



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

Nombre: Cruz Camacho Diego

Materia: Cinematica de Robtos

Carrera: Ing. Mecatrónica

Docente: Ing. Carlos Enrique Moran Garabito

Grado y Grupo: 7mo B

1. INTRODUCCIÓN

La principal ventaja de los robots paralelos viene dada por la capacidad de distribuir las cargas aplicadas sobre el elemento terminal entre las piernas o cadenas cinemáticas abiertas que unen la plataforma móvil a la plataforma base. Es así como las cadenas cinemáticas o piernas le proporcionan una mayor rigidez al robot. Sin embargo, las piernas limitan su espacio de trabajo por las restricciones que introducen la configuración de cadena cerrada. Esto se explica haciendo un símil con el cuerpo humano, tal como lo presentan en, una cadena cinemática abierta (robot serial) puede ser vista como un solo brazo con el que se pueden realizar diversas tareas. Sin embargo, si se requiere de mayor fuerza o de precisión el ser humano emplea los dos brazos. Cuando se utilizan los dos brazos para manipular una pieza se está usando el concepto de robot paralelo teniendo en cuenta que la base fija es el torso y la plataforma móvil equivale al elemento sujetado con ambas manos. Siguiendo este símil, se puede observar que con los dos brazos se gana mayor capacidad de carga, mayor precisión pero a expensas de perder espacio de trabajo. A pesar de la desventaja de poco espacio de trabajo. Sus ventajas comparativas con respecto a los robots seriales hacen que desde su aparición a mediados de los 50, cada día se desarrollen más aplicaciones en el sector industrial y en nuevos campos como la robótica de servicios. En este sentido, este capítulo presenta una revisión de las aplicaciones prácticas y potenciales de los robots paralelos. De la revisión realizada se destacan 4 áreas principales, las dos primeras dentro del sector de la robótica industrial: 1) operaciones de pick and place y 2) centros de mecanizados para altas velocidades. Las otras áreas de interés radican en la robótica de servicio: 3) la cirugía robótica y 4) el desarrollo de dispositivos de rehabilitación y diagnosis. Antes de abordar las aplicaciones, primero se comienza revisando las aplicaciones iniciales de los robots paralelos. Seguidamente, se describen su empleo en aplicaciones pick and place (recogida y descarga) desde el robot precursor en el campo como lo es el robot Delta, hasta el robot Quattro - posiblemente el robot más rápido en la actualidad- que se destaca por tener un diseño de 4 GdL con 4 piernas, donde cada una de las piernas presenta un sistema de paralelogramo. Además, el robot presenta la característica de un diseño innovador de la plataforma móvil por medio de un plato articulado. Como segundo punto, se revisan los centros de mecanizados cuyo concepto de diseño se basan en robots paralelos. Se agrupan los robots comerciales de mayor impacto hasta la fecha a través de dos categorías. La primera categoría presentan robots basados en la configuración de plataforma Stewart y por tanto de 6 GdL. La segunda categoría incluye a los robots híbridos. Se destaca que una de las ventajas comparativas del robot paralelo con respecto a los robots seriales es en el mecanizado a altas velocidades de materiales de elevada dureza como los utilizados para la fabricación de herramientas y matrices de extrusión. Posteriormente, se presen-

ta una revisión sobre robot paralelos en el campo medico en donde prácticamente no hay dispositivos del tipo comercial, más si dispositivos desarrollados a nivel de laboratorio. La última parte del capítulo se dedica al estudio de robots para rehabilitación y diagnosis. Para cada campo de aplicación se presentan las respectivas referencias no solo de artículos de investigación, sino que también sobre las patentes más relevantes. La información contenida en este capítulo se organiza a los fines de orientar y dar luces a diseñadores en la etapa conceptual de un proyecto de diseño que consideren utilizar un robot paralelo. Adicionalmente, se refieren documentos donde el lector interesado puede profundizar sobre el contenido presentado, por lo que un aporte del trabajo es pensado para orientar la fase inicial de la revisión bibliográfica de trabajos y tesis orientados al desarrollo de robot paralelos. Finaliza el capítulo con la descripción de robot paralelos desarrollados conjuntamente por equipos de investigación de la Universitat Politècnica de València y de la Universidad de los Andes, Venezuela. Se presentan trabajos que se enfocan al desarrollo de robots de rehabilitación y diagnosis de extremidades inferiores.

2. APLICACIONES INICIALES

Un robot paralelo consiste de una plataforma móvil unida a una plataforma fija mediante una serie de cadenas cinemáticas llamadas piernas. Partiendo del anterior concepto, Bonev establece que el origen del robot paralelo se encuentra en la industria del entretenimiento, siendo James E. Gwinnett en el año 1928 uno de los pioneros en patentar un artefacto basado en el concepto de robot paralelo. La Figura 1 presenta un esquema incluido en el documento de la patente original. El dispositivo presenta una arquitectura donde una cadena cinemática o pierna central restringe el movimiento de la plataforma móvil respecto a la base de forma tal que su movimiento resultante es del tipo esférico. Una cadena cinemática ubicada en uno de los extremos de las plataformas, provee el movimiento de rotación a la plataforma móvil que es aprovechado para producir el movimiento requerido para el entretenimiento de los usuarios.



Figura 3 Máquina para ensayo de neumáticos, Robot paralelo de 6 GdL propuesto por Gough [10].

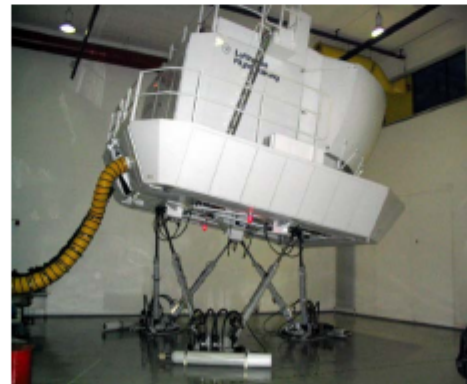


Figura 4 Plataforma Stewart usada por Lufthansa como simulador de vuelo [10].

APLICACIONES.PNG

La primera aplicación industrial conocida del robot paralelo, siguiendo la cronología propuesta por Bonev, fue presentada por Willard L.V. Pollard en el año 1940. El dispositivo fue propuesto para pintar vehículos de forma automática con pintura de aerosol y posteriormente fue patentado como dispositivo para controlar el posicionamiento de una herramienta. La Figura 2 muestra una representación esquemática del ingenioso aparato de 5 grados de libertad (GdL) donde la plataforma móvil va unida a la fija mediante 3 cadenas cinemáticas o piernas. El diseño presenta tres motores que determinan la posición de la cabeza de la herramienta, y otros dos motores que mediante un sistema de cables transmite el movimiento que permite orientar la herramienta.

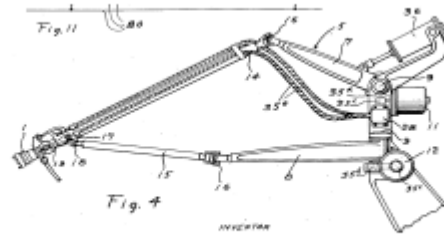


Figura 2 Primera aplicación industrial de los Robot Paralelos patentada en 1942 [6].

APLICACIONES2.PNG

Más tarde en la década de los 50, Eric Gough un ingeniero automotriz trabajando en la fábrica de neumáticos de la Ford Dunlop en Birmingham, Inglaterra, desarrolla una máquina Universal de pruebas de neumáticos. La plataforma fue puesta en funcionamiento en el año 1954 y cumplía la función de probar mecánicamente neumáticos mediante la aplicación de cargas combinadas. La Figura 3 muestra una imagen del dispositivo utilizado por la empresa Dunlop hasta el cierre de la fábrica en el año 1980. Actualmente el dispositivo se ubica en el Museo de Ciencia de Londres, específicamente en el almacén Wroughton. Su diseño presenta una forma de octaedro donde cada cadena cinemática es impulsada por actuadores lineales. El mecanismo presenta 6 GdL. No fue sino hasta 1965 que aparece la primera publicación científica referida a un robot paralelo. Stewart [8] introduce un robot paralelo de 6 GdL similar al de Gough. Debido al parecido que presenta la plataforma Stewart con el robot propuesto por Gough hoy en día la configuración del tipo hexápodo con actuadores lineales se conoce como plataforma Gough-Stewart. Es de destacar que la plataforma Stewart fue propuesta para aplicaciones de simulador de vuelo. La Figura 4 muestra el robot basado en el concepto de Stewart desarrollado para un simulador de vuelo de Lufthansa. Es justo también indicar que Klaus Cappel en 1964 de forma separada, y sin tener conocimiento previo de los trabajos de Gough y de Stewart, patenta una configuración similar al robot hexápodo como dispositivo para simulación de movimiento.

Los robots anteriores representan las aplicaciones iniciales de los robot paralelos, pero no es hasta el año 1987 que los robot paralelos vuelven a tener un auge en la comunidad científica y de desarrollo de aplicaciones (Merlet, 2000). En el siguiente apartado se presentan diversos robots agrupados por campos de aplicación.

3. APLICACIONES DE PICK AND PLACE (RE-COGER Y COLOCAR)

Luego de la introducción de la configuración de robot paralelo para desarrollar simuladores de vuelo, la aplicación más conocida y desarrollada de estos robot es en operaciones de pick and place. Es de destacar que el robot serial equivalente para este tipo de operaciones lo constituye el robot SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arms) que presenta 4 GdL. Un robot SCARA permite posicionar el elemento terminal, y por ende la pieza, en el espacio cartesiano, además también puede realizar una rotación. A este tipo de movimiento se le conoce como movimiento de Schoenflies. El primer robot comercial y posiblemente uno de los más exitosos en implementación industrial lo constituye el robot Delta desarrollado a partir de la década de los 80 en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suiza) por Reymond Clavel . El robot fue desarrollado partiendo de la idea de desarrollar un robot para manipular objetos de bajo peso a altas velocidades. La particularidad del robot Delta es que la plataforma móvil va unida a la base mediante 3 piernas donde cada pierna presenta un mecanismo de paralelogramo que permite balancear el centro de masa de cada una de ellas. Las piernas se unen a la base fija mediante pares o juntas universales (U). La Figura 5 muestra la representación esquemática del robot Delta donde el movimiento de las piernas externas aporta 3 GdL que permiten posicionar la plataforma móvil en el espacio. Generalmente la plataforma superior va fija a la bancada, mientras que la plataforma inferior es la móvil donde va ubicado la herramienta. El diseño de este robot incluye una pierna central del tipo cardan con el objeto de proveer el movimiento de rotación desde un motor ubicado en la base hasta la plataforma móvil. De esta forma el robot presenta los 4 GdL similares al robot SCARA. Lo novedoso de este diseño a diferencia del robot serial equivalente, es que emplea los actuadores en la base por lo que las barras en movimiento requieren de menos masa e inercia para soportar las cargas. El robot puede lograr aceleraciones de 50G en entornos experimentales y para aplicaciones industriales de 12 G. En general, el robot es diseñado para transportar objetos de bajo peso (de 10 gr a 1 Kg), por lo que lo hace un excelente candidato en la industria de ensamblado de componentes electrónicos. En el año 1999 ABB Flexible Automation comienza a fabricar y comercializar el robot Delta bajo el nombre de FlexPicker. En el año 2009 la compañía FANUC adquiere la licencia del robot y lo comienza a desarrollar para manipular objetos de mayor tamaño y peso. Las aplicaciones principales de este tipo de robot se encuentran en la industria del embalaje, en la industria farmacéutica e incluso para aplicaciones médicas de cirugía.



Figura 7 Robot Quattro comercializado por Adept [23].

AND PLACE.PNG

Existen otros desarrollos de robot paralelos para aplicaciones del tipo SCARA pero estos no han alcanzado su aplicación comercial y se mantienen a nivel de desarrollo de laboratorios de investigación o universidades, entre ellos el lector interesado. Uno de los inconvenientes del robot tipo Delta es la necesidad de una pierna central para introducir el movimiento de rotación. La pierna central al ser del tipo cardan limita la vida útil ya que debe soportar grandes momentos de torsión, lo que hace que para altas velocidades se tenga que reemplazar constantemente. Inspirados en la configuración de 4 piernas externas Pierrot y col. presenta un robot con movimiento tipo SCARA que no requiere de una pierna central. La innovación del robot fue introducir el concepto de una plataforma articulada para añadir el grado de rotación a partir del movimiento de las 4 piernas ubicadas de forma externa (sin pierna central). Los diseños tradicionales se basan en una plataforma móvil rígida unida a las piernas. En este nuevo concepto las piernas van unidas a la extremos de la plataforma móvil que a su vez van unidas a un plato (que sirve como elemento terminal) mediante juntas cinemáticas, es decir, la plataforma es un conjunto de varias barras articuladas. El desarrollo de este tipo de robot ha pasado por varias etapas. Se inició con desarrollo de robot de la serie H4, donde H es un indicativo de la forma que presenta la plataforma móvil hasta su versión más actual el robot Par4 [19]. La Figura 6 muestra una representación esquemática del robot Par4 junto con un detalle del plato articulado que sirve como plataforma móvil.

El robot es un ejemplo de éxito de una innovación generada en ámbitos académicos y que luego ha llegado a su implementación en la industria. En el año 2007, la empresa Adept se hace con la patente del robot y lo comercializa bajo el nombre de Quattro. Dicho robot es posiblemente en la actualidad el robot más rápido en

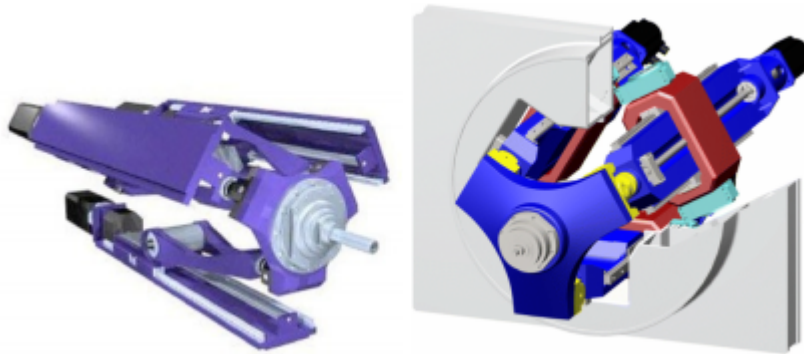
el mercado industrial. La Figura 7 presenta una versión del robot comercializado por la empresa Adept. Las principales aplicaciones de los robot antes descritos se encuentran en Industrias de empaquetado como la de alimentos, para el manejo de células fotovoltaicas, manejo de instrumentos médicos, corte laser a alta velocidad, así como también mecanizado de piezas de madera. También han sido empleados para la manejo de verduras, para mayor detalle se refiere al lector a la referencia. Para el año 2013, los robots pick and place basados en la configuración tipo delta o variantes representaban el 1 mayor número de robot instalados en aplicaciones industriales.

4. APLICACIONES EN CENTRO DE MECANIZADO

Otra de las aplicaciones prácticas de los robots paralelos se encuentra en el área de desarrollo de centros de mecanizado. En este campo es común que los desarrolladores se refieran al robot paralelo como Mecanismo Cinemático Paralelo (MCP) en inglés Parallel Kinematic Mechanism (PKM). El primer prototipo de centro de mecanizado basado en la en MCP fue presentado al público en el evento International Manufacturing Technology Show (IMTS) de 1994 en Chicago, USA. El dispositivo utiliza un robot paralelo del tipo plataforma Stewart (6GdL) para realizar operaciones de mecanizado en 5 ejes. A partir su introducción en 1994 el número de desarrollo y patentes de centros de mecanizados basados en MCP ha incrementado constantemente. Seguidamente describimos aquellos robots que realmente han tenido aplicación en el sector industrial y que han superado la etapa de investigación y prototipado. Una lista extensa de los robots propuestos prototipos académicos o industriales se puede consultar en. El dispositivos presentado en el evento IMTS dio origen al centro de mecanizado comercial Giddings and Lewis' Variax Hexacenter. La base del dispositivo es una máquina del tipo hexápodo (6 GdL) con un diseño particular donde las piernas que unen la plataforma móvil a la fija se cruzan. La Figura 8 muestra una imagen del robot Variax, en ella se puede observar como la plataforma móvil va unida a la fija por medio de 6 piernas donde agrupadas en pares, sus piernas se cruzan.



El desempeño de este robot ha sido comparado con el desempeño de máquinas tradicionales de configuración serial de 3 y 5 ejes. El estudio mostró que para el mecanizado de materiales tradicionales con una dureza de 54HRc el robot paralelo presenta las mismas prestaciones que los robots seriales. La prestación es medida en función del acabado superficial que deja la máquina sobre la pieza así como también la geometría obtenida a partir de medir probetas de prueba. Los autores reportaron que para materiales con alta dureza 62 HRc el robot paralelo Variax mejora las prestaciones de los robots seriales. En esta misma línea de robots basados en la configuración Hexápodo se tiene el Okuma PM600 cuya diferencia respecto a la configuración del Variax subyace en que las piernas del robot están conectadas en configuración hexagonal sin cruzarse. Entre los robots de configuración de 6 GdL cabe destacar también el Hexaglide mostrado en la Figura 9 conjuntamente con el robot Okuma. Adicionalmente se puede destacar el robot HexaM de Toyoda basado en la configuración de 6 ejes.

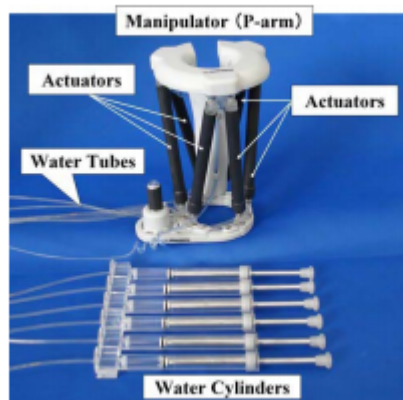


Los robots anteriores entran en la categoría de robot paralelos completos o fully parallel robot, donde cada pierna es similar a la otra y además tiene un actuador o motor en cada pierna que generalmente es lineal. La ventaja de estos robots es que en cada pierna sus componentes trabajan a tradición o compresión por lo que no están sometidos a momento flector como los robots seriales. Esto le da la característica de mayor rigidez pudiendo maquinar piezas de mayor du-

reza. Sin embargo le restan capacidad de espacio de trabajo. Es por esto que ha surgido el diseño de robots híbridos paralelo/serie que tratan de tomar las ventajas tanto de un robot paralelo como de uno serial. En el campo de máquinas de mecanizado generalmente 3 de sus GdL viene dado por el robot paralelo y los GdL restantes son añadidos bien sea utilizando un robot en la base para dar 2 GdL o colocando un robot serial en la plataforma móvil. Para el primer caso donde se usa una plataforma para el movimiento plano de translación x-y, el robot paralelo cumple con la función de proporcionar a la herramienta 3 GdL, principalmente 2 rotaciones y un desplazamiento (en la dirección perpendicular a la base). La Figura 10 muestra una representación esquemática de este tipo de robot.

5. APLICACIONES EN LA CIRUGÍA ROBÓTICA

La cirugía mínimamente invasiva representa una de las áreas donde la introducción de robot produce un gran impacto, sobre todo mejorando las prestaciones de la cirugía laparoscópica, ya que aumenta la habilidad del cirujano a la hora de realizar una operación (mayor precisión, evita el movimiento errático del pulso de la mano). Con la cirugía robótica se han logrado avances como realizar una operación mediante orificios de 10 mm en el cuerpo del paciente. En la actualidad solo hay un robot comercial disponible que es el sistema Da Vinci. El sistema se ha comercializado a partir de los años 90 y en el año 2000 fue autorizado por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de los Estados Unidos. El robot consiste de 3 o 4 brazos robóticos del tipo serial, una consola o monitor para interacción del médico con el robot y una camilla donde se ubica al paciente. El desarrollo de robot paralelo para aplicaciones de cirugía robótica no ha llegado al nivel comercial. Los desarrollos se tienen a nivel de laboratorios de universidades e institutos de investigación. En se diseña un robot paralelo del tipo esférico para aplicaciones de cirugía laparoscópica. El mecanismo se caracteriza por tener juntas de revoluta, los autores presentan el diseño óptimo del robot mediante algoritmos genéticos. Sin embargo este robot no ha evolucionado más allá de su diseño preliminar. En desarrollan un robot paralelo compacto para asistir en varios tipos de operaciones laparoscópicas, el robot presenta la característica de utilizar materiales de bajo costo en su manufactura. El robot ha sido evaluado de forma experimental en colecistectomía extraída de órganos porcinos. El robot presenta una configuración similar al de la plataforma Stewart-Gough donde los actuadores lineales son del tipo hidráulico. La Figura 13 presenta una imagen del robot. Es de destacar también el robot paralelo RAMiSS que presenta una arquitectura 6-RRCCR.



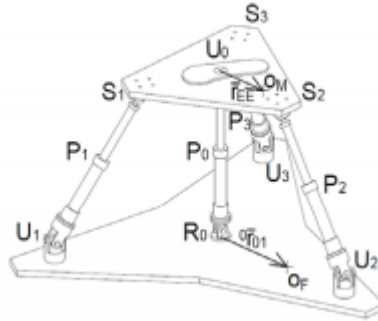
6. APLICACIONES EN ROBÓTICA PARA REHABILITACIÓN

La rehabilitación robótica se presenta como otro de los campos de mayor interés en la actualidad, sirviendo de asistencia al trabajo arduo de los fisioterapeutas, además de que logra una mejor coordinación para los ejercicios de rehabilitación y mayor precisión en el diagnóstico de lesiones y la medición de la evolución de los pacientes. La rehabilitación y diagnosis de las extremidades inferiores es muy frecuente debido a la gran cantidad de accidentes a los que están expuestas estas extremidades, de hecho, en el campo de los deportes suelen presentarse muy a menudo. Los robots paralelos presentan su mayor aplicación en el desarrollo de robot para rehabilitación de tobillo. En la última década se han desarrollado importantes trabajos en el área de la robótica para la rehabilitación y entre los que se han desarrollado prototipos de dispositivos de rehabilitación para la articulación de tobillo. Actualmente, existen dispositivos comerciales Fisiotek 2000 y el Biodex Balance System . También existen un buen número de desarrollos de dispositivos robóticos a nivel de laboratorio, en donde la mayoría de los prototipos desarrollados se basan en configuraciones de robots paralelos, donde el pie generalmente se coloca sobre la plataforma móvil .También se han propuesto robots paralelos tipo exoesqueleto donde la plataforma fija va unida a la pierna (tibia peroné) y la plataforma móvil al pie. Uno de los primeros dispositivos de rehabilitación para la articulación de tobillo propuestos fue el "Rutgers-Ankle". Dicho robot presenta una configuración de robot paralelo tipo plataforma Stewart. El robot consiste de una plataforma móvil con posibilidad de cambiar su posición en el espacio así como también su orientación. El robot presenta 6 grados de libertad (6-GDL) que le permiten mover al tobillo dentro del rango de movimiento realizados por el fi-

siatra en los ejercicios de rehabilitación. En un posterior estudio se observa que no es necesario diseñar robots con 6 GDL para este tipo de rehabilitación. En dicho trabajo se propusieron configuraciones de robot paralelos de 3 GDL y 4 GDL. Seguidamente, en destacan que el rango de movimiento puede variar en función del paciente por lo que proponen un dispositivo reconfigurable con respecto al rango de movimientos de cada paciente. Recientemente, en han discutido aspectos funcionales de configuraciones robóticas considerando el modelo cinemático del tobillo. En el trabajo, emplean un modelo biomecánico del tobillo. Los autores proponen incluir la junta de tobillo, dos pares de revolución, como parte de la topología del robot paralelo. Por lo que el modelo de tobillo es incluido en el estudio cinemático del dispositivo propuesto. Los robots propuestos consideran la base fija colocada en el piso y la base móvil unida al pie. Recientemente, se han propuesto configuraciones de robot paralelos del tipo exosqueleto de 3 GDL y 4 GDL. En estos casos, la plataforma móvil va unida al pie mientras que la plataforma fija va unida a la extremidad inferior. Por último, a partir del estudio de las configuraciones singulares presentes en los robots paralelos, se han propuesto configuraciones de robot paralelos redundantes y se han estudiado aspectos relacionados con el control del robot.

7. APLICACIONES EN EL LABORATORIO UPV Y MECABOT-ULA

El Laboratorio de Mecatrónica y Robótica de la Universidad de los Andes (MECABOT-ULA), Venezuela, conjuntamente con grupos de investigación de la Universitat Politècnica de Valencia han venido desarrollando metodologías para el diseño de sistemas biomecátrónicos para el diagnóstico y rehabilitación de extremidades del cuerpo humano. En particular, se han desarrollado y construido dos prototipos robóticos para rehabilitación y diagnosis de la extremidad inferior. El primer robot fue enfocado para cubrir con tareas de rehabilitación del tobillo, el robot presenta una arquitectura donde la plataforma móvil va unida a la base mediante 3 piernas de configuración PRS. El desarrollo mecatrónico que incluye el modelo cinemático y dinámico del robot puede ser consultado en. La rehabilitación de tobillo requiere principalmente de dos GdL, el primero para la rotación de dorsi/plantar flexión y la segunda para abducción y aducción. El robot PRS presenta además un movimiento de traslación perpendicular al plano base, este GdL es usado ajustar la altura del paciente. Para aplicaciones de rehabilitación resulta muy importante el diseño del controlador. Para este dispositivo se desarrolló controladores tanto de fuerza como también con observadores para la velocidad del robot.



ULTRA.PNG

La arquitectura de control basada en programas middleware que pueden permitir aplicaciones de telerobótica. La Figura 14 presenta una imagen del robot donde es empleado para simular la rehabilitación de tobillo utilizando una pierna maniquí.