

EXPERIENCIAS EN TELEOPERACIÓN BILATERAL DE ROBOTS

Emanuel Slawiński, José Francisco Postigo y Vicente Mut

*Instituto de Automática (INAUT). Universidad Nacional de San Juan.
Av. Libertador San Martín 1109 (oeste). J5400ARL. San Juan, Argentina.
e-mail: {slawinski, jpostigo, vmut}@inaut.unsj.edu.ar*

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema aplicado a la teleoperación de robots a través de Internet. Además, se propone un modelo del retardo de tiempo de Internet, el cual se verifica experimentalmente a través de datos reales. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos de experiencias en teleoperación utilizando dos robots dispuestos en ciudades diferentes (Roma y Verona, Italia) distantes en 500 Km. y vinculados vía Internet. *Copyright © 2006 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Teleoperación bilateral, retardo de tiempo, protocolo UDP, Internet.

1. INTRODUCCIÓN

La teleoperación de sistemas robóticos permite a un operador humano transferir su capacidad y destreza para realizar una tarea determinada en ambientes remotos. En general, los sistemas de teleoperación están compuestos por un sitio local, donde un operador maneja un manipulador denominado maestro; un sitio remoto, donde un manipulador llamado esclavo —el cual sigue el movimiento del maestro— interactúa con el mundo físico; y un canal de comunicación que vincula ambos sitios. El maestro es utilizado para generar comandos (usualmente comandos de posición o velocidad) hacia el manipulador remoto, mientras que la fuerza, debida a la interacción dinámica entre el esclavo y el medio, es realimentada hacia el operador humano, lo cual mejora el desempeño de una gran cantidad de tareas en interacción (Sheridan, 1992). Tal vez, el caso más interesante sea el uso de Internet como medio de comunicación entre los sitios local y remoto de un sistema de teleoperación, teniendo en cuenta su uso masivo a través del mundo con costos de transmisión de datos accesibles. La posibilidad de intercambiar datos sobre información táctil y de movimiento podría permitir un sentido real de telepresencia, con capacidad de tocar objetos y personas a distancia. Así, un amplio rango de aplicaciones se puede abrir para esta tecnología, incluyendo telemedicina, exploración, telemanufactura, entretenimiento, tareas cooperativas en ambientes peligrosos, etc. (Elhajj, *et al.*, 2003). Sin embargo, esta tecnología (Internet) presenta

problemas para el desarrollo de aplicaciones de teleoperación de robots a distancia, ya que el mismo adiciona retardos variantes en el tiempo con componentes aleatorias entre paquetes distorsionando las señales de comandos y de realimentación del sistema de teleoperación. La presencia de retardo de tiempo en el sistema puede inducir inestabilidad o mal desempeño en el mismo (Niculescu, 2001), (Richard, 2003). Además, debido a la alta variabilidad de las propiedades de Internet (por ejemplo, del retardo de tiempo) es conveniente estimar algunas características del canal de comunicación con el fin de utilizar las mismas en el diseño de estrategias de control para estos sistemas (Oboe y Fiorini, 1998). Hasta el momento, se han propuesto diferentes estrategias de control para teleoperación de robots, las cuales pueden dividirse en: teleprogramación (Funda, 1992; Hernando, 2003) y control supervisor (Sheridan, 1992; Brady y Tarn, 2001), donde el operador humano supervisa la tarea generando comandos de alto nivel enviados hacia algoritmos de planeamiento y control que actúan sobre el robot remoto, la desventaja de este método es que no se realiza una teleoperación continua; display predictivos (Bejczy, *et al.*, 1990; Kikuchi, 1998), en donde se visualiza al operador un display gráfico con el robot remoto, entonces el operador humano genera la tarea interactuando con el ambiente gráfico, el principal problema es que se debe poseer un excelente modelo del robot remoto y su entorno lo cual hace que esta metodología sea empleada principalmente en espacio libre; compensación del retardo basada en transmitir las conocidas variables

de onda (Anderson y Spong, 1989; Niemeyer y Slotine, 1991; Chopra y Spong, 2003) de forma de asegurar la pasividad del canal de comunicación a consta de perder transparencia (Arcara y Melchiorri, 2002), lo cual dificulta la ejecución de una tarea dada; y otras estrategias basadas en el uso de: control de impedancia remota (Kim, *et al.*, 1992), filtrado de señal (Ueda y Yoshikawa, 2004), control predictivo (Sheng y Spong, 2004), control basado en eventos (Elhajj, *et al.*, 2003), entre otras.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema para teleoperación bilateral de robots, remarcándose los aspectos más importantes a tener en cuenta en aplicaciones basadas en Internet. Además, se presenta una estructura de control estable para teleoperación bilateral de sistemas lineales con retardo variante en el tiempo como así también un modelo del retardo de tiempo de Internet verificándose el mismo mediante el procesamiento de datos reales. Finalmente, se realizó una experiencia de teleoperación que consistió en manejar un robot vía Internet entre dos ciudades de Italia (Verona y Roma) distantes en 500 Km.

El trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 describe la notación utilizada en este trabajo. En la sección 3 se propone una condición de estabilidad para sistemas lineales con retardo variante en el tiempo. La sección 4 presenta los modelos utilizados para describir la teleoperación de robots manipuladores, donde se asume que los mismos poseen una alta relación de reducción. Las secciones 5 y 6 presentan la estructura de control propuesta junto con el análisis de estabilidad del sistema de teleoperación diseñado. La sección 7 introduce el protocolo UDP, el diseño del paquete de datos y el análisis del ancho de banda, los cuales son aspectos importantes para el diseño y desarrollo de un sistema de tele-robótica. En la sección 8 se presentan las características más importantes de la estructura de software desarrollada. La sección 9 muestra la identificación y comprobación mediante datos reales del modelo propuesto de Internet. La sección 10 presenta el resultado de una experiencia de teleoperación utilizando dos robots manipuladores conectados a través de Internet entre dos ciudades diferentes. Finalmente, en la sección 11 son dadas las conclusiones generales de este trabajo.

2. NOTACIÓN

La siguiente notación es utilizada en este trabajo: $h(t) \in \mathbb{R}^+$ denota el retardo de tiempo. Se asume que el retardo es finito y $\dot{h}(t) < 1$. Aquí, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ y $\|x\|$ es la norma-2 de x . Si B es una matriz o vector entonces B^T es el transpuesto de B , $|A|$ denota la norma-2 de $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ definida por $|A| = \sup_{|x|=1} |Ax|$, $\mu(A)$ denota la

medida de la matriz real A (dicha medida es derivada de la norma-2) calculada como $\mu(A) = \frac{1}{2} \max_{\lambda_i} (\lambda_i(A^T + A))$, donde $\lambda_i(A^T + A)$ son los autovalores de $A^T + A$. Por otro lado, x_t (para un instante dado de tiempo t) es la función definida por $x_t(\theta) = x(t+\theta)$ para $\theta \in [-h(t), 0]$, por ejemplo: $x_t(0) = x(t)$, $x_t(-h) = x(t-h)$; y la norma $\|\cdot\|$ es definida por $\|x_t\| = \sup_{\theta \in [-h(t), 0]} |x(\theta)|$. Además, $(C, \|\cdot\|)$ es el espacio Banach de funciones continuas $[t-h(t), t]$ en el instante de tiempo t , y $C_H := \{\psi \in C : \|\psi\| \leq H\}$.

3. ESTABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES CON RETARDO DE TIEMPO

Se considera la ecuación diferencial funcional con retardo de tiempo dada por,

$$\dot{x}_{(t)} = f(t, x_t), \quad (1)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$, $x_t \in C$, $t, t_0 \in \mathbb{R}^+$, y $f: \mathbb{R}^+ \times C \rightarrow \mathbb{R}^n$ con $f(t, 0) = 0, \forall t \geq t_0$. Aquí, f es continua y toma conjuntos acotados de $\mathbb{R}^+ \times C$ en conjuntos acotados de \mathbb{R}^n . Se asume que existe una solución $x(t; t_0, \psi_0)$ de (1), la cual depende continuamente de los datos iniciales $[t_0, \psi_0]$, donde $\psi_0 = x(t_0 + \theta)$ para $\theta \in [-h(t_0), 0]$ con $\psi_0 \in C_H$. Condiciones suficientes implicando existencia, unicidad y dependencia continua pueden ser encontradas en la teoría estándar (Burton, 1985; Kolmanovskii y Myshkis, 1999). Desde aquí en adelante se denotará la norma de la solución por $\|x(t; t_0, \psi_0)\| = |x_t(0)|$.

Teorema 1 (Krasovskii, 1963). Se supone que la función $f: \mathbb{R}^+ \times C \rightarrow \mathbb{R}^n$ toma conjuntos acotados de C en conjuntos acotados de \mathbb{R}^n , y que $u(\cdot), v(\cdot)$ y $w(\cdot)$ son funciones continuas, positivas, no-decrescentes y escalares. Si existe un funcional continuo $V: \mathbb{R}^+ \times C \rightarrow \mathbb{R}^+$ que cumpla con:

$$u(|x_t(0)|) \leq V(t, x_t) \leq v(|x_t|), \quad (2)$$

$$\dot{V}(t, x_t) < -w(|x_t(0)|), \quad (3)$$

donde $\dot{V}(t, x_t)$ es la derivada respecto del tiempo de $V(t, x_t)$ a lo largo de las trayectorias de (1); entonces la solución $x_t = 0$ es uniformemente asintóticamente estable.

3.1 Estabilidad de sistemas lineales con retardo variante en el tiempo

Se considera un sistema lineal con retardo de tiempo representado por,

$$\dot{x}_{(t)} = Ax_{(t)} + Bx_{(t-h)}, \quad (4)$$

donde $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $x_{(t)} \in \mathbb{R}^n$, y $0 \leq h_{(t)} \leq h_m \in \mathbb{R}^+$, $\dot{h}_{(t)} < \tau < 1, \forall t \geq t_0$, con $\tau \in (-\infty, 1)$.

Teorema 2. *El origen del sistema lineal con retardo variante en el tiempo representado por (4) es asintóticamente estable si,*

$$\mu(A) + \frac{1 - \frac{1}{2}\tau}{1 - \tau} |B| < 0 \quad (5)$$

donde $|B|$ es la norma-2 de la matriz B , $\mu(A)$ es la medida de la matriz A y la derivada respecto al tiempo del retardo verifica $\dot{h}_{(t)} < \tau < 1$.

Prueba. Se propone un funcional $V: \mathfrak{R}^+ \times C \rightarrow \mathfrak{R}^+$, basado en la teoría de Lyapunov-Krasovskii, como sigue,

$$V(t, x_t) = \frac{1}{2} x_{(t)}^T x_{(t)} + \frac{1}{2} \frac{|B|}{1 - \tau} \int_{t-h}^t x_{(\theta)}^T x_{(\theta)} d\theta > 0, \quad (6)$$

donde el funcional propuesto incorpora información de la dinámica con retardo ($|B|$).

A partir de (6) y considerando que el retardo h es acotado ($h_{(t)} \leq h_m$) y que $x^T x = \|x\|^2 \leq \|x\|^2$ (usando propiedades conocidas de norma), entonces el funcional propuesto $V(t, x_t)$ verifica la condición (2),

$$\frac{1}{2} \|x_{(t)}(0)\|^2 \leq V(t, x_t) \leq \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|B| h_m}{1 - \tau} \right) \|x_{(t)}\|^2, \quad (7)$$

La derivada respecto al tiempo de $V(t, x_t)$ a lo largo de las trayectorias del sistema (4) es,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, x_t) &= \frac{1}{2} x_{(t)}^T [Ax_{(t)} + Bx_{(t-h)}] + \frac{1}{2} [Ax_{(t)} + Bx_{(t-h)}]^T x_{(t)} \\ &+ \frac{1}{2} \frac{|B|}{1 - \tau} x_{(t)}^T x_{(t)} - \frac{1}{2} |B| \frac{1 - \dot{h}_{(t)}}{1 - \tau} x_{(t-h)}^T x_{(t-h)}. \end{aligned}$$

Organizando términos y considerando que $x_{(t)}^T Bx_{(t-h)} = [x_{(t)}^T Bx_{(t-h)}]^T$ es un número real ($B \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $x \in \mathfrak{R}^n$), entonces,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, x_t) &= x_{(t)}^T \left[\frac{A + A^T}{2} + \frac{1}{2} \frac{|B|}{1 - \tau} I \right] x_{(t)} + x_{(t)}^T Bx_{(t-h)} \\ &- \frac{1}{2} |B| \left[\frac{1 - \dot{h}}{1 - \tau} \right] x_{(t-h)}^T x_{(t-h)}, \end{aligned}$$

donde $I \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es la matriz identidad. Usando la inequación $x_1^T Bx_2 \leq \frac{1}{2} |B| x_1^T x_1 + \frac{1}{2} |B| x_2^T x_2$ en $\dot{V}(t, x_t)$, con

$x_1 = x_{(t)}$ y $x_2 = x_{(t-h)}$, se obtiene lo siguiente,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, x_t) &\leq x_{(t)}^T \left[\frac{A + A^T}{2} + \frac{1}{2} \frac{|B|}{1 - \tau} I + \frac{1}{2} |B| I \right] x_{(t)} \\ &+ x_{(t-h)}^T \left[\frac{1}{2} |B| I \left(1 - \frac{1 - \dot{h}}{1 - \tau} \right) \right] x_{(t-h)}. \end{aligned}$$

Ahora, se utiliza una propiedad de la medida de la matriz dada por $x_{(t)}^T 0.5[A + A^T] x_{(t)} \leq x_{(t)}^T [\mu(A)I] x_{(t)}$ en $\dot{V}(t, x_t)$ como sigue,

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, x_t) &\leq x_{(t)}^T \left[\mu(A)I + \left(\frac{1 - \frac{1}{2}\tau}{1 - \tau} \right) |B|I \right] x_{(t)} \quad (8) \\ &+ x_{(t-h)}^T \left[\frac{1}{2} |B| I \left(1 - \frac{1 - \dot{h}}{1 - \tau} \right) \right] x_{(t-h)}. \end{aligned}$$

El segundo término del miembro derecho en (8) es definido negativo porque $\dot{h}_{(t)} < \tau < 1$. A partir de (8), la condición (3) es satisfecha si se cumple (5). Por lo tanto, (7) y (8) satisfacen las condiciones de estabilidad requeridas por el Teorema 1, y en consecuencia, el origen del sistema (4) es asintóticamente estable. Δ

A continuación, se aplica la propiedad conocida dada por $\text{Re } \lambda_i(X) \leq \mu(X)$ en (5) como sigue:

$$-\mu(A) > |B| \left[\frac{1 - \frac{1}{2}\tau}{1 - \tau} \right] \rightarrow -\text{Re } \lambda(A) > |B| \left[\frac{1 - \frac{1}{2}\tau}{1 - \tau} \right]. \quad (9)$$

La condición de estabilidad alcanzada en (9) es independiente de la amplitud del retardo de tiempo y la misma depende de tres factores: la parte real de los autovalores de A , es decir de la dinámica sin retardo del sistema, la norma $|B|$ de la dinámica con retardo del sistema y la derivada máxima τ del retardo de tiempo. Además, a medida que más alta es la derivada máxima τ del retardo de tiempo, más fuerte debe ser la estabilidad del sistema sin retardo de tiempo $\dot{x} = Ax$ para asegurar la estabilidad del sistema con retardo variante en el tiempo.

4. MODELO DE UN SISTEMA DE TELEOPERACIÓN

Los sistemas de teleoperación son representados por ecuaciones diferenciales con retardo de tiempo. Esta sección describe un sistema de teleoperación bilateral para robots manipuladores que poseen una alta relación de reducción, y por lo tanto, los mismos pueden representarse con modelos lineales. La figura 1 muestra un diagrama de bloques general del sistema compuesto por un sitio local representado por una admitancia y_l , donde un operador humano recibe realimentación de fuerza y genera referencias de posición a través de un dispositivo hand-controller (como por ejemplo un joystick); un sitio remoto representado por una impedancia z_r , donde un robot manipulador interactúa con su entorno; y un medio de comunicación, el cual vincula ambos sitios, introduciendo un retardo de tiempo en el sistema.

La estrategia de control propuesta incorpora controladores en los sitios local y remoto, y una estrategia de compensación del retardo de tiempo. Las señales principales del sistema son la fuerza y la posición de ambos sitios, local (f_l, x_l) y remoto (f_r, x_r) , respectivamente, tanto como la referencia de

fuerza f_d generada por el operador humano, la cual dependerá del trabajo o tarea a realizar y la misma se asume constante.

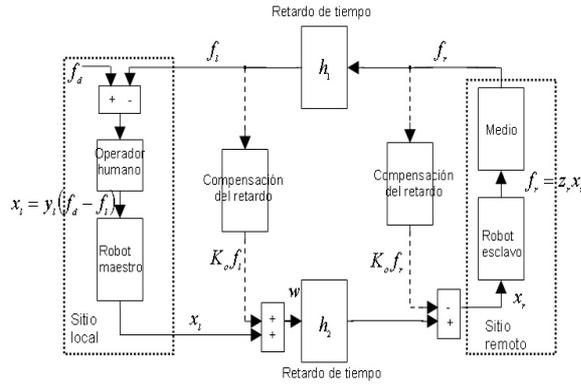


Figura 1. Diagrama en bloques general del sistema.

La admitancia del sitio local y la impedancia del sitio remoto (y_l y z_r) son representados por modelos lineales y relacionan la posición y fuerza de ambos sitios,

$$x_{l(t)} = y_{l(p)} [f_d - f_{l(t)}], \quad (10)$$

$$f_{r(t)} = z_{r(p)} x_{r(t)}, \quad (11)$$

Donde p es el operador derivación $\frac{d}{dt}$. Dichos

modelos pueden ser expresados como un cociente de polinomios como sigue:

$$y_{l(p)} = \frac{y_{l1(p)}}{y_{l2(p)}} = \frac{a_0 + a_1 p + \dots + a_{l_1} p^{l_1}}{b_0 + b_1 p + \dots + b_{l_2} p^{l_2}}, \quad (12)$$

$$z_{r(p)} = \frac{z_{r1(p)}}{z_{r2(p)}} = \frac{c_0 + c_1 p + \dots + c_{r_1} p^{r_1}}{d_0 + d_1 p + \dots + d_{r_2} p^{r_2}}, \quad (13)$$

Donde l_1, l_2, r_1, r_2 son números enteros positivos y verifican que $l_2 \geq l_1$ y $r_2 \geq r_1$. La ganancia estática de la admitancia local y de la impedancia remota son $G_{y_l} = \frac{a_0}{b_0}$ y $G_{z_r} = \frac{c_0}{d_0}$, respectivamente. Por otro lado, los controladores dispuestos en los sitios local y remoto tienen parámetros K_i , con $i = 1, 2, \dots, l_2 + r_2$. De aquí en más, dichos controladores son considerados dentro de los modelos de admitancia local e impedancia remota.

Por otro lado, el modelo que se propone para describir el retardo $h(t)$ de Internet se compone de una constante M , la cual depende de la distancia entre los sitios local y remoto y se puede estimar como el valor medio de $h(t)$; una componente $r(t)$ variante en el tiempo, de baja frecuencia, con derivada primera acotada y de una señal $v(t)$ de ruido blanco con distribución gaussiana y varianza $\rho(t)$, esto es:

$$h(t) = h_{1(t)} + h_{2(t)} = M + r(t) + v(t), \quad (14)$$

donde el retardo de tiempo $h(t)$ es la suma del retardo de 'ida' $h_{2(t)}$ (desde el sitio local hacia el sitio remoto) y de un retardo de 'vuelta' $h_{1(t)}$ (desde el sitio remoto hacia el sitio local), lo cual es representado gráficamente en la figura 1.

5. COMPENSACION PROPUESTA DEL RETARDO DE TIEMPO

Esta sección describe la compensación del retardo propuesta (Figura 1). Esta compensación no modifica la fuerza realimentada desde el sitio remoto. Además, el sitio local envía hacia el sitio remoto una señal $w(t)$, la cual combina la referencia de posición generada por el operador humano con la fuerza que siente el mismo en dicho instante. En el sitio remoto, la fuerza presente es utilizada para modificar la señal $w_{(t-h_2(t))}$ y establecer la referencia de posición $x_{r(t)}$ aplicada en el sitio remoto. Las ecuaciones que definen la compensación propuesta del retardo son las siguientes:

$$w(t) = x_{l(t)} + K_0 f_{l(t)}, \quad (15)$$

$$x_{r(t)} = w_{(t-h_2(t))} - K_0 f_{r(t)}, \quad (16)$$

$$f_{l(t)} = f_{r(t-h_1(t))}, \quad (17)$$

donde $x_{l(t)}$ es la referencia de posición generada en el sitio local; $f_{l(t)}$ es la fuerza realimentada desde el sitio remoto; $f_{r(t)}$ es la fuerza de interacción en el sitio remoto; $w(t)$ es la señal enviada desde el sitio local hacia el sitio remoto; $h_{2(t)}$ y $h_{1(t)}$ son los retardos de ida y vuelta del canal de comunicación; y K_0 es un operador lineal de diseño de la estrategia de compensación propuesta.

A partir de (16), e introduciendo (15) y (17) en dicha expresión y además considerando (14), se tiene,

$$x_{r(t)} = x_{l(t-h_2(t))} + K_0 f_{r(t-h(t))} - K_0 f_{r(t)}, \quad (18)$$

Luego, sustituyendo (10) dentro de (18), queda,

$$x_{r(t)} = -y_l f_{l(t-h_2(t))} + K_0 f_{r(t-h(t))} - K_0 f_{r(t)} + y_l f_{d(t-h_2(t))}, \quad (19)$$

Introduciendo (17) en (19), y considerando (14) y la referencia de fuerza f_d constante, se puede expresar que,

$$x_{r(t)} = -y_l f_{r(t-h(t))} + K_0 f_{r(t-h(t))} - K_0 f_{r(t)} + y_l f_{d(t-h_2(t))}, \quad (20)$$

Si se introduce (11) en (20) y se re-organizan términos en la Ec. resultante se obtiene lo siguiente,

$$x_{r(t)} = (-y_l + K_0) z_r x_{r(t-h(t))} - K_0 z_r x_{r(t)} + y_l f_{d(t-h_2(t))},$$

Finalmente, a partir de la última ecuación, se obtiene,

$$(1 + K_0 z_r) x_{r(t)} = [(-y_l + K_0) z_r] x_{r(t-h(t))} + y_l f_d(t-h_2(t)), \quad (21)$$

De (21), se infiere que el compensador óptimo se obtiene cuando $K_0 = y_l$, haciendo nulo el primer término del miembro derecho de (21), obteniéndose la misma dinámica a lazo cerrado que si no existe retardo de tiempo. Por lo tanto, si el sistema sin retardo de tiempo es estable, entonces el sistema con retardo de tiempo también será estable. Este resultado de estabilidad está basado sobre el conocimiento exacto de la admitancia del sitio local y_l . En la sección siguiente se desarrolla el análisis de estabilidad cuando se conoce solamente la ganancia estática de la admitancia del sitio local, además la entrada $f_d(t-h_2)$ será tratada de aquí en adelante como f_d ya que la misma es constante y se encuentra fuera del lazo cerrado del sistema con retardo (ver (21)).

6. ESTABILIDAD DEL SISTEMA DE TELEOPERACION PROPUESTO

Considere un sistema de teleoperación bilateral (Figura 1) compuesto por dos sistemas lineales vinculados por un canal de comunicación. La estabilidad del sistema de teleoperación será analizada considerando la estrategia de control propuesta. La compensación del retardo es representada por un modelo lineal dado por,

$$K_0 = \frac{k_{o1}}{k_{o2}} = \frac{e_0 + e_1 p + \dots + e_n p^{o_1}}{f_0 + f_1 p + \dots + f_{o_2} p^{o_2}}, \quad (22)$$

con ganancia estática $G_{K_0} = \frac{e_0}{f_0}$. A partir de (21), e introduciendo (12), (13) y (22), se tiene,

$$x_{r(t)} \left[1 + \frac{k_{o1} z_{r1}}{k_{o2} z_{r2}} \right] = \left[\begin{array}{c} -y_{l1} + \frac{k_{o1}}{k_{o2}} \\ y_{l2} \end{array} \right] \frac{z_{r1}}{z_{r2}} x_{r(t-h(t))} + \frac{y_{l1}}{y_{l2}} f_d$$

Organizando la última ecuación se tiene,

$$x_{r(t)} \left[\frac{k_{o1} z_{r1} + k_{o2} z_{r2}}{k_{o2} z_{r2}} \right] = \left[\frac{-y_{l1} k_{o2} + y_{l2} k_{o1}}{y_{l2} k_{o2}} \right] \frac{z_{r1}}{z_{r2}} x_{r(t-h(t))} + \frac{y_{l1}}{y_{l2}} f_d$$

Si multiplicamos miembro a miembro de la expresión anterior por $y_{l2} k_{o2} z_{r2}$, se puede escribir que,

$$x_{r(t)} y_{l2} [k_{o1} z_{r1} + k_{o2} z_{r2}] = [-y_{l1} k_{o2} + y_{l2} k_{o1}] z_{r1} x_{r(t-h(t))} + k_{o2} y_{l1} z_{r2} f_d \quad (23)$$

Suposición A-1: Los errores entre y_l y el modelo K_0 utilizado por la estrategia de compensación son acotados como sigue,

$$[-y_{l1} k_{o2} + y_{l2} k_{o1}] z_{r1} = g_1 p + g_2 p^2 + \dots + g_q p^q, \quad (24)$$

donde $q = \max(l_1 + o_2 + r_1, l_2 + o_1 + r_1)$ y $\sum_{i=1}^{i=q} g_i^2 \leq \beta^2$, con $\beta \in \mathcal{R}^+$.

Lema: La Ec. (24) se cumple si $G_{y_l} = G_{K_0}$.

Prueba: A partir de (12), (13) y el modelo de K_0 , se puede escribir lo siguiente:

$$[-y_{l1} k_{o2} + y_{l2} k_{o1}] z_{r1} = g_0 + g_1 s + \dots + g_q s^q,$$

donde $g_0 = (-a_0 f_0 + b_0 e_0) c_0$. Se supone que $G_{K_0} = G_{y_l}$, entonces, $\frac{e_0}{f_0} = \frac{a_0}{b_0} \Rightarrow -a_0 f_0 + b_0 e_0 = 0 \Rightarrow g_0 = 0$, y por lo tanto, la Ec. (24) es válida cuando $G_{y_l} = G_{K_0}$. Δ

Luego, a partir de (23) y considerando el grado de los polinomios numerador y denominador de la admitancia e impedancia de los sitios local (12) y remoto (13), y la suposición A-1 (24), resulta,

$$x_{r(t)} (v_{l_2 + o_2 + r_2} p^{l_2 + o_2 + r_2} + \dots + v_1 p + v_0) - d f_d = (g_q p^q + \dots + g_1 p) x_{r(t-h(t))}$$

donde $d = f_0 a_0 d_0$, debido a que los demás términos de $k_{o2} y_{l1} z_{r2} f_d$ son nulos ya que la referencia de fuerza f_d es constante. Definiendo $n = l_2 + o_2 + s_2$ y estableciendo $v_n = 1$ (para simplificar el análisis posterior), la última Ec. Se puede expresar de la siguiente manera,

$$\left(x_{r(t)} - \frac{d}{v_0} f_d \right) (p^n + v_{n-1} p^{n-1} + \dots + v_1 p + v_0) = (g_q p^q + \dots + g_1 p) x_{r(t-h(t))} \quad (25)$$

Los valores de v_i para $i = 0, 1, \dots, n-1$ son los coeficientes del polinomio $[k_{o2} z_{r2} + k_{o1} z_{r1}] y_{l2}$, donde a partir de (12), (13) y (22) se tiene que $v_0 = b_0 (f_0 d_0 + e_0 c_0)$. Utilizando la expresión de d y v_0 se puede establecer lo siguiente:

$$\frac{d}{v_0} f_d = \frac{f_0 a_0 d_0}{b_0 (f_0 d_0 + e_0 c_0)} f_d$$

Si en la última ecuación, se divide numerador y denominador por $f_0 d_0$ y luego se introducen la ganancias estáticas $G_{y_l} = \frac{a_0}{b_0}$, $G_{z_r} = \frac{c_0}{d_0}$ y $G_{K_0} = \frac{e_0}{f_0}$ de los sitios local, remoto y del modelo K_0 , respectivamente, se obtiene lo siguiente,

$$\frac{d}{v_0} f_d = \frac{G_{y_l}}{(1 + G_{z_r} G_{K_0})} f_d.$$

Como se supone que $G_{y_l} = G_{K_0}$, entonces se tiene que,

$$\frac{d}{v_0} f_d = \frac{G_{y_l}}{(1 + G_{K_0} G_{z_r})} f_d = \frac{G_{y_l}}{(1 + G_{y_l} G_{z_r})} f_d = G_{LC} f_d, \quad (26)$$

donde $G_{LC} = \frac{G_{y_l}}{1 + G_{z_r} G_{y_l}}$ es la ganancia estática del sistema a lazo cerrado.

El sistema dado por (25) se puede representar en forma matricial como (4), donde se define como estado $x^T = [x_r - G_{LC} f_d \quad \dot{x}_r \quad \ddot{x}_r \quad \dots \quad x_r^{n-1}]$ el error entre la posición del sitio remoto del sistema con retardo de tiempo y la posición en estado estacionario del sitio

remoto del sistema sin retardo de tiempo, cuya respuesta es tomada como referencia. Utilizando (26) y la definición del estado $x_{(t)}$, el sistema (25) se describe con el modelo representado por (4) con matrices A y BB^T (de orden $n \times n$) dadas por:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \\ v_0 & \dots & \dots & v_{n-1} \end{bmatrix} \quad BB^T = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \sum_{i=1}^q g_i^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Modificando los parámetros K_i de los controladores locales, y calibrando el modelo de compensación K_0 , es posible establecer la posición de los autovalores de la matriz A . Si éstos son diferentes entre sí, entonces existirán T y T^{-1} , tal que la matriz A puede ser expresada como $A = T^{-1}A_zT$, donde A_z es una matriz diagonal con los autovalores de A situados a la largo de dicha diagonal, y T es una matriz de transformación compuesta por los autovectores de A , los cuales son linealmente independientes. Tomando en cuenta la consideración anterior, el sistema puede ser expresado como,

$$\dot{z}_{(t)} = A_z z_{(t)} + B_z z_{(t-h(t))}, \quad (28)$$

donde $z = Tx$ y $B_z = TBT^{-1}$.

El primer término del miembro izquierdo de la condición de estabilidad propuesta en (9) verifica que:

$$\text{Re}(A_z) = \text{Re} \lambda(A). \quad (29)$$

Por otro lado, el segundo término de la condición de estabilidad (9), a partir de (27), la suposición A-1 y definiendo $\alpha := |T^{-1}| \cdot |T|$, se puede expresar como,

$$\frac{1-1/2\tau}{1-\tau} \|B_z\| \leq \frac{1-1/2\tau}{1-\tau} \|T\| \|B\| \|T^{-1}\| \leq \frac{1-1/2\tau}{1-\tau} \alpha \beta, \quad (30)$$

donde α dependerá del número de condición de la matriz de transformación T , y –si la misma está bien condicionada– el valor de α es próximo a uno.

Finalmente, sustituyendo (29) y (30) en (9) y reorganizando términos, se establece que el sistema es globalmente asintóticamente estable si,

$$\beta < -\text{Re} \lambda(A) \left[\frac{1-\tau}{1-1/2\tau} \right]. \quad (31)$$

La condición de estabilidad alcanzada (31) brinda una cota del error β del modelo del sitio local para asegurar que el sistema con retardo sea asintóticamente estable, esto es que $x_{(t)} \rightarrow 0$ a medida que $t \rightarrow \infty$. Dicha cota depende de la dinámica más lenta del sistema sin retardo de tiempo $\dot{x} = Ax$ y de la derivada máxima τ del retardo de tiempo. Si el error del modelo es menor que β , entonces se puede asegurar que el sistema arriba a un punto de equilibrio y además dicho punto es igual al

equilibrio alcanzado cuando no existe retardo de tiempo en el sistema.

7. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA TELE-ROBOTICA

A continuación se detallan algunos aspectos fundamentales para el desarrollo de un sistema de tele-robótica basado en Internet como medio de comunicación. Dichas características implican la elección de un protocolo de transmisión conveniente para este tipo de aplicaciones, el diseño del paquete de datos, y el análisis del requerimiento de ancho de banda.

7.1. Protocolo de transmisión UDP

Los sistemas de tele-robótica basados en Internet deben utilizar protocolos de comunicación para intercambiar datos en tiempo real entre el controlador y el proceso. En este trabajo, se utiliza el protocolo IP/UDP, el cual no requiere algún reconocimiento del mensaje entre los procesos de transmisión y recepción de paquetes de datos, y por lo tanto, no es ‘bloqueante’. Por otra parte, el protocolo UDP no garantiza la llegada de los datos a la computadora destino. En cambio, los mecanismos de TCP aseguran que los datos arriban al nodo destino pero los mismos no pueden ser omitidos, y por lo tanto, no se pueden implementar aplicaciones en tiempo real usando el protocolo TCP. El protocolo UDP, en cambio, es un protocolo conveniente para aplicaciones en tiempo real, el mismo permite el intercambio de ‘datagramas’ y ofrece un acceso más rápido a una red de computadoras (Comer, 1991). Aunque el uso del protocolo UDP para aplicaciones de tele-robótica basada en Internet es conveniente, estos sistemas presentan dificultades relacionadas a la amplitud del retardo de tiempo, que depende de la distancia entre nodos de la red; la fluctuación del retardo, que depende de la carga o congestión de la red y la pérdida de paquetes (Bolot, 1993).

7.2. Diseño del paquete de datos

El paquete de datos a transmitir se diseñó considerando la frecuencia necesaria para cada tipo de dato, (por ejemplo, información visual de posición a 20 cuadros por segundos), con el fin de minimizar la tasa de baudios requerida. El paquete de datos posee la siguiente información:

- 1 byte de control.
- 2 bytes x n para datos de control, donde n es el número de grados de libertad.
- 2 bytes para información auxiliar, como por ejemplo, información de posición, identificador de un paquete y retardo de tiempo medido en línea.

Además, se envía realimentación visual desde el sitio remoto hacia el sitio local. La tasa y tamaño de cada imagen es adecuada al ancho de banda disponible de acuerdo a la tasa de datos de control transmitida y la

tasa de transmisión máxima admisible por el canal de comunicación.

7.3. Requerimiento de ancho de banda

Es muy importante realizar el análisis del ancho de banda requerido de forma de que el mismo sea menor que el ancho de banda disponible dado por el canal de comunicación utilizado (por ejemplo: línea telefónica con 'modem' genérico, banda ancha, entre otros).

Un paquete IP/UDP sin datos tiene 28 bytes. Por otra parte, los datos de control para tres grados de libertad para un manipulador robótica utilizando el paquete de datos diseñado son 9 bytes. Además, la realimentación visual se realiza mediante la transmisión de imágenes JPEG de 4 kBytes con una resolución de 160x120 píxeles. La tasa de datos requerida (en baudios) para un intervalo de transmisión de 2 milisegundos es de 37 Kbytes/seg y de 7,4 Kbytes/seg si, en cambio, el intervalo es de 10 milisegundos (sin adicionar la información de imagen). Dependiendo de la conexión de red disponible, la elección del período de transmisión debe ser una relación de compromiso entre la dinámica del sistema y el uso de ancho de banda requerido, el cual puede ajustarse de acuerdo a la tasa de paquetes perdidos (Liu, *et al.* 2003).

8. DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA DE SOFTWARE PARA TELEOPERACIÓN

En esta sección se describen las características más importantes del sistema de software desarrollado, el cual sirve para la realización de experiencias en teleoperación de robots a través de una red local o red global de computadoras, como por ejemplo Internet. En esta estructura de software, se ejecutan cuatro programas: dos aplicaciones de interfase y control local de los dispositivos maestro y esclavo; y dos aplicaciones para interfase de comunicación entre ambos sitios del sistema de teleoperación conectados a través de una red de computadoras utilizando el protocolo IP/UDP. La figura 2 muestra un diagrama en bloques general de la estructura de software.

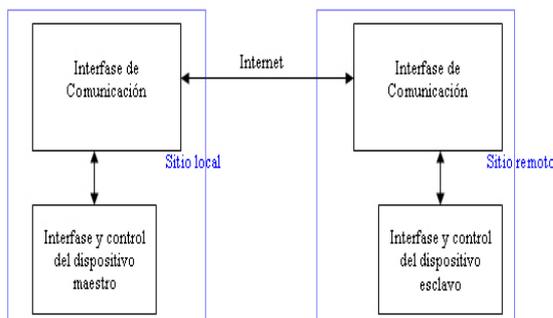


Figura 2. Estructura de software desarrollada.

Las características relevantes de la estructura de software desarrollada son las siguientes:

- Aplicaciones multi-hilo con prioridad dependiente de la tarea.

- Uso del protocolo IP/UDP.
- Alta velocidad de comunicación entre procesos utilizando memoria compartida.
- Uso de temporizadores multimedia de alta resolución.
- Período de muestreo de 2 milisegundos (estándar para control de manipuladores robóticos en tiempo real).
- Flexibilidad para utilizar nuevos dispositivos.
- Datos guardados al disco en línea.
- Hilos de transmisión y recepción de datos independientes.
- Medición del retardo de tiempo ida y vuelta en línea.
- Transmisión de imagen desde el sitio remoto hacia el sitio local.
- Lenguaje Visual C++ sobre plataformas Windows NT.

9. PROPIEDADES DEL CANAL DE COMUNICACIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del proceso para estimar la derivada máxima τ del retardo de tiempo $h_{(t)}$ (ver la condición de estabilidad dada por (30)) a partir de su componente de baja frecuencia $r_{(t)}$ (ver (14)) calculada a partir de datos medidos de Internet. La medición de datos se realizó sobre una conexión de dos computadoras a la red Internet entre las ciudades italianas de Roma (sitio local) y Verona (sitio remoto), distantes en 500 Km. La figura 3 muestra el retardo de tiempo medido 'ida y vuelta' $h_{(t)}$ medido en línea durante dos experimentos de teleoperación (A y B).

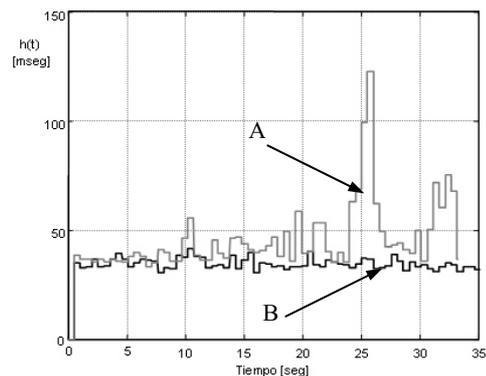


Figura 3. Retardo de tiempo $h_{(t)}$ entre los sitios local y remoto.

Por otra parte, el estimador de la componente variante $r_{(t)}$ de baja frecuencia del retardo de tiempo se implementó con un filtro pasa-bajo. El orden y frecuencia de corte del filtro digital pasa-bajo diseñado se determinó en forma empírica verificando que la señal $v_{(t)} = h_{(t)} - M - r_{(t)}$ represente aproximadamente una señal tipo ruido blanco con distribución gaussiana (Ecuación 1), y donde M es el valor medio de $h_{(t)}$. La figura 4 muestra la evolución

de la derivada respecto al tiempo de la señal estimada $r_{(t)}$, donde se obtuvo un valor máximo para $\frac{d}{dt}r_{(t)}$ de 0.5 y 0.1 para los experimentos A y B, respectivamente. La derivada máxima de esta señal es determinada por la calidad de la conexión presente durante cada experiencia, la cual depende del tráfico y congestión de la red.

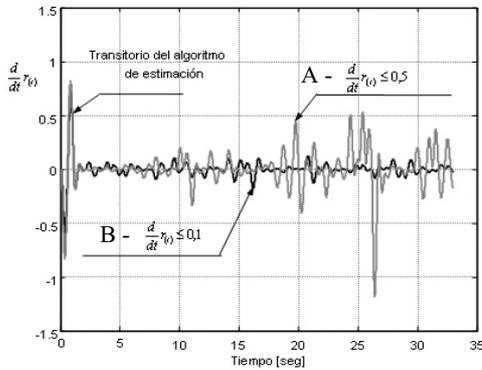


Figura 4. Evolución de la señal $\frac{d}{dt}r_{(t)}$.

Las figuras 5 y 6 muestran la auto-correlación y la función de densidad de probabilidad de la señal $v_{(t)}$ estimadas a partir de las muestras para ambos experimentos.

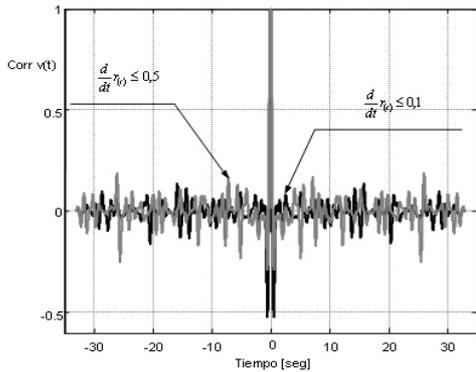


Figura 5. Auto-correlación de la componente $v_{(t)}$.

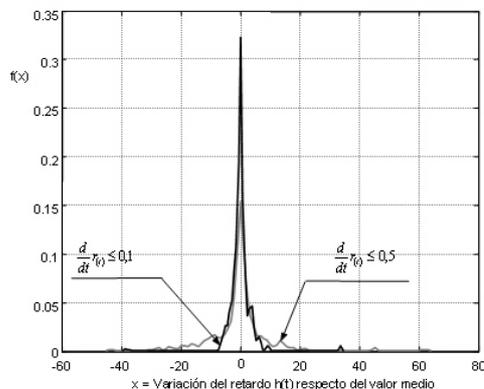


Figura 6. Función de distribución de $v_{(t)}$.

Se puede apreciar de las últimas figuras que la auto-correlación se asemeja a la auto-correlación de un ruido blanco y además, la función de distribución es aproximadamente tipo gaussiana, lo cual verifica experimentalmente el modelo propuesto en (14).

10. EXPERIENCIAS DE TELEOPERACIÓN DE ROBOTS A TRAVÉS DE INTERNET

A continuación, se muestran los resultados obtenidos aplicando el sistema desarrollado para teleoperación bilateral de robots. La experiencia de teleoperación fue realizada vía Internet entre las ciudades italianas de Roma (sitio local) y Verona (sitio remoto), ciudades separadas por 500 Km. Los dispositivos utilizados fueron un manipulador Cyberforce, situado en el sitio local y un robot PUMA 560, situado en el sitio remoto (figura 7). Ambos dispositivos poseen articulaciones tipo-rotacional q_1, q_2, q_3 . Además, la tensión aplicada sobre los actuadores del manipulador remoto PUMA 560 –proporcional a la fuerza ejercida por el manipulador remoto- es realimentada hacia el sitio local. La experiencia realizada consistió en ‘tocar a distancia’ una caja de madera y ejercer una determinada fuerza (decidido por el operador humano) sobre la misma, colocada en el espacio de trabajo del esclavo.



Figura 7. A la izquierda, el dispositivo Cyberforce, en Roma, Italia (sitio local) y a la derecha, el robot PUMA, en Verona, Italia (sitio remoto).

En la experiencia realizada se utilizó un período de muestreo de $T_s = 2[mseg]$. Los parámetros de los controladores locales de cada sitio del sistema de teleoperación diseñado fueron ajustados en forma independiente. En el sitio remoto, se implementó un controlador PD de posición con compensación de la gravedad. Los parámetros utilizados fueron $P = 0.16 \left[\frac{V}{rad} \right]$, $D = 0.064 \left[\frac{V}{rad/seg} \right]$ sobre cada articulación. No se utilizó en el control de posición parte integrativa para eliminar el error de estado estacionario ya que no se utilizaron sensores de fuerza. El rango de tensión para cada articulación sobre el esclavo fue de $[-10,10][V]$. En el sitio local, se utilizó un controlador de fuerza dado por $f_m = K_1 x_t + K_2 \dot{x}_t + f_t$, donde la fuerza aplicada sobre el dispositivo maestro f_m depende de la posición x_t y velocidad \dot{x}_t del maestro y de la fuerza f_t realimentada desde el sitio remoto. Los parámetros usados fueron $K_1 = 0.115 \left[\frac{N}{rad} \right]$, $K_2 = 1.15 \left[\frac{N}{rad/seg} \right]$, los cuales se ajustaron principalmente para aumentar la fricción del hand-controller dispuesto en el sitio local evitando así la generación de referencias excesivamente rápidas.

Por otra parte, la fuerza máxima admisible sobre el dispositivo maestro es $8,8N$ sobre cada articulación, mientras que los rangos de posición para q_1, q_2 y q_3 para ambos dispositivos son $[-\pi/2, \pi/2][rad]$, $[0, \pi/2][rad]$, $[-0.88\pi, 0][rad]$, respectivamente.

El modelo utilizado para la compensación del retardo es: $K_0(p) = \frac{\hat{G}_{y_i}}{\hat{T}_{y_i} p + 1}$, donde p es el operador

derivación. Aquí, se utilizó el algoritmo recursivo de mínimos cuadrados para estimar la ganancia estática $\hat{G}_{y_i} = 0.5 \frac{rad}{N}$, y la constante de tiempo $\hat{T}_{y_i} = 0.2[seg]$ de la admitancia del sitio local. El valor de \hat{T}_{y_i} depende principalmente de la constante neuromuscular del operador humano (McRuer, *et al.*, 1965; Postigo, 1999), ya que el tiempo de reacción del mismo es considerado como parte del retardo de tiempo.

La figura 8 muestra la evolución de la posición de la articulación $q_{1(t)}$ sobre los sitios local y remoto.

Sobre esta articulación se encuentra principalmente la interacción en fuerza con la caja dispuesta sobre el sitio remoto.

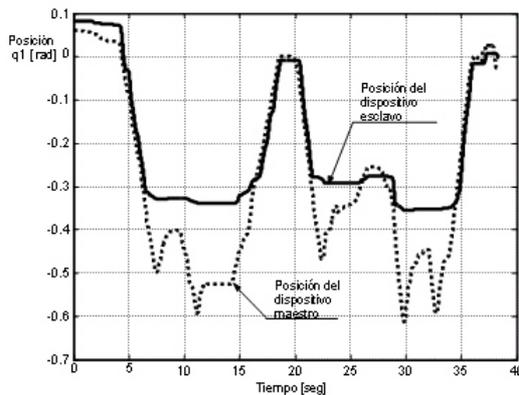


Figura 8. Evolución temporal de la posición sobre q_1 .

En la figura 9 se observa la fuerza de realimentación aplicada en el sitio local (los valores de fuerza fueron escalados sobre el rango $[-1,1]$, utilizando la fuerza máxima).

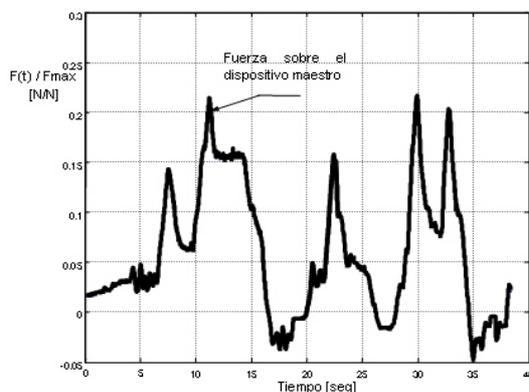


Figura 9. Evolución de la fuerza realimentada sobre la articulación 1 del maestro.

Se puede observar que la fuerza de interacción realimentada desde el sitio remoto hacia el sitio local siempre es representativa de la interacción real. Dicha fuerza muestra que el operador humano toca la caja remota y ejerce una fuerza de contacto sobre la misma. El retardo de tiempo presente es mostrado en la figura 3 (experimento A).

Las figuras 10 y 11 muestran la posición en función del tiempo de las articulaciones $q_{2(t)}$ y $q_{3(t)}$, respectivamente, de los dispositivos maestro y esclavo. Se aprecia un satisfactorio seguimiento del esclavo para la referencia generada por el operador humano con errores debidos principalmente a una no-exacta compensación de la gravedad y a la ausencia mencionada de parte integrativa en el control de posición. La fuerza sobre q_2 y q_3 es muy pequeña debido a que el contacto de fuerza principal se encuentra sobre la articulación q_1 .

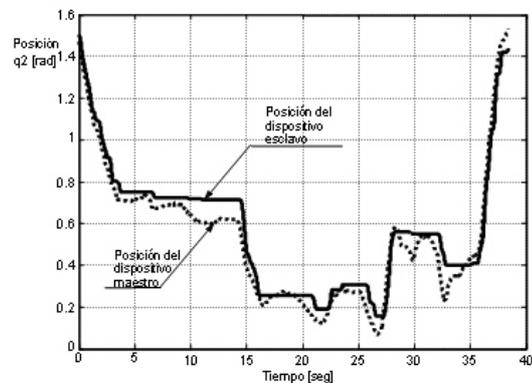


Figura 10. Evolución de la posición sobre q_2 .

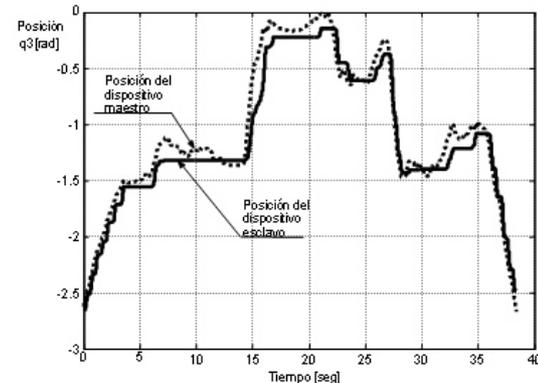


Figura 11. Evolución de la posición sobre q_3 .

El sistema de teleoperación diseñado mostró un comportamiento estable con desempeño satisfactorio en las respuestas de fuerza y posición sobre ambos dispositivos (local y remoto) del sistema de tele-robótica propuesto. Este sistema permite a un operador humano realizar una determinada tarea a distancia a través de Internet, con retardos de comunicación variantes en el tiempo.

11. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño y desarrollo de un sistema para teleoperación bilateral de robots a través de Internet. La estructura de control propuesta

está compuesta por controladores locales y por una compensación del retardo, la cual no modifica la fuerza realimentada desde el sitio remoto hacia el sitio local y establece la referencia de posición aplicada sobre el robot remoto usando la fuerza actual junto con el comando de posición generado por el operador humano un tiempo atrás y la fuerza que sintió el operador en dicho instante. Además, se propuso un modelo del retardo de tiempo de Internet, el cual se verificó mediante el procesamiento de datos reales.

Finalmente, los resultados obtenidos de experiencias en teleoperación bilateral realizadas con dispositivos robóticos vinculados a través de Internet fueron satisfactorios, obteniéndose respuestas estables en fuerza y posición.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Además, se remarca la colaboración prestada, para materializar las experiencias realizadas, del Dr. Jorge Manzano, del 'Ente Nazionale per le Nuove Tecnologia, L'Energia e l'Ambiente' (ENEA), en Roma, Italia, y el Prof. Paolo Fiorini, del 'Altair Laboratories' de la Universidad de Verona, en Italia.

REFERENCIAS

- Anderson, R.J. and M. Spong, *Bilateral control of Teleoperators with time delay*. IEEE Transaction and Automatic Control, **34**(5):494-501 (1989).
- Arcara, P. and C. Melchiorri. *Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study*. Robotics and Autonomous Systems **38**, pp. 49-64 (2002).
- Bejczy A.K., W.S. Kim and S.C. Venema. *The Phantom robot: Predictive displays for teleoperation with time delays*. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 546-551 (1990).
- Bolot, J.C., *End-to-end packet delay and loss behaviour in the Internet*. In SIGCOMM '93, pages 289-298, Ithaca, NY, February, (1993).
- Brady, K. and T. Tarn. *Internet-Based Teleoperation*. Proc. of the Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 644-649, Seoul, Korea (2001).
- Burton T.A., "Stability and Periodic Solutions of Ordinary and Functional Differential Equations", Mathematics in Science and Engineering Vol. **178**, Academic Press (1985).
- Chopra N. and M. Spong. *Bilateral Teleoperation over the Internet: the Time Varying Delay Problem*. Proc. of the American Control Conference, Denver, Colorado, June 4-6 (2003).
- Comer, D.E., *Interconnecting with TCP/IP*. Prentice Hall, (1991).
- Elhajj, I , N. Xi, W. Fung, Y. Liu, et al. *Supermedia-Enhanced Internet Based Telerobotics*. Proceedings of the IEEE, Vol. **91**, N°3, pp. 396-421, March, (2003).
- Funda, J., T.S. Lindsay, and R.P. Paul, *Teleprogramming: Toward delay-invariant remote manipulation*, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. **1**, N°1, pp. 29-44, Winter (1992).
- Hernando, M. and E. Gamba. *A Robot Teleprogramming Architecture*. Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp 1113-1118 (2003).
- Kikuchi, J. Takeo K. and K. Kosuge. *Teleoperation System via Computer Network for Dynamic Environment*. In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 3534-3539 (1998).
- Kim, W., B. Hannaford and A. Bejczy. *Force reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay*. IEEE Transaction on Robotics and Automation, **8** (2): 176-185 (1992).
- Kolmanovskii, V.B., and A.D. Myshkis. *Introduction to the theory and applications of functional differential equations*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1999).
- Liu P., M. Meng, J. Gu, et al. *Control and Data Transmission for Internet Robots*. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 1659-1664, Taipei, Taiwan (2003).
- McRuer D., G. Krendel, and W. Reisner. *Human pilot dynamics in compensatory systems— theory models and experiments with controlled element and forcing function variations*. Air Force Flight Dynamics Laboratory. July (1965).
- Niculescu, S.I., *Delay effects on stability*. In Lecture notes in control and information sciences, Vol. **269**. Berlin: Springer (2001).
- Niemeyer, G. and J.J.E. Slotine. *Stable Adaptive Teleoperation*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, **16**(1):152-162 (1991).
- Oboe, R. and P. Fiorini. *A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics*, The International Journal of Robotics Research, Spring (1998).
- Postigo, J.F., *Teleoperación de Manipuladores robóticos con Referencias de Fuerza y Posición*, Editorial: EFU, Editorial Fundación Universidad Nacional de San Juan. ISBN N° 950-605-187-9. San Juan, Argentina (1999).
- Richard, J.P., *Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems*, Automatica **39**, pp. 1667-1694 (2003).
- Sheng, J. and M. Spong. *Model Predictive Control for Bilateral Teleoperation Systems with Time Delays*. Proceedings of IEEE CCECE 2004 – CCGEI 2004, pp. 1877-1880, Niagara Falls (2004).
- Sheridan, T.B., *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, MIT Press, Cambridge (1992).
- Ueda, J. and T. Yoshikawa. *Force-Reflecting Bilateral Teleoperation with Time Delay by Signal Filtering*. IEEE Transactions on Robotics & Automation, vol. **20**, No. 3, pp. 613-619 (2004).