

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***MANIPULADORES PARALELOS
ACTUADOS POR CABLES***

Alumno/Alumna: Araiz, Miranda, Pablo

Director/Directora: Frías, Hernández, Alfonso

Curso: 2017-2018

PABLO ARAIZ MIRANDA

Fecha: Lunes, 18, Junio, 2018

1

Contenido

1. RESUMEN TRILINGÜE	4
RESUMEN	4
LABURPENA	4
ABSTRACT	5
PALABRAS CLAVE	5
2. LISTAS DE ILUSTRACIONES Y TABLAS	6
2.1 ILUSTRACIONES	6
2.2 TABLAS	6
3. INTRODUCCIÓN	7
4. CONTEXTO	8
5. OBJETIVOS Y ALCANCE	9
6. BENEFICIOS DEL PROYECTO	10
7. ESTADO DEL ARTE	11
7.1 INTRODUCCIÓN A LOS MANIPULADORES PARALELOS	12
7.2 MANIPULADORES PARALELOS ACTUADOS POR CABLES	15
8. ASPECTOS IMPORTANTES DE LOS CDPM	17
8.1 Descripción del sistema robótico	17
8.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS CDPM	18
8.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CDPM	19
9. TIPOLOGÍA	20
9.1 TENDON ROBOTS	20
9.2 ROBOTS TENSÉGRICOS	22
9.3 ROBOTS DE CABLES SUSPENDIDOS	24
10. APLICACIONES	25
10.1 APLICACIONES DE ALTA VELOCIDAD	25
10.2 APLICACIONES A GRAN ESCALA	26
10.3 APLICACIONES MÉDICAS Y HÁPTICAS	27
10.4 DESARROLLO DE MACINISMO BIOINSPIRADOS	28

11. METODOLOGÍA	30
11.1 MODELADO CINEMÁTICO	30
11.1.1 ANALISIS DE DESPLAZAMIENTO	31
11.1.2 Análisis directo de desplazamiento	32
11.1.3 Análisis inverso de desplazamiento	33
11.1.3 Análisis de velocidad	33
11.1.4 Análisis de aceleración	34
11.2 MODELADO DINÁMICO	36
11.2.1 Modelo dinámico del elemento terminal	36
11.2.2 Modelo dinámico del actuador	38
11.2.3 Modelo dinámico del sistema	39
12. WORKSPACE	41
13. DIAGRAMA GANTT	42
13.1 TAREAS	42
13.2 HITOS	46
13.3 DIAGRAMA GANTT	47
14. PRESUPUESTO	49
15. ANÁLISIS DE RIESGOS	51
16. CONCLUSIONES	53
17. FUENTES DE INFORMACIÓN	54
18. ANEXO I: TAREAS	57

1. RESUMEN TRILINGÜE

RESUMEN

En este trabajo se realiza un informe sobre los manipuladores paralelos actuados por cables. Un manipulador paralelo es una cadena cinemática cerrada con una plataforma móvil conectada a una base fija mediante varias cadenas cinemáticas independientes. Si los actuadores que unen la base fija con la plataforma móvil son cables, entonces se denominan manipuladores paralelos actuados por cables.

Para su realización se ha recopilado toda la información posible ya sea de internet, de revistas de ingeniería o de libros de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) y se ha expuesto con la finalidad de que cualquier persona pueda acudir a este trabajo en busca de información. En él se puede encontrar información acerca de qué es un manipulador paralelo actuado por cables, qué características tiene, qué tipos hay, para qué se usan y cuáles son las ecuaciones que rigen su movimiento.

LABURPENA

Lan honetan kableen bidez eragindako manipulatzaille paraleloei buruzko txosten bat egiten da. Manipulatzaille paralelo bat: kate-zinematikoa itxita plataforma mugikor batekin base finko bati lotuta aparteko kate-zinematikoa batzuen bidez. Base finkoa plataforma higikorri lotzen dituzten eragingailuak kableak badira, kableen bidez eragindako manipulatzaille paraleloak deitzen dira.

Lana burutzeko interneteko, ingenieritza-aldizkarietako edo ETSIko liburuetako informazioa bilduko da, eta edozeinek informazioa bilduko da, eta edozeinek informazioa bila lan honetara etor dezake manipulatzaille paralelo zer den, zein mota dauden, zertarako erabiltzen diren eta zein ekuazio eraentzen dituen bere mugimendua bilatzeko.

ABSTRACT

This work deals a report about cable driven parallel manipulators. A parallel manipulator is a closed kinematic chain with an end-effector connected to a fixed base by several independent kinematic chains. If the actuators connecting the fixed base to the end-effector are cables, then it is called cable driven parallel manipulators.

For its realization, all posible information will be collected, wether from the Internet, engineering journals or books of the High Technical School of Engineering (ETSI), and it will be exposed so that anyone can go to this work searching for information. It contains information about what a cable driven parallel manipulator is, what characteristics it has, what types there are, what they are used for and what are the equations that govern their movement.

PALABRAS CLAVE

- Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI)
- Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
- Manipuladores paralelos actuados por cables (CDPM)
- Grados de libertad (GDL)

2. LISTAS DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

2.1 ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tipos de robots	12
Ilustración 2. Robot paralelo de Willard LV Pollard	13
Ilustración 3. Plataforma de Stewart	14
Ilustración 4. Robot paralelo Delta	15
Ilustración 5. Skycam	16
Ilustración 6. Modelo CDPM	17
Ilustración 7. Ejemplo de un TDR	20
Ilustración 8. The MACEYE. En la imagen se aprecia el obturador y el resorte, los cables y los tendones.	21
Ilustración 9. Cable Bowden	22
Ilustración 10. Ejemplo de Robot Tenségrico	23
Ilustración 11. The Robocrane	24
Ilustración 12. Robot FALCON.....	26
Ilustración 13. Prototipo CDPM para Contour Crafting	27
Ilustración 14. CAREX.....	28
Ilustración 15. The Eccerobot	29
Ilustración 16. Modelo cinemático	30
Ilustración 17. Modelo dinámico de la plataforma móvil.....	36
Ilustración 18. Modelo dinámico del actuador	38
Ilustración 19. Diagrama Gantt	48

2.2 TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre CDPMs y Manipuladores Paralelos Convencionales.....	18
Tabla 2. Presupuesto.....	49
Tabla 3. Matriz de Priorización de Riesgos	52
Tabla 4. Tareas	57

3. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por título: “Manipuladores Paralelos Actuados por Cables”. Es por ello, que este es el tema a tratar en el presente informe técnico en el que se recoge información sobre el tema y se presenta de manera que con la lectura de la información una persona pueda adquirir unos conocimientos básicos sobre dichos mecanismos.

Se ha empezado ubicando el trabajo junto con una descripción del mismo. A continuación se han expuesto cuáles son los objetivos que se buscan al realizar el informe y cuáles son los beneficios que aportarán. Además junto con los objetivos se establecen los recursos que se utilizan en la realización del trabajo.

Una vez presentado y ubicado el trabajo, se pasa a realizar el Estado del Arte donde se habla de la historia de los manipuladores paralelos y se introducen los manipuladores paralelos actuados por cables. Una vez introducidos estos, se realiza una descripción más detallada de dichos manipuladores donde también se comentan sus principales características y sus ventajas y desventajas. Después, podemos encontrar una distinción entre los tipos que hay y se analiza las aplicaciones en las que se usan estos mecanismos, explicando algún ejemplo.

Ya con la información dada, el lector puede hacerse una idea de lo que son los manipuladores paralelos actuados por cables y puede pasar a analizarla. En la metodología se explican las fórmulas que rigen el comportamiento cinemático y dinámico de los mecanismos estudiados. Además se hace un pequeño análisis de su espacio de trabajo (Workspace).

Finalmente, se realizan una serie de conclusiones sobre el trabajo donde se exponen las ideas más relevantes.

Después de las conclusiones se pueden encontrar las fuentes de información utilizadas para la realización del trabajo.

4. CONTEXTO

El presente trabajo se trata de un informe técnico sobre el tema manipuladores paralelos actuado por cables. Un manipulador paralelo actuado por cables es una cadena cinemática cerrada cuyo órgano terminal, o plataforma móvil, está conectado a la base mediante varias cadenas cinemáticas independientes [1]. Dicho informe se realiza haciendo uso de un ordenador, ya sea el propio del alumno o cualquiera de los disponibles en las salas de ordenadores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de la universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Lo que diferencia a los robots de cables de los otros manipuladores paralelos es que utilizan cables flexibles como actuadores. Un ejemplo de estos robots serían las cámaras que se usan en los estadios, también llamadas Skycam [2]. Estas cámaras están enganchadas a varios cables (ver figura 1) y, de esta manera, para moverlas de un punto del estadio a otro, solo es necesario que cada cable se alargue o se acorte.

Se ha realizado un estudio del estado del arte, seguido de información adicional de los mecanismos tratados: características, tipología, aplicaciones... Se ha terminado haciendo un estudio cinemático y dinámico de los mismos y con un breve análisis de su espacio de trabajo.

5. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo que se ha buscado en el presente TFG ha sido el de realizar un informe técnico sobre el tema ya mencionado, de manera que al desarrollarlo se adquieran unos buenos y amplios conocimientos del tema. De esta manera, cualquier persona que quiera o necesite estudiar dichos mecanismos podrá acudir al presente trabajo y obtener unos conocimientos básicos pero amplios del tema trabajado.

Este estudio técnico se ha realizado en profundidad, buscando toda la información necesaria para que el estudio sea completo y ofrezca una visión amplia en el que se explique detalladamente qué es un robot accionado por cables y cómo funciona. Además, se ha completado el trabajo haciendo un estudio cinemático y dinámico de un robot paralelo general y así exponer los cálculos realizados.

Para la realización del informe se utilizará un ordenador. La información se ha buscado tanto en internet como en revistas de ingeniería o libros especializados en el tema. Además se ha contado con la ayuda del profesor encargado de guiar al alumno en dicho trabajo y al que el alumno ha podido consultar las dudas que le iban surgiendo. Dicho profesor se ha encargado también de leer el trabajo realizado con el fin de corregir los fallos y aportar ideas.

6. BENEFICIOS DEL PROYECTO

Los “manipuladores paralelos actuados por cables” son unos mecanismos relativamente recientes (finales de los 80). Esto conlleva a que buscar información sobre el tema sea más complejo que con otros mecanismos, más aún si se desea información en castellano. Así, con el presente trabajo se ha pretendido obtener un informe técnico que facilite a cualquier persona la búsqueda de dicha información.

Con ello, se ha intentado realizar un informe en el que se reúna una amplia información sobre estos mecanismos y que dicha información sea útil. De esta manera se ha buscado que la persona que lea el informe adquiera unos conocimientos básicos sobre el tema que le permitan entender qué son y cómo funcionan y poder así trabajar con ellos partiendo de una buena base.

Para conseguir esto se ha empezado ubicando los mecanismos a través del estado del arte para posteriormente detallarlos más profundamente. Se han analizado las ventajas que nos aportan y se han descrito las aplicaciones en las que se les da uso actualmente. Por último se han analizado cinemática y dinámicamente y se ha llevado a cabo un pequeño estudio de su espacio de trabajo.

7. ESTADO DEL ARTE

Desde la antigüedad, el hombre ha sentido fascinación por las máquinas que imitan la figura y los movimientos de seres animados. Existe una larga tradición de autómatas ya desde el mundo griego, pasando por los autómatas de los artesanos franceses y suizos del siglo XVIII, donde ya había interesantes dispositivos mecánicos para el control de los movimientos [3]. Sin embargo, no es hasta 1921 cuando aparece por primera vez el término “robot”. Su aparición fue en una obra teatral llamada R.U.R (Rossum’s Universal Robots) del novelista y autor dramático checo Karel Capek [4].

Los robots son aparatos electromecánicos que se pueden configurar para llevar a cabo una gran variedad de tareas. Atendiendo a su diseño y al tipo de uniones y articulaciones se pueden clasificar en 4 grupos [5]: robots series, manipuladores paralelos, robots híbridos y robots móviles.

Los robots series son mecanismos de cadena abierta con varios grados de libertad, los cuales necesitan de un sistema de control y sensorización para programar diferentes tareas. Tiene una única cadena cinemática entre la base y el efector final, compuesta por articulaciones.

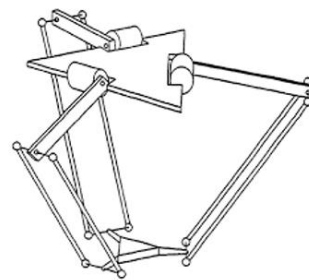
Los manipuladores paralelos son mecanismos de cadena cerrada con varios grados de libertad, caracterizados por poseer un elemento flotante, la plataforma, la cual se conecta al bastidor mediante varias cadenas cinemáticas independientes en paralelo [6].

Los robots móviles son capaces de moverse completamente y no solo el efector final.

Los robots híbridos son aquellos que involucran más de un tipo (robots series, manipuladores paralelos y móviles) siendo su estructura una combinación, bien sea por yuxtaposición o por conjunción.



a) Robot Serie



b) Manipulador paralelo



c) Robot Móvil



d) Robot híbrido

Ilustración 1. Tipos de robots

7.1 INTRODUCCIÓN A LOS MANIPULADORES PARALELOS

Dentro de los robots, están los manipuladores, cuya utilización es frecuente en las últimas décadas. Estos manipuladores son utilizados para la manipulación de objetos como puede ser levantamiento de mercancía u operar con materiales peligrosos e incluso radiactivos.

Un robot manipulador es un mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante

dispositivo lógico [7]. Estos robots están compuestos por elementos unidos fundamentalmente por pares prismáticos (P) y rotacionales (R).

Los manipuladores paralelos son cadenas cinemáticas cerradas cuyo órgano terminal, o plataforma móvil, está conectado a la base mediante varias cadenas cinemáticas seriales independientes [8]. Estos robots se caracterizan principalmente por su ligereza, su rigidez y por sus altas aceleraciones y tiene aplicaciones son muy variadas, tal y como pueden ser la simulación de vuelo, el maquinado de piezas o la transferencia de piezas de alta velocidad.

El primer diseño de un manipulador paralelo se realizó en 1931 por James E.Gwinnett, que diseño una plataforma de movimiento destinada para la industria del entretenimiento [8-9]. Aunque se pidió la patente, esta máquina nunca llego a construirse. Fue una década más tarde, en 1940, cuando se diseñó y construyó el primer robot paralelo industrial. Este robot, diseñado por Willard LV Pollard, fue diseñado para operaciones de pintura con spray. Dicho robot consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno, unidos mediante articulaciones universales. Los tres actuadores de la base comandaban la posición de la herramienta, mientras que la orientación era proporcionada por otros dos actuadores situados en la base y que transmitían el movimiento a la herramienta mediante la rotación proporcional de cables flexibles [10].

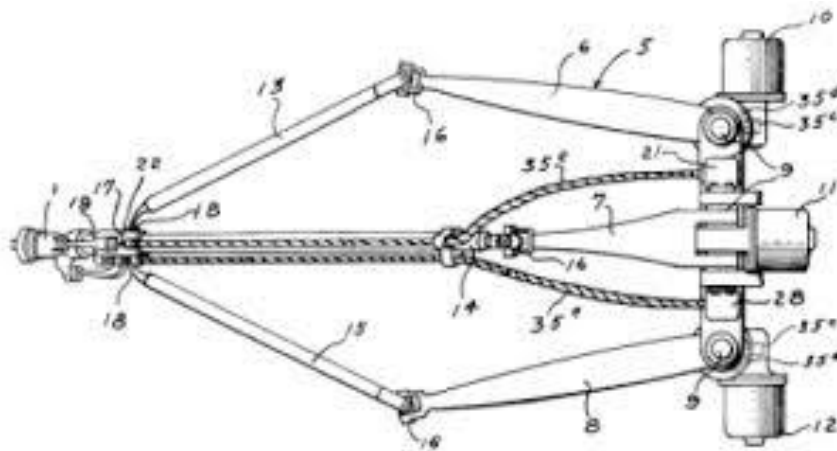


Ilustración 2. Robot paralelo de Willard LV Pollard

Uno de los manipuladores paralelos más estudiado ha sido la plataforma diseñada por el Dr. Eric Gough en el año 1947. Dicha plataforma es de tipo octaedro hexápodo con lados de longitud variable y 6 grados de libertad. El propio Dr. Gough la llamaba máquina de cubiertas universal, o plataforma universal. El objetivo con el que fue diseñada era la simulación del proceso de aterrizaje de un avión [11]. En los últimos años se ha producido un gran avance en la síntesis de manipuladores paralelos gracias al estudio de esta plataforma debido a su simplicidad. De hecho, esta plataforma es usada por numerosos autores como base para realizar simplificaciones a la hora de realizar el estudio de manipuladores paralelos con diferentes grados de libertad.

Más adelante, en 1965, Mr. Stewart presentó una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad que, al igual que la del Dr. Dough, estaba destinada a simulación de vuelos. En 1967, Mr. Cappel patentó un simulador de movimiento basado en un hexápodo. En 1978, Hunt destacó que los manipuladores paralelos requerían de estudios más detallados para su utilización debido a las ventajas que ofrecían respecto a los robots serie.

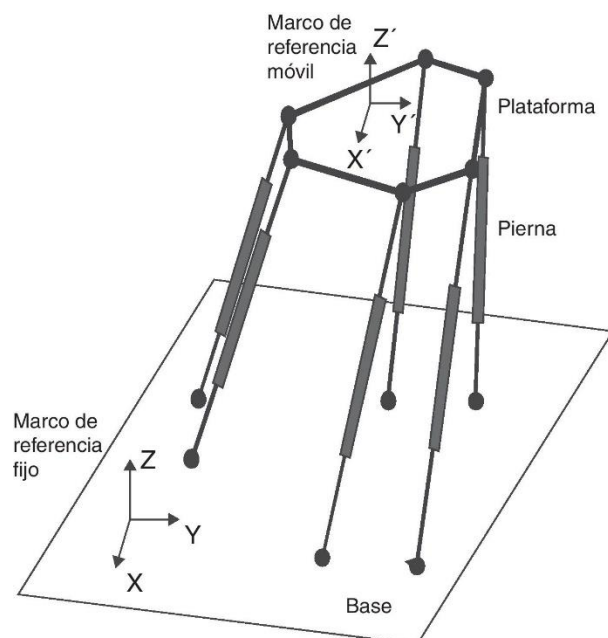


Ilustración 3. Plataforma de Stewart

En 1990, Reymond Clavel presento lo que se acabaría llamando Robot paralelo Delta. Este es una modificación de la plataforma de Stewart, que proporciona un robot más sencillo de analizar cinemáticamente y con un coste inferior. La idea que tuvo Reymond Clavel fue el uso de paralelogramos, que permiten que un eslabón de salida tenga una posición fija con respecto un eslabón de entrada. Así, al utilizar 3 paralelogramos la orientación de la plataforma móvil queda totalmente restringida, pudiendo solo desplazarse en la dirección de los 3 ejes del plano cartesiano [12].

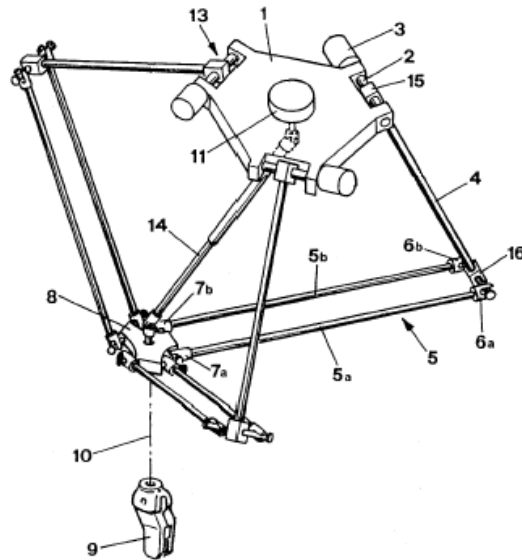


Ilustración 4. Robot paralelo Delta

7.2 MANIPULADORES PARALELOS ACTUADOS POR CABLES

Muchos de los manipuladores paralelos más importantes están sometidos a cargas de compresión y tensión. Es natural dar un paso más y considerar manipuladores paralelos que estén únicamente sometidos a tensión. De esta manera se obtiene el concepto de

manipuladores paralelos actuados por cables o, en inglés, cable-driven parallel mechanisms (CDPM), que es el tipo de manipuladores paralelos en el que se centrará el presente trabajo.

La idea de los CDPM surgió al final de los años 80 y principio de los 90 gracias al trabajo de Landsberger, Higuchi y Ming y Albus. Landsberger propuso un manipulador paralelo en 1985 basado en la plataforma de Stewart, donde cambió las articulaciones rígidas por cables flexibles. A partir de ahí, el estudio de este tipo de manipuladores se ha ido extendiendo hasta el día de hoy debido a que los CDPM son mecanismos que presentan grandes ventajas.

Los cables son elementos flexibles capaces de soportar cargas de tensión muy altas. Su uso es muy efectivo y por ello ha sido tan extendido desde la antigüedad. Los manipuladores paralelos actuados por cables combinan las propiedades de los manipuladores paralelos con las propiedades de los cables, consiguiéndose de esta manera unos manipuladores muy eficaces. Además, al poder ser recogidos los cables en carretes, se consiguen espacios de trabajo bastante amplios.

Un claro ejemplo de este tipo de manipuladores es la skycam [13]. La skycam es la cámara que se utiliza para grabar los partidos de fútbol. Su funcionamiento es sencillo: la cámara está unida a varios cables y, dependiendo del grado en que se alarguen o acorten cada uno de los cables, la cámara se ira moviendo de una posición a otra.

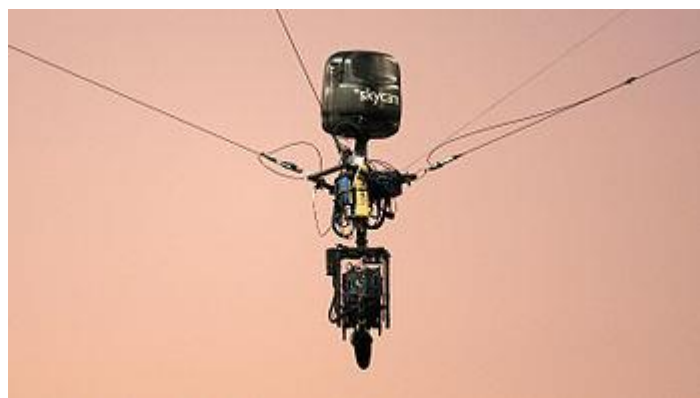


Ilustración 5. Skycam

8. ASPECTOS IMPORTANTES DE LOS CDPM

En este apartado se va a introducir los CDPM con el objetivo de que el lector adquiera unos conocimientos básicos. Lo primero que se va a realizar es una descripción breve del sistema, en la que se explicarán los componentes que tiene un CDPM. Una vez descrito el sistema, se expondrán las principales características que poseen los CDPM haciendo una comparación con los manipuladores paralelos convencionales. Por último, se hablará de las principales ventajas y desventajas que nos aportan estos manipuladores.

8.1 Descripción del sistema robótico

Como podemos ver en la ilustración 6, un CDPM consta principalmente de una base fija y una móvil a la que se le llama plataforma móvil, elemento terminal o efector final (end-effector). La plataforma móvil está suspendida por medio de un número m de cables. Para cada uno de los cables se tiene un motor que es el encargado de enrollar y desenrollar los cables.

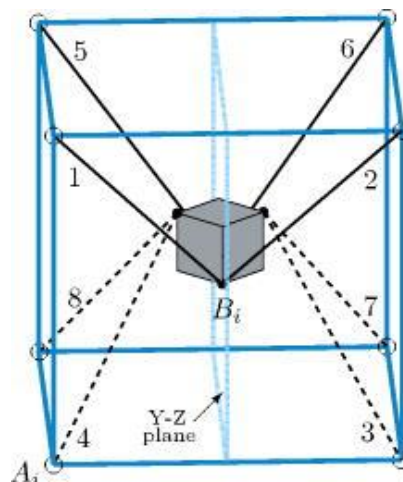


Ilustración 6. Modelo CDPM

8.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS CDPM

Aunque los CDPMs comparten los conceptos básicos de los manipuladores paralelos clásicos, tienen muchas diferencias. Las principales características de los CDPMs son las siguientes [14]:

- La flexibilidad de los cables permite realizar grandes cambios en la longitud de las cadenas cinemáticas.
- Los cables se pueden enrollar muy rápido, ya que la masa del robot es muy baja. Gracias a esto se pueden conseguir velocidades y aceleraciones muy altas.
- Solo trabajan a tracción
- El número de cables m se puede incrementar y así poder modificar el espacio de trabajo, trabajar con mayores cargas o conseguir una mayor seguridad.

A continuación se presenta una tabla con las principales diferencias entre los CDPM y los manipuladores paralelos convencionales

CDPMs	Manipuladores Paralelos Convencionales
Amplios espacios de trabajo	Espacios de trabajo reducidos
Altas velocidades y aceleraciones	Velocidades y aceleraciones reducidas
Actuadores flexibles	Actuadores rígidos
Ligeros	Pesados
Solo trabajan a tracción	Pueden trabajar a tracción y a compresión

Tabla 1. Diferencias entre CDPMs y Manipuladores Paralelos Convencionales

8.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CDPM

Debido a las características ya expuestas los CDPMs nos aportan principalmente 3 ventajas. La primera de estas ventajas es la posibilidad de trabajar en espacios de trabajo muy amplios, ya que esta es una de las principales desventajas de los manipuladores paralelos convencionales. Otra ventaja muy importante es la alta velocidad que se puede conseguir, útil para muchas aplicaciones. Por último, se consigue un sistema liviano con una inercia reducida.

Ahora bien, no todo son ventajas. Los CDPMs también tienen desventajas. Estas desventajas son la intersección entre cables, la colisión de cables con el ambiente circundante, su baja rigidez y la naturaleza no rígida de los cables para posicionar y rotar la plataforma móvil [15]. Además, dado que solo trabajan a tensión, su equilibrio estático depende estrictamente de la disposición del cable y de los límites de tensión del cable.

9. TIPOLOGÍA

Existe una amplia variedad de manipuladores paralelos actuados por cables. Se pueden conseguir numerosos diseños para realizar muchas tareas de diferente índole. Todos estos posibles mecanismos se pueden dividir de forma general en 2 categorías [16]. La primera de estas categorías corresponde a los tendon robots, en el cual el cable normalmente es enrollado alrededor de una o más poleas y atado a un enlace que se moverá. La segunda categoría consiste en mecanismos suspendidos que no dependen de uniones rígidas, quitando la de la estructura base. Además de estas dos categorías, suele hablarse también de robots tenségricos que incluyen enlaces sólidos junto con los cables. A continuación se hará una explicación más detallada de las tres categorías.

9.1 TENDON ROBOTS

Muchos de los manipuladores paralelos actuados por cables se pueden describir de una manera más específica como Tendon-driven Robots (TDR). El objetivo de los TDR es el de transmitir un movimiento generado en un punto a otro punto situado a cierta distancia. Es decir, imita el sistema muscular, como por ejemplo los músculos del brazo que controlan los movimientos de los dedos. Por ello también se pueden describir como robots cuyas extremidades imitan sistemas musculoesqueléticos biológicos.



Ilustración 7. Ejemplo de un TDR

Se utilizan correas de plástico para imitar los músculos y los tendones. Con estos robots se consiguen movimientos más naturales que con los robots tradicionales que son más rígidos. La principal ventaja que nos ofrecen los TDRs es la ligereza que tienen, lo que permite que los movimientos sean efectuados con menos energía e inercia.

Actualmente podemos encontrar muchos ejemplos de este tipo de robots. Entre ellos existen manos artificiales como pueden ser the Dexter robot y the Utah-MIT dexterous Hand. También hay otros más originales como the MACEYE, que consiste en un ojo que hace uso de cables para mover un ojo robótico.

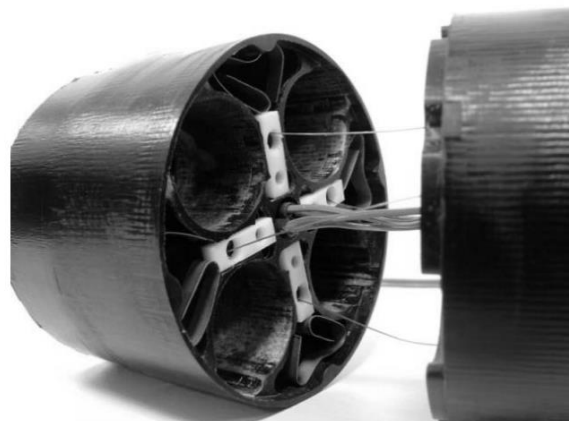


Ilustración 8. The MACEYE. En la imagen se aprecia el obturador y el resorte, los cables y los tendones.

Dentro de los TDR se encuentran también los cables bowden. Este cable es un sistema de accionamiento mecánico constituido por un cable desplazable en el interior de una vaina flexible, formada por una hélice metálica. En los dos extremos de la vaina están colocados los capuchones metálicos de forma adecuada, que se apoyan o están unidos al asentamiento fijo, colocados lo más cerca posible de los elementos de unión con el cable. Cuando el cable se pone en tensión, los terminales de la vaina son empujados u obligados a apretar contra el asentamiento fijo y, prosiguiendo en la acción de tensado, la vaina se comporta como una guía de forma curvilínea dentro de la cual se desplaza el cable; por

tanto, el desplazamiento de uno de los dos extremos del cable se traduce (aparte del efecto de elasticidad del cable mismo) en un correspondiente desplazamiento del otro extremo [17].



Ilustración 9. Cable Bowden

Estos cables son muy utilizados en el sector del automóvil donde se pueden encontrar en los frenos, el acelerador, el embrague o incluso en la calefacción interna del vehículo. Su principal ventaja es que son muy versátiles y económicos. Ahora bien, se deben tener en cuenta ciertas precauciones. La primera de estas precauciones es que las curvas a las cuales está expuesto el cable flexible deben ser amplias y suaves de manera que no produzcan un esfuerzo excesivo en la vaina protectora. Además, en el interior de la vaina se suele colocar un tubo de cloruro de polivinilo para evitar rozamientos. Por último, es aconsejable una buena lubricación del cable interior para un correcto funcionamiento.

9.2 ROBOTS TENSÉGRICOS

Otra categoría es la de los robots tenségricos que se basan en la tensegridad. La palabra tensegridad es una mezcla de los términos “tensión” e “integridad” y hace referencia a que una estructura mantiene su integridad gracias a un equilibrio de fuerzas de tensión continua que se oponen a otras de compresión continua [18]. Una estructura es tensébrica

cuando sus cables están conectados entre sí de manera que los objetos rígidos están suspendidos únicamente por cables.

Estos robots son sistemas con varios cables actuadores unidos a varios puntos de estructuras rígidas que se utilizan, al igual que pasaba con los TDR, para la transmisión de movimientos. Su característica más importante es que las barras rígidas conectan solo con cables de manera que no se tocan entre ellas.



Ilustración 10. Ejemplo de Robot Tenségrico

El estudio de este tipo de estructuras comenzó en los años 20, aunque no fue hasta los años 60 cuando se patentó el primero de ellos. Al principio fueron pensados para utilizarse en estructuras estáticas, pero hoy en día se utilizan también en estructuras robóticas. Su principal ventaja es que permiten una interacción humana relativamente segura, a pesar de incorporar también elementos rígidos. Esto se debe a su ligereza y baja inercia respecto a estructuras completamente rígidas.

Últimamente se está experimentando con estos robots para reproducir los movimientos humanos. A primera vista parece confuso, ya que siempre hemos visto el cuerpo humano como un grupo aislado de músculos soportando el esqueleto. Pero se ha desarrollado una nueva ideología que consiste en considerar la tensegridad del cuerpo. Los huesos son las barras y los músculos los cables.

9.3 ROBOTS DE CABLES SUSPENDIDOS

Los robots de cables suspendidos, también llamados de actuación directa o espacial, tienen numerosas configuraciones. Dichos manipuladores pueden ser lineales, planos o tridimensionales. También se puede hacer otra distinción atendiendo a si los mecanismos son indeterminados, completamente determinados o redundantes [14]. Los primeros en ser estudiados eran de tipo indeterminado, que suelen hacer uso de la gravedad para ganar estabilidad.

El primer robot de cables suspendidos conocido es el Robocrane. Este empezó a investigarse en los años 80, aunque no se hizo oficial hasta el año 1993. Después de este han venido muchos más entre los que están algunos robots famosos como Charlotte.

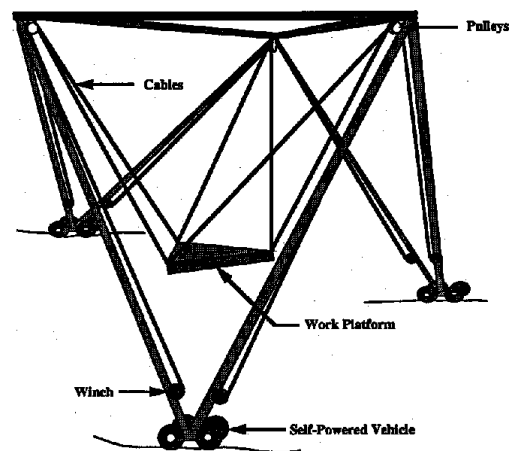


Ilustración 11. The Robocrane

Este tipo de robots tiene 2 importantes características que hacen que sea un tipo de robot muy versátil en cuanto a los usos que se le pueden dar. La primera de estas características es que permiten hacer grandes movimientos. La segunda gran característica es que pueden ser construidos a larga escala. De esta forma, puede obtenerse un robot bastante grande que tenga un espacio de trabajo realmente extenso.

10. APLICACIONES

Desde los primeros estudios a final de los años 80 sobre los CDPM, estos sistemas han sido cada vez más estudiados, siendo cada vez más utilizados para tareas cada vez más variadas. Se busca usarlos para cualquier aplicación donde sea posible hacer uso de sus ventajas y ello ha llevado a la amplia cantidad de aplicaciones en los que se usa hoy en día estos sistemas.

En términos generales, sus aplicaciones se pueden dividir en 4 grandes grupos [19]: aplicaciones de alta velocidad, aplicaciones a larga escala, aplicaciones médicas y hápticas y desarrollo de mecanismos bioinspirados. A continuación se detallará un poco más cada grupo y se mostrará algún ejemplo de cada aplicación.

10.1 APLICACIONES DE ALTA VELOCIDAD

Este grupo se refiere a todas aquellas aplicaciones en las que se ha utilizado CDPMs por su propiedad de ser capaz de trabajar a una alta velocidad. Como ya se vio anteriormente, esta es una de las ventajas de los CDPM y se busca aprovecharla en todas las aplicaciones donde sea factible su uso. Lo que hace realmente atractivos a los CDPMs para este uso es la combinación que posee de gran velocidad y peso ligero.

Un ejemplo muy conocido de este tipo de aplicaciones es el FALCON (Fast Load Conveyance), un robot desarrollado por Kawamura [20]. El FALCON es un robot de gran velocidad que tiene 6 GDL. El FALCON es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 13 (m/s) y una aceleración de hasta 43g, incluso cuando se usan pequeños motores de 60W. Al desarrollar este robot, se vio que la falta de rigidez en los cables suponía problemas de vibraciones. Para hacer frente a estos problemas se utilizan fuerzas internas entre los cables.



Ilustración 12. Robot FALCON

También en este grupo de aplicaciones encontramos los simuladores de vuelo, que hacen uso de los CDPMs por su estructura ligera. Un ejemplo sería el sistema de 3 GDL para sensación virtual de Korkaub. Por último, se ha utilizado bastante en robots grúa e incluso se ha propuesto atar una grúa al final de otro manipulador o a un helicóptero

10.2 APLICACIONES A GRAN ESCALA

Al igual que lo que ocurría con las aplicaciones de alta velocidad, aquí se intenta aprovechar la otra gran ventaja de los CDPMs, los cuales son capaces de tener un espacio de trabajo muy amplio. En estas aplicaciones resultaría imposible o muy difícil el uso de robots series tradicionales y manipuladores paralelos de uniones rígidas.

Ejemplos de estas aplicaciones serían la skycam o la cablecam, que son cámaras utilizadas en estadios para grabar partidos de fútbol. Otro ejemplo sería el NIMS3D de Borgstrom o el sistema de Bosscher, Williams and Tummino, ambos utilizados para localizar objetos o personas en un espacio 3D.

Un ejemplo muy interesante que se está estudiando es el uso de CDPMs para el Contour Crafting [21]. El Contour Crafting es una tecnología de fabricación por capas desarrollada por el DR. Behrokh Khosnevis, que podría ser la solución para la creación de viviendas de bajo costo. La idea básica es un robot enorme que “imprima” casas.

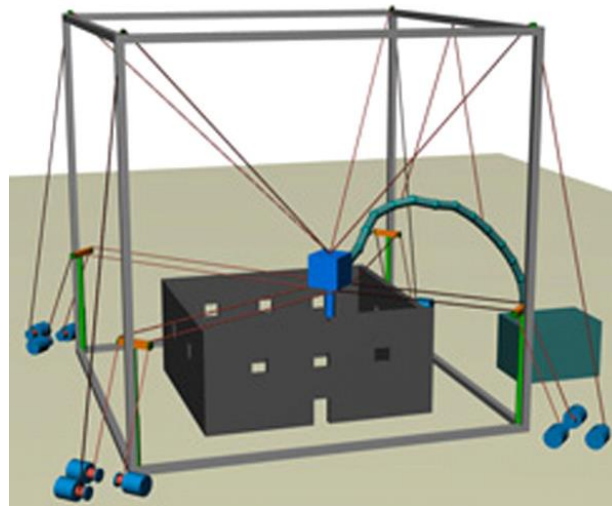


Ilustración 13. Prototipo CDPM para Contour Crafting

Otros sistemas, como el “All-Weather Cargo Transfer System” se utilizan para transportar cargas entre un barco y el muelle en el que está atracado [3]. Tecnalia, a su vez, está trabajando en el desarrollo de un robot que permitirá manipular y trasladar cargas muy pesadas de un punto a otro [22]. También se quiere desarrollar un sistema para hospitales que permita mover a los pacientes de una sala a otra.

10.3 APLICACIONES MÉDICAS Y HÁPTICAS

Como ya ha sido comentado, los CDPMs se utilizan en una gran variedad de campos. Uno de estos campos es el campo de la medicina y de las aplicaciones hápticas (táctiles). Los usos más comunes son en teleoperaciones, rehabilitación, exoesqueletos y procedimientos quirúrgicos. La facilidad de reconfiguración de los CDPMs aporta una gran flexibilidad en la operación y en el espacio de trabajo del manipulador, lo que hace conveniente su uso en estos campos.

Una de las aplicaciones que encontramos aquí fue propuesta por Vilchis y es un CDPM con una sonda ultrasonido para realizar exámenes ecográficos remotos [15]. En rehabilitación se encuentran ejemplos como String-Man de Surdilovic, que es un concepto

en el que los cables se conectan al paciente de manera que este es el elemento terminal. Otro ejemplo sería el CAREX de Agrawal, que es un exoesqueleto utilizado para la rehabilitación neural [23].

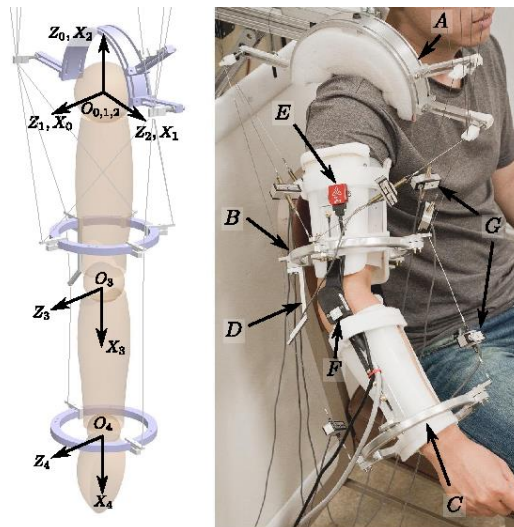


Ilustración 14. CAREX

La ventaja que tiene los CDPMs en los dispositivos hápticos es que el efecto de la dinámica del cable actuador es insignificante al proporcionar retroalimentación de la fuerza al usuario. Un ejemplo de aplicación háptica, sería el PHANTOM.

10.4 DESARROLLO DE MECANISMO BIOINSPIRADOS

Los mecanismos bioinspirados es otro campo en el que se están desarrollando mecanismos que utilizan los CDPMs. Esto se debe a las similitudes que tienen estos mecanismos con los sistemas musculoesqueléticos, ya que ambos músculos y cables actuadores son capaces solo de actuar unilateralmente.

Un ejemplo sería el Eccerobot, que es un robot antropométrico (la antropometría es el estudio de las proporciones y las medidas del cuerpo) utilizado en el estudio de sistemas musculoesqueléticos. En la universidad de Tokyo JSK Robotics Laboratory se han desarrollado una familia de robots humanoides también actuados por cables [15]. Cabe decir

que se han realizado estudios la modelación de músculos humanos como segmentos de cables y también la de tendones y ligamentos.

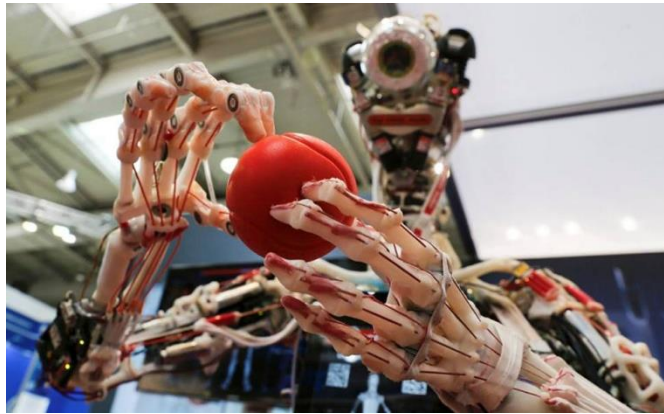


Ilustración 15. The Eccerobot

Este campo es muy interesante y tiene mucho futuro por delante y todavía quedan muchos estudios y avances por realizar.

11. METODOLOGÍA

En este apartado se va a realizar el estudio cinemático y dinámico de un CDPM cualquiera. Se empezará sacando las ecuaciones de su comportamiento cinemático y más tarde se realizará lo mismo para su comportamiento dinámico. Para la realización de este apartado se ha requerido de la ayuda de la referencia 3.

11.1 MODELADO CINEMÁTICO

Para estudiar el modelado cinemático, estudiaremos un CDPM que consiste en una sola plataforma móvil soportada por m cables que son controlados por m actuadores. El modelo utilizado está representado en la Ilustración 16, en la que se puede observar el elemento terminal soportado por m cables. Por otro lado tenemos un sistema de referencia fijo en el punto "O" y un sistema móvil en "P" que está unido a la plataforma móvil.

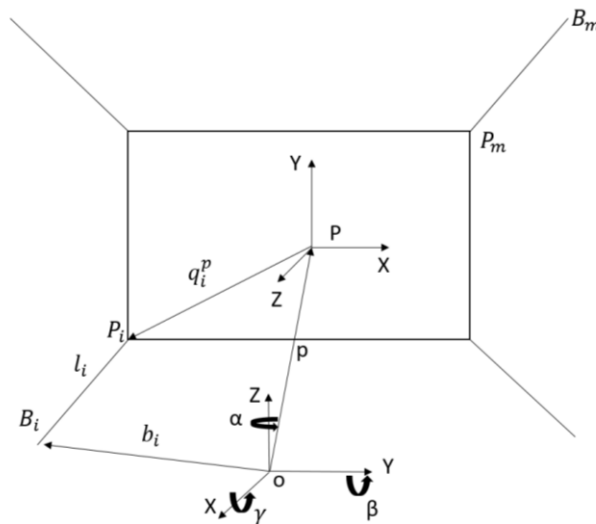


Ilustración 16. Modelo cinemático

La posición de la plataforma móvil respecto al sistema de referencia fijo está representada por $p = \overrightarrow{OP} = \{x \ y \ z\}^T$. Por lo tanto, esta ecuación indica la posición del punto P respecto al punto de referencia O. En un caso general el elemento terminal tendrá 6 grados de libertad, pero puede tener algún grado de redundancia si se cumple que $m \geq (n + 1)$ donde m es el número de cables y n el número de grados de libertad. Aunque fuera redundante en cuanto a los actuadores, no existe una redundancia cinemática.

El modelado cinemático consiste en relacionar las variables de los actuadores con el posicionamiento y las variables del elemento terminal. Es decir, se busca relacionar la longitud de los cables con la posición de la plataforma móvil. Para ello asumiremos que los cables están siempre en tensión de manera que quedará una cinemática similar a la que se tiene en los manipuladores paralelos de enlaces rígidos.

11.1.1 ANALISIS DE DESPLAZAMIENTO

En este apartado se buscará la relación que hay entre el desplazamiento de los cables actuadores y el desplazamiento que tiene la plataforma móvil. El punto en el sistema móvil viene dado respecto al sistema fijo por la matriz de transformación T_P^O :

$$T_P^O = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11.1)$$

Donde,

$p = \overrightarrow{OP} = \{x \ y \ z\}^T$: es la posición de P respecto de O.

$$R = \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & (-s\alpha \cdot c\gamma + c\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma) & (s\alpha \cdot s\gamma + c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma) \\ s\alpha \cdot c\beta & (c\alpha \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma) & (-c\alpha \cdot s\gamma + s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma) \\ -s\beta & c\beta \cdot s\gamma & c\beta \cdot c\gamma \end{bmatrix} \quad (11.2)$$

R es la matriz de rotación ortonormal que representa la orientación del sistema móvil respecto del sistema fijo.

Las coordenadas de los puntos P_i (puntos donde se unen los cables a la plataforma móvil) respecto a al sistema móvil vienen dadas por $q_i^p = \{ q_{i,x}^p \ q_{i,y}^p \ q_{i,z}^p \}^T$, mientras que los puntos B_i (puntos fijo de los cables) respecto al sistema fijo están representados por $b_i = \{ b_{i,x} \ b_{i,y} \ b_{i,z} \}^T$. Así, para cada uno de los cables podemos escribir:

$$\overrightarrow{OB_i} + \overrightarrow{B_iP_i} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PP_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (11.3)$$

De esta manera obtenemos que la longitud de los cada uno de los cables es l_i y vienen dadas por la siguiente expresión:

$$l_i = \|\overrightarrow{B_iP_i}\| = \|\overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PP_i} - \overrightarrow{OB_i}\| = \|p + R q_i^p - b_i\| \quad (11.4)$$

11.1.2 Análisis directo de desplazamiento

Es análisis directo consiste en determinar la posición del elemento terminal, conocidas las longitudes l_i de los cables. Para ello se eleva al cuadrado la ecuación (11.4) obteniéndose un sistema de m ecuaciones con 6 incógnitas (una por cada grado de libertad).

$$F_i(x) = (p + R q_i^p - b_i)^T (p + R q_i^p - b_i) - l_i^2 = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (11.5)$$

Este sistema de ecuaciones no se puede resolver de forma directa, ya que, requiere la solución de un sistema de ecuaciones no lineales. Se puede resolver de forma analítica, aunque resulta muy complicado. Una aproximación práctica es resolverlo numéricamente utilizando el método de Newton-Raphson, que consiste en tomar una aproximación inicial X_0 arbitraria e iterar hasta encontrar una solución aproximada válida.

11.1.3 Análisis inverso de desplazamiento

El problema inverso consiste en determinar la longitud de los cables l_i , a partir de una posición conocida del elemento terminal. Al contrario que en el problema directo, la resolución del problema inverso es sencilla y directa. Además, para cada posición de la plataforma móvil tenemos una única solución posible. La longitud de cada cable se puede calcular directamente a partir de la posición $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ de la siguiente manera:

$$l_i^2 = p^T p + q_i^{pT} q_i^p + b_i^T b_i + 2p^T R q_i^p - 2p^T b_i - 2b_i^T R q_i^p \quad (i = 1, \dots, m) \quad (11.6)$$

11.1.3 Análisis de velocidad

En este apartado se va a determinar la relación entre la velocidad de la plataforma móvil y la tasa de variación de la longitud de los cables. La relación cinemática instantánea es:

$$\dot{L} = J_\chi \dot{\chi} \quad (11.7)$$

Siendo,

$\dot{L} = \{\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dots, \dot{l}_m\}^T$ el vector de tasa de cambio de la longitud de los cables

J_χ la matriz jacobiana referenciada respecto de la base fija

$\chi = \{\dot{v}, \omega\}^T = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \omega_x, \omega_y, \omega_z\}^T$ siendo v el vector de velocidades traslacionales y ω el vector de velocidades rotacionales de la plataforma móvil

La relación entre la velocidad angular $\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}^T$ y $\{\dot{\gamma}, \dot{\beta}, \dot{\alpha}\}^T$ es la siguiente:

$$\omega = \begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & -s\alpha & 0 \\ s\alpha \cdot c\beta & c\alpha & 0 \\ -s\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \end{Bmatrix} \quad (11.8)$$

Derivando la ecuación (11.4) con respecto del tiempo obtenemos \dot{l}_i y, sabiendo que $\dot{R} q_i^p = \omega \times R q_i^p$, se obtiene que

$$\dot{l}_i = \frac{1}{\|l_i\|} [l_i v + \omega (-l_i \times R q_i^p)] = [\hat{l}_i^T - (\hat{l}_i \times R q_i^p)^T] \begin{Bmatrix} v \\ \omega \end{Bmatrix} \quad (11.9)$$

Donde $\hat{l}_i = \frac{l_i}{\|l_i\|}$ es un vector unitario en la dirección del cable i con respecto a la base fija.

La matriz jacobiana queda:

$$J_x = \begin{bmatrix} \hat{l}_1^T & -(\hat{l}_1 \times R q_1^p)^T \\ \hat{l}_2^T & -(\hat{l}_2 \times R q_2^p)^T \\ \vdots & \vdots \\ \hat{l}_m^T & -(\hat{l}_m \times R q_m^p)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{l}_1^T & -(\hat{l}_1 \times R q_1)^T \\ \hat{l}_2^T & -(\hat{l}_2 \times R q_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \hat{l}_m^T & -(\hat{l}_m \times R q_m)^T \end{bmatrix} \quad (11.10)$$

11.1.4 Análisis de aceleración

De forma análoga a lo que se ha hecho en el anterior apartado, aquí se estudia la relación que existe entre la aceleración traslacional de los cables y la aceleración de la plataforma móvil. Las aceleraciones lineales de los cables se pueden obtener derivando la ecuación (11.7) con respecto del tiempo.

$$\ddot{L} = J_x \ddot{x} + \frac{d}{dt} (J_x) \dot{x} \quad (11.11)$$

Donde

$\ddot{L} = \{\ddot{l}_1, \ddot{l}_2, \dots, \ddot{l}_m\}^T$ es el vector de aceleraciones del cable

$\ddot{x} = \{a \ \dot{\omega}\}^T = \{\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z\}$ donde a es el vector de aceleración traslacional y $\dot{\omega}$ el vector de aceleraciones rotacional. De esta manera la ecuación general de la aceleración queda de la siguiente forma:

$$\ddot{L} = J_x \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \vdots \\ \dot{\omega}_z \end{Bmatrix} + \left(\frac{\partial J_x}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial J_x}{\partial y} \dot{y} + \dots + \frac{\partial J_x}{\partial \gamma} \dot{\gamma} \right) \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \vdots \\ \omega_z \end{Bmatrix} \quad (11.12)$$

11.2 MODELADO DINÁMICO

Para realizar el estudio dinámico se han de seguir varios pasos. Primero se estudiará el modelo dinámico del elemento terminal. Más tarde se continuará con el estudio dinámico del actuador y finalmente, se realizará el estudio del sistema en conjunto.

11.2.1 Modelo dinámico del elemento terminal

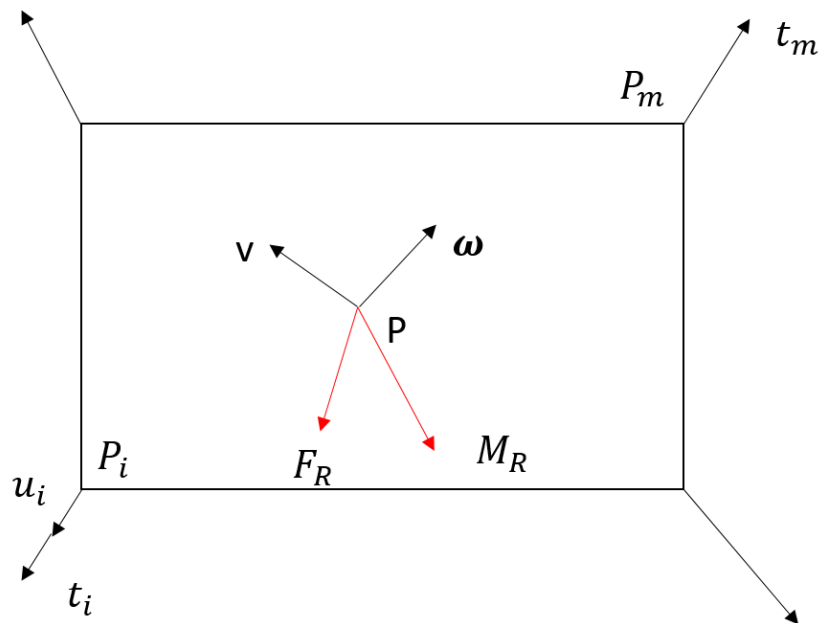


Ilustración 17. Modelo dinámico de la plataforma móvil

Se van a utilizar las ecuaciones generales de la dinámica de un CDPM utilizando la segunda ley de Newton $F=m \cdot a$.

$$\sum t_i + m_e g + F_R = m_e \dot{v} \quad (11.13)$$

$$\sum q_i \times t_i + M_R = I_e \dot{\omega} + \omega \times (I_e \omega) \quad (11.14)$$

Donde

m_e es la masa del elemento terminal

I_e es el tensor de inercia del elemento terminal respecto al eje móvil

g es la aceleración de gravedad

v, ω son la velocidad y la velocidad angular del centro del elemento terminal

Combinando (5.1) y (5.2) la ecuación dinámica del elemento terminal queda de la siguiente forma matricial:

$$ST = W \quad (11.15)$$

Donde,

$S = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_m \\ q_1 \times u_1 & q_2 \times u_2 & \dots & q_m \times u_m \end{bmatrix}$ es la matriz estructural

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}^T$ es el vector de tensiones

$W = \left\{ \begin{array}{l} m_e \dot{v} - m_e g - F_R \\ I_e \dot{\omega} + \omega \times I_e \omega - M_R \end{array} \right\}$ es el estado de carga de la plataforma móvil

11.2.2 Modelo dinámico del actuador

En esta sección se va a estudiar el comportamiento dinámico del motor y del tambor de enrollamiento. En la siguiente ilustración se puede ver el diagrama de cuerpo libre.

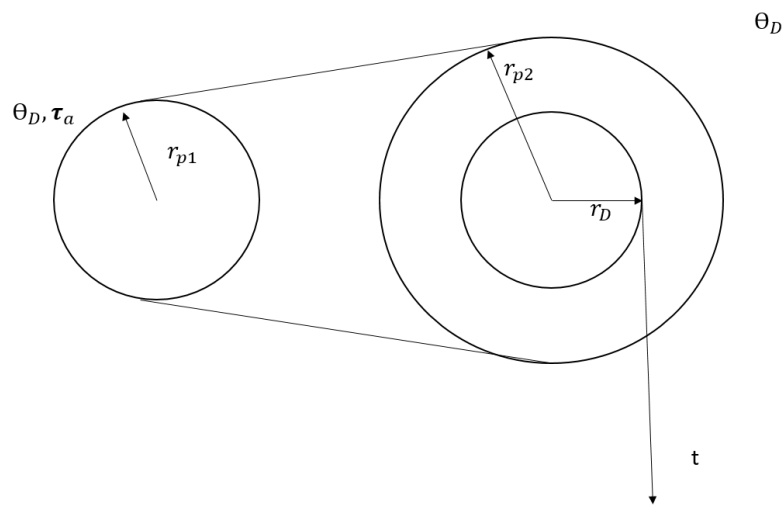


Ilustración 18. Modelo dinámico del actuador

Considerando que la tensión aplicada por cada actuador es lo suficientemente grande como para mantener en todo momento los cables en tensión, la ecuación que rige su comportamiento dinámico es la siguiente:

$$T = r^{-1} (\tau - \tau_f - J \ddot{\theta} - C \dot{\theta}) \quad (11.16)$$

Donde

$J = \text{diag} (J_1, \dots, J_m)$ siendo J_i los coeficientes de inercia angular

$C = \text{diag} (r_1, \dots, r_m)$ donde $r_i = \left(\frac{r_{p1}}{r_{p2}}\right) r_D$ son los radios equivalentes de las unidades de bobinado de cables

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}^T$$

$$\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\}^T$$

$\tau_f = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\}^T$ es el vector de fuerzas de rozamiento

$\theta = [\theta_1, \dots, \theta_m]^T$ es el vector de posición angular de los actuadores

11.2.3 Modelo dinámico del sistema

Las ecuaciones del sistema completo se obtienen combinando las ecuaciones del elemento terminal con las ecuaciones de los actuadores. Para este apartado se define que todos los θ_i son 0 cuando el centro de la plataforma móvil se encuentra sobre el origen de la base fija sin ninguna rotación. De esta manera un ángulo positivo θ_i causara un incremento de longitud negativo Δl_i .

$$r_1 \theta_i = -\Delta l_i \quad (11.17)$$

$$\Delta l_i = l_i - l_{i0} \quad (11.18)$$

Donde l_{i0} es la longitud inicial del cable i siendo su ecuación: $l_{i0} = \|q_i - b_i\|$, de manera que nos queda

$$\theta = \begin{Bmatrix} \theta_1(X) \\ \vdots \\ \theta_2(X) \end{Bmatrix} = r^{-1} \begin{Bmatrix} \|q_1 - b_1\| - \|p + R q_1^p - b_1\| \\ \vdots \\ \|q_m - b_m\| - \|p + R q_m^p - b_m\| \end{Bmatrix} \quad (11.19)$$

Se obtiene la primera y segunda derivada de esta ecuación y se sustituye en (5.6) obteniéndose:

$$T = r^{-1} \left(\tau - \tau_f - J \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \dot{X}} \right) \dot{X} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \ddot{X} \right) - C \left(\frac{\partial \theta}{\partial \dot{X}} \dot{X} \right) \right) \quad (11.20)$$

Que al combinar con (5.3) resulta:

$$M_{eq} \ddot{X} + N(X, \dot{X}) = S_{\tau} \quad (11.21)$$

Donde la matriz de inercia equivalente M_{eq} y los términos no lineales $N(X, \dot{X})$ son:

$$M_{eq} = SJ \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + r \begin{bmatrix} m_e I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_e \end{bmatrix} \quad (11.22)$$

$$N(X, \dot{X}) = S \left(J \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + C \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \right) \dot{X} + S \tau_f + r \left\{ \begin{array}{l} -m_e g - F_R \\ \omega \times I_e \omega - M_R \end{array} \right\} \quad (11.23)$$

12. WORKSPACE

En este apartado se va a realizar una breve análisis del espacio de trabajo o workspace de lo CDPMs. Ya que una de sus principales ventajas radica en la posibilidad que tienen los CDPMs de trabajar en un espacio muy amplio, es importante saber un poco sobre las características de este.

A la hora de analizar el workspace se debe considerar que una postura se encuentra dentro de él no solo si las restricciones geométricas se cumplen, también cuando la tensión en los cables es positiva. Esto es así ya que los cables no pueden trabajar con fuerzas de compresión.

También se debe tener en cuenta las singularidades que se pueden dar y los posibles cambios en la configuración de los cables. Dichas singularidades han de ser evitadas y se debe determinar en tiempo real si puede ocurrir un cambio en la configuración de los cables en la proximidad de la posición actual. Un problema adicional es poder detectar un cambio en la configuración que puede obtenerse mediante mediciones de tensión o de direcciones [24].

Ya que una de las ventajas de un CDPM es poder abarcar un gran espacio de trabajo, la maximización del workspace es uno de los objetivos a cumplir a la hora de realizar un diseño óptimo. Para ello se debe evaluar cuantitativa y cualitativamente para determinar los límites geométricos de las tareas a realizar. Un enfoque común a la hora de cualificar es discretizar numéricamente las tres dimensiones del espacio en cuadrículas, que consiste en una disposición regular de los puntos y resolver el problema de cinemática inversa en cada punto para ver si esta dentro o no del espacio de trabajo [3].

Se ha de tener en cuenta que cuando se diseña un CDPM para obtener su workspace máximo se obtendrán características cinemáticas no deseadas como poca destreza o baja manipulabilidad. Por lo tanto se debe considerar también la calidad a la hora de diseñar el mecanismo. Para ello se suelen utilizar indicadores de calidad como pueden ser la manipulabilidad la destreza o la rigidez. Como la mayoría de estos indicadores dependen de la matriz jacobiana, si esta está bien condicionada nuestro workspace tendrá una alta calidad.

13. DIAGRAMA GANTT

13.1 TAREAS

En este apartado se va a explicar brevemente en que cuales son las tareas a realizar en el trabajo. Las tareas (T) están organizadas en paquetes de trabajo (PT). Para cada una de las tareas se dará una breve descripción, los medios humanos y materiales a utilizar, la duración y los entregables en caso de haberlos.

P.T.1 Estado del Arte

El estado del arte es la primera tarea a realizar. Aunque sea lo primero que se realice, a lo largo del trabajo se hará revisiones

T.1.1 Recopilación de datos

- Descripción: es la fase inicial. Consiste en buscar toda la información posible sobre el tema que se trabaja.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (2h)
- Recursos Materiales: Ordenador, revistas de ingeniería, libros de la ETSI.
- Duración: 3 semanas

T.1.2 Síntesis

- Descripción: Consiste en resumir la información recopilada en la tarea anterior, de manera que solo quede la información relevante para la tarea a ejecutar.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (1h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 1 semana
- Entregables: Estado del Arte

P.T.2 Aspectos Importantes

Antes de realizar tareas más complejas es necesaria la elaboración de un apartado que integre la información básica para entender cómo funcionan los CDPMs.

T.2.1 Recopilación de datos

- Descripción: es la fase inicial. Consiste en buscar toda la información posible sobre el tema que se trabaja.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (2h)
- Recursos Materiales: Ordenador, revistas de ingeniería, libros de la ETSI.
- Duración: 2 semanas

T.2.2 Síntesis

- Descripción: Consiste en resumir la información recopilada en la tarea anterior, de manera que solo quede la información relevante para la tarea a ejecutar.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (1h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 1 semana
- Entregables: Aspectos Importantes

P.T.3 Tipología

Redactar un apartado explicando los diferentes tipos de CDPM que existen. Se describen y se explican las principales características de cada uno de ellos. También se aporta algún ejemplo con ilustraciones.

T.3.1 Recopilación de datos

- Descripción: es la fase inicial. Consiste en buscar toda la información posible sobre el tema que se trabaja.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (2h)
- Recursos Materiales: Ordenador, revistas de ingeniería, libros de la ETSI.
- Duración: 1 semana

T.3.2 Síntesis

- Descripción: Consiste en resumir la información recopilada en la tarea anterior, de manera que solo quede la información relevante para la tarea a ejecutar.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (1h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 5 días
- Entregables: Tipología

P.T.4 Aplicaciones

Este apartado da a conocer las aplicaciones en las que se utilizan los CDPM hoy en día y explica también algunas de las aplicaciones en las que se quieren introducir los CDPM en un futuro próximo.

T.4.1 Recopilación de datos

- Descripción: es la fase inicial. Consiste en buscar toda la información posible sobre el tema que se trabaja.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (2h)
- Recursos Materiales: Ordenador, revistas de ingeniería, libros de la ETSI.
- Duración: 1 semana

T.4.2 Síntesis

- Descripción: Consiste en resumir la información recopilada en la tarea anterior, de manera que solo quede la información relevante para la tarea a ejecutar.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (1,5 h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 5 días
- Entregables: Aplicaciones

P.T.5 Modelización

Se trata de conocer la forma en la que actúan los CDPM deduciendo las ecuaciones que rigen su movimiento y analizando su forma de trabajar. Para ello se realizará un estudio cinemático y dinámico y se presentará un ejemplo de aplicación

T.5.1 Análisis cinemático

- Descripción: Consiste en definir las ecuaciones cinemáticas de los CDPM
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (8 h)
- Recursos Materiales: Ordenador, revistas de ingeniería, libros de la ETSI.
- Duración: 7 Días
- Entregables: Modelado cinemático

T.5.2 Análisis dinámico

- Descripción: Consiste en Definir las ecuaciones dinámicas de los CDPM
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (8 h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 7 días
- Entregables: Modelado dinámico

T.5.3 Análisis del Workspace

- Descripción: Pequeño estudio del espacio de trabajo
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (3 h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 5 días
- Entregables: Modelado dinámico

T.5.4 Ejemplo de aplicación

- Descripción: Ejemplo práctico del uso de las ecuaciones cinemáticas y dinámicas en un CDPM
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (8 h)
- Recursos Materiales: Ordenador

- Duración: 7 días
- Entregables: Modelado dinámico

T.6 Finalización del trabajo

- Descripción: Una vez realizadas las anteriores tareas, solo falta agruparlas todas y dar formato al trabajo de manera que quede presentable y listo para entregar.
- Recursos Humanos: Ingeniero Junior (4 h)
- Recursos Materiales: Ordenador
- Duración: 5 días
- Entregables: TFG

13.2 HITOS

A lo largo del trabajo hay varios hitos. Un hito es un acontecimiento puntual y significativo que marca un momento importante en el desarrollo del proceso. El trabajo consta de los siguientes hitos:

Hito 1. Redacción del Estado del Arte: se realiza al terminar la tarea T.1.2

Hito 2. Redacción de Aspectos Importantes: al terminar la tarea T.2.2

Hito 3. Redacción de Tipología: al terminar la tarea T.3.2

Hito 4. Redacción de Aplicaciones: al terminar la tarea T.4.2

Hito 5.1. Redacción de Modelización: al terminar las tareas T.5.1 y T.5.2

Hito 5.2. Redacción de Workspace: al terminar la tarea T.5.3

Hito 5.3. Verificación del Ejemplo: al terminar la tarea T.5.4

Hito 6. Entrega del Trabajo: al terminar la tarea T.6

13.3 DIAGRÁMA GANTT

En este apartado se presenta el diagrama Gantt que se puede ver en la ilustración. En el se puede apreciar a simple vista que la tarea que más tiempo se tarda en realizar es la primera. Esto tiene sentido, ya que empezar de cero un trabajo es lo más laborioso, mientras que a mitad trabajo ya se sabe hacia dónde va dicho trabajo y es más fácil continuarlo.

Se ha calculado que si se comienza el trabajo el día 24 de enero, este se finalizará el día 18 de marzo. En el anexo 1 se puede encontrar la tabla que relaciona todas las tareas junto con el tiempo de trabajo que conlleva cada una.

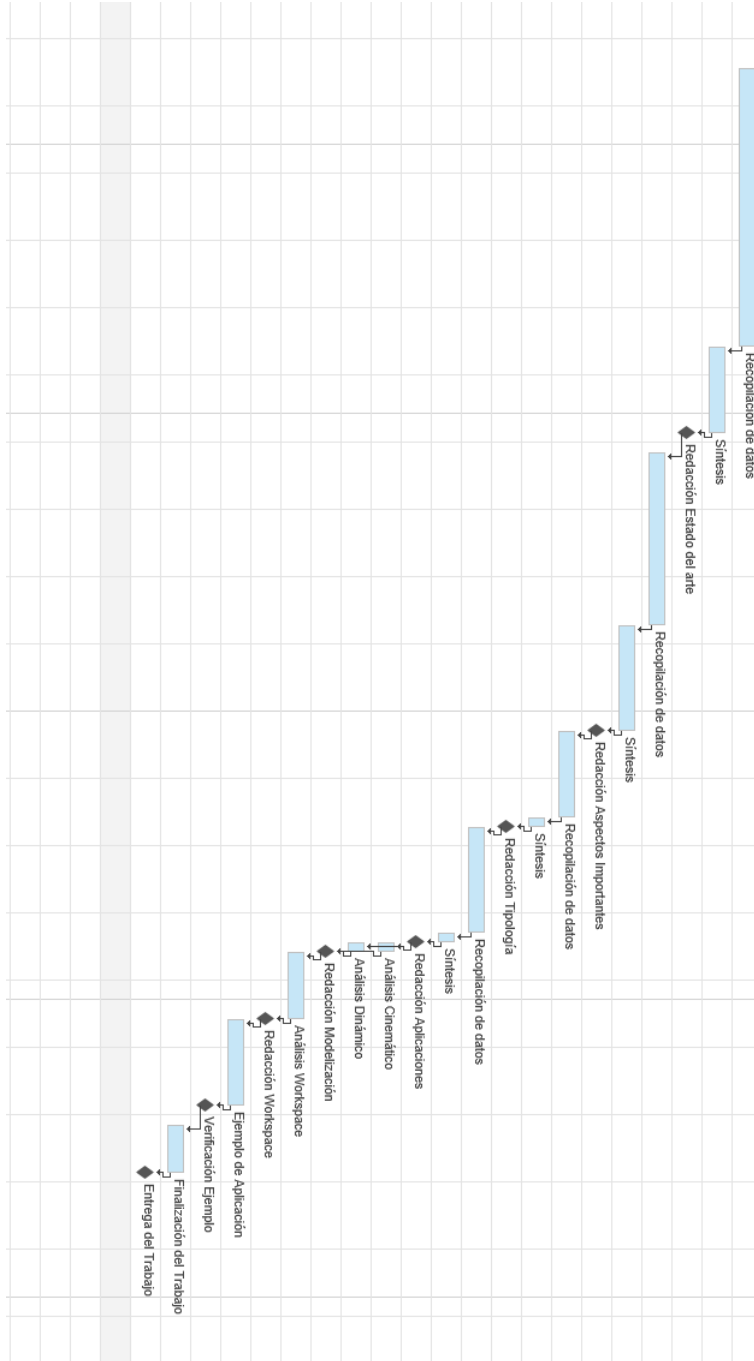


Ilustración 19. Diagrama Gantt

14. PRESUPUESTO

En este apartado se presenta el presupuesto que se ha realizado previamente a la ejecución del trabajo. En él se han tenido en cuenta la horas que se han dedicado junto con los materiales utilizados y se han calculado las tasas horarias. El resultado es un presupuesto de 5.130,03 €. Gracias a este presupuesto es posible estudiar la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Se puede observar el presupuesto detallado en la siguiente tabla:

Concepto	Unidades	Nº de Unidades	Coste Unitario	Coste
Horas Internas				4.000,00 €
Ingeniero Junior	h	200	20,00 €	4.000,00 €
Amortizaciones				366,21 €
Licencias	h	300	0,21 €	300,21 €
Ordenador	h	300	0,22 €	66,00 €
Costes directos				4.366,21 €
Costes indirectos	7%			305,63 €
Subtotal 1				4.671,84 €
Imprevistos	10%			467,18 €
TOTAL				5.139,03 €

Tabla 2. Presupuesto

Hay dos tipos de gastos: Horas Internas y Amortizaciones. En horas internas están las horas que le dedica el estudiante a realizar el trabajo y, al ser un ingeniero junior, se tiene una tasa horaria de 20 € por hora. Como es de esperar, este gasto es el mayor de todos con diferencia. Dentro de amortizaciones se han realizado dos distinciones. La primera es las licencias: MS office, MS Project... ya que son programas de pago y es un gasto que también ha de justificarse. Por otro lado esta las horas de uso del ordenador, que, al igual que con las licencias, se ha de justificar su gasto.

Por último tenemos las partidas de costes indirectos (7% de los costes directos) y la partida de costes imprevistos (10% de directos + indirectos) donde se engloban los gastos como la limpieza y la luz.

15. ANÁLISIS DE RIESGOS

En este apartado se ha realizado un estudio con los riesgos a los que está sometido el trabajo, que pueden suponer un retraso del trabajo. Es importante saber cuáles son estos riesgos, evaluarlos y tomar una decisión sobre la manera de actuar ante ellos en caso de que ocurriesen. Se han encontrado 2 riesgos potenciales de suponer un peligro para la correcta ejecución del trabajo. Dichos riesgos son los siguientes:

- A. Riesgos de información incorrecta: a la hora de buscar información una de las fuentes es internet. En internet cualquier persona puede subir información sobre el tema que quiera y, por ello, cabe la posibilidad de que alguna persona con un conocimiento insuficiente sobre el tema suba información que no sea del todo correcta.
- B. Riesgos de pérdida total o parcial del trabajo: hoy en día se hacen todos los trabajos a ordenador con lo que se tiene el riesgo de que un virus borre el trabajo completo o que un fallo de electricidad haga que se pierda parte del trabajo ya realizado.

Así, una vez descritos los riesgos potenciales, se ha realizado una Matriz de Priorización de Riesgos con el fin de evaluar cuál de los dos riesgos tiene una mayor relación probabilidad-impacto. La Matriz de Priorización de Riesgos es la que se presenta a continuación:

		Impacto		
		Bajo (0.2)	Medio (0.5)	Alto (0.9)
Probabilidad	Baja (0.3)	0.06	0.15	A (0.27)
	Media (0.5)	B (0.1)	0.25	0.45
	Alta (0.9)	0.18	0.45	0.81

Tabla 3. Matriz de Priorización de Riesgos

Una vez analizados con la matriz, se decide la manera de actuar ante estos riesgos. En los dos casos se han decidido medidas preventivas. En el primero de los casos, la solución por la que se opta es hacer visitas cada poco tiempo al tutor del trabajo y enseñarle los avances, con el fin de que el corrobore que los datos utilizados sean correctos.

Para el riesgo B se podría optar por no tomar ninguna solución debido a que la relación Probabilidad-Impacto es muy pequeña. Aun así, se ha encontrado una solución bastante sencilla y se ha decidido utilizarla. La medida que se utiliza es el uso de un disco duro donde ir guardando el trabajo y así en caso de pérdida total tener una copia de seguridad.

16. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un estudio técnico de los manipuladores paralelos actuados por cables. En él se ha introducido estos materiales en el tiempo, se les ha definido y se han expuesto sus características. Además se han diferenciado los tipos que hay, se ha hablado sobre las aplicaciones que pueden tener y se ha realizado un estudio cinemático y dinámico.

Ya finalizado el trabajo se va a pasar a comentar las conclusiones que se sacan de él:

- Los CDPMs son un tipo de mecanismos recientes. Por ello, es difícil encontrar información abundante sobre ellos y la información que hay es en su inmensa mayoría en inglés. Con este trabajo se intenta facilitar la búsqueda de información en castellano sobre ellos. Además, al ser recientes, todavía faltan muchos estudios por hacer para investigarlos y desarrollarlos en su totalidad.
- Estos manipuladores ofrecen grandes ventajas sobre los manipuladores convencionales. Las más relevantes son las altas velocidades y aceleraciones que se pueden conseguir, el poder trabajar sobre espacios de trabajo muy amplio y su ligereza.
- Las aplicaciones en las que se pueden utilizar son casi ilimitadas. En este trabajo se han hablado de varias de ellas, pero todavía quedan muchas aplicaciones que se les puede dar en un futuro.
- Las ecuaciones que rigen su comportamiento dinámico y cinemático, aunque no son sencillas, no son muy complicadas, lo que hace que trabajar con ellos sea relativamente cómodo comparado con otros mecanismos.
- A la hora de maximizar el workspace, habrá que tener en cuenta que se pierde calidad. Lo óptimo es encontrar un punto medio entre calidad y un Workspace amplio.

Resumiendo, aunque quede mucho desarrollar, estos mecanismos tienen unas características muy atractivas y su uso es recomendado siempre que se pueda aprovechar las ventajas que nos ofrecen.

17. FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] MUSTAFA, Shabbir Kurbanhusen, et al. Cable-driven robots. En Handbook of manufacturing engineering and technology. Springer London, 2015. p. 2169-2228.
- [2] CONE, Lawrence L. Skycam-an aerial robotic camera system. Byte, 1985, vol. 10, no 10, p. 122-&.
- [3] BANADAKI, Seyed Masood Dehghan. Modelling and control of cable-driven robots. 2007. Tesis Doctoral.
- [4] BATURONE, Aníbal Ollero. Robótica: manipuladores y robots móviles. Marcombo, 2005.
- [5] SARAIVIA, Darly Babeth P.; LOPEZ, Marlon Jhair H.; RIAZA, Hector Fabio Q. Revisión del estado del arte de manipuladores paralelos. Scientia et technica, 2009, vol. 2, no 42, p. 81-86.
- [6] HERNÁNDEZ, Alfonso. Cinemática de mecanismos: análisis y diseño. Síntesis, 2010.
- [7] Platea [En línea]. Disponible en: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/industrial.htm
- [8] A.MORENO Avalos, Héctor. SlideShare [en línea]. Actualizada: 12 septiembre 2012. Disponible en: <https://es.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos>
- [9] VARIOS autores. Milenio [en línea]. Actualizada: 13 Abril 2017. Disponible en: <http://www.milenio.com/opinion/varios-autores/universidad-politecnica-de-tulancingo/resena-historica-de-los-robots-paralelos>
- [10] V. Gough and S. Whitehall, "Universal tyre test machine," in Proc. FISITA 9th Int. Technical Congress, pp. 117–137, 1962.
- [11] . D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," Proceedings of the institution of mechanical engineers, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, 1965.
- [12] K. Cappel, "Motion simulator," Feb. 9 1971. US Patent RE27,051

- [13] OndaCero [En línea]. Disponible en: http://www.ondacero.es/programas/transistor/audios-podcast/entrevistas/como-funciona-la-skycam-instalada-en-la-parte-alta-de-los-estadios_201801275a6bc7040cf2717a3c2ad430.html#
- [14] BRUCKMANN, Tobias, et al. Wire robots part I: Kinematics, analysis & design. En Parallel manipulators, new developments. InTech, 2008.
- [15] GONZÁLEZ ALVAREZ, Natalia Ximena. Desarrollo de un entorno de simulación para un robot paralelo activado por ocho cables. 2017. Tesis de Maestría.
- [16] MORRIS, Melissa; SHOHAM, Moshe. Applications and Theoretical Issues of Cable-Driven Robots. En Florida Conference on Recent Advances on Robots, FCAR. 2009. p. 1-29.
- [17] <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/bowden-definicion-significado/gmx-niv15-con193242.html>
- [18] BRUNNER, Cristian. Cristianbrunner [en línea]. Actualizada: 22 agosto 2014. Disponible en: <http://cristianbrunner.com/que-significa-tensegridad-de-que-materiales-estamos-hechos-terapia-miofascial/>
- [19] LAU, Darwin Tat Ming. Modelling and analysis of anthropomorphic cable-driven robots. 2014. Tesis Doctoral.
- [20] KAWAMURA, Sadao, et al. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using parallel wire drive systems. Journal of the Robotics Society of Japan, 1997, vol. 15, no 1, p. 82-89.
- [21] BOSSCHER, Paul, et al. Cable-suspended robotic contour crafting system. Automation in construction, 2007, vol. 17, no 1, p. 45-55.
- [22] Tecnalía[en línea]. Disponible en: <http://www.tecnalia.es/proyectos-item/robot-de-manipulacion-por-cables>
- [23] MAO, Ying; AGRAWAL, Sunil Kumar. Design of a cable-driven arm exoskeleton (CAREX) for neural rehabilitation. IEEE Transactions on Robotics, 2012, vol. 28, no 4, p. 922-931.

- [24] MERLET, Jean-Pierre. Wire-driven parallel robot: open issues. En Romansy 19–Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Vienna, 2013. p. 3-10.

18. ANEXO I: TAREAS

El presente anexo contiene la tabla de tareas que se han realizado para la elaboración del trabajo. En la tabla se puede ver el nombre de las tareas, junto con su duración y la dependencia con las demás tareas.

EDT	Código	Nombre	Duración	Predecesor
1	P.T.1	Estado del arte		
1.1	T.1.1	Recopilación de datos	3 sem.	
1.2	T.1.2	Síntesis	1 sem.	T.1.1
1.3	H.1	Redacción Estado del arte	0d	T.1.2
2	P.T.2	Aspectos Importantes		
2.1	T.2.1	Recopilación de datos	2 sem.	H.1
2.2	T.2.2	Síntesis	1 sem.	T.2.1
2.3	H.2	Redacción Aspectos Importantes	0d	T.2.2
3	P.T.3	Tipología		
3.1	T.3.1	Recopilación de datos	1 sem.	H.2
3.2	T.3.2	Síntesis	5d	T.3.1
3.3	H.3	Redacción Tipología	0d	T.3.2
4	P.T.4	Aplicaciones		
4.1	T.4.1	Recopilación de datos	1 sem.	H.3
4.2	T.4.2	Síntesis	5d	T.4.1
4.3	H.4	Redacción Aplicaciones	0d	T.4.2
5	P.T.5	Modelización		
5.1	T.5.1	Análisis Cinemático	7d	H.4
5.2	T.5.2	Análisis Dinámico	7d	H.4
5.3	H.5.1	Redacción Modelización	0d	T.5.1;T.5.2
5.4	T.5.3	Análisis Workspace	5d	H.5.1
5.5	H.5.2	Redacción Workspace	0D	T.5.3
5.6	T.5.4	Ejemplo de Aplicación	7d	H.5.2
5.7	H.5.3	Verificación Ejemplo	0d	T.5.4
6	T.6	Finalización del Trabajo	5d	H.5.3
6.1	H.6	Entrega del Trabajo	0d	T.6

Tabla 4. Tareas