been established. An example of a cam contact is shown in Fig. 6.

2.1.4 Additional options

Once a specific mechanism has been defined by the user, which implies that all the elements have been created and all the kinematic joints have been properly defined, the program offers additional options that are displayed in Fig. 7.

On the one hand, the icons at the left enable to set the origin of the fixed frame at any point of interest, to modify the location of any node and to delete any node or element.

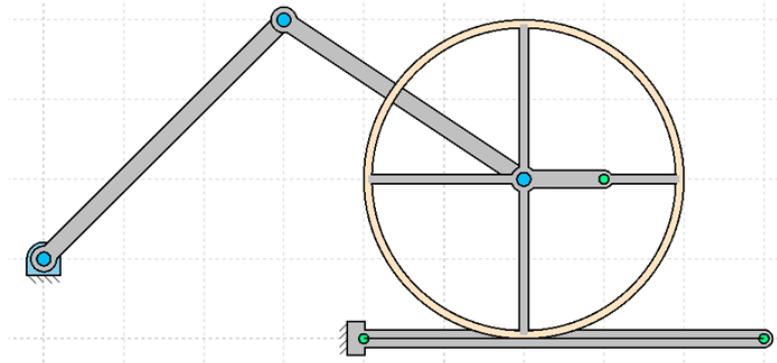


Figure 6: Example of cam contact between a disk and a line

On the other hand, the icons at the right can be used to vary geometric dimensions of the mechanism. First, we have to select the constraint that we want to keep fixed (the upper icons) and then, selecting the last icon, we can edit any of the dimensions and parameters that are not fixed.



Figure 7: Additional options in *Geometry* module

An example regarding the modifying of the dimensions of a mechanism is shown in Fig. 8. The *Absolute angle constraint* icon has been chosen in order to fix the angle colored in red in the figure. Then, selecting the *Edit* icon, all the possible dimensional parameters that can be modified appear in green color. The values of the parameters can be inserted in the left-hand side box of the edit constraint.

2.1.5 Library of mechanisms

Many types of planar mechanisms are included in a library that can be accessed with the *Open* icon at the top. One, two or three degree-of-freedom mechanisms are available, their geometry being completely defined so that the kinematic analysis of the mechanism can be directly done. Besides, some types of structures are included in the library that are related to the *Statics* module.

A preview of some types of planar mechanisms that can be found in the library is shown in Fig. 9. Once a specific mechanism of the library has been selected, it is automatically opened in *Geometry* module. If the user wants to vary any of its dimensions,

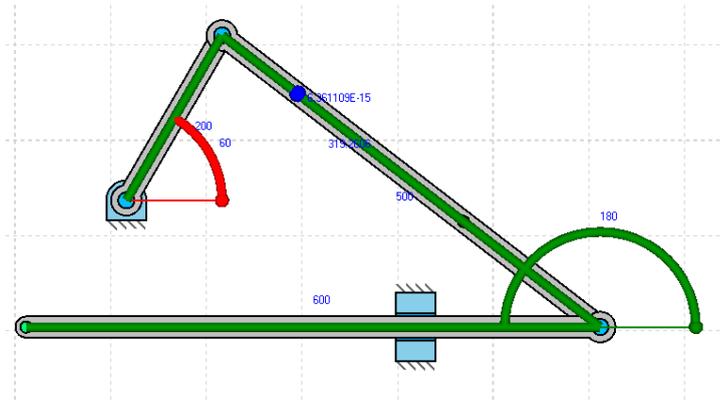


Figure 8: Modifying the geometric dimensions

this can be done by following the instructions already explained in Section [2.1.4](#)

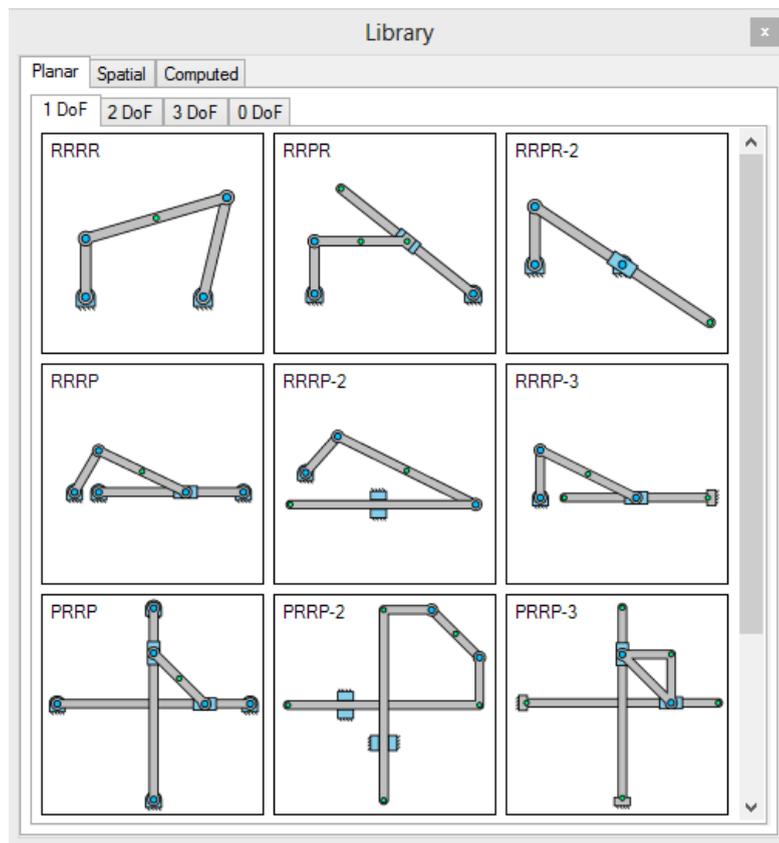


Figure 9: Library of mechanisms

2.2 Motion module

Motion module is the module in charge of carrying out the motion simulation and kinematic analysis of a planar mechanism under study. The user can access this module only once the geometry of the mechanism has been completely defined in Geometry module. To get into Motion module, just select the option *Motion* from the display menu on the upper bar of the main window.

In Fig. 10, the starting main window associated with Motion module is shown, using the four-bar mechanism as an illustrative example.

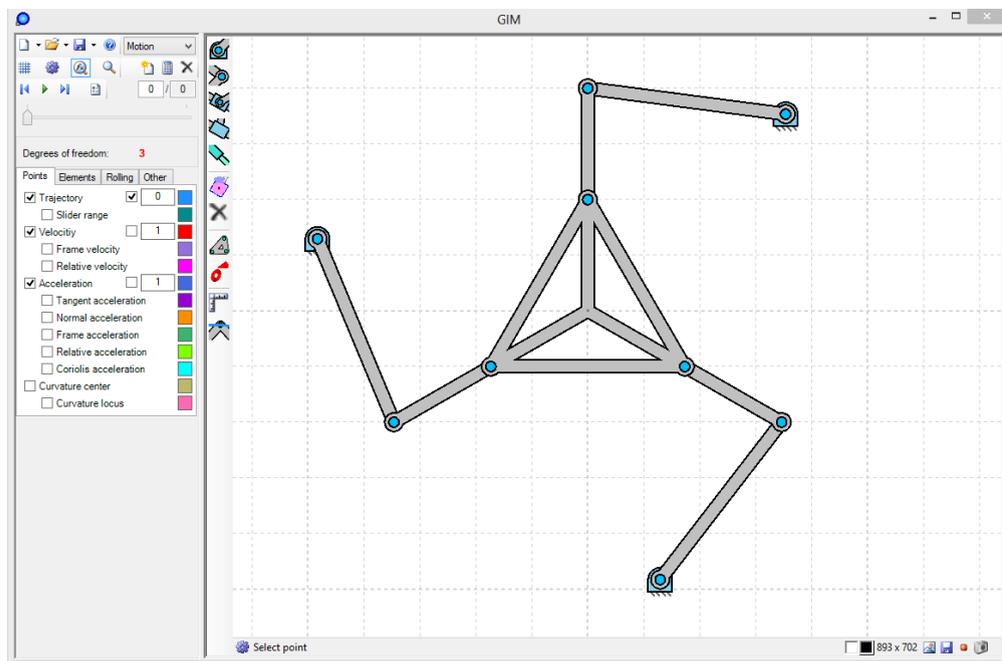


Figure 10: Main window of Motion module

This screen contains three main parts:

1. The vertical bar close to the drawing screen in which several icons appear so as to define the inputs' motion. The first five icons serve to define the inputs of the mechanism. The inputs are: fixed rotation actuator, floating rotation actuator, slider R actuator, slider actuator and piston actuator. Besides, the next icons are used to modify or delete any actuator, define the reference element and modify the coupler position. The two last icons permit selecting specific elements or nodes, and showing graphs respectively.

The way the input conditions has to be established is detailed in Section 2.2.1.

2. The top horizontal bar containing the controls of the motion simulation (play/pause, next step, previous step). Besides, just below the motion controls, it is displayed the number of degrees of freedom of the mechanism.
3. Four menus named **Points**, **Elements**, **Rolling** and **Other**. This is the main part of the Motion module, as it contains all the options that can be visualized in relation

to important kinematic features of the mechanism, as for example, velocities and accelerations, points' trajectory, Instantaneous Center of Rotation (ICR), fixed and moving polodes, main circles, rolling contact properties, and so on (see Fig. 11).

Detailed explanation of the operation of this part is given in Section 2.2.2.

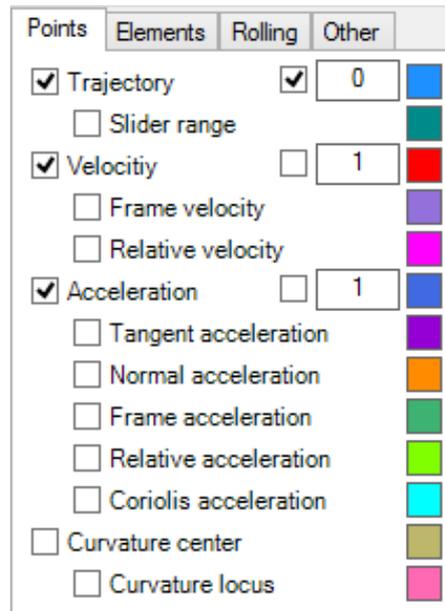


Figure 11: Menu of Motion module

2.2.1 Defining the input conditions

The first step to proceed with the kinematic analysis of a mechanism under study is to define the input(s) of the mechanism. For a n -DOF mechanism, n number of inputs must be established. As highlighted in Fig. 12, the icons in the vertical bar serve to define the following type of inputs: fixed rotation actuator, floating rotation actuator, slider rotation actuator, slider actuator and piston actuator.

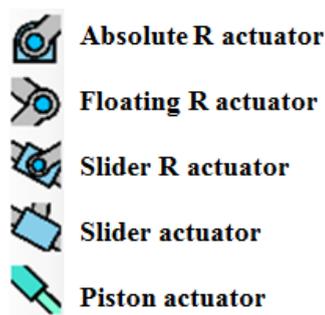


Figure 12: Vertical bar of Motion module

By using the four-bar mechanism as an example, let us choose one of the fixed revolute joints as the actuated one, as shown in Fig. 13a. The process is very simple, first select any of the icons of the vertical bar associated with the input you want to specify, and then click on the corresponding input joint of the mechanism. Next, define the characteristics of the input (position, velocity, acceleration) by establishing the desired parameters on the right-hand side box menu, as shown in Fig. 13b.

The default input option consists in a linear increment of position, that is, constant velocity. However, the characteristics of the input actuation can be varied by the user, by modifying the parameters of position, velocity and acceleration displayed in the menu of Fig. 13b. A polynomial up to the quintic can be specified. The graphs on the right-hand side are displayed according to the established input conditions.

2.2.2 Getting into the kinematics

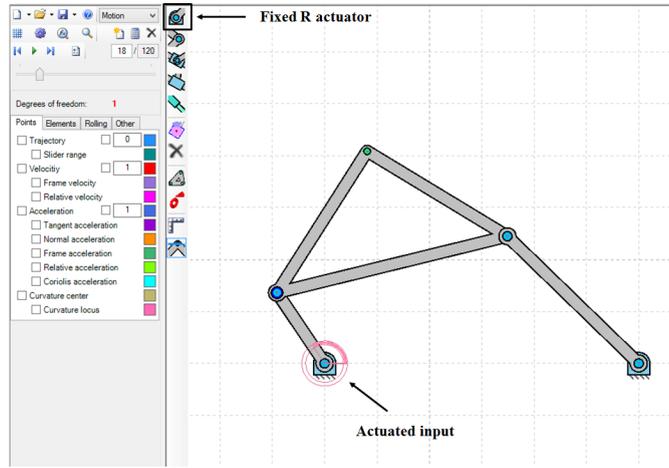
Once the input (or inputs in the case of more than one DoF) of the mechanism has been defined and the motion has been computed, the user is ready to analyze several kinematic properties of the mechanism.

As stated in Section 2.2, in particular focusing on the options of Fig. ??, there exist two menus regarding the kinematic properties that can be obtained. On the one hand, in relation to **points** of interest of the mechanism (**Points** menu), the following data can be displayed:

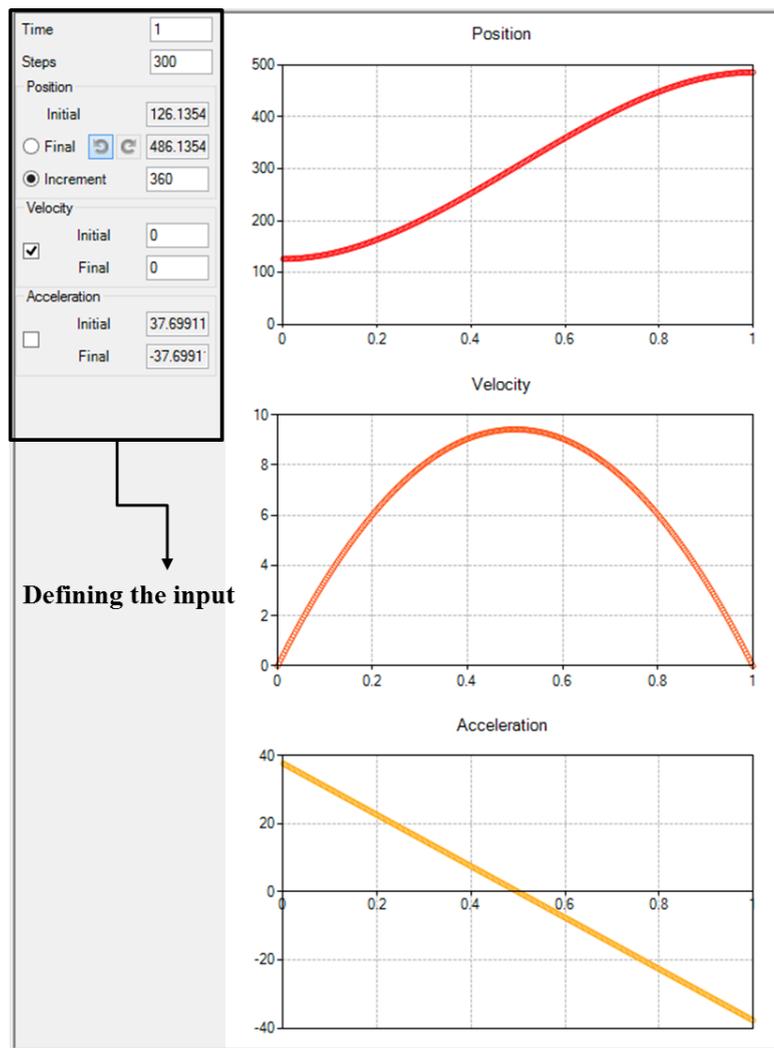
- Trajectory
- Velocity
 - Frame velocity
 - Absolute velocity
- Acceleration
 - Tangent acceleration
 - Normal acceleration
 - Frame acceleration
 - Absolute acceleration
 - Coriolis acceleration
- Curvature center
 - Curvature locus

On the other hand, regarding the **elements** of the mechanism (**Elements** menu), the user can obtain the next features:

- Swept



(a)



(b)

Figure 13: Defining the input actuation: (a) selecting the input; (b) Establishing the input conditions

- Angular velocity
- Angular acceleration
- ICR (Instantaneous Center of Rotation)
 - Pole velocity
 - Fixed centrode
 - Moving centrode
 - Centrode tangent
- ICA (Instantaneous Center of Acceleration)
 - Components
 - Inflection circle
 - Inversion circle
- Line envelope
 - Return circle

In addition to this, if any mechanism including a **rolling contact** has been established, there exists another menu named **Rolling** which allows the user to analyze the following options:

- Contact motion
- Contact tangent
- Contact velocities
- Contact accelerations
- Contact point trajectory

In order to visualize any of the aforementioned options (or various options simultaneously) it is just needed to click the box (or boxes) associated with the desired option included in *Point* or *Element* menu, and then select the point or element of interest.

An illustrative example is shown in Figs. [14](#) and [15](#). In Fig. [14](#), some properties of a point of interest, in this case the coupler point **P**, are displayed: the velocity and acceleration, its trajectory and the curvature center of the trajectory. Figure [15](#) displays significant kinematic features associated with a specific element, in this case the moving platform: the ICR, and the fixed and moving centrodes.

It is essential to *remark* that all of the kinematic features can be visualized not only for a certain position but all along the motion of the mechanism. In order to get this, just press the play button included in the motion controls.

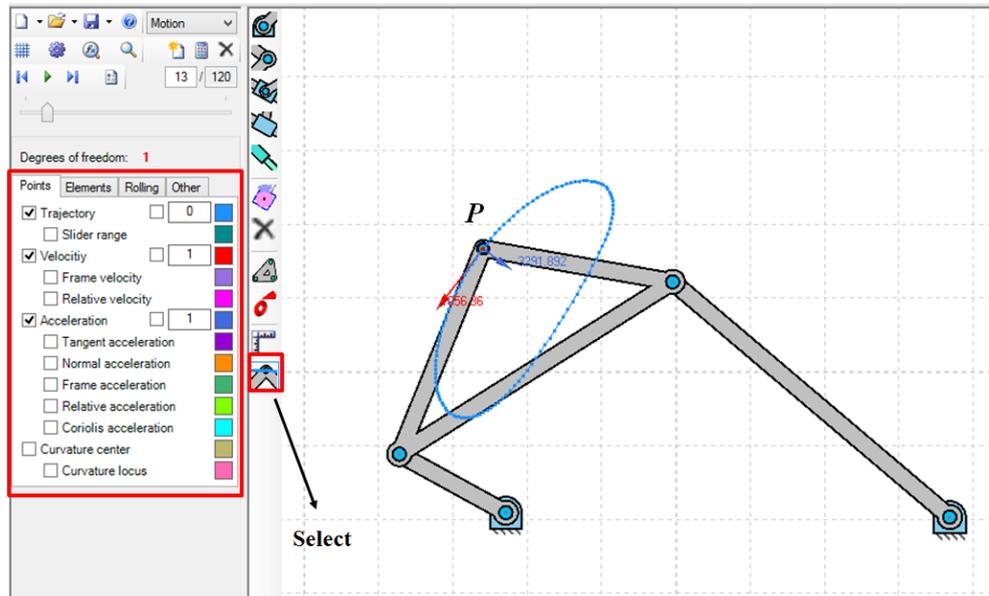


Figure 14: Showing kinematic properties of the coupler point

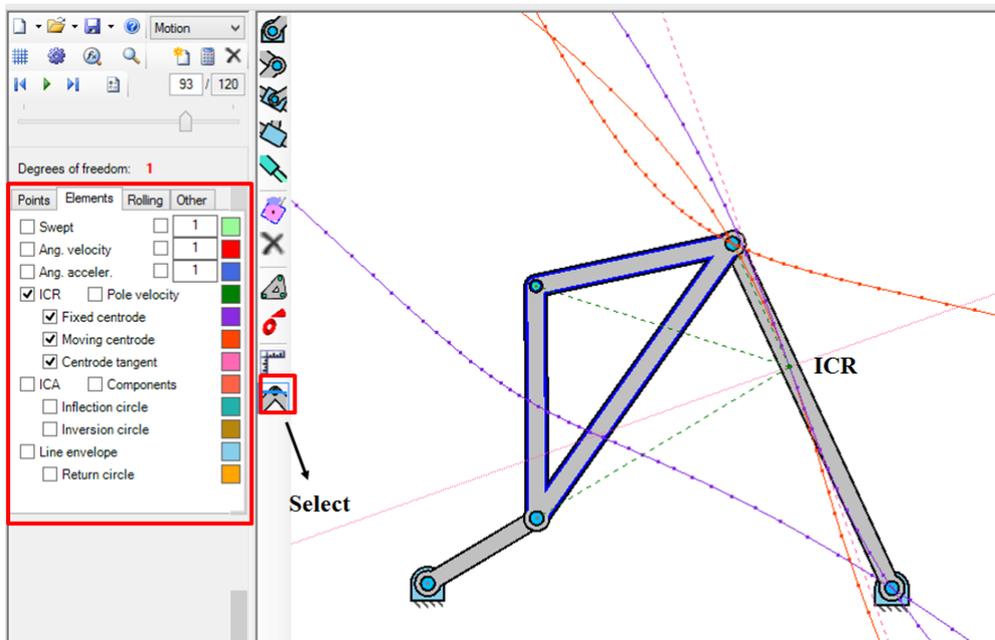


Figure 15: Showing kinematic properties of the moving platform

2.2.3 Graphical plots

Motion module allows to represent the graphs of features associated with points or elements. These graphics are obtained by selecting the icon indicated in Fig. 16, which displays the menu also shown in the figure. This menu is divided into the characteristics of points and the ones associated with elements.

With respect to points, the following graphs can be obtained:

- Coordinates

- Velocity
- Acceleration
- Tangential acceleration
- Normal acceleration
- Curvature Center
- Curvature radius

And regarding the elements:

- Angular velocity
- Angular acceleration
- ICR
- Pole velocity
- IC of acceleration

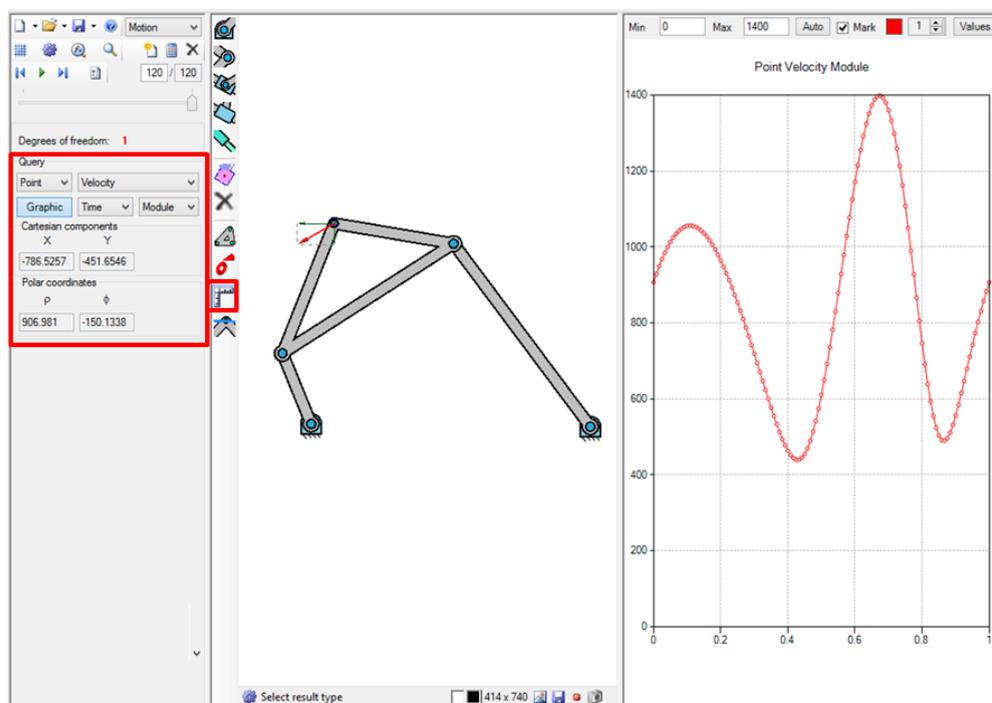


Figure 16: Obtaining graphs of features associated with points or elements

3 Dimensional Synthesis

Until now the two modules named Geometry and Motion have been deeply explained. GIM software also incorporates a module intended for dimensional synthesis of planar mechanisms.

This module, named Synthesis, can be directly accessed from the top menu. In particular, this module analyzes the four-bar mechanism, which is displayed in the drawing screen when the module is opened (see Fig. 17).

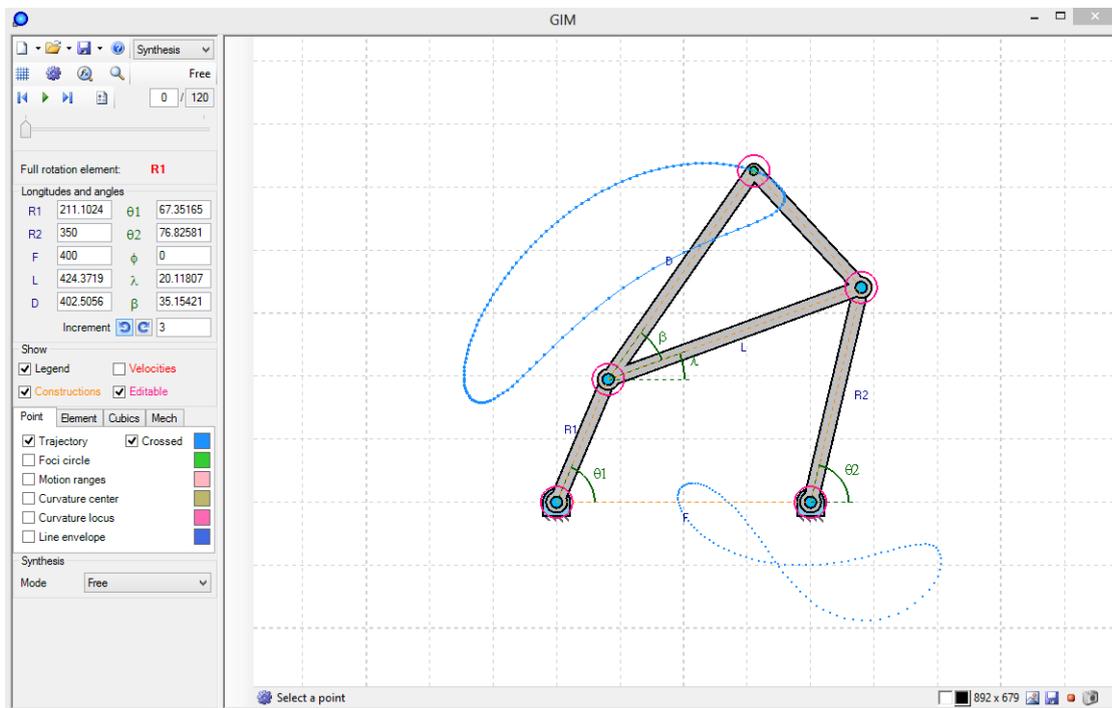


Figure 17: Main window of Synthesis module

All the dimensional parameters and the actuators that define the inputs of the mechanism can be visualized in the screen. The numeric values of these parameters appear on the left-hand side column, as shown in Fig. 18a. To vary the dimensions the user can directly type the values in the corresponding box, or make use of the *Editable* option. The latter option is shown in Fig. 18a. If the icon is selected, some pink circles appear on the mechanism. By clicking in any of these circles the corresponding location of the node can be modified, and so the associated longitudes and angles.

3.1 First steps into Synthesis module

On the left column, at the bottom, four menus are displayed. The first two of them are named *Point* and *Element* respectively. They show many kinematic properties of points of interest and of different elements. They have similar options to the ones included in Motion module and that have been already analyzed in Section 2.2. Additionally, they can show the trajectory of the end-effector (two trajectories if the crossed solution of

Longitudes and angles			
R1	211.1024	$\theta 1$	67.35165
R2	350	$\theta 2$	76.82581
F	400	ϕ	0
L	424.3719	λ	20.11807
D	402.5056	β	35.15421
Increment			3

Show

Legend Velocities

Constructions Editable

(a)

Point	Element	Cubics	Mech
<input checked="" type="checkbox"/>	Cubic of stationary curvature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Pivot point curve	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Ball point	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10 x 100 points			
Synthesis			
Mode Free			

Point	Element	Cubics	Mech
<input type="checkbox"/>	Crossed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Cognate 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Cognate 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Translate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Synthesis			
Mode Free			

(b)

Figure 18: (a) Longitudes and angles; (b) *Cubics* and *Mech* menus

the four-bar establishes a different path) and the motion range of each bar.

The remaining two menus are called *Cubics* and *Mech*. They are displayed in Fig. 18b. The first one allows the user to depict the cubic of stationary curve and the pivot point curve, and also the location of the Ball point. Bear in mind that by using the controls at the top, the motion of the mechanism can be visualized and simultaneously the evolution of the aforementioned curves along the motion.

In *Mech* menu many interesting options are available. Firstly, the crossed architecture of the four-bar can be displayed and also the two cognates. When any of these options is selected, the icon named *Change* appears which allows the user to change into the crossed solution or into any of the two cognates. Secondly, selecting the *Translate* icon, a translation bar connected to the end-effector of the original mechanism and to the end-effector of any of the cognates is achieved. By clicking twice on this icon, the redundant elements of the whole generated mechanism are eliminated.

3.2 Dimensional synthesis methods

3.2.1 Precision points

In GIM software there are also implemented various graphical constructions to get the design of the four-bar that meets three, four or five precision points. To do that, in the left column, select the mode called *Precision points* and using the submode icon select the number of points of interest: 3, 4 or 5. In Fig. 19, an example with three precision points is shown. The three precision points are plotted in red, and the trajectory of the coupler point is depicted in blue. Besides, the graphical constructions that are inherent to the graphical method are shown. If the user wants to see only the trajectory, the constructions can be eliminated just by inactivating the corresponding icon in Fig. 18a

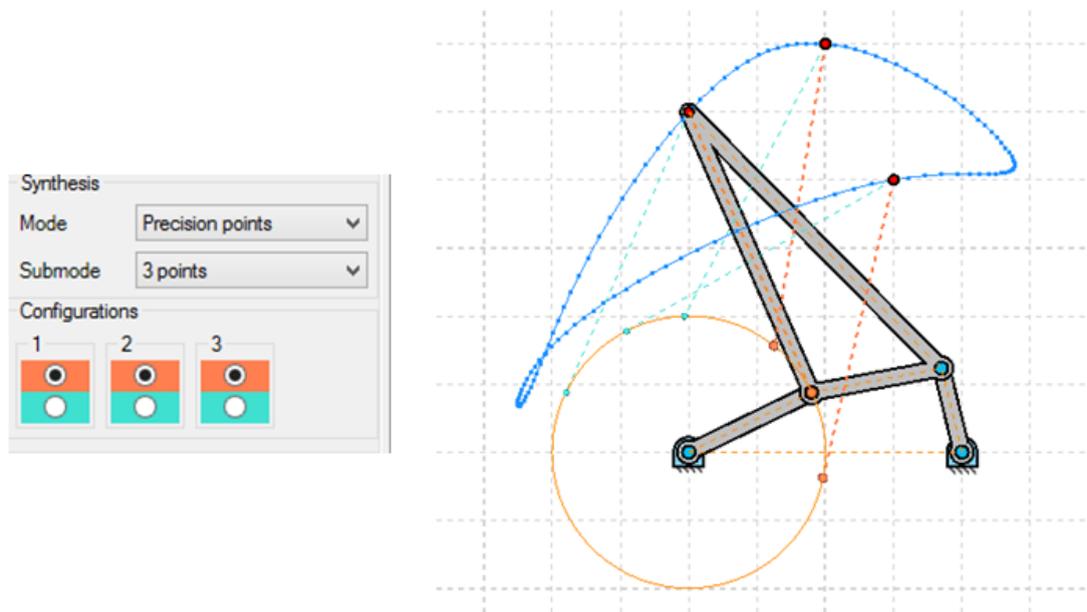


Figure 19: Cubic of stationary curve and the pivot point curve

Note that the graphical constructions achieve more than one solution, depending on the intersection points that are selected (depicted in blue or orange in Fig. 19). To visualize all the possible combinations the user can activate any of the configurations that appear below the submode icon. At the time of changing the combination the resulting mechanism is automatically displayed on the screen. Of course, changing the configurations implies obtaining a different geometry of the four-bar and thus, a different trajectory of the coupler point. As an example, by choosing two different combinations, the resultant mechanism and the corresponding trajectories are shown in Fig. 20. Note that the location of three precision points has not been altered. The user can visualize all the possibilities and chose the optimum geometry that best fits the desired trajectory.

Regarding the number of precision points, not only three but also four or five precision points can be established. The process is similar to the one explained. In the submode icon the user has to select 4 or 5 precision points, and the four-bar mechanism appears automatically in the drawing screen. Again, the different configurations are

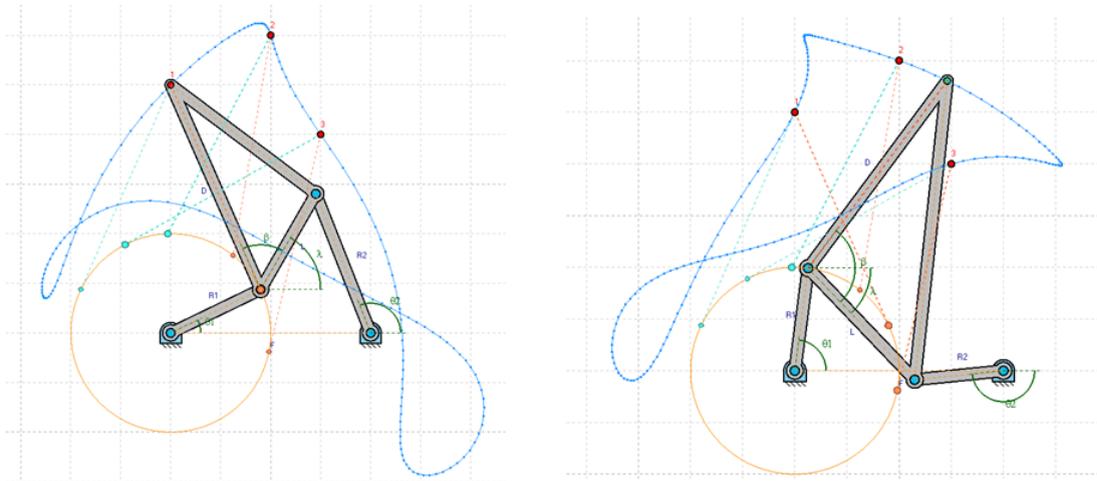


Figure 20: Different trajectories for three precision points

available, and the resulting mechanism can be visualized.

In relation to the location of the precision points, for the three cases (3,4 or 5 points), the points' location is initially established by the program as a default position. In the three cases their location can be changed just by clicking in any of the points and then, moving the mouse to wherever we want or typing the exact location in the boxes located at the left column.

3.2.2 Solid element guiding

The graphical constructions to perform the dimensional synthesis for solid element guiding are also implemented in the software. Three options are available: 3 postures and moving, 3 postures and fixed, and 4 postures. The difference between the first two cases lies in the possibility of varying the location of the fixed joints (the first case) or maintaining them at the same position (the second case).

In Fig. [21](#), an example of *3 postures and fixed* can be visualized. The three locations of the solid are plotted in pink. The end-point of the solid is colored in red, and by clicking in it, the position and orientation of the solid can be varied. In this way, we can modify their location and the program displays automatically the resultant mechanism. Another example with four postures is shown in Fig. [22](#).

3.2.3 Function generation

The method known as Function generation is used whenever we want the end-effector to follow a trajectory as a function of the input of the mechanism. In the case of the four-bar, this relation is found between the angular values of the input and output actuators. To set these values, the user has to select Function generation in the Mode icon. Then, a menu is displayed in which the angular values of the input angle θ_1 and the output angle θ_2 can be typed. Besides, the possibility of establishing reference values exists.

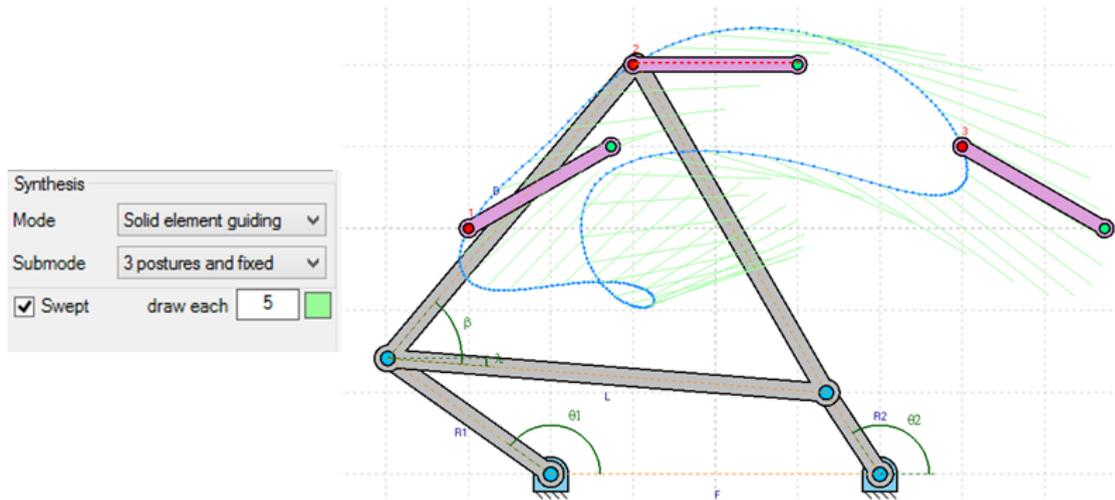


Figure 21: Solid element guiding with 3 postures

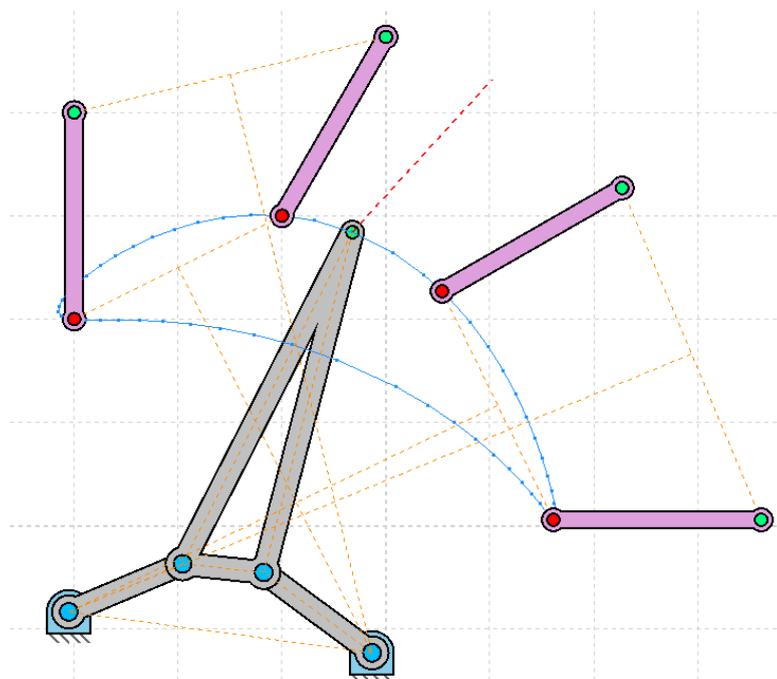


Figure 22: Solid element guiding with 4 postures

4 Statics

4.1 Main window of Statics module

GIM software incorporates an additional module intended for static analysis of several planar structures, specially planar trusses.

As in previous cases, the first step is to define the geometry of the truss, which is done using the Geometry module and following the instructions given in Section 2.1.2. As an illustrative example, the planar truss shown in Fig. 24 will be analyzed. Before performing the static analysis of the truss it is essential to verify that the structure has zero

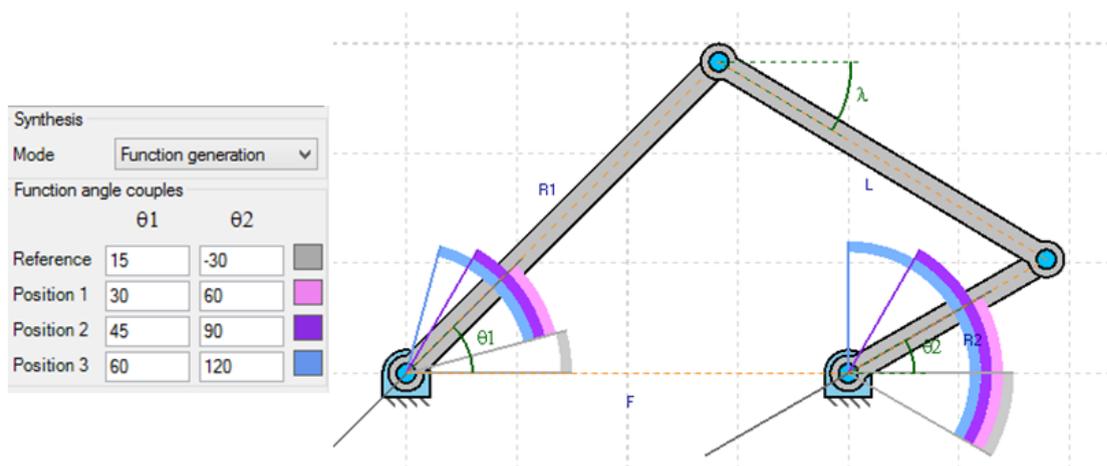


Figure 23: Example of Function generation

degrees of freedom. Otherwise, something has not been correctly defined and needs to be changed accordingly.

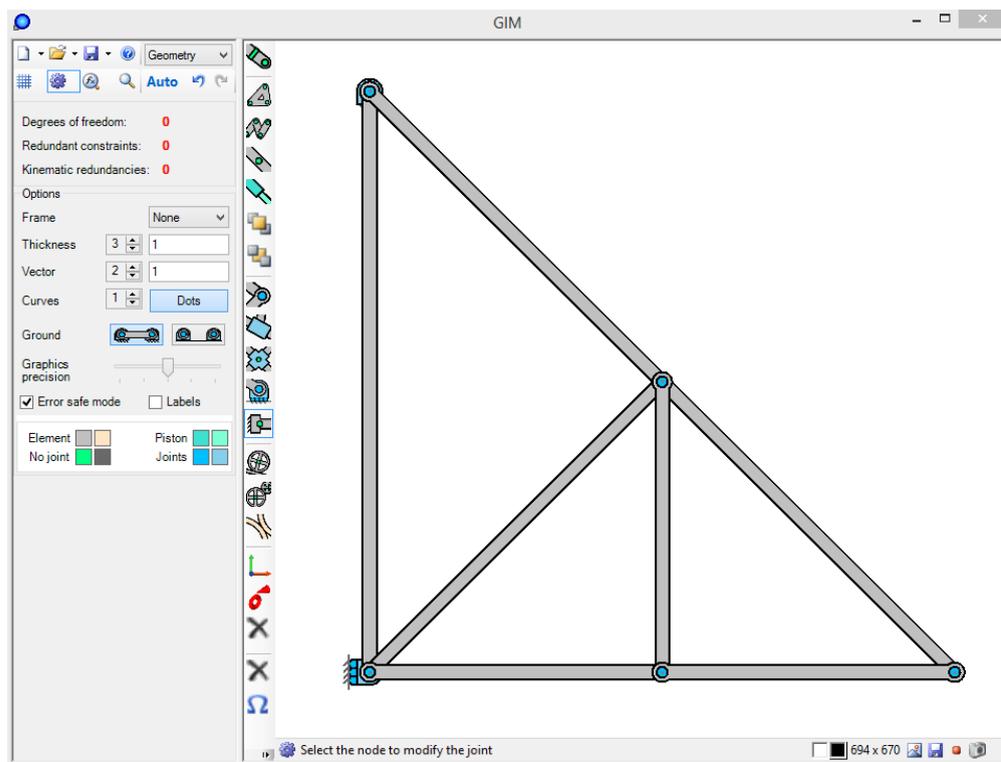


Figure 24: Illustrative example of a planar truss

The next step is to get inside Statics module, located at the displayable top menu in which all the main modules appear. By selecting Statics module a new screen in which the associated options appear will be created, as it can be observed in Fig. 25. The vertical bar closed to the drawing screen contains several options of Statics module which are the following:

- Creating new nodes
- Adding forces
- Adding moments
- Adding distributed forces
- Incorporating parabolic wires

4.2 Capacities of Statics module

An example of how to add a specific force on any of the nodes is shown in Fig. 25. The value of the force can be modified by specifying the corresponding values in the menu which appears at the bottom on the left-hand side. In this case, we have specified a unitary vertical force, from top to bottom, so the value is -1 in the vertical direction.

Similarly, moments can be applied to a node defined in any bar of the truss. For that, once the geometry of the truss has been created the user can define a point by selecting the *New node* option, and then clicking on the bar. Its location can be varied by activating the *Modify* icon.

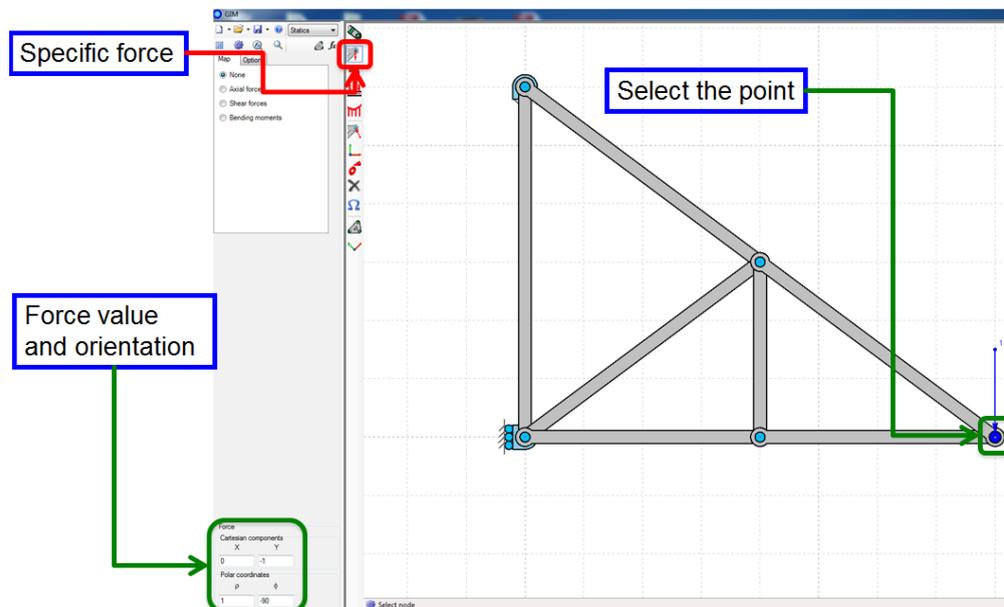


Figure 25: Adding specific forces

Besides, parabolic wires can be added to any bar of the structure. For that, the corresponding icon named *Parabolic wire* has to be selected, and then click on the nodes where the wire will have its starting and final point respectively. When activating the *Parabolic wire* icon, a new menu will be displayed at the bottom. This menu contains many related parameters that can be varied by the user, and they are automatically changed in the drawing screen.

The program permits also obtaining the *Free solid diagrams* for any of the bars and solids integrating the structure under analysis. The instructions to visualize these diagrams are shown in Fig. 26. Once the icon is activated, the user just clicks on the corresponding solid and the diagram will appear at the right-hand side.

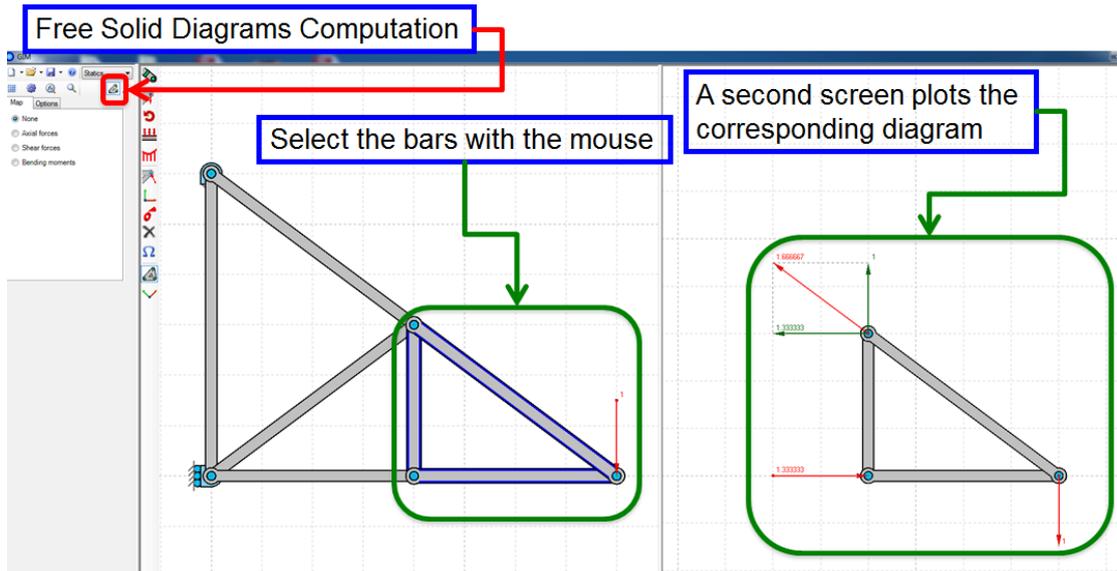


Figure 26: Obtaining free solid diagrams

On the other hand, the *Map* menu presents the following options:

- Axial forces
- Shear forces
- Bending moments

Selecting any of these options the values of the axial forces, shear forces or bending moments can be obtained and visualized on the drawing screen. Besides, an specific color is given for each value so that it is easily detected which bars have the same force or, for example, which ones suffer the maximum or minimum forces or moments.

Following with our example, if we select the option of *Axial forces*, their corresponding values will appear as shown in Fig. 27.

Many examples of planar trusses can be found in the library of the software. Select the option *Open Library*, at the top, and choose the option *0DoF*, where the geometry of many well-known planar trusses is already defined. Then, all the options of Statics module can be used to analyze the selected truss.

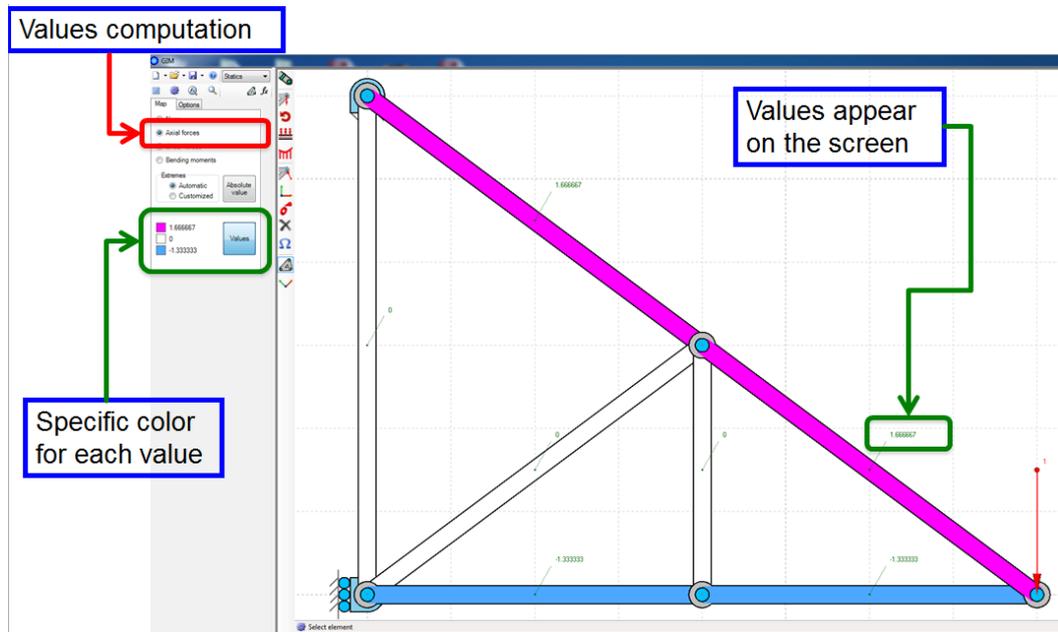


Figure 27: Values of axial forces

5 Examples

In the following link the user can find several videos illustrating various mechanisms that can be analyzed using GIM software.

<http://www.ehu.es/compmech/software/>

These videos, shown at the right-hand side of the web page, contain many examples explaining step-by-step how to create the geometry of the mechanisms, how to perform the kinematic analysis and visualize the motion of the mechanism, getting into the dimensional synthesis of the four-bar mechanism and perform static analysis of planar trusses.