

# Implementación de una Plataforma Experimental para un Sistema de Teleoperación Robótica en Tiempo Real

**Julio C. TAFUR**  
Sección Electricidad y Electrónica  
Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura  
Pontificia Universidad Católica del Perú  
San Miguel, Lima, Lima 32, PERÚ

y

**César A. PEÑA**  
Departamento de Mecánica, Mecatrónica e Industrial.  
Universidad de Pamplona.  
Ciudadela Universitaria, Pamplona, COLOMBIA

y

**Cecilia GARCIA**  
Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales  
Centro de Automática y Robótica  
c/ José Gutiérrez Abascal 2, E-28006, Madrid, ESPAÑA

y

**Rafael ARACIL**  
Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales  
Centro de Automática y Robótica  
c/ José Gutiérrez Abascal 2, E-28006, Madrid, ESPAÑA

## RESUMEN

El desarrollo de este trabajo presenta la realización de una plataforma experimental, la cual permitirá investigar sobre una metodología para el diseño y análisis de un sistema teleoperado, considerando la dinámica no lineal del manipulador esclavo, así como el retardo en el canal de comunicación.

El trabajo ha sido desarrollado entre el laboratorio de Automática y Robótica (DISAM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Laboratorio de Manufactura del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

La estructura mecánica del brazo, así como los accionamientos eléctricos ha sido implementada. Se han desarrollado pruebas experimentales del Sistema de Teleoperación. La tarjeta PC104 (*embedded board*) ha sido configurada y puesta a punto, ésta comanda la interface de potencia y sensores de los motores DC de cada articulación del brazo.

Se ha desarrollado los drives para el manejo de los accionamientos del maestro y del esclavo: envío/recepción de datos de posición velocidad, aceleración y corriente a través de una red CAN. Así como los programas para la interconexión a través de una red LAN, del Sistema Operativo Windows y el Sistema Operativo en Tiempo Real - QNX.

**Palabras Clave:** Teleoperación, Robótica, Tiempo Real, Embedded board, QNX.

## 1. INTRODUCCION

El dispositivo teleoperador permite al operador humano realizar acciones mecánicas que usualmente son realizadas por brazos y manos humanas.

Así, los teleoperadores o el acto de teleoperación extienden las capacidades de manipulación de los brazos y manos humanas en ambientes remotos, físicamente hostiles o peligrosos.

Históricamente, los sistemas de teleoperación fueron desarrollados a mediados de 1940 para crear capacidades de manipulación de materiales altamente radioactivos. Los teleoperadores permitían al operador humano manejar material radioactivo desde ambientes de trabajo separados por una pared de un metro de espesor, las paredes de concreto absorben la radiación desde el ambiente radioactivo.

El desarrollo de los teleoperadores para la industria nuclear culminó con la introducción de sistemas bilaterales maestro-esclavo con reflexión de fuerza. En estos sistemas exitosos, el brazo del maestro está mecánicamente o eléctricamente acoplado en el lado remoto a un brazo geoméricamente idéntico o similar al brazo del maestro que es manipulado por un operador y sigue el movimiento del brazo del maestro [1].

Posteriormente las conexiones mecánicas fueron reemplazadas con servomotores eléctricos permitiendo una mayor distancia entre el sistema maestro y sistema esclavo.

La teleoperación robótica involucra la interacción entre un operador humano y un sistema robótico remoto a través de un canal de comunicación. La Figura 1, [2] permite ilustrar un sistema teleoperado. El mismo consta de una estación local en que se encuentra el operador humano, el manipulador local a través del cual envía los comandos al sitio remoto y además cuenta con un conjunto de dispositivos tales como televisores y monitores que le permiten ver la tarea remota. En el sitio remoto se encuentra el robot que realiza la tarea propiamente. Ambas estaciones están comunicadas por medio de un canal de comunicación que permite el flujo de la información en ambos sentidos.

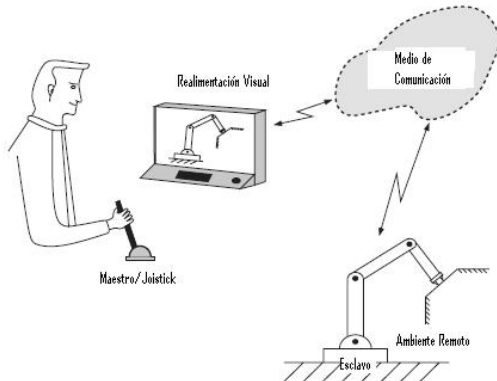


Fig. 1: Esquema General de un Sistema de Teleoperación

La Figura. 2 muestra el diagrama de bloques de un típico sistema teleoperado. En el diagrama se muestra los principales componentes de un sistema de teleoperación; la interacción con el operador humano por un lado y el entorno por el otro, la dinámica y los controladores del maestro y el esclavo, y se caracteriza el canal de comunicación mediante el retardo de transmisión  $T$ .

Los sistemas de Teleoperación se emplean en diferentes áreas entre las que se puede citar: son el manejo de materiales radioactivos y la exploración espacial y submarina, la medicina, la asistencia a personas minusválidas, el sector de servicios de mantenimiento eléctrico, entre otros. Existe un gran interés en el campo de la robótica por la operación en ambientes remotos mediante el uso de sistemas teleoperados.



Fig. 2: Diagrama de Bloques de un Sist. de Teloperación Típico

Existen varios esquemas de control propuestos en la literatura para tratar con problemas específicos en el campo de la robótica. En general el principal objetivo del sistema de teleoperación es ejecutar la tarea en un entorno remoto, mediante la presencia de un manipulador maestro y esclavo y prescindiendo del retardo de tiempo en el canal de comunicación entre el maestro y el esclavo

Los esquemas de control propuestos usan diferentes técnicas de control no lineales, tales como pasividad, control de modos deslizantes, control adaptable [3], [4], [5] las cuales permiten estabilizar el sistema maestro-esclavo cuando el canal de comunicación presenta retardos pequeños y el entorno es "soft". Sin embargo, en el diseño de los algoritmos de control se considera una dinámica lineal para el teleoperador y el efecto del retardo se analizan usando aproximaciones lineales, [2], [6]. El Departamento de Automática y robótica de la ETSII de 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, los robot trepadores TREPA I, II. Estos robots han demostrado tener unas características propicias para moverse en sus entornos trabajo [7].

El objetivo de este trabajo es la realización de una plataforma experimental, la cual permitirá investigar sobre una metodología para el diseño y análisis de un sistema teleoperado, considerando la dinámica no lineal del manipulador para el maestro y el esclavo, así como el retardo en el canal de comunicación.

El brazo de robot implementado se ubicara en el anillo móvil de una PLATAFORMA PARALELA (STEWART-GOUGH), permitiendo la manipulación teleoperada de objetos.

El trabajado ha sido desarrollado conjuntamente entre el laboratorio de Automática y Robótica (DISAM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Laboratorio de Manufactura del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Se aprovecha de manera significativa 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.

La estructura mecánica desarrollada es compacta y liviana.

## 2. METODOS Y MATERIALES

Los elementos de la plataforma experimental para el sistema de teleoperación robótica se describen a continuación.

### Tarjeta Embebida PC104

**Características Hardware:** El modelo TS-5600 es una *Single Board Computer* compacta, con todas las características de una computadora compatible, basada en el procesador AMD Elan520. Con una frecuencia de 133 MHz, es aproximadamente 10 veces más rápida que los productos basados en 386EX. La compatibilidad con la PC permite un rápido desarrollo, ya que se puede usar herramientas de desarrollo de computadoras estándar tales como Turbo C o Power Basic o herramientas basadas en Linux y QNX.

**Sistema Operativo:** La PC de *Technologic Systems Embedded* es compatible con una amplia variedad de sistemas operativos. Algunos de los sistemas operativos que soporta la tarjeta embebida son:

- TNT Embedded Toolsuite, Phar Lap Software
- UCos II
- RTKernel, On Time Software
- RTEMS, On-Line Applications Research Corporation

- DOS with WATTCP, public domain TCP/IP source code for DOS
- Linux
- QNX

**Sistema Operativo Utilizado, QNX:** QNX es un sistema operativo en tiempo real basado en el microkernel compatible POSIX- desarrollado por QNX Systems de Canadá. Es ampliamente usado en control industrial, multimedia y otras aplicaciones embebidas las cuales requieren un desempeño en tiempo real. QNX es un pequeño sistema operativo y puede ser configurado para utilizar una pequeña cantidad de espacio de disco y memoria comparado a otros sistemas operativos para PC embebidos. El microkernel de QNX desarrolla un excelente desempeño en tiempo real a través de un sistema configurable por el usuario.

### Tarjeta de Control de Movimiento EPOS 24/1

Maxon motor EPOS 24/1 es un controlador digital de movimiento. Debido a la flexibilidad y gran eficiencia de la etapa de potencia EPOS 24/1 puede comandar motores DC con escobilla con sensores de posición y velocidad (encoder) digitales, así como también motores sin escobillas con sensores digitales de efecto Hall y sensores de posición y velocidad (encoders). La conmutación de corriente sinusoidal con control vectorizado espacial ofrece a los motores EC un rizado mínimo de torque y bajo ruido. Es especialmente diseñado para ser comandado y controlado como un nodo esclavo en una red CANopen. Además, el dispositivo puede ser operado a través de un Puerto de comunicación RS-232.

La interfase CANopen internamente estructurado permite conectar en red múltiples controladores y comando en línea por un dispositivo CANopen maestro.

Como se tiene varios dispositivos EPOS, se utiliza el protocolo CANopen. Los dispositivos individuales de la red son comandados por el maestro CANopen.

### 3. BRAZO MANIPULADOR

El brazo de robot implementado se ubicara en el anillo móvil de una PLATAFORMA PARALELA (STEWART-GOUGH), como se muestra en las Figuras 3 y 4 permitiendo la manipulación teleoperada de objetos.

El brazo es un manipulador serial de tres grados de libertad articulado verticalmente, el sistema de actuación se realiza con motores eléctricos de corriente continua, como se muestra en la Figura 5.

Una de las principales desventajas de los robots seriales con actuadores eléctricos es su relación de carga vs peso.

Por ello se ideó un robot en el cual los motores se ubicaran en la base. Por esta razón el brazo se implementa con una serie de transmisiones que llevan el movimiento a cada una de las articulaciones. Las transmisiones se realizan usando correas dentadas de poliuretano con fibras de acero las cuales brindan la característica de sincronismo lo cual es esencial para el control del robot [8].

Aunque existen numerosos programas disponibles para modelamiento y simulación de movimiento en 3D, no existe un único programa que incluya todo, que dé como resultado la características físicas (características 3D) y la descripción funcional (planificación de movimiento) del robot. La

simulación en si misma consiste de la parte cinemática y dinámica dependiendo de si se consideran o no las fuerzas o torques de los actuadores, cuando se generan las trayectorias de movimiento.

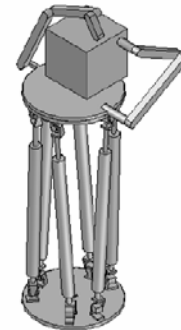


Fig. 3: Estructura Simulada en el software CAD

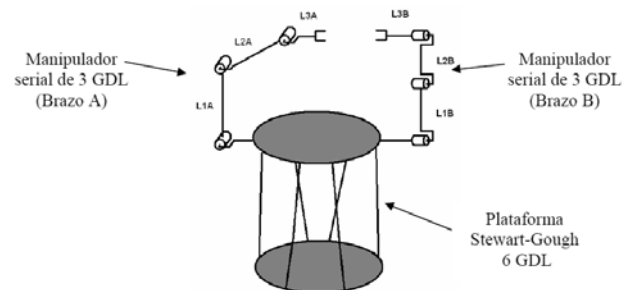


Fig. 4: Estructura del Robot



Fig. 5: Estructura del Brazo

### Modelo Dinámico del Manipulador

Expresando el modelo dinámico del brazo mediante la formulación Lagrange- Euler

$$\tau = D\ddot{q} + H + C \quad (1)$$

Matriz de inercia D:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D_{11} &= 0.006079 \cos(q_3 + q_2) + 0.032163 \cos(q_2) + 0.0046029 \cos(q_3) + 0.04689 \\ D_{12} &= 0.0030397 \cos(q_3 + q_2) + 0.01608 \cos(q_2) + 0.0046029 \cos(q_3) + 0.013525 \\ D_{13} &= 0.0030397 \cos(q_3 + q_2) + 0.0019746 + 0.0023014 \cos(q_3) \\ D_{22} &= 0.0046029 \cos(q_3) + 0.001352 \\ D_{23} &= 0.0019746 + 0.0023014 \cos(q_3) \\ D_{33} &= 0.0019746 \\ D_{21} &= D_{12}, \quad D_{31} = D_{13}, \quad D_{32} = D_{23} \end{aligned}$$

La matriz de fuerzas de Coriolis y Centrífugas  $H$  está definida como:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_1 &= -0.0030397 \dot{q}_2^2 \sin(q_3 + q_2) - 0.0030397 \dot{q}_3^2 \sin(q_3 + q_2) - 0.0046029 \dot{q}_1 \dot{q}_3 \sin(q_3) \\ &\quad - 0.032163 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sin(q_2) - 0.0046029 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \sin(q_3) - 0.0060795 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sin(q_3 + q_2) \\ &\quad - 0.0060795 \dot{q}_1 \dot{q}_3 \sin(q_3 + q_2) - 0.0060795 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \sin(q_3 + q_2) - 0.0023014 \dot{q}_3^2 \sin(q_3) \\ &\quad - 0.016082 \dot{q}_2^2 \sin(q_2) \\ H_2 &= -0.0046029 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \sin(q_3) + 0.016082 \dot{q}_1^2 \sin(q_2) - 0.0023014 \dot{q}_3^2 \sin(q_3) \\ &\quad - 0.0046029 \dot{q}_1 \dot{q}_3 \sin(q_3) + 0.0030397 \dot{q}_1^2 \sin(q_3 + q_2) \\ H_3 &= 0.0023014 \dot{q}_2^2 \sin(q_3) + 0.0023014 \dot{q}_1^2 \sin(q_2) + 0.0030397 \dot{q}_1^2 \sin(q_3 + q_2) \\ &\quad + 0.0046029 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sin(q_3) \end{aligned}$$

La matriz de la fuerza de gravedad  $C$  está definida por:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= -0.14146 \cos(q_1 + q_2 + q_3) - 0.74839 \cos(q_1 + q_2) - 1.653 \cos(q_1) \\ C_2 &= -0.14146 \cos(q_1 + q_2 + q_3) - 0.74839 \cos(q_1 + q_2) \\ C_3 &= -0.14146 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \end{aligned}$$

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LOS MOTORES

El primer paso para la selección de los motores es la parametrización del robot, para ello se calcula la masa, el centro de gravedad y la inercia de los eslabones referida a cada uno de los sistemas de coordenadas de los eslabones.

Estos parámetros se obtienen mediante el uso de un programa de diseño asistido por computador.

Una vez se obtenidos los parámetros del robot, se reemplazan en el modelo dinámico, para esto se escoge la posición del robot en la cual los motores requieran un mayor par (peor posición) y poniendo como datos de entrada perfiles específicos de velocidad y aceleración, utilizando el computo de la dinámica inversa se obtienen los pares requeridos para los motores.

La Figura 6 muestra el diagrama de simulación implementado para el cálculo del par de los motores.

Los perfiles de velocidad y aceleración se calcularon teniendo en cuenta la velocidad máxima a la cual giraran las articulaciones al igual que los tiempos de aceleración y deceleración.

Estos parámetros se tomaron como:

- Velocidad máxima de las articulaciones:  $-\pi/3$  rad/s
- Tiempo de aceleración: 100ms
- Tiempo constante: 400ms
- Tiempo deceleración: 100ms

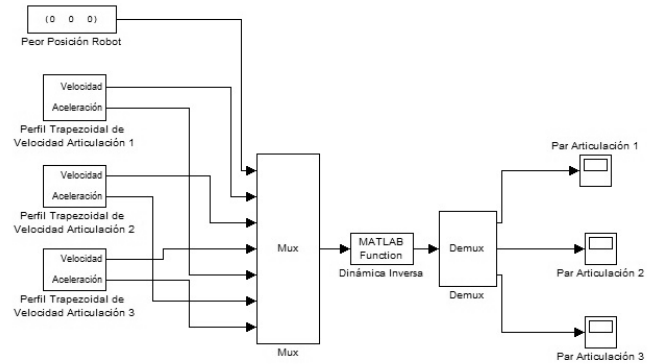


Fig. 6: Modelo en Simulink® para el cálculo de motores del brazo

Tabla 1. Parámetros de la articulación 1

PARAMETRO	VALOR
Longitud entre ejes:	210.8
Masa:	0,429 kg
Centroide x :	-82.337 mm
Centroide y :	-1,062E-008 mm
Centroide z :	-12,398 mm
Ixx:	167,929 kg mm <sup>2</sup>
Iyy:	2,595E+003 kg mm <sup>2</sup>
Izz:	2,583E+003 kg mm <sup>2</sup>

Las Tablas 1, 2 y 3 muestran los parámetros para cada articulación.

La Tabla 4 muestra los pares que son requeridos para cada una de las articulaciones.

En base a ello se hicieron las siguientes selecciones para los motores correspondientes a cada articulación.

Los motores utilizados son de la compañía Maxonmotor.

Para la articulación 1 se selecciono el motor 169008 EC 22 con un reductor 143994 GP 22 C (relación de reducción de 316:1) y una unidad de control 302267 EPOS 24/1.

Para la articulación 2 se selecciono el motor 283840 EC-max 22 con un reductor 143994 GP 22 C (relación de reducción de 316:1) y una unidad de control 302267 EPOS 24/1.

Para la articulación 3 se selecciono el motor 169008 EC 22 con un reductor 143994 GP 22 C (relación de reducción de 316:1) y una unidad de control 302267 EPOS 24/1.

El material utilizado para la fabricación de los eslabones del brazo es acero inoxidable, para los otros elementos se ha considerado aluminio. También se han utilizado rodamientos.

Tabla 2. Parámetros de la articulación 2

PARAMETRO	VALOR
Longitud entre ejes:	159.6 mm
Masa:	0,214 kg
Centroide x :	-70.7 mm
Centroide y :	-1,743E-008 mm
Centroide z :	17,720 mm
Ixx:	39,977 kg mm <sup>2</sup>
Iyy:	724,650 kg mm <sup>2</sup>
Izz:	737,257 kg mm <sup>2</sup>

Tabla 3. Parámetros de la articulación 3

PARAMETRO	VALOR
Longitud:	40 mm
Masa:	0,021 kg
Centroide x :	14.42 mm
Centroide y :	2,771E-005 mm
Centroide z :	43,500 mm
Ixx:	2,279 kg mm <sup>2</sup>
Iyy:	5,603 kg mm <sup>2</sup>
Izz:	6,236 kg mm <sup>2</sup>

Tabla 4. Pares calculados

Articulación	Tpico [Nm]	Tnominal [Nm]
1	-4.14	-2.7
2	-1.59	-0.96
3	-0.34	-0.19

## 5. IMPLEMENTACION

La Figura 7 muestra el diagrama de la plataforma experimental del sistema de Teleoperación.

Se han desarrollado pruebas de la plataforma experimental del sistema de teleoperación. Se ha configurado y puesta a punto la tarjeta PC104 (embedded board), la cual comanda la interface de potencia y sensores de los motores DC de cada articulación del brazo.

También se ha desarrollado los drives para el manejo de los accionamientos del brazo maestro y esclavo: envío/recepción de datos de posición velocidad, aceleración y corriente a través de una red CAN (Control Area Network); 1. Envío de datos, 2. Recepción de datos, 3. Comando de velocidad, 4. Comando de posición y 5. Comando de corriente.

Además se ha desarrollado programas para la interconexión a través de una red LAN, del Sistema Operativo Windows y el Sistema Operativo en Tiempo Real (QNX).

En el lado local se utiliza un dispositivo háptico PHANTOM Omni<sup>®</sup> de SensAble Technologies como manipulador local, el brazo remoto reproduce los movimientos del operador sobre este dispositivo.

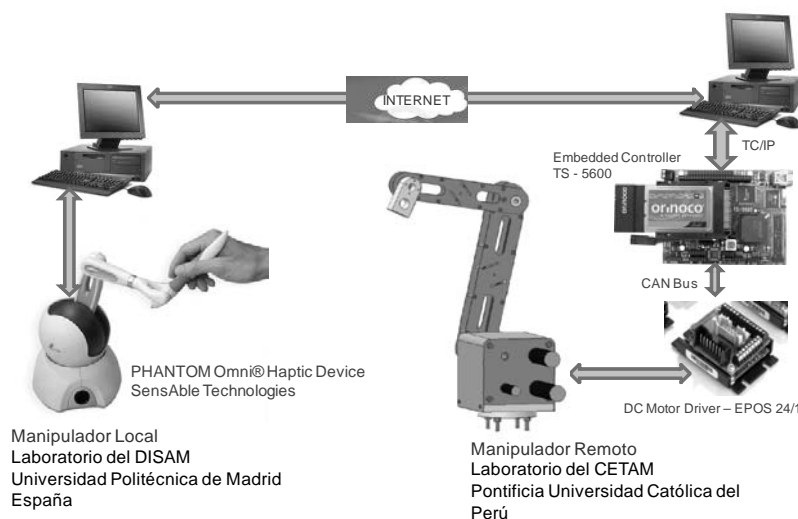


Fig. 7: Plataforma Experimental del Sistema de Teleoperación

## 6. CONCLUSIONES

La estructura implementada permitirá y facilitará la implementación de algoritmos de control no lineal en tiempo real garantizando la estabilidad del sistema teleoperado ante la presencia de retardos en la comunicación.

La tarjeta PC104 (*embedded board*), comanda la interface de potencia y sensores de los motores DC y permite ejecutar el algoritmo de control en tiempo real

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.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Goertz, R.C. and Thompson, R.C. "Electronically controlled manipulator." **Nucleonics**, pages 46-47, 1954.
- [2] Hokayem P.F., Spong M.W. "Bilateral teleoperation: An historical survey", **Automatica**, (2006), doi:10.1016/j.automatica.2006.06.027
- [3] Arcara P., Melchiorri. "Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study", **Robotics and Autonomous Systems** 38 (2002) 49–64
- [4] Lee D.; Li, P.Y. "Passive bilateral control and tool dynamics rendering for nonlinear mechanical teleoperators", **Robotics, IEEE Transactions on** [see also Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Volume 21, Issue 5, Oct. 2005 Page(s):936 – 951.
- [5] Ho S.A. et al. "A teleoperation position control for 2-DOF manipulators with control input saturation", **Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on**, Volume 3, 12-16 June 2001 Page(s):1520 - 1525 vol.3
- [6] Yokokohji Y. and Yoshikawa T. "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling—Formulation and experiment," **IEEE Trans. Robot. Autom.**, vol. 10, no. 5, pp. 605–620, Oct. 1994.
- [7] Almonacid M., Saltaren R., Aracil R, and Reinoso O. "Motion planning of a climbing parallel robot", **IEEE Trans. Robot. Automatica**, vol. 19, no. 3, pp. 485–489, 2003.
- [8] Peña C. **Trabajo Tutelado**. Universidad Politécnica de Madrid. 2007.