



ScienceDirect

Disponible en www.sciencedirect.com



www.elsevier.es/RIAI

Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11 (2014) 212–223

Bases para el desarrollo de Micromáquinas Herramienta Paralelas

Ricardo Yáñez-Valdez*

Departamento de Energía de la división de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana
Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamaulipas, 02200 Distrito Federal, México.

Resumen

El presente trabajo pretende sentar las bases del desarrollo de micromáquinas herramienta paralelas. Se plantean condiciones básicas y se propone un proceso de selección de configuraciones paralelas con miras a su implementación como micromáquinas herramienta. Con base en requerimientos e índices de desempeño se seleccionó una configuración paralela con todas las cualidades solicitadas para desempeñar tareas de micromecanizado. Se aborda con mayor detalle el proceso de selección para un caso de estudio donde 3 ejes traslacionales de movimiento son requeridos. Con base en el resultado del proceso de selección y en especificaciones de diseño, se construyó y se evaluó un prototipo de micromáquina herramienta paralela. El resultado de la investigación realizada muestra que es factible realizar tareas de micromecanizado con el prototipo de micromáquina herramienta paralela. Copyright © 2014 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Desacoplamiento cinemático, Espacio de trabajo, Índices de desempeño, Isotropía de fuerzas, Mecanismo paralelo, Micromáquina herramienta, Proceso de selección, Síntesis de tipo.

1. Introducción

El interés y la necesidad de fabricar piezas de tamaño micrométrico ha sido esencialmente la misma desde que el concepto de manufactura tomó relevancia como un aspecto tecnológico y económico que transforma y agrega valor a un producto. Siempre en la búsqueda de nuevas aplicaciones, mejor desempeño, menor coste y mayor calidad (Dornfeld *et al.*, 2006). En este sentido, el rol que juega el micromecanizado mecánico, es decir, versiones escaladas de los procesos de torneado, fresado y taladrado, están adquiriendo mayor relevancia por su viabilidad a producir piezas funcionales miniaturizadas en 3D (Dhanorker and Ozel, 2008).

Con la frecuente aparición de requerimientos de diseño que involucran la reducción del tamaño y peso de piezas y ensambles, tolerancias dimensionales más cerradas, etc., la investigación en el área de la tecnología de fabricación de microequipos representa una gran oportunidad de desarrollo (Dario *et al.*, 1992). Paulatinamente, se han conseguido beneficios en el ahorro de insumos, consumos y materias primas al miniaturizar los sistemas de producción (Kawahara *et al.*, 1997). Las micromáquinas herramienta (MMH) surgen como una alternativa para desarrollar sistemas productivos con la finalidad de generar dispositivos con dimensiones menores a un milímetro.

La configuración de las micromáquinas herramienta, en su mayoría, están constituidas por guías sobrepuertas, las cuales

transmiten su movimiento por medio de tornillos y cajas de engranes. Esta clase de configuraciones corresponden a las estructuras mecánicas de lazo abierto, tipo cartesiano.

Otra configuración que presenta, por definición, características viables para su aplicación como MMH es la configuración conformada por cadenas cinemáticas de lazo cerrado, conocida como mecanismo paralelo (MP). A un MP se le atribuyen ventajas, respecto a las configuraciones seriales, asociadas a su constitución más ligera y rígida (Aracil *et al.*, 2006). El uso de los mecanismos paralelos como micromáquinas herramienta ha sido poco explorada debido a los retos de diseño que conlleva su implementación a una aplicación real. Adicionalmente, los métodos de análisis y diseño de MP se centran en aplicaciones a escala convencional. Por lo tanto, se vislumbra un área de oportunidad para proponer las pautas que permitan seleccionar una configuración paralela con miras a aplicarse como MMH, sin que esto represente una tarea de escalamiento simplemente.

El presente trabajo se centra en tres objetivos principalmente:
1) Sentar las bases del desarrollo de micromáquinas herramienta basadas en estructuras mecánicas paralelas.

2) Proponer una síntesis de tipo de mecanismos paralelos con miras a ser aplicados como micromáquinas herramienta paralelas.

3) Validar la metodología descrita construyendo un prototipo de micromáquina herramienta paralela.

* Autor en correspondencia.

ryv@azc.uam.mx (Ricardo Yáñez-Valdez)

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la tecnología de microequipo. En la sección 3 se describe la síntesis de tipo para predecir la mejor combinación de topología de eslabonamientos y tipo de juntas para resolver la tarea de micromecanizado. La sección 4 introduce las herramientas de análisis para cumplir las condiciones propuestas. La sección 5 aborda la implementación de la síntesis de tipo para seleccionar una configuración paralela como micromáquina herramienta. La sección 6 presenta el prototipo de micromáquina herramienta paralela. Finalmente, se presentan las conclusiones que se derivan de la investigación realizada, así como las expectativas que se tienen sobre la línea de investigación.

2. Tecnología de microequipo

Hasta 1990 las tecnologías empleadas en microelectrónica, tales como microdispositivos MEMS (por sus siglas en inglés Micro Electro Mechanical Systems) y las máquinas de ultraprecisión de escala convencional eran las principales alternativas para fabricar microdispositivos (Frazier *et al.*, 1995).

Los microdispositivos MEMS están basados en la tecnología de fotolitografía, obteniendo piezas en superficies, generalmente, de silicio en 2D y 2.5D. Sin embargo, el desarrollo de sistemas micromecánicos más elaborados en tres dimensiones, como micromanipuladores o micromáquinas, requieren estructuras mecánicas que incorporan materiales metálicos diversos y que no siempre son compatibles con el material base de los microdispositivos MEMS.

La manufactura a escala tradicional además de consumir más energía, espacio y recursos materiales (Liang *et al.*, 2006), no se recomienda su uso para producir micropiezas debido a que los errores geométricos se incrementan con el tamaño de la máquina herramienta (Singh, 2008). Los errores se magnifican con la presencia de un error angular en el eje del husillo, por citar un ejemplo.

Para transferir las tecnologías empleadas en los procesos de manufactura al contexto microscópico se ha propuesto el uso de microequipo con diferentes vertientes. La posibilidad de usar componentes con un alto grado de precisión ha sido explorada (Okazaki and Kitahara, 2000; Okazaki *et al.*, 2002), sin embargo esta característica encarece el microequipo, haciéndolo poco atractivo debido a su elevado coste de desarrollo.

Otra alternativa, propuesta a mediados de los 90's (Kussul *et al.*, 1996), consiste en desarrollar MMH de forma generacional. Cada generación está constituida por un conjunto de equipos que incluyen MMH, micromanipuladores, etc., que funcionando en forma automática serán capaces de fabricar las piezas y máquinas que conformarán la segunda generación, igual que la anterior, pero de dimensiones más pequeñas, y así sucesivamente.

En la actualidad, el desarrollo de MMH se centra en dos grupos de interés; como unidades independientes (Kussul *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2006; Jang *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2008) o como parte de una microfábrica (Ataka, 1999; Tanaka, 2001). Una MMH debe su nombre a su propio tamaño, al tamaño de sus componentes, al tamaño de la herramienta que manipula y a las piezas que ésta produce (Ruiz, 2000). Como regla general, el

volumen que ocupa una micromáquina herramienta es 125-1000 veces el tamaño de su volumen de trabajo (Ehmann *et al.*, 2008).

Por definición, el dominio dimensional de la microescala cubre un intervalo de 1 a 1000 micras. Esto significa que las piezas producidas por una micromáquina herramienta deben medir un milímetro en cualquier dirección, como máximo. En la práctica, las piezas producidas llegan a estar en el dominio dimensional de la mesoscalas, de 100 a 10000 micras.

Las áreas más importantes de aplicación de la tecnología de microequipo incluyen a la industria automotriz, la ingeniería médica, la electrónica, sistemas de visión, comunicaciones, tecnología aeroespacial, entre otras (Detter and Popovic, 2000; Fujita *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2007). Entre estas áreas destaca el área biomédica (Dario *et al.*, 2002) con el plan de desarrollar nanomáquinas bioquímicas que, al ser ingeridas, actúen como células, detectando infecciones bacterianas en el organismo, produciendo un medicamento con el material del cuerpo mismo.

2.1. Características básicas de las micromáquinas herramienta

Como resultado del desarrollo de prototipos de MMH, se han identificado algunas razones por las cuales es conveniente miniaturizar a las máquinas herramienta (Slocum, 1992; Kussul *et al.*, 2004; Mekid *et al.*, 2004), entre las que cabe citar:

- La baja relación masa/tamaño de las micromáquinas hace que alcancen el equilibrio térmico más rápido, las expansiones térmicas a pequeña escala no representan un problema serio, por lo tanto, la exactitud del sistema no se ve alterado en respuesta al decremento de las deformaciones de los elementos debido al calor del proceso de mecanizado o al generado por los actuadores.
- El consumo de material, volumen ocupado y energía se reducen sustancialmente. El uso de materiales con mejores propiedades puede ser incluido sin que su coste sea un factor limitante.
- Al reducir la masa de piezas móviles se reduce la fuerza inercial del sistema, las frecuencias naturales de los dispositivos son más altas y, en consecuencia, la amplitud de las vibraciones decrece.

En este punto, se deduce que una MMH necesita de elementos básicos para operar. Estos elementos deben procurar sostener la pieza de trabajo, colocar la posición de la herramienta con respecto a la pieza de trabajo y proporcionar la potencia necesaria para realizar el proceso de mecanizado a la velocidad, avance y profundidad que se han establecido. Dado que el proceso de corte es por contacto directo entre una pieza de trabajo y una herramienta, los elementos deben descansar en una estructura mecánica que aporte suficiente rigidez para resistir distorsiones causadas por las cargas estáticas y dinámicas, que ofrezca estabilidad y exactitud de sus piezas móviles, y que amortigüe la vibración.

2.2. Máquinas cinemáticas paralelas

Los mecanismos paralelos han sido incorporados al campo de la manufactura, como máquinas herramienta, desde que la demanda por máquinas con un mejor desempeño dinámico se ha incrementado. A éstas máquinas se les conoce como máquinas cinemáticas paralelas (PKM-por sus siglas en inglés Parallel

Kinematic Machines). Las publicaciones concernientes a la investigación y desarrollo de PKM se remontan dos décadas atrás (Wang *et al.*, 1997).

En la actualidad, existen varias compañías e instituciones involucradas en la investigación y desarrollo de esta clase de máquinas (Merlet, 2006). La compañía Giddings and Lewis fue pionera en el desarrollo comercial de una máquina hexápoda llamada Variax (Zhang, 2009).

Las ventajas atribuidas a las PKM que hacen viable su aplicación en tareas de mecanizado son:

- Baja inercia y mejor comportamiento dinámico; en respuesta a que no tiene que cargar masas muy pesadas. Los actuadores normalmente se ubican en la base del mecanismo para conferir mejor comportamiento dinámico y obtener estructuras más livianas.
- Mayor rigidez; La aceleración y desaceleración de masas ligeras minimiza los problemas de rigidez, teniendo un impacto positivo en la exactitud, calidad superficial y durabilidad de la herramienta de corte (Youssef and El-Hofi, 2008).
- Mejor repetibilidad y confiabilidad; la carga neta que recibe cada brazo produce en estos deflexiones menores, permitiendo que los sensores retroalimenten información más fiable.
- Ahorro de energía. La energía consumida por una máquina herramienta decrece en proporción a su masa. En (Li and Bone, 2001) se menciona que, bajo ciertas condiciones, la reducción de la masa móvil en un mecanismo paralelo representa hasta el 70% de un mecanismo serial.

2.3. Máquinas cinemáticas paralelas en la micromanufactura.

Dentro del concepto de microequipo, en su mayoría, se emplea a los MP como micromanipuladores (Perroud *et al.*, 2003; Heikkilä *et al.*, 2007) y como microplataformas de posición (Kang *et al.*, 2006). La aplicación de configuraciones paralelas como MP no es muy evidente. Hasta ahora, se tienen identificadas algunas configuraciones que se han introducido al campo de la micromanufactura. Una de éstas, es una plataforma hexápoda, desarrollada y comercializada por la compañía alemana Physik Instrumente (PI, 2013). Consiste de un micromanipulador que, de acuerdo a su ficha técnica, puede ser usado para desempeñar tareas de micromecanizado. Tiene seis ejes, una capacidad de carga que oscila entre 2.5 y 5 kg, alcanza una repetibilidad mínima de ± 0.1 micras, usa tecnología de punta y su coste es muy elevado (modelo: H-810.D11, \$66.960.00 USD, Mayo 2013).

Otra configuración consiste en un robot hexápodo móvil de seis ejes, originalmente comercializado como kit de ensamble y diseñado para dibujar sobre papel. Eventualmente, una pluma fue sustituida por un cortador de $1/16"$ y tiene la capacidad de fresar superficies de poliestireno en 3D. Alcanza una repetibilidad de ± 0.5 milímetros y una velocidad en el husillo de 35000 r.p.m. aproximadamente (Denton, 2009).

En el campo del proceso de corte por electroerosión también se han usado configuraciones paralelas. Un ejemplo consiste en una micromáquina de EDM (por sus siglas en inglés Electro Discharge Machining) que usa una configuración Delta con juntas flexibles para manipular un electrodo. Cubre un espacio de

trabajo de $8 \times 8 \times 8$ milímetros con una resolución de 5 nanómetros (Beltrami *et al.*, 2004).

Con base en la investigación realizada, se deduce que un mecanismo paralelo ofrece los elementos básicos para que pueda operar como una micromáquina herramienta. La rigidez estructural es una cualidad que ofrece este tipo de configuraciones mecánicas, de manera que su incorporación al mundo de la micromanufactura de una forma fundamentada se vislumbra viable. Debido a la incipiente aplicación de los mecanismos paralelos al campo de la micromanufactura (Beltrami *et al.*, 2004; Denton, 2009) y a la gran variedad de configuraciones paralelas existentes, se justifica la exploración de una configuración paralela aplicada a la micromanufactura, con base en requerimientos y especificaciones de diseño, desde su selección hasta su desarrollo.

De acuerdo a las características que presentan las MMH reportadas en la literatura, se plantean las siguientes especificaciones de diseño:

- Movilidad espacial de 3 ejes traslacionales, como mínimo.
- Producción de piezas < 5 milímetros.
- Espacio de trabajo de $20 \times 20 \times 20$ milímetros, como máximo.
- Resolución inferior a 1 micra.
- Repetibilidad de 5-10 micras.
- Velocidad de avance lineal en un intervalo de 50-100 mm/min bajo condiciones de operación.

3. Síntesis de tipo

Las condiciones básicas que deben considerarse para que una configuración paralela sea aplicada como una micromáquina herramienta (tabla 1) son inspiradas de las ventajas que esencialmente ofrecen las configuraciones típicas cartesianas, tales como; espacio de trabajo regular, desempeño homogéneo y desacoplamiento cinemático. Estas condiciones son consideradas indispensables o deseables para desempeñar tareas de micromecanizado básico.

Tabla 1: Condiciones que deben cumplir las configuraciones paralelas con miras a ser aplicadas como micromáquinas herramienta.

Condición	Indispensable	Deseable
1	Movilidad	-----
2	-----	Desacoplamiento cinemático
3	-----	Isotropía de fuerzas
4	-----	Espacio de trabajo regular

A continuación se explica con más detalle cada una de las condiciones planteadas.

La condición de movilidad se refiere al número de ejes que debe presentar la MMH para desempeñar operaciones de mecanizado. Por ejemplo, para desempeñar operaciones básicas de mecanizado (fresado en las caras o frontal, refrentado o cilindrado) tres ejes traslacionales son suficientes, permaneciendo un eje rotacional desacoplado donde giraría la herramienta, o bien, la pieza de trabajo. Para desempeñar operaciones más complejas (fresado lateral o de cantos), donde se demanda un eje adicional que oriente la pieza de trabajo o herramienta, tres ejes traslacionales no son suficientes y se debe incrementar el número de ejes solicitados a la configuración mecánica.

El desacoplamiento cinemático se presenta en una máquina cuando el movimiento del órgano terminal a lo largo de cada eje es controlado por su respectivo actuador. La ventaja de ésta característica se traduce en una simplificación del cómputo de la cinemática; se obtiene una fácil formulación en el análisis de desplazamiento directo e inverso o en el análisis de singularidades (Arakelin *et al.*, 2005), y por tanto, al simplificarse los modelos cinemáticos y dinámicos no lineales se facilita el control (Jin *et al.*, 2006).

Existen tres diferentes tipos de acoplamiento en los mecanismos (Merlet, 2006):

- Acoplados; cada parámetro de posición está en función de la combinación del movimiento que proporcionan los actuadores,
- Desacoplados; cada parámetro de posición está en función de sólo un actuador, y
- Parcialmente acoplados; ninguno de los dos tipos anteriores.

El diseño de una configuración paralela que cumpla con el requisito de movilidad desacoplada y que mantenga, a su vez, alta rigidez usando cadenas eslabonadas ligeras no es una tarea simple, debido a que cada cadena cinemática del mecanismo opera sólo en una dirección. En (Merlet, 2006) y (Gosselin *et al.*, 2007) se menciona que un mecanismo desacoplado, eventualmente, podría presentar una condición en la que una sola cadena cinemática tiene que soportar la carga completa aplicada en el órgano terminal. Por esta razón, un mecanismo desacoplado podría tener una carga nominal más baja que los mecanismos acoplados, lo que podría desvanecer cualquier interés en un mecanismo desacoplado con miras a su aplicación como máquina herramienta. Sin embargo, una solución a esta contrariedad se vislumbra en los cambios que se presentan en los efectos de los fenómenos físicos al miniaturizar las máquinas. Las fuerzas de corte y la masa de los elementos mecánicos cambian en una proporción mayor que la rigidez (Kussul *et al.*, 2006). La rigidez es una propiedad que presenta una configuración paralela inherente a su constitución mecánica. Por esta razón, aunque la carga no se distribuya por completo en todas las cadenas cinemáticas del mecanismo, las reacciones en cada cadena cinemática deberían disminuir conforme se reduce el tamaño de éste.

Para comprobar lo antes expuesto, considérese un eslabón A y un eslabón B, como parte de una cadena eslabonada de un mecanismo cuyas características, tomadas de (Kussul *et al.*, 2006), son las siguientes:

- Presentan el mismo diseño,
- Están fabricados con el mismo material, y
- El tamaño del eslabón A es S veces más grande que el eslabón B.

El ejercicio consiste en analizar la relación entre las reacciones a las que están sujetas las barras y los parámetros físicos que se derivan. La figura 1 muestra el diagrama de cuerpo libre de un eslabón uniforme con un centro de masa C, con una longitud L en rotación y una masa m . La orientación del mismo es especificada por θ . Se usan los vectores unitarios $\hat{\mathbf{e}}_r$, $\hat{\mathbf{e}}_\theta$ no fijos al marco inercial \mathcal{M} .

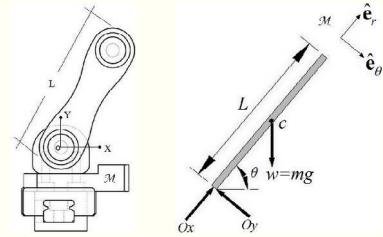


Figura 1: Diagrama de cuerpo libre de un eslabón.

La magnitud de las reacciones R en el pivote O se escribe:

$$R = \sqrt{(Ox)^2 + (Oy)^2}, \quad (1)$$

las componentes Ox y Oy se obtienen de la ecuación $\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}_c$. En donde la aceleración del centro de masa del eslabón \mathbf{a}_c , en términos de su velocidad ω y su aceleración angular α está dado por $\mathbf{a}_c = \mathbf{a}_o + \alpha \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{r}_{oc} - \omega^2 \mathbf{r}_{oc}$, con \mathbf{r}_{oc} igual a $\frac{L}{2} \hat{\mathbf{e}}_r$. Simplificando tenemos:

$$\mathbf{a}_c = \frac{L}{2} \alpha \hat{\mathbf{e}}_\theta - \frac{L}{2} \omega^2 \hat{\mathbf{e}}_r, \quad (2)$$

Para expresar la ecuación (2) en función de θ escribimos la ecuación de momentos respecto al pivote O :

$$\begin{aligned} \sum M_o &= I_o \alpha = I_o \ddot{\theta}, \\ mg \frac{L}{2} \cos \theta &= \frac{mL^2}{3} \ddot{\theta}, \\ \ddot{\theta} &= \frac{3g}{2L} \cos \theta, \end{aligned} \quad (3)$$

Para obtener ω^2 en función de θ se debe integrar (3).

$$\frac{\omega^2}{2} = \frac{3g}{2L} \sin \theta + C,$$

Como $\omega^2=0$, cuando $\theta=0$, se tiene que $C=0$, y

$$\dot{\theta}^2 = \frac{3g}{L} \sin \theta, \quad (4)$$

Sustituyendo (3) y (4) en (2):

$$\mathbf{a}_c = \frac{3g}{4} \cos \theta \hat{\mathbf{e}}_\theta - \frac{3g}{2} \sin \theta \hat{\mathbf{e}}_r, \quad (5)$$

Entonces,

$$\begin{aligned} \sum F &= m a_{C_r}, & \sum F &= m a_{C_\theta}, \\ Ox - mg \sin \theta &= m \left(-\frac{3g}{2} \sin \theta \right), & Oy + mg \cos \theta &= m \left(\frac{3g}{4} \cos \theta \right), \\ Ox &= -\frac{mg}{2} \sin \theta, & Oy &= \frac{mg}{4} \cos \theta, \end{aligned}$$

Por lo tanto, la magnitud de la reacción del eslabón, como función de θ es:

$$R = \frac{mg}{2} \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{1}{4} \cos^2 \theta}, \quad (6)$$

Considerando que la reacción máxima se encuentra cuando $\theta = 90^\circ$, la ecuación (6) se reduce a:

$$R_{\max} = \frac{mg}{2}, \quad (7)$$

La relación de parámetros entre los eslabones A y B es $m_A = S^3 m_B$. Sustituyendo esta relación en la expresión (7), se tiene:

$$R_{\max_A} = \frac{m_A g}{2} = \frac{S^3 m_B g}{2} = S^3 R_{\max_B}, \quad (8)$$

La ecuación (8) muestra que la magnitud de las reacciones asociadas a la barra A es S^3 veces mayor que la magnitud de las reacciones asociadas a la barra B.

Por otra parte, la condición de isotropía de fuerzas es de suma importancia en un proceso de mecanizado. En los procesos de mecanizado la dirección de la fuerza de corte y las velocidades transmitidas al órgano terminal deben ser constantes, así como las condiciones de corte a lo largo de la trayectoria de la herramienta (Rehsteiner *et al.*, 1999; Tlusty *et al.*, 1999). Esta cualidad influye en el acabado de la pieza producida y en la vida útil de la herramienta. Por lo tanto, los mecanismos a ser considerados como micromáquinas herramienta deben proporcionar fuerzas constantes en direcciones de interés.

En aplicaciones de micromecanizado está de por medio una herramienta y eventuales trayectorias que pueden cruzar el espacio de trabajo de un extremo a otro. Para garantizar un proceso de mecanizado con buenos resultados el espacio de trabajo debe estar libre de singularidades de movimiento, libre de colisiones entre los elementos y debe presentar un volumen físico de forma regular, entendiendo como forma regular a la forma de un cubo o un paralelepípedo ortogonal. Si bien, es conocido que los mecanismos paralelos brindan un espacio de trabajo con forma irregular, es importante que el mecanismo candidato tenga la posibilidad de alojar un espacio de trabajo prescrito regular.

4. Herramientas de análisis para cumplir las condiciones propuestas

Cuando un mecanismo desarrolla una tarea de mecanizado, fuerzas y momentos son transmitidos a través de una o varias cadenas cinemáticas al órgano terminal, generados, a su vez, por actuadores instalados en puntos de conexión. El análisis de fuerzas estáticas es una práctica común para determinar la calidad de la transmisión de fuerzas y momentos ejercidos por juntas y eslabones en un mecanismo. Este análisis sirve de base para el diseño y selección de componentes.

Por otro lado, la traducción de necesidades en requerimientos específicos ha permitido desarrollar índices que tienen un significado físico real, definidos en un sentido matemático, conocidos como índices de desempeño. El propósito de un índice de desempeño es evaluar cuantitativamente la habilidad de un mecanismo desde el punto de vista cinemático y estático, esto es, en la solución de estado estable de las ecuaciones dinámicas. Por esta razón, se refiere a ellos como índices de desempeño cinetostáticos. También es cierto que cada vez es más común encontrar índices que consideran aspectos dinámicos (Moreno *et al.*, 2012).

Un índice de desempeño cinetostático de un sistema mecánico representa una cantidad escalar que mide la funcionalidad del sistema con respecto a la fuerza y movimiento que transmite. El análisis cinetostático es esencial para máquinas paralelas que son usadas para realizar procesos de mecanizado, las cuales requieren transmitir fuerzas, ofrecer alta rigidez y bajas deformaciones equivalentes, resultando en mejores acabados superficiales y una mayor vida útil de las herramientas (Zhang *et al.*, 2004).

En este sentido, la relación entre las condiciones propuestas que deben cumplir los mecanismos paralelos para ser considerados como micromáquinas herramienta, descritas en la sección anterior, y los índices de desempeño, aparece en la tabla 2.

Tabla 2. Relación entre las condiciones propuestas y los índices de desempeño.

Condición propuesta	Índice de desempeño	Ecuación
Movilidad	---	Caracterización estructural
Espacio de trabajo regular	Volumen del espacio de trabajo	---
Desacoplamiento cinemático	Índice de acoplamiento	---
Isotropía de fuerzas	Índice de isotropía cinemática	---

Todas las condiciones propuestas, excepto la condición de movilidad, se relacionan con un índice de desempeño. La condición de movilidad se analizará con las ecuaciones de caracterización estructural de mecanismos paralelos que propone Lung-Wen Tsai (Tsai, 1998).

5. Proceso de selección

La figura 2 muestra el esquema general del proceso de selección de configuraciones paralelas con miras a su uso como micromáquinas herramienta.

Para aplicar el proceso de selección en un primer caso de estudio, se seguirá la secuencia propuesta. El ejercicio se centrará en buscar una configuración paralela de 3 GDL traslacionales, movilidad requerida para desempeñar tareas básicas de mecanizado.

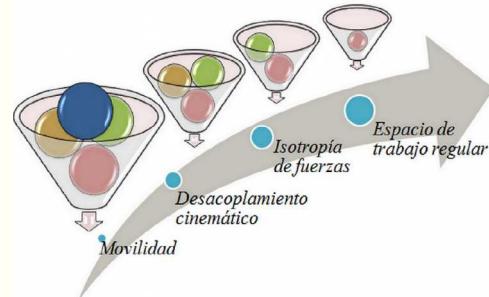


Figura 2: Esquema general del proceso de selección de mecanismos paralelos.

Se debe señalar que, de acuerdo a la secuencia del proceso de selección, en cada análisis se considerarán las configuraciones que cumplen la condición solicitada, de manera que aunque exista la posibilidad de que cumplan una segunda restricción, no será considerada si no cumple con la precedida.

Al imponer la movilidad al inicio de la secuencia del proceso de selección, se busca eliminar la mayoría de las configuraciones que no cumplen con esta condición indispensable. De esta manera, el análisis de las condiciones deseables sucesivas se centrará en un número limitado de configuraciones. La razón de dejar al último la condición de espacio de trabajo regular, es porque no tendría sentido invertir tiempo en calcular el mismo si no existe la certeza de que las configuraciones candidatas cumplen con las condiciones de desacoplamiento y de isotropía de fuerzas.

5.1. Análisis de movilidad.

Con el propósito de converger a un diseño práctico que facilite su construcción, se centrará este trabajo en configuraciones paralelas simétricas espaciales.

La ecuación que describe la movilidad de un mecanismo simétrico es conocida como criterio de Grübler o Kutzbach, esto es:

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i, \quad (9)$$

Donde, F son los grados de libertad (GDL) del mecanismo, λ es el espacio en el cual el mecanismo intenta funcionar, n es el número de eslabones del mecanismo, incluida la base fija, j es el número de juntas del mecanismo, y f_i es el grado de movimiento relativo permitido por la junta i .

La conectividad C_k de una cadena es definida como los grados de libertad asociados a todas las juntas que conforman esa cadena cinemática, esto es:

$$\sum_{k=1}^m C_k = (\lambda + 1)F - \lambda, \quad (10)$$

Con el propósito de garantizar la movilidad requerida del órgano terminal, la conectividad de cada cadena no debe ser mayor que el parámetro de movimiento λ , ni menor que los grados de libertad del órgano terminal F , esto es:

$$\lambda \geq C_k \geq F, \quad (11)$$

La deducción completa ha sido previamente derivada en (Tsai, 1998), la tabla 3 muestra un resumen de resultados.

Tabla 3: Resumen del análisis de movilidad.

Variable	Configuraciones paralelas				
	3 GDL	4 GDL	5 GDL	6 GDL	
Parámetro de movimiento	λ	6	6	6	
GDL	F	3	4	5	
Número de juntas	n_j	9	12	15	
Conectividad	C_k	5, 5, 5 6, 5, 4 6, 6, 3	6, 6, 5, 5 6, 6, 6, 4	6, 6, 6, 5	6, 6, 6, 6, 6
Número de restricciones	M	3	2	1	0

Para mecanismos simétricos es conveniente usar la conectividad 5, 5, 5 para formar las clases que conformarán las configuraciones paralelas candidatas. Con base en esta conectividad, a continuación se describen las consideraciones propuestas que ayudarán a seleccionar las clases útiles para

formar configuraciones paralelas de 3 GDL traslacionales considerando el uso de juntas de revolución (R), prismáticas (P), helicoidales (H), cilíndricas (C), universales (U) y esféricas (S).

Consideración A.

Para fines de actuación, las juntas activas deben estar colocadas en la base. Esta condición es lo que generalmente proporciona a los mecanismos paralelos la excelente relación carga admisible/peso propio. Si los actuadores están colocados en la base, y no en las cadenas cinemáticas, gran parte de la inercia a controlar está en el órgano terminal.

Consideración B.

Se deben evitar las juntas H, P y C como juntas pasivas. Considerando que la traslación pasiva puede resultar en una resistencia extra, causando baja velocidad de trabajo que llevará a conseguir un desempeño mecánico pobre.

Consideración C.

El órgano terminal debe poseer sólo movimiento de traslación, por lo tanto, cada unión cinemática debe proveer una restricción de movimiento rotacional de un grado de libertad en el órgano terminal. Esto es, las restricciones proporcionadas por las tres cadenas cinemáticas deben inmovilizar completamente la rotación del órgano terminal. Una junta esférica no puede restringir el movimiento de rotación en un órgano terminal, por lo tanto, algunas clases que conformarán las configuraciones candidatas deben ser eliminadas, como hizo Tsai (Tsai, 1998). Sin embargo, aquí se sugiere usar equivalencias cinemáticas más que eliminar soluciones potenciales. Considerando que la equivalencia cinemática de una junta esférica está compuesta por tres juntas de revolución básicas se sustituyen las juntas esféricas por tres de revolución y se eliminan las repeticiones.

En cada una de las equivalencias se puede incluir un arreglo con una junta compuesta Pa (paralelogramo), conocida como junta Π (Angeles, 2004), la cual presenta traslación pura y no altera la movilidad de la configuración. Por ejemplo $PRPaR$, donde los ejes de las juntas de revolución son perpendiculares a los ejes del paralelogramo.

Consideración D.

En el análisis matemático se debe hacer indistinta la nomenclatura de las juntas H y P. Cuando se habla de juntas H y P se intuye el uso de tornillos de potencia y pistones, respectivamente. Sin embargo, en términos de análisis matemático no interesa qué tipo de elemento actúa el mecanismo físicamente. Además, ambos elementos de unión proveen 1 GDL haciendo indiferente su nomenclatura.

La tabla 4 muestra el resultado aplicando las consideraciones A, B, C y D.

Tabla 4: Tipo y clase de juntas para formar mecanismos paralelos de 3 GDL traslacionales con juntas activas sobre la base fija, usando equivalencias cinemáticas y obviando la nomenclatura.

Tipo			Clase
Número de juntas de:			
1 GDL	2 GDL	3 GDL	
2	0	1	<u>RRPaR</u> , <u>PRPaR</u> , <u>PRRR</u> .
1	2	0	<u>RUU</u> , <u>PUU</u> .

En la literatura es posible encontrar mecanismos paralelos de 3 GDL traslacionales que están constituidos de alguna de las diferentes clases que se presentan en la tabla 4. La tabla 5 muestra estas configuraciones.

Tabla 5: Mecanismos paralelos de 3 GDL traslacionales.

No.	Nombre(s) del mecanismo	Nomenclatura
1	Delta (Clavel, 1988)	3RUU
2	Urane Sx o Delta lineal (Yangmin and Qingsong, 2006)	3PUU
3	Cartesiano (Gosselin and Kong, 2004), Isoglide o Tripteron (Kong and Gosselin, 2002; Wu <i>et al.</i> , 2007)	3PRRR
4	Mecanismo de Maryland (Tsai, 1997)	3RRPaR
5	Orthoglide (Chablat and Wenger, 2003), Y-Star o H-Robot (Sparacino and Hervé, 1993)	3PRPaR

5.2. Análisis de acoplamiento.

El índice de acoplamiento representa una medida de independencia entre los vectores columna de las matrices usadas en la formalización de la cinemática directa e inversa. Existe una relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las velocidades de variación de posición del extremo del mecanismo que, al extraer y manipular, es posible identificar si el mecanismo presenta movilidad acoplada o desacoplada (Gogu, 2004).

Las restricciones geométricas impuestas por las cadenas cinemáticas en el movimiento del órgano terminal resultan en la relación de coordenadas generales, esto es:

$$f_{ij}(q_{ij}, w_1, w_2, \dots, w_6) = 0, \quad i=1,2,\dots,k; \quad j=1,2,\dots,g_i, \quad (12)$$

Donde q_{ij} ($i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,g_i$) representa el desplazamiento lineal o angular en las juntas activas y w_1, w_2, \dots, w_6 representan los parámetros usados para describir la orientación y posición del órgano terminal. En general, la relación (12) puede ser obtenida expresando la ecuación de lazo cerrado para cada cadena en el marco de coordenadas fijas, y eliminando las variables de las juntas pasivas.

La velocidad del órgano terminal $\dot{\mathbf{w}} = [\dot{w}_1, \dot{w}_2, \dots, \dot{w}_6]^T$ está relacionada con la velocidad de las juntas actuadas $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_{ij}]$ por la ecuación general:

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial q_{ij}} \dot{q}_{ij} = -\frac{\partial f_{ij}}{\partial w_1} \dot{w}_1 - \frac{\partial f_{ij}}{\partial w_2} \dot{w}_2 - \dots - \frac{\partial f_{ij}}{\partial w_6} \dot{w}_6, \quad (13)$$

La ecuación (13) se puede escribir en forma matricial

$$J_s \dot{\mathbf{q}} = J_p \dot{\mathbf{w}}, \quad (14)$$

donde:

$$J_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{11}}{\partial q_{11}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_{12}}{\partial q_{12}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{k_{g_i}}}{\partial q_{k_{g_i}}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

es la matriz Jacobiana serial, y

$$J_p = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{11}}{\partial w_1} & \frac{\partial f_{11}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial f_{11}}{\partial w_6} \\ \frac{\partial f_{12}}{\partial w_1} & \frac{\partial f_{12}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial f_{12}}{\partial w_6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{k_{g_i}}}{\partial w_1} & \frac{\partial f_{k_{g_i}}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial f_{k_{g_i}}}{\partial w_6} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

es la matriz Jacobiana paralela.

La ecuación (14) también puede ser escrita como la expresión matemática del modelo cinemático directo, esto es:

$$\dot{\mathbf{w}} = J \dot{\mathbf{q}}, \quad (17)$$

donde:

$$J = J_p^{-1} J_s, \quad (18)$$

es la matriz jacobiana global que representa la matriz de la transformación lineal entre el vector de velocidad de las juntas actuadas $\dot{\mathbf{q}}$ y vector de velocidad operacional del órgano terminal $\dot{\mathbf{w}}$. También es posible, y a veces más conveniente, calcular la matriz jacobiana que relaciona la transformación inversa.

La ecuación (17) representa la transformación lineal entre los espacios vectoriales de las coordenadas articulares y las coordenadas de posición y orientación. En un caso general, esta ecuación puede ser escrita de la forma (Gogu, 2008):

$$\mathbf{y} = A \mathbf{x}, \quad (19)$$

Donde el vector \mathbf{y} toma el lugar de $\dot{\mathbf{w}}$, el vector \mathbf{x} toma el lugar de $\dot{\mathbf{q}}$ y la matriz A el lugar de J . Es posible asociar un vector \mathbf{A}_i con la i -ésima columna de la matriz A . La relación angular θ_{ij} entre dos columnas \mathbf{A}_i y \mathbf{A}_j de la matriz A puede ser obtenida considerando el producto escalar, esto es:

$$\cos \theta_{ij} = \frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{A}_j}{|\mathbf{A}_i| |\mathbf{A}_j|}, \quad (20)$$

El índice de acoplamiento está dado por el seno del ángulo de intersección θ_{ij} entre \mathbf{A}_i y \mathbf{A}_j , esto es:

$$k_{ij} = \sin \theta_{ij}, \quad (21)$$

Al expresar en términos del índice de acoplamiento se obtiene:

$$k_{ij} = \left[1 - \left(\frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{A}_j}{|\mathbf{A}_i| |\mathbf{A}_j|} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (22)$$

El ángulo de intersección entre los vectores columna está en el intervalo $(0, \pi)$, por lo tanto, se deduce que k varía entre $0 \leq k_{ij} \leq 1$. Cuando la matriz A es singular, los dos vectores columna están alineados, esto es $\theta_{ij} = 0$, y $k_{ij} = 0$, esta característica representa movilidad acoplada en un mecanismo. Cuando $k_{ij} = 1$, los dos vectores columna de la matriz A son mutuamente ortogonales, esta característica representa movilidad completamente desacoplada en un mecanismo.

El índice de acoplamiento en problemas de cinemática directa e inversa es derivado del índice general asociado a la matriz A con el Jacobiano J y su inversa J^T . Por lo tanto, para identificar el tipo de movilidad que presenta un MP, la matriz J debe presentar una de las siguientes características:

- Parcialmente desacoplada si J es una matriz triangular.
- Completamente desacoplada si J es una matriz diagonal.
- Completamente acoplada si la matriz J no es diagonal ni triangular.

La tabla 6 muestra el resumen de resultados del análisis de acoplamiento de las configuraciones enlistadas en la tabla 5.

Tabla 6: Resumen de resultados del análisis de acoplamiento.

Configuración	Forma de la matriz J	Movilidad
a) 3RUU	No es triangular, tampoco diagonal	Fuertemente acoplada
b) 3PUU		
c) 3PRRR	Diagonal	Completamente desacoplada
d) 3RRPaR	No es triangular, tampoco diagonal	Fuertemente acoplada
e) 3PRPaR		

5.3. Análisis de isotropía de fuerzas.

Zanganeh y Angeles (Zanganeh and Angeles, 1997) definen el índice de isotropía como el recíproco del número de condición de J , esto es:

$$w_I(J) = \frac{\sigma_k}{\sigma_1}, \quad 0 \leq w_I \leq 1, \quad (23)$$

Geométricamente, esta es la proporción de la longitud de los ejes mayor y menor de un elipsoide de manipulabilidad (Yoshikawa, 1985).

Un elipsoide de manipulabilidad se interpreta como la eficacia con la que un manipulador transmite fuerza y velocidad a su órgano terminal (Staffetti *et al.*, 2002). La manipulabilidad se representa como un elipsoide para cada posición del mecanismo, donde la distancia del centro del elipsoide a la frontera es proporcional a la facilidad de transmisión de fuerza o velocidad en esa dirección.

Considerando la matriz Jacobiana J de la ecuación (18), ésta puede ser descompuesta (Press *et al.*, 2002) en:

$$J = USV^T, \quad (24)$$

donde; U es una matriz ortogonal de $m \times m$,

$$U^T U = UU^T = I_{m \times m}, \quad (25)$$

V es una matriz ortogonal de $n \times n$,

$$V^T V = VV^T = I_{n \times n}, \quad (26)$$

y S es una matriz diagonal de $m \times n$ con elementos $\sigma_{ij} = 0$ para $i \neq j$ y $\sigma_{ii} = \sigma_i$ para $i \neq 0$. El rango de la matriz J es $k(J)$, y

$$k(J) \leq \min(m, n), \quad (27)$$

Si el rango de J_{nn} es n , J es de rango completo, entonces J es no singular y, por lo tanto, $|J| \neq 0$.

Las columnas de la matriz U son los vectores característicos ortonormales de JJ^T , mientras que las columnas de la matriz V son los vectores característicos ortonormales de $J^T J$. La matriz jacobiana J traza una esfera unitaria en el espacio de las articulaciones al correspondiente elipsoide en el espacio de velocidades cartesianas, el cual es llamado elipsoide de manipulabilidad, figura 3.

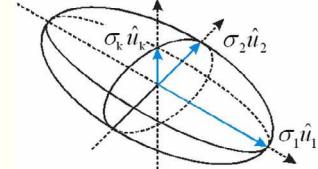


Figura 3: Elipsoide de manipulabilidad de fuerzas.

El eje mayor $\sigma_1 \hat{u}_1$ del elipsoide de manipulabilidad indica la dirección a lo largo del cual el órgano terminal puede moverse con más facilidad, y con menor facilidad en la dirección $\sigma_k \hat{u}_k$. En una postura ideal, al no existir distorsión en el Jacobiano, el elipsoide de manipulabilidad debe ser perfectamente esférico y de radio unitario. Cuando el elipsoide se hace una esfera, el órgano terminal puede moverse uniformemente en todas direcciones, tal configuración es conocida como una configuración isotrópica. Una interpretación geométrica se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\mathbf{F}^T J J^T \mathbf{F} = 1, \quad (28)$$

La condición de acoplamiento arroja como resultado una configuración traslacional de 3 GDL completamente desacoplada, por lo tanto, se comprobará la condición de isotropía de fuerzas a ésta configuración únicamente.

La matriz Jacobiana de la configuración 3PRRR es la matriz identidad. Por lo tanto, la ecuación (28) toma la forma

$$f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 = 1, \quad (29)$$

Debido a que la concepción de la configuración del mecanismo es completamente simétrica, la longitud de las cadenas es la misma, la ecuación (29) representa la ecuación de una esfera. Esto significa que la configuración 3PRRR es isotrópica en todo su espacio de trabajo. De acuerdo al índice de isotropía la proporción de la longitud de los ejes mayor y menor es la misma; esto es $w_I(J) = 1$, figura 4.

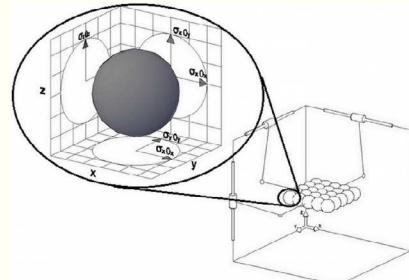


Figura 4: Esfera de fuerzas en el plano XY del espacio de trabajo del mecanismo 3PRRR.

5.4. Espacio de trabajo regular.

El análisis del espacio de trabajo de la configuración propuesta se determina con el cálculo del espacio de trabajo con orientación constante. Este consiste en determinar geométricamente los límites de un espacio tridimensional o volumen alcanzable por el centro del órgano terminal mientras la orientación no cambia (Merlet, 2006). El espacio de trabajo se deduce a partir de la restricción que aporta cada cadena cinemática en un objeto geométrico (w, h, d), este a su vez describe todas las posibles localizaciones del órgano terminal que satisfacen las restricciones de cada cadena cinemática.

El análisis del espacio de trabajo se centrará únicamente en la configuración que ha mostrado desacoplamiento e isotropía de fuerzas, figura 5.

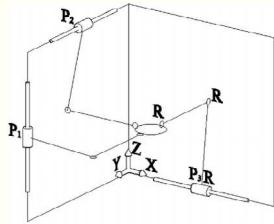


Figura 5: Diagrama cinemático del MP 3PRRR.

Se dibuja para cada cadena cinemática el volumen que puede alcanzar en función de la libertad de movimiento de cada actuador P_i , con $i=1, 2, 3$, figura 6.

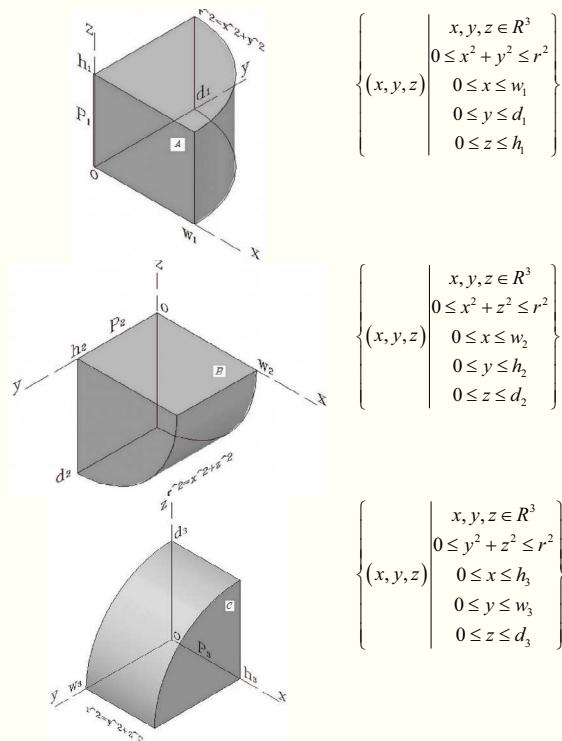


Figura 6: Libertad de movimiento de cada cadena cinemática.

La intersección de los volúmenes A , B y C , delimitan a su vez un volumen A' , B' y C' por cada cadena, respectivamente. Estos volúmenes se forman a partir de un espacio común, figura 7.

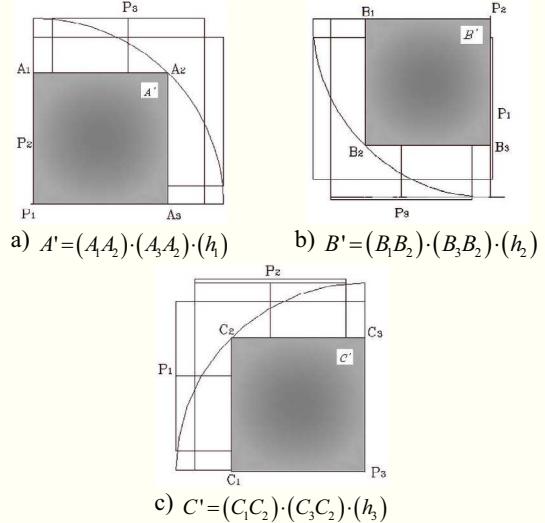


Figura 7: Volumen de espacio en común desde la perspectiva de la cadena a) uno, b) dos y c) tres.

El volumen A' está dado por el producto del lado A_1A_2 por el lado A_3A_2 y por la altura h_1 . Y así sucesivamente, por lo tanto

$$(A' \cap B') \cap C' = D, \quad (30)$$

El volumen D es el espacio de trabajo de la configuración 3PRRR, figura 8.

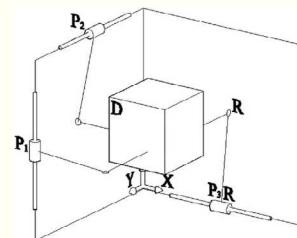


Figura 8: Espacio de trabajo del mecanismo 3PRRR.

6. Micromáquina herramienta paralela.

Con base en el proceso de selección propuesto, las especificaciones planteadas, y la configuración paralela seleccionada, se diseñó y construyó un prototipo de micromáquina herramienta paralela en las instalaciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, (figura 9).

El prototipo construido en su mayoría con aluminio 6063 T5 cubre tres grados de libertad traslacionales. Las dimensiones del prototipo son 120 x 100 x 70 milímetros y cubre un espacio de trabajo de 15 x 15 x 15 milímetros, libre de singularidades y colisiones. El prototipo fue construido colocando las cadenas cinemáticas a tierra. A su vez, cada cadena se desliza por medio de guías lineales miniatura que incorpora dos columnas de balines de acero en un arreglo de 4 puntos de contacto con el riel en el que corre. Cada guía es conectada a su vez por una tuerca diseñada con un paso modificado, para absorber el juego mecánico, mediante tecnología FDM (por sus siglas en inglés

Fused Deposition Modeling) grado ABS de prototipado rápido. La transmisión de movimiento se realiza directamente, sin reductor, mediante motores a pasos bipolares de 20 pasos por revolución (18° por paso).

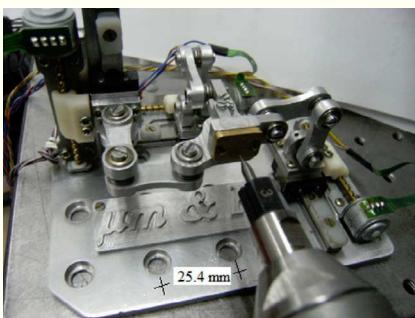


Figura 9: Prototipo de micromáquina herramienta paralela.

6.1. Caracterización experimental.

Los desplazamientos en todo el espacio de trabajo regular del prototipo desarrollado, son obtenidos por motores a pasos conectados a cada cadena cinemática mediante una transmisión directa, brindando una resolución 600 nanómetros cuando se configura a 250 micropasos por revolución. Estos son controlados a su vez por una tarjeta de control de movimiento National Instruments, el cual consiste de una etapa de potencia MID-7604/7602 de 4 ejes, una tarjeta de control PCI-7340, y un programa de entorno gráfico LabVIEW. Con éste controlador y un interferómetro láser HP para longitud (figura 10), de resolución nanométrica, fueron medidos los errores de posición del prototipo.

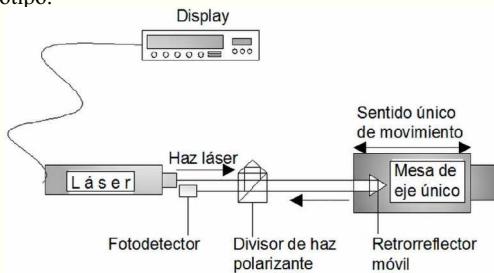


Figura 10: Esquema general del sistema de interferometría utilizado.

Se analizó el desplazamiento de cada eje tratando de cubrir, en lo posible, todo el espacio de trabajo. Fueron analizados un grupo de 1080 mediciones con incrementos de 200 micras por cada eje. Los datos se concentran en 54 gráficas, 18 por eje, distribuidos en diferentes puntos del espacio de trabajo. Los errores de posición se encuentran en un intervalo de 25 a 35 micras. La repetibilidad de la máquina fue evaluada usando series de 20 movimientos por cada eje. El juego mecánico fue evaluado

con avances de 500 micras bidireccionalmente. El resumen de la caracterización se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Parámetros del prototipo.

	Carrera [mm]	Resolución [μm]	Repetibilidad [μm]	Promedio del juego mecánico [μm]
Ejes	X	15	0,6	4,1
	Y	15	0,6	3,9
	Z	15	0,6	3,4

6.2. Pruebas de mecanizado.

Finalmente, algunas piezas fueron mecanizadas usando el prototipo de micromáquina herramienta paralela. Se usó latón comercial como pieza de trabajo y un microcortador de carburo de 0,2 milímetros de diámetro como herramienta. La prueba de mecanizado se realizó con una profundidad de corte de 30 micras, un avance de 100 mm/min y una velocidad de husillo de 36000 r.p.m. La figura 11 muestra la pieza mecanizada con dimensiones de 5 x 4 milímetros.

Estas primeras pruebas de mecanizado muestran las oportunidades de mejora respecto a los elementos de actuación y demuestra que el prototipo de micromáquina herramienta paralela es viable para producir componentes a microescala. También se resalta la importancia de incluir herramientas con dimensiones menores a 0,2 milímetros de diámetro para lograr mecanizados en el dominio dimensional de la microescala.

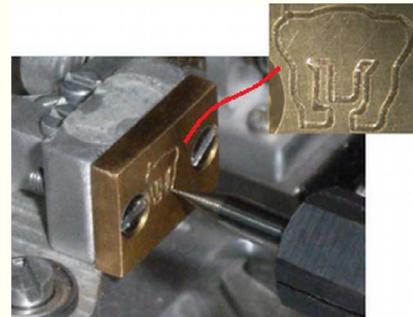


Figura 11: Mecanizado de la pieza.

7. Conclusión.

En este trabajo se ha investigado y explorado la viabilidad de introducir al campo de la micromanufactura a las configuraciones paralelas como micromáquinas herramienta (MMH). Se establecieron los requerimientos que deben considerarse para seleccionar configuraciones paralelas con miras a su aplicación como MMH. Las características de diseño que las configuraciones paralelas deben presentar para ser aplicadas como MMH son: movilidad, desacoplamiento cinemático, isotropía de fuerzas y espacio de trabajo regular. Al adoptar estos requerimientos sistemáticamente se planteó una propuesta de síntesis de tipo que permite identificar potenciales configuraciones paralelas para ser aplicadas como micromáquinas herramienta.

Describiendo las herramientas de análisis que permiten evaluar cuantitativamente los atributos establecidos, la propuesta se validó con un caso de estudio, seleccionando una configuración

paralela de tres ejes traslacionales. Con base en especificaciones se construyó un prototipo de micromáquina herramienta paralela, la cual representa una plataforma experimental para la investigación en el proceso de microcorte.

El prototipo de micromáquina herramienta paralela cumple de manera satisfactoria con los atributos solicitados. Proporciona movilidad en tres direcciones ortogonales, sin que exista acoplamiento cinemático, la fuerza que transmite el órgano terminal en cualquier dirección es homogénea y cubre un espacio de trabajo regular. Las pruebas de desempeño demuestran que el prototipo de micromáquina herramienta paralela es viable para realizar operaciones de micromecanizado. Además, se comprueba que las configuraciones paralelas aportan características de compactación y rigidez al mundo de la micromanufactura.

Las expectativas que se tienen de este trabajo es que sirva de base no sólo para seleccionar configuraciones paralelas, sino para crear configuraciones paralelas nuevas de tres o más ejes de movimiento.

English Summary

Basis for the development of micro-parallel kinematic machines.

Abstract

This work aims to establish the development basis of parallel configurations based micromachine tools. Basic conditions are identified from typical micromachine tools in order to propose a selection process of parallel configurations with the aim to develop micro-parallel kinematic machines. Based on requirements and performance indices a 3DOF parallel configuration is selected. The selection process is applied for a case of study where 3 axes of movement are required. Based on previous results and specifications, a prototype of micro-parallel kinematic machine is built and evaluated. Through test analysis, the micro-parallel kinematic machine is proved to be feasible and applicable for micro-manufacturing.

Keywords: Decoupled motion, Force isotropy, Micromachine tool, Microparallel kinematic machine, Performance indices, Reachable workspace, Selection method, Type synthesis.

Agradecimientos

Se agradece a los coordinadores del grupo de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET-UNAM, Dr. Leopoldo Ruiz Huerta y Dr. Alberto Caballero Ruiz, por sus valiosos comentarios y la oportunidad de desarrollar el trabajo de investigación con el apoyo de la DGEP-UNAM y los proyectos PAPIME PE105909 y CONACYT 60895.

Referencias

Angeles, J. 2004. The qualitative synthesis of parallel manipulators. *Mechanical Design* 126(4) pp. 617-624.

Aracil, R., Saltarén, R., Sabater, J. Reinoso, O. 2006. Robots paralelos: máquinas con un pasado para una robótica del futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 3(1) pp. 26-28.

Arakelian, V., Briot, S., Guegan, S., Le Flecher, J. 2005. Design and prototyping of new 4, 5 and 6 degrees of freedom parallel manipulators based on the copying properties of the pantograph linkage. *Proceedings of 36th International Symposium on Robotics ISR*, Tokyo, Japan.

Ataka, T. 1999. The experimental microfactory system in Japanese national R&D project. *R&D Department, Scientific Instruments Division, Seiko Instruments Inc.* 36-1.

Beltrami, I., Joseph, C., Clavel, R., Bacher, J. P., Bottinelli, S. 2004. Micro- and nanoelectric-discharge machining. *Materials Processing Technology*, 149(1-3) pp. 263-265.

Clavel, R. 1988. DELTA, a fast robot with parallel geometry. *International Symposium on Industrial Robots*. 12-17 Lausanne, pp. 91-100.

Chablat, D., Wenger, Ph. 2003. Architecture optimization of a 3-DOF translational parallel mechanism for machining applications, the orthoglide. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19(3) pp. 403-410.

Dario, P., Menciassi, A., Stefanini, C., Accoto, D. 2002. Miniaturization of biomedical micromachines. *2nd. Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine & Biology*. IEEE. Madison, Wisconsin USA, pp. 291-296.

Dario, P., Valleggi, R., Carrozza, M. C., Montesit M. C., and Coccot M. 1992. Microactuators for microrobots: A critical survey. *Micromechanic and Microengineering* 2, pp. 141-157.

Denton, M. 2009. Hexapod CNC router strolls into action. *Micro manufacturing*, [http://www.micromanufacturing.com/showthread.php? p=734](http://www.micromanufacturing.com/showthread.php?p=734). accessed: Octubre 2009

Detter, H., Popovic G. 2000. Industrial demands on micromechanical products. *IEEE Proc. 22nd International Conference on Microelectronics*, NIS, Serbia, 14-17 May, pp. 61-67.

Dhanorker, A., Öznel, T. 2008. Meso-micro scale milling for micro manufacturing. *Mechatronics and Manufacturing Systems* 1(1) pp. 23-42.

Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y. 2006. Recent advances in mechanical micromachining. *Manufacturing Technology* 55(2) pp. 745-768.

EHmann, K. F., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., Cao, J. 2008. Design and analysis of micro/meso-scale machine tools. Wang, L. and Xi, J. (Eds.) *Smart Devices and Machines for Advanced Manufacturing*. Springer, pp. 283-318.

Frazier, A. B. 1995. The miniaturization technologies: Past, present, and future. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 42(5) pp. 423-430.

Fujita, H., Toshiyoshi, H., Hashiguchi, G., Wada, Yasou. 2001. Micromachined tools for nano technology. *RIKEN Review. Focused on Science and Technology in Micro/Nano Scale* (36) pp. 12-15.

Gogu, G. 2004. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. *European Journal of Mechanics A/Solids* 23, pp. 1021-1039.

Gogu, G. 2008. Structural synthesis of Parallel Robots, Part 1: Methodology. Springer, *Solid Mechanics and its applications* Vol. 149. pp. 275.

Gosselin, C., Masouleh, M., Duchaine, V., Richard, P-L., Foucault, S., Kong, X. 2007. Parallel mechanisms of the multipteron family: Kinematic Architectures and Benchmarking. *International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. Roma, Italy, 10-14 April, pp. 555-560.

Gosselin, C. M., Kong, X. 2004. Cartesian parallel manipulators, US Patent No. 6,729,202 B2.

Heikkilä, H. R., Karjalainen, I. T., Uusitalo, J. J., Vuola, A. S., Tuokko, R. O. 2007. Possibilities of a microfactory in the assembly of small part and products-first result of the M4-project. *Proceedings of the International Symposium on Assembly and Manufacturing*, Ann Arbor, Michigan, USA.

Jang, S. H., Jung, Y. M., Hwang, H. Y., Choi, Y. H., Park, J. K. 2008. Development of a reconfigurable micro machine tool for microfactory. *International Conference on Smart Manufacturing Application*. KINTEX. Gyeonggi-do, Korea, pp. 190-195.

Jin, Y., Chen, I. M., Yang, G. 2006. Kinematic design of a 6-DOF parallel manipulator with decoupled translation and rotation. *IEEE Transactions on Robotics* 22(3) pp. 545-551.

Kang, D. S., Seo, T. W., Yoon, Y. H., Shin, B. S., Liu, X.-J., Kim, J. 2006. A micro positioning parallel mechanism platform with 100 degree tilting capability. *Manufacturing Technology* 55(1) pp. 377-380.

Kawahara, N., Suto, T., Hirano, T., Ishikawa, Y., Kitahara, T., Ooyama, N., Ataka T. 1997. Microfactories; new applications for micromachining technology to the manufacture of small products. *Microsystem Technologies* 3(2) pp. 37-41.

Kong, X., Gosselin, C.M. 2002. Type synthesis of linear translational parallel manipulators. J. Lenarcic, F. Thomas (Eds.), *Advances in Robot Kinematics: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, pp. 453-462.

Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G. 2006. Scaling down of microequipment parameters. *Precision Engineering* 30(2) pp. 211-222.

Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G., Kasatkina, I. 2002. Development of micromachining tool prototypes for microfactories. *Micromechanics and Microengineering* 12(6) pp. 795-812.

Kussul, E., Rachkovskij, D., Baidyk, T., Talayev, S. 1996. Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment. *Micromechanical and Microengineering* 6(4) pp. 410-425.

Kussul, E., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Kasatkina, A., Kasatkina, L., Baidyk, T., Velasco, G. 2004. CNC machine tools for low cost micro devices manufacturing. *Journal of applied research and technology* 2(1) pp. 76-91.

Li, H., Lai, X., Li, C., Lin, Z., Miao, J., Ni, J. 2008. Development of meso-scale milling machine tool and its performance analysis. *Frontiers of Mechanical Engineering in China* 3(1) pp. 59-65.

Li, X., Wang, J., Li, W. 2007. Current state and prospect of micro-machining. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, China, pp. 1414-1419.

Li, Y., Bone, G. 2001. Are parallel manipulators more energy efficient? *Proceedings of the International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Alberta, Canada, pp. 41-46.

Liang, Y., Zhaol, Y., Bai Q., Wang, S., Wang, B., Chen, M., Dou, J. 2006. Study on micromachining tools in fabrication of microparts. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Zhuhai, China, pp. 856-859.

Mekid, S., Gordon, A., Nicholson, P. 2004. Challenges and rationale in the design of miniaturised machine tool. *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference at UMIST*, Springer, pp. 456-471.

Merlet, J. P. 2006. *Parallel Robots*. Springer. ISBN-10: 1-4020-4132-2.

Moreno, H., Saltaren, R., Carrera, I., Puglisi, L., Aracil R. 2012. Índices de desempeño de robots manipuladores: una revisión del Estado del Arte. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9(2) pp. 111-122.

Okazaki, Y., Kitahara, T. 2000. Micro-lathe equipped with closed-loop numerical control. 2nd International Workshop on Microfactories. Fribourg Switzerland, Oct 9-10, pp. 87-90.

Okazaki, Y., Mishima, N., and Ashida, K. 2002. Microfactory and micro machine tools. First Kore-Japan Conference on Positioning Technology, pp. 1-6.

Perroud, S., Codourey, A., Mussard Y. 2003. A miniature robot for the microfactory. Switzerland, CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique.

PI. 2013. *Physik Instrumente*. Accessed: April 2013, www.physikinstrumente.com/.

Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., Flannery, B. 2002. *Numerical recipes in C, The art of scientific computing*. Cambridge University Press.

Rehsteiner, F., Neugebauer, R., Spiewak, S., Wieland, F. 1999. Putting parallel kinematics machines (PKM) to productive work. *Manufacturing Technology* 48(1) pp. 345-350.

Ruiz, L. 2000. Desarrollo de microtecnología mecánica para aplicaciones de instrumentación. Memoria SOMI XV Congreso Nacional de Instrumentación. Guadalajara, Jalisco México.

Singh, K. 2008. Expect changes when entering 'micro' world. *Micro Manufacturing* 1(1).

Slocum, A. H. 1992. Precision machine design: Macromachine design philosophy and its applicability to the design of micromachines. *Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '92. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robot*, Travemunde, Germany, pp. 37-42.

Sparacino, F., Hervé, J. 1993. Synthesis of parallel manipulators using lie-groups Y-star and H-robot. *International Workshop on Advanced Robotics*, Tsukuba, Japan, November 8-9, pp. 75-80.

Staffetti, E., Bruyninckx, H., De Schutter, J. 2002. On the invariance of manipulability indices. J. Lenarcic, Thomas, F. (Eds.) *Advances in Robot Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, pp. 57-66.

Tanaka, M. 2001. Development of desktop machining microfactory. RIKEN review: Focused on Advances on Micro Mechanical Fabrication Techniques, No. 34, pp. 46-49.

Thusty, J., Ziegert, J., Ridgeway, S. 1999. Fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machines tools. *Manufacturing Technology* 48(1) pp. 351-356.

Tsai, L. W. 1997. Multi-degree-of-freedom mechanisms for machine tools and the like, US Patent No. 5,656,905.

Tsai, L. W. 1998. Systematic enumeration of parallel manipulator. *Technical Research Report*. T. R. 98-33, pp. 1-11.

Wang, Y., Zou, H., Zhao, Y., Li, M. 1997. Design and kinematics of a parallel manipulator for manufacturing. *Manufacturing Technology* 46(1) pp. 297-300.

Wu, Z., Rizk, R., Fauroux, J. C., Gogu, G. 2007. Numerical simulation of parallel robots with decoupled motions and complex structure in a modular design approach. Tichkiewitch, S., Tollenaere, M., Ray, P., (Eds.) *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, Springer. Part 3 pp. 129-144.

Yangmin, L., Qingsong, X. 2006. A new approach to the architecture optimization of a general 3-puu translational parallel manipulator. *Intelligent & Robotic Systems* 46(1) pp. 59-72.

Yoshikawa, T. 1985. Manipulability of robotic mechanism. *The International Journal of Robotic Research* 4(2) pp. 3-9.

Youssef, H., El-Hofy, H. 2008. *Machining technology. Machine tools and operations*. CRC Press.

Zanganeh, K., Angeles, J. 1997. Kinematic isotropy and the optimum design of parallel manipulators. *Journal of Robotics Research* 16(2) pp. 185-197.

Zhang, D. 2009. *Parallel robotic machine tools*, Springer. ISBN: 978-1-4419-1116-2.

Zhang, D., Xi, F., Mechebske, C. M., Lang, S. 2004. Analysis of parallel kinematic machine with kinetostatic modelling method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20(2) pp. 151-165.