

ARMS DESIGN OF A TELEOPERATED SERIAL - PARALLEL ROBOT
DISEÑO DE LOS BRAZOS DE UN ROBOT TELEOPERADO HIBRIDO
SERIAL - PARALELO

MSc Cesar A. Peña*, PhD. R. Aracil, PhD. R. Saltaren****

* **Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Tel.: 57-7-5685303 Ext. 164, Fax: 57-7-5685303.
E-mail: cesarapc@unipamplona.edu.co

** **Universidad Politécnica de Madrid**
Calle José Gutiérrez Abascal 2, Madrid, España
E-mail: {aracil, rsaltaren}@etsii.upm.es

Abstract: This paper presents the design of a two serial arms architecture whose will be locate in a Stewart-Gough parallel platform conforming a serial – parallel hybrid robot, allow the tele-operated object manipulation. The structure selection, its design and the control strategies to be implemented was described.

Resumen: En este artículo se presenta el diseño de una arquitectura para dos brazos seriales los cuales se van a ubicar en una plataforma paralela Stewart-Gough formando un robot hibrido serial-paralelo, permitiéndole la manipulación teleoperada de objetos. Se describe la selección de la estructura, el diseño de la misma y las directrices del control a implementar.

Keywords: Robotic manipulators, Robot arms, Telerobotics, Telemanipulation, Hybrid.

1. INTRODUCCION

Los robots paralelos han demostrado en las últimas décadas que son máquinas que ofrecen unas características ideales para desarrollar tareas que requieran de una gran precisión, rigidez y/o alta velocidad. Debido a su estructura estos tienen una relación de capacidad de carga vs peso bastante elevada con respecto a los robots seriales lo que les permite desarrollar grandes fuerzas con actuadores relativamente pequeños, esto se debe a que las fuerzas se distribuyen de una manera más homogénea entre todos sus actuadores.

La Universidad Politécnica de Madrid ha venido desarrollando desde hace varios años diversos robots entre los cuales se encuentran varios que

poseen estructura paralela. Entre ellos se encuentran los robots submarinos REMO I, II los robot trepadores TREPA I, II. Estos robots han demostrado tener unas características propicias para moverse en sus entornos de trabajo.

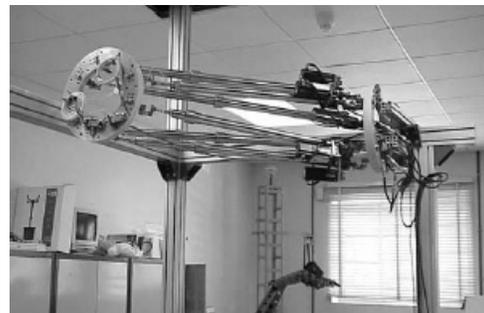


Fig. 1: Robot TREPA II

Aunque algunas de las tareas que desempeñan estos robots es la inspección, estos robots gozaran de una mayor utilidad cuando tengan la capacidad de interactuar con su entorno. Por esta razón uno de los objetivos del grupo de robots y máquinas inteligentes es desarrollar brazos manipuladores que les doten a estos robots la capacidad realizar tareas que un operador les imponga remotamente.

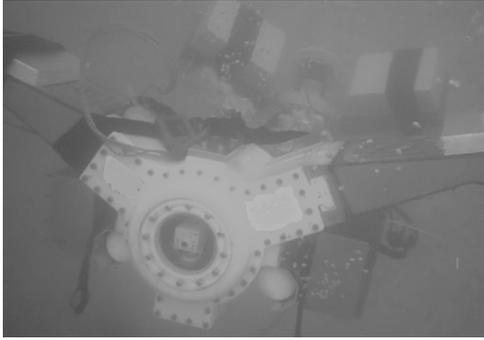


Fig. 2. Robot REMO I

En la figura 2 se aprecia al robot REMO I realizando una tarea de inspección. En la figura 3 se aprecia la el esquema de la nueva versión del robot submarino la cual contara con los brazos manipuladores.

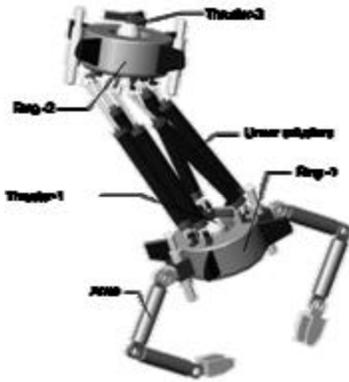


Fig. 3: Estructura Robot REMO II

Con el fin de abordar el desarrollo de estos brazos teleoperados se realizo un estudio previo de robots manipuladores sobre bases móviles en este caso una plataforma paralela. Se comenzó con el estudio de una estructura compuesta por dos brazos seriales cada una de tres grados de libertad que sumados con los seis grados de libertad de la plataforma de Stewart Gough le permitirán posicionar y orientar ambos efectores finales simultáneamente.

En este paper se pretende ilustrar el desarrollo de los dos brazos manipuladores los cuales podrán interactuar con objetos livianos generando una

estructura con los mecanismos adecuados para la implementación de algoritmos de control en teleoperación.

La implementación de estos brazos se hará sobre el robot MINITREPA el cual es un robot en etapa de desarrollo que realizara tareas en la construcción de edificios elevados, evitando así riesgos para algunos trabajadores. El robot utilizara la estructura paralela para desplazarse hasta un punto deseado en el cual fijara su base permitiendo al anillo móvil situar correctamente los brazos para realizar la manipulación, este trabajo también generara algunas directrices para el posterior diseño de los manipuladores en la versión estanca para aplicarlas al robot submarino.

2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Tomando en cuenta que para manipular el efector final de un robot en el espacio es necesario contar con 6 grados de libertad (GDL), en una estructura con dos brazos se requiere un mínimo de 12 grados de libertad. La plataforma paralela Stewart-Gough cuenta con 6 grados de libertad que le permiten variar la posición y orientación de su anillo móvil por lo tanto la suma de los grados de libertad de los dos brazos debe ser por lo menos de 6.

Como uno de los objetivos en este proyecto es el aprovechamiento de manera significativa de los movimientos de la plataforma con el fin de obtener el mínimo de grados de libertad en los brazos, manteniendo un espacio de trabajo específico con las principales orientaciones en los extremos de los robots, se buscara una estructura con un máximo de 12 GDL.

El análisis de esta estructura híbrida se puede abordar desde diferentes puntos de vista. Uno es considerar la estructura como dos conjuntos formados por cada uno de los brazos y la plataforma paralela tal como se ilustra en la figura 4.

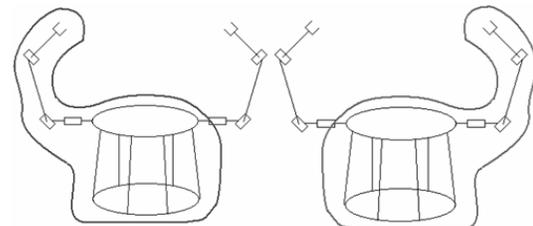


Fig. 4: Conjuntos brazo-plataforma

Siguiendo este análisis se puede observar claramente el gran acoplamiento producido en la plataforma paralela para cumplir las exigencias de cada uno de los brazos simultáneamente, por esta razón es necesario asegurar para todos los casos que las exigencias en posición y orientación de los dos brazos a la plataforma paralela sean viables.

Una posible solución es restringir las exigencias de cada uno de los brazos, esto se puede realizar dividiendo las tareas en posicionamiento y orientación de cada uno de los efectores finales, de tal modo que el brazo 1 controlara el cambio de posición de su efector final mientras la plataforma controlara su orientación y el brazo 2 controlara únicamente la orientación de su efector final mientras la plataforma controlara su posición. Esto se aprecia en el esquema de la figura 5.

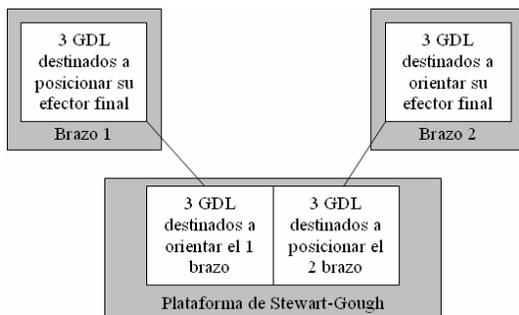


Fig. 5: Esquema de una posible solución

Una estructura que cumple este esquema es la que se aprecia en la figura 6 donde el brazo 1 es un robot cartesiano de 3 GDL y el brazo 2 es el equivalente a una muñeca esférica.

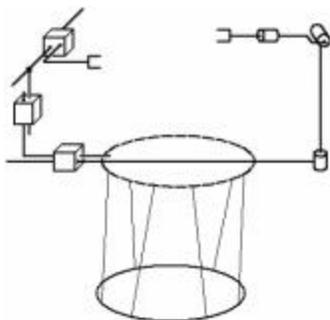


Fig. 6: Estructura con un brazo cartesiano y un brazo equivalente a una muñeca esférica

Otro punto de vista con el que se puede abordar el análisis de la estructura es suponer otros dos conjuntos. Uno formado por los dos brazos incluyendo el anillo móvil de la plataforma paralela y el otro formado solamente por la plataforma Stewart-Gough. El esquema se ilustra en la fig. 7.

Este análisis permite asumir que el conjunto formado por los dos brazos actuó como un robot estándar de 6 grados libertad el cual en vez de base tendrá otro efector final y la plataforma paralela asumirá el papel de eslabón entre dos de sus articulaciones controlado además su posición y orientación para cumplir los requerimientos de ambos brazos.

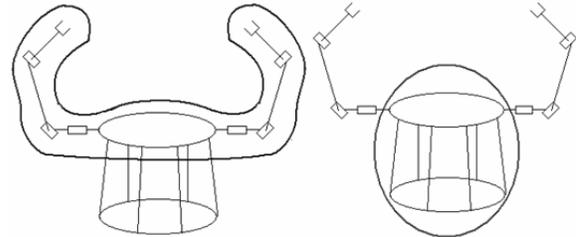


Fig. 7: Conjuntos brazo y plataforma

Al asumir el conjunto de los brazos como un robot serial se pueden crear diversas estructuras inspirándose en los robots estándar. Con este fin se decidió crear algunos criterios de diseño como el de ser capaz de bordear un objeto de un tamaño determinado, al igual que lograr la totalidad de orientaciones para un espacio de trabajo específico, etc. En la figura 8 se aprecian algunas estructuras de los brazos estudiadas.

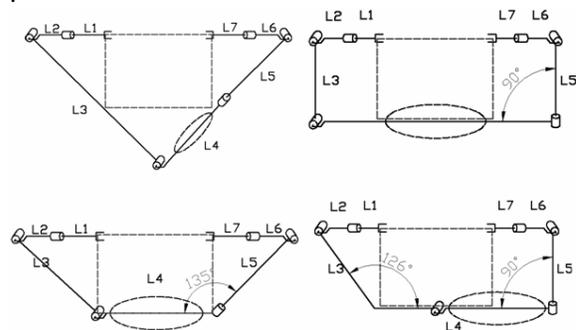


Fig. 8: Ejemplo de estructuras estudiadas.

Una vez se corroboraron las longitudes óptimas de los eslabones y los espacios de trabajo, satisfaciendo las restricciones de diseño se realizó el estudio del acoplamiento de los brazos y la plataforma, para esto fue necesario calcular el espacio de trabajo de la plataforma de Stewart-Gough donde se encontró que para orientación con bastante inclinación el espacio de trabajo se reducía de manera abrupta tal como se muestra en la figura 9 donde el espacio de trabajo para pequeñas orientaciones es relativamente grande mientras que para orientaciones mayores a 45° en alguno de los ejes se reduce considerablemente.

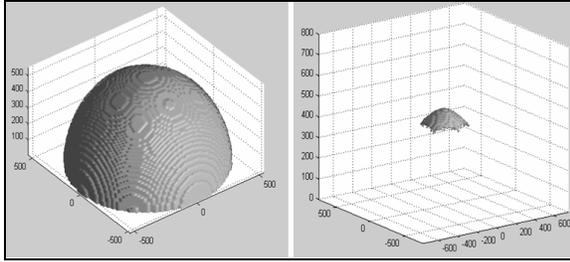


Fig. 9: Espacios de trabajo de la plataforma paralela para pequeñas y grandes orientaciones

Realizando simulaciones de algunas trayectorias para las estructuras anteriormente planteadas se detecto en continuas ocasiones que el eslabón correspondiente al efector final de la plataforma paralela requiere de grandes cambios de orientación, por esta razón y teniendo en cuenta las limitaciones que presenta la plataforma de Stewart-Gough con respecto a su espacio de trabajo para un amplio rango de orientaciones, se decidió modificar la estructura de los brazos de tal forma que alcance las principales orientaciones usadas en manipulación sin requerir grandes orientaciones en el efector final de la plataforma.

En la figura 10 se ilustra la estructura del robot propuesto donde cada uno de los brazos posee tres articulaciones y tiene la característica de no exigir grandes cambios en la orientación del efector final de la plataforma de Stewart-Gough.

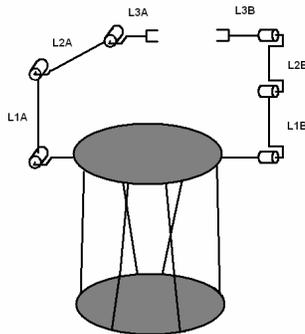


Fig. 10: Estructura del robot propuesto

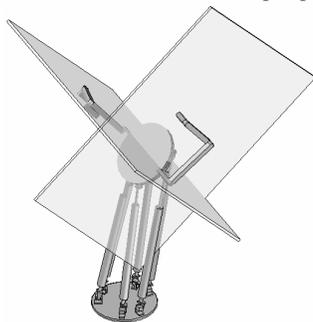


Fig. 11: Orientación de los planos de trabajo de los brazos por la Plataforma SG.

Los dos brazos poseen articulaciones cuyos ejes son paralelos, lo que implica que el espacio de trabajo esta contenido en un plano cuando la plataforma se encuentra paralizada. Debe notarse que el efector final del primer brazo es perpendicular al eje de su ultima articulación mientras que en el brazo dos coincide con el eje de la articulación final, por lo tanto teniendo en cuenta que los dos espacios de trabajo de los brazos son perpendiculares entre si dan como resultado la capacidad de lograr un gran número de orientaciones en ambos efectores finales simultáneamente al controlar la posición y orientación de la plataforma.

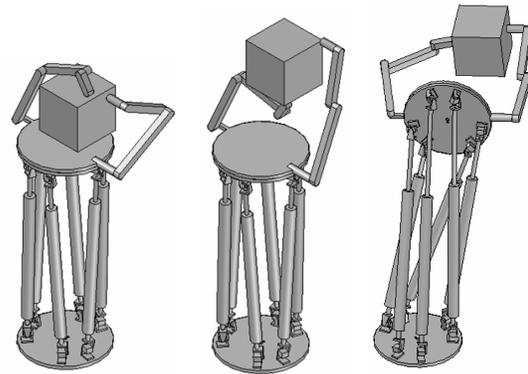


Fig. 12: Ejemplo de manipulación.

En la figura 12 se aprecia un ejemplo en la manipulación de un objeto alcanzando diversas posiciones y orientaciones en los efectores finales de los brazos al controlarlos paralelamente con la plataforma.

3. DISEÑO DE LOS BRAZOS

Teniendo en cuenta que una de las principales desventajas de los robots seriales con actuadores eléctricos es su relación de carga vs peso se idearon unos brazos en los cuales sus motores se ubicaran en la base, dándole la característica de usar unos motores más pequeños para lograr una misma fuerza determinada en los efectores finales, esto se debe a que el peso de las articulaciones se reduce significativamente.

Para reducir aun más el peso de los eslabones de los brazos se diseñaron por medio de chapas de acero inoxidable las cuales son delgadas y poseen una serie de agujeros. Estas chapas se fijan por medio de conectores de aluminio. También se utilizaron casquillos de plástico autolubrificante evitando el uso de rodamientos en las dos últimas articulaciones.

Para transmitir el movimiento a cada una de las articulaciones desde los motores ubicados en la base se utilizan correas dentadas de poliuretano con fibras de acero las cuales brindan la característica de buen sincronismo lo cual es esencial para el control del robot.



Fig. 13: Brazo B de la estructura híbrida.

En la figura 13 y 14 se ilustran los brazos B y A respectivamente donde se puede apreciar claramente la diferencia en la orientación del último eslabón donde se fijaran sus efectores finales.



Fig. 14: Brazo A de la estructura híbrida.

Con el fin de garantizar una rigidez adecuada y obtener piezas delgadas y livianas evitando la deformación de alguna de las mismas, se realizó un análisis estructural por elementos finitos generando la distribución de esfuerzos ante la aplicación de fuerzas externas.

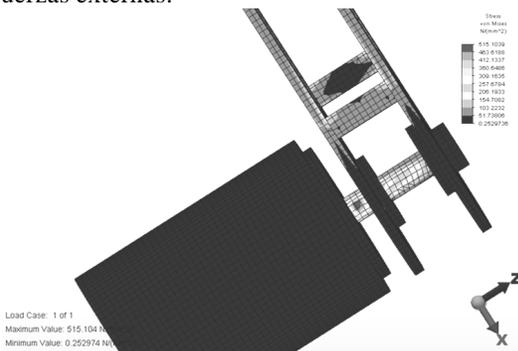


Fig. 15: Análisis por elementos finitos del extremo del robot

En la figura 15 se aprecia como ejemplo, uno de los modelos previos en el diseño del robot donde se obtuvo que el eje de la última articulación estuviera siendo sometida a esfuerzos un poco elevados lo cual originaría deformaciones del mismo. En la figura 16 se ilustra la distribución de esfuerzos de la misma región del robot donde se distingue claramente un mayor diámetro en el eje de la articulación con el fin de reforzar la estructura. Siguiendo esta metodología se realizaron los refuerzos estructurales de las piezas de los dos brazos.

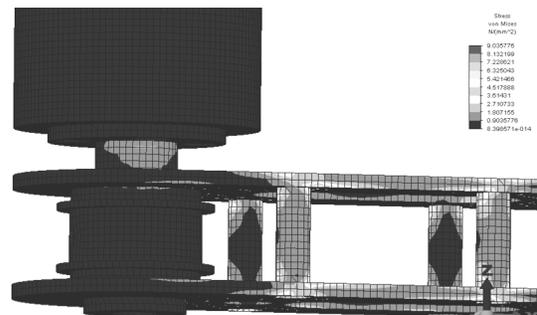


Fig. 16: Análisis por elementos finitos del extremo del robot reforzado

Con el fin de calcular los motores de cada una de las articulaciones se realizó el modelo dinámico de cada uno de los brazos usando el método de Lagrange-Euler y el de Newton-Euler como corroboración. Para estos modelos se tuvieron en cuenta los parámetros del robot tales como inercia y peso, estimados por medio del CAD en el diseño del robot lo cual brindará un gran nivel de aproximación debido a que se tiene en cuenta todas las piezas incluyendo los objetos de sujeción tales como tornillos, tuercas y arandelas.

Con el modelo dinámico del robot se crearon las simulaciones pertinentes para el cálculo de los motores ubicando el robot en la configuración donde se requirieran los mayores pares para cada una de las articulaciones y se aplicaba un perfil de velocidades y aceleraciones determinado dando como resultado los pares exigidos a los motores durante la ejecución de dichos perfiles.

En la figura 17 se ilustra el diagrama realizado en simulink para el cálculo de los pares en las articulaciones y en la figura 18 se aprecian los resultados correspondientes.

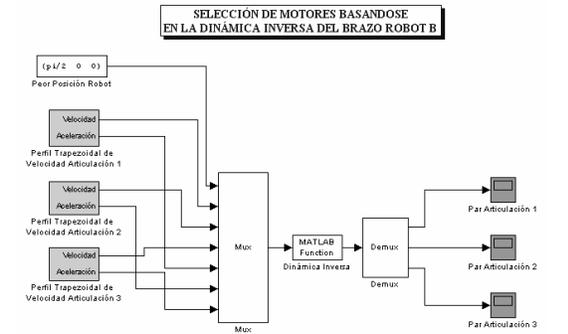


Fig. 17: Diagrama de bloques de la simulación para el cálculo de los pares exigidos en las articulaciones.

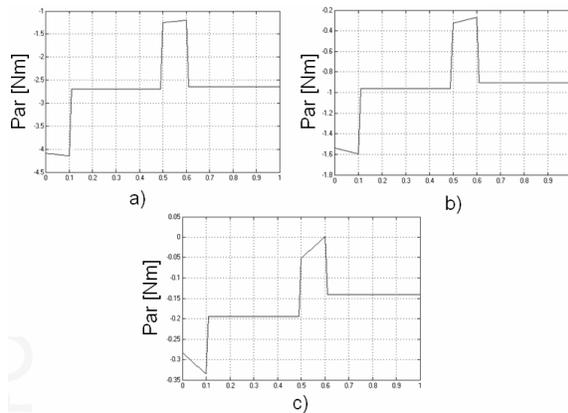


Fig. 18: Par articulación brazo B a) articulación 1 b) Articulación 2 c) Articulación 3

Con los pares requeridos en cada una de las articulaciones, teniendo en cuenta los factores de transmisión correspondiente a los sistemas de transmisión de movimiento al igual que su eficiencia y considerando un factor de seguridad de 1.5 se seleccionaron los motores para trabajar en una zona segura según los datos del fabricante. En la figura 19 se aprecia el prototipo virtual del robot incluyendo los motores.



Fig. 19: Prototipo virtual del robot

Utilizando el modelo dinámico directo de cada uno de los brazos se realizó una sintonización de los controladores de cada uno de los motores de las articulaciones utilizando el método de Ziegler-Nichols. En la figura 20 se ilustra un modelo de control desacoplado para uno de los brazos utilizando esta sintonización.

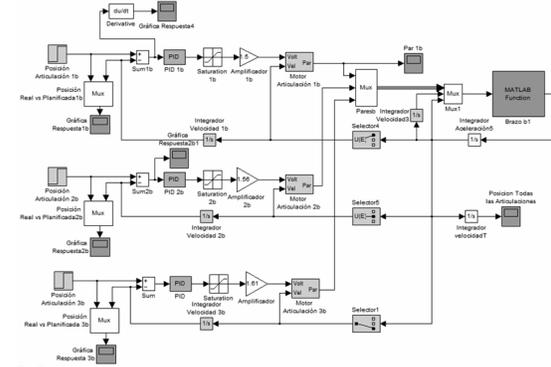


Fig. 20: Diagrama del control desacoplado del brazo B usando el modelo de dinámica directa

En la figura 21 se ilustran los resultados obtenidos ante un escalón en cada una de sus entradas, donde se aprecia un bajo acoplamiento entre las articulaciones tal como se esperaba debido a las altas relaciones de los reductores de los motores.

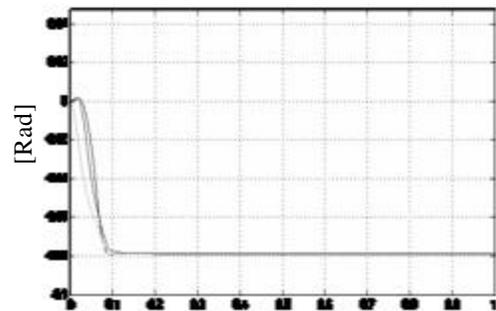


Fig. 21: Evolución de las coordenadas articulares ante un escalón en cada una de sus entradas.

4. TRABAJO FUTURO

Con el fin de desarrollar algoritmos avanzados de control en teleoperación se está desarrollando en C++ una interfaz que controlara robot completo tal como se aprecia en la figura 21.

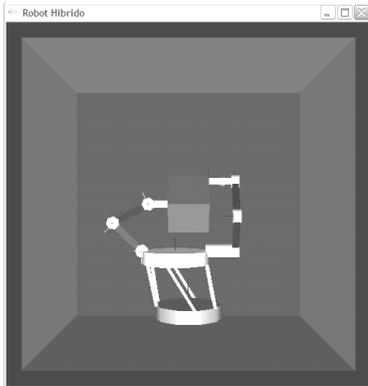


Fig. 22: Simulador del robot completo.

El control teleoperado del robot se realizara de diversos modos entre los cuales se encuentran: el control de cada uno de los efectores finales de los brazos utilizando 1 o 2 dispositivos hápticos que permiten la reflexión de fuerzas para lo cual el programa calcula las coordenadas articulares correspondientes de los brazos y la plataforma paralela a partir de la posición y orientación deseadas de los extremos de los brazos. Si se quiere también se podrá controlar el robot teniendo en cuenta solamente la posición y orientación deseada del objeto usando un solo dispositivo háptico.



Fig.23: Control teleoperado del robot por medio de dos dispositivos hápticos

Con los dispositivos hápticos el teleoperador podrá controlar el robot dentro de un espacio de trabajo útil detectando los límites por medio de fuerzas que le impiden salirse del mismo. Igualmente se reflejara al teleoperados las fuerzas correspondientes a colisiones entre las piezas del mismo robot o piezas externas con el fin de evitar sobrecargas u otro tipo de daños permitiendo una mejor manipulación.

5. CONCLUSIONES

Se desarrollo una estructura hibrida paralelo-serial que permite la orientación y el posicionamiento de dos efectores finales simultáneamente en un espejado de trabajo especializado en tareas de manipulación.

La estructura serial de los brazos desarrollada permite la manipulación de objetos de un tamaño determinado con pequeñas exigencias en orientación y posición del efector final de la plataforma de Stewart-Gough.

La transmisión de movimiento rotacional por correas dentadas brinda a los brazos la capacidad de centrar la mayoría de su peso en la base lo que permite la utilización de accionamientos de menor potencia y tamaño.

El análisis por elementos finitos es una buena herramienta para el estudio de las deformaciones del robot ante fuerzas externas con lo cual se pueden reforzarla estratégicamente la estructura con el fin de evitar las mismas.

La estructura diseñada permitirá y facilitara la implementación de algoritmos de control y teleoperación gracias a que se tienen todos los parámetros de su construcción.

REFERENCIAS

- Huang T, Hong Z, Mei, J and Chetwynd D. (2006). *Kinematic Calibration of the 3-DOF module of a 5 DOF Reconfigurable hybrid robot using a double-ball-bar system*. IEEE Proceeding. International conference on intelligent robots and systems, China, October.
- Kyung J, Han H and Ha Y. (2006). *Design of a hybrid serial-parallel robot for multi-tasking machining processes* IEEE. ICCAS International conference.
- Almonacid M, Saltaren R, Aracil R, and Reinoso O. (2003). *Motion planning of a climbing parallel robot*, IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 19, no. 3, pp. 485–489.