

Técnica de control en teleoperación bilateral con retardos

Nicolás González Fonseca, Jesús de León Morales

Doctorado en Ingeniería Eléctrica, FIME-UANL

nicolasgzz@gmail.com; drjleon@gmail.com

RESUMEN

El retraso en sistemas teleoperados es uno de los problemas más importantes en control y para disminuir sus efectos negativos se han implementado diversas técnicas. Una de las opciones más interesantes para los investigadores en el área de control es el uso de control en modos deslizantes. Más importante aún es la combinación de las técnicas de modos deslizantes con los controles basados en impedancia, la cual permite disminuir el 'chattering' asociado con el funcionamiento normal de modos deslizantes. El uso de observadores ha sido analizado ampliamente en la literatura, sin embargo en muy pocos casos se aborda el caso no lineal. Este trabajo presenta un nuevo esquema de control de sistema de teleoperación de modos deslizantes basado en impedancia. Además se proponen dos posibles observadores que evitarían el uso de sensores de velocidad en el sistema esclavo, reduciendo costos y las dimensiones del control. La comparación del observador super twisting con el Lyapunov-Krasovskii es una de las aportaciones más importantes de este trabajo.

PALABRAS CLAVE

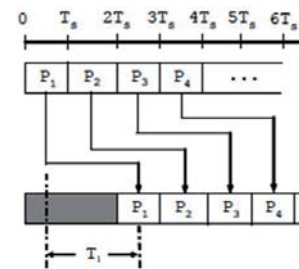
Teleoperación, control, retardos, impedancia, deslizantes.

ABSTRACT

Delay in teleoperatorated systems is one of the most important problems in control, and for reducing its effects; several techniques have been implemented. One of the most interesting options for the researchers working on control is the application of sliding mode control. It is even more important the combination of control of sliding mode with impedance based controls, which allows the reduction of chattering, associated to normal functioning of sliding controls. The use of observers has been widely reviewed in literature, however, non linearity is considered in very few cases nonlinear observers has been proposed to be used in teleoperation, specially considering time delayed. This paper presents a new scheme for a teleoperation control system of sliding mode based on impedance. Besides two possible observers which would avoid use of high speed sensors in the slave system, reducing costs and control dimensions. The comparison of the super-twisting observer with the Lyapunov-Krasovskii one, is one of the main contributions of this work.

KEYWORDS

Teleoperation, control, delays, impedance, sliding.



INTRODUCCIÓN

Recientemente ha habido gran interés por el estudio de los sistemas que presentan retardos en el tiempo. Muchos sistemas físicos muestran este tipo de fenómeno, por ejemplo en comunicaciones, la transmisión de datos está siempre acompañada de un retardo, así mismo ocurre en sistemas biológicos. El efecto de los retardos en el tiempo en un sistema no lineal en lazo cerrado puede provocar inestabilidades en éste; y por este motivo es importante realizar estudios de estos sistemas bajo los efectos del retardo en el tiempo.

Los retardos en el tiempo se pueden presentar tanto en el propio estado (las variables internas del sistema) como en las entradas del sistema, y pueden provocar comportamientos complejos, tales como: oscilaciones, inestabilidad, y mal desempeño, entre otros. Por ejemplo un pequeño retardo podría desestabilizar un sistema, mientras que uno más grande podría estabilizar otros. Un retardo que aparece en el estado de un sistema no lineal podría generar un comportamiento caótico, mientras que un sistema caótico podría ser estabilizado con un retardo en la salida del sistema.

Por lo tanto, el estudio de los efectos de los retardos en el tiempo en un sistema dinámico es de gran importancia porque permitirá entender el comportamiento dinámico de un sistema y diseñar estrategias de control que mejoren el desempeño.¹ Los retardos en un sistema no lineal se pueden presentar ya sea en la entrada del sistema o en el estado.

Un problema particular donde se aprecian los efectos de los retardos en el tiempo es en los teleoperadores. Un teleoperador es una máquina que permite mover, medir y manipular objetos a distancia. Por lo general está constituido de sensores y dispositivos que permiten su manipulación y/o movilidad, además de un dispositivo de comunicación entre el proceso a manipular y el operador, los cuales se encuentran físicamente separados a una distancia considerable.² La manipulación a distancia se logra mediante un manipulador controlado por un operador, llamado el sistema maestro, denotado por r_m , este provee los comandos o acciones que se deben ejecutar en el proceso, el cual es denominado sistema esclavo, y denotado por r_e (ver figura 1). Si el sistema

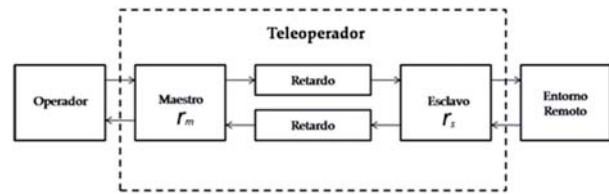


Fig. 1. Modelo de teleoperador de dos puertos.

esclavo posee sensores, entonces puede transmitir o retroalimentar información del estado del entorno remoto al sistema maestro, y en tal caso se dice que el teleoperador es bilateral. La comunicación entre el sistema maestro y el sistema esclavo permite aplicar el control sobre el entorno remoto, sin embargo esta misma comunicación puede generar inestabilidad debido a la presencia de retardos en la comunicación o en la transferencia de información.

En la figura 1 se muestra la descripción general de un teleoperador bilateral (de dos canales), donde los sistemas maestro y esclavo se pueden agrupar en un solo elemento. El problema de la inestabilidad debida a los retardos constantes en el tiempo en un sistema no lineal retroalimentado ha sido resuelto en,³ donde se derivó un esquema de compensación de retardos constantes en el tiempo, el cual garantiza la estabilidad del sistema. Sin embargo, no mucho se ha podido desarrollar para un sistema con retardos variables en el tiempo, y en tales casos en su mayoría para sistemas lineales,^{4,5 y 6}

Este problema de inestabilidad en la presencia de retardos ha supuesto un limitante en el uso de algunas tecnologías útiles en teleoperación, tales como Internet.⁷ Actualmente, la red de Internet ha sido ampliamente utilizada como medio de comunicación, ya que se encuentra accesible para todo tipo de usuario y prácticamente no tiene limitantes en cuanto a la distancia del dispositivo a teleoperar. Los dispositivos a teleoperar (figura 2) pueden ser muy diversos pero en estos casos se hará referencia a brazos mecánicos con un comportamiento dinámico similar a un sistema masa-resorte.

ANTECEDENTES

El problema del retardo en el tiempo en sistemas no lineales ha sido tratado mediante diferentes técnicas y métodos, entre los cuales se encuentran los siguientes:

Nuevas arquitecturas de comunicación. Anderson y Spong³ propusieron una nueva arquitectura de comunicación, la cual está basada en la teoría de dispersión. En esta arquitectura se representa al teleoperador como esquemas conectados en serie de uno y dos puertos, con un flujo de esfuerzo que se intercambia entre cada uno de los puertos. La relación entre las fuerzas y las velocidades de todos los puertos es entonces representada por una matriz híbrida, la cual cumple con la definición de operador de dispersión. Por otro lado, en este esquema se garantiza la pasividad de dicho sistema. Posteriormente, Niemeyer y Slotine⁸ desarrollaron un método para caracterizar los retardos en el tiempo cuando estos son constantes. Esto se logró mediante la transmisión de una combinación de señales de onda desde el sistema maestro m , luego obteniendo las señales en el sistema esclavo (figura 2). Utilizando estas herramientas se logra recuperar las señales de onda original con un retardo que garantiza una conexión sin pérdidas en el teleoperador.

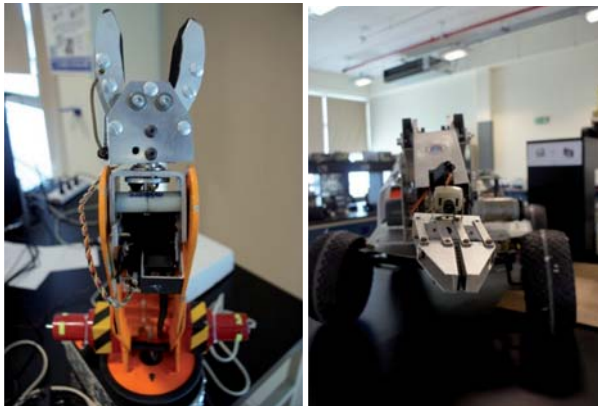


Fig. 2. Algunos dispositivos que podrían utilizarse en teleoperación.

Análisis de Impedancias. En el contexto de líneas de transmisión, es bien conocido que si la carga al final de la línea tiene una diferente impedancia que la impedancia característica de la línea de transmisión, entonces ocurre una reflexión de onda. En teleoperación, tal reflexión disminuye el desempeño del sistema. Esto lleva a la introducción de los conceptos de compatibilidad de impedancias. La compatibilidad de impedancias fue abordada por Hogan en,⁹ y el trabajo sobre la compatibilidad de impedancia robusta basada en un modelo de la impedancia deseada y diseñando un control de modo deslizante fue presentado por Cho y Park en.¹⁰

Uso de observadores para compensar retardos. Brady y Tarn¹¹ estudiaron el problema del retardo variable en el tiempo y diseñaron un observador para estimar el retardo y el estado del sistema en un aplicación de Internet. Por otro lado, aunque de manera similar, Munir y Book¹² usaron un Filtro de Kalman y un observador para predecir las variables de onda y compensar los retardos utilizando los resultados obtenidos en³ y aprovechando la pasividad del sistema.

Controladores aplicados a sistemas con retardos. Sano *et al.*¹³ diseñaron un controlador H_∞ para estabilizar el teleoperador para un retardo en el tiempo constante. En¹⁴ se muestra un controlador adaptable que tiene el mismo efecto en un teleoperador unilateral o bilateral. Además en¹⁵ se considera un esquema adaptable que permite trabajar con incertidumbres paramétricas. Se ha desarrollado un control óptimo combinado con la ecuación funcional de Bellman en¹⁶ la cual es válida para un sistema con retardos. La teoría de control de modos deslizantes también ha sido analizada para sistemas con retardos, ante la presencia de un sistema con retardo en el estado el procedimiento es similar al aplicado a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, este se muestra en.¹⁷ Por otro lado en^{18 y 19} es introducido el control con retardo en el tiempo, una técnica que introduce voluntariamente un pequeño retardo en el diseño del control con la finalidad de reducir el efecto de perturbaciones.

Control de seguimiento adaptable. Con esta técnica se aborda el problema principal de la teleoperación bilateral el cual es, garantizar la estabilidad mientras el esclavo es capaz de efectuar un adecuado seguimiento del maestro. Bajo la suposición que el operador pasivo y el ambiente remoto son pasivos en tal caso la estabilidad del sistema completo está asegurada.^{3,8} Sin embargo, en la mayoría de las aproximaciones basadas en scattering es imposible asegurar el seguimiento de la posición. Esquemas tipo PD que son capaces de superar este problema se pueden encontrar en^{4,20,21}

CONTROL DE IMPEDANCIA PARA SISTEMA MAESTRO

En muchas tareas de teleoperación, los robots manipulados frecuentemente interactúan con su

ambiente remoto. Cualquier fuerza de contacto excesiva entre el robot y el ambiente puede dañar el sistema, por lo que esta situación debe ser evitada. Debido a esto, a pesar de lo exacto que pueda ser un buen control de seguimiento es muy importante desempeñarlo con seguridad. En este campo es bien sabido que un control de impedancia, el cual controla la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad del actuador en el maestro, es adecuado para este tipo de objetivos en un sistema teleoperado.

Considere que las siguientes ecuaciones diferenciales representan las dinámicas de los sistemas maestro y esclavo en un sistema teleoperado:

$$m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m = f_h + u_m \tag{1}$$

$$m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s = u_s - f_e \tag{2}$$

Donde x_i representa la posición, y \dot{x}_i , \ddot{x}_i la velocidad y la aceleración respectivamente; u_i es el torque generado por el control; m_i y b_i representan los coeficientes de la masa y de fricción respectivamente, con $i=m,s$ denotando maestro y esclavo; f_h es la fuerza aplicada en el maestro por el operador humano, entendiéndose como la señal de referencia; y f_e es la fuerza reflejada en el esclavo por el ambiente remoto.

Este esquema de teleoperación bilateral puede ser representado también por el diagrama de la figura 3 donde la posición y la fuerza del maestro son transmitidas al esclavo y la fuerza de contacto del esclavo es enviada al maestro a través del canal de comunicación con un retardo T_2 . Durante todo el análisis de este trabajo se asume que el retardo tiene un valor constante. Es importante aclarar este punto ya que los retardos que varían en función del tiempo tienen otro tipo de implicaciones en sistemas teleoperados. Como se percibe, en este canal de comunicación existe un retardo, de manera que la

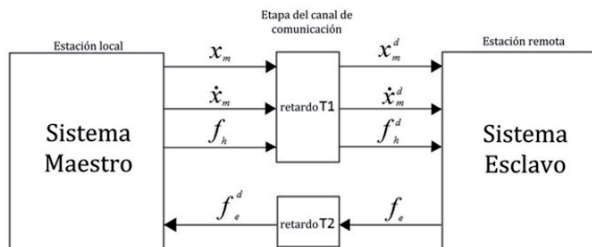


Fig. 3. Esquema de señales con retardo para Teleoperación bilateral.

relación de las señales está dada por las siguientes ecuaciones:

$$x_m^d(t) = x_m(t - T_1) \tag{3}$$

$$\dot{x}_m^d(t) = \dot{x}_m(t - T_1) \tag{4}$$

$$f_h^d(t) = f_h(t - T_1) \tag{5}$$

$$f_e^d(t) = f_e(t - T_2) \tag{6}$$

Donde x_m^d , \dot{x}_m^d y f_h^d son la posición, la velocidad del maestro, y la fuerza ejercida por un operador humano respectivamente, las cuales son transmitidas al esclavo a través de un canal de comunicación; f_e^d es la fuerza externa en el esclavo transmitida a través del maestro; T_1 es un retardo de tiempo de la señal que fluye desde el maestro al esclavo, y T_2 es el retardo en la dirección opuesta. Se asume razonablemente que la fuerza exógena, es decir la fuerza que el operador humano aplica al sistema maestro está acotada por arriba. Además, no se considera expresión matemática alguna que modele el comportamiento del operador humano. Otras suposiciones importantes tienen que ver con el canal de comunicación. En este caso asumimos que no hay pérdidas en los paquetes de transmisión, por lo que se puede decir que no habrá espacios vacíos en cada instante de muestreo. Esto significa que los controladores siempre tendrán datos disponibles en su respectivo instante de muestreo. Se asume que el tiempo de muestreo T_s es el mismo en el maestro y el esclavo y además que los paquetes de información no llegan en desorden, como se ve en la figura 4.

Las señales retardadas al salir del canal de comunicación son escaladas dependiendo de los requerimientos de la teleoperación. Usando coeficientes de escalamiento, la posición y la velocidad quedan de la siguiente manera:

$$x_s = k_p x_m^d \tag{7}$$

$$f_h = k_f f_e^d \tag{8}$$

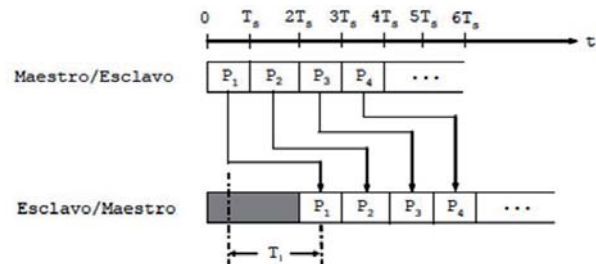


Fig. 4. Esquema de señales con retardo T_1 para teleoperación bilateral.

Donde k_p y k_f son factores que escalan la posición y la fuerza respectivamente.

Reescribiendo la ecuación diferencial (1) del sistema maestro en la forma de variables de estados, se obtiene las siguientes ecuaciones.

$$\dot{x}_{m1} = x_{m2} \quad (9)$$

$$\dot{x}_{m2} = -\frac{b_m}{m_m} x_{m2} + \frac{1}{m_m} u_m + \frac{1}{m_m} f_h \quad (10)$$

De manera análoga se reescribe la ecuación (2) para el sistema esclavo:

$$\dot{x}_{s1} = x_{s2} \quad (11)$$

$$\dot{x}_{s2} = -\frac{b_s}{m_s} x_{s2} + \frac{1}{m_s} u_s - \frac{1}{m_s} f_e \quad (12)$$

Con el control de impedancia es posible establecer la impedancia deseada entre la fuerza del humano y la fuerza externa (la fuerza de contacto en el ambiente). Suponga que la dinámica que se desea imponer en el maestro está dada por:

$$\bar{m}_m \ddot{x}_m + \bar{b}_m \dot{x}_m + \bar{k}_m x_m = f_h - k_f f_e^d \quad (13)$$

Donde $\bar{m}_m, \bar{b}_m, \bar{k}_m > 0$ son la inercia, el factor de amortiguamiento y de rigidez respectivamente, de una impedancia deseada. Sustituyendo esta ecuación en la ecuación diferencial del sistema maestro (1), el error en la impedancia en lazo cerrado se muestra como

$$u_m = -f_h + b_m \dot{x}_m + \frac{m_m}{\bar{m}_m} (f_h - k_f f_e^d - \bar{b}_m \dot{x}_m - \bar{k}_m x_m) \quad (14)$$

Es decir, aplicando el control u_m el sistema maestro se comporta con la dinámica deseada por el operador dada por la ecuación de impedancia deseada. Se puede ver como el control en el maestro impone una dinámica deseada, entre la velocidad del maestro y la combinación de la fuerza del operador humano y de la fuerza retardada de contacto.⁹

CONTROL MODOS DESLIZANTES BASADO EN IMPEDANCIA PARA SISTEMA ESCLAVO

Bajo un criterio similar, se considera el diseño del control en el esclavo para producir una impedancia deseada considerando la fuerza de contacto y que sea robusto a un tiempo de retardo desconocido. El control se diseña como un control de modos deslizantes de alta orden. Para este fin se considera

la impedancia deseada en el esclavo como:

$$\bar{m}_s \ddot{\tilde{x}}_s + \bar{b}_s \dot{\tilde{x}}_s + \bar{k}_s \tilde{x}_s := -f_e \quad (15)$$

Donde $\bar{m}_s, \bar{b}_s, \bar{k}_s > 0$ son la inercia, el factor de amortiguamiento y de rigidez, y

$$\ddot{\tilde{x}}_s := \ddot{x}_s - k_p \dot{x}_m^d, \quad \dot{\tilde{x}}_s := \dot{x}_s - k_p x_m^d,$$

$$\tilde{x}_s := x_s - k_p x_m^d$$

son los errores de seguimiento para la aceleración, la velocidad y la posición respectivamente. Como el interés es obtener la ecuación anterior (15) en lazo cerrado, entonces se entiende que la superficie deslizante es la siguiente

$$I_e = \bar{m}_s \ddot{\tilde{x}}_s + \bar{b}_s \dot{\tilde{x}}_s + \bar{k}_s \tilde{x}_s + f_e = 0 \quad (16)$$

Ahora se puede definir el error extendido de la siguiente manera

$$\Omega = \frac{1}{\bar{m}_s} \left[\int_0^t I_e(t) dt + k_i \int_0^t \int_0^s \text{sign}(I_e(t)) dt ds \right] \quad (17)$$

Donde $k_i > 0$ es la ganancia del modo deslizante. Sustituyendo estas dos ecuaciones, e integrando, el resultado del error es el siguiente

$$\Omega = \tilde{x}_s + \frac{\bar{b}_s}{\bar{m}_s} \tilde{\dot{x}}_s + \tilde{m} \frac{1}{\bar{m}_s} \int_0^t [\bar{k}_s \tilde{x}_s + f_e] dt + \frac{k_i}{\bar{m}_s} \int_0^t \int_0^s \text{sign}(I_e(t)) dt ds \quad (18)$$

El control para el sistema esclavo u_s tiene por lo tanto la siguiente forma

$$u_s = -\frac{m_s}{\bar{m}_s} \left(\bar{b}_s \dot{\tilde{x}}_s + \bar{k}_s \tilde{x}_s + f_e + k_i \int_0^t \text{sign}(I_e(t)) dt \right) + \frac{m_s}{\bar{m}_m} k_p (f_h^d - k_f f_e^{dd} - \bar{b}_m \dot{x}_m^d - \bar{k}_m x_m^d) + f_e + b_s \dot{x}_s - k_g \Omega \quad (19)$$

Donde $f_e^{dd} = f_e(t - 2T)$, el índice dd se refiere a la señal con un doble retardo $2T, k_g > 0$, y $\text{sign}(\cdot)$ es la función signo. El término $k_g \Omega$ se ha agregado para asegurar estabilidad⁶ su propósito queda claro al realizar un análisis de estabilidad en lazo cerrado, pero que aparece en un trabajo previo.²² También note que el uso de este control requiere de contar con una medición de aceleración debido al uso de I_e . Para evitar el uso de la medición, así como del uso del equipo, la aceleración y la velocidad son estimadas, mediante el uso de un observador de modos deslizantes tal y como en el ejemplo anterior.

OBSERVADOR SUPER-TWISTING

Con el propósito evitar el uso de sensores de velocidad para la implementación del control en el sistema esclavo se utiliza un observador de estado. Para poder hacerlo las ecuaciones del sistema esclavo (11) y (12) se deben reescribir en la siguiente forma canónica.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (20)$$

$$\dot{x}_2 = F(x_1, x_2) + \Phi(u, y) \quad (21)$$

Con

$$F(x_1, x_2) = -\frac{b_s}{m_s} x_2 \quad (22)$$

$$\Phi(u, y) = \frac{1}{m_s} u_s - \frac{1}{m_s} f_h \quad (23)$$

Para el sistema de teleoperación bilateral considerado, el cual cumple con la forma canónica, un observador super-twisting²³ está dado por las siguientes ecuaciones

$$\dot{\hat{x}}_1 = \tilde{x}_2 + \lambda_1 \sqrt{|\tilde{x}_1 - \hat{x}_1|} \text{sign}(\tilde{x}_1 - \hat{x}_1) \quad (24)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = \alpha_1 \text{sign}(\tilde{x}_1 - \hat{x}_1) \quad (25)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = E_1 \left[\tilde{\Theta} + \tilde{e}_2 \sqrt{|\tilde{x}_2 - \hat{x}_2|} \text{sign}(\tilde{x}_2 - \hat{x}_2) \right] \quad (26)$$

$$\dot{\tilde{\Theta}} = E_2 \alpha_2 \text{sign}(\tilde{x}_2 - \hat{x}_2) \quad (27)$$

Donde \hat{x}_1 y \hat{x}_2 son los estados estimados por el observador. Por otro lado \tilde{x}_1 es la posición del sistema esclavo utilizada para generar el error de estimación que excitará las dinámicas del observador. Las ganancias λ_1 y λ_2 serán sintonizadas de acuerdo con el comportamiento deseado, así como α_1 y α_2 . Es de resaltar el uso que hace el observador de la función signo $\text{sign}(\cdot)$. Por otro lado las variables E_1 y E_2 puede tomar los valores 1 o 0 de acuerdo al siguiente criterio:

$$E_i = 1 \text{ si } |e_j| = |\tilde{x}_j - \hat{x}_j| \leq \varepsilon, \forall j \leq 1 \text{ de lo contrario } E_i = 0$$

OBSERVADOR LYAPUNOV-KRASOVSKII

Otra opción para estimar los estados del sistema esclavo es el observador *Lyapunov-Krasovskii*. En este método consideramos un sistema de forma triangular dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + \Psi(x, x_{rc}, u, u_{rc}) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (28)$$

$$x(s) = \varphi(s); \forall s \in [-\tau_c, 0]$$

Donde τ_c es el retardo, y en este caso el retardo también se considera constante en el tiempo. Para un sistema que cumple con esta estructura triangular un observador Lyapunov-Krasovskii está dado por:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + \Psi(x, x_{rc}, u, u_{rc}) - \\ &\theta \Delta_\theta^{-1} S^{-1} C^T C \{z - x\} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\hat{y} = Cz \quad (30)$$

Donde $\Delta_\theta = \text{diag}(1, \frac{1}{\theta}, \dots, \frac{1}{\theta^{n-1}})$ con $\theta > 0$ es un parámetro sintonizable (ganancia) del observador. Por otro lado S es la solución única de la ecuación algebraica de la Ecuación de Lyapunov:

$$S + A^T S + SA - C^T C = 0 \quad (31)$$

Se utilizan entonces estas ecuaciones para obtener un observador Lyapunov-Krasovskii para el sistema de teleoperación utilizado. Consideramos que para el caso de las dinámicas del sistema esclavo dadas por las ecuaciones (11) y (12), la matriz A y el valor de $\Psi(x, x_{rc}, u, u_{rc})$ están dados por:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Psi(x, x_{rc}, u, u_{rc}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} (u_s - f_e^d - b_s z_2) \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, usando estas matrices en la forma canónica (29) y (30), además resolviendo la ecuación de Lyapunov (31) para el valor obtenido de A, entonces el observador Lyapunov-Krasovskii para el sistema teleoperado bilateralmente con retardos constantes está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{z}_1 = z_2 - 2\theta(z_1 - x_1) \quad (32)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{m_s} (u_s - f_e^d - b_s z_2) - \theta^2 (z_1 - x_1) \quad (33)$$

SIMULACIÓN

A continuación se realizó una simulación que permitiera comprobar la eficiencia de dicho esquema, además de poder obtener una comparación entre ambos observadores. Para la simulación se utilizaron los siguientes parámetros para el maestro: $m_m = 1.7, c_m = 0.4, \bar{m}_m = 1.9, \bar{c}_m = 2, \bar{k}_m = 0.01, k_f = 0.9$. De manera similar para el sistema esclavo :

$$m_s = 7, c_s = 0.9, \bar{m}_s = 0.3, \bar{c}_s = 0.5, \bar{k}_s = 15, k_p = 10.69, k_i = 1, k_g = 50.$$

Los parámetros utilizados para sintonizar el observador supertwisting $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = 10, \alpha_1 = 20, \alpha_2 = 1$. Así mismo se utilizó una $\theta = 5$. La sintonización de las ganancias del observador se hace de manera experimental y se debe probar con distintos valores para asegurar el mejor desempeño.

Los resultados de ambos observadores con los controles antes citados se muestran en las siguientes figuras. En la figura 5, se muestra el seguimiento del sistema esclavo al maestro, es además visible el retardo en la reacción del sistema esclavo debido al retardo inducido por el canal de comunicación.

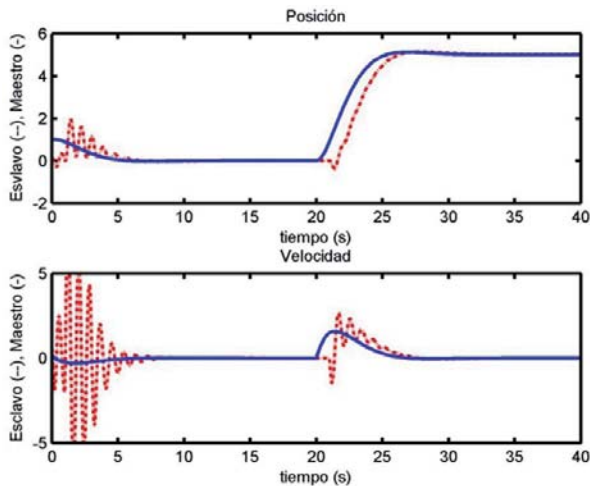


Fig. 5. Seguimiento del sistema esclavo (líneas punteadas) al sistema maestro (línea continua) con un retraso de 1s.

En la figura 6, la estimación de los observadores en el sistema esclavo, aunque con oscilaciones, los parámetros pueden ser sintonizados para tener un estimado aceptable. En ellas se aprecia, como el control del sistema esclavo sigue de manera aceptable al sistema maestro considerando el objetivo de un control basado en impedancia el cual es evitar una

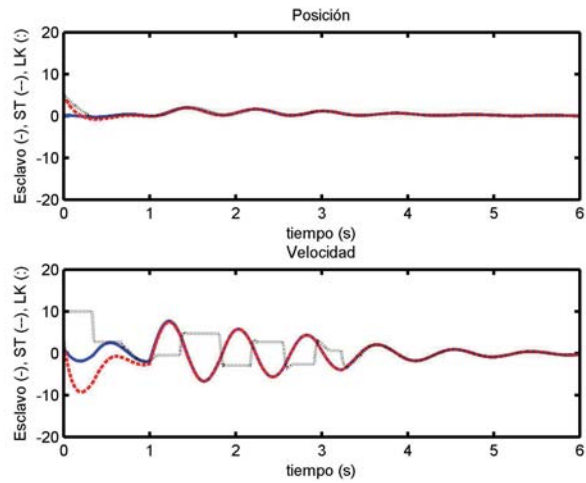


Fig. 6. En esta gráfica se muestra el comportamiento de los observadores Lyapunov-Krasovskii (LK) y el Super Twisting (ST) al estimar los estados del sistema esclavo sin retardo con retardo de 1s.

reacción que pueda dañar al dispositivo, utilizando las mediciones aportadas por el observador.

Finalmente en la figura 7 se muestra el efecto que tiene el retardo en los observadores particularmente. La diferencia en la trayectoria de ambos observadores es apenas notoria en el transitorio, y casi imperceptible una vez que han alcanzado la trayectoria. Es notorio como al incrementarse el retardo el desempeño se empobrece. Sin embargo, las oscilaciones que se presentan se deben al efecto del retardo en el sistema retroalimentado en general, i.e. la sincronización maestro esclavo, y no únicamente a un mal desempeño del observador.

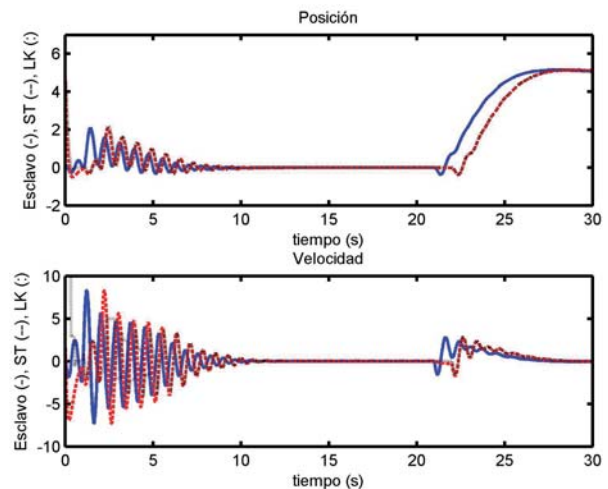


Fig. 7. El efecto del retardo en el tiempo sobre los observadores. a) considerando un retardo de 1s. b) considerando un retardo de 3s.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una solución al problema de inestabilidad en presencia de retardos para un sistema de teleoperación bilateral. Además el esquema propuesto no requiere ningún sensor de velocidad ya que utiliza un observador de estados para obtenerla. Se ofrecieron dos esquemas de observación super-twisting y Lyapunov-Krasovskii, para el esquema de control propuesto. Mediante simulación se presentó una comparación en el desempeño de estas dos diferentes técnicas de observación bajo el efecto de un retardo constante.

Se verificó el funcionamiento de los esquemas mediante simulación en MatLab. Los resultados obtenidos muestran que utilizando observadores de estimación de estados es posible obtener buenos resultados al acoplarlo con un sistema de control basado en modos deslizantes aun y con cierta cantidad de retardos.

Por otro lado, al considerar un retardo en los canales de comunicación, una situación muy práctica y apegada a la realidad, se muestra que el esquema control-observador es estable para un retardo constante y acotado, si bien al aumentar dicho retardo se empobrece el buen desempeño del esquema.

Comparando ambos observadores es notorio que ambos tienen un buen desempeño en simulación. El observador super-twisting tiene como ventaja que no requiere conocer los parámetros del sistema lo cual lo hace especialmente robusto a incertidumbres paramétricas, pero tiene como desventaja que su sincronización puede llegar a ser complicada debido al número de ganancias envueltas. Por otro lado como desventaja del observador Lyapunov-Krasovskii es que sí se requiere la información completa del modelo, pero de su forma dinámica su comportamiento es más suave y además es mucho más sencilla y práctica su sintonización al solo elegir un valor adecuado para θ .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Niculescu, S., *Delay Effects on Stability.*, Springer-Verlag 2001.
- Sheridam, T.B., *Teleoperation, Telerobotics and Telepresence: A Progress Report.*, Control Eng. Practice, Vol.3, No.2, pp. 205-214, 1995.
- Anderson, R..J., and Spong, M.W., *Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay.* IEEE Trans. Automat. Contr., AC-34, No.5, pp. 495-501. May, 1989.
- Nuño, E., Ortega, R., Barabanov, N. & Basañez, L., *A globally stable PD controller for bilateral teleoperators with variable time-delay.* International Journal of Robotics Research, 24(3), 753-758. (2008).
- Nuño, E., Ortega, R. & Basañez, L., *An Adaptive controller for nonlinear teleoperators.* Automatica 46(2010) pp. 155-159.
- García-Valdovinos et al., *Observer-based sliding mode impedance control of bilateral teleoperation under constant unknown time delay.* Robotics And Autonomous Systems 55(2007) pp. 609-617.
- R. Farrell, *Remote manipulation with transmission delay.*, IEEE Trans. Human Factors in Electron, Vol.6, 1965, pp. 24-32.
- G. Niemeyer; J.E. Slotine, *Stable Adaptive Teleoperation.*, IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 26, No.1, 1991, pp. 1-24.
- N. Hogan, *Impedance Control: An approach to manipulation: parts I-III.*, J. Dyna. Syst. Measure Cont., 1985, pp. 1-24.
- Y.C.Cho; Park, J.H., *Stable Bilateral Teleoperation under a time delay using a robust impedance control.*, J. of Mechatronics, Vol. 15, 2005, pp.611-625.
- Brady, K; Tarn, T.J., *Internet-based remote teleoperation.*, IEEE Int. Conf. Robot. Auto., 1998, pp. 65-70.
- Munir, S; Book, W.J., *Internet based teleoperation using wave variable with prediction.*, IEEE/ ASME Trans. Mechatronic, Vol.7, 2002, pp. 124-133.
- Sano, A. Fujimura, H; Tanaka, T., *Gain scheduled compensation for time delay of Bilateral Teleoperation Systems.*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robot. Auto., Leuven, Belgium, 1998, pp. 1916-1923.
- Zhu, W.H.; Salcudean, S.E., *Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach.*, IEEE Trans. Automat. Contr. Vol. 45, No.11, 2000, pp. 1951-1969.

15. Lozano, R.; Chopra, N.; Spong, M.: Passivation of force reflecting bilateral teleoperators with time varying delay. *Mechatronics'02*, Entschede, Netherland, 2002.
16. Kolmanovskii, V.; Shaikhet, L., Control of Systems with aftereffect., *Transactions of Mathematical Monographs*, Vol. 157, 1996. Providence, RI: American Methemathical Society.
17. Gouaisbaut, F., Perruquetti, W., Orlov, Y., & Richard, J. P. A sliding-mode controller for linear time-delay systems. In *ECC'99*, Karlsruhe, Germany 1999.
18. Youcef-Toumi, K. & Ito, O. A time delay controller design for systems with unknown dynamics. *ASME Journal on Dynamic Systems Measurement and Control*, 112, 113-142. (1990).
19. Youcef-Toumi, K., & Reddy, S. Analysis of linear time invariant systems with time delay. *ASME Journal on Dynamic Systems Measurement and Control*, 114(4), 623-633. (1992)
20. Nuño, E., Basañez, L., Ortega, R., & Spong, M. W., Position tracking for nonlinear teleoperators with variable time-delay. *International Journal of Robotics Research*, 28(7), 895-910. (2009).
21. Chopra, N., & Spong M. W., Output synchronization of nonlinear systems with time delay in communication. In *IEEE conf. on decision and control*, pp. 4986-4992. (2006).
23. Davila, J., Fridman, L & Levant, A., Sliding-order sliding-mode observer for mechanical systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 50. Issue 11, pp. 1785-1789, 2005.
22. González, N., et al., A sliding mode-based impedance control for bilateral teleoperation under time delay. *18th IFAC World Congress*, Milan, Italia 2011.

 **INSTITUTO TECNOLÓGICO**
de saltillo

33 CONGRESO INTERNACIONAL
DE METALURGIA Y MATERIALES

NOVIEMBRE
9,10,11 2011

Convocatoria
Call for papers

[http:// aplicaciones.its.mx/congreso2011/](http://aplicaciones.its.mx/congreso2011/)
Tel: +52(844) 438 9539