

TELEOPERACIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL A TRAVÉS DE INTERNET

Cecilia E. García, Rafael Aracil
Dpto. de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial
José Gutiérrez Abascal, 2 28006, Madrid, España
{cgarcia,aracil}@etsii.upm.es

Armando D. Assandri
Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid
Prado de la Magdalena s/n, 47005 - Valladolid, España
armando@autom.uva.es

Carlos Soria, Ricardo Carelli
Instituto de Automática. Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador San Martín Oeste 1109 - San Juan, Argentina
{csoria,rcarelli}@inaut.unsj.edu.ar

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al teleoperar a través de Internet un robot manipulador industrial BOSCH tipo SCARA situado en la provincia de San Juan, Argentina. Esta teleoperación es realizada con un manipulador cartesiano de la firma CYBERNET localizado en Madrid, España. La teleoperación se realiza bajo la implementación de una estrategia de compensación del retardo de comunicación, para lo cual se dispone de un simulador del sitio remoto que contempla el modelo del medio y del robot remoto. Además se realiza la medición en línea del retardo de transmisión usando el protocolo NTP.

Palabras Clave: Teleoperación, Retardo de Comunicación, TCP/IP, NTP.

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a estadísticas recientes, Internet ha alcanzado 100 millones de hosts alrededor del mundo. Internet constituye una poderosa herramienta de comunicación interactiva, por lo que es evidente que esta red continuará su crecimiento.

Internet ha experimentado grandes cambios que van desde la simple transferencia de datos a un “mundo virtual”, donde es posible comprar, vender, aprender, explorar, jugar y “controlar”. En realidad, se puede decir que las aplicaciones usando la red están únicamente limitadas por nuestra imaginación. Una de las aplicaciones en las que se están concentrando muchos esfuerzos es la telemedicina, área en la cual ya se han realizado numerosos experimentos con éxito. La consulta a distancia y la cirugía remota son

las aplicaciones más usuales en este campo. La manipulación de materiales peligrosos, las exploraciones submarina y espaciales pueden ser citadas entre otras aplicaciones frecuentes de la teleoperación. Además de éstas, los denominados “e-services” como el mantenimiento remoto y el monitoreo de procesos de manufactura, entre otros, constituyen los campos en los cuales los investigadores hacen continuos y numerosos aportes.

Como se ha mencionado, las aplicaciones basadas en teleoperación a través de Internet son muy diversas. Sin embargo, cuando nos referimos al control utilizando a la red de redes, éste está caracterizado por diferentes propiedades. La principal característica y limitación de la teleoperación por Internet es el retardo variable en la comunicación. Este problema no resulta significativo si se trata de una mera transmisión de paquetes de información. Sin embargo, cuando Internet se convierte en un vínculo de comunicación a través del cual se envían comandos de control y se recibe información sensorial en tiempo real, el retardo de comunicación es un factor crucial en la estabilidad y desempeño del sistema.

1.2 ROBÓTICA BASADA EN INTERNET

Es claro que Internet es cada vez más usada en aplicaciones referentes a la teleoperación. En [1], [3], [7], [8], [9], se muestran diversos sistemas de teleoperación que están accesibles para el usuario. En teleoperación, la información sobre el sitio remoto, tal como el espacio de trabajo, la posición del extremo operativo del robot y la posición del objeto, son necesarias para realizar la tarea con éxito. Sin embargo, el retardo en la comunicación y la escasa información que se tiene sobre el sitio remoto hacen que esta tarea se ejecute con algunas dificultades,

provocando, entre otras cosas, que el tiempo de ejecución sea considerablemente mayor.

La robótica basada en Internet puede ser clasificada en tres categorías [2], considerando los siguientes aspectos: el envío de comandos, la realimentación de información háptica y la naturaleza de esa realimentación. Estas tres categorías se denominan: teleprogramación, telesimulación y teleoperación en tiempo real.

Durante una teleprogramación, el operador humano debe cargar previamente un conjunto de comandos o bien un plan de actividades que el robot remoto deberá ejecutar. En este aspecto, el operador puede tener o bien una actitud pasiva, en la que no puede intervenir hasta que el robot remoto finalice la tarea o puede tener una actitud activa en la que el operador puede tomar decisiones durante la ejecución del plan. En este tipo de teleoperación el operador humano recibe información visual del sitio remoto. Típicamente, el usuario realiza un programa para el robot y éste es enviado al sitio remoto para que lo ejecute más tarde. Los resultados de la acción son luego reportados al usuario, actualizando los últimos datos que éste disponía.

En la telesimulación, el operador humano envía comandos al sitio remoto en tiempo real. Sin embargo, la realimentación de señales al operador es producto de una simulación basada en el modelo del robot remoto y el medio, o bien está parcialmente basada en el modelo y es corregida luego con las señales reales.

En la teleoperación en real tiempo real, el operador humano envía comandos en tiempo real y recibe la información sensorial real desde el sitio remoto también en tiempo real. Esta realimentación suele hacerse en forma de señales de video y señales de fuerza reales.

Muchas aplicaciones de estas tres estrategias de realizar robótica basada en Internet tienen un factor común: los comandos enviados por el maestro son ejecutados bajo la supervisión del controlador del robot remoto, que toma decisiones en base a la lectura de los sensores.

Cualquiera sea la manera en que se hace la teleoperación, deben satisfacerse criterios de estabilidad y desempeño. Los criterios de estabilidad están relacionados a la factibilidad y seguridad de la teleoperación. Otro criterio a satisfacer es la sincronización y transparencia vinculados al realismo y la eficiencia de la teleoperación.

Los efectos del retardo (variante en el tiempo), la pérdida de paquetes de información y las interrupciones en la comunicación dificultan el cumplimiento de los criterios antes mencionados. En la literatura se registran numerosos estudios sobre el

efecto que tiene sobre el sistema el retardo en la comunicación.

En este trabajo se presentan resultados experimentales obtenidos al implementar una estrategia de compensación del retardo de tiempo propuesta en [4] en un sistema real de teleoperación por Internet, en el que la estación remota está localizada en Argentina y la estación local en España. El sistema se corresponde con la clasificación de teleoperación en tiempo real realizada previamente. La estrategia de compensación está basada en el modelo del sistema remoto y en la medición en línea del retardo de la red. Esta medición se realiza utilizando el protocolo NTP (Network Time Protocol) [6] para la sincronización de la hora del sistema en ambos extremos del sistema de teleoperación. El retardo es medido agregando "marcas de tiempo" a los paquetes que transportan información de posición y fuerza. Los datos reales y estimados son convenientemente dispuestos de manera tal de cumplir con los criterios previamente comentados.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: En la Sección 1 se realiza una introducción breve al estado del arte en el área de la teleoperación a través de Internet. En la Sección 2 se realiza una descripción del sistema de teleoperación con el que se está trabajando. La Sección 3 presenta la estructura de compensación diseñada e implementada. Los resultados experimentales se presentan en la sección 4. Finalmente se presentan las conclusiones y líneas futuras de trabajo.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TELEOPERACIÓN

En esta sección se describe el sistema de teleoperación utilizado para realizar las experiencias.

2.1 ESTACIÓN LOCAL

En la estación local del sistema de teleoperación se dispone de un manipulador cartesiano CYBERNET de 6 grados de libertad a través del cual el operador envía los comandos al sitio remoto. En el sitio local se dispone de dos simuladores 3D de la estación remota.

A uno de los simuladores se le envían los mismos comandos que se le envían al robot remoto. De esta manera el operador puede ver, a modo predictivo, el comportamiento que el robot remoto tendrá. Por otro lado, el simulador 3D restante utiliza como consignas de referencia para su movimiento, los datos reales obtenidos a través de los sensores del robot, que llegan a través del canal de comunicación al sitio local. Este simulador permite que el operador compare lo sucedido en el sitio remoto con su intención.

La PLataforma Abierta de Tele- Robótica (PLATERO), concebida bajo la estructura cliente-servidor, permite interconectar de una manera rápida y flexible los robots locales con los remotos. La plataforma PLATERO fue desarrollada por un grupo de investigadores de Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial a los que se le hace especial mención en los agradecimientos de este artículo. Esta plataforma comunica al servidor con el cliente usando como protocolo de comunicación el TCP/IP. Es necesario aclarar que esta plataforma esta orientada a la conexión entre un único cliente con un único servidor con lo cual su utilización se ve limitada por esta característica.

Para resolver este inconveniente fue necesario rediseñar el sistema de comunicación entre los diferentes componentes del sistema. En tal sentido, cada componente es concebido como un servidor, y un programa cliente es quien realiza el intercambio de información entre los diferentes servidores. En la figura 1 se presenta un esquema del sistema de comunicación usado.

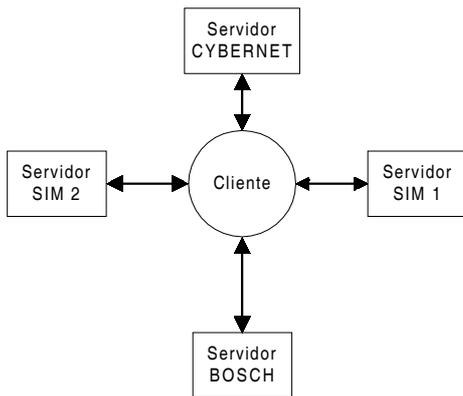


Figura 1: Esquema de Comunicación en el Sistema

2.2 ESTACIÓN REMOTA

En el sitio remoto se dispone de un robot industrial BOSCH SR-800 tipo SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) y que actualmente dispone de cuatro componentes:

- El Manipulador propiamente dicho
- La Unidad de Potencia
- El Controlador de Bajo Nivel
- El Controlador de Alto Nivel (supervisión).

Este tipo de manipuladores tienen sus articulaciones dispuestas en configuración de coordenadas cilíndricas. Se usan para proveer movimientos rápidos y suaves, especialmente operaciones de ensamble, como las que requieren inserción de objetos en agujeros. Cuenta con cuatro articulaciones o grados de libertad a saber: movimiento de hombro, de codo desplazamiento y rotación de muñeca. Todas

estas articulaciones son verticales. Las articulaciones 1, 2 y 4 se mueven en el plano horizontal, mientras que el movimiento en el plano vertical es provisto por la articulación 3, a través de un sistema de correas dentadas. En la figura 2 se muestra la configuración del mismo, además de sus dimensiones físicas.

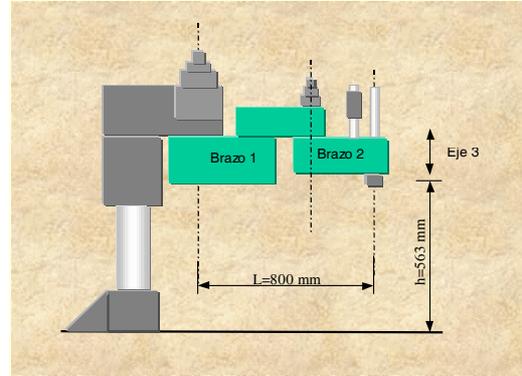


Figura 2: Configuración y Dimensiones Físicas del Robot

2.3 CANAL DE COMUNICACIÓN

La estación local de trabajo se fijó en el Departamento de Informática, Automática y Electrónica Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, España. El sitio remoto está localizado en el Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina. Para comunicar ambas estaciones de trabajo se utilizó la red Internet mientras que el protocolo de comunicación utilizado es TCP/IP.

El conjunto de protocolos IP (Internet Protocol) es el más usado hoy en día en las comunicaciones de red, debido a la extensa difusión que a alcanzado Internet a nivel mundial. El protocolo IP tuvo sus orígenes a fines de la década del 60 (red ARPA) y su motivación estuvo en la necesidad de permitir que cualquier ordenador, de cualquier fabricante, se pudiera comunicar con otro a través de redes heterogéneas. Proporciona una serie de servicios a los usuarios que les permiten entrar de forma remota en las computadoras mediante sesiones virtuales (telnet), realizar transferencias de ficheros (FTP), enviar correo electrónico por la red (SMTP), etc.

Actualmente, IP proporciona dos protocolos de transporte, TCP (Transfer Control Protocol) y UDP (User Datagram Protocol). TCP está orientado a la conexión y requiere, al igual que sucede con la telefonía, de un proceso de llamada y del establecimiento de un canal de comunicación para la transferencia de los datos. Es fiable y comprueba que los datos han llegado a destino. En [1] se manifiesta que el 95 por ciento de los bytes y del 85 al 95 por ciento de los paquetes que circulan por Internet lo hacen bajo el protocolo TCP.

UDP, no está orientado a la conexión. Cuando se compone un mensaje, se incluye la dirección de destino y se lo envía. Sin embargo, el nodo destino puede que no reciba el mensaje o bien que la dirección de destino sea incorrecta, lo que ocasiona la pérdida de los datos enviados.

El protocolo de transporte empleado en esta aplicación es TCP. Este protocolo proporciona los servicios necesarios para la realización de comunicaciones punto a punto bidireccionales, garantizando el orden de los datos recibidos (byte-stream). Para ello se emplea un socket (dirección IP + Puerto) que ofrece garantías de datos ordenados. Para cada interfaz de red que tenga su propia dirección IP, el protocolo proporciona un conjunto completo de puertos que pueden ser solicitados por los procesos para establecer canales de comunicación.

La variabilidad del retardo de transmisión de un paquete en Internet depende de varios factores. Las rutas por la que “viajan” los paquetes son asignada dinámicamente y esta asignación depende de la carga de la red. Además los paquetes son sometidos a diversos controles en cada nodo que atraviesan. Por otro lado, cuando la cantidad de paquetes por segundo enviados por un socket excede el ancho de banda disponible, se producen congestiones en la red, con la posibilidad de que se incremente la tasa de paquetes perdidos. Estas características, entre otras, hacen que modelar la red de comunicación sea muy difícil. Sin embargo, un modelo aproximado de Internet está caracterizado por los paquetes retardados y los paquetes perdidos. Por lo general estos parámetros son usualmente medidos en tiempos de “round trip” (viaje de ida y vuelta de un paquete) y por la tasa de paquetes perdidos.

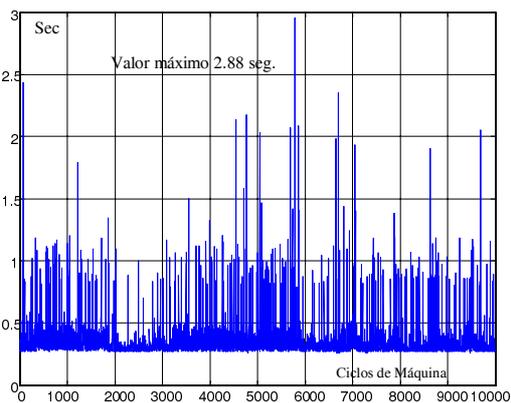


Figura 3: Retardo de Round Trip en la red durante la realización del experimento

Las figuras 3 y 4 presentan el retardo de round trip medido con en la conexión entre el DISAM y el Instituto de Automática. Es claro que este valor dependerá de muchos factores como la hora de conexión y el día de la semana en que se realiza la misma. Cabe aclarar que estos datos se corresponden con los existentes en el momento en que se realizaron

las experiencias y por ello se presentan aquí. Como puede verse en esta gráfica el valor del retardo de round trip ronda los 300 mseg, y se presentan picos que pueden alcanzar valores de hasta casi 3 segundos.

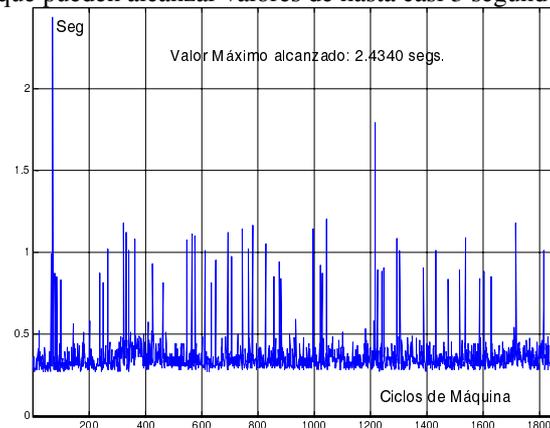


Figura 4: Retardo de Round Trip en una conexión nocturna en Madrid

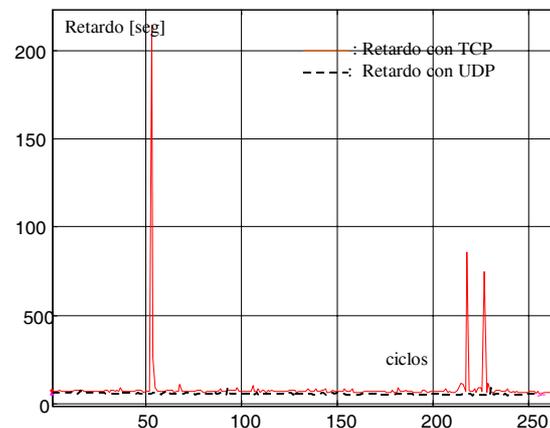


Figura 5: Retardo medido con el NTP usando TCP y UDP entre Brasil y Valladolid

En las figuras 5 y 6 se presentan los datos medidos entre la ciudad de Valladolid y la de Vitoria en Brasil. En este caso se el protocolo NTP permite medir el retardo de ida y vuelta por separado. Es digno de destacarse que este protocolo provee una medida menos ruidosa aunque el valor promedio es semejante al obtenido para el caso anterior. También aquí se comparan los valores obtenidos usando como protocolo de comunicación tanto a TCP como a UDP. Respecto a esto puede decirse que el protocolo UDP presenta valores más estables que el TCP dando una mejor medida. Estas mediciones fueron realizada a las 18:00 hs de España.

3 ESTRUCTURA DE COMPENSACIÓN

Basándose en el Predictor de Smith [5] se diseñó una estructura de compensación del retardo de comunicación. Dicha estructura se presenta con detalle en [4]. En la estación local del sistema se

incorporó un modelo de la estación remota y en la figura 7 se presenta un esquema de la estructura propuesta donde $\hat{\cdot}$ significa valor estimado.

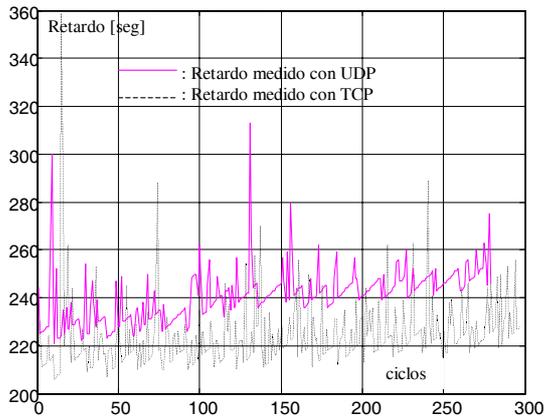


Figura 6: Retardo medido con NTP usando TCP y UDP entre Valladolid y Brasil

Como desde la estación remota real se recibe información de posición y de fuerza, esas mismas señales deben ser generadas por el modelo. Por lo tanto no sólo se requiere del modelo del robot remoto sino también del medio sobre el cual éste está interactuando.

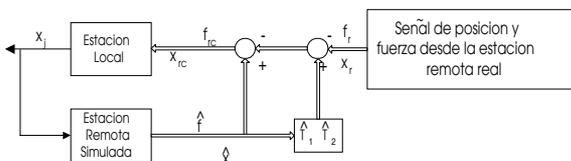


Figura 7: Esquema de la Estación Local del Sistema de Teleoperación

En la figura 7, x_i es la consigna de referencia que el operador humano envía a la estación remota, x_r y f_r son las señales de posición y fuerza de interacción que son realimentadas desde la estación remota hacia la estación local; \hat{x} y \hat{f} son las estimas de las señales x_r y f_r respectivamente; x_{rc} y f_{rc} son las señales compensadas que son enviadas al operador. T_1 y T_2 son los retardos de tiempo que sufren los datos y las imágenes visuales, respectivamente. Este dato no es sencillo de obtener por lo que en esta primera etapa se ha considerado el valor medio del retardo de round trip que sufren los datos.

La estructura de compensación también contempla, la incorporación de un modelo de la estación local en el sitio remoto. Sin embargo, debido a la complejidad de obtener el modelo del manipulador local, esta parte de la estructura de compensación no se ha implementado.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

La implementación del sistema se realizó en Visual C++. Tal como se mencionara, la conexión con el manipulador local se realiza utilizando la plataforma cerrada PLATERO. Los comandos enviados por el operador humano al robot remoto son también enviados al simulador local con el que cuenta el operador a modo de predictor. En las figuras que se presentan a continuación se podrán observar tanto las posiciones del simulador local como las del simulador remoto.

En las figuras 8 y 9 se presentan los resultados experimentales obtenidos al realizar la teleoperación teniendo como estación remota al simulador del robot remoto.

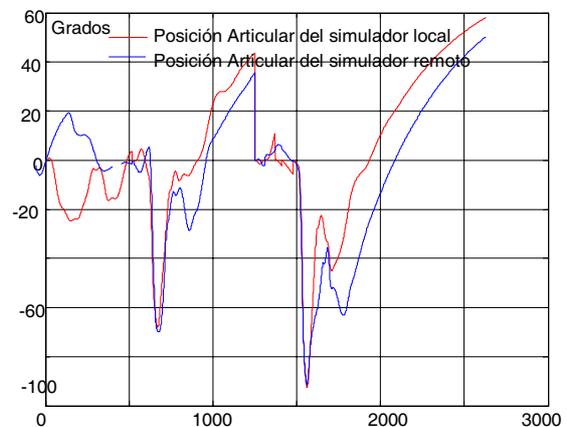


Figura 8: Posición Real del manipulador local y remoto

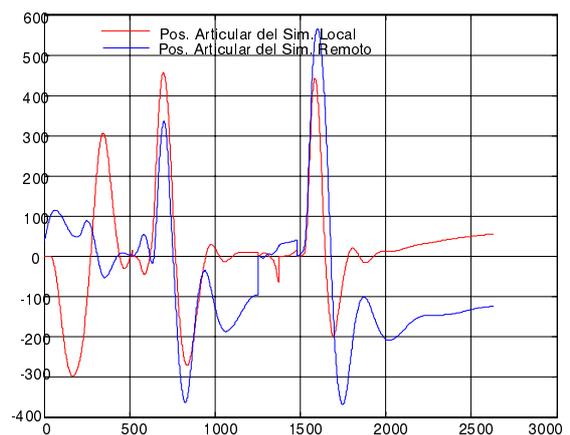


Figura 9: Posición Real del manipulador local y el remoto.

Las figuras 10 y 11 presentan los resultados obtenidos al compensar el sistema. Comparando ambos resultados, es notable la mejora en el desempeño que produce la incorporación de la estructura de compensación. Además puede observarse también que la señal correspondiente a la compensación se adelanta a la señal del robot remoto

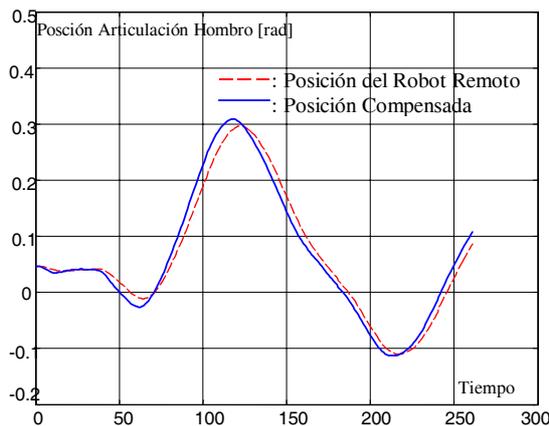


Figura 10: Posición Real y Compensada de la Articulación de Hombro.

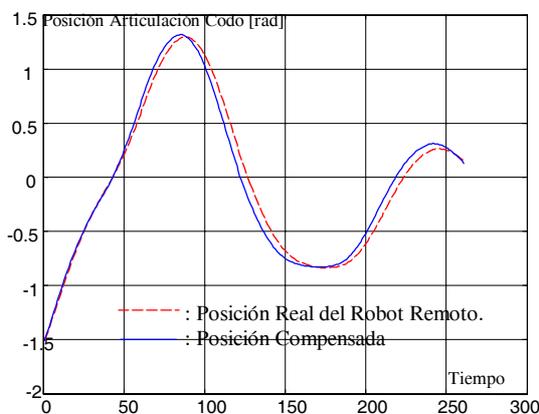


Figura 11: Posición Real y Compensada de la Articulación de Codo.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una estructura de compensación del retardo de tiempo para un sistema de teleoperación a través de Internet. El sistema de teleoperación tiene como estación remota el laboratorio de robótica del Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina y como estación local el laboratorio de robótica del Departamento de Automática, Electrónica e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, España. El robot remoto es un manipulador industrial tipo Scara de la firma BOSCH, mientras que el manipulador local es cartesiano y pertenece a la firma CYBERNET. La comunicación entre ambas estaciones se realiza a través de Internet y TCP/IP fue el protocolo de comunicación empleado para tal conexión. Se realizó además la medición del retardo de transmisión mediante marcas de tiempo, usando el protocolo NTP para la sincronización de los relojes del sistema en cada extremo. Los resultados obtenidos al implementar la estructura de compensación presentada muestran el desempeño más que aceptable

del sistema de teleoperación considerando la variación del retardo de red.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración del Prof. Antonio Barrientos y del Ing. Adrián Mora por facilitarnos el uso de la plataforma PLATERO. Los autores también agradecer al CONICET, Consejo Nacional de Ciencia y Técnica de Argentina y a la Agencia Española de Cooperación Internacional.

Referencias

- [1] Brady K., T. J. Tarn. Internet Based Remote Teleoperation. Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. Belgium, May 1998. Pp 65-70.
- [2] Elhadj I, Xi N. y Liu Y. Real-Time control of Internet Based Teleoperation with Force Reflection. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Pp 3284-3289. San Francisco, CA. April 2000.
- [3] Fiorini P. y Oboe R. Internet-Based telerobotics: problems and approach. International Conference on Advanced Robotics (Icar'97). Monterrey, CA.
- [4] García C, Carelli R., Postigo J. y Morales B., "Time Delay Compensation for a Robotic Teleoperation System". Submitted to 4th IFAC International Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications. SICICA 2000. Buenos Aires-Argentina.
- [5] Marshall J.E. "Control of Time Delay Systems", The Institution of Electrical Engineers, London and New York. Peter Peregrinus Ltd. Stevenage, UK and New York", ISBN 0-906048-12-5.
- [6] Mills David L. On the Chronometry and Metrology of Computer Network Timescales and their Application to the Network Time Protocol. ACM Computer Communications Review 21, 5 (October 1991), 8-17.
- [7] Oboe R. Web-Interfaced, Force-Reflecting Teleoperation Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 48, No 6, December 2001.
- [8] Saucy P. and Mondada F. KephOnTheWeb: Open access to a mobile robot on the Internet. IEEE Robot Automation Mag. Vol 7 pp 41-47. Mar, 2000.
- [9] Taylor K. And Dalton B. Internet robots: A new robotics niche. IEEE Robot Automat. Mag., vol 7 pp 27-37, Mar. 2000.