

Estado de la técnica de los manipuladores paralelos. Aplicaciones prácticas y criterios cinemáticos de diseño

Alfonso Hernández-Frías, Mónica Urizar-Arana, Víctor Petuya-Arcocha, Enrique Amezcua-San Martín, Mikel Díez-Sánchez
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Bilbao

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7258>

1. INTRODUCCIÓN

Los robots son cadenas cinemáticas compuestas por elementos mecánicos resistentes, dotadas de movilidad, y actuadas por motores que se coordinan electrónicamente mediante armarios de control, comandados por un programa de ordenador. Inicialmente se pensaron para manipular objetos y ejecutar tareas que tradicionalmente eran realizadas por personas. Actualmente se diseñan para cualquier tarea imaginable, pueda o no ser realizada por el hombre, tal que suponga una ventaja económica, social, industrial, médica, o de cualquier otra índole que suponga un avance respecto del estado actual de la técnica. En consecuencia, existen diversos tipos de robots: robots humanoides, robots de exploración, robots acuáticos, robots aéreos, robots destinados aplicaciones médicas, robots espaciales, manipuladores robóticos, etc. Los manipuladores robóticos son ampliamente utilizados en el sector industrial; son sistemas mecánicos cuya misión es manipular objetos, esto es, transportar objetos de una localización a otra. En la categoría de manipuladores robóticos destacan sin duda dos tipos, los robots serie y los robots paralelos. Los robots serie se componen de una sucesión de cuerpos rígidos conectando una base fija con el elemento terminal, que es quien realiza la función. Su topología estructural es similar a la de un brazo humano, por lo que también se les conoce como robots antropomórficos. George C. Devol y

Joseph F. Engelberger crean en 1956 la empresa *Unimation* y desarrollan el primer robot serie, *Unimate*, instalado en una cadena de montaje de General Motors (New Jersey). Fue considerado el primer robot industrial de la historia y su función era la de levantar y apilar grandes piezas de metal caliente. Durante los años sesenta y setenta hubo una continua evolución de este tipo de robots industriales, destacando el robot *PUMA*, un robot de seis grados de libertad (gdl), utilizado sobre todo para aplicaciones de soldadura por puntos. Los *Unimates* y *PUMAs* tuvieron un gran impacto en la industria, especialmente en las industrias de automoción y de aviación. Hoy en día, destacan los robots de cuatro gdl (denominados SCARA) y los de seis, como pueden ser los comercializados por las compañías KUKA y ABB. Estos robots cubren un amplio espectro de aplicaciones industriales, como son: operaciones de máquina-herramienta, manipulación, carga y descarga, procesos de soldadura, sistemas de embalaje, industria de la automoción, etc.

Realizada esta breve reseña sobre los robots serie, de aquí en adelante el artículo se va a centrar en los robots paralelos. Se denomina *manipulador paralelo* a aquél que posee un elemento terminal unido a un elemento base o fijo por medio de varias cadenas cinemáticas independientes [Merlet, *Parallel Robots*, 2006]. Esta arquitectura de lazo cerrado presenta una serie de ventajas: relaciones carga/peso elevadas, alta rigidez a lo largo de todo el espacio de trabajo, baja inercia, altas velocidades y aceleraciones, y gran precisión. Sin embargo, en comparación con los robots serie, poseen un espacio de trabajo más limitado, con una cinemática compleja debido a las singularidades asociadas a la arquitectura paralela.

1.1. BREVE HISTORIA DE LOS ROBOTS PARALELOS

La primera aplicación de los manipuladores paralelos en los tiempos modernos se remonta al año 1928, cuando el inventor James E. Gwinnett patentó [1] un ingenioso diseño de una plataforma móvil con arquitectura paralela, destinada a la industria del entretenimiento, en particular, para el cine. Se trataba de un sistema capaz de simular una ley de movimiento ligada a las imágenes proyectadas en pantalla.

En 1942, Willard L.V. Pollard inventó un manipulador paralelo de aplicación industrial [2], destinado al posicionamiento de una pistola de spray automática. Este manipulador es considerado el primer robot paralelo industrial. Poco tiempo después, en 1947, el ingeniero Eric Gough desarrolló un manipulador paralelo, conocido como



Fig. 1: Plataforma Gough de Dunlop Tyres



Fig. 2: Variax Hexacenter de Giddings and Lewis

Hexápodo (en inglés *Hexapod*), que tuvo y continúa teniendo en la actualidad una gran importancia en la industria. El diseño, representado en la Fig. 1, consiste en una plataforma móvil, de seis gdl, unida a una base fija mediante seis cadenas cinemáticas actuadas por pistones neumáticos. Este sistema fue fabricado por la compañía Dunlop Tyres y se utilizó como dispositivo para el control de calidad de neumáticos.

En 1965, D. Stewart publicó un artículo de un robot paralelo de características muy similares al de Gough, cuyo objeto era el diseño de una plataforma de simulación de vuelo [3]. En ocasiones, debido a sus similitudes, se confunden los diseños citados, refiriéndose indistintamente a ambos como la plataforma *Gough-Stewart*. Por otro lado, el ingeniero Klaus Cappel, desconociendo los inventos de Gough y Stewart, diseñó y patentó en 1967 un hexápodo también destinado a la simulación del vuelo [4].

2. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LOS MANIPULADORES PARALELOS

En esta sección, van a citarse de forma clasificada una serie de aplicaciones prácticas que presentan los manipuladores paralelos. Si bien existen numerosas referencias de aplicaciones industriales [5], el presente artículo ha tratado de destacar las más relevantes, o de mayor impacto en la actualidad.

2.1. MÁQUINA-HERRAMIENTA

Las operaciones de mecanizado por arranque de viruta exigen una alta velocidad de ejecución y unos requisitos dinámicos muy exigentes. En consecuencia, la arquitectura de los manipuladores paralelos se postula como una alternativa muy apropiada para este sector. De entre las numerosas Máquinas de Cinemática Paralela (*Parallel Kinematic Machines, PKMs*) podemos destacar el centro de mecanizado *Variax Hexacenter* de Giddings and Lewis (Fig. 2), y el robot paralelo *Sprint Z³-head*, diseñado como cabezal de máquina-herramienta y desarrollado por DS Technologie GmbH (Fig. 3). El *Octahedral Hexapod VOH-1000* de la empresa Ingersoll (Fig. 4) posee una arquitectura similar a la de *Variax*. Ambas son máquinas de cinco ejes, basadas en la arquitectura del

hexápodo. *Variax* consigue una precisión de 11 μm y *Octahedral Hexapod* 20 μm . Otro modelo de Ingersoll de características similares al *Octahedral Hexapod* es el HOH-600, en el cual la herramienta se dispone en un plano horizontal. Por otro lado, el mencionado *Sprint Z³-head* es un cabezal de herramienta que permite la orientación de ésta dentro de un cono de $\pm 40^\circ$, alcanzando una velocidad en el elemento terminal de 80°/sg.

Entre los diversos centros de mecanizado expuestos en la referencia [6] se puede destacar el *Cosmo Center PM-600* de Okuma, que es un manipulador paralelo destinado a la producción de alto rendimiento de moldes y troqueles de aluminio. Otros centros de mecanizado reseñables son el *DECKEL MAHO Pfronten TriCenter DMT100*, basado en una estructura híbrida compuesta por un manipulador paralelo de tres gdl más una cadena serie de dos gdl adicionales para la herramienta de fresado, o el *Vertical Turning Machine Index V100* para aplicaciones de torneado, fresado y soldadura laser.

Otro de los robots paralelos de gran éxito comercial en la actualidad y que

se utiliza también para mecanizado, es el denominado *Tricept*, desarrollado por SMT Tricept AB. Está compuesto por tres cadenas cinemáticas actuadas y una cadena cinemática pasiva, de manera que dotan al elemento terminal de un patrón de movimiento compuesto por dos rotaciones independientes y una traslación, y de una mayor rigidez estructural.

2.2. MANIPULACIÓN DE COMPONENTES (PICK & PLACE)

Las operaciones de transporte y colocación de componentes, denominadas *Pick & Place*, han encontrado en los manipuladores paralelos un aliado perfecto. Para este tipo de operaciones se precisan manipuladores paralelos espaciales de baja movilidad con velocidades y aceleraciones muy elevadas. Se les denomina “de baja movilidad” porque poseen un elemento terminal dotado de una movilidad inferior a seis gdl. En concreto, en este ámbito de la manipulación de piezas destacan los robots que poseen tres gdl de traslación, y los de cuatro gdl que generan el denominado movimiento *Schönflies* (tres gdl de traslación y una rotación alrededor de un eje de dirección fija).

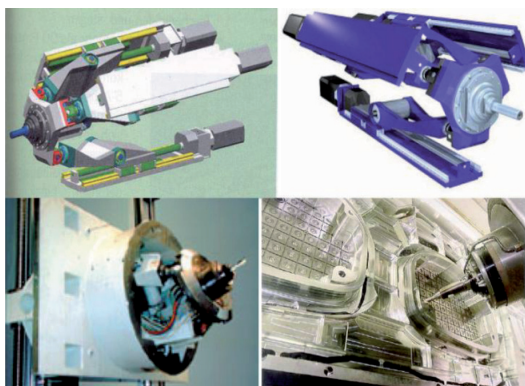


Fig. 3: Sprint Z³-head de DS Technologie GmbH



Fig. 4: Octahedral Hexapod VOH-1000 de Ingersoll



Fig. 5: Robot IRB 340 FlexPicker de ABB



Fig. 6: Sigpack System de Bosch

El primer manipulador espacial de tres gdl fue diseñado en 1990 por Raymond Clavel, el robot paralelo *Delta* [7]. Este robot está compuesto por tres cadenas idénticas, incluyendo cada una un paralelogramo. Cada cadena restringe un gdl de rotación a la plataforma de manera que el movimiento resultante de la misma es una traslación pura. El sistema de actuación se compone de tres motores rotativos, ubicados en la base de cada una de las correspondientes cadenas. Además, un brazo telescópico motorizado conecta la base fija con la plataforma móvil, dotando a ésta de una gdl adicional y desacoplado, que permite el giro de la plataforma móvil.

El robot *Delta* puede ser considerado como uno de los diseños de robots paralelos con mayor éxito comercial, destacando el robot comercial *IRB 340 FlexPicker* del grupo ABB (representado en la Fig. 5), el cual es capaz de llevar a cabo más de 150 operaciones de toma, giro y dejada por minuto. Su velocidad es de 10 m/s y su aceleración máxima supera el valor 10 g. Un ejemplo de aplicación en el sector industrial es el *Sigpack System* (Fig. 6), de la compañía *Bosch Packaging Technology*, que constituye un sistema automático de manipulación y empaquetado formado por varias células compactas con robots *Delta* integrados.

Existen diferentes variantes del robot *Delta*, bien empleando actuadores lineales como en [8], o bien variando la orientación de sus actuadores rotativos, como es el caso del robot *NUWAR* desarrollado en la *Universidad de Western Australia*, capaz de alcanzar aceleraciones de hasta 600 m/s².

Otros robots paralelos capaces de desarrollar exclusivamente movimientos de traslación se citan a continuación: el robot *STAR* (Hervé y Sparacino), el robot *3-RRPaR* de la *Universidad de Maryland* (Stamper), el robot *3-UPU* (Tsai y Joshi) y el robot cartesiano *3-CRR* desarrollado prácticamente de forma simultánea en las *Universidades de Laval* (Kong y Gosselin) y *California en Riverside* (Kim y Tsai). La nomenclatura utilizada en los citados robots es la siguiente: el cardinal indica tanto el nº de cadenas como el nº de gdl del robot; a continuación va la secuencia de pares que constituyen la cadena (*R* es un par de rotación, *P* es un par prismático, *U* es una junta universal, *C*

es un par cilíndrico, y *Pa* es una estructura de barras formando un paralelogramo); el subrayado inferior indica el par actuado.

En las Figs. 7a, 7b y 7c [9], se presentan varias alternativas y soluciones interesantes enfocadas a las operaciones de manipulación de objetos y procesos. El *Paraplacer* (Fig. 7a) es un manipulador híbrido formado por dos cadenas cinemáticas en cuyo extremo móvil se coloca un dispositivo lineal-rotativo, el cual permite al elemento terminal desplazarse en la dirección vertical y girar alrededor de ese mismo eje. El *Triglidge* (Fig. 7b) es una variante del robot *Delta* con actuación lineal que igualmente consigue 3 gdl de traslación en el elemento terminal. Por último, el robot espacial *Hexa* de 6 gdl (Fig. 7c) surge como una generalización del robot *Delta*.

Recientemente se ha desarrollado en la *Universidad de Montreal* [10] el robot *DEXTAR* (Fig. 7d), basado en la estructura cinemática del *5R*, el cual lleva implementado una estrategia de control que permite cambiar de configuración entre sus diferentes modos de trabajo. Las bases teóricas de este tipo de cambio de configuración entre las distintas soluciones del inverso, cuyo objeto es aumentar el espacio de trabajo operacional del robot, pueden encontrarse en [11] y constituyen una de las líneas de investigación desarrolladas por el Grupo *CompMech* [www.ehu.es/compmech].

La arquitectura de los manipuladores paralelos que generan un movimiento *Schönflies* (anteriormente indicado) resulta también muy adecuada para las aplicaciones de *Pick & Place*. Un

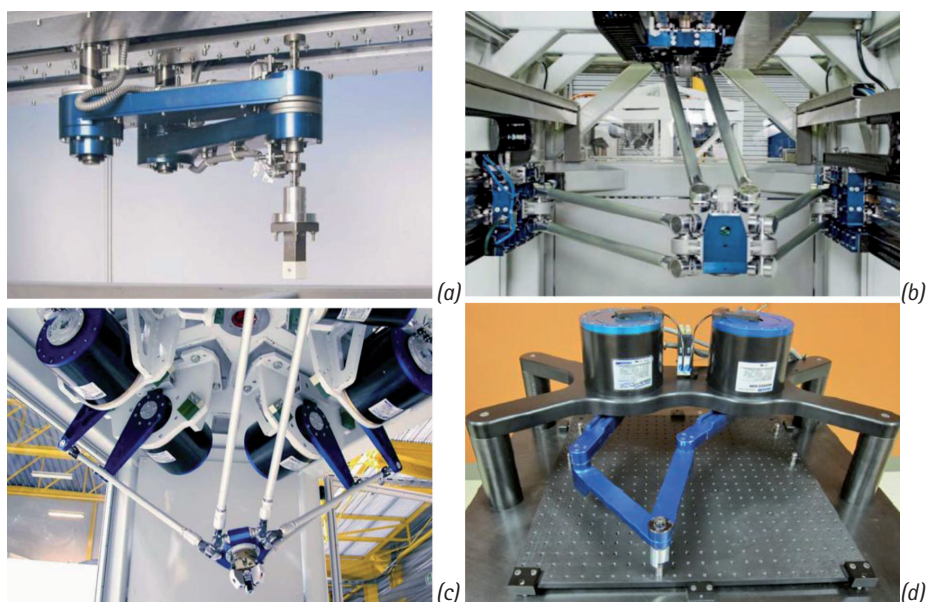


Fig. 7: Robots paralelos (a) Paraplacer, (b) Triglidge, (c) Hexa y (d) DEXTAR

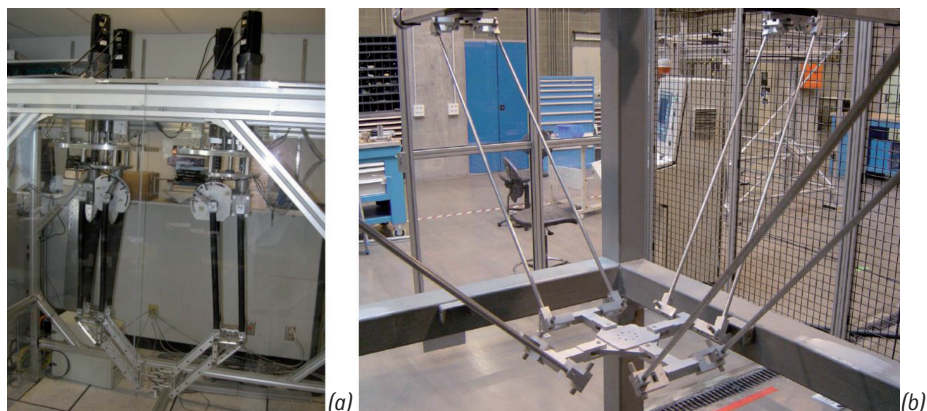


Fig. 8: (a) Manipulador SMG de la Universidad de McGill; (b) Prototipo de manipulador paralelo con movimiento *Schönflies*. Grupo *CompMech*, Dpto. de Ing. Mecánica de la UPV/EHU

diseño novedoso de este tipo de manipuladores, compuesto por dos únicas cadenas cinemáticas, es el SMG (Fig. 8a) desarrollado en la Universidad de McGill [12]. El Grupo CompMech ha desarrollado un prototipo de manipulador *Schönflies* (Fig. 8b) completamente simétrico, cuyo diseño final se alcanzó mediante la optimización de características tales como el volumen del espacio de trabajo y la destreza [Altuzarra *et al.*, ASME Journal of Mechanical Design, 2009].

2.3. AUTOMOCIÓN

El sector automovilístico es uno de los grandes destinatarios de los sistemas de automatización en general, y de robots en particular. En lo referente a los manipuladores paralelos, el hexápodo constituye la arquitectura más utilizada. *Volkswagen* en cooperación con la compañía *Moog* ha implementado un banco de ensayos que utiliza estas plataformas de seis gdl para evaluar la suspensión de vehículos, así como para la realización de ensayos de fatiga. De manera análoga, el robot paralelo *F-200iB* de Fanuc, se utiliza principalmente para la elevación y posicionamiento de vehículos.

Destacan también en el campo de la automoción las máquinas multiaxiales denominadas MAST (*Multi Axis Shaking Tables*). Son máquinas capaces de generar en su elemento terminal un movimiento acoplado de traslaciones y rotaciones, con un número de grados de libertad variable según la aplicación. Son ampliamente utilizadas para la realización de ensayos dinámicos de suspensión de automóviles, así como evaluación del comportamiento de varios componentes del vehículo sometidos a vibraciones. En los últimos años se han desarrollado MAST de cinemática paralela, cómo se observa en la Fig. 9. Ac-

tualmente, éstas poseen poca diversidad en cuanto a su morfología, pudiéndose englobar en dos grandes grupos: MAST basadas en la geometría del hexápodo (Fig. 9a), y las formadas por una banca soportada por tres o más actuadores formando una cadena cerrada de lazos múltiples (Fig. 9b).

2.4. APLICACIONES EN MEDICINA

Los robots paralelos poseen también una notable implicación en ciertas aplicaciones médicas como pueden ser: operaciones quirúrgicas, terapias de rehabilitación, elaboración de prótesis y asistencia a personas con discapacidad. Los autores [Shoham *et al.*, IEEE Trans. Robotics and Automation, 2003] diseñaron un robot en miniatura para operaciones quirúrgicas de columna vertebral que requieren una gran precisión. Dicho robot constituye la parte fundamental de un sistema quirúrgico que ha sido comercializado posteriormente bajo el nombre de *SpineAssist* por la empresa *Mazor Surgical Technologies*.

En neurocirugía destaca, sin duda, el robot paralelo *SurgiScope* (Fig. 10), de-



Fig. 10: Robot SurgiScope de ISIS

sarrollado por la empresa ISIS (*Intelligent Surgical Instruments & Systems*). Su destino son las operaciones microscópicas en neurocirugía. El robot no es totalmente autónomo, sino que se concibe como un auxiliar mecánico para el cirujano.



Fig. 11: Simulador de vuelo GRACE de NLR

2.5. APLICACIONES ESPACIALES

El telescopio *Spherical Primary Optimal Telescope* (SPOT) forma parte de un proyecto de investigación iniciado en 2003 en el *Goddard Space Flight Center*, con el objetivo de buscar nuevas soluciones para los futuros telescopios espaciales [13]. Los esfuerzos se centran en encontrar una arquitectura robusta para los telescopios de gran apertura basados en porciones de espejos. El telescopio debe tener tres gdl: dos rotaciones denominadas *tip* and *tilt*, y una traslación vertical. La arquitectura del diseño final se basa en el robot *Tripod* [14], compuesto por tres cadenas cinemáticas con actuadores prismáticos.

Por otro lado, el centro aeroespacial *Aerospace Manufacturing Technology Centre* (AMTC) de Canadá se ha involucrado en una iniciativa que investiga la industrialización del hexápodo en procesos de fabricación como el perforado y el fresado de materiales aeroespaciales.

2.6. SIMULADORES DE VUELO

Como se ha mencionado en el Apartado 1.1, una de las primeras aplicaciones de los robots paralelos fue su utilización como simuladores de vuelo. En la actualidad cabe destacar el simulador de vuelo GRACE (*Generic Research Aircraft Cockpit Environment*), representado en la Fig. 11, perteneciente al Laboratorio Nacional Aeroespacial de

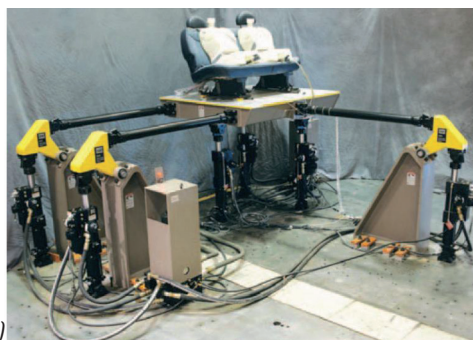
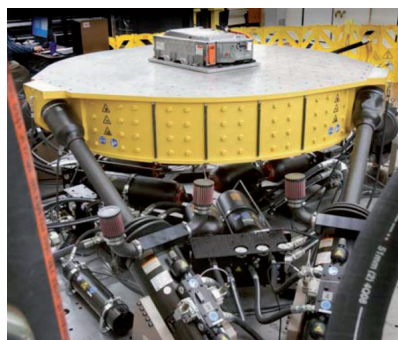


Fig. 9: Máquinas multiaxiales de cinemática paralela de MTS Systems: (a) Modelo Hexápodo 353 y (b) Modelo Ortogonal 323

Holanda. Se trata de un hexápodo que incorpora una cabina sobre su plataforma, la cual se puede reconfigurar para simular las condiciones de vuelo en distintos tipos de avión, como el Airbus 330 o el Boeing 747-400. Este sistema ofrece varias posibilidades: evaluación de entrenamiento, simulación de despegue y aterrizaje, pruebas de aerodinámica, etc.

2.7. OTRAS APLICACIONES Y PROTOTIPOS

- Cámara de alta velocidad: el *Agile Eye* es un manipulador paralelo esférico 3-*RRR* pensado para orientar de forma rápida una cámara situada sobre su elemento terminal. El manipulador, mostrado en la Fig. 12, fue diseñado por [15], en la Universidad de Laval, Canadá. En funcionamiento, la cámara situada sobre su elemento terminal puede abarcar un cono de visión de 140° con una torsión de $\pm 30^\circ$, pudiendo alcanzar velocidades y aceleraciones angulares superiores a $1000^\circ/\text{s}$ y $20000^\circ/\text{s}^2$ respectivamente, superiores a las que el ojo humano es capaz de alcanzar.

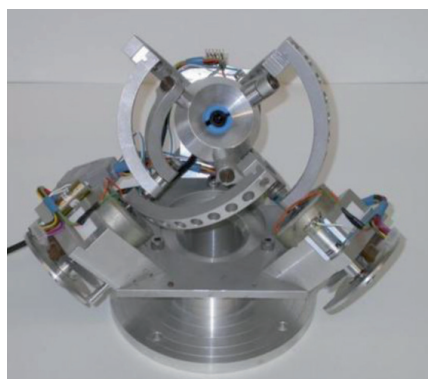


Fig. 12: Agile Eye de la Universidad de Laval



Fig. 13: Novint Falcon de Novint

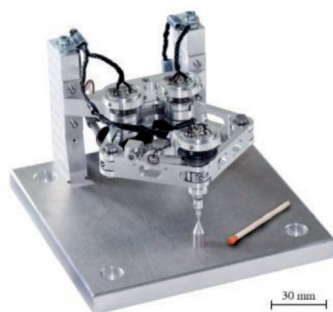


Fig. 14: Robots miniatura de arquitectura paralela: (a) APIS y (b) MICABO. Instituto Tecnológico IWF de la Universidad de Braunschweig, Alemania

- Robots de tecnología háptica (*haptic technology*): se trata de una tecnología que, mediante el sentido del tacto, consigue transmitir fuerzas, vibraciones y movimientos de un entorno virtual al usuario. Originalmente surgida en la industria de los videojuegos (destaca el robot comercial *Novint Falcon* mostrado en la Fig. 13), hoy en día se está extendiendo a otras áreas como la medicina y el sector industrial.
- Robots miniatura de alta precisión: en el Instituto Tecnológico IWF de la Universidad de Braunschweig (Alemania) se han desarrollado varios prototipos de este tipo de robots. Por ejemplo, el robot miniatura APIS de arquitectura paralela (Fig. 14a), genera tres gdl de posicionamiento en el plano [16]. Está actuado por motores de rotación piezoeléctricos que consiguen movimientos en el rango de unos pocos micro-gra-

dos. Otro manipulador miniatura desarrollado en el IWF es el robot MICABO (Fig. 14b), que genera tres gdl (dos de posicionamiento y un giro). Este robot posee la arquitectura del ampliamente conocido manipulador plano paralelo 3-*PRR*, donde *P* es el par prismático actuado mediante piezoeléctricos, y los convencionales pares de rotación *R* son sustituidos por articulaciones flexibles pseudoelásticas. Este tipo de robots se podría incluir dentro de los sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS), un campo en creciente actividad en los últimos tiempos.

- Plataformas paralelas sustentadas por cables: este tipo de manipuladores tiene la forma habitual de un hexápodo, con la diferencia de que en vez de los habituales accionamientos hidráulicos que éstos presentan, se utilizan cables o alambres. El objetivo es conseguir estructuras ligeras que ofrezcan

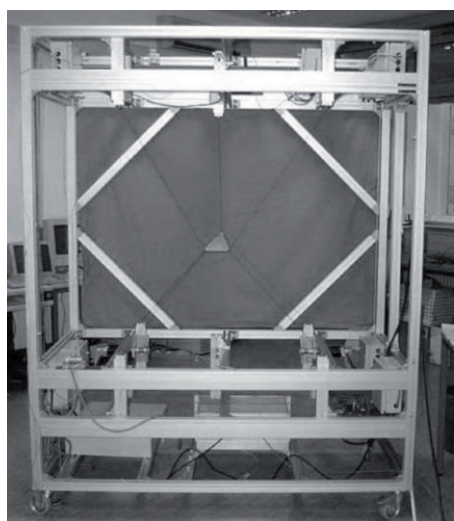


Fig. 15: Plataformas paralela de cables: (a) Proyecto SEGESTA de la Universidad de Duisburg; (b) Aplicación a grúas de rescate portátiles del centro de investigación INRIA

altas aceleraciones con bajo consumo de energía. En la referencia [17] se realiza un análisis de las capacidades de este tipo de robots, centrándose en el proyecto “*Tendon-Based Stewart-Platforms in Theory and Application*” (proyecto SEGESTA). El prototipo desarrollado en este proyecto ha sido implementado en la Universidad de Duisburg (Alemania) para poder realizar ensayos de manipulación a alta velocidad (Fig. 15a). Posibles aplicaciones de este tipo de robots son: grúas de rescate portátiles [18] (Fig. 15b), ensayos aerodinámicos de prototipos de aviones y automóviles en túneles de viento [19], rehabilitación médica [20], etc.

- Manipuladores espaciales de tres grados de libertad: en esta categoría se encuentran los manipuladores paralelos cuyo objeto es la orientación de un sólido en el espacio, y los manipuladores con grados de libertad acoplados como es el caso de las plataformas 3-RPS y 3-PRS. La morfología más habitual de los manipuladores de orientación se compone de un elemento terminal unido a una base fija mediante tres cadenas cinemáticas con pares de rotación, cuyos ejes intersecan en un punto fijo que es el centro de rotación del elemento terminal. Un ejemplo reseñable de este tipo de robots es el anteriormente citado el *Agile Eye*. Otras arquitecturas como la presentada en la referencia [21], se componen de cadenas cinemáticas SPS o UPU uniendo a las plataformas fija y móvil; además, una junta esférica fija limita el movimiento de la plataforma móvil a una rotación pura. Algunas aplicaciones destacables de los robots de orientación son: paneles solares y antenas espaciales [22], simulación del movimiento de partes del cuerpo humano [23] o dispositivos robóticos de manipulación de piezas [24]. Respecto a los robots de gdl acoplados, en la referencia [14] se analiza un manipulador espacial cuya plataforma tiene un gdl de traslación y dos de rotación, destinado inicialmente a aplicaciones telescópicas;

posteriormente esta arquitectura fue utilizada para posicionar la herramienta de corte en máquina-herramienta, y también para la simulación del movimiento de vehículos. Una característica peculiar de estos robots es la dependencia existente entre algunas de las variables de salida, lo cual conlleva unos movimientos asociados de la plataforma que son denominados movimientos parásitos, y pueden resultar perjudiciales para algunas aplicaciones.

3. CAMPOS ACTIVOS EN LA MEJORA DEL DISEÑO DE MANIPULADORES PARALELOS

Se citan a continuación los criterios cinemáticos más relevantes para la obtención de diseños óptimos de manipuladores paralelos.

3.1. EVALUACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO

Los principales procedimientos que se describen en la literatura para la obtención del espacio de trabajo de robots paralelos son: los métodos de discretización, los métodos geométricos y los métodos analíticos.

Los métodos de discretización [25] consisten en establecer una malla de nodos, cada uno de los cuales define la posición y/u orientación de la plataforma móvil. En cada nodo se comprueba si éste pertenece o no al espacio de trabajo, normalmente mediante la resolución del problema cinemático inverso. Téngase en cuenta la simplicidad de la resolución de este problema en el caso de los manipuladores paralelos. Las ventajas asociadas a estos métodos son su fácil implementación computacional y la posibilidad de modelizar varios tipos de restricciones. Sin embargo, presentan como desventajas el gran coste computacional asociado y un grado de precisión dependiente de la discretización realizada. En este grupo se puede incluir el método de análisis por intervalos, *Interval Analysis* [26]. Este método es, en definitiva, una herramienta matemática que permite obtener numéricamente el conjunto de soluciones pertenecientes al espacio de trabajo. Presenta como ventajas, la limitación de la búsqueda de soluciones a un dominio

determinado, lo que agiliza el proceso, y la posibilidad de incluir restricciones inherentes a un sistema físico (por ejemplo las tolerancias de fabricación).

Los métodos geométricos son los más utilizados para determinar las fronteras del espacio de trabajo. Se basan en la obtención de superficies definidas por los límites de cada una de las cadenas cinemáticas del robot. Para ello, dichas cadenas cinemáticas se consideran inicialmente desconectadas. Posteriormente, se obtiene el espacio de trabajo mediante la intersección de las superficies asociadas a cada cadena, recurriendo generalmente a herramientas CAD. La principal desventaja de estos métodos radica en su limitación a espacios tridimensionales.

Por último, los métodos analíticos se basan en la resolución matemática del conjunto de restricciones impuestas por la topología del manipulador. La mayoría de estos métodos dependen, en gran medida, de la arquitectura del robot analizado, por lo que suelen considerarse de aplicación específica a manipuladores concretos.

En este campo de investigación, dentro del Grupo CompMech se ha desarrollado un software denominado GIM, que permite obtener y visualizar el espacio de trabajo de manipuladores completamente paralelos [27, 28]. Este software se basa en un procedimiento híbrido analítico-discreto que evalúa una cantidad de puntos discretos, susceptibles de pertenecer al espacio de trabajo. La rapidez del método radica en la resolución efectiva de las ecuaciones analíticas de las restricciones impuestas por cada cadena cinemática. Cabe resaltar que el software GIM permite visualizar no sólo el espacio de trabajo, sino también otras entidades de gran relevancia, como los mapas de singularidad, el espacio articular o el espacio de configuración reducido.

3.2. OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

Cuando se está diseñando un robot, uno de los criterios es maximizar su espacio de trabajo. Para ello, las dimensiones fundamentales del mismo se someten a un proceso de síntesis dimensional. Sin embargo, no basta con esto, sino que es necesario, además, implementar indicadores adicionales que evalúen la forma que éste posee,

procurando un diseño cuyo espacio de trabajo sea lo más regular posible [29]. Otras investigaciones proponen simplificar la geometría del espacio de trabajo, detectando mediante procedimientos numéricos, volúmenes internos regulares al mismo como cilindros o esferas inscritas [30].

En todo caso, no sólo se trata de maximizar el espacio de trabajo, sino también otras características adicionales que mejoran notablemente las capacidades del robot. Con esto se entra de lleno en el problema de la optimización multiobjetivo. Este tipo de optimización se caracteriza porque la función objetivo a maximizar se compone de varias funciones a menudo con sentidos contrapuestos. Es decir, valores óptimos de una función llevan a pobres resultados en las otras. A partir de aquí se derivan varias estrategias entre las que caben destacar dos: por un lado la determinación del conjunto óptimo de Pareto, y por otro la búsqueda de una solución de compromiso basada en el establecimiento de requisitos mínimos para cada función. En la referencia [31] las funciones a optimizar son el espacio de trabajo y la destreza (característica dependiente de la matriz jacobiana del manipulador). En la referencia [32] las funciones a optimizar son el espacio de trabajo, la destreza y la energía consumida por los actuadores en un ciclo de movimiento.

Recientemente, dentro de una de las líneas de investigación desarrolladas por el Grupo *CompMech*, se ha presentado una metodología para ampliar el espacio de trabajo (incluye también optimización multiobjetivo) de los manipuladores paralelos, basándose en las denominadas transiciones no singulares [33]. Este tipo de transiciones se pueden dar en los denominados manipuladores cuspidales, que permiten trayectorias entre distintas soluciones del problema cinemático directo, manteniendo en todo momento el control del robot [34].

3.3. SÍNTESIS ESTRUCTURAL O MORFOLÓGICA

La síntesis morfológica tiene por objetivo determinar las cadenas cinemáticas que constituyen un manipulador, con el objeto de que su plataforma móvil sea capaz de generar el movimiento deseado para la aplicación a la que se va a destinar. La especificación técnica

clave de la síntesis estructural es el patrón de movimiento de la plataforma móvil. Es decir, el número y la naturaleza de sus grados de libertad, así como las direcciones de rotación y traslación puras. Hay tres métodos en los que se apoya la síntesis morfológica: la teoría de torsores [35], la teoría de grupos de desplazamientos, y la teoría de transformaciones lineales [36]. Los autores se decantan por la segunda debido a que opera con movimientos finitos.

La Teoría de Grupos de Desplazamientos emplea las propiedades matemáticas de Grupo de Lie que poseen los desplazamientos de sólido rígido. Estos conceptos matemáticos no fueron introducidos en el ámbito de la Síntesis Morfológica de mecanismos hasta los primeros trabajos de J. Hervé. La Teoría de Grupos de Desplazamientos opera con los denominados generadores de movimiento, que son cadenas cinemáticas que permiten un determinado tipo de movimiento en el elemento terminal. Estos generadores de movimiento operan bajo las leyes del álgebra de grupos. Así, dentro del Grupo General de los Desplazamientos de Sólido Rígido están: los subgrupos de traslación de 1, 2 y 3 dimensiones, el de rotación, el cilíndrico, el subgrupo Schönflies, etc. Esto permite determinar con facilidad el tipo de movimiento de un elemento sobre el que se aplican simultáneamente varios de estos generadores. En el caso de los robots paralelos, cada pata es un subgrupo generador de movimiento que se aplica sobre la plataforma móvil. Se trata ahora de obtener todas las estructuras cinemáticas que generan un determinado tipo de movimiento previamente especificado en la plataforma móvil. A continuación pueden seleccionarse una o varias alternativas. Para ello hay que tener en cuenta no sólo los requisitos funcionales sino también condicionantes como la sencillez de fabricación, el coste económico, el rozamiento y desgaste en las articulaciones, etc. Uno de los últimos trabajos en este campo se puede encontrar en la referencia [37].

3.4. PRECISION Y SENSIBILIDAD

Los indicadores de precisión y sensibilidad adquieren también especial relevancia a la hora de evaluar la calidad de un determinado diseño. Si bien parecen conceptos muy similares, no son exactamente lo mismo. La precisión

trata de cuantificar la influencia de determinadas fuentes de error, como son las holguras en las juntas o la existencia de tolerancias de fabricación y montaje, en la posición real del elemento terminal del robot. En general, los errores debidos a las tolerancias de fabricación y montaje suelen solventarse mediante la implementación de técnicas de calibración. Sin embargo, son varios los métodos que se proponen para el análisis de otros factores como las incertidumbres en los actuadores o las holguras en los pares que unen elementos, destacando de este último grupo los métodos que buscan la obtención del espacio acotado de error en relación al espacio de trabajo del manipulador [38].

Por otro lado, el indicador de sensibilidad evalúa qué parámetros de diseño influyen en mayor medida sobre el posicionamiento de la plataforma móvil, teniendo en cuenta que la localización del elemento terminal puede ser más sensible a la variación de unos parámetros geométricos determinados que a otros. Recientemente, los autores en la referencia [39] han presentado un método de análisis de sensibilidad basado en la linealización por intervalos, comprobando su validez en el caso de manipuladores planos como el 5R y el 3-RPR, y el robot *Orthoglide*.

3.5. MULTIOPERACIONALIDAD

Actualmente, se desarrollan nuevas líneas de trabajo cuyo objetivo es el de aportar una mayor versatilidad al diseño de manipuladores, de manera que un mismo robot pueda adaptarse a distintas tareas que no tienen por qué conocerse a priori. Estos trabajos forman parte de un campo de estudio emergente en el que se potencia la capacidad de reconfiguración del robot, resultando los denominados *manipuladores reconfigurables*. Existen diversos enfoques, como por ejemplo, el propuesto en el Proyecto PARAGRIP de la Universidad de RWTH de Aachen [40]. Este proyecto presenta un novedoso sistema robótico de arquitectura paralela, en el cual el objeto a manejar constituye la propia plataforma móvil, una vez acoplada al sistema robótico. Otras opciones consisten en realizar diseños en los que uno o varios de los elementos del manipulador puedan variar de dimensión para ajustarse a distintas tareas [41], o métodos para modificar el sistema de ac-

tuación mediante pares que puedan ser bloqueados y de este modo variar los grados de libertad del robot [42].

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo, los autores han realizado una amplia recopilación sobre los trabajos en el ámbito de los manipuladores paralelos que se han llevado a cabo durante los últimos años, así como de las líneas de investigación que se están desarrollando actualmente y que están dando lugar a diversas líneas futuras de investigación. Entre éstas cabe destacar el desarrollo de plataformas reconfigurables capaces de dotar de una mayor flexibilidad y versatilidad a este tipo de robots, con el objetivo de lograr la multioperacionalidad. Además, se han señalado los principales criterios cinemáticos de diseño que se tienen en cuenta a la hora de diseñar un robot paralelo, con el propósito de mejorar algunas de sus debilidades, como son el limitado espacio de trabajo inherente a estos robots y la existencia de múltiples singularidades. Varias de las aportaciones de los autores del artículo tratan en profundidad el análisis de estas singularidades y la posibilidad de aumentar el espacio de trabajo mediante las transiciones no singulares, mejorando así la capacidad de movimiento del manipulador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida del Gobierno de España a través del Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto DPI2011-22955), la Unión Europea (Proyecto FP7-CIP-ICT-PSP-2009-3), el Gobierno Vasco a través del Departamento de Educación, Universidades e Investigación (Proyecto IT445-10) y la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) bajo el programa UFI 11/29.

PARA SABER MÁS

- [1] Gwinett, J. E., Amusement device. US Patent No. 1,789,680, 1928
- [2] Pollard, W., Position Controlling Apparatus. US Patent No. 2,286,571, 1942

- [3] Stewart, D., A platform with six degrees of freedom, *Proceedings of the IMechE*, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371-385, 1965
- [4] Cappel, K., Motion simulator. US Patent No. 3,295,224, 1967
- [5] Patel, Y. D. and George, P.M., Parallel Manipulators Applications-A Survey, *Modern Mechanical Engineering*, 2012, 2, pp. 57-64. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.23008>
- [6] Pandilov, Z. and Dukovski, V., Parallel Kinematics Machine Tools: Overview-From History to the Future, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, 2012
- [7] Clavel, R., Device for the movement and positioning of an element in space. US Patent No. 4,976,582, 1990
- [8] Stock, M. and Miller, K., Optimal Kinematic Design of Spatial Parallel Manipulators: Application to Linear Delta Robot. *ASME Journal of Mechanical Design*, 125 (2): págs. 292-301, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1563632>
- [9] Krefft, M., Last, P., Budde, C., Mass, J., Hesselbach, J. and Wahl, F., Improvement of parallel robots for handling and assembly tasks, *Assembly Automation*, 2007, 27(3), 222-230. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/01445150710763240>
- [10] Campos, L., Bourbonnais, F., Bonev, I.A. and Bigras, P., Development of a five-bar parallel robot with large workspace, *Proc. ASME 2010 Int. Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering (IDETC/CIE 2010)*, August 15-18, Montreal, Canada, 2010.
- [11] Macho, E., Altuzarra, O., Pinto, Ch. and Hernández, A., Workspace associated to assembly modes of the 5R planar parallel manipulator, *Robotica*, Vol. 26, pp. 395-403, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574707004109>
- [12] Angeles, J., Caro, S., Khan, W., and Morozov, A., 2006, Kinetostatic Design of an Innovative Schönflies-Motion Generator, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 220(7), 935-943. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544062JMES258>
- [13] Budinoff, J. and Pfenning, D., Precision Linear Actuators for the Spherical Primary Optical Telescope Demonstration Mirror, *Proceedings of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium, Langley Research Center, May 17-19, 2006*
- [14] Carretero, J. A., Podhorodeski, R., Nahon, M. A. and Gosselin, C. M., Kinematic Analysis and Optimization of a New three Degree of Freedom Parallel Manipulator, *Journal of Mechanical Design*, 2000, 122(1), 17-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.533542>
- [15] Gosselin, C. and Hamel, J., The Agile Eye: A High-Performance Three-Degree-of-Freedom Camera-Orienting Device, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 781-786, 1994. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351393>
- [16] Borchert, G., Burisch, A. and Raatz, A., Advantages of task-adapted parallel Robot Systems featuring Modularity and Reconfigurability, *13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, 19-25 June, 2011*
- [17] Hiller, M., Fang, S., Mielczarek, S., Verhoeven, R. and Franitz, D., Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40, 429-445. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.08.002>
- [18] Daney, D. and Merlet, J.-P., A portable, modular parallel wire crane for rescue operations. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, USA, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509299>
- [19] Sturm, C., Bruckmann, T., Schramm, D. and Hiller, M., Optimization of the wire length for a skid actuated wire based parallel robot, *13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, 19-25 June, 2011*
- [20] Homma, K., Fukuda, O., Sugawara, J., Nagata, Y. and Usuba, M., A Wire-driven Leg Rehabilitation System: Development of a 4-DOF Experimental System, *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AIM.2003.1225463>
- [21] Tsai, L., Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, *John Wiley and Sons*, 1999
- [22] Robertson, J., Application of the Trio-Tri-Star carpal Wrist for use in Solar Array Tracking Mechanism for the Momentum-eXchange, *NASA Marshall Space Flight Center*, 2006
- [23] Cheng, G., Yu, J.-L., Ge, S.-R. and Zhang, S., Workspace analysis of 3SPS+1PS bionic parallel test platform for hip joint simulator, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2011, 225, 2216-31.

- DOI: 10.1177/0954406211404864
- [24] Callegari, M., Carbonari, L., Palmieri, G. and Palpacelli, M.-C., Grasping in Robotics, Parallel Wrists for Enhancing Grasping Performance, *Springer (Ed. G. Carbone)*, 2013, 189–219
- [25] Masory, O. and Wang, J., Workspace evaluation of Stewart platforms, *Advanced Robotics*, 1995, 9 (4), 443–461. DOI: <http://dx.doi.org/10.1163/156855395X00508>
- [26] Merlet, J.-P., Interval Analysis for Certified Numerical Solution of Problems in Robotics, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2009, 19(3), 399–412. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/v10006-009-0033-3>
- [27] Macho, E., Pinto, C., Amezua, E. and Hernández, A., Software Tool to Compute, Analyze and Visualize Workspaces of Parallel Kinematics Robots, *Advanced Robotics*, 2011, 25(6), 675–698. DOI: <http://dx.doi.org/10.1163/016918611X563256>
- [28] Petuya, V., Macho, E., Altuzarra, O., Pinto, C. and Hernández, A., Educational Software Tools for the Kinematic Analysis of Mechanisms, *Computer Applications in Engineer Education*, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cae.20532>
- [29] Li, Y. and Xu, Q., Design and application of a new 3-DOF translational parallel manipulator, *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO 2007)*, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ARSO.2007.4531432>
- [30] Blaise, J., Bonev, I., Monsarrat, B., and Briot, S., Kinematic characterisation of hexapods for industry, *Industrial Robot: An International Journal*, 2010, 37(1), 79–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/01439911011009984>
- [31] Rao, A. K., Rao, P., and Saha, S., Dimensional design of hexaslides for optimal workspace and dexterity, *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3), pp. 444–449. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TR-0.2004.842353>
- [32] Altuzarra, O., Pinto, C., Sandru, B., Hernández, A., Optimal Dimensioning for Parallel Manipulators: Workspace, Dexterity and Energy, *ASME Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(4), 041007–7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4003879>
- [33] Hernández, A., Altuzarra, O., Petuya, V. and Macho, E., Defining Conditions for Nonsingular Transitions between Assembly Modes, *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(6), pp. 1438–1447. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2009.2030229>
- [34] M. Urizar, V. Petuya, E. Amezua and A. Hernández, Characterizing the Configuration Space of the 3-SPS-S Spatial Orientation Parallel Manipulator, *Meccanica*, 2014, 49 (5), pp. 1101–1114. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s11012-013-9856-y>
- [35] Kong, X. and Gosselin, C. M., Type Synthesis of Parallel Mechanisms, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2007, Vol. 33, Springer
- [36] Gogu, G., Structural Synthesis of Parallel Robots, Part 1 Methodology, 2008, Springer, Dordrecht
- [37] Meng, X., Gao, F., Wu, S. and Ge, Q.F., Type synthesis of parallel robotic mechanisms: Framework and brief review, *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 78, pp. 177–186. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.008>
- [38] Chen, G., Wang, H. and Lin, Z., A unified approach to the accuracy analysis of planar parallel manipulators both with input uncertainties and joint clearance, *Mechanism and Machine Theory*, 2013, 64, 1–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.01.005>
- [39] Tannous, M., Caro, S. and Goldsztejn, A., Sensitivity analysis of parallel manipulators using an interval linearization method, *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 71, 93–114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.09.004>
- [40] Müller, R., Riedel, M., Vette, M., Corves, B., Esser, M. and Hüsing, M., Precision Assembly Technologies and Systems Reconfigurable Self-Optimising Handling System, *Springer*, 2010, 255–262.
- [41] Bi, Z. and Kang, B., Enhancement of Adaptability of Parallel Kinematic Machines with an Adjustable Platform, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132, 0610161–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4003120>
- [42] Grosch, P., Di Gregorio, R., López, J. and Thomas, F., Motion Planning for a Novel Reconfigurable Parallel Manipulator with Lockable Revolute Joints, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010), Alaska, USA*, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509305>