

# The PID in the Control of Bilateral Teleoperation system with Time-varying delays: An experimental approach <sup>\*</sup>

Evert J. Guajardo Benavides<sup>\*</sup> Marco A. Arteaga<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> *Depto. de Control y Robótica. DIE-FI. Universidad Nacional Autónoma de México. (e-mail: evert\_guajardobds@comunidad.unam.mx, marteagp@unam.mx)*

---

**Abstract:** The control of bilateral teleoperation systems with time-varying delays is a challenging problem that is usually dealt with advanced control techniques. The well-known controllers, such as PD or PID, are scarcely employed and usually in conjunction with other approaches or at least with gravity compensation. In this contribution we intend to show, experimentally, that the standard PID controller exhibits good performance and robustness in position control for teleoperators with variable delays. The results obtained are compared with a well-known algorithm used for teleoperator control.

*Keywords:* Bilateral teleoperation, time-varying delays, tracking control.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante décadas, el control PID ha sido utilizado en una gran cantidad de sistemas, tanto lineales como no lineales en distintos campos de aplicación; además, la evidencia demuestra que es el controlador más utilizado en el sector industrial (Johnson and Moradi, 2005). Debido a esto, es casi imprescindible pensar, como primera alternativa, en utilizar este algoritmo en cualquier sistema o proceso por su robustez y facilidad de implementación. Un ejemplo claro de aplicación, para una clase de sistemas no lineales, es en robots manipuladores, cuya efectividad yace en el control de regulación de posición ante el desconocimiento de los términos gravitatorios o en el rechazo de perturbaciones constantes (Kelly et al., 2006; Spong et al., 2020). Sin embargo, es también sabido que el control PID no es suficiente para el control de seguimiento de trayectoria; por lo que sería necesario conocer el modelo (o parte del modelo) dinámico para tal objetivo de control (Kelly et al., 2006). No obstante, si bien no es posible obtener un control de seguimiento exacto con el control PID estándar, sí es posible aproximar, mediante una sintonización adecuada de las ganancias, las trayectorias del sistema con las deseadas lo suficiente para considerarlo un control de seguimiento, al menos prácticamente. Tal es el caso en sistemas con teleoperación bilateral y retardos en la comunicación en donde no es posible obtener un seguimiento de trayectoria exacto (Arteaga-Pérez et al., 2019).

El problema de los sistemas bilaterales con retardos, tanto constantes como variantes en el tiempo, es tan

complejo y exigente que la mayoría de las soluciones que se encuentran en la literatura se basan en técnicas de control avanzadas. Sólo por mencionar algunos trabajos recientes como ejemplos ilustrativos más que como una investigación profunda, en (Chan et al., 2022b) se propone un sistema de teleoperación no lineal adaptativo robusto que utiliza un observador activo extendido mejorado, un predictor Smith adaptativo y un control de modo deslizante para manejar los retardos de tiempo en el canal de comunicación y las incertidumbres del modelo del robot no lineal. Del mismo modo, en (Chan et al., 2022a) se presenta un enfoque de control de cuatro canales escalado basado en el observador adaptativo que aplica la inyección de amortiguamiento para sistemas de teleoperación no lineales, que unifica el estudio de las incertidumbres dinámicas robóticas, las adquisiciones de fuerza del operador/entorno y los retardos asimétricos variables en el tiempo. En Zhang et al. (2023) se diseña un método de control en tiempo finito basado en el tradicional control de inyección de amortiguamiento proporcional introduciendo una potencia no entera al error de posición, velocidad y al error combinado con error de posición y velocidad.

Con lo mencionado anteriormente, uno pudiera inferir que el control PID estándar es excluido para teleoperación bilateral, incluso Cui et al. (2003) menciona, explícitamente, que los controladores PID no pueden hacer frente a los retardos temporales y que se vuelven inestables cuando estos son variantes en el tiempo. Sin embargo, en este trabajo se muestra, al menos de manera experimental, que el control PID presenta un aceptable

---

<sup>\*</sup> This work is supported by the DGAPA-UNAM under grant IN117820.

desempeño en cuanto al control de posición en presencia de retardos que son variantes en el tiempo.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: en la siguiente Sección 2 se revisan algunos preliminares relacionados con el modelo dinámico de un sistema con teleoperación bilateral. En la Sección 3, se exponen los resultados principales sobre la aplicación del control PID para esta clase de sistemas. Por último, en la Sección 4 se presentan algunas conclusiones sobre este trabajo.

## 2. PRELIMINARES

### 2.1 Modelo dinámico de teleoperación bilateral

Considere un sistema de teleoperación de robots local (l) y remoto (r) compuesto por dos manipuladores, cada uno de ellos con  $n$  grados de libertad. La dinámica del sistema viene dada por (Arteaga et al., 2022):

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

$\mathbf{H}_r(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{D}_r\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{g}_r(\mathbf{q}_r) = \mathbf{u}_r + \boldsymbol{\tau}_e \quad (2)$   
para  $i = l, r$ , en donde  $l$  y  $r$  representan *local* y *remoto*, respectivamente,  $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^n$  es el vector de coordenadas generalizadas en el espacio articular,  $\mathbf{H}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia,  $\mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)\dot{\mathbf{q}}_i \in \mathbb{R}^n$  es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $\mathbf{D}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es una matriz diagonal positiva semidefinida que representa la fricción viscosa,  $\mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de pares gravitacionales, y  $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^n$  es el vector de pares que desempeña el papel de las entradas de control que actúan sobre las articulaciones.  $\boldsymbol{\tau}_h \in \mathbb{R}^n$  representa el par aplicado por el ser humano al robot local y  $\boldsymbol{\tau}_e \in \mathbb{R}^n$  es la interacción con el entorno del robot remoto.

### 2.2 Casos de interés en teleoperación bilateral

Para teleoperación bilateral, en Arteaga-Pérez et al. (2019) introdujeron tres casos de interés en particular para obtener una correspondencia cinemática retardada entre ambos manipuladores; estos son:

- (a) Movimiento libre, i.e.  $\boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{\tau}_e(t) = 0$ . Se debe lograr  $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_r(t))$  y  $\mathbf{q}_r(t) = \mathbf{q}_l(t - T_l(t))$ , lo que significa que, o bien surge un consenso que alcanza una posición igual constante o, en un caso especial, se produce un movimiento periódico sincronizado.
- (b) Movimiento libre para el robot remoto, i.e.  $\boldsymbol{\tau}_h(t) \neq 0$ ,  $\boldsymbol{\tau}_e(t) = 0$ . Debe lograrse  $\mathbf{q}_r(t) = \mathbf{q}_l(t - T_l(t))$ , lo que significa que el manipulador remoto debe seguir la trayectoria retrasada del local.
- (c) Movimiento restringido, i.e.  $\boldsymbol{\tau}_h(t) \neq 0$  y  $\boldsymbol{\tau}_e(t) \neq 0$ . Para esta situación, debe darse una de las 3 respuestas ideales siguientes:
  - (i)  $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_r(t))$
  - (ii)  $\mathbf{F}_e(t) = \mathbf{F}_h(t - T_l(t))$
  - (iii)  $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_l(t))$  y  $\mathbf{F}_e(t) = \mathbf{F}_h(t - T_l(t))$ , donde se considera la siguiente relación muy conocida (Siciliano et al., 2009):

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i)\mathbf{F}_i, \quad (3)$$

con  $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , el Jacobiano geométrico del  $i$ -ésimo robot.

La respuesta ideal (c)-(iii) es la más importante para las aplicaciones prácticas. Significa que el robot local tendrá el entorno remoto reconstruido para el operador humano, mientras que su fuerza aplicada se utilizará como valor deseado para el manipulador remoto, de modo que él/ella (idealmente) conoce la fuerza aplicada en el lado remoto simplemente porque él/ella lo está comandando.

## 3. RESULTADOS PRINCIPALES

En esta sección se presentan los resultados experimentales de la implementación del controlador PID estándar en ambos manipuladores, con el fin de satisfacer, particularmente, los casos de interés (a)-(b). Así mismo, como punto de comparación, se presentan algunos resultados utilizando la muy conocida ley de control PD + compensación de gravedad que se exhibe en (Nuño et al., 2018). Además, para mostrar la robustez del PID en el caso de movimiento restringido (c), se agregan dos tipos de superficies y así restringir el movimiento del robot remoto; para ello, una superficie de aluminio y un libro rugoso son utilizados como entornos del lado remoto. Por último, se presenta también el control PID complementado con un control PI para el seguimiento de fuerza en el sentido del caso ideal (c)-(iii).

El banco de pruebas experimentales está formado por dos robots *Geomagic Touch* conectados a través de Ethernet como se muestra en la Fig. 1. El tiempo de muestreo para la adquisición de datos y ciclo de control es de  $T = 2\text{ms}$  (el más rápido que se pudo conseguir). Dado que el *Geomagic Touch* tiene 6 Grados De Libertad pero sólo se accionan las tres primeras articulaciones, las últimas se fijaron mecánicamente. El software empleado fue VisualStudio 2022 con lenguaje C++ y la librería *OpenHaptics* para la comunicación de los manipuladores con el PC para el envío y recepción de comandos y datos. En esta configuración, los retrasos en el tiempo son bastante insignificantes. Por lo tanto, se aumentaron artificialmente para crear un escenario más desafiante. Para ello, se fijó  $T_l = 0,675\text{s}$  y  $T_r = 0,625\text{s}$  como valores medios para los robots local y remoto, respectivamente, con una varianza de  $0.05\text{s}$ , lo que resulta en  $1.25\text{s} \leq T_l(t) + T_r(t) \leq 1.35\text{s}$  como se muestra en la Fig. 2. Esto significa que el *Round Trip Time* (RTT) es de  $1.3\text{s}$ .

### 3.1 Experimento 1: Control PID con interacción humana

Este experimento se ha diseñado para demostrar que se satisfacen los casos de interés (a)-(b) con una sintonización adecuada (heurísticamente) de las ganancias del controlador PID y, a su vez, comprobar que este controlador también puede utilizarse para los sistemas con teleoperación bilateral y retardos variantes en el tiempo y un operador humano moviendo cualquiera de los dos



Fig. 1. Sistema de teleoperación bilateral compuesto por dos dispositivos hápticos *Geomagic Touch*.

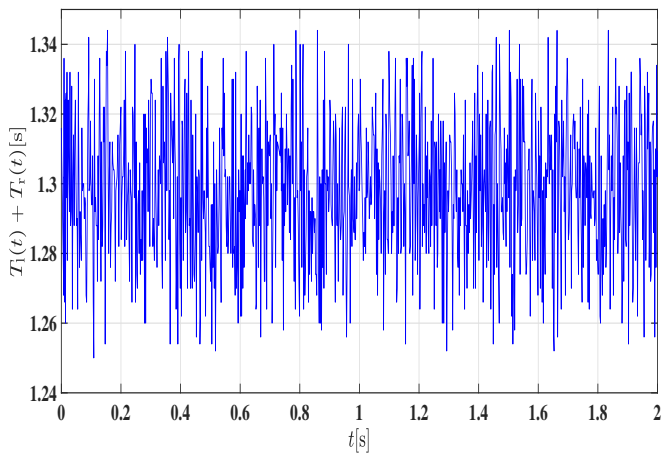


Fig. 2. Round Trip Time típico (RTT).

robots. Para esta clase de sistemas, el control PID adopta la forma:

$$\mathbf{u}_i = -\mathbf{K}_{p_i}\mathbf{e}_i - \mathbf{K}_{v_i}\dot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{K}_{i_i}\xi_{u_i} \quad (4)$$

$$\dot{\xi}_{u_i} = \mathbf{e}_i \quad \xi_{u_i}(t_0) = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{q}_i(t) - \mathbf{q}_j(t - T_j(t)) \quad (6)$$

en donde si  $i = 1$ , entonces  $j = r$  y a la inversa,  $\mathbf{K}_{p_i}, \mathbf{K}_{v_i}, \mathbf{K}_{i_i} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son matrices diagonales positivas definidas. Se puede apreciar que  $\mathbf{e}_i$  representa el error entre la posición actual de cualquiera de los dos robots y la posición retardada proveniente del otro. Obsérvese también que se aprovecha el hecho de que se supone que la velocidad deseada es cero.

Para este experimento, el operador humano mueve primero el efector final local mientras el manipulador remoto sigue la posición local retardada. En  $t \approx 43s$ , el operador lleva el efector final local al valor deseado. Los resultados pueden verse en la Fig. 3. Obsérvese que tanto el operador humano como el término integral del controlador PID impiden que el efector final local se caiga, de modo que cuando lo suelta, cae durante un tiempo pero rápidamente se alcanza el consenso y ninguno de

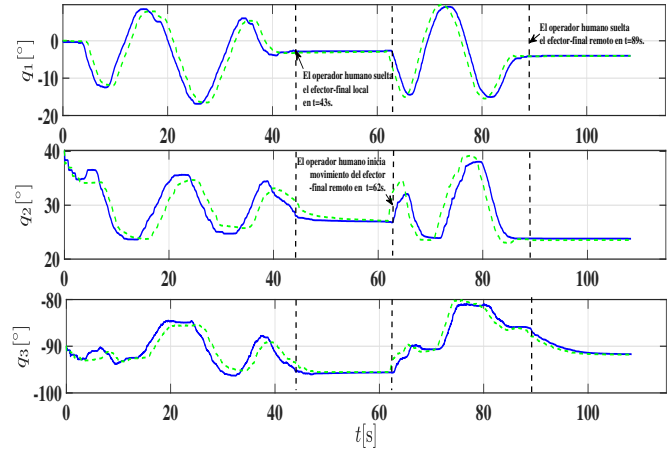


Fig. 3. Experimento 1. Seguimiento de posición:  $\mathbf{q}_l(t)$  (—),  $\mathbf{q}_r(t)$  (- - -).

| Articulación | RMSE [°] |
|--------------|----------|
| 1            | 2.7470   |
| 2            | 2.1181   |
| 3            | 1.5224   |

Table 1. Experimento 1: RMSE de seguimiento de posición.

los efectores finales cae al suelo. En  $t \approx 62s$  el operador sujeta el efector final remoto y empieza a moverlo hasta que lo lleva de nuevo a una posición constante y lo deja caer de nuevo en  $t \approx 89s$ . También como antes, el efector final remoto cae un poco, pero el consenso se alcanza casi inmediatamente y una vez más se compensan los efectos de la gravedad. La Tabla 1 muestra los valores RMSE correspondientes.

### 3.2 Experimento 2: PD + compensación de gravedad

Es importante conocer el desempeño del PID estándar en comparación con otros enfoques de control. Para tal propósito, otro esquema simple y efectivo es considerado, el cual consiste en un control PD + compensación de gravedad (Nuño et al., 2018). Aunque es más sencillo, requiere cierto conocimiento de los manipuladores del robot *a priori*. Obsérvese que se trata de un enfoque habitual y los resultados suelen ser buenos, por lo que proporciona un punto de comparación fiable para determinar si el PID estándar representa una opción aceptable para el tipo de sistemas bilaterales como objeto de estudio.

A grandes rasgos, controlador PD + compensación de gravedad está definido como:

$$\mathbf{u}_i = -\mathbf{K}_{p_i}\mathbf{e}_i - \mathbf{K}_{v_i}\dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i), \quad (7)$$

en donde es evidente la necesidad del conocimiento del vector de pares gravitacionales en ambos manipuladores. Para tal fin, se empleó la técnica de identificación paramétrica (fuera de línea) presentada en (Benavides and Arteaga, 2022).

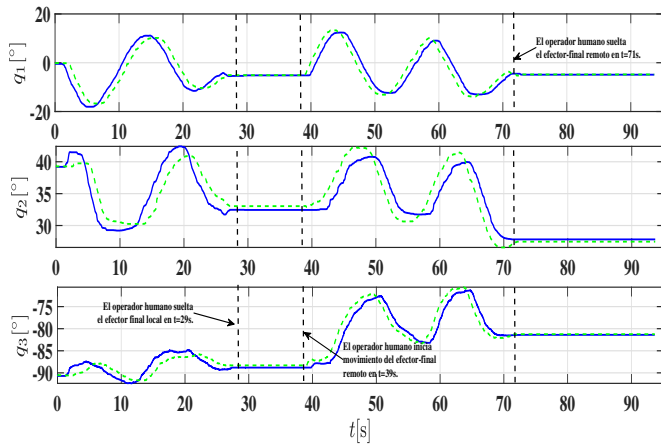


Fig. 4. Experimento 2. Seguimiento de posición con el esquema en (Nuño et al., 2018):  $\mathbf{q}_1(t)$  (—),  $\mathbf{q}_r(t)$  (- - -).

| Articulación | RMSE [°] |
|--------------|----------|
| 1            | 2.8800   |
| 2            | 1.9506   |
| 3            | 1.1187   |

Table 2. Experimento 2: RMSE de seguimiento de posición con el esquema en (Nuño et al., 2018)

Para este experimento, el operador intenta reproducir el mismo experimento que para el controlador PID, pero obviamente es imposible hacerlo con exactitud. Los resultados se pueden apreciar en la Fig. 4. Aunque no son directamente equivalentes a los resultados de la Fig. 3, los resultados pueden compararse objetivamente observando las Tablas 1 and 2. Se puede observar que el esquema en (Nuño et al., 2018) es ligeramente mejor, especialmente para la tercera articulación. No es difícil explicar este comportamiento. Cuando el operador humano deja caer el efector final con los controladores PID, este tiende a caer inmediatamente hasta que el integrador compensa la gravedad. Este inconveniente no se presenta con el enfoque de compensación de gravedad PD +, precisamente porque los efectos de la gravedad se cancelan instantáneamente. Aun así, los resultados con el PID estándar pueden considerarse aceptables con respecto a este punto de comparación.

### 3.3 Experimento 3: Movimiento restringido

Una de las características más atractivas de la ley de control PID es su robustez, mientras que una de las aplicaciones más interesantes de los sistemas bilaterales es el movimiento restringido. En este tercer experimento, el robot remoto entra en contacto con un libro rugoso y una superficie de aluminio como se muestra en la Fig. 5.

Se eligió el libro porque es una superficie ligeramente deformable y presenta algunos efectos de fricción difíciles de modelar, mientras que la placa de aluminio es comple-

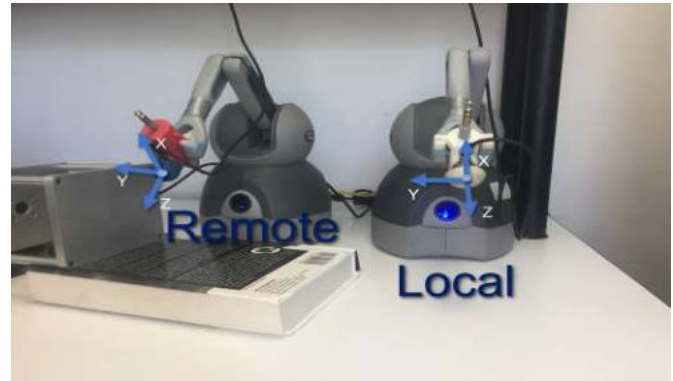


Fig. 5. Superficies para el caso de movimiento restringido.

| Articulación | RMSE [°] |
|--------------|----------|
| 1            | 3.1200   |
| 2            | 3.9702   |
| 3            | 1.4177   |

Table 3. Experimento 3: Movimiento restringido. RMSE de seguimiento de posición.

tamente rígida y la fricción es menor, pero sigue presente. Obsérvese que ambos efectores finales se han equipado con sensores de fuerza para mostrar cómo aumenta la fuerza sobre cada robot a medida que el manipulador remoto toca ambas superficies. El experimento consiste en acercar el efector final remoto al libro para ejercer cierta fuerza en la dirección  $z$  durante algún tiempo, y luego acercarlo a la superficie de aluminio para aplicar lateralmente una fuerza en la dirección  $y$ .

La Fig. 6 muestra las mediciones de fuerza en ambos lados. Dado que los retardos no pueden considerarse despreciables, los resultados en el lado local se muestran con el retardo correspondiente, es decir, tal y como se leerían en el lado remoto si se enviaran a éste. Se puede apreciar claramente que el operador humano experimenta cierta fuerza que restringe sus movimientos pero aún así se mantiene la estabilidad de lazo cerrado confirmando así la conocida propiedad de robustez de los controladores PID. Además, la Fig. 7 muestra  $\mathbf{q}_1(t)$  vs  $\mathbf{q}_r(t - T_r(t))$ , donde se aprecia que cuando el robot remoto entra en contacto con su entorno, aumenta el error de posición lo que a su vez aumenta las medidas de fuerza (comparado con la Fig. 6). Este aumento de fuerza, lo que siente el operador humano, se debe a que el controlador local intenta reducir el error de posición limitando así también los movimientos locales, por lo que ejerce una fuerza en dirección contraria a la superficie. Sin embargo, el esquema muestra que el error de posición permanece acotado aunque el desempeño es peor comparado con el de la Sección 3.1 para la primera y segunda articulaciones (véanse las Tablas 1 y 3).

### 3.4 Experimento 4: Reflexión de fuerza

El experimento de la sección anterior muestra un desempeño extremadamente robusto de los controladores PID cuando la perturbación es el entorno que restringe el

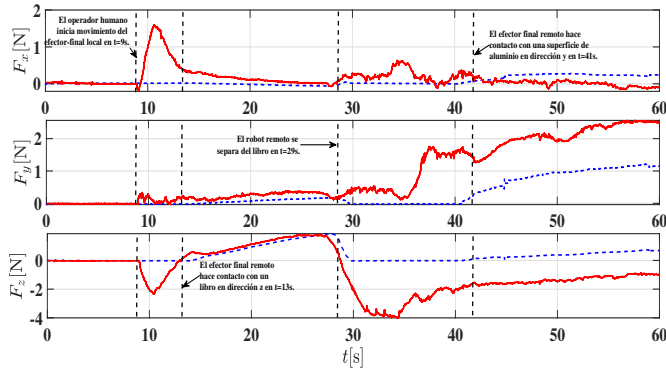


Fig. 6. Experimento 3: Movimiento restringido. Mediciones de fuerza:  $\mathbf{F}_e(t)$  (---),  $\mathbf{F}_h(t - T_1(t))$  (—).

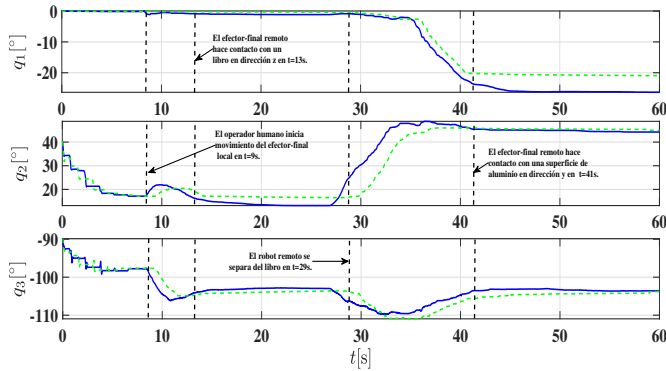


Fig. 7. Experimento 3: Movimiento restringido. Seguimiento de posición:  $\mathbf{q}_l(t)$  (—),  $\mathbf{q}_r(t - T_r(t))$  (---).

| Componente | RMSE [N] |
|------------|----------|
| x          | 0.3449   |
| y          | 1.7693   |
| z          | 1.8941   |

Table 4. Experimento 3: Movimiento restringido. RMSE de seguimiento de fuerza.

movimiento del manipulador remoto. Además, la Fig. 6 muestra claramente que el operador tiene un cierto grado de telepresencia, pero no de transparencia porque no se está considerando la reflexión de fuerzas. Para conseguir transparencia, se emplea el concepto de correspondencia cinemática retardada definido en (Arteaga-Pérez et al., 2019) y se introduce una retroalimentación de fuerza. Aunque un análisis de estabilidad está fuera del alcance de la presente contribución, para el último experimento las ecuaciones (4)-(5) se complementan con los siguientes términos de control de fuerza:

$$\mathbf{u}_i = -\mathbf{K}_{p_i}\mathbf{e}_i - \mathbf{K}_{v_i}\dot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{K}_{f_i}\xi_{ui} \pm \boldsymbol{\tau}_j(t - T_j(t)) \mp \mathbf{K}_{f_i}\Delta\mathbf{p}_i \quad (8)$$

$$\dot{\xi}_{ui} = \mathbf{e}_i \quad \xi_{ui}(t_0) = \mathbf{0}. \quad (9)$$

En lazo cerrado, las modificaciones introducidas representan esquemas de control de fuerza/par PI, donde

| Componente | RMSE [N] |
|------------|----------|
| x          | 0.5545   |
| y          | 0.3855   |
| z          | 0.3308   |

Table 5. Experimento 4: Reflexión de fuerza. RMSE de seguimiento de fuerza.

$\mathbf{K}_{f_i} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es una matriz diagonal definida positiva para cada robot que representa la ganancia integral, seleccionada como  $\mathbf{K}_{f_i} = 1350\mathbf{I}$ .  $\boldsymbol{\tau}_j(t - T_j(t)) \in \mathbb{R}^n$  es el par externo retardado transmitido de un robot al otro,  $\Delta\mathbf{p}_i = \int_0^t (\boldsymbol{\tau}_i - \boldsymbol{\tau}_j(t - T_j(t))) dt \in \mathbb{R}^n$ , el signo (+) es para  $i = l$ ; el signo (-), para  $i = r$ . Obsérvese que este esquema requiere mediciones de pares en lugar de fuerzas, para las que se aplica la conocida relación  $\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i)\mathbf{F}_i$  (Arteaga et al., 2022), en donde  $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es el Jacobiano geométrico del  $i$ -ésimo manipulador y  $\mathbf{F}_i \in \mathbb{R}^n$  son las fuerzas medidas (los pares medidos no se tienen en cuenta en este experimento). El criterio de correspondencia cinemática retardada establece, a grandes rasgos, que los errores de posición deben ser nulos (o próximos a cero) en el lado local, y los errores de seguimiento de fuerza deben ser nulos (o próximos a cero) en el lado remoto (Arteaga-Pérez et al., 2019). De este modo, la superficie remota se reproduce localmente para el operador humano, mientras que la fuerza aplicada por él se reproduce en el lado remoto, lo que significa que la conoce por definición.

En lugar de repetir los mismos movimientos que en el Experimento 3, el operador baja el efector final local hasta que el remoto alcanza el libro. Después, intenta dibujar un círculo en el libro, lleva el efector final local a la placa de aluminio, hace una pequeña línea y concluye el experimento llevando el efector final cerca de la posición inicial. La Fig. 8 muestra un buen desempeño en el seguimiento de la fuerza esta vez, a diferencia con la Fig. 6. Por supuesto, no se puede conseguir un error cero, pero al tener en cuenta que cuando el operador empuja hacia abajo contra el libro, el error en la dirección  $z$  es despreciable, y cuando empuja contra la placa de aluminio, el error en la dirección  $y$  también es despreciable. Esto significa que la dirección principal de la fuerza es la misma en ambos lados. Según Arteaga-Pérez et al. (2019), la fuerza ejercida sobre el entorno es la *comandada* por el operador, y exactamente por eso la conoce. En la Tabla 5 se muestra que el desempeño en el seguimiento de la fuerza es mucho mejor que en la Tabla 4, como era de esperarse. Finalmente, la Fig. 9 muestra nuevamente  $\mathbf{q}_l(t)$  vs  $\mathbf{q}_l(t - T_r(t))$ , donde se aprecia un mejor seguimiento respecto a la Fig. 7, aunque los experimentos no son equivalentes. Esto también puede apreciarse comparando las Tablas 3 y 6. Esta mejora del desempeño en el seguimiento de la posición también se debe a la retroalimentación de fuerza. De acuerdo con Arteaga-Pérez et al. (2019), Dado que ambos robots tienen la misma configuración cinemática, esto significa que el operador siente que el entorno remoto se reproduce para él.

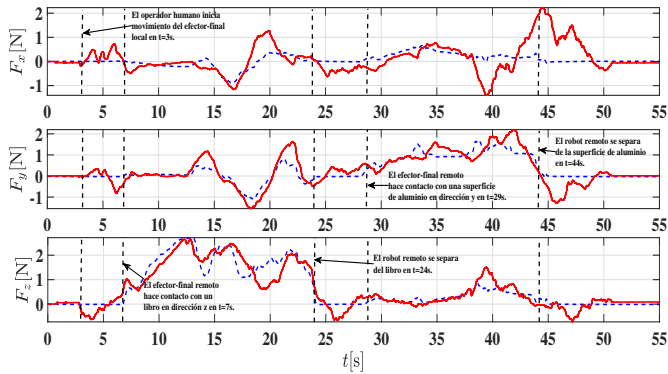


Fig. 8. Experimento 4: Reflexión de fuerza. Seguimiento de fuerza:  $\mathbf{F}_e(t)$  (---),  $\mathbf{F}_r(t - T_1(t))$  (—).

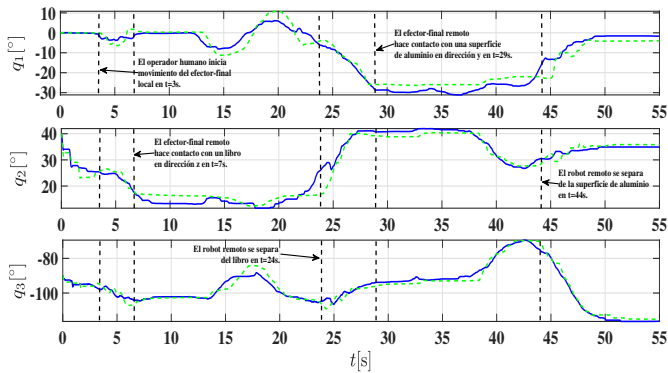


Fig. 9. Experimento 4: Reflexión de fuerza. Seguimiento de posición:  $\mathbf{q}_l(t)$  (—),  $\mathbf{q}_r(t - T_r(t))$  (---).

| Articulación | RMSE [°] |
|--------------|----------|
| 1            | 3.2540   |
| 2            | 2.2470   |
| 3            | 2.1648   |

Table 6. Experimento 4: Reflexión de fuerza. RMSE de seguimiento de posición.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso un enfoque experimental que muestra que el controlador estándar Proporcional Integral Derivativo (PID) puede utilizarse para la regulación de posición de sistemas bilaterales formados por manipuladores robóticos con retardos variables en el tiempo. Mediante una comparación con un conocido esquema de control PD + con compensación de la gravedad, se comprueba que el desempeño no disminuye esencialmente con los controladores PID, lo que lo convierte en una opción válida para sistemas bilaterales variables en el tiempo. A su vez, se llevaron a cabo algunos experimentos para validar las propiedades de robustez de los controladores PID ante movimiento restringido en el robot remoto, y así lograr la reflexión de la fuerza en el caso en donde se añadió un control PI para el control de la misma. Por último, recordemos que el *Round Trip Time* (RTT) es de

1.3s. Como se comenta en (Óscar Hernández-Ortiz and Arteaga-Pérez, 2020), el RTT es uno de los indicadores más fiables para juzgar objetivamente el desempeño de un sistema bilateral.

#### REFERENCES

- Arteaga, M.A., Gutiérrez-Giles, A., and Pliego-Jiménez, J. (2022). *Local Stability and Ultimate Boundedness in the Control of Robot Manipulators*. Springer.
- Arteaga-Pérez, M.A., López, M., Nuño, E., and Hernández-Ortiz, Ó. (2019). On the delayed kinematic correspondence with variable time delays for the control of the bilateral teleoperation of robots. *International Journal of Control*, 1–16.
- Benavides, E.J.G. and Arteaga, M.A. (2022). Parameter identification for the geomagic touch haptic device. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, 5.
- Chan, L., Huang, Q., and Wang, P. (2022a). Adaptive-observer-based robust control for a time-delayed teleoperation system with scaled four-channel architecture. *Robotica*, 40(5), 1385–1405.
- Chan, L., Liu, Y., Huang, Q., and Wang, P. (2022b). Robust adaptive observer-based predictive control for a non-linear delayed bilateral teleoperation system. *IEEE Access*, 10, 52294–52305.
- Cui, J., Tosunoglu, S., Roberts, R., Moore, C., and Repperger, D.W. (2003). A review of teleoperation system control. In *Proceedings of the Florida conference on recent advances in robotics*, 1–12. Citeseer.
- Johnson, M.A. and Moradi, M.H. (2005). *PID control*. Springer.
- Kelly, R., Santibáñez, V., and Loría, J.A. (2006). *Control of robot manipulators in joint space*. Springer Science & Business Media.
- Nuño, E., Arteaga-Pérez, M., and 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.
- Óscar Hernández-Ortiz and Arteaga-Pérez, M.A. (2020). A simple approach for the force control of bilateral teleoperated manipulators with variable time delays. *Control Engineering Practice*, 102, 1–13.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. (2009). *Force control*. Springer.
- Spong, M.W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M. (2020). *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons.
- Zhang, H., Fu, L., and Zhang, A. (2023). A novel adaptive finite-time position tracking control strategy for teleoperation system with varying communication delays. *Mathematics*, 11(6), 1486.