

IDENTIFICACIÓN Y MODELADO DE UN SISTEMA MAESTRO-ESCLAVO PARA TELEOPERACIÓN

Rafael Aracil, Jordi Barrio, Manuel Ferre, Juan Manuel Bogado
DISAM-UPM, C/. José Gutierrez Abascal, 2. 28006 Madrid. aracil@etsii.upm.es

Roque Saltaren
ELAI-UPM, C/ Ronda de Valencia. 28012 Madrid. rsaltaren@etsii.upm.es

Resumen

El presente artículo describe los trabajos realizados para la identificación, modelado y control de un sistema bilateral compuesto por un maestro eléctrico y un esclavo hidráulico. El objetivo fundamental ha sido desarrollar una plataforma abierta para la experimentación de diferentes estrategias de control para robots teleoperados con reflexión de fuerzas. Se ha desarrollado un hardware específico de control basado en el DSP TMS320F2812 de Texas Instrument. Los resultados han puesto de manifiesto la posibilidad de cerrar los dos bucles de control en tiempos próximos a 5 ms; lo cual evita la aparición de problemas relativos a inestabilidades ligadas al retraso en las comunicaciones. La identificación se ha realizado mediante las herramientas que ofrece Matlab, obteniéndose modelos de tercer orden que han demostrado ser suficientes para cerrar satisfactoriamente los bucles de control.

Palabras Clave: Robótica, teleoperación, identificación, control bilateral.

1. INTRODUCCIÓN

Las interfaces de teleoperación son el medio utilizado por los operadores humanos para transmitir su actuación a un entorno alejado a él. Habitualmente la tarea teleoperada es llevada a cabo por manipuladores que utilizan herramientas más o menos sofisticadas.

La ejecución de tareas en entornos remotos requiere el establecimiento de dos canales de datos. El primero, que muestra al operador el estado del trabajo que realiza; y el segundo, que

envía las órdenes generadas por el operador a los diferentes elementos teleoperados. Una vez enlazados el puesto del operador y la zona de trabajo remota, es posible implementar diferentes modos de trabajo según el grado de automatización que se desea alcanzar [1].

Para mejorar el rendimiento de un sistema teleoperado existen dos caminos a seguir. Uno relacionado con la automatización de las tareas, y otro ligado al aumento de la telepresencia del operador. La mejora de las tareas aumentando el grado de automatización requiere disponer de un modelo del entorno de trabajo y de la tarea a realizar [2]. La obtención de este modelo es una tarea compleja, ya que, habitualmente se desconoce la localización espacial de los elementos a manipular, lo cual implica establecer el correspondiente mecanismo para la calibración del modelo del computador con el entorno real de trabajo. Numerosos e importantes trabajos han sido realizados en este sentido, como ejemplo de calibración de entorno mediante el uso de técnicas de visión por computador están trabajos como los de W. Kim [3], también han sido utilizadas técnicas de realidad aumentada [4], y en algunos casos se ha aprovechado la intervención del operador para la localización de los objetos [5].

Los trabajos que se muestran en este artículo se centran en el aumento del grado de telepresencia del operador para mejorar la ejecución de las tareas teleoperadas. Esta alternativa se complementa con la anterior, y representa un esfuerzo en la mejora de interfaces hombre-máquina.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE INTERFAZ DE TELEROBOTS

En la tabla 1 se muestra una clasificación de los dispositivos que puede utilizar el operador para la realización de tareas teleoperadas. Esta

clasificación se ha realizado según el tipo de información procesada. Así pues, se establecen tres tipos de dispositivos: actuación, realimentación, y bilaterales. Los dispositivos de actuación son utilizados por el operador para generar comandos para los elementos teleoperados. Los dispositivos de realimentación se utilizan para el conocimiento del estado de la tarea realizada, excitando los sentidos del operador para suministrarle dicha información. Finalmente, los dispositivos bilaterales se caracterizan porque tienen el doble funcionamiento de generar comandos a la vez que excitan los sentidos del operador.

Actuación	Bajo Nivel
	Alto Nivel
Realimentación	Visual
	Tacto
	Auditiva
Bilateral	Actuación + Realimentación

Tabla 1. Clasificación de los dispositivos de interfaz para teleoperación de robots.

2.1 Dispositivos de actuación

La generación de comandos por el operador se puede dividir en comandos de bajo nivel y alto nivel [1]. Los comandos de bajo nivel están relacionados con el movimiento de las articulaciones de los robots teleoperados. Los dispositivos habitualmente utilizados son maestros con varios grados de libertad, joysticks, pulsadores, etc. Este tipo de dispositivos genera referencias para los servos, implementando un control en posición o en velocidad sobre dicha articulación. El procesamiento realizado sobre este tipo de comandos es reducido, limitándose a la ley de control que se desea, precisándose en algunos casos de la realización de una transformación cinemática.

Los comandos de alto nivel están referidos a la tarea realizada. Este tipo de órdenes indica el tipo de manipulación a realizar, las herramientas, etc. La generación de este tipo de comandos puede realizarse fácilmente con un computador, como puede ser utilizando su ratón, o teclado; siendo posible utilizar otros medios más avanzados como un sistema de reconocimiento de voz, o de reconocimiento de los gestos del operador. La potencia de este tipo

de interfaces es muy superior a las anteriores, pero precisa disponer de información del entorno de trabajo, como la localización espacial de los elementos, sus dimensiones, el procedimiento de trabajo, etc. Toda esta información implica la gestión de gran cantidad de información, con la consecuente complejidad que ello conlleva. La potenciación de estos sistemas significa un avance en la automatización de las tareas teleoperadas, dicha mejora debe ser valorada frente a la complejidad de los equipos que intervienen.

2.2 Dispositivos de realimentación

Los dispositivos de realimentación muestran al operador el estado de la tarea teleoperada, para ello excitan sus sentidos con la información extraída del entorno remoto. En la tabla 1 estos dispositivos han sido clasificados según el sentido que excitan del operador, teniendo en cuenta los sentidos habitualmente utilizados en teleoperación se han definido: visuales, de tacto, y auditivos.

Las imágenes de vídeo y las simulaciones gráficas constituyen el medio habitual de realimentación visual del entorno de trabajo remoto. El sentido de la vista nos proporciona información fundamental para la manipulación de elementos; ya que, nos permite conocer de qué elementos componen la zona de trabajo, así como sus características de dimensión, posición, etc. El diseño de la interfaces visuales debe tener en cuenta varias reglas, como no saturar en exceso al operador, mostrándole numerosas imágenes, visualizar imágenes estereoscópicas que faciliten la percepción de profundidad en la escena [6].

El sentido del tacto nos informa sobre los esfuerzos que se producen durante la manipulación de objetos. Esta es la primera información que se pierde al realizar tareas teleoperadas, ya que, los elementos no son manipulados directamente, sino que los robots son los encargados de la manipulación. La importancia de conocer los esfuerzos generados en la tarea dependerá del tipo de materiales a manipular, pero generalmente será necesario no superar determinados esfuerzos máximos, ya que en caso contrario podría dañarse los elementos manipulados o los propios robots. Así pues, será imprescindible la realimentación de fuerza aunque sólo se informe de manera aproximada para evitar posibles roturas. Una realimentación háptica de alta calidad involucrará información con un elevado ancho de banda, que permite percibir información

relativa a texturas; mientras que una información con un ancho de banda pequeño sólo permitirá conocer la existencia o no de contactos, lo cual en algunas aplicaciones podría ser suficiente [7].

La realimentación auditiva suele ser poco utilizada en tareas teleoperadas, y por lo general se limita a la audición de mensajes procedentes de los computadores, o alarmas que se producen en la tarea. La principal ventaja de la utilización de sentido del oído es que no precisa la atención continuada del operador sino que en cualquier momento es posible informarle de un evento que se produce.

2.3 Dispositivos bilaterales

Las interfaces bilaterales permiten integrar en un sólo dispositivo, tanto la generación de comandos, como la realimentación de información. Estos dispositivos permiten enviar comandos de movimiento a la vez que el operador percibe el esfuerzo generado por su actuación. Esta integración en un mismo dispositivo de los comandos de actuación y la respuesta de estos permite realizar la telemanipulación de una forma muy efectiva.

El ejemplo más claro y representativo de estas interfaces son los maestros con reflexión de fuerza, que permiten generar referencias de movimiento y realimentan los esfuerzos generados en el entorno remoto. Los trabajos descritos en este artículo se centran en el control de dispositivos bilaterales, que permiten el guiado de un telemanipulador a la vez que se reflejan sobre el maestro las fuerzas ejercidas.

3. HARDWARE DE CONTROL PARA EL TELEMANIPULADOR KRAFT

En este apartado se describen los equipos utilizados para control del sistema bilateral. El objetivo es disponer de un sistema de control que permita contrastar los clásicos algoritmos de control posición-posición, fuerza-posición y sus variantes [8], frente a otros esquemas más avanzados [9] y [10].

Tomando como punto de partida el manipulador empleado en el sistema ROBTET [11], que es un sistema pensado para el mantenimiento de líneas eléctricas en tensión, se ha trabajado en el desarrollo de un hardware abierto de control que permita implementar distintos algoritmos de control de teleoperación con la simple modificación del software de control.

3.1 Descripción del telemanipulador y el maestro

Este trabajo se está desarrollando sobre un telerobot hidráulico de 6 GDL con pinza, figura 1; que ofrece información aproximada de la reflexión de fuerzas. Al tratarse de un robot hidráulico se aprovecha esta característica para reflejar la fuerza en base a la diferencia de presión existente entre los dos cilindros hidráulicos. Siendo esta medida lo suficientemente representativa del par de reacción que existe en esa articulación.

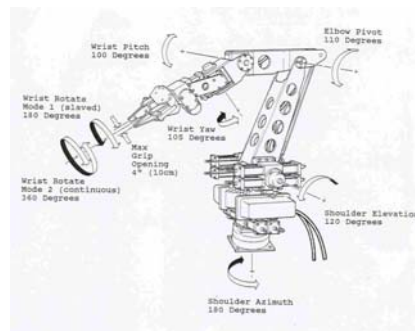


Figura 1. Esclavo utilizado de Kraft Telerobotics Inc.

Como maestro se dispone de un manipulador que reproduce la propia cinemática del esclavo, figura 2. En los 5 primeros ejes existen unos actuadores que sirven para reflejar un par al operador que manipula el telerobot. De esta forma se refleja el par que se está ejerciendo en la correspondiente articulación en el esclavo.

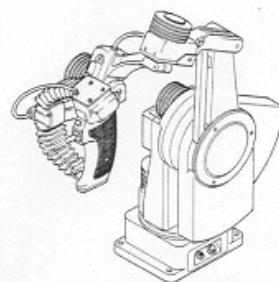


Figura 2. Maestro utilizado de Kraft Telerobotics Inc.

3.2 Hardware de Control del Telerobot

Para implementar el control de un telerobot de estas características se requiere de un hardware de control que cumpla con los siguientes requisitos:

- Gran capacidad de cálculo.

- Capacidad para gestionar un gran número de señales analógicas y digitales.
- Protocolos de comunicación para poder intercambiar información con otros dispositivos.
- Programación en un lenguaje de alto nivel, que permita probar diferentes algoritmos de control

Por todo ello fue seleccionado como núcleo del hardware de control el DSP TMS320F2812 de Texas Instrument, que se caracteriza por:

- Gran capacidad de cálculo de 150MPIS.
- CPU de coma fija pero que emula el coma flotante.
- Interfaz Externo (Xintf), que permite acceder a través una determinada zona de memoria y del bus de datos a dispositivos externos.
- Gestor de interrupciones (Hasta 45 interrupciones de periféricos y 3 externas).
- Conversor Analógico Digital con 16 canales y 12bits.
- Hasta 56 señales de entrada / salida.
- Distintos puertos de comunicaciones (2 canales serie, Bus-CAN, SPI).

Las señales de control de este telerobot son analógicas, tanto en el maestro como en el esclavo, por lo que ha sido necesario desarrollar una electrónica adicional que permita la adaptación de estas señales para poder ser manejadas de forma digital por el DSP de control.

3.3 Hardware específico Maestro y Esclavo

Existen numerosas señales a manejar en el maestro y el esclavo, por lo que cada uno dispone de su propia tarjeta de adaptación de señales y etapas de potencia. En la tabla 2 se resumen dichas señales.

	MAESTRO	ESCLAVO
Salidas Analógicas	5	7
Entradas Analógicas	8	11
Salidas Digitales	4	4
Entradas Digitales	1	4

Tabla 2. Señales procesadas de maestro y esclavo

El hardware de control es el mismo en ambos casos, de forma que se han aprovechado las simetrías de ambos para los equipos de control, y las partes específicas de procesamiento de señales se ha desarrollado en etapas independientes.

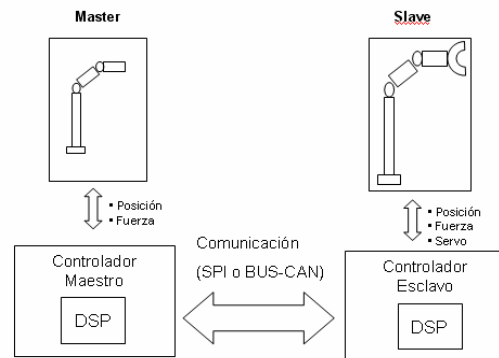


Figura 3. Arquitectura hardware de control

Cada controlador registra y monitoriza la evolución de todas las señales de cada dispositivo, ejecutando el algoritmo de control predefinido para cada parte. Este esquema de control obliga a que exista una comunicación entre el maestro y el esclavo de alta velocidad. Dicha comunicación puede realizarse a través de los puertos de comunicaciones del propio DSP, utilizándose, bien el SPI que permite una elevada velocidad, o bien el BUS-Can por su robustez.

En la comunicación entre maestro y esclavo se transmite la información de posición y par de cada articulación. El regulador utiliza esta información como referencias de su propio bucle de control.

3.4 Canales de comunicación con el PC

La tarjeta de control permite la comunicación con el PC, permitiendo tanto la reprogramación del software de control, vía puerto JTAG; o bien para la descarga de datos vía puerto USB. Este puerto permite volcar grandes cantidades de datos al PC para su posterior tratamiento en la depuración o elaboración de algoritmos de control más complejos. Esta funcionalidad es de vital importancia para la identificación del sistema donde es necesario manejar importantes volúmenes de datos. Además este bus podría permitir en un futuro desarrollar aplicaciones de teleoperación remotas a través de Internet.

4. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Con el objetivo de trabajar en las distintas técnicas de control del sistema, es necesario obtener modelos matemáticos que faciliten el estudio de los controles a aplicar. Como principal característica de las señales muestreadas hay que destacar que se ha trabajado con una frecuencia de muestreo de 1ms.

4.1. Identificación del modelo

La identificación del sistema se ha realizado en base a distintos modelos paramétricos derivados del modelo básico ARX que relaciona las salidas con las entradas. Para la identificación se ha trabajado con las diferentes variantes del modelo básico ARX que parte de la siguiente ecuación:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

La identificación de un robot de estas características puede tratarse acoplada o bien desacopladamente; en este caso y debido a las fuertes reducciones existentes entre las articulaciones se esta abordando de forma desacoplada.

4.2. Captura de datos

Con el objetivo de obtener una buena captura de datos se han generado señales de entrada pseudoaleatorias en amplitud y ancho de pulso, que permiten recorrer una gran cantidad de frecuencias, como en el ejemplo de la figura 4.

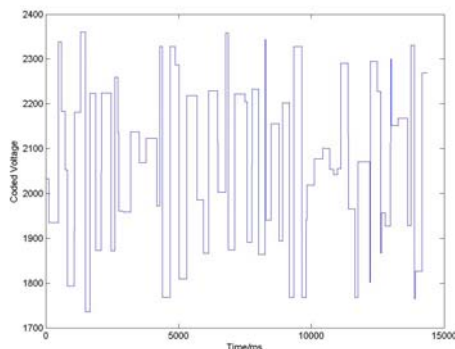


Figura 4. Ejemplo de señal pseudoaleatoria utilizada como entrada.

Es importante a la hora de generar las señales de entrada que no se sobrepasen los límites de trabajo de la articulación, ya que eso provocaría que se saturara la salida, lo cual impediría obtener un buen modelo.

4.3. Preprocesado de datos

Uno de los principales obstáculos que han dificultado la identificación ha sido el ruido; es por ello que en ocasiones se han aplicado técnicas de filtrado, como en la figura 5. Además de mejorarse la electrónica de adquisición de datos.

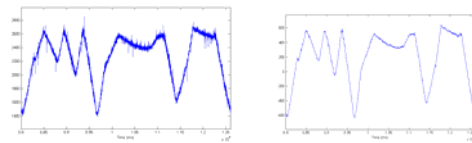


Figura 5. Ejemplo de filtrado para los datos de salida

Si la frecuencia de muestreo es más elevada de lo necesario o el conjunto de datos es excesivamente extenso; con el objetivo de obtener un tiempo de búsqueda razonable es posible reducir su tamaño mediante compresión. La compresión ofrece ventajas como que no se modifica en esencia el conjunto de datos a analizar, se reduce el nivel de ruido y analiza el conjunto de datos en mucho menos tiempo, sin verse prácticamente afectados los resultados de la identificación.

Como es habitual para la identificación se ha dividido los datos en dos partes, una parte se ha empleado en la propia identificación, mientras que la otra parte se utiliza en la validación, según se muestra en la figura 6.

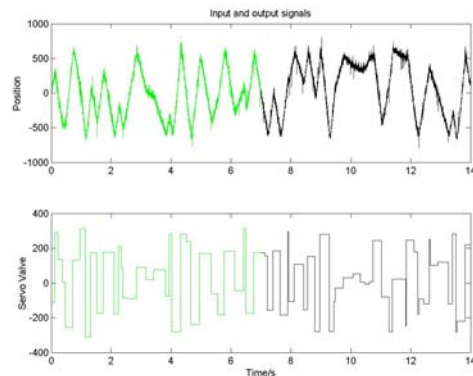


Figura 6. Datos capturados de entrada salida, estos se dividen para usarlos en la identificación y validación

4.4. Identificación del sistema

No existe un proceso que permita determinar a priori cual es el mejor modelo para identificar el sistema; por lo que se han aplicado métodos de ensayo/error hasta encontrar aquellos modelos que ofrezcan una mejor identificación. Por ello se ha desarrollado un programa que facilita este proceso analizando todas las posibilidades en un rango definido por el usuario obteniendo las mejores soluciones.

Se ha preferido usar modelos parametricos de menor orden, pues aunque se obtienen modelos menos precisos, con ello se simplifica posteriormente la obtención del regulador al resultar más controlable el modelo. Esto se ha realizado en aquellos casos donde el incremento de orden no presenta una gran mejora en el Fit del modelo.

4.5. Resultados

Los mejores resultados obtenidos en la identificación de las articulaciones del maestro son los que se presentan en la tabla 3. Los resultados obtenidos en las articulaciones identificadas del esclavo son los que aparecen en la tabla 4.

Como ejemplo de estos resultados, los datos de la articulación quinta del esclavo son mostrados en la figura 7 en superposición con la aplicación del modelo identificado a los datos de entrada. Para esta identificación se ha obtenido un ajuste del 77.36%, con un modelo BJ (nb=1, nc=2, nd=2, nf=3, nk=2) de tercer grado. La identificación empleada no es la que ofrece el mejor ajuste, pero tiene un orden menor lo cual simplifica el controlador. Este modelo se ilustrará en detalle en el siguiente apartado, donde se explica como se ha diseñado el algoritmo de control de para esta articulación.

Art.	Modelo	Orden máximo	Fit	Orden polinomio
WY	BJ	3	72,96	[2 1 3 3 1]
SE	BJ	3	73,64	[2 1 3 3 3]
EL	BJ	3	71,91	[3 2 1 3 2]
SA	BJ	3	96,06	[1 1 3 2 3]
WP	BJ	3	74,09	[2 1 1 2 3]

Tabla 3. Datos capturados de entrada salida, donde estos se dividen para usarlos en la identificación y validación

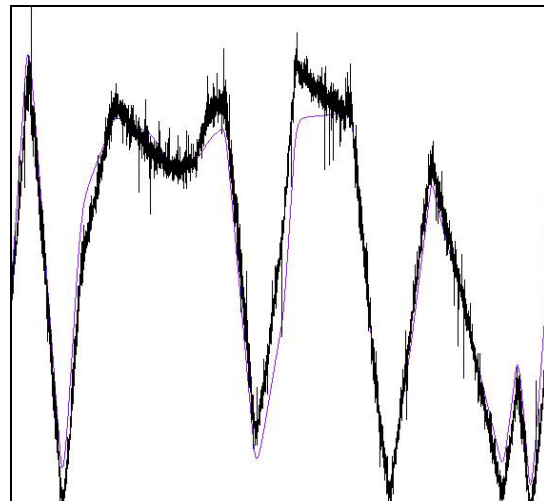


Figura 7. Datos capturados superpuestos con los datos obtenidos de la aplicación del modelo para la quinta articulación del esclavo

Slave Models	Fit	orden	Fit	orden	Fit	orden	Fit	orden
Articulation	WY1 5		WP1 5		WP2 5		WP3 5	
ARX	60,973	3 5 5	1,9793	2 5 3	8,3395	5 5 5	13,169	5 5 5
ARMAX	72,049	3 4 4 2	58,733	4 4 4 5	48,572	4 2 4 4	57,813	5 4 1 5
BJ	81,452	3 5 5 4 1	59,46	2 4 4 5 1	55,265	2 2 4 4 2	62,581	3 3 3 5 5
OE	54,994	4 2 4	45,324	4 3 4	40,37	5 5 3	58,879	2 3 2

Slave Models	Fit	orden	Fit	orden	Fit	orden	Fit	orden
Articulation	EL1 5		EL2 5		EL3 5		WR2 5	
ARX	4,465	2 1 1	4,8961	1 5 2	3,8549	2 2 3	48,462	5 5 1
ARMAX	19,912	3 4 5 1	23,049	4 5 2 3	29,95	3 3 5 5	72,026	3 1 3 5
BJ	20,598	4 5 2 4 2	22,672	5 1 1 5 5	43,963	3 4 2 1 2	76,339	2 2 3 4 4
OE	19,374	4 3 5	23,336	5 5 2	29,877	4 2 2	59,831	1 4 2

Tabla 4. Resumen de los datos obtenidos de la identificación

5. ALGORITMO DE CONTROL

El modelo obtenido de la articulación quinta, es de tipo BJ (Box - Jenkins) y tiene la siguiente forma:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

y los siguientes polinomios:

$$B(q) = -7.158 \cdot 10^{-5} \cdot q^{-2}$$

$$C(q) = 1 - 1.93 \cdot q^{-1} + 0.932 \cdot q^{-2}$$

$$D(q) = 1 - 1.988 \cdot q^{-1} + 0.9884 \cdot q^{-2}$$

$$F(q) = 1 - 2.859 \cdot q^{-1} + 2.722 \cdot q^{-2} - 0.8631 \cdot q^{-3}$$

Si se observan los polos y ceros en la figura 8, se aprecia que el sistema es marginalmente estable. Esto se debe a la integración producida como consecuencia de ser la entrada función de la velocidad y la salida estar referida a la posición.

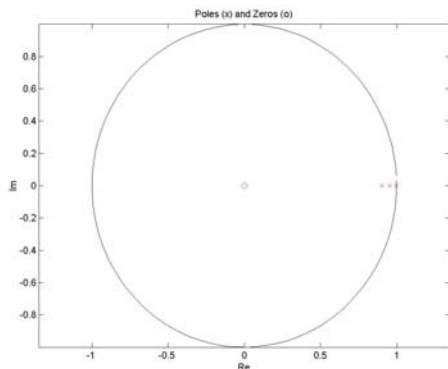


Figura 8. Polos y ceros obtenidos de la identificación de la quinta articulación del esclavo

Introducimos el modelo obtenido de la articulación del robot en bucle cerrado con un regulador que controla la articulación en posición. En un esquema como el de la figura 9.

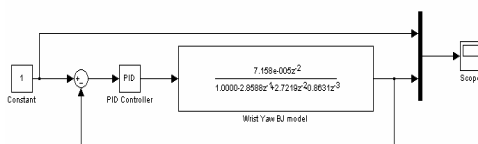


Figura 9. Esquema de control de cada articulación

Con la ayuda de algunas de las herramientas que ofrece Matlab se han ajustado los parámetros del regulador, figura 9. Además se comprueba que ofrece una respuesta adecuada a una entrada del tipo escalón, rampa o seno, con un regulador PD.

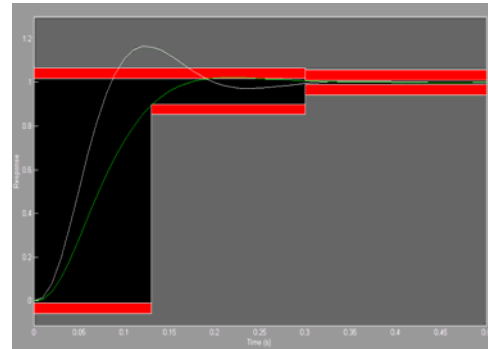


Figura 10. Ajuste de los parámetros del regulador en función de las características temporales

Dado que el manipulador es un dispositivo hidráulico de gran potencia y de movimientos muy rápidos que abarca un gran espacio de trabajo se ha limitado la velocidad máxima y se han reducido los límites articulares. Se ha comprobado, el margen de fase y margen de ganancia del sistema diseñado, como puede apreciarse en la figura 11 los valores son aceptables. Margen de Fase de 68° (en 12,8 rad/s) y margen de ganancia de 20,8 dB (en 67,9 rad/s).

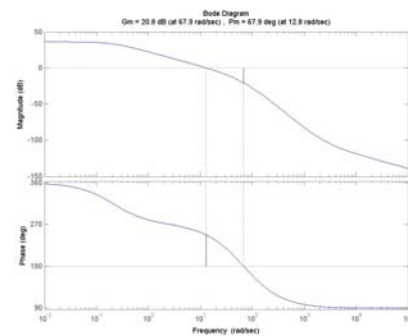


Figura 11. Margen de fase y de ganancia de la quinta articulación

Este controlador PD ha sido programado en el DSP obteniéndose resultados satisfactorios congruentes con las simulaciones. Igualmente se han desarrollado los respectivos controladores para las articulaciones cuarta y sexta con buenos resultados. En la figura 12 se muestra un ejemplo de las pruebas realizadas.



Figura 12. Prueba realizada del controlador implementado para el sistema bilateral

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a todos los compañeros del Laboratorio que han colaborado de una u otra forma en la realización de este trabajo. Especial mención merecen los estudiantes del Programa Erasmus Peter Junck y Philip Elviser que han realizado sus proyectos fin de carrera en DISAM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sheridan T.. “Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control”. 1992. MIT Press.
- [2] Ferre, M. Interfaz Diseño de interfaces para robots teleoperados. Desarrollo de un entorno de teleoperación con características multimedia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 1997. Madrid.
- [3] Kim W. “Computer Vision Assisted Virtual Reality Calibration”. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, nº. 3, pp 450-465, 1999.
- [4] R. Marin, P. J. Sanz, y A.P. del Pobil. “A predictive interfacebased on Virtual and Augmented Reality for Task Specification in a Web Telerobotic System”. Proc. of theIEEE 2002 IROS. 2002.
- [5] Peñín, L.F. et al Telerobotic system for live power lines maintenance: ROBTET. IEEE Int. Conference on Robotics & Automation, 1998. Leuven.
- [6] Ferre, M. Aracil R. y Navas M. Procesamiento de Vídeo en Tiempo Real para Teleoperación: Superposición de Imágenes y Estereoscopia. XXIV Jornadas de Automática. 2003. León.
- [7] Stansfield. “Haptic perception with an articulate, sensaterobot hand”. Robotica, 10, 1992. pp. 497-508
- [8] Hannaford, B. “A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback”. IEEE Trans. on Robotics and Automation. Vol. 5, nº 2. 1989.
- [9] Azorín JM. et all. “Control of Teleoperator with Communication Time Delay through State Convergence”. Journal of Robotic Systems,. Vol 21, nº 2. 2004.
- [10] Niemeyer G., y Slotine JJE. “Stable Adaptative Teleoperation”. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol 6, nº 1. 1991.
- [11] Aracil R., M. Ferre, M. Hernando, E., Pinto and J.M. Sebastián, “Telerobotics system for live-power line maintenance: ROBTET”, Control Engineering Practice, vol. 10, no. 11, Nov. 2002, pp. 1271-1281.