

HERRAMIENTAS PARA LA SIMULACIÓN DE PLATAFORMAS PARALELAS USADAS COMO ROBOTS TREPADORES

M. Almonacid, R. Saltarén, O. Reinoso, N. García, L. M. Jiménez
Universidad Miguel Hernández
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales, Campus de Elche
Avda. del Ferrocarril s/n 03202 Elche (Alicante) España
miguel.almonacid@umh.es

Resumen

Se presenta en este informe una serie de herramientas de dinámica computacional desarrolladas con el fin de analizar el comportamiento cinemático y dinámico de plataformas Stewart, utilizadas como robots trepadores. Estas herramientas se engloban dentro de un proyecto de simulación de entornos virtuales que permita el análisis y diseño de este tipo de estructuras y su interacción con el entorno, así como la estudio de diversas estrategias de control y el guiado sensorial del robot.

Palabras Clave: Robots Trepadores, Robots Paralelos, Simulación Virtual, Dinámica Computacional.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años han aparecido numerosos proyectos de investigación relacionados con disciplinas de simulación virtual. Una correcta simulación dinámica es necesaria como primer paso para la obtención de herramientas capaces de ser utilizadas para el análisis y diseño de robots. Las metas perseguidas con estos simuladores son entre otras la experimentación en sistemas teleoperados, la planificación de trayectorias, el correcto diseño de entornos de trabajo, tareas de entrenamiento y aprendizaje, etc.

Paralelamente, se investiga el uso de plataformas paralelas como robots trepadores considerando la gran capacidad de carga que poseen este tipo de estructuras mecánicas y su habilidad para evolucionar en el espacio de trabajo [6]. Las plataformas paralelas presentan las siguientes ventajas, que las hacen especialmente aptas para operar como robots paralelos:

- Los accionamientos de potencia conectan directamente la base del robot, al efector final. Debido a esto, los accionamientos de potencia sirven de elementos estructurales y actúan de

manera simultánea, lo que les da la capacidad de manipular cargas muy superiores a su propio peso

- Las estructuras paralelas son mecanismos que ofrecen una alta rigidez, con bajo peso y elevadas velocidades de operación, en comparación con cualquier otro tipo de estructura robótica
- Para posicionarse y orientarse en el espacio de la tarea, las estructuras paralelas requieren de seis grados de libertad. Al emplear todos los grados de libertad para su desplazamiento, los robots trepadores propuestos usan un mínimo número de accionamientos de potencia, en comparación con otros tipos de robots trepadores

En este informe se presentan una serie de herramientas realizadas en MATLAB para el análisis de plataformas paralelas, como la utilizada en el proyecto TREPA [7]. Los resultados obtenidos han sido comparados con análisis realizados con el paquete de simulación dinámica de ADAMS.

2 MARCO TEÓRICO PARA LAS PLATAFORMAS PARALELAS RRPS

Los tipos de robots que se estudian en este artículo, están basados en una plataforma paralela de seis grados de libertad [1], con cadena cinemática del tipo **RRPS** (donde los grados de libertad **RR** corresponden a una articulación universal, **P** es un grado de libertad prismático que corresponde al accionamiento de potencia lineal y **S** es una junta esférica que une el actuador lineal con el efector final.

2.1 Solución cinemática inversa de una plataforma RRPS

La solución cinemática inversa que se calcula a partir de la posición y orientación del efector final, permite calcular las variables de comando necesarias para cumplir con una planificación de trayectorias programada.

El modelo geométrico inverso de una plataforma RRPS, consiste en establecer los valores de las variables articulares de la cadena cinemática en función de la configuración del efector final. El planteamiento de la solución se puede realizar fácilmente a partir de la siguiente descripción vectorial en coordenadas generalizadas.

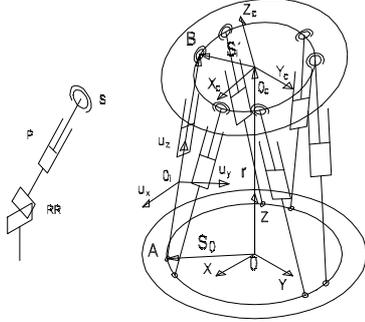


Figura 1: Estructura general de un manipulador paralelo de 6 grados de libertad

$$r_{ABi} = r + A_c s_i - s_0 \quad (1)$$

Donde 0 es el origen del sistema de referencia de la base, 0_c es el origen del sistema de referencia del centro del efector final. El vector de coordenadas generalizadas del centro del efector final es: $q_c = [r, \psi_c, \alpha_c, \phi_c]^T$, A_c es la matriz de rotación 313 de Euler, s_i y s_0 , son vectores relativos al sistema 0_c y 0 respectivamente. Los vectores r_{ABi} , son las variables articulares que se calculan a partir de la solución inversa, cuya magnitud da la configuración de los accionamientos lineales de potencia.

Con base en la norma del vector r_{ABi} , es posible determinar los ángulos ψ_i, α_i, ϕ_i del vector de coordenadas generalizadas $q_i = [r_{ABi}, \psi_i, \alpha_i, \phi_i]^T$. Para estos efectos, por ejemplo, se fija un sistema de referencia 0_i con el eje u_z alineado a lo largo del vector unitario de la norma de r_{ABi} como se muestra en la figura-1, por lo que:

$$u_z = \frac{r_{ABi}}{\|r_{ABi}\|} \quad (2)$$

$$u_x = \frac{u_z \times S_0}{\|u_z \times S_0\|} \quad (3)$$

$$u_y = u_z \times u_x \quad (4)$$

A partir de estos vectores unitarios se puede formar la matriz de cosenos directores $A_i = [u_x, u_y, u_z]$ a

partir de la cual se determinan los ángulos ψ_i, α_i, ϕ_i , ó los parámetros de Euler: $P_i = [e_0^i, e_1^i, e_2^i, e_3^i]$ para la matriz $A_i = (2e_0^2 - 1)I + 2(e^T e + e_0 \tilde{e})$.

2.2 Modelo numérico para la solución cinemática directa

La cinemática directa de una plataforma RRPS, estudia las relaciones para pasar de las variables de comando de los accionamientos lineales a la postura resultante del efector final.

Existen en la literatura varios métodos para el cálculo geométrico de la cinemática directa de plataformas paralelas de 6 grados de libertad, algunos de estos métodos permiten hallar las soluciones posibles a través del uso de polinomios que resultan del modelado geométrico de las cadenas cinemáticas de la plataforma.

En esta sección se expondrá un método numérico basado en la estimación inicial del vector de coordenadas generalizadas q_i . En general una plataforma paralela RRPS, de 6 DOF esta formada por 12 eslabones que forman los accionamientos lineales y dos anillos. Cada par de los eslabones anteriores, están unidos entre sí por un junta prismática, y a su vez en cada uno de sus extremos están conectados a la base y al efector final a través de una articulación esférica y una articulación universal. El vector de coordenadas generalizadas por lo tanto se representa como: $q = [q_1, q_2, q_3,$

$\dots, q_{13}]_{91 \times 1}^T$ donde q_1 es el sistema de coordenadas generalizadas del efector final, y q_2, q_3, \dots, q_{13} corresponden al conjunto de coordenadas generalizadas asignadas a los pares de eslabones que forman los accionamientos lineales. En general cada eslabón se describe por un sistema de coordenadas generalizadas donde: $q_i = [r_{ABi}, P_i]^T$ con $r_{ABi} = [x_i, y_i, z_i]$ y los parámetros de Euler: $P_i = [e_0^i, e_1^i, e_2^i, e_3^i]$

La descripción de la cadena cinemática de la plataforma RRPS, se basa en el vector de restricciones:

$$f(q, t) = \begin{bmatrix} f^k(q) \\ f^D(q, t) \\ f^P(q) \end{bmatrix}_{91 \times 1} = 0; \quad (5)$$

Donde $f^k(q)_{72 \times 1} = 0$ Es el vector de las 72 restricciones holonómicas impuestas por las juntas prismáticas, esféricas y universales. $f^D(q, t)_{6 \times 1} = 0$

es un vector de 6 restricciones impuestas por los accionamientos, que en este caso son función de las variables articulares de comando para las cuales se quiere calcular la cinemática directa. $\mathbf{f}^p(q)_{13 \times 1}$ es un vector de 13 restricciones para la normalización de los parámetros de Euler.

2.2.1 Cálculo numérico de la solución cinemática

Como se mencionaba antes, para calcular la solución cinemática directa se parte de un vector de coordenadas generalizadas aproximado q_i , y los valores de los desplazamientos $C_{ij}(t)$ (que para el caso de la solución cinemática directa depende únicamente de la variable de comando). Para estos efectos es común usar el método iterativo de Newton-Raphson.

$$\mathbf{f}_q \Delta q^{(j)} = -\mathbf{f}(q^{(j)}, t) \quad (6)$$

$$q^{j+1} = q^{(j)} + \Delta q^{(j)} \quad (7)$$

donde \mathbf{f}_q es el jacobiano del vector de restricciones descrito en (5) y $q^{(j+1)}$ es la solución cinemática directa, cuando $\Delta q^{(j)} \approx 0$.

En la configuración inferior de la figura 2 se muestra una representación de la solución cinemática directa calculada con los métodos numéricos explicados en esta sección. Para efectos de este estudio la plataforma superior del robot parte de la posición indicada en la configuración superior y se desplaza hasta un punto final como se indica (un desplazamiento de 400 mm y una rotación de 45° en x). Para ello se ha realizado una planificación de trayectorias dividiendo el desplazamiento total (calculado con la cinemática inversa) en varios segmentos iguales, con el fin de hallar la configuración del robot que deberá cumplir al pasar por cada tramo de la trayectoria.

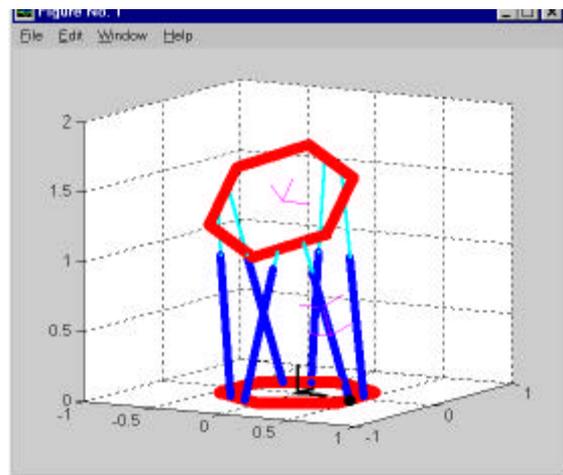
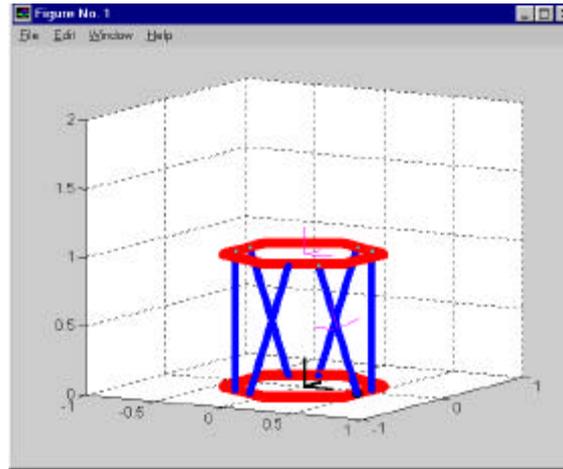


Figura 2: Cinemática directa de una plataforma paralela.

En la siguiente figura se muestran algunos resultados de simulaciones realizadas para una trayectoria de 800 mm de desplazamiento en los actuadores lineales (discretizada en 11 intervalos) del robot trepador.

Para dar una idea del coste computacional de esta simulación, el gráfico siguiente muestra el número de operaciones de coma flotante (Flops) para una simulación. En todos los casos se obtuvo una única solución para la cinemática directa.

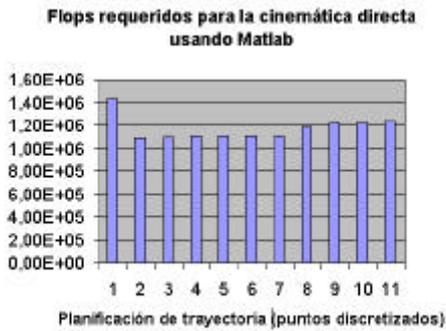


Figura 3: Flops requeridos para una simulación de la cinemática directa.

2.3 Dinámica multicuerpo de las plataformas RRPS

La dinámica de una plataforma RRPS, se puede modelar y calcular numéricamente a partir de la siguiente ecuación matricial diferencial algebraica DAE, como se ilustra en: Nkravesh[3], Haug[2]. Debido a que las velocidades y aceleraciones no son integrables, las expresiones generales de la dinámica, para la solución del problema dinámico directo, se deben escribir en términos de los parámetros de Euler.

$$\begin{bmatrix} M & 0 & \mathbf{f}_r^T & 0 \\ 0 & 4\mathbf{G}^T \mathbf{J} \mathbf{G} & \mathbf{f}_p^T & \mathbf{f}_p^{pT} \\ \mathbf{f}_r & \mathbf{f}_p & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{f}_p^p & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{I}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^A \\ 2\mathbf{G}^T \mathbf{n}^A + 8\dot{\mathbf{G}}^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{G}} \mathbf{p} \\ \mathbf{g} \\ \mathbf{g}^p \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde: \mathbf{J} y M son las matrices de inercia y de masa de cada uno de los nb cuerpos que forman el sistema, $\mathbf{G}_{3 \times 4}$ son matrices que se obtiene a partir de las identidades de los parámetros de Euler, \mathbf{p} son los vectores de los parámetros de Euler de cada uno de los sistemas q_i de coordenadas generalizadas, \mathbf{F}^A son las fuerzas externas aplicadas, \mathbf{g} son los términos de las aceleraciones y \mathbf{I} son los vectores de los multiplicadores de Lagrange, que físicamente representan las fuerzas de restricción entre los pares de cuerpos.

La solución del problema dinámico inverso se obtiene resolviendo la ecuación 8, en términos de los multiplicadores de Lagrange y transformando estos parámetros a los sistemas de referencia de cada cuerpo, para obtener las fuerzas de reacción y los pares o fuerzas requeridos en los accionamientos de potencia para cumplir con la planificación de trayectorias.

La solución del problema dinámico directo es más compleja. Para estos efectos se debe resolver la ecuación diferencial-algebraica anterior en consideración de las condiciones iniciales, despejando los términos de las aceleraciones y aplicando algoritmos de integración numérica especiales para este tipo de ecuaciones mixtas diferenciales-algebraicas, con el fin de obtener la velocidad y posición que deben satisfacer además las siguientes ecuaciones de restricción:

$$\mathbf{f}(r, p, t) = 0, \mathbf{f}^p = 0 \text{ y } \mathbf{f}_r \dot{r} + \mathbf{f}_p \dot{w} = 0 \quad (9)$$

Para la resolución de la cinemática directa se ha desarrollado un simulador en MATLAB, utilizando las ecuaciones anteriores de la dinámica multicuerpo.

La figura 4 muestra una animación del modelo obtenida para una fuerza constante, aplicada sobre cada actuador durante un periodo de 0.5 segundos. Para resolver el problema de integración se utilizó el Método del Algoritmo Híbrido [4]

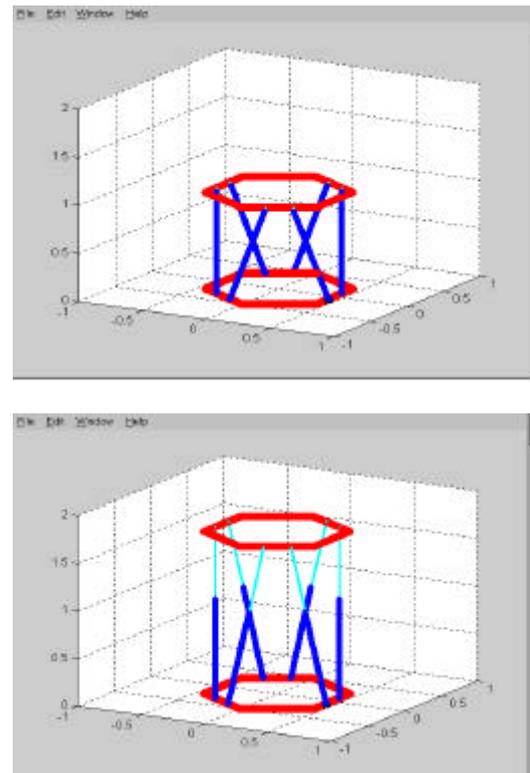


Figura 4: Animación para la simulación de la dinámica directa.

En la figura 5 se muestran los flops para la simulación de la dinámica directa mostrada en la figura 4.

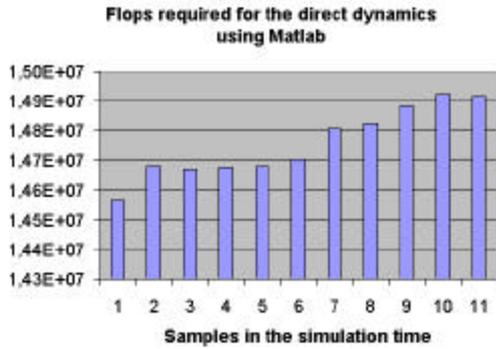


Figura 5: Flops para la simulación de la dinámica directa.

3 CONCLUSIONES

En este informe se han presentado unas herramientas desarrolladas en MATLAB y basadas en la dinámica multicuerpo que tratan de resolver los complejos problemas numéricos que se plantean en la resolución de la cinemática y dinámica directa de plataformas paralelas. Se pretende que estos desarrollos, junto con otras herramientas desarrolladas en C++ en Saltarén [5] puedan usarse para la simulación de entornos virtuales enfocados a validar en ellos estrategias de control y de teleoperación.

Agradecimientos

El proyecto TREPA está siendo desarrollado gracias al apoyo de la Asociación de Palmereros de Elche y las empresas Lar Meridional, S.L. y Tamegar, S.L., seleccionadas para la fabricación del primer prototipo.

Referencias

- [1] Aracil, R., (1999) "TREPA, Parallel Climbing Robot for Maintenance of Palm Trees and Large Structures", *2nd International Workshop & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR)*.
- [2] Haug, E. J., (1989) *Computer-Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon, USA.
- [3] Nikravesh, P. E., (1988) *Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*, Prentice-Hall, USA.
- [4] Park, T., (1986) "A Hybrid Constraint Stabilization-Generalized Coordinate Partitioning Method for Mach. Dyn.", *J. of Mech., Trans., and Automation in Design*, Vol. 108, No. 2, pp. 211-216.
- [5] Saltarén, R., (1996) *Herramientas para el Modelado y Diseño Paramétrico de Robots Basadas en la Dinámica Multicuerpo*, PhD tesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- [6] Saltarén, R., (1999) "Modelling, Simulation and Conception of Parallel Climbing robots for Construction and Service", *2nd International Workshop & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR)*.
- [7] Saltarén, R., (1999) "Parallel Climbing Robot for Construction, Inspection and Maintenance", *International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*.