

# Mejoramiento de la Robustez en un Esquema de Teleoperación Basado en Estimación de Velocidad y Fuerza

Alejandro Gutiérrez–Giles\* Alejandro Rodríguez–Ángeles\*  
Marco Arteaga–Pérez\*\*

\* *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, CDMX, México (e-mail: {alejandro.giles,aangeles}@cinvestav.mx).*

\*\* *División de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM, Av. Universidad Nacional 3000, Ciudad Universitaria, CDMX, México (e-mail: marteagp@unam.mx)*

**Resumen:** Se mejora la robustez de un esquema de teleoperación propuesto recientemente por los autores. Dicho esquema sólo requiere de mediciones de posición y de par de entrada y es capaz de estimar las velocidades articulares y las fuerzas externas. El esquema mencionado está diseñado para obtener una transparencia casi ideal, por lo que es poco robusto ante incertidumbres paramétricas y perturbaciones externas. En el presente trabajo, se rediseñan los controladores para lograr dos objetivos: 1) Estabilidad de los robots involucrados cuando no hay fuerzas externas y 2) Seguimiento arbitrariamente cercano de la posición del esclavo respecto a la posición del maestro sin importar si se está ejerciendo una fuerza sobre la superficie remota. Estos puntos son conseguidos a cambio de cierto sacrificio en la transparencia del sistema. Se presentan resultados experimentales, tanto en un ambiente controlado como en una conexión a través de internet, para validar el esquema propuesto.

*Keywords:* Teleoperation, robotics, robustness, observers, stability

## 1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de teleoperación maestro–esclavo se compone comúnmente de un *operador humano* que mueve un robot llamado *maestro* cuyas señales son transmitidas a través de un *canal de comunicación* para ser utilizadas en el control de un robot *esclavo* el cual puede manipular un *entorno remoto*. En la teleoperación robótica se persiguen básicamente dos objetivos: la *transparencia* y la *robustez* del sistema. La primera propiedad dota al operador humano de la sensación de *telepresencia*, es decir, el operador tiene la sensación de estar manipulando directamente el entorno remoto. La segunda propiedad garantiza que el sistema se comporte bien en escenarios no previstos, como perturbaciones externas, retardos variantes en la comunicación, pérdida de información, etc. De acuerdo con Lawrence (1993), estos dos objetivos son contradictorios y por lo tanto el favorecimiento de uno de ellos depende de la aplicación en específico. Gran parte del trabajo existente en la literatura se ha enfocado en la robustez en presencia de retardos, como puede verse en la compilación realizada en Hokayem y Spong (2006) que resalta los resultados más importantes hasta 2006. Para demostrar estabilidad en presencia de retardos, algunos de los esquemas más importantes son los controladores basados en pasividad, que se exponen en el excelente tutorial de Nuño et al. (2011). Por otro lado, la trans-

parencia es un objetivo menos estudiado. En la década de 1990, Yokokohji y Yoshikawa (1994) estableció que se requieren cuatro canales de comunicación para lograr la transparencia ideal, *i.e.*, transmitir de un lado a otro tanto fuerzas como posiciones. Este resultado fue mejorado por Hashtrudi-Zaad y Salcudean (2002) al demostrar que puede lograrse la transparencia ideal con sólo tres canales de comunicación. En otro contexto, los últimos esfuerzos sobre sistemas de teleoperación se enfocan en la estimación de algunas variables, con el objetivo de ahorrar costos, reducir peso y tamaño, etc. Por ejemplo, en Sarras et al. (2016) se utiliza el conocido observador de inmersión e invarianza (I&I, por sus siglas en inglés) para estimar la velocidad articular de los robots. Dicho resultado es mejorado más tarde por Nuño et al. (2018). Otros esfuerzos recientes que no requieren medición de velocidad pueden encontrarse en Nuño et al. (2018); Arteaga–Pérez et al. (2018); Arteaga–Pérez y Nuño (2018). Con respecto a la estimación de fuerza, existen relativamente pocos resultados, de los que pueden mencionarse Daly y Wang (2014); Gutiérrez–Giles y Arteaga–Pérez (2017), en los que el objetivo principal es la transparencia del sistema.

El presente trabajo se basa en un resultado reciente de los autores (Gutiérrez–Giles et al., 2019), en el que se obtiene una transparencia casi ideal del sistema, sin medir fuerza ni velocidad en ambos robots. Dicho esquema se rediseña en este artículo para lidiar con los problemas de robustez inherentes al objetivo de transparencia. Además, se recoge de Hashtrudi-Zaad y Salcudean (2002) la idea

\* Este trabajo fue financiado parcialmente por el proyecto DGAPA–UNAM con registro IN114617 y por el Conacyt bajo el proyecto CB-2015-01/254329 y la beca CVU: 334785.

de utilizar retroalimentación local de fuerza para mejorar el desempeño del sistema.

## 2. MODELO MATEMÁTICO Y PROPIEDADES

Considere un sistema de teleoperación maestro–esclavo, cuya dinámica puede ser modelada mediante las ecuaciones

$$\mathbf{H}_m(\mathbf{q}_m)\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)\dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m) = \boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\tau}_h \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_s(\mathbf{q}_s)\ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{C}_s(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s)\dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{g}_s(\mathbf{q}_s) = \boldsymbol{\tau}_s - \boldsymbol{\tau}_e, \quad (2)$$

donde  $\mathbf{q}_m, \mathbf{q}_s \in \mathbb{R}^n$  son las coordenadas generalizadas para el manipulador maestro y para el manipulador esclavo, respectivamente. Para  $i = \{m, s\}$ ,  $\mathbf{H}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia que es positiva definida para toda  $\mathbf{q}_i$ ,  $\mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)\dot{\mathbf{q}}_i \in \mathbb{R}^n$  es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $\mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de gravedad,  $\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^n$  son los pares de entrada de cada manipulador,  $\boldsymbol{\tau}_h \in \mathbb{R}^n$  es el par impuesto por el operador humano sobre el robot maestro y  $\boldsymbol{\tau}_e \in \mathbb{R}^n$  es el par de fuerzas externas debido a la interacción del robot esclavo con el entorno remoto. En este trabajo se asume que las matrices anteriores satisfacen las propiedades estándar de los robots manipuladores de cadena cinemática abierta (Siciliano et al., 2010). Se asume además que los manipuladores involucrados se componen únicamente de articulaciones de revolución. Algunas propiedades de utilidad para el desarrollo subsecuente, que surgen cuando la matriz  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  se define utilizando los símbolos de Christoffel del primer tipo, se enlistan a continuación (Kelly y Santibáñez, 2003).

*Propiedad 2.1.* Cuando el robot se compone únicamente de articulaciones de revolución, existe una constante positiva  $k_H$  tal que

$$\|\mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{y}\| \leq k_H\|\mathbf{y}\|, \quad (3)$$

para toda  $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ .

*Propiedad 2.2.* El vector  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{x})\mathbf{y}$  satisface  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{x})\mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{y})\mathbf{x}$  para todo  $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ .  $\square$

*Propiedad 2.3.* Cuando el manipulador cuenta sólo con articulaciones de revolución, existe una constante  $k_{C1}$ , tal que

$$\|\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{x})\mathbf{y}\| \leq k_{C1}\|\mathbf{x}\|\|\mathbf{y}\|, \quad (4)$$

para todo  $\mathbf{q}, \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ .  $\square$

Para estimar la fuerza de contacto del robot esclavo con el ambiente remoto, así como el par de entrada del operador humano, considere las siguientes definiciones.

$$\mathbf{z}_{m1} \triangleq \mathbf{H}_m^{-1}(\mathbf{q}_m)\boldsymbol{\tau}_h \quad (5)$$

$$\mathbf{z}_{s1} \triangleq -\mathbf{H}_s^{-1}(\mathbf{q}_s)\boldsymbol{\tau}_e. \quad (6)$$

Se asume que los vectores  $\mathbf{z}_{m1}$  y  $\mathbf{z}_{s1}$  satisfacen las siguientes suposiciones (Gutiérrez-Giles y Arteaga-Pérez, 2014).

*Suposición 2.1.* El vector  $\mathbf{z}_{i1}$  puede ser escrito como

$$\mathbf{z}_{i1}(t) = \sum_{j=0}^{p-1} \mathbf{a}_j t^j + \mathbf{r}(t), \quad (7)$$

donde cada  $\mathbf{a}_i$  es un vector de dimensión  $n$  de coeficientes constantes y  $\mathbf{r}(t)$  es un término residual.  $\square$

*Suposición 2.2.* Al menos las primeras  $p$  derivadas temporales de  $\mathbf{z}_{i1}$  existen.  $\square$

*Comentario 1.* La Suposición 2.1 no es muy restrictiva, dado que define un modelo interno para el vector a ser estimado. Este modelo interno es auto-actualizable (Sira-Ramírez et al., 2010). Además, en el peor de los casos todos los coeficientes  $\mathbf{a}_j$  se hacen cero y la señal se aproxima únicamente mediante el término residual  $\mathbf{r}(t)$ . Por otra parte, la Suposición 2.2 es más restrictiva, en el sentido de que el contacto entre el operador humano y el robot maestro, así como entre el robot esclavo y el entorno remoto, debe ser suave. Por ejemplo, un impacto brusco con una superficie rígida no cumple con esta suposición. No obstante, en la Sección 4, se muestra un experimento donde esto se logra. Lo anterior puede ser explicado por la naturaleza amortiguante del controlador Proporcional Derivativo (PD) utilizado en el robot esclavo.  $\square$

Se definen  $\mathbf{q}_{i2} \triangleq \dot{\mathbf{q}}_i$ ,  $i = \{m, s\}$ . Tomando en cuenta las Suposiciones 2.1 y 2.2, una representación en el espacio de estados de (1)–(2) puede escribirse como

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{q}_{i2} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{i2} = \mathbf{H}_i^{-1}(\mathbf{q}_i) (\boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_{i2})\mathbf{q}_{i2} - \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i)) + \mathbf{z}_{i1} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_{i1} = \mathbf{z}_{i2} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_{i2} = \mathbf{z}_{i3} \quad (11)$$

$\vdots$

$$\dot{\mathbf{z}}_{i(p-1)} = \mathbf{z}_{ip} \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_{ip} = \mathbf{r}_i^{(p)}(t), \quad (13)$$

donde cada  $\mathbf{r}_i(t) \in \mathbb{R}^n$  es un vector de términos residuales.

## 3. RESULTADO PRINCIPAL

El objetivo principal de este trabajo es obtener robustez en el sistema de teleoperación maestro–esclavo cuando los pares de entrada del operador humano y del ambiente remoto son cero, *i.e.*,  $\boldsymbol{\tau}_h = \boldsymbol{\tau}_e = 0$ . Esta condición equivale a que el operador humano suelta al robot maestro cuando el robot esclavo no se encuentra en contacto con el ambiente remoto. Primero se presenta el observador de estados, que fue reportado por los autores en un artículo anterior (Gutiérrez-Giles y Arteaga-Pérez, 2014).

### 3.1 Diseño de los observadores

Sean  $\hat{\mathbf{q}}_i \in \mathbb{R}^n$ ,  $i = \{m, s\}$ , los estados estimados de  $\mathbf{q}_i$  y sean  $\tilde{\mathbf{q}}_i \triangleq \mathbf{q}_i - \hat{\mathbf{q}}_i$ , los errores de observación. Los observadores de estado propuestos para ambos robots están dados por

$$\dot{\hat{\mathbf{q}}}_i = \hat{\mathbf{q}}_{i2} + \boldsymbol{\lambda}_{i(p+1)}\tilde{\mathbf{q}}_i \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{q}}}_{i2} = \mathbf{H}_i^{-1}(\mathbf{q}_i) (\boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \hat{\mathbf{q}}_{i2})\hat{\mathbf{q}}_{i2} - \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i)) + \hat{\mathbf{z}}_{i1} + \boldsymbol{\lambda}_{ip}\tilde{\mathbf{q}}_i \quad (15)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{z}}}_{i1} = \hat{\mathbf{z}}_{i2} + \boldsymbol{\lambda}_{i(p-1)}\tilde{\mathbf{q}}_i \quad (16)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{z}}}_{i2} = \hat{\mathbf{z}}_{i3} + \boldsymbol{\lambda}_{i(p-2)}\tilde{\mathbf{q}}_i \quad (17)$$

$\vdots$

$$\dot{\hat{\mathbf{z}}}_{i(p-1)} = \hat{\mathbf{z}}_{ip} + \boldsymbol{\lambda}_{i1}\tilde{\mathbf{q}}_i \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{z}}}_{ip} = \boldsymbol{\lambda}_{i0}\tilde{\mathbf{q}}_i, \quad (19)$$

donde  $(\hat{\cdot})$  denota el estimado de la variable correspondiente y  $\boldsymbol{\lambda}_{ij}$ ,  $j = 0, \dots, p+1$  son los coeficientes en la diagonal del polinomio matricial

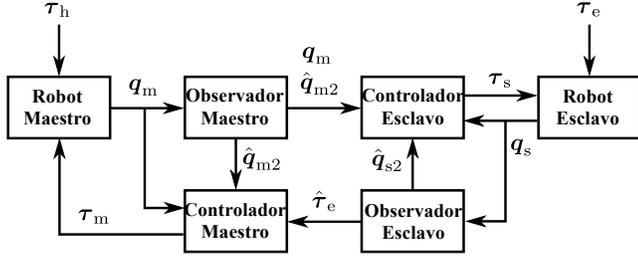


Fig. 1. Esquema de teleoperación basado en estimadores de fuerza/velocidad.

$$\rho(s) = s^{p+2}\mathbf{I} + s^{p+1}\lambda_i + \dots + s\lambda_{i1} + \lambda_{i0}, \quad (20)$$

donde  $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de identidad y  $\lambda_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son matrices diagonales de ganancias, elegidas de tal forma que cada componente en la diagonal de (20) sea un polinomio Hurwitz de grado  $p + 2$ .

En el artículo citado (Gutiérrez-Giles y Arteaga-Pérez, 2014), se demuestra que los errores de observación  $\tilde{q}_i, \tilde{q}_{i2}, \tilde{z}_{i1}, \tilde{z}_{i2}, \dots, \tilde{z}_{ip}$  pueden hacerse finalmente acotados por una cota arbitrariamente pequeña independientemente del controlador implementado. Esta cota final depende únicamente de los polos del observador, *i.e.*,  $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{p+1}$ .

### 3.2 Diseño de los controladores

En un trabajo reciente de los autores (Gutiérrez-Giles et al., 2019), el objetivo principal consiste en obtener el mayor nivel de transparencia en el sistema de teleoperación. El esquema utilizado, que se empleará también en este artículo, se muestra en la Figura 1. Para lograr el objetivo de obtener la mayor transparencia posible, en Gutiérrez-Giles et al. (2019) se propuso la ley de control para el maestro

$$\tau_{m,ant} = \mathbf{H}_m(q_m)\dot{\hat{q}}_{m2} + \mathbf{C}_m(q_m, \hat{q}_{m2})\hat{q}_{m2} + \mathbf{g}_m(q_m) + \mathbf{H}_s(q_s)\dot{z}_{s1}. \quad (21)$$

Es posible demostrar que con esta ley de control y el observador (14)–(19), la cota final de la diferencia entre el par impartido por el operador humano y el par generado por la fuerza de contacto sobre la superficie remota, está dada por  $\|\tau_h - \tau_e\| \leq \mu_\tau$ , donde  $\mu_\tau$  puede hacerse arbitrariamente pequeña colocando los polos del observador (14)–(19) lejos del eje imaginario en el semiplano izquierdo del plano complejo. Lo anterior se traduce en que la fuerza sentida por el operador humano, a través del robot maestro, será arbitrariamente cercana a la que ejerce el robot esclavo sobre el entorno remoto *i.e.*,  $\tau_h \approx \tau_e$ . Por otra parte, la ley de control para el robot esclavo se propuso en Gutiérrez-Giles et al. (2019) como

$$\tau_{s,ant} = \mathbf{H}_s(q_s)\dot{\hat{q}}_{s2} + \mathbf{C}_s(q_s, \hat{q}_{s2})\hat{q}_{s2} + \mathbf{g}_s(q_s) - \mathbf{K}_{ps}(\hat{q}_s - \hat{q}_m) - \mathbf{K}_{ds}(\hat{q}_{s2} - \hat{q}_{m2}), \quad (22)$$

donde  $\mathbf{K}_{ps}, \mathbf{K}_{ds} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son matrices diagonales positivas de ganancias. En el mismo artículo citado, se demuestra que el error de seguimiento de posición en estado estacionario satisface  $\|q_s - q_m\| \leq (1/k_{ps})(\mu_q + \|\tau_e\|)$ , donde por simplicidad se considera  $\mathbf{K}_{ps} = k_{ps}\mathbf{I}$ . De nuevo,  $\mu_q$  puede hacerse arbitrariamente pequeña eligiendo los polos del observador para el robot esclavo, lo que implica que el seguimiento de trayectorias en movimiento libre, es decir, Puebla, Puebla, México, 23-25 de octubre de 2019

cuando  $\tau_e = \mathbf{0}$ , será arbitrariamente cercano, *i.e.*,  $q_s \approx q_m$ . Ambas condiciones,  $\tau_h \approx \tau_e$  y  $q_s \approx q_m$ , implican una transparencia casi perfecta del sistema. Sin embargo, como consecuencia del análisis de Lawrence (Lawrence, 1993), surgen los siguientes problemas.

- No hay ninguna garantía de que el sistema sea estable cuando el operador humano deja de moverlo, incluso cuando el manipulador esclavo no está en contacto con el entorno remoto.
- El error de seguimiento de trayectorias depende de la fuerza de contacto que se ejerce sobre el entorno remoto, aunque puede mitigarse su efecto aumentando la ganancia proporcional  $\mathbf{K}_{ps}$ . Sin embargo, esto último tiene la desventaja de hacer que el robot esclavo se comporte de una forma más rígida, lo que puede ocasionar problemas cuando el entorno remoto es también rígido.

Para solucionar estos problemas se propone modificar ambas leyes de control de la siguiente forma

$$\tau_m = \mathbf{g}_m(q_m) + \mathbf{H}_s(q_s)\dot{z}_{s1} - \mathbf{K}_{dm}\hat{q}_{m2}, \quad (23)$$

para el robot maestro y

$$\tau_s = \mathbf{H}_s(q_s)\dot{\hat{q}}_{s2} + \mathbf{C}_s(q_s, \hat{q}_{s2})\hat{q}_{s2} + \mathbf{g}_s(q_s) - \mathbf{K}_{ps}(\hat{q}_s - \hat{q}_m) - \mathbf{K}_{ds}(\hat{q}_{s2} - \hat{q}_{m2}) + \mathbf{H}_s(q_s)\dot{z}_{s1}, \quad (24)$$

para el robot esclavo. En términos concretos, se eliminó la cancelación dinámica de los efectos de inercia y de Coriolis en el robot maestro y se añadió un término de amortiguamiento ( $\mathbf{K}_{dm}\hat{q}_{m2}$ ). Para el robot esclavo, se añadió un término de retroalimentación local de fuerza, basado en la fuerza estimada ( $\mathbf{H}_s(q_s)\dot{z}_{s1}$ ).

### 3.3 Análisis dinámico

En cuanto a la dinámica del robot maestro y la retroalimentación hacia el operador humano de la fuerza ejercida por el robot esclavo sobre el ambiente remoto, utilizando la Propiedad 2.1 se puede obtener la siguiente norma

$$\|\tau_h - \tau_e\| \leq \|\mathbf{H}_m(q_m)\ddot{q}_m + \mathbf{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m\| + \|\mathbf{K}_{dm}\hat{q}_{m2}\| + k_{H_s}\|\dot{z}_{s1}\|. \quad (25)$$

Mientras la norma de  $\dot{z}_{s1}$  puede hacerse arbitrariamente pequeña con las ganancias del observador, como se explicó anteriormente, los otros términos son en general distintos de cero. Por lo tanto, la nueva ley de control hace que el sistema pierda transparencia. En términos simples, el operador humano sentirá no sólo la fuerza de contacto sobre la superficie remota, sino la dinámica propia del manipulador maestro más un término artificial de fricción viscosa en el mismo robot maestro. Puede demostrarse que en el caso particular de ausencia de movimiento, *i.e.*,  $\dot{q} = \ddot{q} = \mathbf{0}$ , se sigue cumpliendo que  $\tau_h \approx \tau_e$ .

La ventaja del nuevo controlador surge cuando  $\tau_h = \tau_e = \mathbf{0}$ , es decir, cuando el operador humano suelta al robot maestro y no hay contacto del robot esclavo con el entorno remoto. En este caso, la dinámica del robot maestro está dada por

$$\mathbf{H}_m(q_m)\dot{\hat{q}}_{m2} + \mathbf{C}_m(q_m, \hat{q}_{m2})\hat{q}_{m2} = -\mathbf{K}_{dm}(q_{m2} - \hat{q}_{m2}) - \mathbf{H}_s(q_s)\dot{z}_{s1}. \quad (26)$$

A continuación, se propone la función positiva

$$V_m = \frac{1}{2}q_{m2}^T \mathbf{H}_m(q_m)q_{m2}, \quad (27)$$

cuya derivada evaluada a lo largo de las trayectorias de (26), eligiendo  $\mathbf{K}_{dm} = k_{dm}\mathbf{I}$  por simplicidad, satisface

$$\begin{aligned} \dot{V}_m &= -\mathbf{q}_{m2}^T (\mathbf{K}_{dm} (\mathbf{q}_{m2} - \tilde{\mathbf{q}}_{m2}) + \mathbf{H}_s(\mathbf{q}_s) \tilde{\mathbf{z}}_{s1}) \\ &\leq -\|\mathbf{q}_{m2}\| (k_{dm}\|\mathbf{q}_{m2}\| - k_{dm}\|\tilde{\mathbf{q}}_{m2}\| - k_{H_s}\|\tilde{\mathbf{z}}_{s1}\|), \end{aligned} \quad (28)$$

de donde se deduce que  $\dot{V}_m \leq 0$  cuando  $\|\mathbf{q}_{m2}\| \geq \|\tilde{\mathbf{q}}_{m2}\| + (k_{H_s}/k_{dm})\|\tilde{\mathbf{z}}_{s1}\|$ . Como se mencionó anteriormente, las normas de  $\tilde{\mathbf{q}}_{m2}$  y  $\tilde{\mathbf{z}}_{s1}$  pueden hacerse arbitrariamente pequeñas con las ganancias de los observadores, independientemente de la ley de control elegida. Por lo tanto, basta con  $k_{dm} > 0$  para garantizar la estabilidad. Sin embargo, esta ganancia también puede utilizarse para obtener robustez ante dinámicas no modeladas y perturbaciones, por lo que podría elegirse un valor mayor.

Para analizar la dinámica del robot esclavo se propone la función positiva

$$V_s = \frac{1}{2} \mathbf{e}_s^T \mathbf{K}_{ds} \mathbf{e}_s, \quad (29)$$

donde  $\mathbf{e}_s \triangleq \mathbf{q}_s - \mathbf{q}_m$ . La derivada de (29) a lo largo de las trayectorias de (28) está dada por

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= \mathbf{e}_s^T \left\{ -\mathbf{K}_{ps} \mathbf{e}_s - \mathbf{H}_s \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_{s2} \right. \\ &\quad \left. + \left( 2\mathbf{C}_s(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s) - \tilde{\mathbf{C}}_s(\mathbf{q}_s, \tilde{\mathbf{q}}_{s2}) \right) \tilde{\mathbf{q}}_{s2} \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{K}_{ds} (\tilde{\mathbf{q}}_{m2} - \tilde{\mathbf{q}}_{s2}) - \mathbf{K}_{ps} (\tilde{\mathbf{q}}_m - \tilde{\mathbf{q}}_s) + \tilde{\mathbf{z}}_{s1} \right\} \\ &\leq -\|\mathbf{e}_s\| (k_{ps}\|\mathbf{e}_s\| - k_{H_s}\|\dot{\tilde{\mathbf{q}}}_{s2}\| - k_{C_s}\|\tilde{\mathbf{q}}_{s2}\| \\ &\quad - k_{ds}\|\tilde{\mathbf{q}}_{m2} - \tilde{\mathbf{q}}_{s2}\| - k_{ps}\|\tilde{\mathbf{q}}_m - \tilde{\mathbf{q}}_s\| - \|\tilde{\mathbf{z}}_{s1}\|), \end{aligned} \quad (30)$$

De nuevo, dado que los errores de estimación,  $(\tilde{\cdot})$  y sus derivadas temporales pueden hacerse arbitrariamente pequeños con las ganancias de los observadores, el error de seguimiento de posición estará finalmente acotado por un disco arbitrariamente pequeño centrado en el origen siempre que  $k_{ps} > 0$ . Una vez más, esta ganancia puede hacerse mayor para incrementar la robustez ante perturbaciones y dinámicas no modeladas. El efecto de la retroalimentación local de fuerza se nota en que la norma del error de seguimiento será muy cercana a cero, *i.e.*,  $\|\mathbf{e}_s\| \approx 0$ , cuando  $t \rightarrow \infty$  ya sea en movimiento libre o en contacto con la superficie remota, mientras que con el diseño anterior se tenía  $\|\mathbf{e}_s\| \approx (1/k_{ps})\|\boldsymbol{\tau}_e\|$  cuando  $t \rightarrow \infty$ .

#### 4. EXPERIMENTOS

La plataforma utilizada para validar los resultados de la Sección 3 consistió en dos manipuladores *Phantom Touch* de 6 grados de libertad cada uno, de los cuales únicamente los primeros tres están actuados, por lo que se bloquearon mecánicamente los últimos tres para obtener dos manipuladores de 3 grados de libertad cada uno. La programación se realizó utilizando *Microsoft Visual Studio*, con lo que se obtuvo un periodo de muestreo,  $T = 0.002$  [s].

##### 4.1 Experimento en laboratorio

El primer experimento se elaboró colocando ambos robots en un mismo laboratorio y consistió en trazar dos vueltas de una circunferencia sobre una superficie sólida. La plataforma experimental utilizada para este experimento se muestra en la Figura 2.



Fig. 2. Plataforma de evaluación experimental.

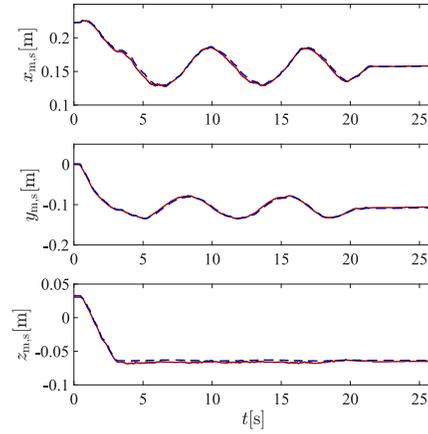


Fig. 3. Experimento 1, seguimiento de posición: Maestro (—), Esclavo (---).

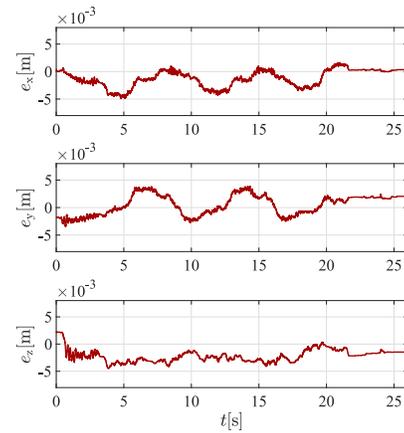


Fig. 4. Experimento 1, error de seguimiento de posición.

Para la extensión dinámica del modelo (Suposición 2.1), se eligió  $p = 3$ . Las ganancias de los observadores tanto para el manipulador maestro como para el esclavo fueron elegidas como  $\boldsymbol{\lambda}_0 = 1 \times 10^8 \mathbf{I}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}_1 = 4 \times 10^6 \mathbf{I}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}_2 = 6 \times 10^4 \mathbf{I}$  y  $\boldsymbol{\lambda}_3 = 400 \mathbf{I}$ , *i.e.*, los polos de los observadores se colocaron en  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = -100$ . Las ganancias de los controladores (23)–(24) fueron elegidas como  $\mathbf{K}_{dm} = \text{diag}(0.02, 0.02, 0.02)$ ,  $\mathbf{K}_{ps} = \text{diag}(5, 5, 5)$  y  $\mathbf{K}_{ds} = \text{diag}(0.25, 0.25, 0.25)$ .

En la Figura 3 se presenta el seguimiento de trayectorias en coordenadas Cartesianas. El error correspondiente se presenta en la Figura 4. En esta última figura puede apreciarse que el error de seguimiento se mantuvo siempre menor a  $0.005$  [m], lo que puede considerarse como un

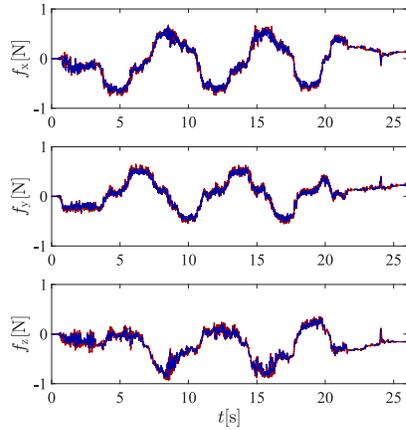


Fig. 5. Experimento 1, fuerza estimada: Operator humano (—), fuerza sobre el entorno remoto (---).

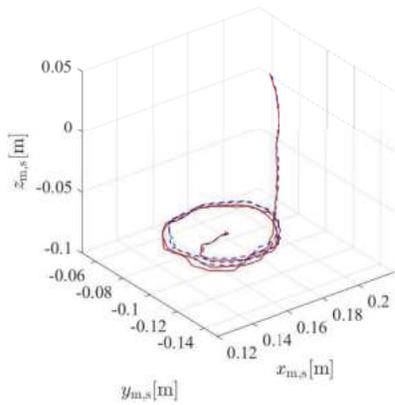


Fig. 6. Experimento 1, seguimiento de posición en 3D: Maestro (—), Esclavo (---).

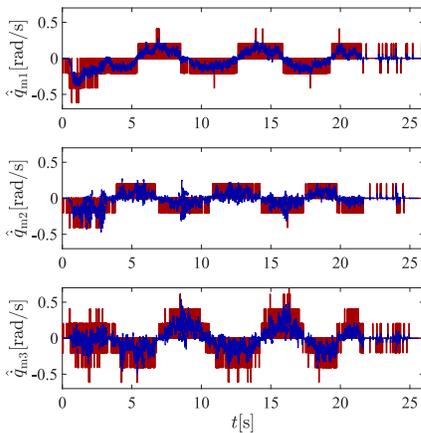


Fig. 7. Experimento 1, estimación de velocidad para el maestro: Derivada numérica (—), Observador (---).

buen desempeño para este tipo de manipuladores. En la Figura 5 se presenta la estimación de las fuerzas en el espacio Cartesiano, tanto la ejercida por el operador humano sobre el robot maestro, como la ejercida por el robot esclavo sobre el ambiente remoto. Puede apreciarse que ambas fuerzas son muy similares, avalando la alta transparencia del sistema, como se estableció en la Sección 3. El seguimiento de la trayectoria en 3D se presenta en la Figura 6. Por último, la estimación de la velocidad ar-

ticular del maestro, comparada con la obtenida mediante diferenciación numérica se muestra en la Figura 7. En esta figura puede observarse que la velocidad estimada coincide con la obtenida mediante diferenciación numérica, con la ventaja de ser más suave. La velocidad estimada del esclavo es completamente análoga y se omite su gráfica por cuestiones de espacio.

#### 4.2 Experimento a distancia

Con el objetivo de poner a prueba el esquema diseñado en un escenario más realista, se llevó a cabo un experimento con los manipuladores ubicados en diferentes puntos geográficos. La comunicación se realizó a través de internet mediante el protocolo TCP/IP. El manipulador maestro se colocó en el Laboratorio de Robótica de la Unidad de Posgrado de la UNAM, mientras que el esclavo se colocó en el edificio de Mecatrónica de la Sección de Ingeniería Eléctrica del Cinvestav. La distancia entre ambos puntos es de aproximadamente 23 [km]. El retardo promedio en el canal de comunicación fue obtenido mediante pruebas de *ping* y fue aproximadamente de  $T_d = 0.03$  [s] en cada dirección.

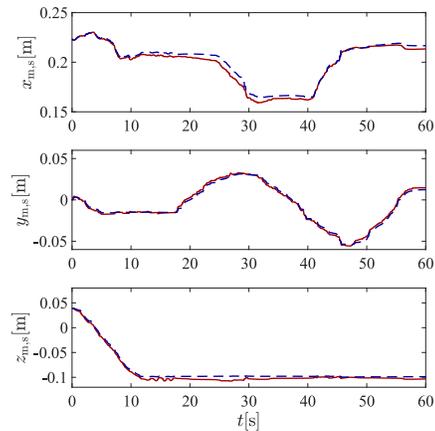


Fig. 8. Experimento 2, seguimiento de posición: Maestro (—), Esclavo (---).

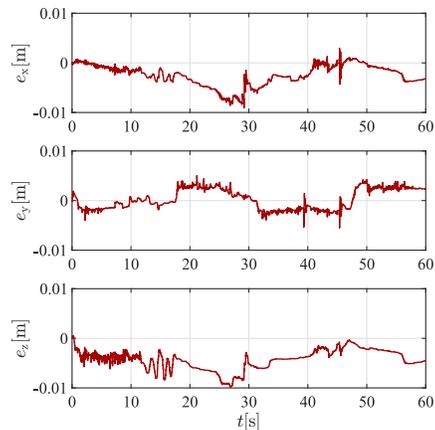


Fig. 9. Experimento 2, error de seguimiento de posición.

El tiempo de muestreo para cada robot fue de  $T = 0.002$  [s]. Las ganancias de los observadores y de los controladores fueron elegidas iguales a las de las Sección 4.1. El experimento consistió en trazar un óvalo sobre una

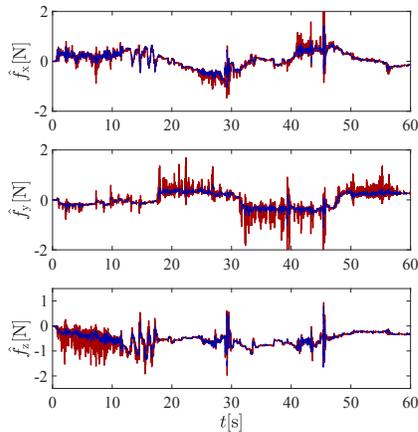


Fig. 10. Experimento 2, fuerza estimada: Operador humano (—), fuerza sobre el entorno remoto (- - -).

superficie no rígida. El operador remoto contó con retroalimentación visual mediante una videollamada independiente. En la Figura 8 se muestra el seguimiento de posición en coordenadas Cartesianas, mientras que en la Figura 9 se muestra el error de seguimiento correspondiente. A pesar de que el error de seguimiento esta vez si rebasó los  $0.005 [m]$ , se mantuvo siempre por debajo de  $0.01 [m]$  en las tres coordenadas. el aumento en este error se debe, más que al retardo, al completo desconocimiento de la superficie a manipular por parte del operador humano y a la falta de entrenamiento en la tarea específica, lo que fue planeado *a propósito*. Además, el operador humano reconoció tener problemas para visualizar el ambiente remoto, debido a que la videollamada, a diferencia del experimento local, dificulta la percepción de la profundidad. No obstante, los errores obtenidos aún se pueden considerar un buen desempeño para este tipo de manipuladores. Finalmente, en la Figura 10 se muestra la estimación de la fuerza imprimida por el humano sobre el robot maestro y la imprimida por el esclavo sobre el entorno remoto. Puede observarse que ambas fuerzas son muy similares, lo que evidencia la transparencia del sistema.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El nuevo diseño de las leyes de control para el esquema de teleoperación implementado anteriormente logró mitigar algunos de los problemas de estabilidad. No obstante, teóricamente, se sacrificó un poco de desempeño en cuanto a la transparencia del sistema. El nuevo diseño permite garantizar la estabilidad de los manipuladores cuando las fuerzas externas imprimidas a éstos son nulas. Además, en contraste con el diseño anterior, se pudo garantizar seguimiento finalmente acotado con cota arbitrariamente pequeña, del error de posición del esclavo con respecto al maestro, independientemente si el esclavo se encuentra en movimiento libre o ejerciendo fuerza sobre un entorno remoto. Los experimentos muestran un buen desempeño en cuanto a transparencia y robustez. En particular, el experimento a distancia pone a prueba estas dos prestaciones del diseño, con buenos resultados.

Como trabajo futuro se buscará incluir explícitamente el retardo en la comunicación e idear una modificación a las leyes de control para lidiar con el mismo. En este mismo contexto, se buscará realizar experimentos a una distancia más grande que la presentada en este artículo

(23 km). Por último, se trabajará en el diseño de un controlador que englobe los resultados aquí presentados y los del diseño anterior para que el practicante pueda elegir entre favorecer la transparencia o la robustez, o una versión ponderada.

## REFERENCIAS

- Arteaga-Pérez, M.A., Morales, M., López, M. y Nuño, E. (2018). Observer design for the synchronization of bilateral delayed teleoperators. *European Journal of Control*, 43, 20–32.
- Arteaga-Pérez, M.A. y Nuño, E. (2018). Velocity observer design for the consensus in delayed robot networks. *Journal of the Franklin Institute*, 355(14), 6810–6829.
- Daly, J.M. y Wang, D.W. (2014). Time-delayed output feedback bilateral teleoperation with force estimation for n-dof nonlinear manipulators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(1), 299–306.
- Gutiérrez-Giles, A., Arteaga-Pérez, M. y Rodríguez-Ángeles, A. (2019). Transparent master-slave teleoperation without force nor velocity measurements. In *European Control Conference (ECC)*. Naples, Italy.
- Gutiérrez-Giles, A. y Arteaga-Pérez, M.A. (2014). GPI based velocity/force observer design for robot manipulators. *ISA Transactions*, 53(4), 929–938.
- Gutiérrez-Giles, A. y Arteaga-Pérez, M.A. (2017). Transparent bilateral teleoperation interacting with unknown remote surfaces with a force/velocity observer design. *International Journal of Control*, 1–18.
- Hashtrudi-Zaad, K. y Salcudean, S.E. (2002). Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(1), 108–114.
- Hokayem, P.F. y Spong, M.W. (2006). Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 42(12), 2035–2057.
- Kelly, R. y Santibáñez, V. (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson educación.
- Lawrence, D.A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5), 624–637.
- Nuño, E., Arteaga-Pérez, M. y Espinosa-Pérez, G. (2018). Control of bilateral teleoperators with time delays using only position measurements. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 28(3), 808–824.
- Nuño, E., Basañez, L. y Ortega, R. (2011). Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial. *Automatica*, 47(3), 485–495.
- Sarras, I., Nuño, E., Basañez, L. y Kinnaert, M. (2016). Position tracking in delayed bilateral teleoperators without velocity measurements. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 26(7), 1437–1455.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. y Oriolo, G. (2010). *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media.
- Sira-Ramírez, H., Ramírez-Neria, M. y Rodríguez-Ángeles, A. (2010). On the linear control of nonlinear mechanical systems. In *IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, GA, USA, 1999–2004*. IEEE.
- Yokokohji, Y. y Yoshikawa, T. (1994). Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(5), 605–620.