

Diseño Conceptual de un Robot Paralelo Reconfigurable

Sánchez Alonso Róger Ernesto, González Barbosa José Joel y Castillo Castañeda Eduardo

Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro. Cerro Blanco No. 141, Colinas del Cimatario, Querétaro, Qro, C. P. 76099.

Resumen

En este trabajo se reporta el diseño a nivel de concepto de un robot paralelo reconfigurable. El prototipo tomado como modelo base a reconfigurar es un manipulador paralelo de 6 GDL que se encuentra en proceso de patentamiento ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El esquema de reconfiguración seleccionado es el de geometría variable, por lo que primero se identificaron todos parámetros que definen la geometría del manipulador, para posteriormente, tomando en cuenta una serie de requerimientos técnicos, determinar aquellos a considerar como base para la reconfiguración del robot. Después se tomó como criterio de selección definitivo la generación de espacios de trabajo para establecer la mejor estrategia de reconfiguración. Finalmente se presenta una propuesta de diseño conceptual para el robot manipulador reconfigurable.

Palabras clave: robot paralelo, reconfiguración, geometría variable.

1. Introducción

Actualmente la industria tiene la necesidad de poder ajustar sus líneas de producción para hacer frente a cambios inesperados en las exigencias del mercado. Por lo anterior, la ingeniería robótica tiene el reto de desarrollar manipuladores flexibles que puedan desempeñarse eficientemente en cualquier entorno, situación o condición de trabajo, haciendo especial énfasis en los manipuladores paralelos por sus ventajas competitivas sobre los robots tipo serie.

Una estrategia de reconfigurabilidad es quizá el enfoque más razonable para proveer de flexibilidad a un robot manipulador [1]. En el caso de manipuladores paralelos los principales avances en esta materia pueden agruparse en dos categorías; los basados en un diseño modular y los basados en un diseño con geometría variable [2].

Un diseño modular consiste en un conjunto de módulos estandarizados, tales como actuadores, articulaciones, eslabones y efectores finales, los cuales pueden ser rápidamente conectados y desconectados para obtener diferentes configuraciones en un robot manipulador, los trabajos presentados en [3-7] constituyen ejemplos de esta estrategia aplicada a robots manipuladores paralelos.

Por otro lado, en un diseño de geometría variable las dimensiones de los parámetros geométricos del manipulador son modificadas para alcanzar nuevas configuraciones. El dodecápodo [8], la plataforma Gough-Stewart reconfigurable planteada en [9], y el robot paralelo presentado en [2], constituyen ejemplos de este enfoque, el cual se encuentra más desarrollado que el de tipo modular ya que presenta la ventaja de una fácil implementación durante la operación del robot.

A pesar de los avances obtenidos, en la actualidad el diseño de un manipulador paralelo reconfigurable de gran versatilidad y desempeño sigue siendo un desafío, por lo que la búsqueda de un diseño innovador y de gran potencial resulta en una tarea altamente justificada para la ingeniería robótica.

En este trabajo se presenta el diseño conceptual de un robot paralelo reconfigurable cuyo modelo base es un manipulador de 6 GDL que por sí sólo presenta grandes ventajas cinemáticas y que actualmente se encuentra en proceso de patentamiento ante el IMPI.

2. Descripción geométrica del modelo base

El manipulador tomado como modelo base a reconfigurar (proceso de patentamiento: MX/a/2013/011009) consiste en dos sub-manipuladores paralelos tipo 3-RUS que comparten base móvil (Fig. 1a), donde R, U y S representan articulaciones de revoluta, universales y esféricas respectivamente, y el subrayado indica la junta activa. A menos que se especifique de otra manera los subíndices $i = 1, 2, 3$ se refieren a los elementos del sub-manipulador llamado M_1 , mientras los subíndices $i = 4, 5, 6$ se refieren a los elementos del sub-manipulador llamado M_2 .

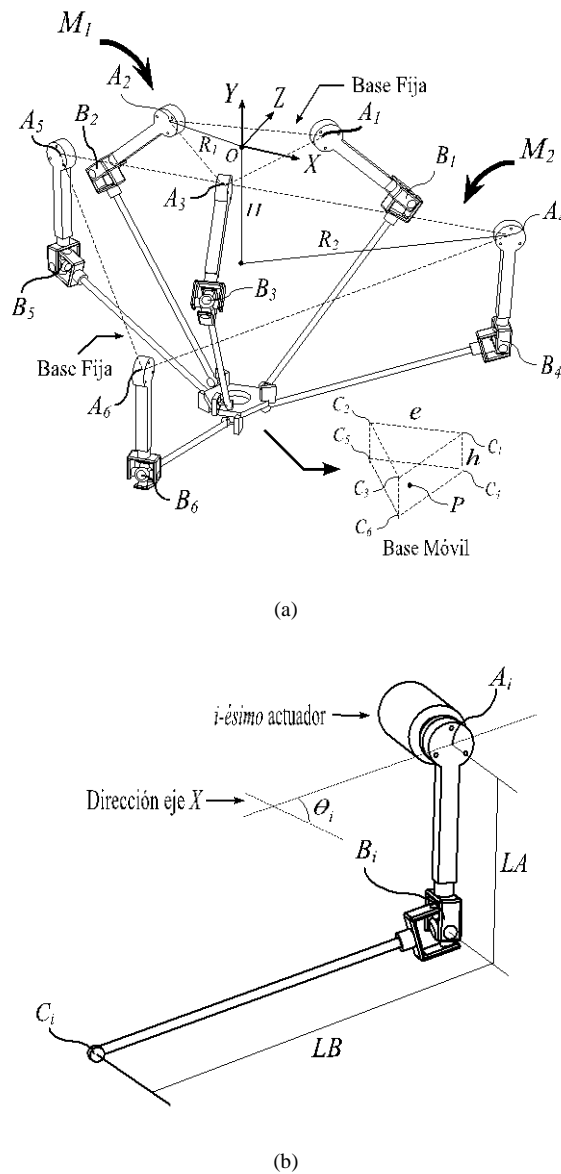


Fig. 1. Modelo base a reconfigurar. (a) Vista general. (b) i -ésima cadena cinemática.

La plataforma fija del manipulador es representada por dos triángulos equiláteros paralelos, $A_1A_2A_3$ y $A_4A_5A_6$, separados por una distancia H . El sistema de referencia global del robot está ubicado en el centro O del triángulo $A_1A_2A_3$, con sus ejes X y Z yaciendo en el plano definido por este triángulo, y el eje Y apuntando hacia arriba. Las juntas de revoluta definidas en los puntos A_i son accionadas por actuadores rotacionales, y determinan los vértices de los triángulos equiláteros $A_1A_2A_3$ y $A_4A_5A_6$, donde R_1 y R_2 representan los circunradios de estos triángulos, y θ_i representa la orientación de cada una de las seis cadenas cinemáticas del robot (Fig. 1b), la cual está medida desde la dirección del eje X hasta A_i , para $i = 1, 2, 3$, y hasta la proyección de A_i en el plano XZ , para $i = 4, 5, 6$.

Por otro lado, los puntos B_i denotan la posición de la articulación universal que conecta el eslabón de longitud LA con el eslabón de longitud LB en la misma cadena cinemática. De forma similar, los puntos C_i denotan la posición de la articulación esférica que conecta la base móvil con el eslabón de longitud LB . Los puntos C_i forman un prisma triangular de lado e y de altura h , donde las bases $C_1C_2C_3$ and $C_4C_5C_6$ son triángulos equiláteros. Finalmente, el punto P es el punto de interés en la base móvil (elemento efector) y está ubicado convenientemente en el centro del triángulo $C_4C_5C_6$.

Los parámetros que definen la geometría del manipulador de 6 GDL y sus valores tomados como referencia se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros geométricos de referencia

Parámetro	Valor
R_1	200 mm
R_2	450 mm
H	200 mm
LA	200 mm
LB	400 mm
h	34 mm
e	86.60 mm
θ_1	35°
θ_2	155°
θ_3	275°
θ_4	25°
θ_5	145°
θ_6	265°

3. Determinación de los parámetros geométricos a considerar como base para la reconfiguración

El esquema de reconfiguración seleccionado es el de geometría variable. La razón es que dicho esquema presenta la ventaja de poder implementarse fácilmente durante la operación del robot, es decir, no hay necesidad de parar al robot para reconfigurarlo tal y como sucede en la mayoría de robots modulares.

Una reconfiguración de tipo geométrica implica la variación de uno, algunos o todos los parámetros mostrados en la Tabla 1. En este trabajo se toma la opción de variar solamente un parámetro, ésto para no intensificar el problema de redundancia cinemática que se generará al reconfigurar el robot.

La selección del parámetro considerado como base para la reconfiguración se hace tomando en cuenta aquel que implique un diseño mecánico que cumpla con los siguientes requerimientos técnicos: simplicidad para la construcción y de fácil implementación en el manipulador (Req.1), que no agregue cargas excesivas en las cadenas cinemáticas para no afectar drásticamente la capacidad de carga, rigidez y exactitud del manipulador (Req.2), que no genere interferencias en el espacio de trabajo operable del manipulador (Req.3), que no modifique drásticamente el espacio físico que ocupa el manipulador, pues de otra manera la reconfiguración sería prácticamente igual a hacer un robot de dimensiones superiores (Req.4), que favorezca la reconfiguración durante la operación del robot (Req.5), y que minimice el uso de actuadores adicionales (Req.6).

La evaluación de los parámetros geométricos del robot considerando los requerimientos técnicos antes mencionados se muestra en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Evaluación de los parámetros R_1 , R_2 y H

Requerimientos	Imp. Relat.	R_1		R_2		H	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Req.1	0.2	9	1.8	4	0.8	8	1.6
Req.2	0.25	10	2.5	10	2.5	10	2.5
Req.3	0.2	10	2	1	0.2	10	2
Req.4	0.15	9	1.35	5	0.75	9	1.35
Req.5	0.1	9	0.9	6	0.6	9	0.9
Req.6	0.1	9	0.9	6	0.6	8	0.8
Total	1		9.45		5.45		9.15

Tabla 2. Evaluación de los parámetros LA , LB y h

Requerimientos	Imp. Relat.	LA		LB		h	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Req.1	0.2	10	2	10	2	2	0.4
Req.2	0.25	4	1	3	0.75	4	1
Req.3	0.2	10	2	10	2	10	2
Req.4	0.15	8	1.2	8	1.2	10	1.5
Req.5	0.1	10	1	10	1	6	0.6
Req.6	0.1	8	0.8	8	0.8	2	0.2
Total	1		8		7.75		5.7

Tabla 3. Evaluación de los parámetros e y θ_i

Requerimientos	Imp. Relat.	e		θ_i	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Req.1	0.2	2	0.4	2	0.4
Req.2	0.25	4	1	10	2.5
Req.3	0.2	10	2	2	0.4
Req.4	0.15	10	1.5	10	1.5
Req.5	0.1	6	0.6	7	0.7
Req.6	0.1	2	0.2	2	0.2
Total	1		5.7		5.7

Tal y como se observa en las tablas anteriores, el parámetro geométrico que implica un diseño más ajustado a los requerimientos es R_1 (9.45 pts.), es decir la reconfiguración del robot estaría basada en el redimensionamiento del triángulo $A_1A_2A_3$ de la base fija del mecanismo. Por otro lado, el parámetro H parece también implicar un diseño factible (9.15 pts.), es decir la reconfiguración del robot podría estar también basada en redimensionar la separación entre los triángulos $A_1A_2A_3$ y $A_4A_5A_6$ que definen la base fija del mecanismo.

4. Selección de la estrategia de reconfiguración

En la Fig. 2 se muestra tanto la i como la $i+3$ -ésima cadena cinemática del robot (para $i = 1, 2, 3$), en donde fácilmente se puede intuir las implicaciones geométricas generadas sobre el mecanismo producto de una variación en el parámetro R_1 o H . En el caso de una variación del parámetro R_1 , las coordenadas de las articulaciones activas de revoluta definidas en los puntos A_i se ven afectadas horizontalmente, por otro lado, para una variación del parámetro H , son las coordenadas de las articulaciones activas de revoluta definidas en los puntos A_{i+3} las que se ven afectadas verticalmente.

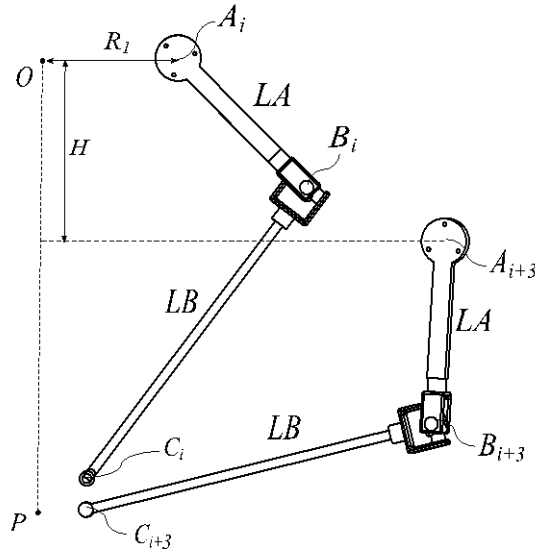


Fig. 2. Representación de la i e $i+3$ -ésima cadena cinemática del robot de paralelo de 6 GDL.

La estrategia de reconfiguración tratada anteriormente hace referencia a la variación de solamente un parámetro, ya sea R_l o H . Sin embargo en la Fig. 3 se presenta un esquema más completo que implica la modificación de ambos parámetros mediante la inclusión de solamente un grado de libertad al sistema. Esta estrategia de reconfiguración, propuesta en un trabajo desarrollado en el Instituto Politécnico Nacional (CICATA-Qro) que se encuentra en proceso de patentamiento ante el IMPI (MX/a/2013/006781), se logra al agregar en las $i = 1, 2, 3$ cadenas cinemáticas pertenecientes al sub-manipulador M_j un eslabón móvil de longitud R_r , el cual será llamado de aquí en adelante eslabón de reconfiguración. Las articulaciones de revoluta que permiten la movilidad del eslabón de reconfiguración están localizadas en el punto F_i a una distancia R_f del sistema de referencia global del robot en la dirección de θ_i .

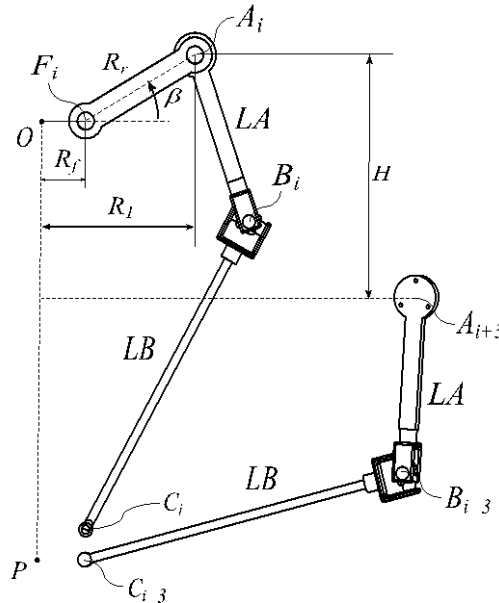


Fig. 3. Estrategia de reconfiguración basada en la variación simultanea de R_l y H .

Como se observa en la Fig. 3, cuando la articulación definida en F_i es accionada, ésta genera un movimiento angular definido por β en el eslabón de reconfiguración, lo que a su vez implica un reposicionamiento de las articulaciones activas definidas en los puntos A_i , que puede ser visto como un redimensionamiento simultáneo de los parámetros R_l y H .

De lo anterior se puede decir que existe tres posibles estrategias de reconfiguración que parecen técnicamente viables; la primera estrategia implica la variación de R_l , la segunda la variación de H , y la tercera la variación simultánea de ambos parámetros mediante el esquema de la Fig. 3. Para poder decidir qué estrategia conviene implementar se realizó un estudio que permitiera determinar el comportamiento del espacio de trabajo del robot frente a cada una de las estrategias, los resultados se muestran en la Fig. 4, en donde se puede observar que el espacio de trabajo del robot tiende a disminuir en la medida que aumenta la longitud del parámetro R_l (curva azul delgada), situación un poco distinta en el caso de la variación de H (curva roja delgada) y en el caso de la variación simultánea de R_l y H (curva negra delgada), en donde la relación con el espacio de trabajo es mayoritariamente directa. El análisis anterior permite inferir que la configuración del robot que provee el máximo espacio de trabajo, aproximadamente $5.38 \times 10^7 \text{ mm}^3$, se da bajo la estrategia basada en la variación simultánea de R_l y H , específicamente cuando la posición angular β del eslabón de reconfiguración está entre 50 y 60 grados.

El resultado anterior no es lo suficientemente concluyente como para seleccionar la estrategia de reconfiguración, pues no basta con seleccionar una estrategia que permita obtener el mayor espacio de trabajo dada una configuración, ya que esto en realidad lo que representa es un sub-espacio de trabajo. Lo adecuado es analizar la unión de los sub-espacios de trabajo generados por una estrategia de reconfiguración, ya que en una configuración dada se pueden alcanzar puntos que en otras configuraciones no es posible, de ahí la necesidad de utilizar la unión de los sub-espacios de trabajo como una medida del espacio de trabajo global de un robot reconfigurable.

Tomando en cuenta lo anterior, en la Fig. 4 se muestra el comportamiento del espacio de trabajo global del manipulador con cada estrategia de reconfiguración. En el caso del espacio global generado con la estrategia que implica la variación de R_l , éste permanece prácticamente constante dentro del rango de análisis (curva azul gruesa), presentando su máximo en $5.44 \times 10^7 \text{ mm}^3$ cuando $R_l = 200 \text{ mm}$. En el caso de la estrategia basada en la variación de H , el espacio de trabajo global tiende a aumentar significativamente en la medida que aumenta este parámetro (curva roja gruesa), alcanzando su máximo en $6.59 \times 10^7 \text{ mm}^3$ cuando $H = 350 \text{ mm}$. Finalmente, en el caso de la estrategia de variación simultánea de R_l y H , el espacio de trabajo global también tiende a aumentar en la medida que el eslabón de reconfiguración se mueve de -90 a 90 grados, alcanzando su máximo en $6.79 \times 10^7 \text{ mm}^3$ cuando $\beta = 70$ grados. Debido a que el máximo espacio de trabajo global se obtiene mediante la estrategia de reconfiguración simultánea de R_l y H , es dicha estrategia la que se selecciona como base para la reconfiguración del robot. En la Fig. 5 se muestra el espacio de trabajo global del robot producido por la estrategia de reconfiguración basada en la variación simultánea de R_l y H .

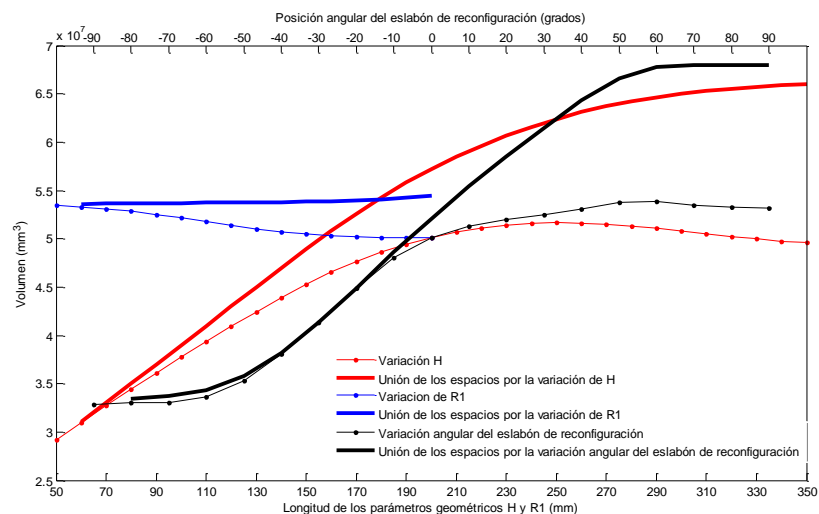


Fig. 4. Comportamiento del espacio de trabajo del robot frente a tres estrategias de reconfiguración.

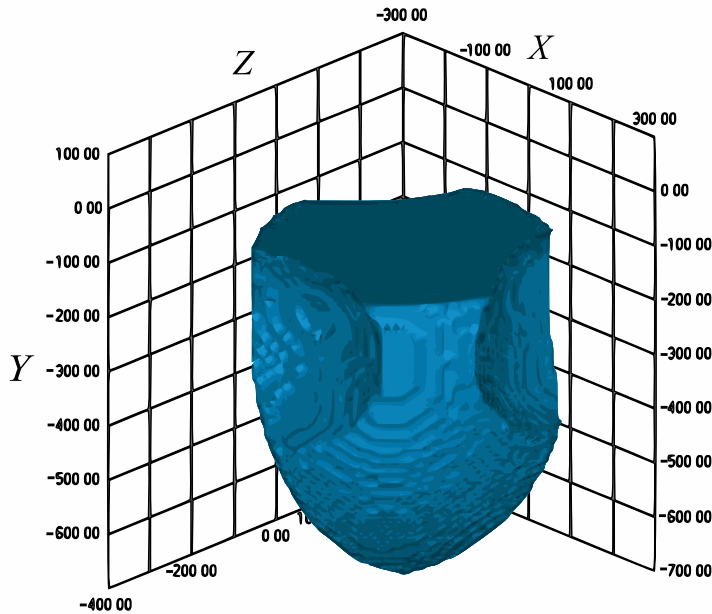


Fig. 5. Visualización 3D del espacio global de trabajo bajo la estrategia de reconfiguración basada en la variación simultánea de R_l y H .

Para estimar el volumen del espacio de trabajo del robot dada una determinada configuración perteneciente a cada una de las tres estrategias evaluadas, se implementó el método de discretización. En este método un espacio más grande que el espacio de trabajo del robot es discretizado uniformemente en una serie de puntos, de manera que aquellos puntos que satisfagan el modelo inverso de posición del robot son considerados como pertenecientes a su espacio de trabajo. El desarrollo del modelo inverso del robot no es un tópico de interés en este trabajo y por ello no será abordado. Por otro lado, es importante mencionar que para la evaluación del espacio de trabajo generado por la estrategia de reconfiguración seleccionada, se consideró $R_f = 50$ mm y $R_r = 150$ mm (Fig. 3). Lo anterior con el propósito de que cuando $\beta = 0$ se cumpla que $R_l = 200$ mm, lo que corresponde a la configuración del robot sin reconfigurar (Tabla 1).

5. Propuesta de diseño conceptual

Para que el esquema de reconfiguración seleccionado implique la inclusión de solamente un grado de libertad al sistema mecánico, el posicionamiento angular de los tres eslabones de reconfiguración debe ser idéntico y simultáneo, de esta manera no se intensifica drásticamente el problema de redundancia cinemática. La redundancia cinemática es entendida como el hecho de que el modelo cinemático inverso del manipulador tiene infinitas soluciones para una misma pose.

Existen muchos mecanismos capaces de generar el movimiento deseado en el eslabón de reconfiguración a través de un único grado de libertad. Uno de ellos y quizá el más estudiado y sencillo de implementar, es el mecanismo Manivela-Biela-Corredera. En la Fig. 6 se presenta una propuesta de diseño conceptual para el robot paralelo reconfigurable. Dicha propuesta está basada en la incorporación de un mecanismo que está compuesto por tres sub-mecanismos tipo Manivela-Biela-Corredera que son accionados por un único actuador. Es importante mencionar que este mecanismo de reconfiguración es parte de la solicitud de patente (MX/a/2013/006781).

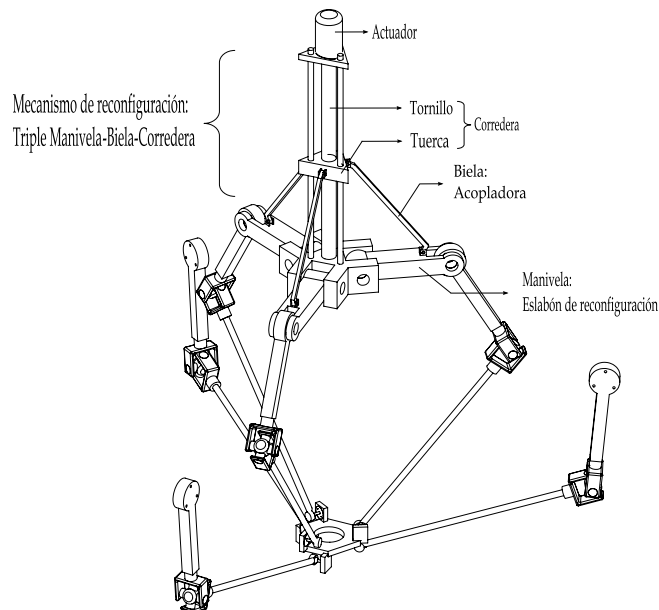


Fig. 6. Propuesta de diseño conceptual para el robot paralelo reconfigurable.

Cuando el actuador ubicado en la parte superior del mecanismo de reconfiguración es accionado en un sentido u otro, se genera el giro de un tornillo que hace que una tuerca se desplace verticalmente hacia arriba o hacia abajo. Esta tuerca está conectada a una barra acopladora, última que está conectada a su vez al eslabón de reconfiguración, de manera que cuando la tuerca sube o baja, el eslabón de reconfiguración realiza el movimiento de balancín deseado.

6. Conclusiones

Se presentó el diseño conceptual de un robot paralelo reconfigurable basado en un esquema de geometría variable. La estrategia de reconfiguración seleccionada se fundamentó en el cumplimiento de una serie de requerimientos técnicos, en su mayoría relacionados con la fácil y adecuada implementación de la estrategia de reconfiguración sobre el prototipo tomado como modelo base, el cual es un manipulador paralelo de 6 GDL que actualmente se encuentra en proceso de patentamiento ante el IMPI, razón por la cual no se entró en muchos detalles de su movilidad y comportamiento cinemático.

Existe mucho trabajo a desarrollar a partir del diseño propuesto: el diseño a detalle, el análisis cinemático y dinámico del prototipo, y el desarrollo de una estrategia de optimización que permita resolver la redundancia cinemática inducida debido a la reconfiguración. Además resulta importante evaluar el efecto positivo que genera la reconfiguración más allá de un incremento en el espacio de trabajo del robot, por ejemplo estudiar el escape de configuraciones singulares y una potencial mejora en el desempeño cinetostático del robot.

Referencias

- [1] El Maraghy-Hoda A. *“Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems”*, Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer, London, 2009.
- [2] Zhang D., Shi Q. *“Novel Design and Analysis of a Reconfigurable Parallel Manipulator Using Variable Geometry Approach”*, *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 124: 447-457, 2012.
- [3] Guilin Y., I-Ming C., Wee K., Song H. *“Kinematic Design of Modular Reconfigurable in-Parallel Robots”*, *Autonomous Robots*, 10: 83-89, 2001.

- [4] Brisán C. “*Designing Aspects of a Special Class of Reconfigurable Parallel Robots*”, *Innovative Algorithms and Techniques in Automation, Industrial Electronics and Telecommunications*, 101-106, 2007.
- [5] Gogu G. “*Isogliden-TaRb: A Family of up to Five Axes Reconfigurable and Maximally Regular Parallel Kinematic Machines*”, *International Conference on Smart Machining Systems*, Gaithersburg, 2007.
- [6] Haage M., Dressler I., Robertsson A., Nilsson K., Brogardh T., Johanson R. “*Reconfigurable Parallel Kinematic Manipulator for Flexible Manufacturing*”, *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 145-150, Moscow, Russia, 2009.
- [7] Xi F., Li Y., Wang H. “*Module-Based Method for Design and Analysis of Reconfigurable Parallel Robots*”, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 6: 151-159, 2011.
- [8] Bande P., Seibt M., Uhlmann E., Saha S., Rao P. “*Kinematics Analyses of Dodekapod*”, *Mechanism and Machine Theory*, 40: 740-756, 2005.
- [9] Ji Z., Song P. “*Design of a Reconfigurable Platform Manipulator*”. *Journal of Field Robotics*, 15: 341-346, 1998.