

Analysis and Experimentation of a Mobile Robot Teleoperation System Over Internet

F. Penizzotto, E. Slawiński and V. Mut

Abstract— En este trabajo, se propone un análisis de estabilidad y experimentación entre diferentes países de un esquema de control para teleoperación bilateral de robots móviles, el cual considera una impedancia remota con elasticidad variante en el tiempo. En la demostración de estabilidad se consideran los retardos de tiempo variantes del canal, y la impedancia. Se ejecutó satisfactoriamente una teleoperación de un robot Pioneer 3AT entre la Universidad Nacional de San Juan (Argentina) y la Universidad de Verona (Italia), del cual se exponen gráficas y conclusiones.

Keywords— Teleoperación de robots, realimentación de fuerza, factores humanos, estabilidad.

I. INTRODUCCIÓN

LA TELEOPERACIÓN de robots permite ejecutar distintas tareas en entornos remotos, incluyendo trabajos peligrosos para el ser humano [18]. Por ello, se han desarrollado muchos esquemas y estrategias de control para teleoperar robots móviles, en diferentes tareas como supervisión de zonas inaccesibles, transporte de materiales peligrosos, inspección de líneas de alta tensión, control de incendios y exploración de minas entre otras [3], [5], [11], [16], [17], [20], [24].

Es conocido que la presencia de retardos de tiempo pueden desestabilizar el sistema [7], [15], [19], y también empeorar la transparencia [12]. Existen números trabajos sobre teleoperación bilateral, incluso artículos muy recientes tales como [2] y [26] pero pocos de ellos analizan la inclusión en el lazo de control de métricas referidas al operador. [10] propone un método para evasión de obstáculos basado en impedancia de fuerza, donde la distancia relativa robot-obstáculo se considera como una fuerza virtual. Una propuesta similar basada en este tipo de impedancia fue utilizada en [23], donde además se agrega una fusión de comandos en el sitio remoto y realimentación de fuerza al dispositivo maestro para ayudar al operador (la impedancia fija fue utilizada muchos años atrás por [6]). [9] considera la utilización de reflexión de fuerza basada en la impedancia remota, la cual es proporcional a las fuerzas ficticias y [25] propone un análisis centrado en el humano y en su interacción con el sistema luego de proponer tres opciones de leyes de ayuda táctil en el dispositivo maestro para teleoperación de múltiples robots. Además, [1] presenta una estrategia basada en fuerzas ficticias para evadir obstáculos y luego realimentarlas al joystick. [4] presenta una

estrategia donde la ganancia de la reflexión de fuerza es variante en función de la distancia relativa robot-obstáculo y su derivada. En estos trabajos citados, la retroalimentación o impedancia no varían en función de ningún factor humano, sino que solo dependen de la interacción robot-entorno. Adicionalmente, en [14] presentamos una estrategia para variar en línea la ganancia de la impedancia remota, pero el sistema no considera retardos de tiempo, y solo se realizaron simulaciones.

En este trabajo se propone un esquema de control para teleoperación con retardo de robots móviles, incluyendo información sobre el desempeño del comando y se analiza la estabilidad de dicho sistema basado en la teoría de Lyapunov. El esquema utiliza una impedancia remota basada en fuerzas ficticias, y la elasticidad de esta impedancia crece cuando el comando incrementa el riesgo actual en el sitio remoto [14]. Para probar el sistema en una situación real, se realizó una teleoperación entre Argentina e Italia, de un robot Pioneer 3AT, donde el sitio local se ubico en la Universidad de Verona, y el sitio remoto en el Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan.

Primero se presentan los preliminares y el modelo del sistema junto con la estrategia de control propuesta. Posteriormente, en la sección IV se expone un análisis de estabilidad del sistema completo. Luego, en la sección V se muestran los datos de la experimentación mencionada. Finalmente, se exponen las conclusiones.

II. PREELIMINARES

En este trabajo se propone y analiza un sistema de teleoperación, donde el operador humano guía un robot móvil (esclavo) a través de un entorno desconocido, de manera remota y utilizando un dispositivo maestro. El esquema se muestra en la Fig. 1. Adicionalmente, el sistema incluye una realimentación de fuerza en el joystick y para el sitio remoto, una impedancia remota variable basada en fuerzas ficticias y en una métrica novedosa respecto del desempeño del comando del usuario.

El modelo típicamente utilizado para el master es:

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

donde $\mathbf{q}_m(t) \in \mathcal{R}^{n_x}$ es la posición articular; $\dot{\mathbf{q}}_m(t) \in \mathcal{R}^{n_x}$ es la velocidad de las articulaciones; $\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m) \in \mathcal{R}^{n_x \times n_x}$ es la matriz de inercia; $\mathbf{C}(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m) \in \mathcal{R}^{n_x \times n_x}$ es la matriz de torques centrípetas y de Coriolis; $\mathbf{g}(\mathbf{q}_m) \in \mathcal{R}^{n_x}$ es el torque gravitacional; $\mathbf{f}_h \in \mathcal{R}^{n_x}$ es el torque causado por la acción del humano sobre el

F. Penizzotto, Instituto de Automática (INAUT), Universidad Nacional de San Juan y CONICET, San Juan - Argentina, fpenizzotto@inaut.unsj.edu.ar

E. Slawiński, Instituto de Automática (INAUT), Universidad Nacional de San Juan y CONICET, San Juan - Argentina, slawinski@inaut.unsj.edu.ar

V. Mut, Instituto de Automática (INAUT), Universidad Nacional de San Juan y CONICET, San Juan - Argentina, vmutg@inaut.unsj.edu.ar

extremo operativo, y $\tau_m \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ es el torque de control aplicado

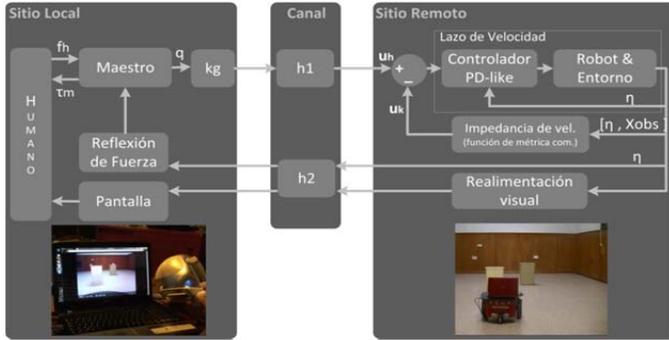


Figura 1. Esquema de teleoperación bilateral. Control aplicado al robot móvil y realimentación de fuerza.

al dispositivo (detallado en III-B). En este trabajo, $n = 2$.

El operador humano se comporta de una manera no-pasiva, representada por la siguiente ecuación,

$$\mathbf{f}_h = -k_h \mathbf{q}_m - \alpha_h \dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{f}_a \quad (2)$$

donde k_h y α_h son parámetros intrínsecos y positivos del operador, y \mathbf{f}_a es el componente activo de \mathbf{f}_h . Se asume que $\mathbf{f}_a \in L_2$.

En el sitio remoto, se considera la ecuación dinámica del robot móvil tipo unicyclo, representado por

$$\mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{f}_e \quad (3)$$

donde $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2]^T$ es el vector de velocidades del robot, con η_1 y η_2 como velocidad lineal y angular del robot, y

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & i_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & -ma\eta_2 \\ ma\eta_2 & 0 \end{bmatrix}$$

donde m es la masa del robot, i_n es la inercia rotacional, y a es la distancia entre el centro de masa y geométrico. Además, $\boldsymbol{\tau}_s = [u_1 \ u_2]$ es el torque de control (ver sección III-A). \mathbf{f}_e es la fuerza causada por la interacción robot-obstáculos. En nuestro caso, como el robot debe evadir obstáculos, \mathbf{f}_e se forma por fuerzas ficticias (lineal y normal)

$$\mathbf{f}_e = [\mathbf{f}_t \ \mathbf{f}_y]^T \quad (4)$$

generadas por la proximidad del robot a los obstáculos.

Además, el canal de comunicación agrega retardos de tiempo variantes y asimétricos, de ida y vuelta (h_1 y h_2).

Las siguientes propiedades, suposiciones y lemas serán utilizados en este trabajo:

Propiedad 1: La matriz de inercia $\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m)$ y \mathbf{D} son simétricas definidas positivas.

Propiedad 2: La matriz $\dot{\mathbf{M}}_m(\mathbf{q}_m) - 2\mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)$ es anti-simétrica.

Propiedad 3: Existe $k_c > 0$ tal que $\mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)\dot{\mathbf{q}}_m \leq k_c |\dot{\mathbf{q}}_m|$

Suposición 1: Los retardos de tiempo $h_1(t)$ y $h_2(t)$ son

acotados. Por lo tanto, existen escalares positivos \bar{h}_1 y \bar{h}_2 tal que $0 \leq h_1(t) \leq \bar{h}_1$ y $0 \leq h_2(t) \leq \bar{h}_2$ para todo t .

Suposición 2: La fuerza de interacción del robot con el entorno, y la parte no pasiva del operador son acotados, esto es $|\mathbf{f}_e| \leq \bar{f}_e$ y $|\mathbf{f}_a| \leq \bar{f}_a$ donde \bar{f}_e y \bar{f}_a son valores positivos.

Lema 1 [8]: Para funciones vectoriales reales $\mathbf{a}(\cdot)$ y $\mathbf{b}(\cdot)$ y un escalar variante en el tiempo $h(t)$ con $0 \leq h(t) \leq \bar{h}$, se cumplen las siguientes inecuaciones:

$$\begin{aligned} -2\mathbf{a}^T(t) \int_{t-h(t)}^t \mathbf{b}(\xi) d\xi - \int_{t-h(t)}^t \mathbf{b}^T(\xi) \mathbf{X} \mathbf{b}(\xi) d\xi \\ \leq h(t) \mathbf{a}^T(t) \mathbf{X}^{-1} \mathbf{a}(t) \leq \bar{h} \mathbf{a}^T(t) \mathbf{X}^{-1} \mathbf{a}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

donde $\mathbf{X} > \mathbf{0}$ es una matriz definida positiva.

III. CONTROLADOR

A. Sitio Remoto

[22] presenta una estrategia de control para teleoperación de manipuladores, basada en estructuras PD-like. La misma permite asegurar que con inyección de ganancias de damping lo suficientemente grandes, el sistema es estable aún en presencia de retardo de tiempo. En este trabajo se propone la extensión de esta estrategia a robots móviles, siendo el torque aplicado al robot:

$$\boldsymbol{\tau}_s = k_s ((k_g \mathbf{q}_m(t-h_1) - \mathbf{u}_k) - \boldsymbol{\eta}) - \alpha_s \mathbf{z} + \mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta} \quad (6)$$

siendo

$$\mathbf{u}_k = \text{sgn}(\mathbf{q}_m(t-h_1)) u_m (1 - e^{-(\varepsilon + \mathbf{C}_{Met}) k_f \mathbf{f}_t}) \quad (7)$$

donde $\mathbf{u}_k \in \mathfrak{R}^{n \times 1} < k_g q_m$ es la impedancia de velocidad.

Además, k_g es una ganancia para mapear la posición del master en velocidad de referencia. k_s es una ganancia proporcional para disminuir el error de sincronización y α_s es la ganancia de damping (fricción viscosa), ambas positivas. Siguiendo, u_m es el valor máximo para u_k (ajustado por el diseñador), $\mathbf{C}_{Met} \in \mathfrak{R}^{1 \times 1}$ es la variable que cuantifica el desempeño del comando respecto del riesgo y se incrementa cuando el comando va a incrementar las probabilidades de colisión. $k_f \in \mathfrak{R}^{1 \times 1}$ es un parámetro de ajuste (luego de ser ajustada f_f , u_k debe variar desde un valor mínimo hasta u_m a medida que \mathbf{C}_{Met} va de 0 a 1). Además, $\mathbf{f}_t = [f_t \ f_y]$ son las fuerzas ficticias lineal y normal y ε es un parámetro de ajuste para fijar la elasticidad mínima de la impedancia.

Finalmente, \mathbf{z} representa la aceleración filtrada del robot, y verifica que

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{z} + \gamma \dot{\mathbf{z}}, \text{ con } \gamma > 0 \quad (8)$$

En [14] se explica el funcionamiento de la impedancia de velocidad utilizada en el controlador remoto, con el fin de evadir obstáculos, el cómputo de las fuerzas ficticias debido a la proximidad robot-obstáculo y el cómputo de la métrica \mathbf{C}_{Met} que estima cuan malo es el comando respecto de la evasión de obstáculos y que se utiliza para variar la elasticidad de la impedancia de velocidad.

B. Sitio Local

La ecuación (9) propone una ley de realimentación de fuerza donde se considera el error de sincronismo (referencia de velocidad y velocidad del robot), un damping dependiente del movimiento del joystick y una compensación para gravedad.

$$\boldsymbol{\tau}_m = -k_m (k_g \mathbf{q}_m(t) - \boldsymbol{\eta}(t - h_2)) - \alpha_m \dot{\mathbf{q}}_m(t) + \mathbf{g}(t) \quad (9)$$

donde $\boldsymbol{\tau}_m$ es el torque aplicado al maestro, α_m es el damping, y k_m es una ganancia para el error de sincronismo.

IV. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Generalmente en los sistemas de teleoperación, los errores de control que deben tender a cero son: 1) el error de seguimiento maestro-esclavo, comúnmente llamado *error de sincronismo*, 2) la velocidad del master ($\dot{\mathbf{q}}_m$ debería tender a 0) y 3) la aceleración del master ($\ddot{\mathbf{q}}_m$ debería tender a 0).

Luego, se propone el siguiente funcional definido positivo:

$$V_i = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 > 0 \quad (10)$$

Es importante destacar que no existe un punto de equilibrio pero si una solución de Krasovskii que depende de los estados

$$\mathbf{x} := \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_m & (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) & \mathbf{z} & \mathbf{q}_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

en el intervalo de tiempo $[(t - h_1 - h_2), t]$ ([13], [21]).

Nota 1: Para facilitar la lectura, las variables de estado se resaltan en negrita. Además, no se escribe de forma explícita la dependencia de (t) para las variables que dependen del tiempo actual, pero si se explicita esta dependencia para las variables retrasadas en el tiempo.

Nota 2: En el análisis de estabilidad, k_g, k_s, α_s, k_m y α_m son consideradas escalares por simplicidad, pero el análisis y resultados son válidos también para matrices diagonales.

El funcional se forma por 4 partes: V_1 y V_3 representan la energía potencial de movimiento del master y del robot

respectivamente, V_2 representa la energía potencial del error de sincronismo, V_4 representa la energía potencial del master, y V_5 se incluye por razones matemáticas para transformar términos con variables retrasadas en términos con variables no retrasadas (para llegar a tener todo el funcional en la misma línea de tiempo).

Los primeros 4 términos del funcional, son los siguientes:

$$V_1 = \frac{1}{2} \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m) \dot{\mathbf{q}}_m \quad (12)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) \quad (13)$$

$$V_3 = \frac{1}{2} \gamma \mathbf{z}^T \mathbf{z} \quad (14)$$

$$V_4 = \frac{1}{2} \frac{k_h k_g}{k_m} \mathbf{q}_m^T \mathbf{q}_m \quad (15)$$

La derivada temporal de V_1 considerando la dinámica del dispositivo maestro (ecuación (1)), y teniendo en cuenta las propiedades 1 y 2, es la siguiente,

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{1}{2} \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{M}}_m \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{q}}_m \\ &= \frac{1}{2} \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{M}}_m \dot{\mathbf{q}}_m \\ &\quad + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{M}_m \mathbf{M}_m^{-1} (\boldsymbol{\tau}_m + \mathbf{f}_h - \mathbf{C}_m \dot{\mathbf{q}}_m - \mathbf{g}_m) \\ &= \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T (\boldsymbol{\tau}_m + \mathbf{f}_h - \mathbf{g}_m) \end{aligned} \quad (16)$$

Luego, si se incluye las acciones de control $\boldsymbol{\tau}_m$ (9) en la ecuación (16), y considerando (2), se llega a

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T (\boldsymbol{\tau}_m - \mathbf{g}_m) + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_h \\ &= \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T (-k_m (k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}(t - h_2))) \\ &\quad - (\alpha_m + \alpha_h) \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_a - \frac{k_h k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{q}_m \\ &= k_g \dot{\mathbf{q}}_m^T (-(k_g \mathbf{q}_m - \boldsymbol{\eta}(t - h_2)) + \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}) \\ &\quad - (\alpha_m + \alpha_h) \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_a - \frac{k_h k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{q}_m \\ &= k_g \dot{\mathbf{q}}_m^T (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) - k_g \dot{\mathbf{q}}_m^T \int_{t-h_2}^t \dot{\boldsymbol{\eta}}(\xi) d\xi \end{aligned}$$

$$-(\alpha_m + \alpha_h) \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_a - \frac{k_h k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{q}_m \quad (17)$$

Luego, incluyendo la dinámica del esclavo (ecuación (3)) en la ecuación \dot{V}_2 se obtiene,

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T (\dot{\boldsymbol{\eta}} - k_g \dot{\mathbf{q}}_m) \\ &= (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \dot{\boldsymbol{\eta}} - k_g (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \dot{\mathbf{q}}_m \\ &= k_s (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \\ &\quad (k_g \mathbf{q}_m (t - h_1) - \mathbf{u}_k - \boldsymbol{\eta} + k_g \mathbf{q}_m - k_g \mathbf{q}_m) \\ &\quad - k_g (\boldsymbol{\eta} - \mathbf{q}_m k_g)^T \dot{\mathbf{q}}_m \\ &\quad + (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f}_e - \alpha_s (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} \\ &= -k_s (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) \\ &\quad - k_g (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \dot{\mathbf{q}}_m + (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f}_e \\ &\quad - k_s k_g (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\ &\quad - \alpha_s (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} - k_s (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{u}_k \quad (18) \end{aligned}$$

Además, \dot{V}_3 puede ser escrito incluyendo la ecuación (8) en la forma derivada de (14), y considerando la ecuación (3) y la (6), se llega a la siguiente expresión

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \boldsymbol{\gamma} \mathbf{z}^T \dot{\mathbf{z}} = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{z}^T \left(\frac{\dot{\boldsymbol{\eta}}}{\boldsymbol{\gamma}} - \frac{\mathbf{z}}{\boldsymbol{\gamma}} \right) = \mathbf{z}^T \dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{z}^T \mathbf{z} \\ &= -\alpha_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} + k_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} (k_g \mathbf{q}_m (t - h_1) - \mathbf{u}_k - \boldsymbol{\eta}) \\ &\quad + \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f}_e - \mathbf{z}^T \mathbf{z} \\ &= -\alpha_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} - k_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) \\ &\quad - k_s k_g \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\ &\quad + \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f}_e - \mathbf{z}^T \mathbf{z} - k_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{u}_k \quad (19) \end{aligned}$$

Luego, la derivada temporal de V_4 es calculada como

$$\dot{V}_4 = \frac{k_h k_g}{k_m} \mathbf{q}_m^T \dot{\mathbf{q}}_m \quad (20)$$

Es posible apreciar en las ecuaciones (17)-(19) que existen variables con retardo que dificultan el análisis, como por ejemplo el término $-k_s k_g \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi$ en (19).

Para resolver esto, V_5 se propone como:

$$\begin{aligned} V_5 &= \int_{-\bar{h}_2}^0 \int_{t+\theta}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{W} \mathbf{z}(\xi) d\xi d\theta \\ &\quad + \int_{-\bar{h}_1}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{q}}_m^T(\xi) (\mathbf{X} + \mathbf{Y}) \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi d\theta \quad (21) \end{aligned}$$

donde $\mathbf{W}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}$ son matrices definidas positivas.

De la ecuación (21), y considerando la suposición 1, \dot{V}_5 puede ser escrita como

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 &\leq \bar{h}_2 \mathbf{z}^T \mathbf{W} \mathbf{z} - \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{W} \mathbf{z}(\xi) d\xi \\ &\quad + \bar{h}_1 \dot{\mathbf{q}}_m^T (\mathbf{X} + \mathbf{Y}) \dot{\mathbf{q}}_m \\ &\quad - \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m^T(\xi) (\mathbf{X} + \mathbf{Y}) \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \end{aligned}$$

Por otro lado, se tiene que cada término de $\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3$ que incluya variables retrasadas puede ser unido utilizando el Lema 1 (5) con alguno de los términos de \dot{V}_5 . Luego, las ecuaciones (22)-(24) utilizarán esta propiedad.

Aplicando la propiedad distributiva al último término de (22) y posteriormente, el primer sub-término de este resultado es unido al cuarto término de la (18).

$$\begin{aligned} & - \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m^T(\xi) \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi - k_s k_g (\boldsymbol{\eta} - \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\ & \leq \frac{1}{4} \bar{h}_1 k_g^2 k_s^2 (\boldsymbol{\eta} - \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{D}^{-1} (\boldsymbol{\eta} - \mathbf{q}_m) \quad (22) \end{aligned}$$

Nuevamente, aplicando distributiva al último término de (22) y luego, el segundo sub-término de este resultado es unido con el tercer término de (19)

$$\begin{aligned} & - \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m^T(\xi) \mathbf{Y} \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi - k_s k_g \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \int_{t-h_1}^t \dot{\mathbf{q}}_m(\xi) d\xi \\ & \leq \frac{1}{4} \bar{h}_1 k_g^2 k_s^2 \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} \quad (23) \end{aligned}$$

Ahora, uniendo el segundo término de (22) con el segundo término de (17),

$$\begin{aligned} & - \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{W} \mathbf{z}(\xi) d\xi - k_g \dot{\mathbf{q}}_m^T \int_{t-h_2}^t \dot{\boldsymbol{\eta}}(\xi) d\xi \\ & = - \int_{t-h_2}^t \mathbf{z}^T(\xi) \mathbf{W} \mathbf{z}(\xi) d\xi - k_g \dot{\mathbf{q}}_m^T \int_{t-h_2}^t (\mathbf{z}(\xi) + \boldsymbol{\gamma} \dot{\mathbf{z}}(\xi)) d\xi \end{aligned}$$

$$\leq \frac{1}{4} \bar{h}_2 k_g^2 \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{W}^{-1} \dot{\mathbf{q}}_m + \gamma k_g h_2 \sigma |\dot{\mathbf{q}}_m| \quad (24)$$

En (24), se asume que $\dot{\mathbf{z}}$ es acotada por $|\dot{\mathbf{z}}| \leq \sigma$, donde σ es un valor finito. Esta suposición es razonable porque \mathbf{z} representa $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ (señal continua) filtrada por un filtro pasa-bajo de primer orden.

Luego, uniendo el penúltimo término de (18) y el segundo término de (19), la siguiente desigualdad puede deducirse

$$\begin{aligned} & -(\alpha_s + k_s)(\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} \\ & \leq \frac{1}{4} (\alpha_s + k_s)^2 (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \boldsymbol{\beta} (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) \\ & \quad + \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \boldsymbol{\beta}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{z} \end{aligned} \quad (25)$$

con $\boldsymbol{\beta}$ siendo una matriz definida positiva.

Finalmente, \dot{V} puede ser escrito (considerando las ecuaciones (17)-(25) e introduciendo la expresión de u_k) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 + \dot{V}_4 + \dot{V}_5 \\ &\leq \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{B}_1 \dot{\mathbf{q}}_m + (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{B}_2 (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m) \\ &\quad + \mathbf{z}^T \mathbf{B}_3 \mathbf{z} + \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f}_e + (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{f}_e \\ &\quad + \frac{k_g}{k_m} \dot{\mathbf{q}}_m^T \mathbf{f}_a + \psi |\dot{\mathbf{q}}_m| - k_s (\boldsymbol{\eta} - k_g \mathbf{q}_m)^T \mathbf{D}^{-1} \\ &\quad \left(\text{sgn}(\mathbf{q}_m(t-h_1)) u_m (1 - e^{-(\varepsilon + C_{Met}) k_f f_r}) \right) \\ &\quad - k_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}^{-1} \left(\text{sgn}(\mathbf{q}_m(t-h_1)) u_m (1 - e^{-(\varepsilon + C_{Met}) k_f f_r}) \right) \end{aligned} \quad (26)$$

siendo

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 &= -\frac{(\alpha_m + \alpha_h) k_g}{k_m} \mathbf{I} + \frac{1}{4} k_g^2 \bar{h}_2 \mathbf{W}^{-1} + \bar{h}_1 (\mathbf{X} + \mathbf{Y}) \\ \mathbf{B}_2 &= -k_s \mathbf{D}^{-1} + \frac{1}{4} (\alpha_s + k_s)^2 \boldsymbol{\beta} + \frac{1}{4} \bar{h}_1 k_g^2 k_s^2 \mathbf{D}^{-1} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \\ \mathbf{B}_3 &= -\alpha_s \mathbf{D}^{-1} - \mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1} \boldsymbol{\beta}^{-1} \mathbf{D}^{-1} + \bar{h}_2 \mathbf{W} \\ &\quad + \frac{1}{4} \bar{h}_1 k_g^2 k_s^2 \mathbf{D}^{-1} \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \end{aligned}$$

con \mathbf{I} la matriz de identidad y $\psi = \gamma k_g h_2 \sigma$.

Puede notarse en la ecuación 26 que existen términos con los estados al cuadrado, los cuales se pueden hacer negativos si $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3 < 0$. Esto se logra a través del ajuste de los parámetros de control $\alpha_m, k_m, k_s, \alpha_s$. Como resultado de esto, el estado del sistema tenderá a una zona de convergencia

acotada que depende del mínimo autovalor de $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3$ y del nivel de las perturbaciones (términos lineales de ecuación (26)). En este caso, el funcional sobre las trayectorias del sistema es acotado para todo t , y por lo tanto el vector de estados (ecuación (11)) $\mathbf{x} \in \mathcal{L}_{\text{inf}}$.

Finalmente, si $\mathbf{u}_k = \mathbf{0}$, $\mathbf{f}_e = \mathbf{0}$, $\mathbf{f}_a = \mathbf{0}$ y $\psi = 0$, entonces $\dot{V} \rightarrow 0$ con $t \rightarrow \infty$ y por lo tanto \mathbf{x} tenderá a cero.

V. EXPERIMENTACIÓN

El experimento consiste en manejar un robot Pioneer (de ActiveMedia), a través de internet, situándose el sitio remoto en la Universidad Nacional de San Juan (Argentina) y el local en la Universidad of Verona (Italia). Como joystick se utilizó un dispositivo comercial con realimentación de fuerza (<http://home.novint.com/index.php/products>) de 3DOF (se utilizan solo 2).

El tiempo de muestreo utilizado para el sitio local fue de 10ms, la tasa de transmisión de datos entre sitio local y remoto de 50ms, al igual que el tiempo de muestreo del sitio remoto.

El retardo de tiempo de ida y vuelta medido durante el experimento fue de

$$460ms < h_{1+2} < 780ms \quad (27)$$

Puede notarse que este retardo es mucho mayor que el tiempo de muestreo del lazo de control (50ms), lo cual influye en el manejo del robot.

El lazo de control de velocidad del robot es ajustado previamente para un buen seguimiento de la velocidad de referencia (control interno del robot).

Las ganancias del controlador local que se eligieron, fueron:

$$k_m = \text{diag}\left\{20 \frac{Ns}{m}; 3 \frac{Ns}{m}\right\}; \quad \alpha_m = \text{diag}\left\{10 \frac{Ns}{s}; 10 \frac{Ns}{m}\right\}.$$

Estas se obtuvieron tras un ajuste en el cual primero se analizaron los valores para cumplir con las condiciones de estabilidad y posteriormente, verificando por prueba y error el efecto que provocan en el dispositivo debido a que por ser un joystick de bajo costo, presenta ciertas limitaciones físicas y saturaciones en sus actuadores.

Para transformar la posición del maestro a velocidad de referencia, se fijó en $k_g = \text{diag}\left\{10.0 \frac{1}{s}; 5.0 \frac{1}{s}\right\}$. Como el rango de desplazamiento del maestro en ambos ejes es de $-0.05[m]$ a $0.05[m]$, se deduce que las máximas velocidades lineal y angular son de $0.5 [m/s]$ y $0.25[rad/s]$. El parámetro u_m fue fijado en $[0.35 \ 0.20]^T$.

La Fig. 2 muestra múltiples capturas del sitio remoto, durante la ejecución de la prueba. Por otro lado, la Fig. 3 expone capturas de imágenes del sitio remoto. Las capturas no han sido tomadas de manera sincronizada local-remoto, ni tampoco espaciadas regularmente en el tiempo.

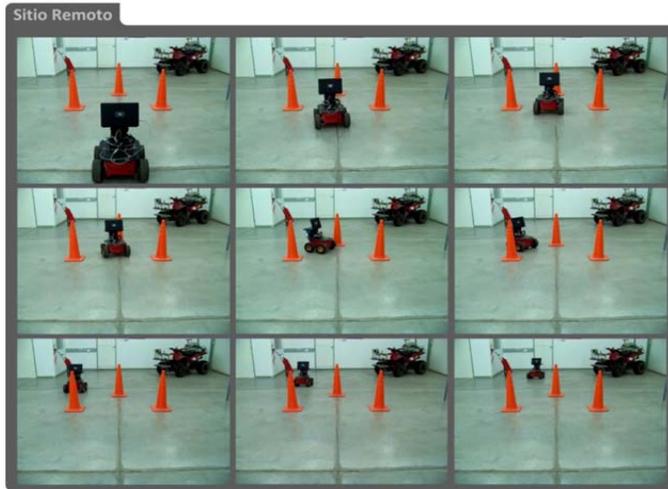


Figura 2. Fotos sucesivas del sitio remoto (Argentina), durante el experimento.

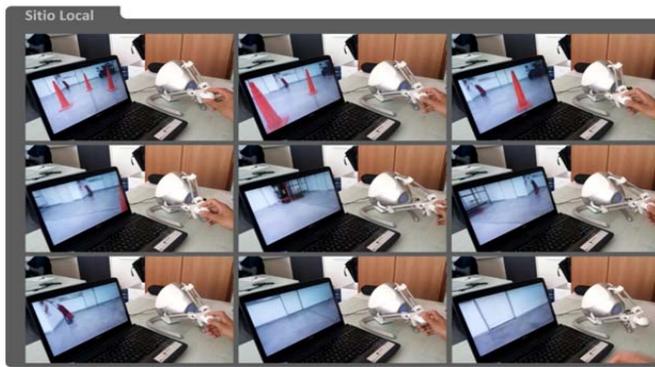


Figura 3. Fotos sucesivas del sitio local (Italia), durante el experimento.

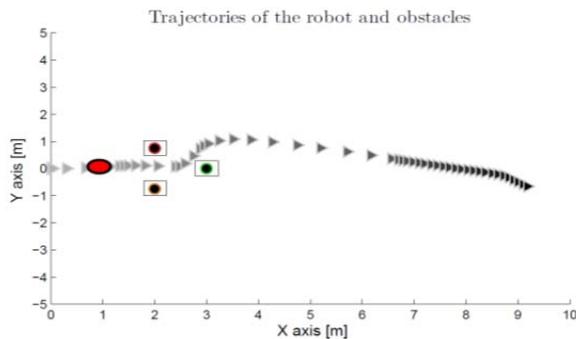


Figura 4. Trayectoria seguida por el robot.

A. Resultados

La Fig. 4 muestra la trayectoria ejecutada por el robot, y la posición de los tres obstáculos fijos dispuestos en el entorno.

La Fig. 6 grafica las probabilidades de colisión (real y de comando) respecto de los obstáculos 1 (izquierda) y 2 (centro).

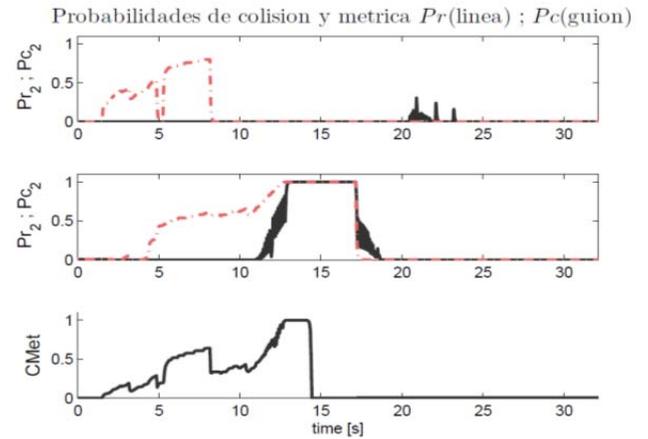


Figura 5. Probabilidades de Colisión y Métrica.

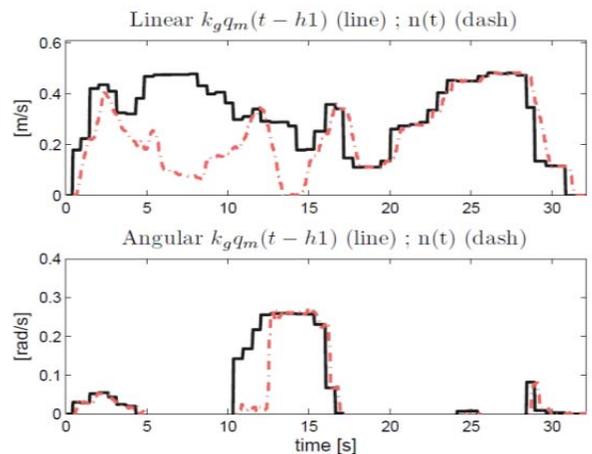


Figura 6. Comandos enviados (referencias de velocidad lineal y angular) y velocidades medidas en el robot.

No se grafica Pr_3 Pc_3 porque son despreciables. También se muestra la métrica utilizada para medir el desempeño del comando respecto a la evasión de obstáculos. Además, la Fig. 6 expone los comandos de velocidad recibidos por el sitio remoto, y las velocidades medidas en el robot (lineal y angular). Puede notarse para $4 < t < 10$ que la velocidad lineal del robot es limitada en función de la métrica (también en función de la componente normal de la fuerza ficticia), mientras que para $10 < t < 12$ se limita más la velocidad angular. Para $15 < t$ la métrica se mantiene en cero, la impedancia de velocidad se mantiene en valores mínimos de seguridad, y por lo tanto, el robot sigue los comandos que envía el operador con el retardo total involucrado en el sistema.

Con respecto al sitio local, la Fig. 7 grafica el par en las direcciones x e y aplicados al dispositivo maestro, el cual se opone fuertemente al movimiento cuando el error de sincronismo es grande $4 < t < 10$ y aún crece más cuando además se mueve el comando (damping de fuerza). La realimentación de fuerza para movimientos laterales del

dispositivo se utiliza con ganancias bajas por la diferencia en la sensibilidad a la realimentación de fuerza en este tipo de comando lateral. La Fig. 8 muestra las velocidades del maestro en la dirección X e Y, y puede verse que es acotada y tiene a cero.

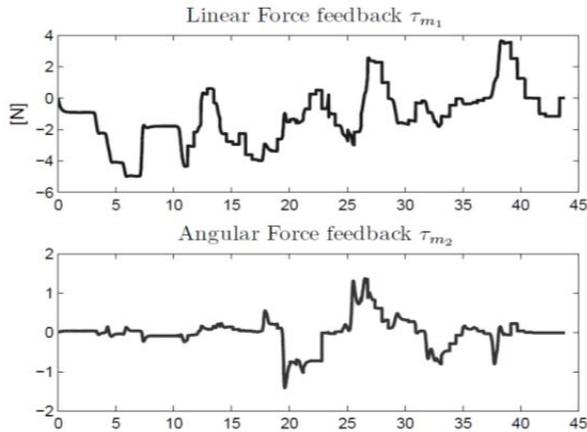


Figura 7. Torque aplicado al Maestro.

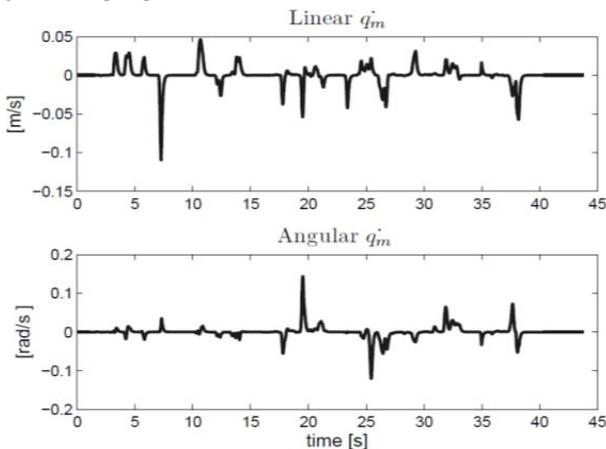


Figura 8. Velocidad del Maestro.

VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se presentó una estrategia de control para teleoperación bilateral de un robot móvil, incluyendo en el lazo una métrica que pondera el desempeño del comando respecto a la evasión de obstáculos (riesgo). Se presenta un análisis de estabilidad considerando las dinámicas del robot y dispositivo maestro, los retardos de tiempo variantes y asimétricos, y también la impedancia de velocidad incluida en el sitio remoto. Se demuestra que el sistema es estable e los errores de interés de un sistema teleoperado, y que la inclusión de la métrica de desempeño de comandos puede variar la impedancia sin desestabilizar el sistema. Además, se teleoperó satisfactoriamente un robot Pioneer 3AT situado en San Juan (Argentina) desde Verona (Italia) y se expusieron las gráficas de los datos relevantes obtenidos, los cuales respaldan el análisis teórico realizado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y el Instituto de Automática de la UNSJ.

REFERENCIAS

- [1] Seung Keun Cho, Hong Zhe Jin, Jang Myung Lee, and Bin Yao. Teleoperation of a mobile robot using a force-reflection joystick with sensing mechanism of rotating magnetic field. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 15(1):17–26, February 2010.
- [2] J.M. Daly and D.W.L. Wang. Time-delayed output feedback bilateral teleoperation with force estimation for n-dof nonlinear manipulators. *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, 22:299 – 306, 2014.
- [3] I. Elhajj, Ning Xi, Wai Keung Fung, Yun-Hui Liu, Y. Hasegawa, and T. Fukuda. Supermedia enhanced internet based telerobotics. *Proceedings of the IEEE*, 91:396–421, 2003.
- [4] I. Farkhatdinov, Jee-Hwan Ryu, and Jinung An. A preliminary experimental study on haptic teleoperation of mobile robot with variable force feedback gain. In *Haptics Symposium*, 2010 IEEE, pages 251–256, March 2010.
- [5] Paolo Fiorini and Roberto Oboe. *Internet-based telerobotics: Problems and approaches*, 1997.
- [6] N. Hogan. Impedance control: An approach to manipulation, part 1: Theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 107:1–7, 1985.
- [7] P. F. Hokayem and M. W. Spong. Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 42(12):2035–2057, 2006.
- [8] Chang-Chun Hua and X.P. Liu. Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays. *IEEE Trans. Robot.*, 26(5):925–932, 2010.
- [9] Farrokh Janabi-Sharifi, , and Iraj Hassanzadeh. Experimental analysis of mobile-robot teleoperation via shared impedance control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 41(2):591–606, April 2011.
- [10] Eun Soo Jang, Seul Jung, and T.C. Hsia. Collision avoidance of a mobile robot for moving obstacles based on impedance force control algorithm. In *Intelligent Robots and Systems*, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on, pages 382–387, Aug 2005.
- [11] Thanh Mung Lam, Harmen Wigert Boschloo, Max Mulder, and Marinus M. van Paassen. Artificial force field for haptic feedback in uav teleoperation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 39:1316–1330, 2009.
- [12] D. A. Lawrence. Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 9(5):624–637, 1993.
- [13] S. I. Niculescu. *Delay Effects on Stability: A Robust Control Approach*. Springer Verlag, 2001.
- [14] Franco Penizzotto, Emanuel Slawiński, and Vicente Mut. Teleoperation of mobile robots considering humans commands. In M. Armada, A. Sanfeliu, and M. Ferre, editors, *ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing*, volume 253, pages 601–614. Springer, 2014.
- [15] J. P. Richard. Time-delay systems: An overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, 39(10):1667–1694, 2003.
- [16] David Sanders. Comparing ability to complete simple tele-operated rescue or maintenance mobile-robot tasks with and without a sensor system. *Sensor Review*, 30:40 – 50, 2010.
- [17] Craig Sayers. *Remote control robotics*. Springer-Verlag, 1999.
- [18] T. B. Sheridan. *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. MIT Press Cambridge, MA, USA, 1992.
- [19] T. B. Sheridan. Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 9(5):592–606, 1993.
- [20] Thomas B. Sheridan. *Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control*. MIT Press, 1992.

- [21] E. Slawiński, V. A. Mut, and J. F. Postigo. Stability of systems with time-varying delay. *Latin American applied research*, 36:41–48, 2006.
- [22] Emanuel Slawiński and Vicente Mut. Pd-like controllers for delayed bilateral teleoperation of manipulators robots. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014.
- [23] Emanuel Slawiński, Vicente Mut, Lucio Salinas, and Sebastian García. Teleoperation of a mobile robot with time-varying delay and force feedback. *Robotica*, 30:67–77, January 2011.
- [24] Leonid Slutski. *Remote manipulation systems: quality evaluation and improvement*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [25] Hyoung Il Son, Antonio Franchi, Lewis L. Chuang, Junsuk Kim, Heinrich H. Bühlhoff, and Paolo Robuffò Giordano. Human-centered design and evaluation of haptic cueing for teleoperation of multiple mobile robots. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43(2):597–609, 2013.
- [26] B. Willaert, D. Reynaerts, H. Van Brussel, and E.B.V. Poorten. Bilateral teleoperation: Quantifying the requirements for and restrictions of ideal transparency. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 22:387 – 395, 2014.



Franco V. Penizzotto was born in San Juan, Argentina on February 16th, 1982. He is graduated from the National University of San Juan (UNSJ), Argentina. He received a Magistral Degree on Control Systems Engineering at the UNSJ in 2009. Currently, he is student of the Ph.D program at Automatic Institute of the National University of San Juan. He has a scholarship supported by the National Council of Scientific and Technical Investigations of Argentina (CONICET). His research interests are on Robotics, Human Factors applied to Automatic and Human-Robot Interaction.



Emanuel Slawiński was born in Chubut, Argentina on November 5, 1975. He is graduated from the National University of San Juan (UNSJ), Argentina. He received a Doctoral Degree on Control Systems Engineering at the UNSJ in 2006. Currently, he is Researcher at the National Council of Scientific and Technical Investigations of Argentina (CONICET) and he is professor at the UNSJ in the careers of electronic engineering as well as Ph.D. His areas of interest are: Teleoperation Systems, Human Factors, Human-Robot Interaction and Software Development.



Vicente A. Mut is professor at the National University of San Juan and Independent Researcher at the National Council of Scientific and Technical Investigations of Argentina (CONICET), developing research activities and teaching at the graduate and posgraduate programs. He received a Doctor Grade in Engineering of Systems of Control in the National University of San Juan, Argentina in 1995. He has been qualified as Researcher Class I in the categorization for incentives program to the Research-Education of the Argentinean government. His research interests are on Robotics, Manufacturing Systems, Adaptive Control and Artificial Intelligence applied to Automatic Control.