

Resultados experimentales del control de un sistema de teleoperación bilateral de robots con retardos variantes en el tiempo

Mauro Gilberto López^{a, *}, Marco Antonio Arteaga^a, A. I. Gutiérrez^b, Emmanuel Nuño^c

^aDepartamento de Control y Robótica, División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 04510, México.

^bCentro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, CDMX, México.

^cCentro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, esq. Calzada Olímpica 44430, Guadalajara, Jalisco, México.

To cite this article: López, M. G., Arteaga, M. A., Gutiérrez, A. I., Nuño, E. 2022. Experimental results on the control of a robot bilateral teleoperation system with time varying delays. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 19, 96-107. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.14834>

Resumen

Los sistemas bilaterales de teleoperación son útiles en una amplia gama de tareas que pueden resultar peligrosas o inaccesibles para un humano. Sin embargo, cuando aparecen retardos variantes en el tiempo en el canal de comunicación, ya no se puede garantizar una transparencia perfecta. En cambio, se pueden perseguir otros objetivos de control, como la correspondencia cinemática entre los robots local y remoto. Además, dado que la mayoría de los robots disponibles comercialmente no están equipados con sensores de velocidad, para garantizar un cierto nivel de transparencia o correspondencia cinemática, el controlador no puede depender de las mediciones de velocidad. Este artículo está enfocado en presentar los resultados experimentales de un esquema robusto ante los retardos en el tiempo para manipuladores no lineales conectados a través de un canal de comunicación. Las ventajas principales del esquema propuesto son: i) no es necesario conocer los parámetros dinámicos de los manipuladores, ii) no es necesario imponer restricciones acerca del comportamiento del operador humano y de la superficie remota, iii) se obtiene una estimación de velocidades a través de un filtro lineal de segundo orden, iv) un término que garantiza el seguimiento de fuerza fue agregado al esquema. Con el objetivo de mostrar el buen desempeño del esquema propuesto, se reportan un conjunto de experimentos que se han llevado a cabo entre diferentes ciudades de México utilizando Internet como canal de comunicación.

Palabras clave: Teleoperadores bilaterales, diseño de observadores, retardos variantes en el tiempo, correspondencia cinemática retardada.

Experimental results on the control of a robot bilateral teleoperation system with time varying delays

Abstract

Bilateral systems of teleoperation are useful in a wide range of tasks that can be dangerous or inaccessible for a human operator. However, when time varying delays appear in the communication channel, perfect transparency can no longer be ensured. Instead, other control objectives may be pursued, such as the kinematic correspondence between the local and the remote robots. Furthermore, since most of the commercially available robots are not equipped with velocity sensors, to guarantee a certain level of transparency or kinematic correspondence the controller cannot rely on velocity measurements. This article is focused on presenting the experimental results of a robust scheme to time delays for non-linear manipulators connected through a communication channel. The main advantages of the control scheme are: i) it is not necessary to know the dynamic parameters of the manipulators; ii) it is not necessary to impose restrictions in the behavior of the human operator and the remote surface; iii) an estimation of velocities is obtained through a second order linear filter; iv) a term that guarantee force tracking is added to the scheme as well. In order to show good performance, we report a set of experiments that have been carried out between different cities in Mexico using the Internet as a communication channel.

Keywords: Bilateral teleoperators, observer design, time varying delays, delayed kinematic correspondence.

1. Introducción

Los sistemas de teleoperación bilaterales permiten a las personas desempeñar tareas complejas en ambientes remotos o inaccesibles. Estos sistemas se componen de cinco elementos: un operador humano, un robot local/maestro, un canal de comunicación, un robot remoto/esclavo, y el ambiente remoto. Existen aplicaciones donde el operador humano no puede acceder al ambiente remoto, principalmente por el riesgo que se conlleva, sin mencionar los obstáculos que pudiesen estar presentes. Cuando estos dos factores se unen, se puede decir que el sistema de teleoperación se encuentra en movimiento restringido y es de particular interés debido a que en muchas ocasiones no se tiene información acerca de la superficie de contacto. En estas circunstancias el operador humano debe describir una trayectoria y aplicar una fuerza en el lado del robot local, después el robot local envía la información a través de un canal de comunicación hacia el robot remoto, este último seguirá la posición y aplicará la fuerza comandada por el operador humano sobre una superficie desconocida Anderson and Spong (1989). Idealmente, el operador humano identifica, percibe o tiene alguna sensación de la superficie remota; sin embargo, este objetivo se alcanza gracias a la combinación de habilidades humanas, precisión y la repetibilidad de una manipulación robótica rentable. Con base en todos estos factores, las tareas de desempeño y transparencia deben ser maximizadas mientras la estabilidad del sistema en lazo cerrado es garantizada. Por lo tanto, cuanto mejor sea el rendimiento, mejor será la telepresencia del operador y la transparencia del sistema de tal manera que el operador humano puede usar el sistema bilateral sin algún entrenamiento especial García-Valdovinos et al. (2005b), Nuño et al. (2011). En este punto, es importante hacer la aclaración entre la diferencia de transparencia y telepresencia. La primera significa que el medio físico entre el operador y el ambiente no impone ningún comportamiento dinámico, mientras que la segunda es un concepto subjetivo y significa que el operador tiene la sensación de estar en el ambiente remoto Passenberg et al. (2010). Por esta razón, es mejor proponer un criterio para evaluar la transparencia como una métrica de desempeño Lawrence (1993), Yokokohji and Yoshikawa (1994).

Cuando los manipuladores local y remoto están separados por una larga distancia o cuando la transferencia de datos es limitada, retardos variantes en el tiempo substanciales pueden aparecer entre la posición y la fuerza comandada por el operador humano y aquella aplicada por el manipulador remoto, como consecuencia de estos retardos en el tiempo, la estabilidad del sistema se ve afectada en su totalidad Sheridan (1993). En Hua and Liu (2010) Islam et al. (2013) un marco pasivo de teleoperación es propuesto con la finalidad de suavizar las condiciones de estabilidad. Por desgracia, este marco se propone para retardos asimétricos donde las condiciones de estabilidad se basan en desigualdades matriciales, las cuales son obtenidas con el conocimiento del vector de gravedad de ambos manipuladores *a priori*. En los trabajos de Sonoura et al. (2002), Dyck et al. (2013) las anteriores condiciones de estabilidad han sido cuestionadas, ya que no parecen ser válidas para todas las situaciones posibles. Para sobreponerse a estos problemas, en Polushin et al. (2007) se propuso una estrategia de control que funciona en presencia de retardos simétricos variables, pero impone un comportamiento constante en los de pares de entrada por parte

del operador humano y el ambiente remoto.

Otro problema que surge en muchas aplicaciones de sistemas de teleoperación es la posible falta de las mediciones de velocidad. Como solución a este problema, podría simplemente acoplarse sensores de velocidad como lo pueden ser tacómetros, sin embargo es muy probable que las mediciones de velocidad se encuentren contaminadas por ruido, sin mencionar que deberían ser acoplados filtros adicionales Namvar (2009), Nuño (2016). Para evitar estos sensores, una solución es utilizar algún estimador reportado en la literatura. En García-Valdovinos et al. (2005a) se utilizan técnicas basadas en modos deslizantes de orden superior para una estimación de estado robusta, en Sarras et al. (2016) se utiliza un observador de velocidad basado en inmersión e invariancia (I & I). Sin embargo, para que este funcione, es necesario conocer el modelo del sistema por completo, lo que dificulta su implementación. Como alternativa, en Nuño et al. (2018) se propone una solución que no requiere el modelo del sistema por completo, basta con el conocimiento del vector de gravedad de cada manipulador para garantizar el consenso. Como se puede ver, por un lado se tiene la dependencia del modelo en algunos esquemas, y por otro lado no se cuenta con mediciones de velocidad, así que con base en estos problemas abiertos, en Arteaga-Pérez et al. (2017) se propone un esquema de observación y de control diseñado en conjunto, el cual está basado en técnicas de modos deslizantes de segundo orden permitiendo garantizar que los errores de posición no sólo permanezcan acotados sino que además, con un conjunto adecuado de ganancias se logre hacer estos errores arbitrariamente pequeños para el caso de movimiento libre, resolviendo así el problema de consenso. En cuanto a los errores de observación, estos tienden a cero tanto en movimiento libre como en movimiento restringido. Los resultados están respaldados por diferentes experimentos.

En Arteaga-Pérez et al. (2019) se ofrece una discusión completa del por qué los objetivos habituales como la telepresencia y la transparencia, los cuales fueron definidos para sistemas sin ningún tipo de retardo, no pueden extenderse o aplicarse directamente para sistemas con retardos en el tiempo. Por lo tanto, se hace una propuesta acerca de los criterios de desempeño, basados en el concepto de correspondencia cinemática retardada, que además es verificada con la propuesta de un esquema de control-observador. Lo más notable es que la prueba de estabilidad se lleva a cabo sin hacer ninguna suposición de pasividad sobre las fuerzas ejercidas por el operador humano. A pesar de que se llevaron a cabo una serie de experimentos para probar el funcionamiento del enfoque, estos se implementaron en un sólo laboratorio y los retardos de tiempo tuvieron que ser introducidos artificialmente vía una distribución normal para lograr retardos más grandes. En este trabajo, se realiza un nuevo conjunto de experimentos entre diferentes universidades de México, principalmente para evaluar la propuesta presentada en Arteaga-Pérez et al. (2019) bajo condiciones más realistas, *i.e.*, sin retardos artificiales. Así mismo, se introduce en el presente trabajo una modificación más sencilla que eleva el desempeño del esquema de control y observación.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 presenta una breve descripción del sistema y la nueva propuesta de análisis reportada en Arteaga-Pérez et al. (2019), el cual propone un enfoque diferente para los casos de interés

en sistemas de teleoperación bilaterales compuestos por robots manipuladores. La Sección 3 hace énfasis en el esquema original de control y observación dado en Arteaga-Pérez et al. (2019) y se presenta una nueva modificación al controlador y al observador. El conjunto completo de nuevos experimentos para Arteaga-Pérez et al. (2019) y la modificación propuesta se presenta en la Sección 4. El artículo concluye en la Sección 5.

2. Preliminares

2.1. Modelo del sistema

Considere un sistema de teleoperación de robots local (l) – remoto (r) compuesto por dos manipuladores, cada uno ellos con n grados de libertad. La dinámica del robot local y remoto están dadas en Nuño et al. (2009)

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

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

respectivamente, donde para $i = l, r$, $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^n$ es el vector de coordenadas articulares generalizadas, $\mathbf{H}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia simétrica positiva definida, $\mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)\dot{\mathbf{q}}_i \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares de Coriolis y centrífugos, $\mathbf{D}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz semidefinida positiva diagonal que toma en cuenta la fricción viscosa, $\mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares de gravedad y $\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares actuando sobre las articulaciones. Las entradas externas $\boldsymbol{\tau}_h \in \mathbb{R}^n$ y $\boldsymbol{\tau}_e \in \mathbb{R}^n$ representan el par aplicado por el operador humano y la fuerza de contacto, respectivamente.

2.2. Correspondencia retardada cinemática

Cuando los retardos en el tiempo no están presentes en el canal de comunicación, dos maneras usuales de definir la transparencia pueden ser usadas. Por un lado, en Lawrence (1993) se propone como condición de transparencia que la impedancia "sentida" por el operador humano sea igual a la impedancia de la tarea. Por otro lado, en Yokokohji and Yoshikawa (1994) se proponen tres respuestas ideales para la correspondencia cinemática independientemente del operador y la dinámica del entorno: *i)* $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t)$, *ii)* $\boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{\tau}_e(t)$ y *iii)* ambas $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t)$ y $\boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{\tau}_e(t)$ se satisfacen. Sin embargo, los conceptos previos no toman en cuenta los retardos en el tiempo en el canal de comunicación. Por lo tanto, haciendo una analogía a los conceptos propuestos en Yokokohji and Yoshikawa (1994), en Arteaga-Pérez et al. (2019) se propone que la correspondencia cinemática retardada unilateral ideal dada en términos de posición y fuerza debería satisfacer: *i)* $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_j(t - T_j(t))$, *ii)* $\mathbf{F}_i(t) = \mathbf{F}_j(t - T_j(t))$, y *iii)* $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_j(t - T_j(t))$ y $\mathbf{F}_i(t) = \mathbf{F}_j(t - T_j(t))$, donde si $i = l$, entonces $j = r$ y viceversa. $\mathbf{F}_i \in \mathbb{R}^n$ es ya sea la fuerza del ambiente \mathbf{F}_e para $i = r$ o la fuerza aplicada por el humano \mathbf{F}_h para $i = l$. Note que por motivos de simplicidad a veces también se emplea $\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_r$ y $\mathbf{F}_h = \mathbf{F}_l$. Tres Casos particulares de interés son distinguidos:

- a) Para movimiento libre, *i. e.*, $\boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{\tau}_e(t) = \mathbf{0}$, deberá alcanzarse $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_r(t))$ y $\mathbf{q}_r(t) = \mathbf{q}_l(t - T_l(t))$. En este caso hay únicamente dos posibles soluciones, ya sea que resulte en consenso para alcanzar una posición constante

igual o se produce un movimiento periódico sincronizado si la suma $T_l(t) + T_r(t)$ es constante.

- b) Para movimiento libre del manipulador remoto, *i. e.*, $\boldsymbol{\tau}_h(t) \neq \mathbf{0}$ pero $\boldsymbol{\tau}_e(t) = \mathbf{0}$, entonces debería alcanzarse $\mathbf{q}_r(t) = \mathbf{q}_l(t - T_l(t))$, lo que significa que el manipulador remoto debería seguir la posición retardada del manipulador local.
- c) Para movimiento restringido, *i. e.*, $\boldsymbol{\tau}_h(t) \neq \mathbf{0}$ y $\boldsymbol{\tau}_e(t) \neq \mathbf{0}$, entonces una de las tres repuestas unilaterales ideales debería ser alcanzada

$$(i) \quad \mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_r(t))$$

$$(ii) \quad \mathbf{F}_e(t) = \mathbf{F}_h(t - T_l(t))$$

$$(iii) \quad \mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_r(t)) \text{ y } \mathbf{F}_e(t) = \mathbf{F}_h(t - T_l(t)),$$

donde se considera la relación bien conocida Siciliano et al. (2010)

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

donde $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es el Jacobiano geométrico del robot. Note que obteniendo $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t - T_r(t))$ garantiza que la superficie de contacto remota o el objeto, sean reconstruidos en el lado del robot local por el operador humano, mientras que alcanzando $\mathbf{F}_e(t) = \mathbf{F}_h(t - T_l(t))$ (escrito de otra manera $\mathbf{F}_r(t) = \mathbf{F}_l(t - T_l(t))$) implica que la fuerza aplicada por el operador humano en el lado local (sobre la superficie virtual reconstruida) será tomada como la fuerza deseada para el manipulador remoto.

Una discusión completa sobre la definición de los tres casos de interés puede ser encontrada en Arteaga-Pérez et al. (2019).

3. Esquema Control-observador

En esta sección se reproduce para comodidad del lector el esquema original de control-observador propuesto en Arteaga-Pérez et al. (2019) y luego se propone una modificación en el controlador para mejorar el desempeño.

3.1. Esquema original

Considere una vez más $i = l, r$ y defina

$$\mathbf{q}_{di}(t) \triangleq \mathbf{q}_j(t - T_j(t)) \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{q}}_{di} \triangleq \hat{\mathbf{q}}_j(t - T_j(t)), \quad (5)$$

como la trayectoria deseada y una estimación de la no disponible $\hat{\mathbf{q}}_{di}$ respectivamente, donde $\{\hat{\cdot}\}$ denota un valor estimado (observado). Si $i = l$, entonces $j = r$ y viceversa. Los correspondientes errores de observación y de seguimiento son definidos como

$$\mathbf{z}_i \triangleq \mathbf{q}_i - \hat{\mathbf{q}}_i \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{q}_i \triangleq \mathbf{q}_i - \mathbf{q}_{di}, \quad (7)$$

respectivamente, donde $\hat{\mathbf{q}}_i$ es obtenida computando la integral de la estimada $\hat{\mathbf{q}}_i$ en (10). El observador original está definido como

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_i = \mathbf{z}_i \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\zeta}_i = \hat{\mathbf{q}}_{di} - \boldsymbol{\Lambda}_{xi}\Delta\mathbf{q}_i + \mathbf{K}_{di}\boldsymbol{\Lambda}_{zi}\boldsymbol{\xi}_i \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{q}}_i = \boldsymbol{\zeta}_i + \boldsymbol{\Lambda}_{zi}\mathbf{z}_i + \mathbf{K}_{di}\mathbf{z}_i, \quad (10)$$

donde $\boldsymbol{\Lambda}_{zi}, \boldsymbol{\Lambda}_{xi}, \mathbf{K}_{di} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales definidas positivas. Para el controlador las siguientes definiciones son necesarias:

$$\mathbf{s}_i = \hat{\mathbf{q}}_i - \hat{\mathbf{q}}_{di} + \boldsymbol{\Lambda}_{xi}\Delta\mathbf{q}_i \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_i = \mathbf{K}_{\beta i}\mathbf{s}_i + \text{sign}(\mathbf{s}_i) \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{oi} = \hat{\mathbf{q}}_i - \boldsymbol{\Lambda}_{zi}\mathbf{z}_i \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{ri} = \hat{\mathbf{q}}_{di} - \boldsymbol{\Lambda}_{xi}\Delta\mathbf{q}_i - \mathbf{K}_{\gamma i}\boldsymbol{\sigma}_i \quad (14)$$

$$\mathbf{s}_{oi} \triangleq \dot{\mathbf{q}}_{oi} - \dot{\mathbf{q}}_{ri}, \quad (15)$$

donde $\mathbf{K}_{\beta i}, \mathbf{K}_{\gamma i} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales definidas positivas y $\text{sign}(\mathbf{s}_i) = [\text{sign}(s_{i1}), \dots, \text{sign}(s_{in})]^T$ con s_{ij} elemento de \mathbf{s}_i para $j = 1, \dots, n$. También, se define el error de seguimiento de fuerza como¹

$$\Delta\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i - \mathbf{F}_{di} \equiv \mathbf{F}_i - \mathbf{F}_j(t - T_j(t)), \quad (16)$$

mientras que la correspondiente integral está dada por

$$\Delta\mathbf{p}_i = \int_0^t \Delta\mathbf{F}_i dt, \quad (17)$$

con \mathbf{F}_e para $i = r$ y \mathbf{F}_h para $i = l$, y de igual manera si $i = l$ entonces $j = r$ y viceversa, $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^n$ representa el momento lineal y angular. Las leyes de control propuestas en Arteaga-Pérez et al. (2019) están dadas por

$$\boldsymbol{\tau}_l = -\mathbf{K}_{al}\dot{\hat{\mathbf{q}}}_l - \mathbf{K}_{pl}\mathbf{s}_{ol} + \mathbf{J}_l^T(\mathbf{q}_l)(\mathbf{F}_{dh} - \mathbf{K}_{f1}\Delta\mathbf{p}_l) \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\tau}_r = \mathbf{K}_{ar}\dot{\hat{\mathbf{q}}}_r + \mathbf{K}_{pr}\mathbf{s}_{or} - \mathbf{J}_r^T(\mathbf{q}_r)(\mathbf{F}_{de} - \mathbf{K}_{fr}\Delta\mathbf{p}_r), \quad (19)$$

donde $\mathbf{K}_{ai}, \mathbf{K}_{pi}, \mathbf{K}_{fi} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales definidas positivas. El Teorema 1 que se dará a continuación, resume el Teorema 3.1 y el Corolario 3.2 dados en Arteaga-Pérez et al. (2019). Como se muestra en la referencia, el Teorema 1 se puede probar bajo los siguientes suposiciones:

Suposición 1. Las derivadas del retardo están acotadas por T_i^* , i. e. $0 \leq |\dot{T}_i(t)| \leq T_i^* < \infty$, for $i = l, r$. \triangle

Suposición 2. Los pares debidos al humano y al ambiente, así como sus derivadas, están acotados para todo tiempo, i. e. entonces existen constantes positivas b_h, b_{dh}, b_e y b_{de} tales que $\|\mathbf{F}_h\| \leq b_h < \infty, \|\frac{d}{dt}\mathbf{F}_h\| \leq b_{dh} < \infty, \|\mathbf{F}_e\| \leq b_e < \infty, \|\frac{d}{dt}\mathbf{F}_e\| \leq b_{de} < \infty \forall t \geq 0$. Además, los robots manipuladores no alcanzan ninguna singularidad por lo que las matrices inversas $\mathbf{J}_i^{-1}(\mathbf{q}_i)$ siempre existen. \triangle

Teorema 1. Considere el sistema de teleoperación bilateral (1)–(2) en lazo cerrado con los observadores (8)–(10) y las leyes de control (18)–(19). Asuma que las Suposiciones 1 y 2 se cumplen; entonces para $i, j = l, r$ las ganancias del observador y control pueden ser siempre encontradas de tal manera que

- i. Todos los errores de seguimiento y observación permanecen acotados para todo tiempo.
- ii. Los errores de observación tienden a cero, i. e. $\mathbf{z}_i, \dot{\mathbf{z}}_i \rightarrow \mathbf{0}$.
- iii. En un tiempo finito se cumple para $i = l, r$

$$\|\Delta\mathbf{q}_i\| \leq \delta_{\max i}, \quad (20)$$

donde $\delta_{\max i}$ es una constante positiva que puede ser hecha arbitrariamente pequeña.

Con respecto a los tres Casos de interés a, b y c descritos en la Sección 2.2:

- a) Siempre que $\boldsymbol{\tau}_h = \boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{0}$, si $\delta_{\max i} \approx 0$ entonces
 - iv. Todos los errores de seguimiento tienden a cero y el consenso es alcanzado, i. e. $\mathbf{q}_l(t) = \mathbf{q}_r(t) = \mathbf{q}_c$ para alguna constante \mathbf{q}_c , con la excepción dada en el siguiente apartado.
 - v. Los robots tendrán un movimiento sincronizado en el sentido de que se seguirán entre ellos con un comportamiento periódico si la ronda de retardo $T_l(t) + T_r(t)$ es constante.
- b) Si $\boldsymbol{\tau}_h \neq \mathbf{0}$ pero $\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{0}$, entonces
 - vi. Si $\|\Delta\mathbf{q}_l\| \approx 0$ se cumple, entonces el operador humano no será capaz de mover el manipulador local y los apartados iv y v aún serán válidos.
 - vii. Si $\|\Delta\mathbf{q}_l\| \approx 0$ no se satisface, entonces el operador humano será capaz de mover el efector final de robot local, mientras el error de seguimiento remoto $\|\Delta\mathbf{q}_r\|$ puede como antes ser hecho arbitrariamente pequeño.
- c) Si $\boldsymbol{\tau}_h \neq \mathbf{0}$ y $\boldsymbol{\tau}_e \neq \mathbf{0}$, entonces
 - viii. Asuma que $\|\Delta\mathbf{q}_l\| \approx 0$ no se cumple, de tal forma que el operador humano es capaz de mover el efector final del robot local. Entonces, una vez que el movimiento del robot remoto está restringido, el operador sentirá una correspondencia cinemática retardada en el sentido de que ya no podrá mover libremente el efector final local en la dirección en que el manipulador remoto está aplicando la fuerza de contacto y la superficie de contacto remoto será reproducida localmente con un error no mayor que $\delta_{\max l}$.

¹Debe hacerse una advertencia. Por lo general, en implementaciones prácticas, el operador humano tira del efector final local mientras que el robot remoto presiona el entorno. De esta forma, el signo de la fuerza en las medidas puede ser opuesto y esto debe tenerse en cuenta si es necesario.

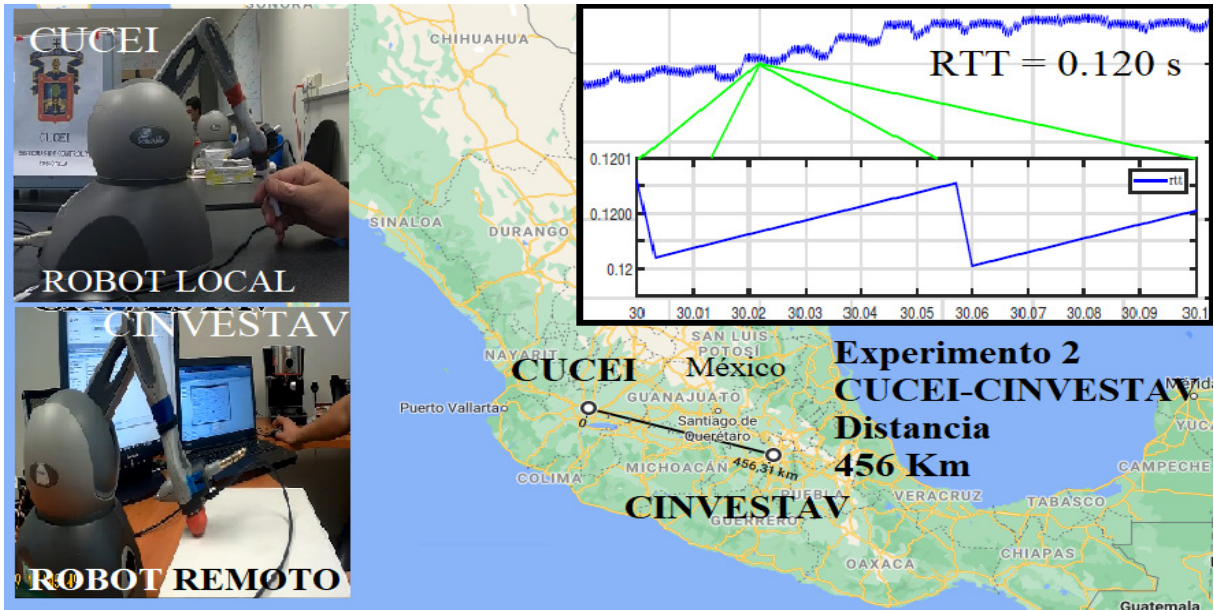


Figura 1: Centros de investigación mexicanos: CINVESTAV, UNAM y CUCEI.

ix. Para valores grandes de \mathbf{K}_{fi} , ambos \mathbf{F}_h y \mathbf{F}_e tenderán a ser constantes e iguales, pero si únicamente \mathbf{K}_{fi} es lo suficientemente grande, entonces $\Delta\mathbf{F}_r$ puede ser hecha arbitrariamente pequeña y los Casos de interés c.iii descritos en la Sección 2.2 estarán cumplidos totalmente. \triangle

3.2. Modificación del esquema de control/observador

El objetivo principal de este trabajo es presentar un conjunto de experimentos más desafiantes y realistas para evaluar los observadores (8)-(10) y las leyes de control (18)-(19) que las presentadas en la referencia original. Sin embargo, una cosa que se puede inferir de los resultados en Arteaga-Pérez et al. (2019) es que el controlador se puede mejorar haciendo algunos cambios en la propuesta original. Por lo tanto, se presenta la siguiente modificación, cuya demostración es omitida porque sigue los mismos argumentos que la prueba reportada en Arteaga-Pérez et al. (2019).

En primer lugar, las leyes de control siguen siendo las mismas, i. e. (18)-(19), pero en lugar de usar $\hat{\sigma}_i$ en (12), se introduce la siguiente modificación

$$\sigma_i = \mathbf{C}_i |s_i|^{1/2} \text{sign}(s_i) + \mathbf{w}_i \quad (21)$$

$$\dot{\mathbf{w}}_i = \mathbf{B}_i \text{sign}(s_i), \quad (22)$$

donde $\mathbf{C}_i, \mathbf{B}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales definidas positivas. Note que las ecuaciones (21) y (22) son el controlador *super twisting* dado en Levant (1993), así que la variedad deslizante ya no es mas una línea recta sino que ahora es una variedad no lineal. En efecto, esta estructura es un controlador basado en modos deslizantes de segundo orden, por lo que tanto σ_i y $\dot{\sigma}_i$ son llevadas a cero en tiempo finito. Además, el signo del término de conmutación de alta frecuencia (s_i) no es usado directamente en σ_i debido a que está oculto bajo la integral. Estas modificaciones permiten compensar con el término integral en las ecuaciones (21, 22) las incertidumbres paramétricas,

perturbaciones y dinámicas no modeladas en el sistema de teleoperación. En cuanto al observador, simplemente se establece $\mathbf{K}_{di} \equiv \Lambda_{zi}$ en (9)-(10) para obtener

$$\zeta_i = \hat{q}_{di} - \Lambda_{xi} \Delta q_i + \Lambda_{zi}^2 \xi_i \quad (23)$$

$$\dot{\zeta}_i = \zeta_i + 2\Lambda_{zi} \zeta_i. \quad (24)$$

En esencia la estructura del observador en lazo cerrado, es un filtro lineal de segundo orden cuya velocidad de convergencia en el error de estimación resulta ser críticamente amortiguada, forzando a que los sobre pasos sean menores. Note, que esta estructura reduce el número de ganancias a ser sintonizadas.

4. Resultados Experimentales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los experimentos en condiciones más desafiantes tanto para el algoritmo de control-observador dado por (8)-(10) y (18)-(19) reportado en Arteaga-Pérez et al. (2019) (abreviado *esquema original*), así como el propuesto en (21)-(22) y (23)-(24) (abreviado *esquema modificado*). Los manipuladores utilizados son dos robots *Geomagic Touch* de 6 grados de libertad (6 GDL o 6 *DOF* por sus siglas en inglés) de la empresa *3D systems* conectados vía protocolo de Internet TCP/IP entre tres universidades diferentes de México. Antes de cada experimento se hizo un *PING* para corroborar la velocidad de la comunicación entre ambas universidades, obteniendo una media de 120 ms de ida y de regreso. Los esquemas de control-observador se programaron en el *IDE* de *Microsoft Visual Studio* en lenguaje C++. La interfaz gráfica de usuario se desarrolló con *Microsoft Foundation Class*. Se decidió usar *MFC* en c++ debido a que esta herramienta permite; escribir, desarrollar, depurar y probar aplicaciones complejas en c++, controlar de manera más precisa los tiempos de muestreo con el reloj interno del sistema operativo, las librerías de ambos robots se encuentran listas para ser usadas en este lenguaje, y por último, la comunicación con los *Sockets* ya estaba resuelta. En los experimentos

se utilizan sólo las 3 primeras articulaciones de los 6-DOF de los manipuladores, debido a que estas son las únicas actuadas. Las tres instituciones mexicanas que participaron en el presente estudio son el CINEVESTAV (*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN*) y la UNAM (*Universidad Nacional Autónoma de México*) en la Ciudad de México, y el CUCEI (*Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara*) en la Ciudad de Guadalajara. La Figura 1 muestra un mapa de México con la distancia máxima aproximada entre los diferentes centros de investigación. Se muestra además el comportamiento del retardo de ida y vuelta RTT entre el CUCEI y el CINEVESTAV, como se puede apreciar el retardo describe un comportamiento variante. Se llevaron a cabo cuatro experimentos, dos para movimiento libre y dos más para movimiento restringido:

Experimento 1 CINEVESTAV–UNAM: 21 [km] con un RTT 20 [ms]. Sólo se presenta el esquema modificado para una distancia corta.

Experimento 2 CINEVESTAV–CUCEI: 456 [km] con un RTT 120 [ms]. El esquema modificado y original son probados para una distancia más grande.

4.1. CINEVESTAV–UNAM: Movimiento libre con el esquema modificado

Esta sección provee los primeros resultados para el esquema modificado. Hasta este punto ninguna comparación es llevada a cabo con el enfoque original. En este caso, el objetivo a perseguir es determinar el comportamiento del sistema de teleoperación cuando el operador humano mueve el efector final local ($\tau_h \neq \mathbf{0}$ y $\tau_e = \mathbf{0}$), Caso b) de la Sección 2.2, y después lo suelta ($\tau_h = \tau_e = \mathbf{0}$), convirtiéndose así en el Caso a) de la Sección 2.2. El operador humano (manipulador local) está ubicado en la UNAM, mientras que el robot remoto está localizado en el CINEVESTAV. El promedio de la ronda de retardo de tiempo de ida y regreso (RTT) es aproximadamente de 20 [ms]. Las velocidades y posiciones iniciales para los manipuladores local y remoto son $\dot{q}_i = \mathbf{0}$ [°/s], $q_i = [0, 90^\circ, 90^\circ]$. Las ganancias del esquema control–observador se omiten por tema de espacio.

El primer conjunto de experimentos tiene el propósito de mostrar que el consenso es alcanzado. El experimento inicia con una trayectoria oscilante inducida por el operador humano, después en el segundo 11 aproximadamente el sistema de teleoperación se vuelve autónomo (El operador humano suelta el efector final del robot local). La Figura 2 muestra que el robot remoto sigue la posición retardada del robot local (que se convierte en la trayectoria deseada), mientras que en la Figura 3 puede ser apreciado que una vez que el operador humano suelta el efector final del robot local $t = 11$ [s], el consenso es alcanzado en el segundo $t = 20$ [s]. Finalmente, la Figura 4 muestra los errores de observación en el lado del robot remoto. Con base en estas figuras, se puede determinar que el esquema modificado presenta un buen desempeño, tanto en seguimiento de las posiciones, como en la parte de observación. Los resultados son muy similares para el lado del robot local por lo tanto, se omitieron las figuras del lado local, pero se muestran los índices de desempeño de seguimiento y observación en la Tablas 1 y 3.

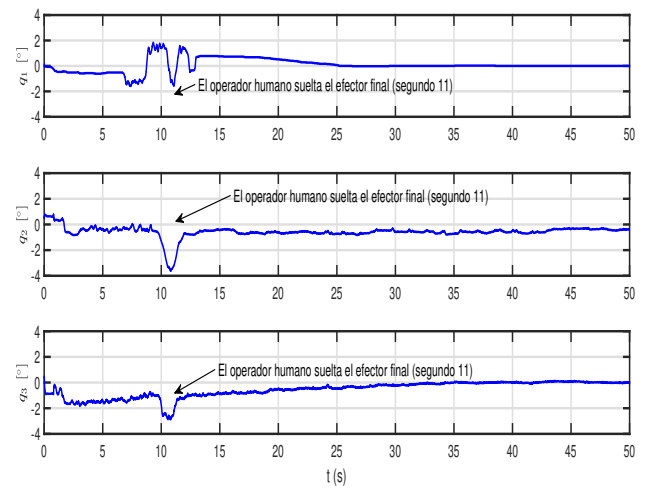


Figura 3: CINEVESTAV–UNAM: Movimiento libre. Error de posición del lado remoto $\Delta q_r(t)$.

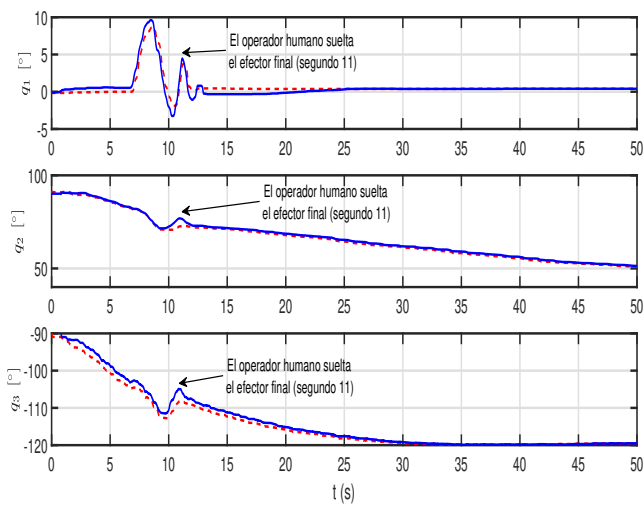


Figura 2: CINEVESTAV–UNAM: Movimiento libre. Posición remota $q_r(t)$ (---) vs posición local retardada $q_l(t - T_1)$ (—).

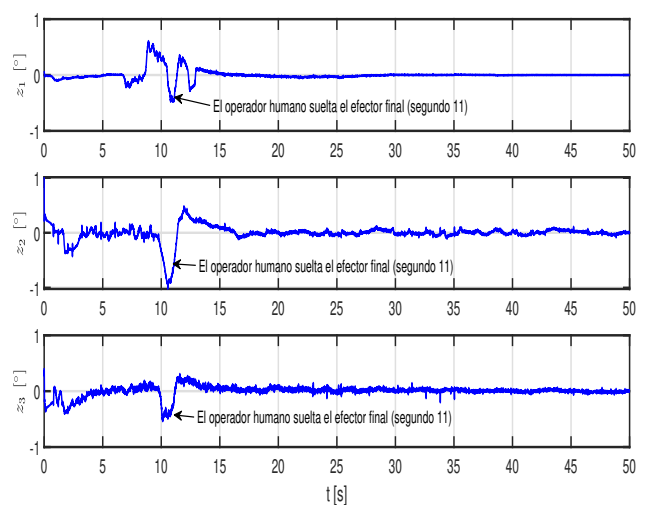


Figura 4: CINEVESTAV–UNAM: Movimiento libre. Error de observación del lado remoto z_r .

4.2. CINESTAV-UNAM: Movimiento restringido con el esquema modificado

Para el segundo experimento, el operador humano moverá hacia abajo el efector final local, hasta que perciba que el robot remoto entra en contacto con una superficie rígida, en este caso la ronda de retardo es similar a la de movimiento libre.

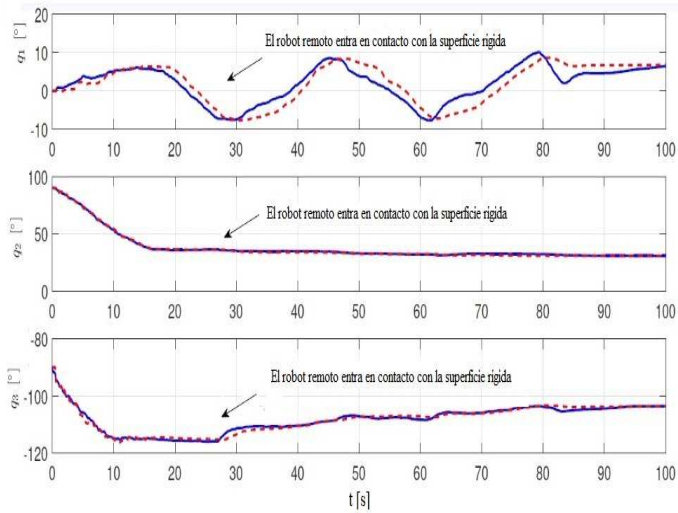


Figura 5: CINESTAV-UNAM: Movimiento restringido. Posición local $q_1(t)$ (—) vs posición retardada del remoto $q_r(t - T_r)$ (- - -)

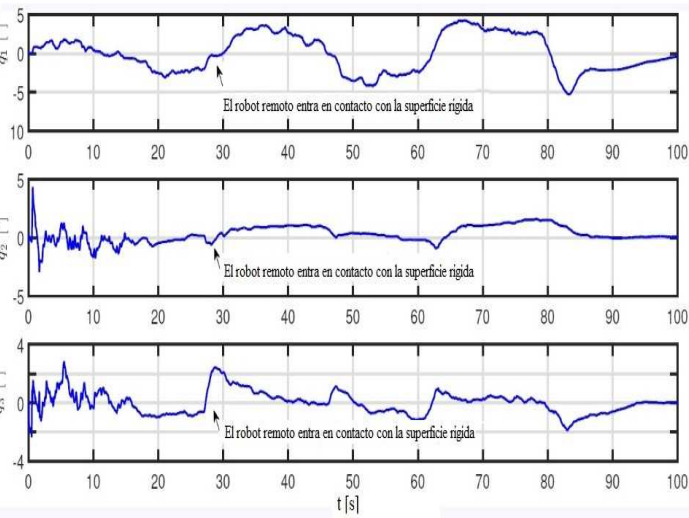


Figura 6: CINESTAV-UNAM: Movimiento restringido. Error de posición local $\Delta q_1(t)$.

En la Figura 5 se puede apreciar que una vez el movimiento del robot remoto se encuentra restringido por la superficie rígida (en $t = 29$ [s]), el movimiento del manipulador local también se vuelve restringido, lo que le da a la persona la sensación de correspondencia cinemática retardada como se indica en el Caso *c.iii* de la Sección 2.2 y soportada además en el apartado *c.viii* del Teorema 1. Este objetivo se logra porque el manipulador local sigue hasta cierto punto la posición retardada del robot remoto. Esto también se puede verificar observando el error local en la Figura 6. Es muy importante entender que, como se

explica completamente en Arteaga-Pérez et al. (2019), los errores de seguimiento solo pueden permanecer acotados como se indica en (20), mientras que $\delta_{m\acute{a}x1}$ más pequeño, como efecto inmediato, sería más difícil mover el efector final local por parte del operador humano. Por lo tanto, se debe permitir que los errores de seguimiento sean relativamente grandes. Como se explica en la Sección 2.2, si la posición local sigue la posición retardada, entonces físicamente significa que el operador está sintiendo una reconstrucción de la superficie remota. Por otro lado, se desea que el robot remoto aplique la fuerza proporcionada por el operador. La Figura 7 muestra los resultados de este experimento. Al igual que antes, los errores correspondientes no pueden ser cero a menos que las fuerzas deseadas sean constantes. Nótese que se podría obtener un mejor desempeño si se conociera la superficie remota *a priori*, porque de esa manera el controlador de fuerza podría ser híbrido, en lugar de un simple PI. En cuanto al observador, la Figura 8 muestra el error de observación local, nuevamente estos errores no solo permanecen acotados sino que son muy pequeños.

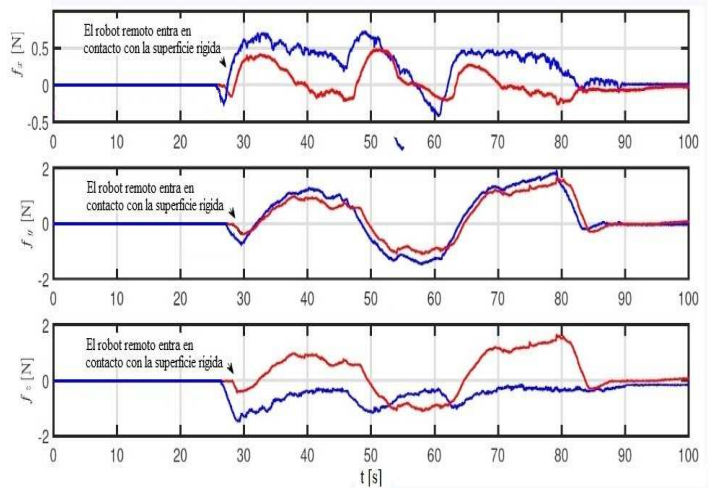


Figura 7: CINESTAV-UNAM: Movimiento restringido. Fuerza del lado del remoto $F_e(t)$ (—) vs fuerza del lado del local $F_h(t - T_1)$ (—), a) F_x , b) F_y , c) F_z .

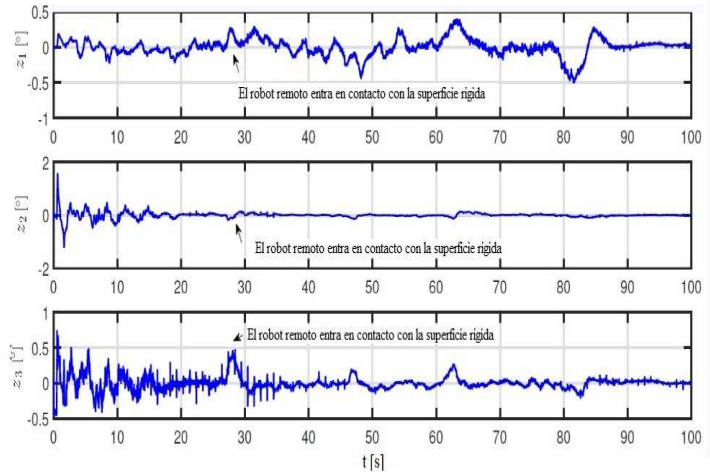


Figura 8: CINESTAV-UNAM: Movimiento restringido. Error de observación del lado local z_1 .

Con el fin de tener una idea más objetiva del rendimiento general del sistema, se han obtenido los errores medios cuadráticos (RMSE) de todos los errores representativos tanto en el lado local como en el remoto. Por ejemplo, para los errores de observación se tiene $RMSE(z_{ij}) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (z_{ij}(k))^2$, donde m es el número de muestras, $i = 1, r$ y $j = 1, 2, 3$. Los resultados son sintetizados en la Tabla 1 para los errores de posición, la Tabla 2 para los errores de fuerza y finalmente la Tabla 3 para los errores de observación.

Tabla 1: CINESTAV-UNAM: RMSE de los errores de seguimiento Δq_{ri} y Δq_{li} para $i = 1, 2, 3$.

RMSE [°]	i = 1	i = 2	i = 3
Movimiento libre $\Delta q_{ri}(t)$	0.6240	1.216	1.0173
Movimiento libre $\Delta q_{li}(t)$	0.4142	1.0421	0.7025
Movimiento restringido $\Delta q_{ri}(t)$	2.9016	1.7021	1.3113
Movimiento restringido $\Delta q_{li}(t)$	2.7932	1.5667	1.6054

Tabla 2: Observación CINESTAV-UNAM: RMSE de los errores en seguimiento de fuerza $\Delta F_r(t)$ y $\Delta F_l(t)$.

RMSE [N]	x	y	z
Movimiento restringido $\Delta F_r(t)$	0.3063	0.4269	1.2471
Movimiento restringido $\Delta F_l(t)$	0.2828	0.2971	1.1405

Tabla 3: CINESTAV-UNAM: RMSE de los errores de observación z_{ri} y z_{li} para $i = 1, 2, 3$.

RMSE [°]	i = 1	i = 2	i = 3
Movimiento libre z_{ri}	0.2171	0.1237	0.1221
Movimiento libre z_{li}	0.3485	0.1169	0.1083
Movimiento restringido z_{ri}	0.2332	0.2923	0.1876
Movimiento restringido z_{li}	0.2082	0.1608	0.1490

4.3. CINESTAV-CUCEI: Movimiento libre con los esquemas modificado y original

Los resultados de las Secciones 4.1 y 4.2 muestran un buen desempeño para el esquema modificado introducido en este trabajo. Sin embargo, el RRT es menor a 20 [ms], por lo que se desea evaluarlo para retardos mayores y por lo tanto en condiciones más exigentes. En lugar de introducir un retardo de tiempo artificial como se hizo en Arteaga-Pérez et al. (2019), para este trabajo, con una colaboración con el CUCEI en la ciudad de Guadalajara fue posible aumentar la distancia de 21 [km] a 456 [km], aproximadamente. Esto permite aumentar el RTT hasta los 120 [ms] (ver Figura 1). Bajo este escenario más desafiante, han sido implementados el esquema original y modificado y se comparan sus resultados. Como antes, se consideran los casos de movimiento libre y restringido en el lado robot remoto.

Para estos experimentos el robot local está ubicado en el CUCEI, mientras que el robot remoto está en el CINESTAV. Como antes, las condiciones iniciales son $\dot{q}_i = \mathbf{0} [^\circ/s]$ y $q_i = [0, 90^\circ, 90^\circ]$ para $i = 1, r$. Debido a que el RTT es seis veces más grande, las diferentes ganancias del control-observador tuvieron que ser sintonizadas nuevamente. El primer objetivo es como antes, resolver el problema de movimiento libre, donde el operador primero mueve el efector final local (Caso b) de la

Sección 2.2), y luego lo suelta (Caso a) de la Sección 2.2). Tenga en cuenta que no hay forma de que una persona pueda repetir los mismos movimientos dos veces, por lo que la duración de los dos experimentos es un poco diferente, además el operador humano suelta el efector final en $t = 15$ [s] para el esquema modificado, mientras que en $t = 20$ [s] para el esquema original. Para una mayor comodidad, los resultados del esquema modificado se muestran en la columna de la izquierda y los del esquema original en la columna de la derecha.

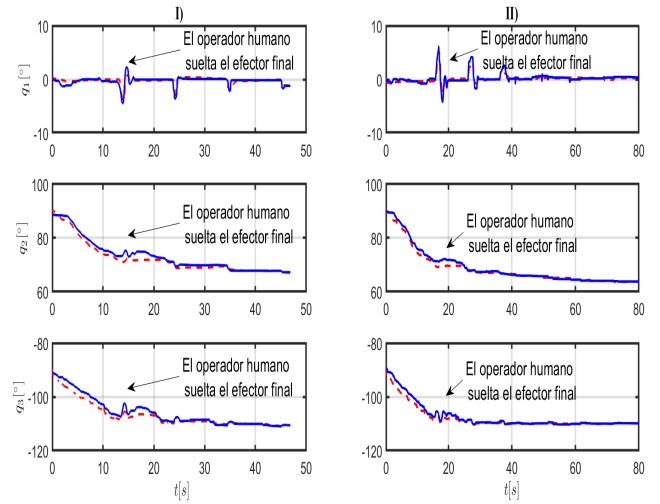


Figura 9: CINESTAV-CUCEI: Movimiento libre. I) Esquema modificado. II) Esquema Original. posición del lado remoto $q_r(t)$ (- - -) vs posición local retardada $q_l(t - T_1)$ (—)

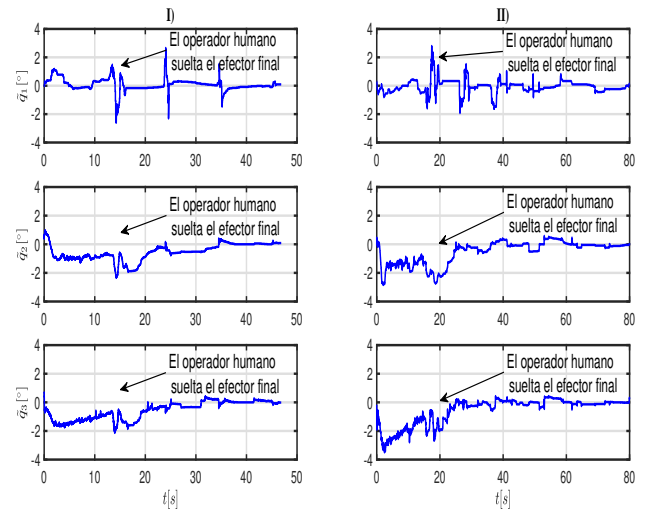


Figura 10: CINESTAV-CUCEI: Movimiento libre. I) Esquema modificado. II) Esquema Original. Error de posición del lado remoto $\Delta q_r(t)$.

Con esta ronda de retardo en el tiempo ($RTT = 120[ms]$), es natural que el seguimiento que se da por parte del manipulador remoto hacia el local muestre un error mas grande como se aprecia en la Figura 9 ($q_r(t)$ vs $q_l(t - T_1)$), sin embargo con una sintonización adecuada de las ganancias ambos esquemas logran tener un buen desempeño. Cabe recordar que el objetivo que se persigue es que el robot remoto siga la posición local

retardada hasta que el operador suelte el efector final local y se alcance el consenso. Los errores de seguimiento correspondientes se pueden ver en la Figura 10, los cuales nunca son más grandes que $\pm 4^\circ$ y además se puede observar que tienden a cero una vez que el efector final local se encuentra libre, a pesar de que no se está realizando una compensación de gravedad.

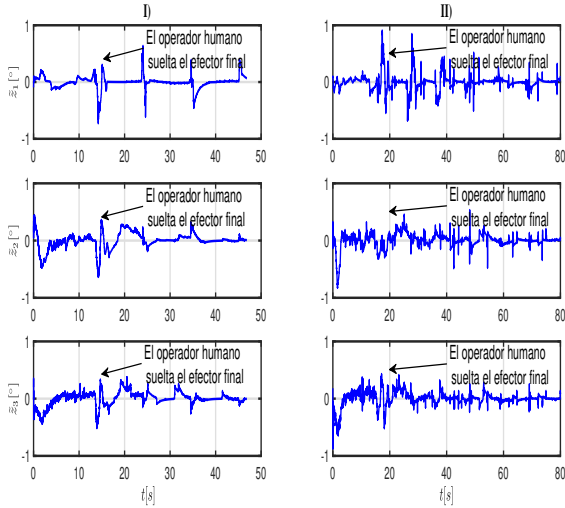


Figura 11: CINESTAV-CUCEI: Movimiento libre. I) Esquema modificado. II) Esquema Original. Error de observación del lado remoto z_r .

Nuevamente, vale la pena señalar que la modificación del controlador dada por (21)-(22), permite compensar las dinámicas no modeladas, permitiendo un mejor seguimiento en posición. El resultado anterior se logra gracias a una mejor estimación de las velocidades. Esto se puede verificar analizando los errores de observación del robot remoto mostrados en la Figura 11.

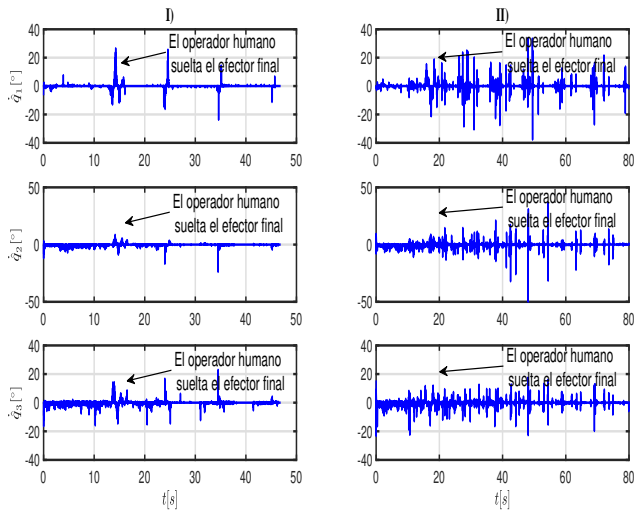


Figura 12: CINESTAV-CUCEI: Movimiento libre. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Velocidades estimadas del robot remoto \dot{q}_r .

Como puede observarse, los resultados para ambos casos son similares, lo que era de esperarse porque al final la estructura del observador es muy similar. Sin embargo, cuando se comparan las velocidades estimadas, la ventaja de la modificación

propuesta se vuelve más evidente porque hay mucho menos picos o sobre pasos (ver Figura 12). Como consecuencia directa, los pares de entrada correspondientes también son más suaves con el esquema modificado. La Figura 13 muestra los pares de entrada en el lado remoto, mientras que los resultados para el manipulador local describen un comportamiento similar.

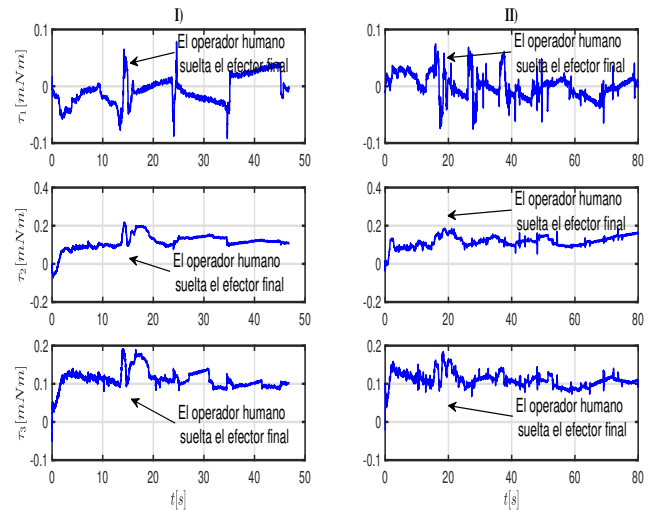


Figura 13: CINESTAV-CUCEI: Movimiento libre. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Pares de entrada del robot remoto τ_r .

4.4. CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido con los esquemas modificado y original

Para el segundo conjunto de experimentos, los dos esquemas fueron evaluados, como antes el operador humano lleva hacia abajo el efector final local hasta que el robot remoto entre en contacto con un objeto.

Se le recuerda al lector que el objetivo es que la posición local siga la posición remota (percibir o identificar la superficie), mientras que la fuerza aplicada sobre la superficie sea la que el operador humano está aplicando sobre el robot local. Para poder validar lo anterior, a ambos robots se les acopló en el efector final un sensor de fuerza *NANO 17* de la empresa *ATI Industrial Automation*. Como era de esperarse, en la Figura 14 se observa que la posición local del efector final sigue la posición retardada del manipulador remoto, esto puede llevar a la conclusión de que el operador humano está percibiendo la superficie remota, es decir se logra la telepresencia. En la Figura 15 se muestran los errores de seguimiento correspondientes. Pese a que los errores se observan ser grandes, hay muchas razones para este comportamiento. En primer lugar, como se menciona en Arteaga-Pérez et al. (2019), la estabilidad del lazo cerrado está garantizada, independientemente de lo grande que sean los retardos, pero esto es a costa de un peor desempeño. En segundo lugar, cuanto más pequeños se intenten hacer los errores, más difícil será para el operador humano mover el efector final local. En tercer lugar, la superficie remota elegida para los experimentos, tiene efectos de alta fricción que dificultan el movimiento del efector final remoto y, como consecuencia, genera una trayectoria deseada difícil de seguir para el controlador en el lado del robot local.

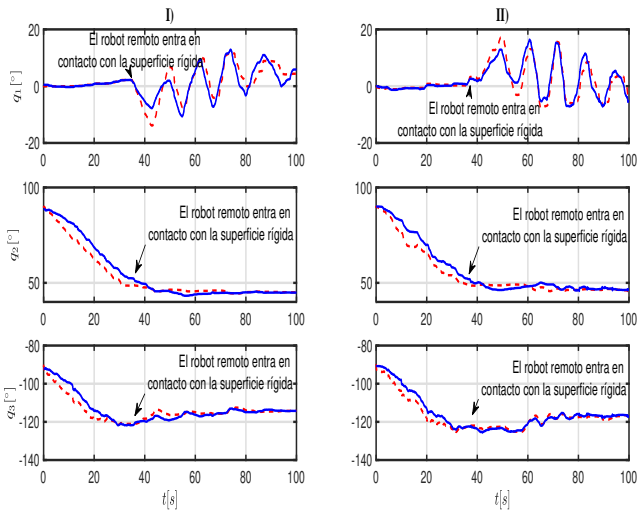


Figura 14: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Posición local $q_l(t)$ (—) vs posición retardada del robot remoto $q_r(t - T_r)$ (- - -)

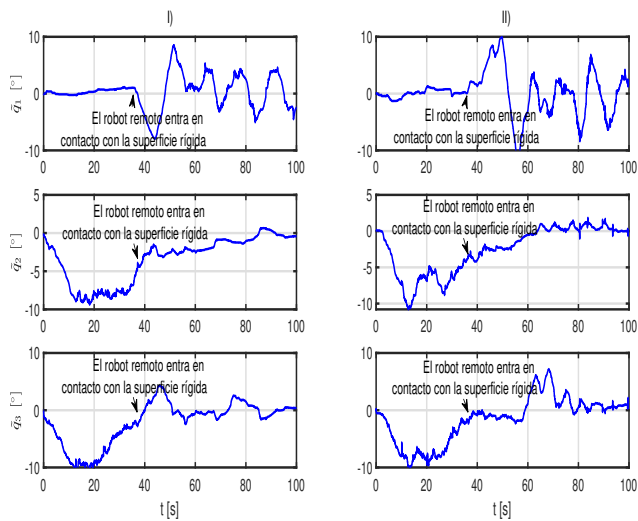


Figura 15: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Error de posición del robot local $\Delta q_l(t)$.

Para mejorar el desempeño en el seguimiento de posición, sería necesario tener más información sobre la superficie de contacto, pero esto disminuiría la aplicabilidad del enfoque. A pesar de que los errores son relativamente grandes, esto no significa necesariamente que el operador humano no esté siguiendo una reconstrucción de la superficie remota. El punto anterior es respaldado con la Figura 16 donde se pueden apreciar en coordenadas cartesianas las superficies real y recreada. Claramente, el efector final del robot local está describiendo un plano, lo que significa que el operador tiene la sensación de estar tocando una superficie muy similar a la superficie remota. Nuevamente, la razón de la magnitud de los errores proviene de un desfase entre las posiciones locales y remotas retardadas, a pesar de esto, los perfiles de posición y fuerza prácticamente tienen la misma forma y por lo tanto, la superficie remota es reconstruida correctamente. Si bien esto no es deseable, se ha

logrado al menos el objetivo principal de proporcionar una reconstrucción precisa.

Debido a que la componente de la fuerza principal está en el eje normal a la superficie de contacto (*i.e.* z), se espera que el seguimiento sea más pobre en las direcciones donde la fricción está presente x y y . Se debe tomar en cuenta que la fuerza aplicada en el lado local es tomada como una referencia deseada para el manipulador remoto. Una vez en contacto con la superficie, ambos sensores brindan mediciones.

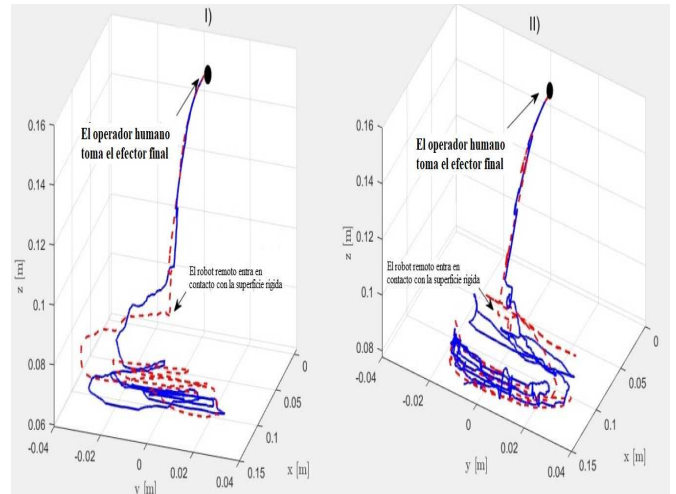


Figura 16: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. posiciones cartesianas, I) Esquema modificado. II) Esquema original. Posición del robot local, ambiente recreado $Pos_{s1}(t)$ (—) vs posición del robot remoto, ambiente real $Pos_r(t - T_r)$ (- - -).

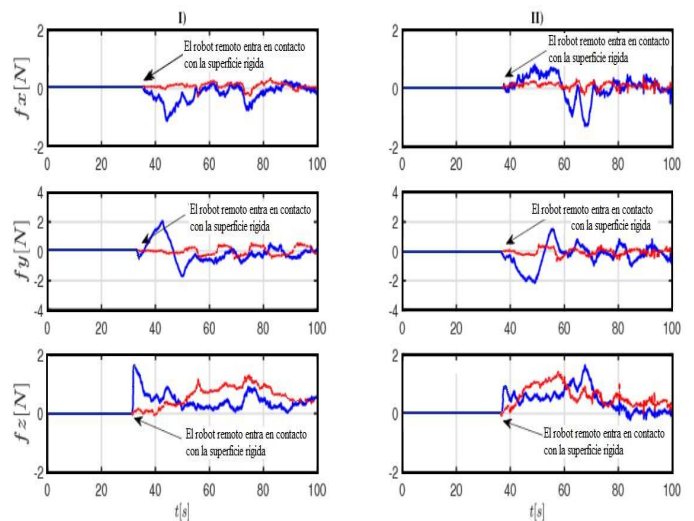


Figura 17: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Fuerza en lado remoto $F_e(t)$ (- - -) vs fuerza local retardada $F_h(t - T_l)$ (—), a) F_x , b) F_y , c) F_z .

Como se puede apreciar en la Figura 17, los resultados son similares para ambos esquemas. Como se señaló anteriormente, no hay forma de que un operador humano pueda recrear el mismo perfil de fuerza deseado dos veces; sin embargo, se trató en lo posible de tener repetibilidad en los experimentos. Esto debe tenerse en cuenta para la comparación en los desempeños. Nuevamente se le recuerda al lector que los algoritmos de control

garantizan un error igual a cero sólo si las fuerzas de contacto son constantes, por lo que era de esperarse que el seguimiento en fuerza no fuese exacto desde el principio del experimento. La Figura 18 muestra los errores de observación local. Como se puede apreciar, los resultados obtenidos son muy similares para ambos esquemas. Sin embargo, en la Figura 19 se puede ver que el esquema modificado proporciona una estimación de velocidades con picos o sobrepasos más pequeños, lo que a su vez permite tener señales de control más suaves, como se muestra en la Figura 20.

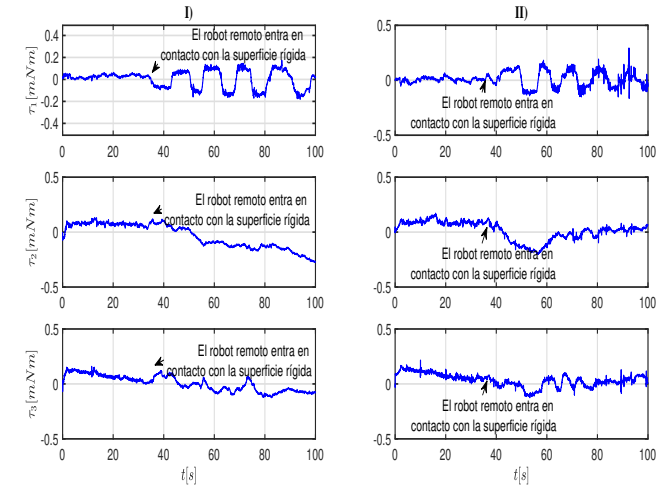


Figura 18: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Error de observación en el lado local z_1 .

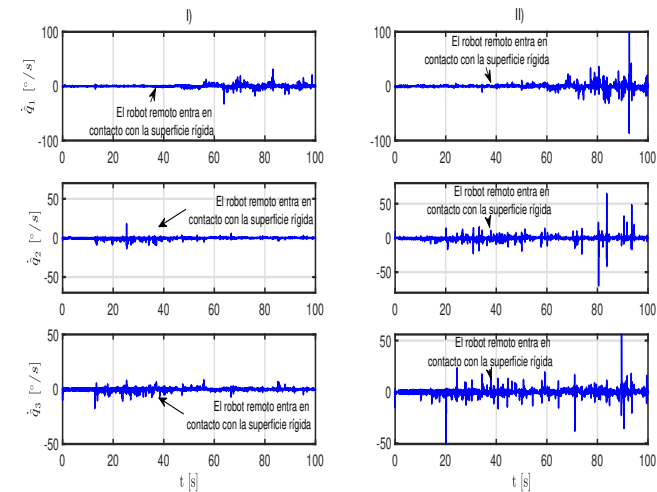


Figura 19: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Velocidades estimadas en el lado local \dot{q}_1 .

Con el fin de obtener una comparación más objetiva, se han obtenido los valores *RMSE* correspondientes. En la Tabla 4 se puede apreciar que todos los errores son menores para el esquema modificado, lo que justifica las modificaciones propuestas al algoritmo original. Recuerde que el objetivo es un $\Delta q_r(t)$ más pequeño para movimiento libre y un $\Delta q_l(t)$ más pequeño en movimiento restringido.

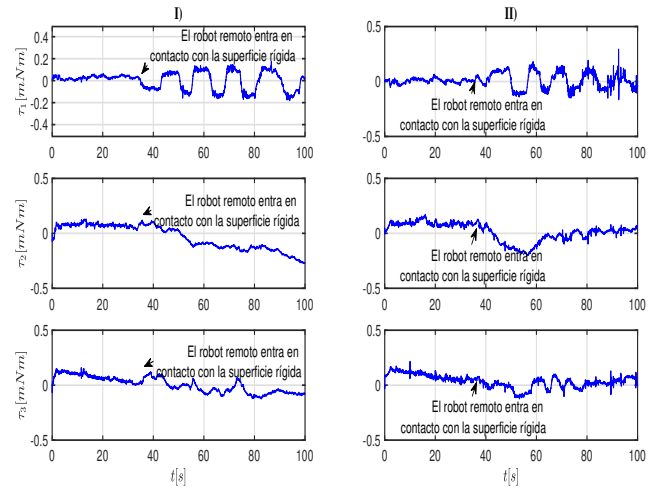


Figura 20: CINESTAV-CUCEI: Movimiento restringido. I) Esquema modificado. II) Esquema original. Par de entrada en el lado remoto τ_r .

En comparación con los resultados de la Tabla 1, se puede concluir que los resultados son mejores para movimiento libre, lo que no es necesariamente sorprendente porque esta situación es menos exigente y, como se mencionó anteriormente, se garantiza la estabilidad de lazo cerrado para cualquier retardo. Por otro lado, los errores de fuerza se muestran en la Tabla 5, donde por el contrario se busca un $\Delta F_r(t)$ (i. e. $\Delta F_e(t)$) pequeño.

Tabla 4: CINESTAV-CUCEI. RMSE de los errores de posición Δq_{ri} y Δq_{li} para $i = 1, 2, 3$. Esquema modificado v_s esquema original.

RMSE [°] Esquema modificado	i = 1	i = 2	i = 3
Movimiento libre $\Delta q_{ri}(t)$	0.464	0.821	0.80
Movimiento libre $\Delta q_{li}(t)$	0.755	3.17	2.92
RMSE [°] Esquema original	i = 1	i = 2	i = 3
Movimiento libre $\Delta q_{ri}(t)$	0.462	0.899	0.997
Movimiento libre $\Delta q_{li}(t)$	0.776	3.534	3.66
RMSE [°] Esquema modificado	i = 1	i = 2	i = 3
Movimiento restringido $\Delta q_{ri}(t)$	3.26	2.40	2.97
Movimiento restringido $\Delta q_{li}(t)$	2.54	3.41	3.18
RMSE [°] Esquema original	i = 1	i = 2	i = 3
Movimiento restringido $\Delta q_{ri}(t)$	3.41	2.76	3.29
Movimiento restringido $\Delta q_{li}(t)$	3.45	3.75	3.94

Con base en estos datos, el esquema modificado muestra un mejor desempeño que el esquema original. Es importante hacer notar que los errores de fuerza son más pequeños que los errores obtenidos con el esquema Arteaga-Pérez et al. (2019), en ambos esquemas el seguimiento no es tan preciso como sería deseable (consulte la Figura 17). Comparando los resultados con la Tabla 2, está claro una vez más que con retardos de tiempo más grandes, no se afecta la estabilidad del lazo cerrado, pero el desempeño se ve afectado. Finalmente, en la Tabla 6 se muestran todos los errores de observación. Se puede concluir que el desempeño en ambos trabajos, tanto para movimiento libre como restringido es similar, y en realidad muy parecidos a los resultados de la Tabla 3.

Tabla 5: CINVESTAV–CUCEI. RMSE de $\Delta F_r(t)$ y $\Delta F_l(t)$. Esquema modificado v_s , esquema original.

RMSE [N] Esquema modificado	x	y	z
Movimiento restringido $\Delta F_r(t)$	0.306	0.626	1.04
Movimiento restringido $\Delta F_l(t)$	0.282	0.597	1.01
RMSE [N] Esquema original	x	y	z
Movimiento restringido $\Delta F_r(t)$	0.446	0.691	1.09
Movimiento restringido $\Delta F_l(t)$	0.417	0.636	1.05

Tabla 6: CINVESTAV–CUCEI. RMSE of z_{ri} y z_{li} para $i = 1, 2, 3$. Esquema propuesto v_s , esquema original.

RMSE [°] Esquema modificado	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Movimiento libre z_{ri}	0.103	0.074	0.0488
Movimiento libre z_{li}	0.096	0.107	0.045
RMSE [°] Esquema original	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Movimiento libre z_{ri}	0.070	0.062	0.050
Movimiento libre z_{li}	0.128	0.117	0.117
RMSE [°] Esquema modificado	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Movimiento restringido z_{ri}	0.100	0.045	0.052
Movimiento restringido z_{li}	0.435	0.175	0.189
RMSE [°] Esquema original	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Movimiento restringido z_{ri}	0.112	0.055	0.063
Movimiento restringido z_{li}	0.425	0.230	0.194

5. Conclusiones

Este trabajo está enfocado en mostrar los resultados experimentales de dos algoritmos para sistemas de teleoperación bilateral con retardos variantes en el tiempo en el canal de comunicación. La estructura del algoritmo propuesto en este trabajo es una modificación del esquema de control–observador reportado previamente en la literatura Arteaga-Pérez et al. (2019). Se demuestra con base en pruebas experimentales, que tanto el esquema original como el esquema propuesto, logran que ambos manipuladores alcancen el consenso en movimiento libre, mientras que para el caso de movimiento restringido, el humano logra percibir o tener la sensación de tocar la superficie remota (sin tener ninguna información previa), al mismo tiempo que el robot remoto aplica la fuerza comandada por el operador humano en el lado del robot local. Con el fin de mostrar la estabilidad del sistema completo y la telepresencia alcanzada, se realizó una comparación experimental exhaustiva en un escenario realista del esquema citado previamente y el esquema presentado en este trabajo. Un conjunto de experimentos más desafiante fue llevado a cabo para dar mayor soporte a este trabajo, primero se realizó la experimentación entre dos universidades de la Ciudad de México y luego, para validar la robustez del algoritmo en presencia de retardos más grandes, experimentos con una mayor distancia fueron llevados a cabo en colaboración de una universidad de la ciudad de Guadalajara.

Los resultados de las diferentes pruebas muestran que tanto el esquema original como el modificado funcionan como se esperaba, sin embargo, el último logra errores de seguimiento más pequeños, velocidades estimadas más limpias de ruido, y por lo tanto señales de control más suaves, lo anterior es respaldado por el análisis de los índices de desempeño para movimiento libre y restringido de ambos esquemas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por la **DGAPA–UNAM** bajo la donación **IN117820**. Finalmente el último autor agradece a **CONACyT** por la donación **CB-282807**.

Referencias

- Anderson, R. J., Spong, M. W., May 1989. Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (5), 494–501.
- Arteaga-Pérez, M. A., López, M., Nuño, E., Hernández-Ortiz, O., 2019. On the delayed kinematic correspondence with variable time delays for the control of the bilateral teleoperation of robots. doi:10.1080/00207179.2019.1707287. *International Journal of Control*.
- Arteaga-Pérez, M. A., López-Recillas, L., López, M., Nuño, E., July 2017. Observer design for bilateral teleoperation systems with variable time delays. In: *Proceedings of the 20th World Congress. The International Federation of Automatic Control*. Toulouse, France, pp. 14933–14938.
- Dyck, M., Jazayeri, A., Tavakoli, M., April 2013. Is the human operator in a teleoperation system passive? In: *Proceedings of IEEE World Haptics Conference 2013*. Daejeon, Korea, pp. 683–688.
- García-Valdovinos, L. G., Parra-Vega, V., Arteaga-Pérez, M. A., July 2005a. Higher-order sliding mode impedance bilateral teleoperation with robust state estimation under constant unknown time delay. In: *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics*. Monterey, California, USA, pp. 1293–1298.
- García-Valdovinos, L. G., Parra-Vega, V., Mendez-Iglesias, J. A., Arteaga-Pérez, M. A., November 2005b. Cartesian sliding pid force/position control for transparent bilateral teleoperation. In: *Proceedings of the 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society IECON2005*. Raleigh, North Carolina, USA, pp. 1979–1985.
- Hua, C., Liu, P. X., 2010. Delay-dependent stability criteria of tele-operation systems with unsymmetrical time-varying delays. *IEEE Transactions on Robotics* 26 (5), 925–932.
- Islam, S., Liu, P. X., Saddik, A. E., August 2013. Teleoperation systems over wide-area communication networks delay. Chongqing, China, pp. 12–17.
- Lawrence, D. A., 1993. Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9 (5), 624–637.
- Levant, A., 1993. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International Journal of Control* 58, 1247–1263.
- Namvar, M., 2009. A class of globally convergent velocity observer for robotic manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control* 54 (8), 1956–1961.
- Nuño, E., 2016. Consensus of Euler–Lagrange systems using only position measurements. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* DOI: 10.1109/TCNS.2016.2620806.
- Nuño, E., Arteaga-Pérez, M., Espinosa-Pérez, G., 2018. Control of bilateral teleoperators with time delays using only position measurements (doi: 10.1002/rnc.3903). *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 28, 808–824.
- Nuño, E., Basañez, L., Ortega, R., Spong, M. W., 2009. Position tracking for non-linear teleoperators with variable time delay. *International Journal of Robotics Research* 28 (7), 895–910.
- Nuño, E., Basañez, L., Ortega, R., 2011. Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial. *Automatica* 47 (3), 485–495.
- Passenberg, C., Peer, A., Buss, M., 2010. A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems. *Mechatronics* 20, 787–801.
- Polushin, I. G., Liu, P. X., Lung, C. H., 2007. A force-reflection algorithm for improved transparency in bilateral teleoperation with communication delay. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 12, 361–374.
- Sarras, I., Nuño, E., Basañez, L., Kinnaert, M., 2016. Position tracking in delayed bilateral teleoperators without velocity measurements. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 26 (7), 1437–1455.
- Sheridan, T., 1993. Space teleoperation through time delay. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9 (5), 592–606.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G., 2010. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer–Verlag, London, Great Britain.
- Sonoura, T., Matsuo, Y., Inaba, T., August 2002. Passivity analysis of a human operator in a human-machine control system considering maneuverability. In: *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. SICE 2002*. Osaka, Japan, pp. 2715–2720.
- Yokokohji, Y., Yoshikawa, T., 1994. Bilateral control of master–slave manipulators for ideal kinesthetic coupling: Formulation and experiments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 10 (5), 605–620.