

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE MANIPULADORES PARALELOS

Review of state of the art of parallel manipulators

RESUMEN

En este artículo se hace una revisión del estado del arte en el estudio de los manipuladores paralelos con base en cadenas cinemáticas cerradas. Se describen las diferentes líneas de investigación que existen en la actualidad, encargadas de temas como: Diseño mecánico, cinemática, análisis de singularidades, espacio de trabajo, dinámica, control y calibración, de los manipuladores paralelos.

PALABRAS CLAVES: Sistemas de control, Manipuladores paralelos, cinemática.

ABSTRACT

This article reviews the state of the art in the study of parallel manipulators based on closed kinematic chains. It describes the different lines of research that there are currently responsible for issues such as mechanical design, kinematics analysis, features, work space, dynamics, control and calibration, of parallel manipulators.

KEYWORDS: Control systems, manipulators type parallel, kinematics.

DARLY BABETH P. SARAVIA

Ingeniero Mecánico
Profesor Catedrático
Estudiante de Maestría en Sistemas Automáticos de Producción
Universidad Tecnológica de Pereira
babeth69@gmail.com

MARLON JHAIR H. LOPEZ

Ingeniero Mecánico
Profesor Catedrático
Estudiante de Maestría en Sistemas Automáticos de Producción
Universidad Tecnológica de Pereira
marlonjherrera@gmail.com

HECTOR FABIO Q. RIAZA

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira
hquinte@utp.edu.co

1. INTRODUCCION

Este documento muestra los diferentes prototipos de manipuladores paralelos que existen, sus diferentes aplicaciones y la aceptación que han tenido a nivel industrial, ya que poseen mayores aceleraciones, mayores precisiones en los movimientos para ejecutar una tarea, además que son estructuras sin cargas de flexión, entre otras. También se realiza una pequeña descripción de algunos métodos propuestos por diferentes autores para solucionar problemas aun presentes, por la complejidad en las diferentes topologías de estos manipuladores.

2. APLICACIONES INDUSTRIALES

Los primeros trabajos teóricos relacionados con las estructuras mecánicas paralelas aparecieron ya hace siglos, antes de que se empezara a hablar de robots, cuando los primeros ingenieros y dibujantes franceses e ingleses realizaron sus estudios sobre los poliedros y sus aplicaciones. Ya en épocas más recientes, el primer mecanismo paralelo fue patentado en el año 1931. Se trataba de una plataforma de movimiento destinada a la industria del entretenimiento diseñada por James E. Gwinnett [43], ver Fig. 1, aunque el mecanismo diseñado nunca fue construido.

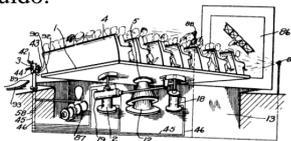


Fig. 1: Plataforma espacial patentada por J.E. Gwinnett [43]

Un corto tiempo después, aparece el primer diseño de robot industrial paralelo. En 1940, Willard L.V. Pollard [43] presentaba un ingenioso robot de 5 grados de libertad destinado a operaciones de pintura con spray. El robot consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno. Los eslabones estaban unidos mediante juntas 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 proporcionada a unos cables flexibles, ver Fig. 2.

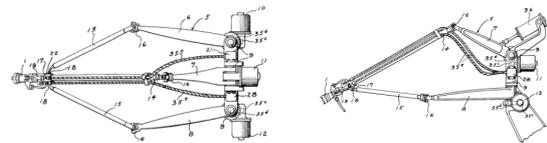


Fig. 2: Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard [8]

Sin embargo, han sido otros mecanismos paralelos los que han logrado un mayor reconocimiento general y han contribuido a la aparición de un mayor número de publicaciones sobre la robótica paralela. Por estricto orden temporal, fue el Dr. Eric Gough [43] quien en 1947 inventó la plataforma paralela más popular de todas. El Dr. Gough diseñó un octaedro hexápodo con lados de longitud variable como plataforma para la comprobación del comportamiento de los neumáticos de la casa Dunlop para la cual trabajaba, bajo cargas aplicadas en diferentes ejes. De esta forma, intentaba simular el proceso de

aterrizaje de un avión. En la actualidad existen multitud de plataformas basadas en este diseño en numerosas empresas, y se conocen bajo el nombre de MAST (Multi-Axis Simulation Table), ver Fig. 3.

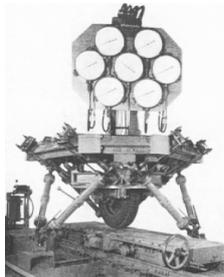


Fig. 3: Robot paralelo ideado por V.E. Gough [43]

Ya en 1965, Mr. Stewart [43], presentó un artículo en el que describía una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad destinada a trabajar como simulador de vuelo, ver Fig. 4. El artículo de Stewart tuvo y tiene gran influencia en el mundo académico y se considera como uno de los primeros trabajos de análisis de plataformas paralelas.

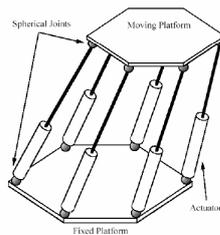


Fig. 4: Plataforma de Stewart [43]

Paralelamente, el ingeniero Klaus Cappel realizaba en el Franklin Institute Research Laboratory numerosas investigaciones con plataformas paralelas de 6 grados de libertad. En 1967 Mr. Cappel patentaba un simulador de movimiento basado en un hexápodo, y construyó varias de sus invenciones ver Fig. 5. Más tarde en 1978, Hunt sugirió que se usaran los mecanismos actuados de forma paralela de los simuladores de vuelo, como robots manipuladores y destacó que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto a rigidez y precisión con respecto a los robots serie convencionales.

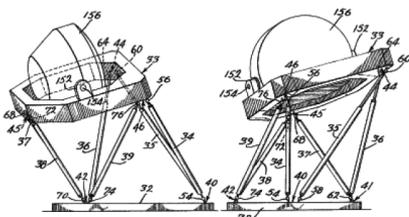


Fig. 5: Simulador de vuelo patentado por K.L. Cappel [43] Además de la excelente relación carga admisible/peso propio, los robots paralelos presentan otras características favorables. En 1979, McCallion y Pham fueron los

primeros que propusieron usar la plataforma de Stewart como un manipulador paralelo para una célula de ensamblaje robotizada, en particular porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares de los robots en serie. La gran rigidez asegura que las deformaciones de los actuadores sean mínimas y esta característica contribuye en gran manera a la precisión en el posicionamiento del manipulador.

En 1990, Reymond Clavel [43] realizó una modificación al manipulador de Stewart que presentaba desventajas respecto con su difícil análisis en la cinemática y su costo elevado en la fabricación de las uniones esféricas por su exigencia en la precisión a la hora de construir. De esta manera surge el manipulador Delta de tres y cuatro grados de libertad, que supera las desventajas antes mencionadas, ver Fig. 6. Este manipulador es un paralelepípedo que cuenta con 3 grados de libertad. En su forma más general, está constituido por una base fija y otra móvil. Éstas se encuentran unidas por 3 cadenas cinemáticas cerradas, conocida cada una como “brazo” del manipulador. Los motores que conducen el plato móvil se encuentran montados en la base fija, de manera que la masa a mover del robot es menor, permitiendo así mayores aceleraciones. Para el Delta de 4 grados de libertad, se le añade un giro a la pinza final. Estos tipos de manipuladores son utilizados principalmente en empresas donde su proceso se basa en la manipulación de alimentos, ya que por su sencillez en la estructura se garantiza una fácil limpieza e higiene.



Fig. 6: Robot paralelo tipo Delta: a) Tres grados de libertad b) Cuatro grados de libertad [6].

En los últimos años los manipuladores paralelos han llamado la atención dadas las ventajas que ofrecen con respecto con los manipuladores seriales en campos como la medicina y las máquinas-herramienta, ver Fig. 7. Esto los ha convertido en un área de investigación y desarrollo con muchos problemas abiertos aún por tratar. Una línea de investigación basada en este tipo de manipuladores debe comenzar comprendiendo a fondo el funcionamiento y complejidad de las estructuras más simples, entre ellas el manipulador delta de tres grados de libertad, que representa una de las estructuras más sencillas y mejor documentas de los robots manipuladores paralelos.



a) b)
Fig. 7: Manipuladores paralelos utilizados en: a) medicina; b) máquina-herramienta [6]

En la actualidad existen tres tipos de robots manipuladores paralelos que son construidos a nivel comercial y que presentan diferentes tipo de aplicaciones, estos son [49]:

- El robot Delta desarrollado por R. Clavel del cual se calcula que existen más de 4000 unidades en funcionamiento a nivel mundial, y es utilizado especialmente en industrias de manipulación de alimentos.
- El robot Tricept patentado por K.N. Neumann del cual se estima que existen cerca de 300 unidades, el cual es utilizado en maquinas herramientas de media precisión e incursionando en el campo de la medicina.
- Plataforma de Gough, la cual es el manipulador paralelo más construido con cerca de 20000 unidades y la cual es utilizada para orientación de antenas, telescopios, paneles solares, aislamiento y producción de vibraciones, posicionamiento de microscopios y pacientes, simuladores de vuelo de avión, vehículos elevadores, ensamble de componentes, posicionamiento de piezas y como máquina herramienta de precisión media.

3. LINEAS ACTUALES DE INVESTIGACION

A continuación se mencionan algunas líneas actuales de investigación, que surgen por el afán de solucionar problemas aun presentes en los manipuladores paralelos, entre ellas destacamos:

3.1 Diseño Mecánico

Actualmente es aún objeto de estudio encontrar un método específico para diseñar cualquier tipo de arquitectura de un robot paralelo, dado el número y el tipo de grados de libertad.

3.2 Cinemática

Hay que distinguir dos aspectos de interés: la cinemática inversa y la cinemática directa, las cuales se utilizan para analizar el comportamiento de los manipuladores. Durante años de estudio se han presentado algoritmos para resolver casos especiales por Merlet [38], Innocenti [25], pero soluciones analíticas sólo se han encontrado en arquitecturas especiales, presentadas por Lee [29]. Otro avance fue propuesto por Ku [28] quien propone el análisis del modelo cinemático directo de la plataforma de Stewart empleando el método de Newton-Raphson, mostrando una mayor simplicidad y eficiencia. También se encuentra Yang [51], que se centra en el diseño y análisis cinemático de robots modulares paralelos reconfigurables de tres cadenas cinemáticas y 6 grados de libertad. Para la solución del problema cinemático directo

utiliza un algoritmo basado en información sensorial de las articulaciones pasivas para simulaciones en línea y el algoritmo de iteración numérica de Newton-Raphson para simulaciones fuera de línea. Otra forma práctica de resolver la cinemática directa es implementar sensores de posición y de orientación para calcular la postura de la plataforma móvil, presentada por Arai [2], y Merlet [38]. Otra solución fue propuesta por Bonev [5], que propone un nuevo método de solución del problema directo usando tres sensores lineales adicionales.

3.3 Análisis de Singularidades

Los robots paralelos pueden adoptar configuraciones en las cuales las fuerzas articulares no puedan equilibrar los esfuerzos sobre la plataforma móvil. Es importante determinar estas configuraciones en cuya vecindad las fuerzas articulares tienden a infinito y el robot puede colapsar. Un estudio analítico elemental de este tipo de singularidades se puede encontrar en Gosselin y Ángeles [19], donde se denominan como 'singularidades de segundo tipo'. Estas disposiciones singulares están caracterizadas por la anulación del determinante de la matriz jacobiana inversa. A pesar de que esta matriz sea conocida, en la mayoría de los casos la computación simbólica de este determinante no conduce a soluciones analíticas, por lo que hay que recurrir a procedimientos numéricos como los propuestos por Douady [16]. Merlet [37], hizo un extenso uso de la geometría de Grassman para enumerar con detalle las condiciones geométricas singulares de diferentes robots paralelos. Liu [32], realizó un estudio geométrico de las singularidades de la plataforma de Stewart, en el que analizaron la matriz jacobiana para cuatro posiciones singulares. Ma y Ángeles [35], mostraron que algunas arquitecturas simétricas de la plataforma de Stewart, presentan singularidades extendidas por todo el espacio del trabajo o regiones importantes dentro del mismo, caracterizadas por la capacidad de movimiento continuo de la plataforma móvil con todos los actuadores bloqueados. A estas singularidades las llamaron singularidades de arquitectura. Aunque estas singularidades dan lugar a serios problemas de control, éstas se pueden eliminar en la fase de diseño. Gosselin estudió la asociación del condicionamiento de la matriz de transformación estática con la rigidez de la plataforma de Stewart, donde se perdía rigidez cerca de configuraciones singulares. Un problema que queda por resolver es determinar de forma simultánea si existen configuraciones singulares dentro del espacio de trabajo de un robot, Sefrioui [48]. Bhattacharya [4], desarrolló un esquema de planificación de trayectorias evitando singularidades, de forma que reestructuraba la planificación en la vecindad de una singularidad. Luego Dasgupta y Mruthyunjaya [13], formularon el problema de la planificación de trayectorias evitando singularidades y desarrollaron una estrategia para planificar entre dos puntos trayectorias bien condicionadas en el espacio de trabajo del robot.

3.4 Espacio de Trabajo

En los robots paralelos el espacio de trabajo no se puede desacoplar en dos sub-espacios 3D caracterizando los movimientos de traslación y de orientación. Este acoplamiento hace que la representación del espacio de trabajo de la gran mayoría de los robots paralelos, sólo sea posible en seis dimensiones, lo que dificulta su representación y aun más su uso en aplicaciones prácticas. Ante esto, cabe desglosar el problema en dos: dada una orientación constante, representar el espacio de trabajo de todas las posibles posiciones 3D, o bien, dada una posición representar el espacio de trabajo de las posibles orientaciones (3D). Una forma usual es representar las posibles traslaciones de la plataforma móvil a una altura y orientación constantes, mediante un procedimiento de discretización fue dado por Fichter [17], y Arai [3], o, más eficientemente, por un algoritmo geométrico dado por Merlet [38], y Gosselin [20], que tenga en cuenta los límites de los actuadores, sus interferencias y las restricciones de las articulaciones. Haug [24], desarrolló una formulación general para el análisis de la destreza y del espacio de trabajo de los manipuladores paralelos en términos de la matriz jacobiana y de las ecuaciones de restricción para la plataforma de Stewart. Masory y Wang [36], consideraron el problema de determinar secciones del espacio de trabajo incluyendo los límites angulares de las articulaciones y la interferencia de los actuadores. Aunque la mayoría de los autores estudiaron el espacio de trabajo manteniendo una orientación fija, Merlet [39], desarrolló un algoritmo para la representación de todas las posibles rotaciones dentro del espacio de trabajo, alrededor de un punto considerado fijo en la plataforma móvil. Merlet [40], propone la inclusión completa de una trayectoria recta en el espacio de trabajo, para una orientación constante y para una variación lineal de los ángulos de orientación. Otro problema que aún se presenta, consiste en determinar las dimensiones de un robot, para que abarque un espacio de trabajo deseado, propuesto por Merlet [42].

3.5 Dinámica

El análisis dinámico de los robots paralelos es complicado dada la existencia de múltiples cadenas cinemáticas cerradas. Diferentes formulaciones han sido propuestas: Dasgupta y Mruthyunjaya, Do y Yang, Guglielmetti y Longchamp y, Tsai y Kholi proponen la formulación de Newton-Euler, Lebret y Liu, Miller y Chavel, Pang y Shahingpoor, proponen la formulación langrangiana, y por último Miller, Codourey y Burdet, Tsai, Wang y Gosselin, Zang y Song proponen el principio de los trabajos virtuales, todas estas referencias se pueden encontrar en Tsai [49]. Do y Yang [15], solucionan la dinámica inversa de la plataforma de Stewart empleando la formulación de Newton-Euler. Geng [18], y Liu [32], desarrollaron las ecuaciones de movimiento de Lagrange para la plataforma de Stewart, asumiendo ciertas simplificaciones en cuanto a geometría y distribución inercial de la plataforma. Dasgupta y Mruthyunjaya [14], y Gosselin [20], proponen un modelo

dinámico inverso para la plataforma de Stewart, que utiliza la formulación de Newton-Euler. Liu [33], propone las ecuaciones del modelo dinámico directo para la plataforma de Stewart-Gough, mediante las ecuaciones de Kane. Este método considera cada cadena cinemática de la plataforma, como una estructura independiente.

3.6 Control

El control de los robots paralelos es todavía un campo abierto y los trabajos aportados hasta la fecha no son muy rigurosos. Liu [30-31], discutió varios aspectos prácticos en relación con el control dinámico de robots paralelos. El análisis es aplicado a una plataforma Stewart dentro de un centro de mecanizado, sin embargo, su esquema de control en tiempo real está en duda debido a las intensas tareas computacionales implicadas en la solución de la cinemática directa. Otra estrategia de control dinámico fue desarrollada por Hatip y Ozgoren [23]. Empleaban una plataforma de Stewart para estabilizar el movimiento de un barco. Wang [50], presentó un esquema de control basado en redes neuronales la cual resultó ser superior respecto de la estrategia del control cinemático. Harris [22], empleó el control cinemático y realizó un análisis sobre la eficiencia computacional entre trayectorias helicoidales y trayectorias en línea recta. Además, demuestra que en determinadas situaciones, un movimiento de rotación y traslación del efector final entre dos puntos requería menos movimiento en los actuadores. En los robots paralelos rápidos, es necesario resolver el modelo dinámico para llegar a un control satisfactorio. Aún no se han establecido soluciones analíticas, pero, se suelen hacer ciertas simplificaciones que permiten simular el comportamiento dinámico de estas plataformas, Reboulet [45], Pierrot [44], y Do [15]. Reboulet [46], y Arai [3], emplean señales de diferentes sensores de esfuerzo dentro del sistema de control, para una plataforma Stewart en aplicaciones de ensamblaje y seguimiento de superficies. La dinámica y el control de la plataforma Stewart teniendo en cuenta la flexibilidad de los actuadores fueron propuestos por Lee y Geng [29], a través del modelo simplificado de la inercia y la flexibilidad de las cadenas cinemáticas.

3.7 Análisis de precisión

La precisión de un robot paralelo no sólo depende del control, sino también del buen conocimiento de sus características geométricas. Además de las tolerancias de fabricación, otros factores intervienen en la precisión del robot. Wang [50] demostró que en una plataforma de Gough son necesarios 132 parámetros para describir sus características geométricas. Sin embargo mediante un cuidadoso diseño, estos parámetros se pueden reducir al conjunto de coordenadas articulares (36 parámetros) y los recorridos de los actuadores (6 parámetros). El análisis de precisión de posicionamiento de robots paralelos sigue vigente como un problema por resolver, aunque ha sido tratado por varios científicos como Masory y Wampler.

4. AGRADECIMIENTOS

Damos nuestro agradecimiento a COLCIENCIAS y a la Universidad Tecnológica de Pereira, Convenio Interadministrativo Especial de Cooperación No 113-2008, por el apoyo mediante la convocatoria jóvenes investigadores, que hace posible la ejecución de este proyecto.

5. CONCLUSIONES

La creciente demanda de los manipuladores paralelos por el sector industrial, ha permitido que entes académicos se interesen en el estudio de métodos para solucionar problemas vigentes en este tipo de manipuladores debido a la complejidad en su topología, así como rofundizar en los diferentes campo de estudio (evaluación de eficiencia, estimación de la resistencia pasiva, errores en la trayectoria debido a deformaciones térmicas o por las cargas aplicadas, análisis nodal), esto es posible a través de la construcción de prototipos o equipos de ensayos para hacer más fácil la apropiación del conocimiento de su funcionamiento y obtener los valores de los parámetros que los caracterizan, para así tener una mejor operación del manipulador.

Por eso la necesidad de construir un equipo de pruebas, por parte de los estudiantes de Maestría en Sistemas Automáticos de Producción de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, proyecto respaldado por Colciencias, para enriquecer la formación de los investigadores en los programas de pregrado y maestría de la Facultad de Ingeniería Mecánica, buscando con esto el fortalecimiento en la parte de operación y control de estos manipuladores y lograr así que se convierta en una alternativa real de automatización para el ingeniero, en las diferentes aplicaciones de procesos industriales.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Agrawal S.K. Workspace boundaries of in-parallel manipulator systems. *Int. J of Robotics and Automation*: 94-99, 1992.

[2] Arai, T. (1990). "Development of a parallel link manipulator". In *ICAR*, pages 839-844, Pise, 19-22.

[3] Arai, T., Stoughton, R., and Jaya, Y.M. (1991). Micro hand module using parallel link mechanism. In *Japan/USA Symp. on Flexible Automation*, pages 163-168, San Francisco, 13-15.

[4] Bhattacharya, S., Hatwal, H., and Ghosh, A. (1998). "Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators". *Mechanism and Machine Theory*, 33(7):965-974.

[5] Bonev, I.A., Ryu, J. (1999). "A simple new closed-form solution of the direct kinematics using three linear extra sensors. In *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 526-530, Atlanta, 19-23.

[6] Bonev, Ilian. Delta Parallel Robot, *The Story of Success*. Disponible en: <http://www.dimec.unige.it/PMAR/>. Acceso Mayo del 2008.

[7] Clavel R Conception d' un robot parallel rapide á 4 degrés de liberté Ph.D. thesis, EPFL, Lausanne, 1991. N° 925.

[8] R. Clavel L. Rey. The delta parallel robot, *Parallel Kinematic Machines, Theoretical Aspects and industrial requirements*, Advanced Manufacturing Series. Springer, 1999.

[9] Clavel R. and others. A new 5 dof parallel Kinematics for production applications. In *Int. Symp. On Robotics*, Stockolm, October, 9-11, 2002.

[10] Clavel R. and others. High precision parallel robots for micro-factory applications. In *2nd Colloquium. Collaborative Research Centre 562*, pages 285-296, Braunschweig, May, 10-11, 2005

[11] Ceccarelli M. and Carbone G. Numerical and experimental analysis of the stiffness performances of parallel manipulators. In *2nd Int. Colloquium, Collaborative Research Center 562*, pages 21-36, Braunschweig, May, 10-11, 2005

[12] Chen I. and others. The management of parallel-manipulator singularities using joint-coupling. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 773-778, Taipei, September, 14-19, 2003

[13] Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998a). "Singularity-free planning for the Stewart platform manipulator", *Mech. Mach. Theory* Vol 33, N° 6, pp 711-725.

[14] Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998b). Closed-Form Dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach. *Mech. Mach. Theory* Vol 33, N° 7, pp 993-1012.

[15] Do W. and Yang, D. (1988). Inverse Dynamic Analysis and Simulation of a Platform Type of Robot," *Journal of Robotics Systems*, vol. 5, No. 3, pp. 209-227.

[16] Douady, D. (1991). Contribution à la modélisation des robots parallèles: conception d'un nouveau robot à 3 liaisons et six degrés de liberté. *Thèse de doctorat, Université Paris VI*, Paris.

[17] Fichter, E.F. (1986). A Stewart platform based manipulator: general theory and practical construction. *Int. J. of Robotics Research*, 5(2):157-181.

[18] Geng, Z. and Haynes, L.S. (1992). "On the dynamic model and kinematic analysis of a class of Stewart platforms". *Robotics and Autonomous Systems*, 9:237-254.

[19] Gosselin, C., and Angeles, J. (1990). "Singularity analysis of closed-loop kinematic chains". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(3):281-290.

[20] Gosselin, C. (1990). "Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 112, pp.167-176, 1990.

[21] Gosselin, C. (1996). "Parallel Computational Algorithms for the kinematics and Dynamics of Parallel Manipulators", *ASME J. Dyn. Syst., Meas. Contr.*, vol 118-1, pp. 22-28.

[22] Harris D.M.J. (1995). Parallel-linkage robot coordinate transformation through screw theory. *9th*

World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, pp1565-1568.

- [23] Hatip, O.E. and Ozgoren M.K. (1995). Utilization of a Stewart platform mechanism as a stabilizer. *9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pages 1393-1396.
- [24] Haug, E. J. (1989). *Computer Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon, USA.
- [25] Innocenti, C. and Parenti-Castelli, V. (1993). Echelon form solution of direct kinematics for the general fully-parallel spherical wrist. *Mechanism and Machine Theory*, 28(4):553-561.
- [26] J.M. Angulo, S. Romero, I. Martinez. *Introducción a la robótica, Principios teóricos, construcción y programación de un robot educativo*, Thomson, 2005.
- [27] J.E. Shigley, *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, McGraw-Hill, 1993.
- [28] Ku, D.M. (1999). "Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism". *Mechanism and Machine Theory*, 34(3):453-465.
- [29] Lee, J.D. and Geng, Z. (1993). Modeling and control of a flexible Stewart platform. *IFAC 12th Triennial World Congress*, pp 441-444, Sydney.
- [30] Liu, Y., Huang, T.S. and Faugeras, O.D. (1990). Determination of camera location from 2-d to 3-d line and point correspondences. *IEEE Trans. Pat. Anal. Machine Intell.*, n°1, pp 28-37.
- [31] Liu, K., Lebet, G., Lowe J.A., and Lewis F.L. (1992). Control of a Stewart platform based robotic milling cell. *ASME Winter Annual Meeting, Symp. on Manufacturing and Control issues in a robotics assembly Workcell*, Angheim.
- [32] Liu, K., Lewis, F., Lebet, G., Taylor, D. (1993). "The singularities and dynamics of a Stewart platform manipulator", *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. vol.8, no.3, pp.287-308.
- [33] Liu, M.J. Li, C.X., and Li, C.N. (2000). "Dynamics Analysis of the Gough-Stewart Platform Manipulator" *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, N° 1.
- [34] Low, Kin-Huat. *Industrial Robotics, Programming, Simulation and Applications* [Publicación en línea]. Disponible en: <http://www.ars-journal.com>. Acceso Junio del 2008.
- [35] Ma, O. and Angeles, J. (1991). "Architecture singularities of platform manipulator". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1542-1547, Sacramento.
- [36] Masory, O. and Wang, J. (1995). "Workspace evaluation of Stewart platforms". *Advanced robotics*, 9(4), pp 443-461.
- [37] Merlet, J-P. (1989). An algorithm for the forward kinematics of general 6 d.o.f. parallel manipulators. *Research Report 1331*, INRIA.
- [38] Merlet, J. P. (1992). Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 11(2), 150-162.
- [39] Merlet, J-P. (1993). Orientation workspace of a parallel manipulator with a fixed point. In *ICAR*, pages 141-146, Tokyo.
- [40] Merlet, J-P. (1994). "Trajectory verification in the workspace of parallel manipulators". In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2166-2171, San Diego.
- [41] Merlet, J.P. (1994). "Designing a Parallel Manipulator for a Specific Workspace," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 16. No.4. pp.545-556.
- [42] Merlet, J.P. (1995). "Designing a parallel robot for a specific workspace". *Rapport de Recherche 2527*, INRIA.
- [43] Merlet, J.P. *Parallel Robots*, Second Edition, Springer, 2006.
- [44] Pierrot, F., Dauchez, P., and Fournier, A. (1991). Towards a fully-parallel 6 d.o.f. robot for high speed applications. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1288-1293, Sacramento.
- [45] Reboulet, C., and Berthomieu T. (1991). Dynamic model of a six degree of freedom parallel manipulator. *ICAR*, pp 1153-1157.
- [46] Reboulet, C. and Pigeyre R. (1992a.). Hybrid control of a 6 d.o.f. in parallel actuated micro-manipulator mounted on a SCARA robot. *Int. J. of Robotics and Automation*.
- [47] Reymond, Clavel. *Devise for the movement and positioning of an element in space*, 1990. U.S. Patent: 4,976,582.
- [48] Sefrioui, J. and Gosselin, C. (1992). "Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators". *Robotics and Autonomous Systems*, 10:209-224.
- [49] Tsai, Lung-Wen. (1999). *Robot Analysis: The mechanic of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, Inc.
- [50] Wang, J. and Masory, O. (1995). On the accuracy of a Stewart platform-part I: The effect of manufacturing tolerances. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 114-120, Atlanta.
- [51] Yang, G., Chen, I-M. and Yeo, S.H. (1999). "Design consideration and kinematic modeling for modular reconfigurable parallel robots". In *10th World*.