

Diseño óptimo de mecanismos flexibles de precisión de baja movilidad

Código: COAMPP810

Desde 01/04/2026 hasta 31/03/2028 - Duración: 2 años

Resumen técnico del PID

El proyecto propone desarrollar una estrategia integral para la síntesis y optimización de mecanismos flexibles de precisión, específicamente orientados a aplicaciones con pequeños desplazamientos. La metodología se fundamenta en el uso de la Teoría de Helicoides como herramienta para representar y manipular espacialmente los grados de libertad y restricciones de los mecanismos flexibles. Se plantea el desarrollo de algoritmos computacionales que permitan, de forma automática, la determinación de espacios de libertad, espacios de restricción y la óptima ubicación de elementos flexibles (flexores) tipo viga en el diseño conceptual y detallado del mecanismo. Se contempla además la validación mediante simulación numérica (por ejemplo, con MATLAB® y simulaciones de elementos finitos en SolidWorks®) y la posterior construcción y testeo experimental de prototipos, utilizando tecnologías de impresión 3D. Los resultados esperan satisfacer necesidades actuales en sectores como la instrumentación de precisión, microposicionamiento para aplicaciones en metrología, biomedicina y sistemas mecatrónicos avanzados.

Grupo de Trabajo

Director
Gallardo Alejandro

Co-Director
Pereyra Maira Etefania

Antecedentes sobre el tema

Un mecanismo es un dispositivo mecánico cuyo objetivo es transferir o transformar movimiento, fuerza o energía [1]. En los mecanismos rígidos tradicionales, la conexión entre cuerpos se realiza mediante juntas cinemáticas, donde el movimiento se produce por el deslizamiento relativo entre superficies de contacto. En las últimas décadas ha ganado relevancia un nuevo tipo de mecanismo: los mecanismos flexibles (*compliant mechanisms*), en los cuales el movimiento se genera por la deformación elástica de sus componentes estructurales.

Estos mecanismos presentan un rango de movimiento más limitado que los tradicionales; sin embargo, ofrecen ventajas como mayor precisión y exactitud, al eliminar el juego inherente a las juntas mecánicas. Asimismo, reducen la necesidad de lubricación, minimizan la fricción y el desgaste, y simplifican el ensamblaje, lo que resulta en menores costos. Gracias a estas características, se utilizan actualmente en aplicaciones de alta precisión como etapas posicionadoras, micro-robots y dispositivos biomédicos [1, 2].

No obstante, el hecho de que el movimiento se genere a través de la deformación introduce nuevos desafíos. Entre ellos se destacan la fatiga de los elementos flexibles y el pandeo debido a la baja rigidez estructural [1]. El diseño de estos mecanismos representa un problema complejo, ya que su comportamiento depende de factores geométricos, materiales y condiciones de carga [3].

En la actualidad, no existen métodos que permitan automatizar completamente el diseño de mecanismos flexibles para geometrías arbitrarias, tanto planas como tridimensionales [4, 3, 5]. Entre los enfoques más utilizados se encuentran el modelo pseudo-rígido, la construcción por bloques, la optimización topológica y el diseño basado en restricciones [1, 2, 3].

Este último se fundamenta en la idea de que el movimiento de un mecanismo está determinado por la localización y orientación de sus restricciones. El concepto fue introducido por Maxwell y posteriormente aplicado al diseño de mecanismos por Blanding [6, 7]. Más adelante, Hopkins incorporó la teoría de helicoides a este enfoque, permitiendo representar los movimientos deseados, definir la actuación, y ubicar los cuerpos flexibles que restringen solamente los movimientos indeseados [8]. Esta metodología se conoce como FACT (*Freedom, Actuation and Constraint Topologies*) [9, 10]. FACT permite obtener diseños con geometrías simples de construir y escalar, y ha sido aplicada recientemente en el diseño de metamateriales con propiedades mecánicas especiales, como alta rigidez con baja densidad [11].

De forma paralela, Su [7] aplicó la teoría de helicoides al diseño basado en restricciones, obteniendo resultados similares. La principal diferencia entre ambos enfoques radica en la representación: Hopkins creó una biblioteca gráfica, mientras que Su empleó formulaciones algebraicas [7]. Siguiendo esta vía algebraica, en [12] se definieron operaciones sobre sistemas de helicoides que permiten un rápido análisis cinemático y también la síntesis de mecanismos flexibles.

En este contexto, el enfoque combinado del diseño basado en restricciones y la teoría de helicoides se perfila como un método riguroso, sistemático y especialmente prometedor para la automatización del diseño de mecanismos flexibles de precisión [13, 14, 15]. Las etapas de síntesis de tipo (es decir, la elección de los grados de libertad y de las restricciones) ya se han automatizado en gran medida [16, 17, 18].

Sin embargo, hasta ahora no se ha logrado automatizar por completo el proceso que va desde la síntesis tipo de un mecanismo hasta la selección óptima de los flexores que maximicen su desempeño. En este proyecto se desarrollará una metodología capaz de elegir e implementar automáticamente los flexores adecuados a la cinemática deseada y, entre ese conjunto factible, seleccionar aquellos que optimicen el rendimiento del sistema.

Referencias

- [1] L. L. Howell, *Handbook of Compliant Mechanisms*, Wiley, New York, 2013.
- [2] N. Lobontiu, *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges*, CRC Press, New York, 2002.
- [3] H.-J. Su, “Mobility Analysis of Flexure Mechanisms via Screw Algebra,” *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 3, no. 4, Oct. 2011, Art. no. 041010.
- [4] M. A. Pucheta, A. G. Gallardo, and J. A. Bernad, “Empleo de teoría de helicoides para el diseño de mecanismos flexibles de precisión tridimensional,” *Mecánica Computacional*, vol. XXXIV, pp. 2825–2845, ENIEF, AMCA, 2016.
- [5] A. Gallego and J. Herder, “Synthesis methods in compliant mechanisms: An overview,” in *Proc. Mechanisms and Robotics Conf.*, Int. Design Engineering Technical Conf. & Computers and Information in Engineering Conf., 2009, vol. 7, pp. 193–214.
- [6] J. Hopkins, *Design of Parallel Flexure Systems via Freedom and Constraints Topologies (FACT)*, MSc Thesis, MIT, USA, 2007.
- [7] H.-J. Su, D. V. Dorozhkin, and J. M. Vance, “A screw theory approach for the conceptual design of flexible joints for compliant mechanisms,” *J. Mechanisms and Robotics*, vol. 1, no. 4, 2009, Art. no. 041009.
- [8] J. Hopkins, *Design of Flexure-based Motion Stages for Mechatronic Systems via Freedom, Actuation and Constraints Topologies (FACT)*, PhD Thesis, MIT, USA, 2010.
- [9] J. Hopkins and M. Culpepper, “Synthesis of multi-degree of freedom, parallel flexure system concepts via freedom and constraint topology (FACT)– Part I: Principles,” *Precision Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 259–270, 2010.
- [10] J. Hopkins and M. Culpepper, “Synthesis of multi-degree of freedom, parallel flexure system concepts via freedom and constraint topology (FACT)– Part II: Practice,” *Precision Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 271–278, 2010.
- [11] C. Spadaccini, “Mechanical Metamaterials: Design, Fabrication, and Performance,” in *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2015 Symposium*, R. D. Braun, Ed., National Academies Press, 2016, pp. 82–162.
- [12] A. G. Gallardo and M. A. Pucheta, “Synthesis of precision flexible mechanisms using screw theory and beam constraints,” *Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 277–304, Nov. 2018.
- [13] X. Kong and C. Gosselin, *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*, Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 33, Springer, Berlin, 2013.
- [14] H. Li et al., “A constraint-flow based method of synthesizing XY θ compliant parallel mechanisms with decoupled motion and actuation characteristics,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 178, 2022, Art. no. 105085.
- [15] G. Hao et al., “Design of four-DOF compliant parallel manipulators considering maximum kinematic decoupling for fast steering mirrors,” *Actuators*, vol. 10, no. 11, 2021.
- [16] Y. Song, X. Kang, and J. S. Dai, “Instantaneous mobility analysis using the twist space intersection approach for parallel mechanisms,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 151, 2020, Art. no. 103866.
- [17] F. Sun and J. Hopkins, “Mobility and constraint analysis of interconnected hybrid flexure systems via screw algebra and graph theory,” *J. of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, no. 3, 2017.
- [18] P. Lambert, L. Da Cruz, and C. Bergeles, “Mobility of overconstrained parallel mechanisms with reconfigurable end-effectors,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 171, 2022, Art. no. 104722.

Objetivo general: Desarrollar una metodología de diseño de mecanismos flexibles de precisión con baja movilidad, reduciendo al mínimo la intervención del diseñador.

Objetivos específicos:

1. Seleccionar y aplicar métodos geométricos que permitan expresar los espacios de libertad y restricción de los mecanismos.
2. Desarrollar un modelo matemático que describa la estática y dinámica del mecanismo ante pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones.
3. Definir parámetros que permitan caracterizar los mecanismos y facilitar su posterior optimización.
4. Desarrollar modelos computacionales para la síntesis y el diseño de mecanismos.
5. Prototipar diseños prometedores para resolver problemas de validación y abordar necesidades de interés industrial.

Metodología

(i) Seleccionar y aplicar métodos geométricos que permitan expresar los espacios de libertad y restricción de los mecanismos

Se aplicará la teoría de helicoides para representar los espacios de libertad y restricción del mecanismo, así como para describir las superficies de fijación de los elementos flexibles. Este formalismo permitirá reinterpretar el problema en términos geométricos, lo cual facilitará la aplicación de herramientas ya existentes en la resolución de problemas similares. Asimismo, se analizarán alternativas más generales a la teoría de helicoides, como el álgebra geométrica. Se llevará a cabo un análisis comparativo entre estos formalismos con el objetivo de determinar cuál resulta más ventajoso en el contexto de diseño de mecanismos flexibles.

(ii) Desarrollar un modelo matemático que describa la estática y dinámica del mecanismo ante pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones

Se profundizará en los modelos desarrollados en [referencia], donde se utilizó la teoría de helicoides para la construcción de las matrices de rigidez y masa de mecanismos flexibles. Al aplicar este modelo, se espera reducir significativamente los tiempos de cálculo en las etapas de optimización, ya que los problemas estático y/o dinámico pueden resolverse de forma directa. Se validará los modelos con simulaciones aplicando el método de elemento finito en SolidWorks®.

(iii) Definir parámetros que permitan caracterizar los mecanismos y facilitar su posterior optimización

Los mecanismos se caracterizarán mediante sus propiedades topológicas y los índices de desempeño vinculados a su capacidad de cumplir con los requisitos de diseño y funcionamiento. La estructura del mecanismo será modelada como un sistema multicuerpo, utilizando teoría de grafos.

Se identificarán las variables de diseño, sus límites (fronteras), los objetivos y las restricciones. La optimización será planteada en un entorno multiobjetivo. Inicialmente, se utilizará un algoritmo genético junto con una estrategia de suma ponderada para abordar múltiples objetivos y restricciones. La formulación podrá organizarse en cascada, como una secuencia de problemas de optimización, o de manera monolítica, según resulte más conveniente.

(iv) Desarrollar modelos computacionales para la síntesis y el diseño de mecanismos

Una vez cumplidos los objetivos anteriores, se desarrollará un modelo computacional que integre la síntesis tipo, el análisis estático y dinámico del mecanismo, y la formulación de la optimización, contemplando las restricciones asociadas a la fijación de los flexores. Este entorno se implementará en MATLAB®, dada su amplia adopción en el ámbito de la ingeniería. También se desarrollará una versión en Python, con el fin de ampliar el acceso a usuarios que no cuenten con licencias comerciales.

(v) Prototipar diseños prometedores para resolver problemas de validación y abordar necesidades de interés industrial

Se fabricarán los diseños más prometedores mediante impresión 3D y/o corte láser. El desempeño de los prototipos se evaluará utilizando sistemas de visión, sensores de desplazamiento y celdas de carga. Los resultados serán sistematizados, publicados en artículos científicos y utilizados como base para proponer la transferencia metodológica a la industria y a otros grupos académicos.

Cronograma

Cronograma de actividades

Año	Actividad	Duración (Meses)	Inicio	Fin
2028	Ensayos y validación. Medición de desplazamientos y cargas	3	02/01/2028	02/04/2028
2027	Fabricación de prototipos. Selección de 2 diseños óptimos.	4	02/09/2027	02/01/2028
2027	Integración de síntesis tipo, análisis estático/dinámico y optimización en MATLAB/Python	4	02/05/2027	02/09/2027
2027	Configuración de algoritmo genético y suma ponderada	4	01/01/2027	02/05/2027
2027	Definición de variables de diseño, límites, objetivos y restricciones	3	01/01/2027	01/04/2027
2026	Validación con FEM en SolidWorks	2	01/11/2026	01/01/2027
2026	Desarrollo de matrices de rigidez y masa mediante helicoides (pequeñas deformaciones)	3	01/08/2026	01/11/2026
2026	Revisión bibliográfica de helicoides y álgebra geométrica	4	01/04/2026	01/08/2026