

Sistema de Control Bilateral Adaptativo por Convergencia de Estados en Teleoperación

Maria Artigas*, Rafael Aracil**, Manuel Ferre**, Cecilia Garcia**

*Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela.
(e-mail:artigasmaria@gmail.com)

** Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006, Madrid, España. (e-mails: rafael.aracil@upm.es / m.ferre@upm.es / cgarcia@etsii.upm.es)

En este artículo se presenta el diseño y aplicación de un método de control adaptativo para un sistema bilateral de teleoperación. El esquema y algoritmo de control se ha formulado en el espacio de estados siguiendo una técnica de control por convergencia del estado de maestro y esclavo. Sobre dicho esquema de control se han ajustado a través del método de control adaptativo las ganancias de las matrices de los reguladores para obtener un sistema bilateral estable con una reflexión de fuerzas establecida a priori, lo que es de utilidad en aplicaciones industriales en las que el operador manipula cargas de gran variabilidad. La validación del método de control diseñado se ha realizado con un sistema experimental maestro-esclavo de un grado de libertad, pero los resultados también son aplicables con varios grados de libertad. Copyright © 2010 CEA.

Palabras Clave: Control Adaptativo, Convergencia de Estados, Modelado, Teleoperación, Bilateral.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 40 (Goertz, 1946) los sistemas teleoperados han sido objeto de numerosas investigaciones y aplicaciones tales como las operaciones de manipulación en el sector nuclear, las exploraciones espaciales o submarinas, y otras más recientes como las aplicaciones médicas basadas en sistemas de telecirugía. Los sistemas teleoperados permiten al operador realizar tareas de manipulación remotas mediante un sistema bilateral maestro-esclavo (Sheridan, 1989).

Las estrategias de control que se utilizan en los diferentes sistemas de teleoperación constituyen un campo de investigación abierto. Entre ellas se puede mencionar los esquemas de control bilateral (Raju *et al.*, 1989; Anderson and Spong, 1989; Yokokohji and Yoshikawa, 1992; Lawrence, 1992; Peñín, 1998; Azorín, 2003). En el estudio de la base del control bilateral es importante avanzar hacia un análisis de una serie de esquemas y técnicas de control que deben ser diseñados con el objetivo de alcanzar la mejor actuación del sistema global de teleoperación en la ejecución de tareas.

Por otro lado, el Control Adaptativo es una técnica de control ya utilizado en el campo de la robótica (Siciliano *et al.*, 1986; Slotine and Li, 1987; Kelly and Carelli, 1988; Craig, 1988; Ghorbel *et al.*, 1989); sin embargo, son muchos los problemas que quedan por resolver en este campo. Como una rama de la teoría de sistemas, el Control Adaptativo, permite la mejora en el rendimiento de sistemas bilaterales como puede ser el estudio de la dinámica de manipuladores que presenta una mayor complejidad, mayor que la de los sistemas dinámicos lineales donde se ha enfocado tradicionalmente los estudios para la aplicación de controladores adaptativos. Sin embargo, se han

propuesto muchos controladores adaptativos en aplicaciones de robótica (Siciliano *et al.*, 1986; Slotine and Li, 1987; Kelly and Carelli, 1988; Ghorbel *et al.*, 1989; Feliu *et al.*, 1989) la mayoría de ellos cuentan con aproximaciones lineales localmente, tiempo-invariante o desacoplo de la dinámica, para garantizar la convergencia del seguimiento. A nivel de aplicaciones de control adaptativo en los sistemas teleoperados, se han presentado investigaciones y desarrollos que van en el camino de conseguir la respuesta ideal, aunque difícil, en el sistema real maestro-esclavo, ya que es imposible obtener un modelo exacto de la dinámica del sistema maestro-esclavo y factores externos que estén involucrados en el mismo, como la variación de las propiedades del entorno.

Algunos de los primeros trabajos en el campo del control adaptativo en teleoperación se centraron en el control de brazos flexibles (Siciliano *et al.*, 1986; Ghorbel *et al.*, 1989). El control adaptativo dio solución a los problemas derivados de los cambios en la carga del mismo. J.-J Slotine y W. Li (1988) presentaron un esquema de un controlador adaptativo directo, donde el parámetro de adaptación se ajusta de acuerdo al error de seguimiento del movimiento. En 1991, G. Niemeyer y J.-J. Slotine (1991) presentaron un esquema de control híbrido basado en el esquema de control adaptativo SL (Slotine and Li, 1988). Sin embargo, este esquema deja abierto el problema dinámico que se presenta cuando el sistema maestro-esclavo interactúa con el operador humano y el entorno. No es de extrañar que estos últimos tengan una impedancia variable en el tiempo y esto hace que se degrade el comportamiento global del sistema. Si, además, existen errores de modelado, tanto en el maestro como en el esclavo, o en el canal de comunicación, entonces el esquema de control no resulta eficiente y se deteriora considerablemente el funcionamiento del sistema. Para

solucionar algunos de estos inconvenientes, K. Hashtrudi-Zaad (1996) proponen un esquema de control bilateral adaptativo indirecto basándose en *SL composite adaptive control* (Slotine and Li, 1987; Slotine and Li, 1988) y la arquitectura de control de Hannaford (1989). En el mismo orden de ideas, Lee *et al.* (1997) proponen un esquema de control adaptativo y arquitectura de control posición-fuerza basado en la estructura general del sistema de teleoperación de Lawrence (1992) y la teoría de cuadripolo. Como también, Zhu y Salcudean (1999) desarrollaron un esquema de control bilateral adaptativo de movimiento/fuerza donde garantiza estabilidad, para ser aplicado a las estructuras de control en posición y velocidad. En el año 2000, Ryu y Kwon (2000) propusieron un esquema de control bilateral adaptativo (estructura de lazo cerrado simétrica) en sistemas con incertidumbre y con el que garantiza la transparencia del mismo. En 2005, Hosseini-Sunny *et al.* (2005) proponen un esquema de control adaptativo de movimiento (velocidad/posición)-fuerza para sistemas de teleoperación bilateral por modelo de referencia con realimentación (MRAC) (Whitaker *et al.*, 1958; Landau, 1979; Craig, 1988; Åström and Wittenmark, 1995; Rodríguez and López, 1996; Keller *et al.*, 1998).

En este artículo, se propone un nuevo método adaptativo para reguladores bilaterales de sistemas teleoperados. El algoritmo de control se basa fundamentalmente en la implementación de métodos adaptativos que garanticen una buena percepción del operador ante variaciones del entorno remoto pero evitándole la fatiga ante continuos cambios en la dinámica del entorno. Por otro lado, en este trabajo no se ha considerado la posible existencia de retardos en el canal de comunicación. Este hecho no debe suponer una restricción puesto que existen numerosas aplicaciones en las que la teleoperación se realiza sin este particular problema (Kaneko K. *et al.*, 1998, Tavakoli M. *et al.*, 2005, Romano J.M. *et al.*, 2007).

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el modelo dinámico del sistema teleoperado. La estrategia de control por convergencia de estados se describe en la sección 3. La sección 4 se centra en el diseño del método de control adaptativo. La sección 5 muestra los resultados obtenidos para la validación del método propuesto aplicados sobre un sistema maestro-esclavo experimental. Finalmente, en la sección 6 resume las principales conclusiones de este trabajo.

2. ESQUEMA DE CONTROL DEL SISTEMA BILATERAL

2.1 Modelado del sistema de teleoperación

Tanto maestro como esclavo son modelados mediante ecuaciones diferenciales lineales de orden n usando la formulación en el espacio de estados de forma matricial del siguiente modo:

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_m \tilde{u}_m(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_m(t) = \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m(t)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \tilde{u}_s(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_s(t) = \mathbf{C}_s \mathbf{x}_s(t)$$

donde $\mathbf{A}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}_m \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ y $\mathbf{C}_m \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ son respectivamente las matrices del sistema, de entrada y de salida del maestro y $\mathbf{A}_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}_s \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ y $\mathbf{C}_s \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ las correspondientes al esclavo; mientras que $\mathbf{x}_m \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ y $\mathbf{x}_s \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ son los vectores de estado del maestro y esclavo, respectivamente.

Previo al desarrollo matemático del modelado y control del sistema de teleoperación propuesto por (2) y (3), es conveniente aclarar algunos aspectos de la notación a utilizar. Los parámetros a adaptar a través de la ley de adaptación se denotan con subíndices en mayúsculas (\mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_M y \mathbf{R}_S) mientras que los parámetros propios del sistema como aquellas ganancias dadas por el método de convergencia de estado se denotan con subíndices en minúscula (\mathbf{K}_m , \mathbf{G}_1 y \mathbf{G}_2).

El esquema de control bilateral que se va a utilizar en este trabajo se presenta en la Figura 1, que proviene de un esquema anteriormente propuesto para convergencia de estados en el que no se contemplaba la adaptación de parámetros (Azorin, 2003). Como puede observarse, se contemplan todas las posibles interacciones que pueden aparecer entre los diferentes elementos del sistema (operador-maestro-esclavo-entorno) a través de las ganancias de control \mathbf{K}_m , \mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_M , \mathbf{R}_S , \mathbf{G}_1 y \mathbf{G}_2 que están definidas en la Tabla 1.

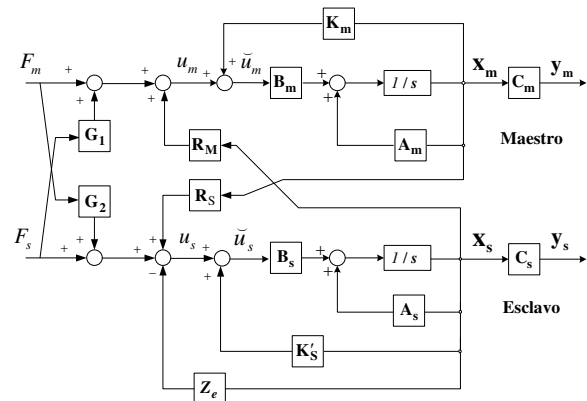


Figura 1. Diagrama de bloques para un sistema de teleoperación bilateral.

Tabla 1 Modelado del sistema bilateral en base al estado de maestro y esclavo

Ganancia de Control	Descripción
$\mathbf{G}_1 \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$	Influencia de la fuerza ejercida o carga sobre el esclavo en el maestro.
$\mathbf{G}_2 \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$	Influencia de la fuerza ejercida por el operador sobre el maestro en el esclavo.
$\mathbf{R}_M \in \mathbb{R}^{1 \times n}$	Interacción esclavo-maestro. Modela la proporción en la reflexión de fuerzas.
$\mathbf{R}_S \in \mathbb{R}^{1 \times n}$	Interacción maestro-esclavo, recíproca de la anterior
$\mathbf{K}_m \in \mathbb{R}^{1 \times n}$	Matriz de realimentación de estado del maestro. Fija la dinámica del maestro.
$\mathbf{K}'_s \in \mathbb{R}^{1 \times n}$	Matriz de realimentación del estado del esclavo. Fija la dinámica del esclavo.

Según el esquema de la Figura 1, las leyes de control para el maestro y el esclavo serán las siguientes:

$$\ddot{u}_m(t) = \mathbf{K}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{R}_m \mathbf{x}_s(t) + F_m(t) + \mathbf{G}_1 F_s(t) \quad (3)$$

$$\ddot{u}_s(t) = \mathbf{K}_s' \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{R}_s \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{G}_2 F_m(t) + F_s(t) - \mathbf{Z}_e \mathbf{x}_s(t) \quad (4)$$

En la citada figura F_m representa la fuerza que el operador ejerce sobre el maestro para provocarle las órdenes de movimiento y F_s representa la posible fuerza que se aplica al esclavo, como cargas o pesos de objetos manipulados. Esta fuerza se considerará nula en todos los desarrollos posteriores, pero se considera interesante incluirla en el caso de que existiera para determinadas aplicaciones.

2.2 Modelado del entorno y del canal de comunicaciones

Supuesta F_s nula entonces el esclavo está sometido a la fuerza provocada por su interacción con el entorno representado mediante \mathbf{Z}_e . El modelo dinámico del entorno se ha considerado del tipo Kelvin (Peñín, 1998), por tanto el entorno se define como:

$$f_e(t) = k_e \mathbf{x}_s(t) + b_e \dot{\mathbf{x}}_s(t) \quad (5)$$

donde $f_e(t) \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ es la fuerza de interacción entre el esclavo y el entorno; siendo k_e y b_e la rigidez y el rozamiento viscoso respectivamente, y \mathbf{x}_s la posición del esclavo.

La reflexión del estado del esclavo sobre el maestro viene dada a través de la matriz \mathbf{R}_M , por lo que se tiene:

$$\mathbf{R}_M \mathbf{x}_s(t) = k_f f_e(t) = \begin{bmatrix} k_f k_e & k_f b_e & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s1}(t) \\ x_{s2}(t) \\ \vdots \\ x_{sn}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

así,

$$\mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} k_f k_e & k_f b_e & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde k_f es la ganancia de reflexión de esfuerzos.

Respecto al canal de comunicaciones, se considera que este no provoca retrasos significativos en la transmisión de los datos. Esto es cierto para un gran número de aplicaciones en las que el puesto del operador y el robot teleoperado están próximos. Como ejemplo de estas aplicaciones están el mantenimiento en líneas eléctricas (Aracil *et al.*, 2002), la manipulación remota en centrales nucleares (Raimondi y Galbiati, 1992), o las aplicaciones de telecirugía (Guthart y Salisbury, 2000). Los retrasos en el canal de comunicaciones aparecen cuando la distancia entre el puesto del operador y el robot es significativa, o cuando los datos se transmiten mediante redes públicas de datos como Internet. En este caso se precisa aplicar técnicas específicas de control basadas en pasividad de forma que no se produzca un almacenamiento de energía en dicho canal. Gran parte de los trabajos citados en el primer apartado consideran el efecto del retraso en las comunicaciones y sus resultados serían aplicables aquí. El principal inconveniente que aparece cuando se producen estos retrasos es que la percepción de fuerzas se

degrada por parte del operador y con ello la transparencia del sistema. No se ha considerado de interés modelar un canal con retraso en las comunicaciones, ya esto aumentaría la complejidad del modelo y aportaría beneficios en la aplicación del control adaptativo, que es la finalidad de este trabajo.

3. CONTROL ADAPTATIVO POR CONVERGENCIA DE ESTADO

En el caso que no se conozcan con certeza los parámetros dinámicos de todos los elementos del sistema se puede recurrir a una estrategia de control que permita superar este inconveniente tal como el control adaptativo. De este modo se podrán compensar los errores que puedan existir en cuanto a la estimación del modelo del entorno, de la carga o de la fuerza ejercida en el esclavo. También es la adecuada para controlar el sistema aún cuando existan errores de identificación en la dinámica maestro-esclavo, o cuando se presenten incertidumbres durante la ejecución de la tarea. Ante estas situaciones, los reguladores involucrados en la estructura propuesta en la Figura 1, deberán adaptar sus parámetros para asegurar la estabilidad, robustez y transparencia del sistema.

El diseño de la ley de adaptación que se presenta en este artículo se basa en la teoría de estabilidad de Lyapunov que permite garantizar la estabilidad global del sistema. Se procede a obtener la ecuación diferencial para el error $\dot{\mathbf{e}}(t)$ que contiene los parámetros de la ley de adaptación. Posteriormente, se busca una función candidata de Lyapunov como mecanismo de adaptación para lograr que el error $\mathbf{e}(t)$ converja a cero. Para llegar al objetivo del control adaptativo se tiene:

Definición 1. Se define como error del estado $\mathbf{e}(t)$ la diferencia entre el estado del maestro y el estado del esclavo, por tanto:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_s(t) - \mathbf{x}_m(t) \quad (8)$$

En la sección 2 se describió el sistema maestro y esclavo en el espacio de estados a través de las expresiones (1) y (2). Para lo cual se tiene que las señales de control del sistema maestro, $\ddot{u}_m(t)$ y sistema esclavo, $\ddot{u}_s(t)$, son respectivamente (3) y (4).

Sustituyendo (3) y (4) en (1) y (2) respectivamente, se tiene

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \tilde{\mathbf{A}}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_m \mathbf{R}_m \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_m F_m(t) + \mathbf{B}_m \mathbf{G}_1 F_s(t) \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{K}_s' \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{R}_s \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{G}_2 F_m(t) + \mathbf{B}_s F_s(t) - \mathbf{B}_s \mathbf{Z}_e \mathbf{x}_s(t) \quad (10)$$

donde

$$\tilde{\mathbf{A}}_m = \mathbf{A}_m + \mathbf{B}_m \mathbf{K}_m \quad (11)$$

Las condiciones iniciales $\mathbf{x}(t_0)$ se deben establecer de manera que se consiga que el estado del esclavo converja al estado del maestro (Azorin, 2003), por lo tanto, estas condiciones son:

$$\mathbf{A}_s - \tilde{\mathbf{A}}_m = \mathbf{B}_m \mathbf{R}_m - \mathbf{B}_s \mathbf{R}_s - \mathbf{B}_s \mathbf{K}_s' \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_s - \mathbf{B}_m \mathbf{G}_1 = \mathbf{0} \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_s \mathbf{G}_2 - \mathbf{B}_m = \mathbf{0} \quad (14)$$

donde \mathbf{K}_s' , \mathbf{R}_m , \mathbf{R}_s , \mathbf{G}_1 y \mathbf{G}_2 son las ganancias de control evaluadas en el instante inicial $t = t_0$.

Desarrollando (8) según (9) y (10), se obtiene la siguiente expresión para la derivada del error de estado:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \tilde{\mathbf{u}}_s(t) - \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_m \tilde{\mathbf{u}}_m(t) \\ \dot{\mathbf{e}}(t) &= \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{K}'_S \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{R}_S \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{G}_2 F_m(t) + \mathbf{B}_s F_s(t) \\ &\quad - \mathbf{B}_s Z_e \mathbf{x}_s(t) - \tilde{\mathbf{A}}_m \mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_m \mathbf{R}_M \mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_m F_m(t) - \mathbf{B}_m \mathbf{G}_1 F_s(t) \end{aligned} \quad (15)$$

operando se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \tilde{\mathbf{A}}_m \mathbf{e}(t) + (\mathbf{A}_s - \tilde{\mathbf{A}}_m) \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{K}'_S \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{R}_S \mathbf{x}_m(t) \\ &\quad - \mathbf{B}_m \mathbf{R}_M \mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s Z_e \mathbf{x}_s(t) + (\mathbf{B}_s \mathbf{G}_2 - \mathbf{B}_m) F_m(t) + (\mathbf{B}_s - \mathbf{B}_m \mathbf{G}_1) F_s(t) \end{aligned} \quad (16)$$

teniendo en cuenta las condiciones de convergencia de estado de (12)-(14), se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \tilde{\mathbf{A}}_m \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s (\mathbf{K}'_S - \mathbf{K}'_S) \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{R}_S \mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_s \mathbf{R}_S \mathbf{x}_s(t) \\ &\quad - \mathbf{B}_m (\mathbf{R}_M - \mathbf{R}_m) \mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s Z_e \mathbf{x}_s(t) \end{aligned} \quad (17)$$

Finalmente, reordenando los términos de la anterior se obtiene una expresión general para el error del estado entre el maestro y el esclavo:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= (\tilde{\mathbf{A}}_m - \mathbf{B}_s \mathbf{R}_S) \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s (\mathbf{K}'_S - \mathbf{K}'_S) \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s (\mathbf{R}_S - \mathbf{R}_s) \mathbf{x}_m(t) \\ &\quad - \mathbf{B}_m (\mathbf{R}_M - \mathbf{R}_m) \mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s Z_e \mathbf{x}_s(t) \end{aligned} \quad (18)$$

Las matrices \mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_S y \mathbf{R}_m son las ganancias de control obtenidas en $t = t_0$. En caso de ser seleccionada la ganancia de control \mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_S y/o \mathbf{R}_m para la adaptación de sus parámetros, será posible diseñarlas para que mantengan o no sus valores iniciales. Es decir que la estrategia propuesta permite incluir los valores pasados de las ganancias \mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_S y \mathbf{R}_m respectivamente, para calcular su valor actual. Dicho esto, es necesario redefinir las ganancias de control mencionadas.

Definición 2: las ganancias de control que representan la dinámica del esclavo \mathbf{K}'_S , la interacción maestro-esclavo \mathbf{R}_S y la reflexión de esfuerzos \mathbf{R}_m son variantes con el tiempo y se definen

$$\begin{aligned} \mathbf{K}'_S &= \hat{\mathbf{K}}'_S = \mathbf{K}'_S + \hat{\mathbf{K}}'_S \\ \mathbf{R}_S &= \hat{\mathbf{R}}_S = \mathbf{R}_S + \hat{\mathbf{R}}_S \\ \mathbf{R}_m &= \hat{\mathbf{R}}_m = \mathbf{R}_m + \hat{\mathbf{R}}_m \end{aligned}$$

donde $\hat{\mathbf{K}}'_S$, $\hat{\mathbf{R}}_S$ y $\hat{\mathbf{R}}_m$ son las estimaciones de las ganancias de control para que el error $\mathbf{e}(t)$ converja a cero. Y \mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_S y \mathbf{R}_m son las ganancias de control para $t = t_0$ (valores pasados).

Por lo que (18) puede reescribirse como

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s (\hat{\mathbf{K}}'_S - \mathbf{K}'_S) \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s (\hat{\mathbf{R}}_S - \mathbf{R}_S) \mathbf{x}_m(t) \\ &\quad - \mathbf{B}_m (\hat{\mathbf{R}}_m - \mathbf{R}_m) \mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s Z_e \mathbf{x}_s(t) \end{aligned} \quad (19)$$

o bien

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{e}(t) + \Phi (\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta}) \quad (20)$$

donde Φ es una matriz de señales (referencia, salidas, etc) relacionadas al parámetro a ajustar y $\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta}$ es el vector de error de los parámetros.

Para garantizar la estabilidad del sistema adaptativo se plantea como función candidata de Lyapunov en función del error entre las señales de los estados y el error de los parámetros

$$V(\mathbf{e}, \hat{\mathbf{\theta}}) = \mathbf{e}^T P \mathbf{e} + (\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta})^T \Upsilon^{-1} (\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta}) \quad (21)$$

con $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ simétrica definida positiva y $\Upsilon^{-1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ diagonal definida positiva. La estabilidad estará garantizada si dV/dt es definida negativa

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -\mathbf{e}^T Q \mathbf{e} + 2(\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta})^T \Phi^T P \mathbf{e} + 2(\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta})^T \Upsilon^{-1} \frac{d\hat{\mathbf{\theta}}}{dt} \\ &= -\mathbf{e}^T Q \mathbf{e} + 2(\hat{\mathbf{\theta}} - \mathbf{\theta})^T \left(\Upsilon^{-1} \frac{d\hat{\mathbf{\theta}}}{dt} + \Phi^T P \mathbf{e} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

La matriz $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es definida positiva dado que verifica la ecuación de Lyapunov (Canudas de Wit, et al 1997; Khalil, 1992):

$$\tilde{\mathbf{A}}^T P + P \tilde{\mathbf{A}} = -Q \quad (23)$$

El primer término del segundo miembro de (22) es definido negativo, haciendo el resto igual cero se tiene una posible solución. Con esto se obtiene la ley de adaptación de parámetros que esta dada por

$$\frac{d\hat{\mathbf{\theta}}}{dt} = -\Upsilon \Phi^T P \mathbf{e} \quad (24)$$

Donde Φ es la matriz de señales relacionadas al parámetro a ajustar y tiene la siguiente forma:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{bmatrix}$$

\mathbf{e} es el error del estado, Υ es una matriz de ganancias de adaptación que define la velocidad de adaptación de cada parámetro.

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques del método adaptativo para teleoperación propuesto.

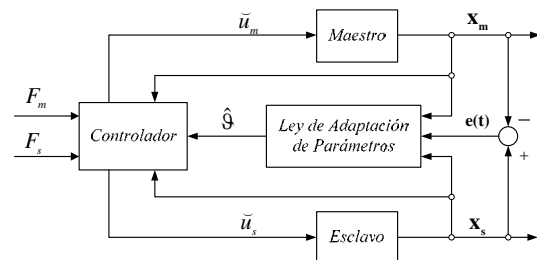


Figura 2. Diagrama de bloques para un sistema de teleoperación bilateral con Control Adaptativo

3.1 Estrategias de Control.

En este apartado se presentan las diferentes estrategias de control derivadas de las posibilidades que existen de adaptar los parámetros de cada una de las matrices de ganancias \mathbf{K}'_S , \mathbf{R}_S y \mathbf{R}_M . Como condición inicial de diseño para $t=t_0$ se considerará un movimiento libre del esclavo, esto implica que la fuerza reflejada hacia el maestro es nula.

Adaptación de la ganancia $\mathbf{K}'_S = \tilde{\mathbf{g}}'_S$. Según la Definición 2, la ganancia \mathbf{K}'_S se define como:

$$\mathbf{K}'_S = \tilde{\mathbf{g}}'_S = \mathbf{g}'_S + \hat{\mathbf{g}}'_S \quad (25)$$

Mientras que las ganancias \mathbf{R}_S y \mathbf{R}_M se suponen constantes. Por lo que el algoritmo de adaptación variará según se consideren o no las condiciones iniciales de la misma. La ecuación (19) se puede expresar de manera general mediante:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s(\tilde{\mathbf{g}}'_S - \mathbf{g}'_S)\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_m\mathbf{R}_M\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e\mathbf{x}_s(t) \quad (26)$$

sustituyendo (14) en (26)

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s(\tilde{\mathbf{g}}'_S - \mathbf{g}'_S)\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I})\mathbf{x}_s(t) \quad (27)$$

- Si $\mathbf{g}'_S \neq \mathbf{0}$, la derivada del error resulta:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s\hat{\mathbf{g}}'_S\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I})\mathbf{x}_s(t) \quad (28)$$

- Si $\mathbf{g}'_S = \mathbf{0}$, la derivada del error resulta:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s(\hat{\mathbf{g}}'_S - \mathbf{g}'_S)\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I})\mathbf{x}_s(t) \quad (29)$$

Para que el error de estado $\mathbf{e}(t)$ evolucione como un sistema autónomo, en (28) y (29) el vector de parámetros $\hat{\mathbf{g}}'_S$ debe converger a sus valores reales, esto es:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{g}}'_S &\rightarrow \mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I}) \text{ si } \mathbf{g}'_S \neq \mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{g}}'_S &\rightarrow \mathbf{g}'_S + \mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I}) \text{ si } \mathbf{g}'_S = \mathbf{0} \end{aligned}$$

Si se desarrolla la ley de adaptación de parámetros dada en (24), se obtiene el conjunto de ecuaciones que gobiernan la evolución de los parámetros que conforman la ganancia \mathbf{K}'_S :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{g}}'_{sj} &= g'_{sj} + \hat{g}'_{sj} \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \dot{\tilde{g}}'_{s1} &= g'_{s1} - \gamma_1 \int b_{s0}(p_{n1}e_1 + p_{n2}e_2 + \dots + p_{nn}e_n)x_{s1} \\ \dot{\tilde{g}}'_{s2} &= g'_{s2} - \gamma_2 \int b_{s0}(p_{n1}e_1 + p_{n2}e_2 + \dots + p_{nn}e_n)x_{s2} \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{g}}'_{sn} &= g'_{sn} - \gamma_n \int b_{s0}(p_{n1}e_1 + p_{n2}e_2 + \dots + p_{nn}e_n)x_{sn} \end{aligned} \quad (30)$$

Finalmente, las leyes de control del maestro y esclavo serán:

$$\tilde{u}_m(t) = \mathbf{K}_m\mathbf{x}_m(t) + \mathbf{R}_M\mathbf{x}_s(t) + F_m(t) + \mathbf{G}_1F_s(t) \quad (31)$$

$$\tilde{u}_s(t) = \tilde{\mathbf{g}}'_S\mathbf{x}_s(t) + \mathbf{R}_S\mathbf{x}_m(t) + \mathbf{G}_2F_m(t) + F_s(t) - \mathbf{Z}_e\mathbf{x}_s(t) \quad (32)$$

En la Figura 3 se observa la arquitectura adaptativa por convergencia de estado aplicada para la adaptación de los parámetros de la matriz \mathbf{K}'_S .

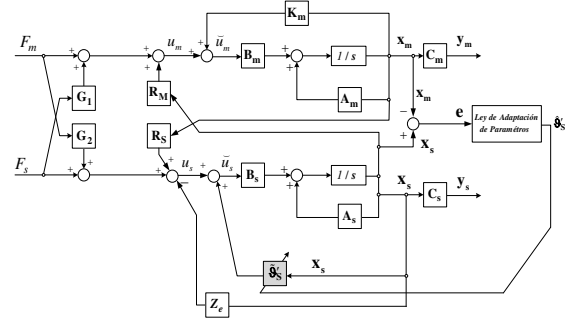


Figura 3. Diagrama de bloques para la adaptación de \mathbf{K}'_S .

Adaptación de la ganancia $\mathbf{R}_S = \tilde{\mathbf{g}}_S$. La Definición 2 establece que:

$$\mathbf{R}_S = \tilde{\mathbf{g}}_S = \mathbf{g}_S + \hat{\mathbf{g}}_S \quad (33)$$

Mientras que las ganancias \mathbf{K}'_S y \mathbf{R}_M se suponen constantes. Tal como sucede en el caso anterior, la ley de control resultante variará según se consideren o no las condiciones iniciales de \mathbf{R}_S . La ecuación (19) se puede expresar de manera general en términos de la ganancia de control a ser adaptada:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s(\tilde{\mathbf{g}}_S - \mathbf{g}_S)\mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_m\mathbf{R}_M\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e\mathbf{x}_s(t) \quad (34)$$

sustituyendo (14) en (34)

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s(\tilde{\mathbf{g}}_S - \mathbf{g}_S)\mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I})\mathbf{x}_s(t) \quad (35)$$

- Si $\mathbf{g}_S \neq \mathbf{0}$, la ecuación del error resulta:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s\hat{\mathbf{g}}_S\mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I})\mathbf{x}_s(t) \quad (36)$$

- Si $\mathbf{g}_S = \mathbf{0}$, la ecuación del error resulta:

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_s(\hat{\mathbf{g}}_S - \mathbf{g}_S)\mathbf{x}_m(t) - \mathbf{B}_s\mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I})\mathbf{x}_s(t) \quad (37)$$

Para que el error de estado $\mathbf{e}(t)$ evolucione como un sistema autónomo, en (36) y (37) el vector de parámetros $\hat{\mathbf{g}}_S$ debe converger a sus valores reales:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{g}}_S &\rightarrow \mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I}) \text{ si } \mathbf{g}_S \neq \mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{g}}_S &\rightarrow \mathbf{g}_S + \mathbf{Z}_e(k_f\mathbf{G}_2 + \mathbf{I}) \text{ si } \mathbf{g}_S = \mathbf{0} \end{aligned}$$

Y las leyes de control del maestro y esclavo serán:

$$\tilde{u}_m(t) = \mathbf{K}_m\mathbf{x}_m(t) + \mathbf{R}_M\mathbf{x}_s(t) + F_m(t) + \mathbf{G}_1F_s(t) \quad (38)$$

$$\tilde{u}_s(t) = \mathbf{K}'_S\mathbf{x}_s(t) + \tilde{\mathbf{g}}_S\mathbf{x}_m(t) + \mathbf{G}_2F_m(t) + F_s(t) - \mathbf{Z}_e\mathbf{x}_s(t) \quad (39)$$

Adaptación de la ganancia $\mathbf{R}_M = \hat{\mathbf{g}}_M$. Según la Definición 2 establece que:

$$\mathbf{R}_M = \hat{\mathbf{g}}_M = \mathbf{g}_m + \hat{\mathbf{g}}_M \quad (40)$$

Mientras que las ganancias \mathbf{K}'_S y \mathbf{R}_S se suponen constantes. Y la ley de control resultante variará según se consideren o no las condiciones iniciales de \mathbf{R}_M . No obstante, se ha establecido que no existe contacto para $\mathbf{t} = \mathbf{t}_0$, esto es, $\mathbf{R}_m = k_f \mathbf{Z}_e(\mathbf{t}_0) = \mathbf{0}$. Por lo que sustituyendo (13) en (19) se puede expresar de manera general en términos de la ganancia de control a ser adaptada:

$$\dot{\mathbf{e}}(\mathbf{t}) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{e}(\mathbf{t}) - \mathbf{B}_m \hat{\mathbf{g}}_M \mathbf{x}_s(\mathbf{t}) - \mathbf{B}_m \mathbf{G}_1 \mathbf{Z}_e \mathbf{x}_s(\mathbf{t}) \quad (41)$$

Para que el error de estado $\mathbf{e}(\mathbf{t})$ evolucione como un sistema autónomo, en (41) el vector de parámetros $\hat{\mathbf{g}}_M$ debe converger a sus valores reales:

$$\hat{\mathbf{g}}_M \rightarrow -\mathbf{G}_1 \mathbf{Z}_e$$

Y las leyes de control del maestro y esclavo serán:

$$\bar{u}_m(\mathbf{t}) = \mathbf{K}_m \mathbf{x}_m(\mathbf{t}) + \hat{\mathbf{g}}_M \mathbf{x}_s(\mathbf{t}) + F_m(\mathbf{t}) + \mathbf{G}_1 F_s(\mathbf{t}) \quad (42)$$

$$\bar{u}_s(\mathbf{t}) = \mathbf{K}'_S \mathbf{x}_s(\mathbf{t}) + \mathbf{R}_S \mathbf{x}_m(\mathbf{t}) + \mathbf{G}_2 F_m(\mathbf{t}) + F_s(\mathbf{t}) - \mathbf{Z}_e \mathbf{x}_s(\mathbf{t}) \quad (43)$$

4. DESARROLLO DEL BANCO EXPERIMENTAL

La Figura 4 muestra el banco de teleoperación experimental diseñado y construido para validar los resultados de las estrategias de control propuestas. El banco experimental consta de un maestro y un esclavo ambos con un grado de libertad. La articulación del maestro y del esclavo tiene la misma longitud. La diferencia entre el maestro y el esclavo se realiza haciendo que este último posea un volante de inercia adicional y un sistema de freno donde por medio de unas pesas se puede cambiar el rozamiento y así modificar su dinámica. También tiene una leva acoplada a su eje y una plataforma para la instalación de un resorte (parte del entorno) que tendrá contacto (roce) con la leva y así tener un entorno variante con el tiempo. Ambos manipuladores maestro y esclavo son controlados mediante motores RE118797 de Maxon con encoders de 500 ppv. Las señales de los encoders de cada articulación son enviadas a una tarjeta servoamplificadora 4-Q-CC ADS 50/5 Maxon y transferidas a un ordenador (Pentium IV) a través de una tarjeta de adquisición de datos *National Instruments* 6024E, por la que se puede interactuar con el sistema teleoperado y transferir las señales de control de cada articulación.

Figura 4. Sistema teleoperado experimental de un grado de libertad.

4.1 Identificación del sistema teleoperado

Mediante el proceso de identificación se pretende caracterizar matemáticamente la función de transferencia del maestro y del esclavo analizando la respuesta obtenida de cada sistema al aplicar una tensión de control. Para realizar la identificación se utiliza el toolbox de identificación (Matlab[®]), cada sistema se ha optado por estudiar su respuesta en lazo abierto frente a una entrada en escalón. Puesto que cada sistema se corresponde a un motor de CC, se identifica la función de transferencia del motor de CC del maestro y del esclavo considerando la dinámica acoplada a su eje.

El esquema de control en posición con los valores físicos identificado de un motor de CC, considerando una dinámica acoplada a su eje, en lazo abierto se muestran en las Figuras 5 y 6, donde $u_{m,s}(t)$ es la tensión de referencia introducida, $\dot{\theta}_{m,s}(t)$ es la medida de la velocidad angular, $\theta_{m,s}(t)$ es la medida de la posición, para el maestro y el esclavo respectivamente.

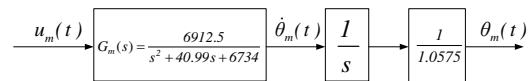


Figura 5. Esquema de control en posición del maestro en bucle abierto.

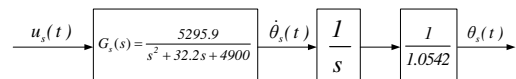


Figura 6. Esquema de control en posición del esclavo en bucle abierto.

De las funciones de transferencias identificadas (Figuras 5 y 6) para el sistema maestro - esclavo se obtiene el modelo en el espacio de estado dado por las ec. (1) y (2) donde el vector de estado, $\mathbf{x}_{m,s} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, queda definido por la posición, velocidad y aceleración de los motores.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez identificada la dinámica del sistema teleoperado, para la verificación y validación experimental del algoritmo adaptativo diseñado en la sección 3, es necesario obtener las ganancias de control por convergencia de estados para condiciones iniciales $\mathbf{t} = \mathbf{t}_0$ según Azorín (2003). Considerando que el coeficiente de reflexión es $k_f = 0.1$ y los polos del error y del esclavo están ubicados en el plano s en -110 y -50 respectivamente, las ganancias de control obtenidas:

$$\mathbf{R}_m = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\mathbf{R}_s = [240.06 \quad 5.733 \quad 0.036]$$

$$\mathbf{K}_m = [-19.12 \quad -0.117 \quad -0.017]$$

$$\mathbf{K}'_s = [-264.95 \quad -6.25 \quad -0.059]$$

$$\mathbf{G}_2 = 1.301$$

La Figura 7 muestra el esquema donde se aplica el método adaptativo para la experiencia de validación, se observa que no se involucra la influencia de la fuerza ejercida o carga del esclavo

sobre el maestro F_s , dado que el sistema experimental no posee ningún sensor de fuerza/par que permita medir la fuerza.

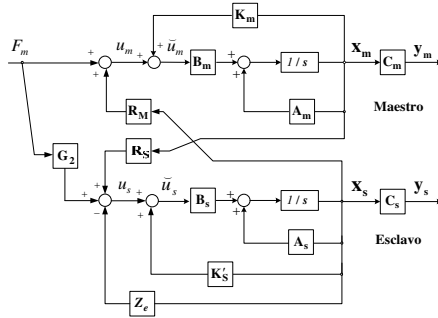


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de teleoperación.

Previamente a implementar el algoritmo de control adaptativo, en el sistema teleoperado real, se comprueba en simulación el funcionamiento de las estrategias de adaptación de las ganancias $\tilde{\theta}'_S$ y $\tilde{\theta}_S$, considerando la dinámica del sistema maestro – esclavo identificada.

Si se observa la Figura 5, se puede inferir que el objetivo de adaptación de las ganancias $\tilde{\theta}'_S$ y $\tilde{\theta}_S$ es compensar las variaciones del entorno de contacto Z_e , dotando al sistema de robustez y estabilidad durante la tarea de teleoperación. A continuación se presenta la respuesta de cada estrategia adaptativa bajo esta condición de operación.

Adaptación de la ganancia $K'_S = \tilde{\theta}'_S$.

En la Figura 8 se muestra la simulación en *Simulink* (Matlab) del sistema teleoperado cuando el operador ejerce una fuerza constante de 1 Nm sobre el maestro. Como puede comprobarse la posición del esclavo sigue la posición del maestro para la variación de la constante de rigidez $k_e = 10 \text{ N/rad}$, 20 N/rad y 100 N/rad , dados en los instantes $t = 3 \text{ seg}$, 8 seg y 13 seg , respectivamente.



Figura 8. Posición del maestro y del esclavo.

En la Figura 9 se muestra el error del estado del maestro-esclavo donde el sistema converge a cero en función de la velocidad de variación que tienen los parámetros de $\tilde{\theta}'_S$, mostrado en la Figura 10, para converger a los valores estimados.

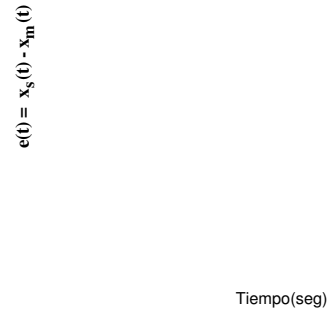


Figura 9. Error del estado maestro-esclavo $e(t)$.

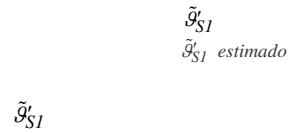


Figura 10. Variación de los parámetros de $\tilde{\theta}'_S$.

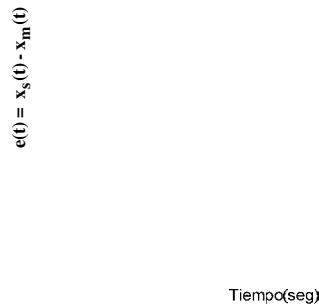
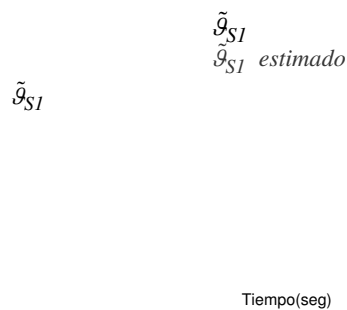
Adaptación de la ganancia $R_S = \tilde{\theta}_S$

De forma similar bajo las mismas condiciones de operación, en la Figura 11, se observa como la posición del esclavo sigue la posición del maestro durante la variación de la dinámica del entorno de contacto Z_e .



Figura 11. Posición del maestro y del esclavo.

Al igual, en la Figura 12 se muestra el error del estado del maestro-esclavo donde el sistema converge a cero en función de la velocidad de variación que tienen los parámetros de $\tilde{\theta}_S$ para converger a los valores estimados, Figura 13.

Figura 12. Error del estado maestro-esclavo $e(t)$.Figura 13. Variación de los parámetros de $\hat{\mathbf{g}}_S$.

Se ha verificado en simulación, el buen funcionamiento del método de control adaptativo. Se debe mencionar, que las ganancias de adaptación influyen en la velocidad de convergencia del parámetro de control, por ende, en la estabilidad del sistema. Realizando ligeras variaciones de las ganancias de adaptación γ , se logra un buen desempeño y una rápida convergencia de estado; lo que hace que el sistema sea robusto y asintóticamente estable. Al igual, se debe destacar que la compensación que se realiza al adaptar los parámetros de las ganancias $\hat{\mathbf{g}}'_S$ y $\hat{\mathbf{g}}_S$, permite mantener la misma impedancia desde el punto de vista del operador aunque el entorno Z_e cambie, lo cual es de gran interés en algunas aplicaciones de telemanipulación.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al implementar en el sistema teleoperado real, cada una de las estrategias descritas en la sección 3.

En un sistema real la señal de control del esclavo (32) vendrá dada por

$$\ddot{u}_s(t) = \mathbf{K}'_S \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{R}_S \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{G}_2 F_m(t) \quad (44)$$

debido que existe un contacto real con el entorno Z_e .

En la experiencia, el operador mueve el brazo del maestro de modo que el esclavo realiza cuatro contactos con un entorno de

dinámica desconocida. Se ha considerado que la fuerza de interacción del esclavo con el entorno f_e es igual a la intensidad de la corriente del motor del esclavo. Sin embargo, en función de conocer los valores reales a los que debe converger algunos de los parámetros de $\hat{\mathbf{g}}_S$, se ha obtenido experimentalmente la constante de rigidez k_e a partir de la intensidad del motor del esclavo y la evolución de la posición del esclavo durante el contacto con el entorno (esponja), resultando un valor de 40 Nm/rad . De igual manera, al no disponer de un sensor de fuerza/par en el sistema experimental para medir la fuerza que ejerce el operador sobre el maestro se ha calculado dicha fuerza como

$$F_m = k_{op} \theta_m(t) \quad (45)$$

experimentalmente se ha conseguido el valor de $k_{op} = 20 \text{ Nm/rad}$.

Adaptación de la ganancia $\mathbf{K}'_S = \hat{\mathbf{g}}'_S$.

Para las condiciones de operación del nuevo instante los parámetros se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Reguladores del sistema teleoperado

Parámetros de diseño	Ganancias de Control
$\mathbf{R}_M = k_f Z_e$	$\mathbf{K}_m = [-19.12 \quad -0.117 \quad -0.017]$
$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_s$	$\mathbf{R}_S = [240.06 \quad 5.733 \quad 0.036]$
$\mathbf{K}'_S = \hat{\mathbf{g}}'_S$	$\mathbf{G}_2 = 1.301$
$\mathbf{K}'_S = \mathbf{g}'_S$	Si $\mathbf{g}'_S \neq \mathbf{0}$
$\gamma_1 = 2.2e-005$	$\mathbf{g}'_S = [-264.95 \quad -6.25 \quad -0.059]$
$\gamma_2 = -1.47e-007$	$\hat{\mathbf{g}}'_S = [45.2 \quad 1.13 \quad 0.0113]$
$\gamma_3 = -1.35e-011$	$\hat{\mathbf{g}}'_S = [-219.7 \quad -5.12 \quad -0.048]$

Tomando las condiciones iniciales, parámetros de diseño y operación de la Tabla 2 se observan los resultados en la Figura 14. Como puede comprobarse la posición del esclavo sigue la posición del maestro hasta el instante que el esclavo no puede continuar el avance debido a su interacción con el entorno y se observa un retroceso en posición del esclavo, debido a la adaptación de los parámetros, mientras el maestro sigue su avance.



Figura 14. Posición del maestro y del esclavo.

En la Figura 15 se muestra el error del estado del maestro-esclavo donde el sistema converge a cero en función de la

velocidad de variación que tienen los parámetros de $\tilde{\mathbf{g}}_s$, mostrado en la Figura 16, para alcanzar los valores estimados presentados en la Tabla 2.

adaptación de los parámetros, mientras el maestro sigue su avance.

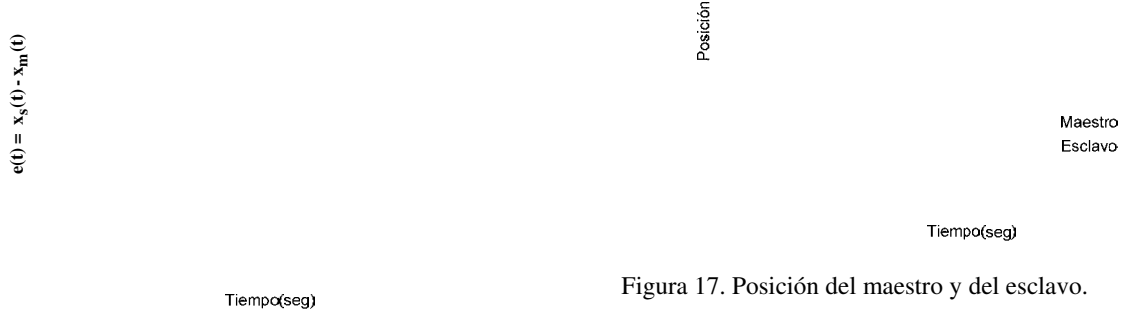


Figura 15. Error del estado maestro-esclavo $e(t)$.

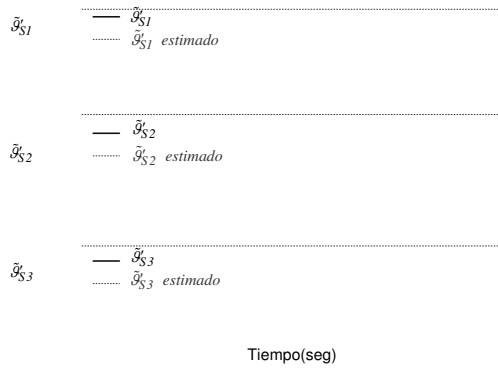


Figura 16. Variación de los parámetros de $\tilde{\mathbf{g}}_s$.

Adaptación de la ganancia $\mathbf{R}_s = \tilde{\mathbf{g}}_s$.

De forma similar las condiciones de operación para el nuevo instante para el presente caso se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Reguladores del sistema teleoperado

Parámetros de diseño	Ganancias de Control
$\mathbf{R}_M = k_f \mathbf{Z}_e$	$\mathbf{K}_m = [-19.12 \quad -0.117 \quad -0.017]$
$\mathbf{K}'_s = \mathbf{K}'_s$	$\mathbf{K}'_s = [-264.95 \quad -6.25 \quad -0.059]$
$\mathbf{R}_s = \tilde{\mathbf{g}}_s$	$\mathbf{G}_2 = 1.301$
$\mathbf{R}_s = \mathbf{g}_s$	Si $\mathbf{g}_s \neq \mathbf{0}$
$\gamma_1 = -1.59e-004$	$\mathbf{g}_s = [240.06 \quad 5.733 \quad 0.036]$
$\gamma_2 = -1.89e-006$	$\hat{\mathbf{g}}_s = [45.2 \quad 1.13 \quad 0.011]$
$\gamma_3 = 1.58e-010$	$\mathbf{g}_s = [285.3 \quad 6.86 \quad 0.047]$

Se observan los resultados en la Figura 17, tomando como condiciones iniciales, parámetros de diseño y operación de la Tabla 3. Como puede comprobarse la posición del esclavo sigue la posición del maestro hasta el instante que el esclavo no puede continuar el avance debido a su interacción con el entorno y se observa un retroceso en posición del esclavo, debido a la



Figura 17. Posición del maestro y del esclavo.

En la Figura 18 se muestra el error del estado del maestro-esclavo donde el sistema converge a cero en función de la velocidad de variación que tienen los parámetros de $\tilde{\mathbf{g}}_s$, mostrado en la Figura 19, para alcanzar los valores estimados presentados en la Tabla 3.

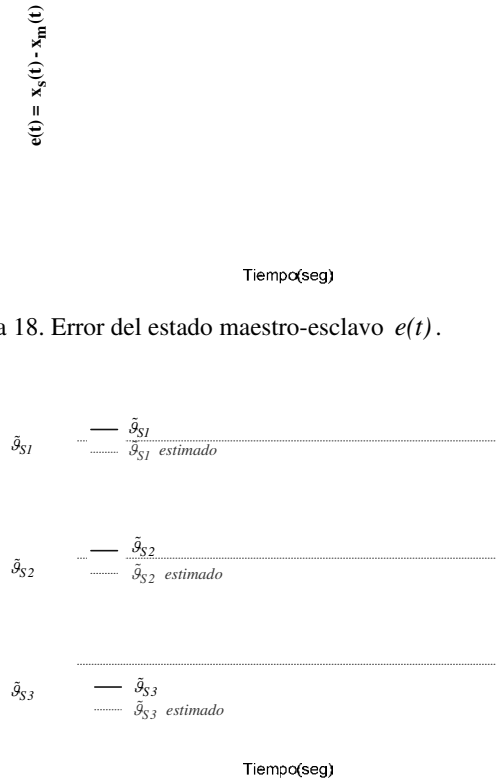


Figura 18. Error del estado maestro-esclavo $e(t)$.

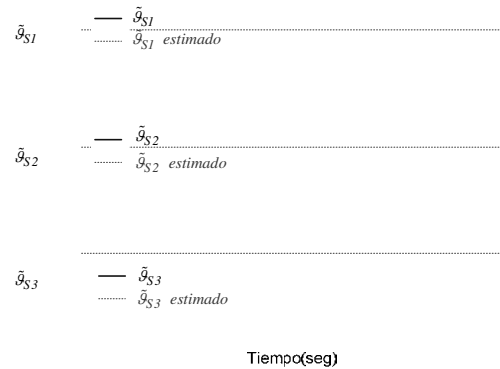


Figura 19. Variación de los parámetros de $\tilde{\mathbf{g}}_s$.

Adaptación de la ganancia $\mathbf{R}_M = \tilde{\mathbf{g}}_M$.

Las condiciones de operación para el nuevo instante en el presente caso se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Reguladores del sistema teleoperado

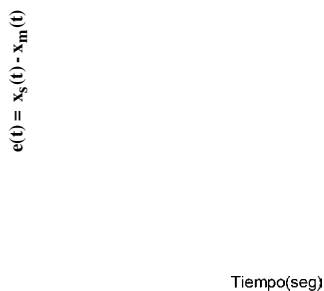
Parámetros de diseño	Ganancias de Control
$\mathbf{R}_m = \mathbf{0}$	$\mathbf{K}_m = [-19.12 \quad -0.117 \quad -0.017]$
$\mathbf{K}'_S = \mathbf{K}'_s$	$\mathbf{K}'_S = [-264.95 \quad -6.25 \quad -0.059]$
$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_s$	$\mathbf{R}_S = [240.06 \quad 5.733 \quad 0.036]$
$\mathbf{R}_M = \tilde{\mathbf{g}}_M$	$\mathbf{G}_1 = 0.769 \quad \mathbf{G}_2 = 1.301$
$\gamma_1 = -9.4e-005$	Si $\mathbf{g}_m = \mathbf{0}$
$\gamma_2 = 3.6e-007$	$\hat{\mathbf{g}}_M = [-30.74 \quad -0.769 \quad -0.0077]$
$\gamma_3 = 3.3e-011$	$\tilde{\mathbf{g}}_M = [-30.74 \quad -0.769 \quad -0.0077]$

Los resultados de la pruebas se muestran en la Figura 19, tomando como condiciones iniciales, parámetros de diseño y operación de la Tabla 4. Como se muestra la posición del esclavo sigue la posición del maestro hasta el instante que el esclavo no puede continuar el avance debido a su interacción con el entorno y se observa un retroceso en posición del esclavo, debido a la adaptación de los parámetros, mientras el maestro sigue su avance.



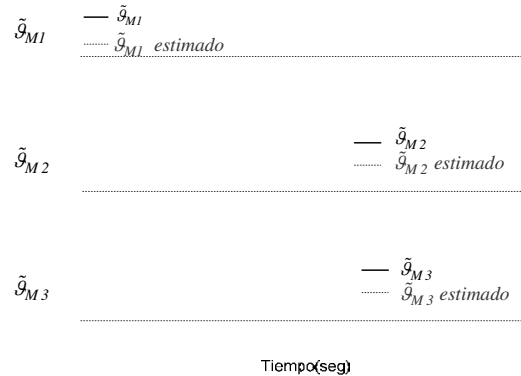
Figura 20. Posición del maestro y del esclavo.

En la Figura 21 se muestra el error del estado del maestro-esclavo donde el sistema converge a cero en función de la velocidad de variación que tienen los parámetros de $\tilde{\mathbf{g}}_M$, mostrado en la Figura 22, para alcanzar los valores estimados presentados en la Tabla 4.

Figura 21. Error del estado maestro-esclavo $e(t)$.

En las figuras 10 y 13 se muestra la evolución de los parámetros de adaptación a través de la simulación; mientras que en las

figuras 16, 19 y 22 se muestra la evolución de los mismos en el sistema físico real.

Figura 22. Variación de los parámetros de $\tilde{\mathbf{g}}_M$.

Tal como puede observarse los parámetros convergen más rápido en el primer caso que en el segundo. Esto se debe a que las ganancias de adaptación son diferentes en ambos sistemas. En el entorno simulado las ganancias son mayores que en el entorno real debido a las restricciones físicas del sistema como por ejemplo la corriente máxima en los motores.

Los resultados obtenidos en este trabajo son extrapolables a sistemas maestro-esclavo con varios grados de libertad. En el caso de que las cinemáticas de ambos dispositivos fueran similares podría realizarse un control eje a eje, de forma que se controlaría independientemente los grados de libertad que fueran homólogos en cada dispositivo. Por el contrario, si los dispositivos tienen cinemáticas diferentes, entonces haría uso de las correspondientes transformaciones cinemáticas de maestro y esclavo para el control de los diferentes grados de libertad de los mismos.

6. CONCLUSIÓN

En este artículo se ha presentado la ley de control de un algoritmo adaptativo para sistemas teleoperados y se ha aplicado experimentalmente en un banco de pruebas de un grado de libertad. El esquema de teleoperación considerado permite evaluar la interacción que existe entre los diferentes elementos del sistema (operador-maestro-esclavo-entorno). El diseño de la ley de adaptación se basa en la teoría de estabilidad de Lyapunov y de esta manera se garantiza la estabilidad global del sistema y por tanto la convergencia del estado del esclavo hacia el estado del maestro.

A través de los resultados experimentales que se han mostrado en este artículo queda comprobada la eficacia de la ley de control propuesta poniendo de manifiesto que las variaciones en el entorno remoto pueden ser compensadas mediante el algoritmo adaptativo. Esto tiene una gran relevancia en sistema teleoperador ya que permite que el operador 'sienta' de igual forma entornos que a priori podrían tener pequeñas diferencias. Así pues el operador trabajará de igual forma aunque el entorno sufra variaciones. Esta particularidad puede resultar de gran utilidad en aplicaciones de mantenimiento remoto en las que se tienen que manipular elementos con gran diferencia en sus pesos, y no se desea que esto provoque fatiga en el operador; ya que, la finalidad es que operador maneje con destreza todos los elementos independientemente de su peso.

Si bien las pruebas experimentales se han realizado con un grado de libertad, la estructura de control y su estabilidad son probadas para orden n . La extensión a varios grados de libertad puede realizarse mediante un control desacoplado eje a eje si las cinemáticas son similares, o acoplado mediante el uso de las correspondientes transformadas cinemáticas si las configuraciones de maestro y esclavo son diferentes.

REFERENCIAS

- Anderson R. J. y M. W. Spong (1989). Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **Vol. 34**(5), 494-501.
- Aracil R., Ferre M., Hernando M., Pinto E. y Sebastian J.M. (2002). Telerobotic system for live-power line maintenance: ROBTET. *Control Engineering Practice*, **Vol. 10**, 1271-1281.
- Aström K.J and B. Wittenmark (1995). *Adaptive Control*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Azorin J. M. (2003). *Control Bilateral por Convergencia de Estado de Sistemas Teleoperados con Retardos en la Transmisión*. Tesis Doctoral, Universidad Miguel Hernández, España.
- Canudas de Wit, C. Siciliano B., and Bastin G. *Theory of Robot Control*. Springer (1997) ISBN 3-540-76054-7
- Craig J. J. (1988). *Adaptive Control of Mechanical Manipulators*. Addison-Wesley Publishing Company. Second Edition.
- Feliu V., K. S. Rattan and H. B. Brown (1989). *Adaptive Control of a Single-Link Flexible Manipulator. In The Presence Of Joint Friction And Load Changes*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pittsburgh, 1036-1041.
- Ghorbel F., J. Y. Hung and M. W. Spong (1989). *Adaptive Control of Flexible-Joint Manipulators*. Control Systems Magazine, IEEE, **Vol. 9**(7), 9-13.
- Goertz R. (1964). *Manipulators Systems Development at ANL*. Proceedings 12th Conference on Remote Systems Technology, ANS.
- Guthart G. S. y Salisbury J. K. (2000). *The intuitive telesurgery system: Overview, application*. Proceedings IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 618-621.
- Hannaford B. (1989). *Stability and Performance Tradeoffs in Bilateral Telemanipulation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1764-1967.
- Hashttrudi-Zaad K. and S. E. Salcudean (1996). *Adaptive Transparent Impedance Reflecting Teleoperation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1369-1374.
- Hosseini-Sunny K., H. Momeni and F. Janabi-Sharifi (2005). *Adaptive Teleoperation Systems Design*. Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, 334-339.
- Kaneko, K., Tokashiki, H., Tanie, K., Komoriya, K. *Macro-micro bilateral teleoperation based on operational force feedforward-operational force feedforward bilateral teleoperation and its dexterity*. IEEE/RSJ International Conference. (1998). Vol3. Pag.1761 - 1769.
- Khalil H.K., *Nonlinear Systems*. Macmillan, New York (1992)
- Keller U., K. Müller, N. Hickey, D. Ready and R. Leitch (1998). *Extending the Gradient Method to Qualitative Model Reference Adaptive Control*. UKACC International Conference on Control.
- Kelly R. and R. Carelli (1988). *Unified approach to adaptive control of robotic manipulators*. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Austin.
- Landau Y. D., (1979). *Adaptive control-The Model Reference-Approach*. Mardel Dekker, Inc.
- Lawrence D. A (1992). *Designing Teleoperator Architectures for Transparency*. Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1406-1411.
- Lee H. K., M. H Shin and M. J. Chung, (1997). *Adaptive Controller of Master-Slave for Transparent Teleoperation*. ICAR, 1021-1026.
- Niemeyer G. and J. J. E. Slotine (1991). *Stable Adaptive Teleoperation*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, **Vol. 6**(1), 152-162.
- Peñín L. F (1998). *Control Bilateral de Robots Teleoperados. Contribuciones a la Reflexión de Fuerzas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Raimondi T. y Galbiati L. (1992). *Manipulators Mascot IV used in Jet and prospects of enhancement*. EURATOM, editor, Teleoperation: Numerical Simulation and Experimental Validation. Editado por M.C. Becquet, 139-161.
- Raju G. J., G. C. Verghese y T. B. Sheridan (1989). *Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Teleoperation*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1316-1321.
- Rodríguez F. and M. J. López (1996). *Control Adaptativo y Robusto*. Universidad del Sevilla, España.
- Romano, J.M.; Webster, R.J.; Okamura, A.M. (2007). *Teleoperation of Steerable Needles*. Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on. 934 - 939.
- Ryu J. H. and D. S. Kwon (2000). *A Novel Adaptive Bilateral Control Scheme using Dual Closed-loop Dynamic Characteristics of Master/Slave Manipulators*. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, 1173-1178.
- Siciliano B., B. S. Yuan and W. J. Book (1986). *Model Reference Adaptive Control of a One Link Flexible Arm*. 25th IEEE Conference on Decision and Control.
- Sheridan T. B (1989). *Telerobotics*. Automática, **Vol. 25**(4).
- Slotine J-J. E. and W. Li (1987). *Adaptive Strategies in Constrained Manipulation*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 595-601.
- Slotine J-J. E. and W. Li (1988) *Adaptive Manipulator Control: A Case Study*. IEEE Transactions on Automatic Control, **Vol.33**(11), 995-1003.
- Tavakoli, M.; Aziminejad, A.; Patel, R.V.; Moallem, M. (2008) *Discrete-time bilateral teleoperation: modelling and stability analysis*. Control Theory & Applications, IET. **Vol. 2**, (6), 496 - 512
- Whitaker H. P., J. Yamron and A. Keser (1958). *Design of Model Reference Adaptive Control Systems for Aircraft*. Report R-164 Instrumentation Laboratory, M.I.T., Cambridge.
- Yokokohji Y. and T. Yoshikawa (1992). *Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 849-858.
- Zhu W. H and S. E. Salcudean (1999). *Teleoperation with Adaptive Motion/Force Control*. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 231-237.