

# Mapeos continuos para teleoperación de Manipuladores Móviles

Diego Santiago, Daniel Herrera, Emanuel Slawiński y Vicente Mut

Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan-CONICET, Av.Libertador Oeste 1109, San Juan-Argentina  
{dsantiago, dherrera, eslawinski, vmut}@inaut.unsj.edu.ar

**Resumen-** Este trabajo presenta un método para la teleoperación de manipuladores móviles. Un manipulador móvil (MM) consiste en un robot manipulador montado sobre una plataforma móvil (robot móvil). Desde el punto de vista tradicional de manipuladores, los MM expanden el espacio de trabajo, mientras que desde el punto de vista de los robots móviles brindan mayor interacción con el ambiente. Se propone así una estrategia de mapeo simultáneo de velocidad y posición a partir de un único comando de posición emitido por el operador humano, que mediante un controlador jerárquico unificado en el sitio remoto donde se encuentra el MM (esclavo) y un mapeo de fuerzas de realimentación en el sitio local (maestro), permite controlar múltiples grados de libertad a partir de solo tres grados del dispositivo maestro.

## I. INTRODUCCIÓN

La teleoperación permite a un operador humano realizar un trabajo físico a distancia. Estos sistemas separan al usuario del espacio de trabajo el cual puede ser hostil, sucio o incluso inaccesible. La teleoperación de robots móviles y manipuladores en forma individual, permite alcanzar mayores niveles de seguridad y mejor performance de la tarea al aprovechar la capacidad intelectual y toma de decisión del operador humano, sin embargo los esquemas de control actuales para teleoperación de manipuladores móviles limitan dichas capacidades.

Un manipulador móvil (MM), es un término amplio que se refiere a un robot manipulador montado sobre una plataforma móvil, la cual puede ser del tipo terrestre, aérea o acuática. Los manipuladores móviles tienen una amplia gama de aplicaciones como son la industria, minería, construcción, medicina, seguridad y vigilancia, industria Aero-espacial, exploración submarina e incluso uso doméstico. La ventaja comparativa de los MM respecto a los robots convencionales (manipuladores o móviles) es la alta redundancia de movimiento que le permite acceder a áreas complejas o incluso lograr diversos objetivos de control simultáneamente [1]. En lo referente a teleoperación, esto se plantea como un reto para el operador humano, ya que debe controlar múltiples grados de libertad de la base móvil y el manipulador, además de sobrellevar la compleja dinámica que se obtiene en esta configuración. En estos aspectos se han propuesto varios trabajos. En [2, 3] se plantea la teleoperación por control conmutado, de este modo, el operador humano decide si controlar la velocidad del móvil o bien la posición del extremo operativo. En [4] también se plantea un control conmutado en dos modos: control bilateral para el modo manipulador y modo de control de velocidad para

la base móvil. En [5] se plantea un control conmutado donde la velocidad controlada es la del extremo operativo y no la de la base; para esto se utiliza un modelo cinemático del manipulador para el modo de manipulación, y por separado el modelo completo del manipulador móvil para el modo de locomoción.

El problema con la estrategia de conmutación manual es que el operador debe posicionar correctamente el manipulador antes de pasar al modo de locomoción; frente a obstáculos, posiblemente tenga que conmutar reiteradas veces, lo cual resulta poco eficiente ya que en general el operador desea desplazarse en la dirección del extremo operativo.

En [6] se proponen distintos métodos para conmutar la acción de control. El primero es meramente manual tal como se describió con anterioridad, el segundo consiste en un método manual-automático donde la conmutación al modo de manipulación ocurre cuando el robot se aproxima lo suficiente al área de manipulación, esto presupone un ambiente estructurado. El tercer método propuesto es completamente automático y consiste en conmutar la acción de control dependiendo de la velocidad con la que el operador humano mueve el dispositivo maestro o bien debido a la presencia de obstáculos. De esta forma un movimiento lento del maestro o la presencia de un obstáculo frente al MM producen la conmutación al modo de manipulación, esto le resta transparencia a la teleoperación ya que la conmutación se produce por una interpretación de la intención del operador que puede diferir de la intención real.

Una posible solución se presenta en Wrock and Nokleby [7], donde el control del manipulador móvil se realiza utilizando un solo joystick de 3-GDL; se definen dos modos que permiten controlar la base o el manipulador. El sistema conmuta automáticamente dependiendo de la configuración del manipulador esclavo. El controlador entra en modo de locomoción cuando el extremo operativo supera unos límites predefinidos en el área de trabajo del esclavo y retorna al modo de manipulación cuando el maestro permanece en una zona predefinida por más de 3 segundos.

Si bien la conmutación automática representa una gran ventaja respecto a la manual, esta puede distraer al operador de la tarea a realizar pues está más pendiente del estado de conmutación que de la tarea en sí, en este sentido Pham and Cong D. [8] proponen reducir la diferencia entre los modos de operación mediante la introducción de fuerzas artificiales entre el manipulador y la base y el punto de observación, que

consiste en una cámara montada sobre la base móvil, de este modo se logra controlar la posición y velocidad del extremo operativo solamente. Una de las diferencias principales con los esquemas anteriores es que el manipulador también se mueve en el modo de locomoción, logrando una operación más intuitiva del mismo. Sin embargo el control continúa siendo conmutado, pudiendo producir, entre otras cosas, inestabilidad frente a retardos de tiempo considerables en la teleoperación.

En base a lo mencionado, en la Sección II se plantea la problemática abordada, en la Sección III se propone un método que pretende mejorar los problemas descritos en el estado del arte para el caso de teleoperación de MM, el cual consiste del mapeo de referencias desde la posición cartesiana del extremo operativo del manipulador maestro, a la posición cartesiana del extremo operativo del manipulador esclavo respecto de su base u otro punto de referencia asociado a ella y simultáneamente a la velocidad cartesiana del extremo operativo respecto a un marco global. De este modo el operador puede controlar tanto la posición como velocidad del manipulador móvil en forma intuitiva y efectiva, reduciendo los tiempos de la tarea y la carga mental.

En la sección IV se describe el modelo del sistema de teleoperación de un MM.

Otro de los aportes de este trabajo se centra en un controlador jerárquico para el robot esclavo, detallado en la Sección V, cuya estructura prioriza la tarea de manipulación sobre la de locomoción, de modo que la manipulación se logre de forma exclusiva con los grados de libertad del manipulador y la tarea de locomoción se logre con los grados de libertad restantes, tanto del manipulador como de la base móvil, además permite aprovechar la redundancia residual del conjunto para tareas de control secundarias, como pueden ser mantener cierta postura o evadir obstáculos.

Adicionalmente en la Sección VI, en el marco de una teleoperación bilateral, se propone un método de composición de fuerzas en el robot-maestro, el cual aumenta la percepción del operador al percibir fuerzas de distinta naturaleza asociadas a la locomoción y manipulación por separado como parte de una sola fuerza de realimentación coherente.

Finalmente en la Sección VII se presentan simulaciones que validan el método propuesto y en la Sección VIII conclusiones y futuros trabajos.

## II. PROBLEMÁTICA

La problemática abordada consiste en la manipulación o realización de una tarea predeterminada, en un área de trabajo que se encuentra alejada de la posición inicial del manipulador móvil. En dicho sentido el robot debe desplazarse hasta que su espacio de trabajo coincida con dicha zona (Fig. 1).

De esta manera se considera que el operador siempre desea desplazarse en dirección del manipulador esclavo, y que la tarea de manipulación se lleva a cabo exclusivamente por el manipulador sin aporte de la base, ya que el control de posición de la base es menos preciso que el del manipulador y está sujeto a perturbaciones. Por simplicidad se presupone que no existen obstáculos entre la posición inicial del robot y el área

de trabajo. Sin embargo esta situación puede contemplarse utilizando una estrategia de evasión de obstáculos [5, 9].

Se considera la capacidad de controlar la posición del brazo esclavo incluso durante la locomoción, sin embargo para la tarea pura de manipulación se garantiza que la base permanezca inmóvil.

El modo como el operador percibe la fuerza correspondiente a la manipulación o a la locomoción según sea la tarea que está realizando, no solo está orientado a la percepción del ambiente y el movimiento, sino además a guiar al operador hacia una posición de trabajo óptima.

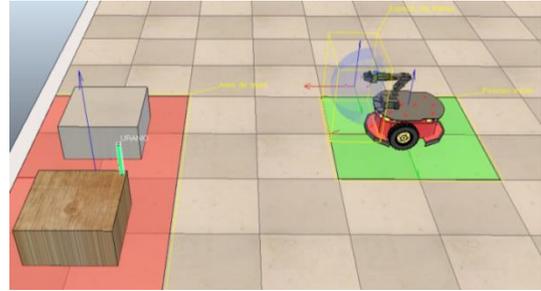


Fig. 1 Desplazamiento hacia el área de trabajo para comenzar la tarea de manipulación

Es por esto que tanto para la transición entre modos, como para la realimentación de fuerzas se proponen funciones continuas que evitan cambios abruptos, propios de las técnicas de conmutación que pueden confundir al operador y que se detallará en la sección III.

## III. MAPEOS POSICIÓN → POSICIÓN - VELOCIDAD

Sea  $\mathbf{X}_m \in \mathbb{R}^3$  la posición del joystick respecto al centro de su área de trabajo y sea  $\mathbf{X}_s \in \mathbb{R}^6$  el vector de referencias del esclavo, el cual contiene las velocidades cartesianas deseadas del extremo operativo del MM respecto a un eje inercial y la posición del extremo operativo referenciada a un eje solidario al robot móvil. Luego el mapeo puede definirse como:

$$\mathbf{X}_m = [x_m \quad y_m \quad z_m]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_s = [\dot{x}_{so} \quad \dot{y}_{so} \quad \dot{z}_{so} \quad x_{sc} \quad y_{sc} \quad z_{sc}]^T = [\mathbf{v}_s \quad \mathbf{h}_s]^T$$

donde,

$$\mathbf{v}_s = (\mathbf{L}_v \mathbf{X}_m)^{2n+1}, n \in \mathbb{N}^+ \quad (2)$$

$$\mathbf{h}_s = \mathbf{L}_h \tanh(\mathbf{L}_h^{-1} \mathbf{K}_h \mathbf{X}_m)$$

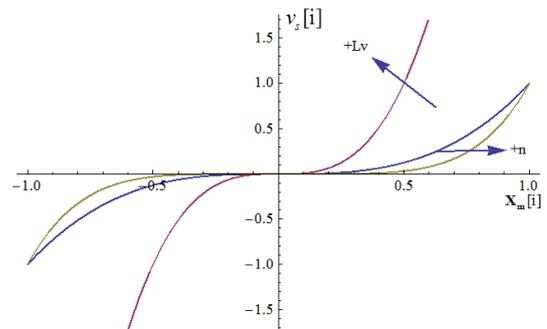


Fig. 2 Parámetros Mapeo Posición - Velocidad

Las Fig. 2 y 3 ilustran la variación del mapeo de posición y de velocidad con las matrices  $\mathbf{L}_h$ ,  $\mathbf{K}_h$  y  $\mathbf{L}_v$ . Valores mayores de  $\mathbf{K}_h$  aumentan la pendiente de la zona lineal de posición, por lo que pequeñas variaciones en el joystick provocarían grandes deflexiones en la posición del extremo del manipulador esclavo; la matriz  $\mathbf{L}_h$  ajusta el valor de saturación del esclavo, es decir su espacio de trabajo máximo;  $\mathbf{L}_v$  ajusta el peso de la velocidad respecto a la posición del joystick, un mayor  $\mathbf{L}_v$  implica una zona de velocidad mayor, por lo que cualquier movimiento pequeño en el maestro producirá un cambio de velocidad marcado en el esclavo. El parámetro  $n$  fija la pendiente de la curva de velocidad así como la “zona muerta” del mapeo, a mayor  $n$  menor será la sensibilidad del mapeo de velocidad en el centro del espacio de trabajo del maestro y mayor será la sensibilidad en las áreas más externas de dicha zona.

La Fig. 4 muestra una configuración tentativa, donde la entrada y la salida se han normalizado a 1. Se observa que en la primera mitad de la zona de trabajo se prioriza la posición, mientras que en la segunda se prioriza la velocidad al tiempo que los movimientos del brazo se vuelven menos sensibles.

#### IV. MODELO DEL SISTEMA

Sea  $\Sigma_s$  el marco inercial del sitio local, ubicado en el centro del espacio de trabajo del maestro, y  $\mathbf{X}_m$  la posición del extremo del maestro respecto a dicho marco. El modelo dinámico del maestro puede expresarse en su forma tradicional:

$$\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m)\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)\dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{G}_m(\mathbf{q}_m) = \boldsymbol{\tau}_m + \mathbf{f}_o \quad (3)$$

donde,  $\mathbf{q}_m \in \mathbb{R}^n$  son las posiciones articulares del robot maestro,  $\mathbf{M}_m(\mathbf{q}_m) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia,  $\mathbf{C}_m(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es

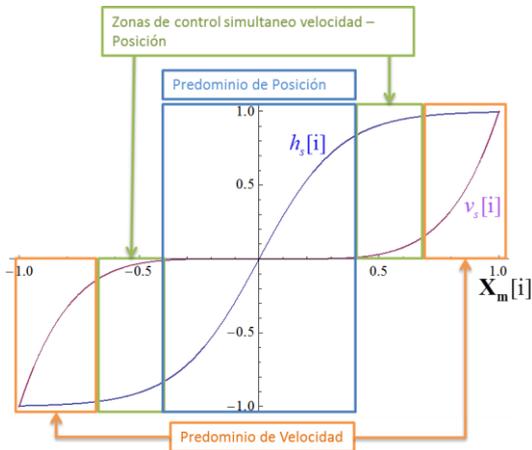


Fig. 4 Composición del Mapeo Simultáneo

la matriz que representa los torques centrípetos y de Coriolis,  $\mathbf{G}_m(\mathbf{q}_m) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de los torques gravitacionales;  $\mathbf{f}_o \in \mathbb{R}^n$  es el vector de torque debido a la fuerza ejercida por el operador humano y  $\boldsymbol{\tau}_m \in \mathbb{R}^n$  es el vector de torque aplicado al maestro.

Para el esclavo se considera  $\Sigma_o$  el marco inercial del sitio remoto,  $\Sigma_b$  el marco del robot móvil cuya posición y orientación relativa a  $\Sigma_o$  es  $\mathbf{p}_b = [x_b \ y_b \ \psi]^T$  y  $\Sigma_e$  el marco de referencia del extremo operativo. Además  $\Sigma_c$  es el marco no inercial solidario al robot móvil ( $\Sigma_b$ ), que puede representar la posición de la cámara o bien una referencia para el posicionamiento del manipulador.

La matriz de transformación  ${}^o\mathbf{T}_m$  relaciona el marco de referencia del móvil respecto al marco global  $\Sigma_o$ . La matriz  ${}^m\mathbf{T}_c$  relaciona la ubicación de la cámara respecto al marco del robot móvil,  ${}^m\mathbf{T}_e$  es la matriz de transformación del extremo

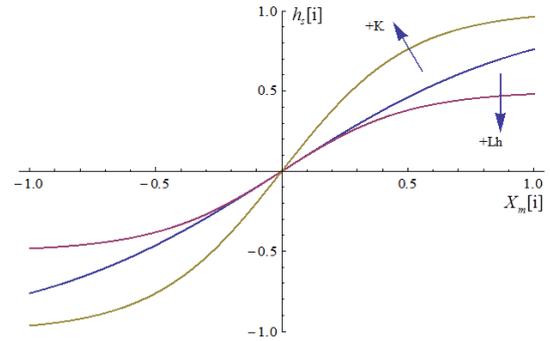


Fig. 3 Parámetros del Mapeo de Posición - Posición respecto al robot móvil. Luego:

$${}^o\mathbf{T}_e = {}^o\mathbf{T}_m {}^m\mathbf{T}_e$$

es la matriz de transformación del extremo operativo al marco inercial  $\Sigma_o$  y,

$${}^c\mathbf{T}_e = ({}^m\mathbf{T}_c)^{-1} {}^m\mathbf{T}_e$$

es la transformación de la posición del extremo operativo al marco de la cámara.

A partir de estas matrices se puede obtener la posición del extremo operativo respecto al marco de la cámara:

$${}^c\mathbf{T}_e \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T = \mathbf{h} \in \mathbb{R}^3$$

con  $\mathbf{h} = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ . La posición del extremo operativo respecto al marco global ( $\Sigma_o$ ) es:

$${}^o\mathbf{T}_{ext} \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T = \mathbf{h}_o \in \mathbb{R}^3.$$

con  $\mathbf{h}_o = [x_o \ y_o \ z_o]^T$ . Derivando estas posiciones en el vector de estados del manipulador móvil

$$\mathbf{q}_s(\mathbf{t}) = [x_s \ y_s \ \psi_s \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$$

se obtiene el Jacobiano que relaciona la velocidad de las articulaciones en el espacio articular con la velocidad del extremo operativo en el espacio cartesiano:

$$\dot{\mathbf{h}}_o = \bar{\mathbf{J}}_o \dot{\mathbf{q}}_s \quad (4)$$

y el Jacobiano que relaciona la velocidad del extremo operativo en el espacio cartesiano, referido al marco de observación (cámara o referencia)

$$\dot{\mathbf{h}} = \bar{\mathbf{J}}_m \dot{\mathbf{q}}_s \quad (5)$$

El modelo dinámico utilizado para el esclavo[10, 11] corresponde al modelo libre de restricciones en el espacio articular, que contempla la dinámica de los controladores de velocidad PD internos.

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{q}_s) \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_s(\mathbf{q}_s, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{G}_s(\mathbf{q}_s) = \mathbf{v}_{\text{ref}} \quad (6)$$

donde,  $\mathbf{v} = [u \ \omega \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$  es el vector de estados redefinido del esclavo,  $u, \omega$  son las velocidades lineales y angulares de la base respectivamente, y  $\dot{\theta}_i$  la velocidad lineal de cada articulación del robot. El vector  $\mathbf{v}_{\text{ref}}$  es la entrada de control al modelo, compuestas de las referencias de velocidad del móvil y de las articulaciones.

Las Ec. (4), (5) se redefinen para el vector de estados  $\mathbf{v}$ :

$$\dot{\mathbf{h}}_o = \mathbf{J}_o \mathbf{v} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}_m \mathbf{v} \quad (8)$$

## V. SISTEMA DE CONTROL

El diseño del controlador plantea un reto adicional, ya que debe permitir controlar los grados de libertad redundantes en modo automático, sin restar claridad al operador para la tarea que desee realizar. Es por ello que en principio se plantea un controlador cinemático mediante control jerárquico [12, 13]. De este modo los objetivos de control con menor importancia se ubican en el espacio nulo de la tarea de mayor jerarquía.

Se considera que el objetivo final del sistema es manipular objetos en un área de trabajo infinita, por ello para el diseño del controlador se prioriza la tarea de posicionamiento del manipulador sobre la locomoción. Se propone la siguiente acción de control en el espacio articular:

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}_m^+ (\mathbf{K}_c \tilde{\mathbf{h}}) - \mathbf{B} \mathbf{G}_s(\mathbf{q}_s) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_m^+ \mathbf{J}_m) (\mathbf{J}_o^+ (\mathbf{K}_o \mathbf{v}_s) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_o^{+T} \mathbf{J}_o) \Lambda) \quad (9)$$

donde,

$$\mathbf{J}_i^+ = \mathbf{W}_i^{-1} \mathbf{J}_i^T (\mathbf{J}_i \mathbf{W}_i^{-1} \mathbf{J}_i^T)^{-1}, \quad i = \{o, m\}$$

es la pseudoinversa de  $\mathbf{J}_i$  y  $\mathbf{W}_i$  es una matriz semi-definida positiva que pesa la acción de control,  $\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{h}_s - \mathbf{h}$  es el error de posición respecto al marco de la cámara y  $\mathbf{K}_c$  la matriz que pesa el error de posición y  $\mathbf{K}_o$  la ganancia proporcional de velocidad y  $\Lambda$  un vector de control que permite aprovechar la redundancia del sistema para tareas secundarias, como control de postura o evasión de obstáculos [5]; finalmente  $\mathbf{B} \mathbf{G}_s(\mathbf{q}_s)$  compensa la acción de la gravedad en el extremo operativo.

El modelo completo del sistema esclavo (MM) es:

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{q}_s) \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_s(\mathbf{q}_s, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{G}_s(\mathbf{q}_s) = \mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \mathbf{K} \mathbf{v}_c) \quad (10)$$

donde,  $\mathbf{L}$  previene la saturación de las acciones de control y  $\mathbf{K}$  es la ganancia proporcional del controlador.

## VI. REALIMENTACION DE FUERZA

Dos objetivos motivan la realimentación de fuerza, por un lado brindar percepción del ambiente en que se encuentra el manipulador y por otro una interfaz intuitiva y sencilla.

Para diferenciar las variables temporalmente se consideran los retardos de subida  $\delta_1$  (Maestro  $\rightarrow$  Esclavo) y de bajada  $\delta_2$  (Esclavo  $\rightarrow$  Maestro). Se propone la realimentación de fuerza proporcional al error de sincronismo entre el extremo del Esclavo y el extremo del Maestro, este es un esquema de realimentación ampliamente utilizado en la teleoperación bilateral con retardo[14, 15], ya que dota al operador de percepción del ambiente y del retardo en forma intuitiva.

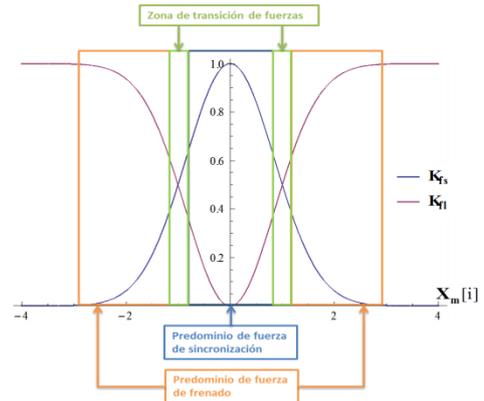


Fig. 5 Mapeo de Fuerzas de Realimentación

$$\mathbf{f}_s = \mathbf{K}_{fs} (\mathbf{h}_s(t) - \mathbf{h}(t - \delta_2)) \quad (11)$$

Donde  $\mathbf{h}_s(t)$  es la referencia de posición en el sitio local y  $\mathbf{h}(t - \delta_2)$  es la posición del Esclavo retardada  $\delta_2$  segundos.

Debido a la composición del mapeo, la base del manipulador genera desplazamientos al momento que el operador desea realizar la tarea de manipulación, el hecho de detener la locomoción constituye una carga adicional para el operador. Otro problema surge al optar por una realimentación visual del tipo "cámara en mano", ya que el operador puede perder percepción de la posición de la base. Estos problemas motivan la inclusión de una segunda fuerza de realimentación, cuyo objetivo es frenar la locomoción y llevar al manipulador hacia una posición óptima respecto a su espacio de trabajo.

$$\mathbf{f}_1 = -\mathbf{K}_n \mathbf{v}_s(t - \delta_2) \quad (12)$$

La composición de ambas fuerzas debe contemplar la naturaleza de la tarea que se está realizando: si predomina la tarea de manipulación la fuerza de interés es  $\mathbf{f}_s$  mientras que en locomoción la fuerza de interés es  $\mathbf{f}_1$ , luego la solución en la literatura [2, 4, 6] es la del control conmutado:

$$\mathbf{f}_r = \begin{cases} \mathbf{f}_s & \text{si en } \mathbf{X}_m \text{ Predomina posición} \\ \mathbf{f}_1 & \text{si en } \mathbf{X}_m \text{ Predomina velocidad} \end{cases} \quad (13)$$

Sin embargo, en la conmutación automática, esta estrategia causa que el operador no esté seguro del tipo de fuerza que está percibiendo en un momento determinado. El método de control propuesto en este trabajo contempla la simultaneidad del

comando de velocidad y posición en ciertas zonas del área de trabajo del master, por lo que el operador debe percibir una componente de ambas fuerzas en las zonas de transición y una fuerza residual en las zonas de predominio de una u otra tarea. Por tanto se propone un mapeo de fuerzas similar al empleado en las secciones anteriores:

$$\mathbf{f}_t = \mathbf{K}_{fs}(\mathbf{X}_m)(\mathbf{h}_s(t) - \mathbf{h}(t - \delta_2)) - \mathbf{K}_n(\mathbf{X}_m)\mathbf{v}_s(t - \delta_2) - \alpha_m \dot{\mathbf{X}}_m - \mathbf{G}_m(\mathbf{X}_m) \quad (14)$$

donde  $\alpha_m$  es un factor de amortiguamiento y  $\mathbf{K}_n$ ,  $\mathbf{K}_{fs}$  son ganancias variables que dependen de la posición del maestro  $\mathbf{X}_m$  y tienen la forma:

$$\mathbf{K}_{fs} = a^{-|\mathbf{X}_m[i]|^2}, \quad i = \{1, 2, 3\}, \quad a \in \mathbb{R}^+ \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_n = 1 - \mathbf{K}_{fs}$$

De este modo es posible ajustar el grado de percepción de las distintas fuerzas dependiendo de la zona en la que se encuentre el maestro. Para el ajuste de la composición de

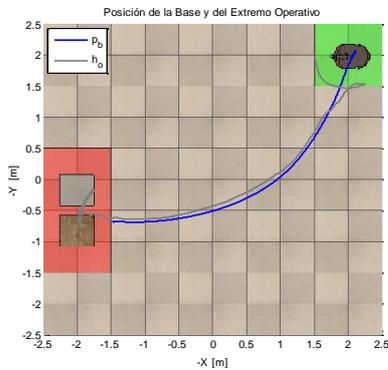


Fig. 6 Trayectoria del Extremo operativo y la Base móvil en el plano XY

fuerzas se debe tener en cuenta que en la zona de transición, el móvil debe estar detenido, lo cual evita conflictos entre  $\mathbf{f}_s$  y  $\mathbf{f}_1$ .

## VII. EXPERIMENTACIÓN

En esta sección, el esquema propuesto se prueba mediante simulación con la presencia del operador humano en el lazo (HITL, Human In the Loop). El operador maneja una simulación 3D de un robot móvil empleando un manipulador de 3 GLD con realimentación de fuerza. Dicho dispositivo maestro consiste en un NovintFalcon <http://www.novint.com/>. El objetivo del experimento es manipular cuidadosamente un objeto que se encuentra alejado del área de trabajo del manipulador, tal como se observa en la Fig. 1. Las fuerzas externas son modeladas a través del motor físico BulletPhysics <http://bulletphysics.org>, funcionando dentro del simulador V-REP <http://www.coppeliarobotics.com>. Este ambiente incluye la simulación de fuerza de gravedad, fuerzas de contacto, fricciones y materiales entre otras. El controlador, tanto del lado del Maestro como del Esclavo, se implementa en MATLAB SIMULINK [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) y la comunicación con V-REP se realiza a través de memoria compartida. El manipulador móvil está compuesto por un manipulador Phantom X Pincher montado sobre un robot Pioneer P3dx.

En el modo de locomoción, el sistema controla la velocidad global del extremo operativo, sin embargo la realimentación visual al operador es del tipo “cámara en mano” es por ello que

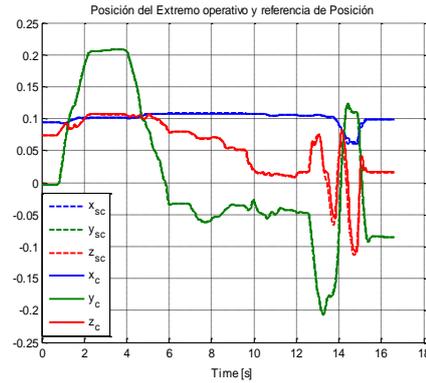


Fig. 7 Comando de Posición y Posición del Extremo Operativo

la referencia de velocidad del maestro se rota a coordenadas globales antes de ingresarlas al controlador:

$$\mathbf{v}_s' = {}^oR_e \mathbf{v}_s \quad (16)$$

El manipulador robótico comienza el experimento en una posición alejada del área de manipulación. Entre  $t_0=0$  seg. y  $t_1=2$  seg., el manipulador robótico se desplaza hacia un costado pero no entra en la zona de velocidad (Fig. 6,8), entre  $t_2=2$  seg. y  $t_3=12$  seg. el maestro trabaja en la zona de velocidad y comienza la tarea de locomoción; el extremo operativo (EO) se desplaza con una velocidad lineal determinada por el mapeo de velocidad de la referencia generada por el operador, tal como se observa en las Fig. 6 y 8. Se observa que durante este periodo, aunque la referencia de velocidad en Y y Z es nula, el EO experimenta cambios de velocidad en ambos ejes, esto se debe a que el operador está controlando la trayectoria del conjunto mediante el posicionamiento fino en Y, a la vez que controla la posición de la cámara en mano en Z, esto demuestra la capacidad de controlar la posición del extremo aun durante

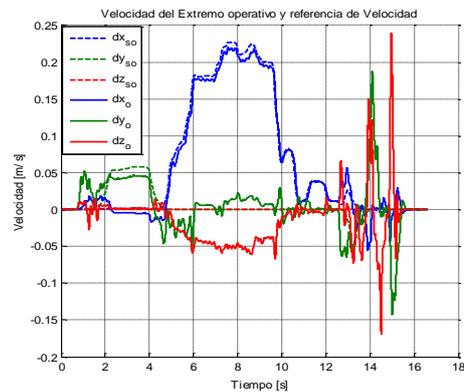


Fig. 8 Comando de Velocidad y Velocidad del Extremo Operativo

una tarea de locomoción. En la Fig. 9 se observa la composición de las fuerzas de realimentación al operador. Debido a que predomina la tarea de locomoción en el intervalo  $[t_2 t_3]$  el operador siente la fuerza inversamente proporcional a la velocidad lineal del móvil, que intenta frenar el conjunto. En  $t_4=14$  seg., comienza la tarea pura de manipulación, se observa

que la base del robot permanece inmóvil mientras que el extremo operativo se desplaza de una zona de trabajo a la otra

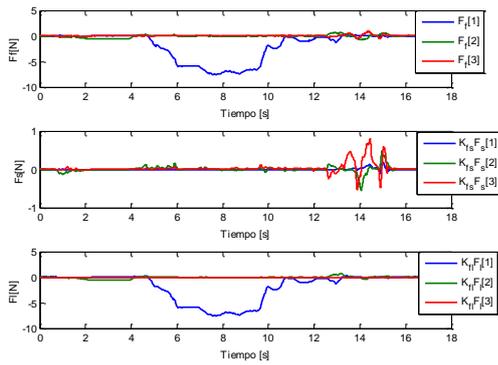


Fig. 9 Composición de Fuerzas de Realimentación

manipulando el objeto de interés.

En la Fig. 7 se observa que la tarea de manipulación genera errores prácticamente nulos durante todo el experimento, esto se debe a que posee la máxima prioridad en el control. Sobre el final del experimento se percibe una diferencia entre la referencia de posición ( $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$ ) y la posición del robot manipulador esclavo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Esta diferencia es la que siente el operador (Fig. 9) en forma de error de sincronismo, y es debida al peso extra del objeto y al contacto con la superficie de trabajo.

### VIII. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un sistema para la teleoperación bilateral de manipuladores móviles.

Este sistema permite al operador controlar de manera intuitiva los múltiples grados de libertad de un manipulador móvil utilizando solamente 3 GLD de un dispositivo aptico.

El diseño contempla el control simultáneo de velocidad y posición a través de un mapeo de referencias.

Se propuso un controlador de posición y velocidad que prioriza la manipulación por sobre la locomoción a la vez que permite aprovechar la redundancia del sistema para tareas secundarias, como evasión de obstáculos o control de postura.

Mediante una composición de mapeos de fuerza el sistema realimenta el error de sincronismo entre la posición del maestro y la posición del manipulador esclavo, y una fuerza inversamente proporcional a la velocidad del móvil, de este modo el operador puede percibir el entorno a la vez que es guiado a una posición óptima para la tarea de manipulación. La realimentación de fuerza incluye amortiguamiento, lo cual permite estabilizar el sistema incluso en condiciones de retardo variable.

En futuros trabajos se presentaran las demostraciones y condiciones de estabilidad del sistema frente a retardo de tiempo variable y asimétrico, así como también se analizara el desempeño del operador frente a otros esquemas presentados en la sección I.

### REFERENCIAS

[1] O. Khatib, "Mobile manipulation: The robotic assistant," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 26, pp. 175-183, 1999.  
 [2] I. Farkhatdinov, J.-H. Ryu, and J. Poduraev, "A feasibility study of time-domain passivity approach for bilateral teleoperation of mobile

manipulator," in *Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 272-277.  
 [3] I. Farkhatdinov and J.-H. Ryu, "Switching of control signals in teleoperation systems: formalization and application," in *Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on*, 2008, pp. 353-358.  
 [4] A. Lasnier and T. Murakami, "Hybrid sensorless bilateral teleoperation of two-wheel mobile manipulator with underactuated joint," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on*, 2010, pp. 347-352.  
 [5] V. H. Andaluz, L. Salinas, F. Roberti, J. M. Toibero, and R. Carelli, "Switching control signal for bilateral tele-operation of a mobile manipulator," in *Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on*, 2011, pp. 778-783.  
 [6] I. Farkhatdinov and J.-H. Ryu, "Hybrid position-position and position-speed command strategy for the bilateral teleoperation of a mobile robot," in *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS'07. International Conference on*, 2007, pp. 2442-2447.  
 [7] M. Wrock and S. B. Nokleby, "Decoupled teleoperation of a holonomic mobile-manipulator system using automatic switching," in *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th Canadian Conference on*, 2011, pp. 001164-001168.  
 [8] C. D. Pham and P. J. From, "Control allocation for mobile manipulators with on-board cameras," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, 2013, pp. 5002-5008.  
 [9] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 5, pp. 90-98, 1986.  
 [10] Y. M. Hu and B. H. Guo, "Modeling and motion planning of a three-link wheeled mobile manipulator," in *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV 2004 8th*, 2004, pp. 993-998 Vol. 2.  
 [11] V. Andaluz, F. Roberti, and R. Carelli, "Robust control with redundancy resolution and dynamic compensation for mobile manipulators," in *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1469-1474.  
 [12] O. Khatib, "Motion/force redundancy of manipulators," in *Proceedings of Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, 1990, pp. 337-342.  
 [13] L. Sentis and O. Khatib, "Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 2, pp. 505-518, 2005.  
 [14] E. S. Lucio R. Salinas, Sebastián García and Vicente A. Mut, "Stable PD-like controllers for delayed bilateral teleoperation of mobile robots," *Asian Journal of Control*, vol. Vol. 00, 2014.  
 [15] J. Park and O. Khatib, "Robust haptic teleoperation of a mobile manipulation platform," in *Experimental Robotics IX*, ed: Springer, 2006, pp. 543-554.