

Intercontinental Bilateral-by-Phases Teleoperation of a Humanoid Robot

Viviana Moya, Emanuel Slawiński, Vicente Mut, and Bernardo Wagner

Resumen—This document proposes a control scheme applied to delayed bilateral-by-phases teleoperation of the locomotion and manipulation of a humanoid robot, where each phase works depending on the decision of the human operator. Besides, balance control, adaptive controller, and force feedback are applied. The implementation is described and the results obtained from experiments of intercontinental teleoperation for a pick and place task with a NAO robot-driven at distance with a haptic device, are shown and summarized.

Index Terms—Locomotion, manipulation, intercontinental bilateral teleoperation, time delay, humanoid robot.

I. INTRODUCCIÓN

LOS crecientes avances tecnológicos en el campo de la robótica, en particular la robótica humanoide como el desarrollo de proyectos como QRIO, ONDA, ATLAS, NAO y ASIMO, han permitido a los investigadores desarrollar robots que pueden simular el comportamiento humano de una manera más similar a otro tipo de máquinas y ser utilizados en trabajos de alto riesgo como: tareas de rescate, búsqueda, inspección de plantas nucleares, desactivación de explosivos o defensa, o en áreas de asistencia y ayuda como rehabilitación, u otros [1].

En un robot humanoide, es necesario controlar la locomoción bípeda [2] y manipulación [3], así como también considerar los efectos que una produce sobre la otra, y las fuerzas que aparecen, cuando dicho robot levanta un objeto y lo transporta [4]. Por otra parte, la teleoperación de robots permite transportar las capacidades de un operador humano a entornos de trabajo remotos [5]. En estos sistemas, un operador humano ubicado en un sitio local envía comandos de control a un robot ubicado en un entorno distante mientras recibe simultáneamente realimentación visual, sonora, y táctil de fuerza. En este trabajo se estudiarán los sistemas de teleoperación bilateral con retardo de tiempo y realimentación de fuerza. Debido a la complejidad que implica controlar muchos grados de libertad de forma bilateral en locomoción y manipulación, la mayoría de trabajos en el estado de arte recurren al uso de dispositivos hápticos complejos y costosos. El trabajo presentado en [6] utiliza un HMI (Interfaz Humano-Máquina) que permite teleoperar un humanoide utilizando seguimiento de torso y pies, así como también una superficie que estima el centro de masa del operador durante la tarea

con un buen desempeño, pero elevado costo de implementación. Para manipulación, el trabajo de [7] teleopera los brazos de un robot JUSTIN a través de una interfaz humano-máquina multimodal con brazos robóticos ligeros y un casco de visualización que permite realizar tareas de precisión con realimentación de fuerza y visual. La combinación de locomoción y manipulación se puede encontrar en [3], [8], en donde se utiliza un traje con sensores de movimiento que mapean las acciones del operador y las envían al robot. Otras investigaciones utilizan dispositivos más económicos como joysticks hápticos con 3 o 6 grados de libertad (GDL) para implementar tareas de locomoción y manipulación [9], o únicamente tareas de locomoción [10] en donde se controlan las piernas del humanoide y la realimentación de fuerza se basa en el Punto de Momento Cero (ZMP).

Este documento presenta un sistema de teleoperación bilateral controlado por fases para la locomoción (velocidad de avance y giro) y manipulación (control del efector final de uno de los brazos del robot) de un robot humanoide. El principal aporte de esta investigación consiste en la propuesta de un esquema de mapeo y control bilateral para obtener un comportamiento estable en presencia de retardos de tiempo variables para realizar una tarea de levantar, transportar y colocar un objeto utilizando un dispositivo háptico de 3GDL de bajo costo para manejar un robot humanoide con 25GDL, y como se desarrollaron e integraron las tareas de locomoción, manipulación, realimentación de fuerza y equilibrio en el sistema propuesto de teleoperación. Finalmente, se realizó un experimento real de teleoperación bilateral de un robot NAO entre Alemania y Argentina a través de Internet.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección II se presentan los modelos del maestro y esclavo utilizados. En la Sección III se describe el controlador para la teleoperación bilateral por fases. Luego, la Sección IV muestra los resultados obtenidos cuando un operador humano ubicado en San Juan-Argentina maneja un robot humanoide NAO ubicado en Hannover-Alemania. Finalmente, las conclusiones se presentan en la Sección V.

II. MODELOS

II-A. Modelo del maestro para locomoción y manipulación

En este artículo, se eligió un Novint Falcon como dispositivo maestro. El modelo dinámico del maestro (m) para locomoción (l) y manipulación (m) es modelado como un robot manipulador en coordenadas cartesianas, cuyo modelo dinámico clásico está dado por:

$$\mathbf{M}_{mi}\ddot{\mathbf{x}}_{mi} + \mathbf{C}_{mi}\dot{\mathbf{x}}_{mi} + \mathbf{g}_{mi} = \mathbf{f}_{mi} + \mathbf{f}_h, \quad (1)$$

Viviana Moya, Emanuel Slawiński and Vicente Mut are with the Instituto de Automática (INAUT), Universidad Nacional de San Juan, J5400ARL Argentina. E-mail: vmoya@inaut.unsj.edu.ar, slawinski@unsj.edu.ar, vmut@inaut.unsj.edu.ar.

Bernardo Wagner, is at Real-Time Systems Group, Leibniz Universität Hannover, D-30167, Germany. E-mail:wagner@rts.uni-hannover.de

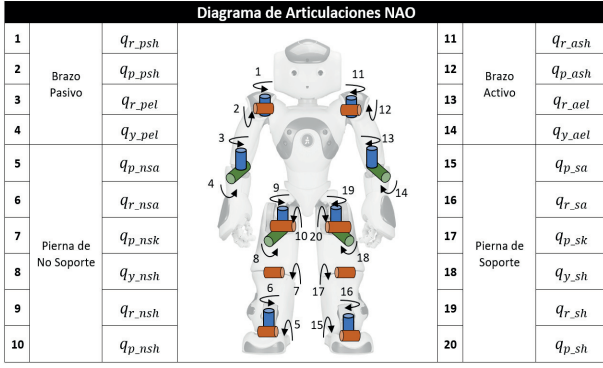


Figura 1. Representación de las articulaciones.

donde el subíndice i puede ser igual a l para locomoción y m para manipulación, $\mathbf{x}_{ml} = [x_{mv} \ x_{m\delta}]^T \in R^{nm \times 1}$ y $\dot{\mathbf{x}}_{ml}$ son las posiciones y velocidades del maestro de locomoción, $\mathbf{x}_{mm} \in R^{nm \times 1}$ y $\dot{\mathbf{x}}_{mm}$ son las posiciones y velocidades del maestro de manipulación, $\mathbf{M}_{m(l,m)} \in R^{nm(l,m) \times nm(l,m)}$ es la matriz de inercia, $\mathbf{C}_{m(l,m)} \in R^{nm(l,m) \times nm(l,m)}$ es la matriz que representa las fuerzas centrípetas y de coriolis, $\mathbf{g}_{m(l,m)} \in R^{nm(l,m)}$ es el vector de la fuerza de gravedad, \mathbf{f}_h es la fuerza del operador humano y $\mathbf{f}_{m(l,m)}$ es la acción de control aplicada al maestro.

II-B. Modelo del esclavo- Robot humanoide

La alta complejidad de un robot humanoide se refleja en un comportamiento híbrido que se modela como una dinámica continua y discreta [2]. La dinámica continua está presente durante la fase de locomoción cuando una de las piernas del robot se balancea en el aire y la dinámica discreta aparece cuando el pie golpea el suelo, causando respuestas impulsivas.

II-B1. Dinámica Continua (Fase de Oscilación): El ciclo de caminata consiste en una fase de apoyo simple (balanceo u oscilación) y una fase de apoyo doble (impacto) [12]. El modelo dinámico continuo puede ser representado por:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g} = \mathbf{B}_l \mathbf{u}_l + \mathbf{B}_m \mathbf{u}_m + \boldsymbol{\tau}_{ext}. \quad (2)$$

donde $\mathbf{q} \in R^n$ con n que representa el número total de articulaciones del robot a utilizar como se observa en la Fig.1, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ es la matriz de inercia, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{n \times n}$ es la matriz centrípeta y de coriolis, $\mathbf{g} \in R^n$ es el vector gravedad. Las matrices \mathbf{B}_l y \mathbf{B}_m distribuyen las entradas \mathbf{u}_l , \mathbf{u}_m que contienen los torques aplicados a las piernas y brazos respectivamente y $\boldsymbol{\tau}_{ext} = \mathbf{J}_{AU}^T \mathbf{F}_e$ son los torques externos, donde \mathbf{J}_{AU} es el jacobiano y \mathbf{F}_e son las fuerzas externas. El modelo dinámico del humanoide (2) entre impactos sucesivos y el vector de estados $\mathbf{x} := [\mathbf{q}^T \ \dot{\mathbf{q}}^T]^T$, puede ser representado en el espacio de estados como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_l(\mathbf{x}) \mathbf{u}_l + \mathbf{g}_m(\mathbf{x}) \mathbf{u}_m + \mathbf{g}_e(\mathbf{x}) \mathbf{F}_e, \quad (3)$$

donde $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) [-\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q})] \end{bmatrix}$, $\mathbf{g}_l(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}_l \end{bmatrix}$, $\mathbf{g}_m(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}_m \end{bmatrix}$, $\mathbf{g}_e(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_{AU}^T(\mathbf{q}) \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{el} \\ \mathbf{F}_{em} \end{bmatrix}$, donde \mathbf{F}_{el} es la

fuerza externa de locomoción y \mathbf{F}_{em} es la fuerza externa de manipulación. La fase de apoyo simple continúa hasta que el pie de oscilación impacta en el suelo delante de la pierna de apoyo y se crea un impulso dando lugar a la siguiente fase.

II-B2. Dinámica Discreta (Fase de doble soporte): Cuando el pie oscilante impacta en el suelo, el sistema entra en la fase de doble soporte que incluye un modelo de impacto que captura la física de la interacción pie-suelo. Aquí se analizan las dinámicas discretas del robot que determinan cómo cambian las velocidades cuando el pie impacta en el suelo, mientras que al mismo tiempo las piernas cambian de una posición a otra y viceversa. En particular, el mapa de reseteo representa la conmutación entre las piernas de apoyo y de balanceo y determina el cambio de velocidad debido al impacto [11]. Es importante mencionar que una dinámica estable y continua entre impactos no garantiza una dinámica estable del sistema híbrido [2], [12], sin embargo, si la velocidad de convergencia entre impactos es suficientemente alta entonces se puede asegurar una dinámica híbrida estable [11].

III. CONTROLADOR DEL SISTEMA DE TELEOPERACIÓN BILATERAL RETARDADA

El esquema de control propuesto busca realizar la teleoperación para locomoción y manipulación de un robot humanoide utilizando no solamente el modelo cinemático del mismo, sino también el modelo dinámico, a través de la implementación de un controlador en el esclavo expresado en la notación de Lie, lo cual nos permite enlazar ambos modelos. Como se puede observar en la Fig.2, el esquema permite teleoperar bilateralmente por fases la locomoción (velocidad de avance y giro) y manipulación (efector final del brazo activo (izquierdo)) de un robot humanoide para realizar una tarea de levantar, transportar y colocar un objeto. En la fase de locomoción se controla bilateralmente la velocidad de avance y giro de un robot humanoide, mientras que los brazos continúan trabajando autónomamente. Cuando se da inicio a la fase de manipulación se teleopera el brazo izquierdo, se aplica un control de equilibrio y se detiene la locomoción, es decir, solo una fase funciona a la vez. Para transportar el objeto, se activa la fase de locomoción y el brazo se fija en la última posición de manipulación. El controlador de teleoperación bilateral está formado por la realimentación de fuerza aplicada al maestro de locomoción \mathbf{f}_{ml} , al maestro de manipulación \mathbf{f}_{mm} , la acción de control \mathbf{f}_{sl} aplicada al esclavo equivalente (Sección III.G) para manejar la velocidad de avance y giro, y la acción de control \mathbf{f}_{sm} aplicada al brazo del robot. Los intervalos de tiempo para la ejecución de cada tarea se establecen en base a la Fig.3. Las ecuaciones del controlador con sus intervalos de trabajo son: $\mathbf{f}_{ml}, \mathbf{f}_{sl}$ para $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 1, 3, 5$, y $\mathbf{f}_{mm}, \mathbf{f}_{sm}$ para $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 2, 4$:

$$\mathbf{f}_m(t) = \begin{cases} \mathbf{f}_{ml} = -\mathbf{k}_{ml}(\mathbf{k}_{gl} \mathbf{x}_{ml} - \mathbf{z}(t - h_2)) + \mathbf{g}_{ml}(\mathbf{x}_{ml}) - \boldsymbol{\alpha}_{ml} \dot{\mathbf{x}}_{ml} \\ \mathbf{f}_{mm} = -\mathbf{k}_{mm}(\mathbf{k}_{gm} \mathbf{x}_{mm} - \mathbf{y}_{sm}(t - h_2)) + \mathbf{g}_{mm}(\mathbf{x}_{mm}) - \boldsymbol{\alpha}_{mm} \dot{\mathbf{x}}_{mm} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_s(t) = \begin{cases} \mathbf{f}_{sl} = \mathbf{k}_{sl}(\mathbf{y}_{ml} - \mathbf{z}) - \boldsymbol{\sigma}_{sl} \dot{\mathbf{z}} \\ \mathbf{f}_{sm} = \mathbf{k}_{sm}(\mathbf{k}_{gm} \mathbf{x}_{mm}(t - h_1) - \mathbf{y}_{sm}) - \boldsymbol{\sigma}_{sm} \dot{\mathbf{y}}_{sm} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_{ml} = \begin{cases} \mathbf{k}_{gl} \mathbf{x}_{ml}(t - h_1) - T \dot{\mathbf{y}}_{ml} & t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 1, 3, 5 \\ 0 & t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 2, 4 \end{cases} \quad (6)$$

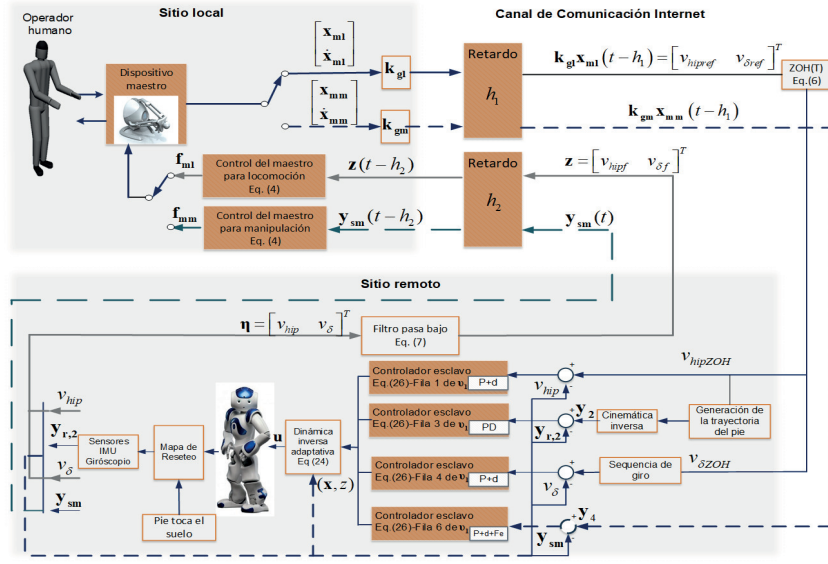


Figura 2. Esquema general del sistema de teleoperación retardado.

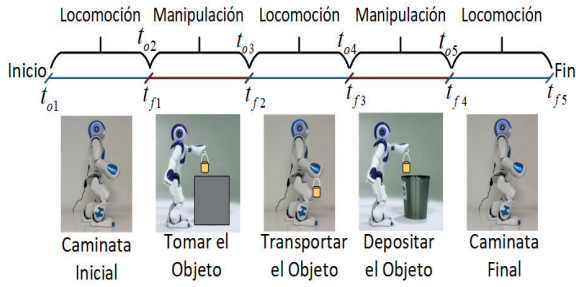


Figura 3. Definición de intervalos de tiempo para el esquema propuesto.

donde k_{ml}, k_{mm}, k_{sm} y $k_{sl} = \begin{bmatrix} k_v & 0 \\ 0 & k_\delta \end{bmatrix}$ son matrices de ganancias positivas cada una de diferente valor; k_{gl} mapea linealmente la posición del maestro a una velocidad de avance de referencia y a una velocidad de giro de referencia y k_{gm} mapea linealmente la posición del maestro de manipulación a la referencia del efector final; α_{ml} y α_{mm} son coeficientes de amortiguación lineal inyectados en el maestro; σ_{sl} es el coeficiente de amortiguación lineal inyectado al robot esclavo equivalente y σ_{sm} es la amortiguación lineal inyectada en el brazo del robot; T es el tiempo de ciclo de caminata y z se calcula por:

$$z = \eta - \beta \dot{z} \quad (7)$$

con $\beta > 0$. Es importante mencionar que (6) representa la aproximación de un retenedor de orden cero para bajas frecuencias con muestreo igual al tiempo de ciclo de caminata T . La referencia de velocidad de avance y giro cambian al inicio de cada nuevo ciclo de caminata. Este tiempo de espera se estableció para ayudar al robot a caminar de forma más estable y poder alcanzar las referencias [13]. Una vez definidas las leyes de control de teleoperación, en las siguientes secciones se explica todas las variables para controlar el robot humanoide, se define un vector de error para controlar la velocidad de

avance, velocidad de giro, el efector final del brazo activo y se define un control esclavo de lazo cerrado.

III-A. Error de velocidad de avance

El error de velocidad de avance está definido dentro de los intervalos de locomoción $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 1, 3, 5$ como:

$$\dot{y}_1(t) = \dot{y}_1(t) - v_{hip}(t), \quad (8)$$

donde \dot{y}_1 es la velocidad de avance de referencia, dada por:

$$\dot{y}_1(t) = \begin{cases} v_{hipZOH} & t_{oi} \leq t \leq t_{fi} & i = 1, 3, 5 \\ 0 & t_{oi} \leq t \leq t_{fi} & i = 2, 4 \end{cases} \quad (9)$$

y v_{hip} , es la velocidad real del humanoide obtenida mediante linealización basada en [11].

$$p_{hip}(\mathbf{q}) = a_1(-q_{p_{sa}}) + a_2(-q_{p_{sa}} - q_{p_{sk}}), \quad (10)$$

$$v_{hip} = \frac{d}{dt} p_{hip}(\mathbf{q}),$$

donde a_1, a_2 son las longitudes de los eslabones de las piernas.

III-B. Ángulos de error para el control de la longitud del paso de caminata

El error en la longitud del paso de caminata durante los intervalos de locomoción $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 1, 3, 5$ se representa como:

$$\tilde{y}_2(t) = y_2(t) - y_{r,2}(t), \quad (11)$$

donde $y_2(t)$ son los ángulos de referencia dados para cada articulación. Las referencias para los ángulos de rodillas y caderas se encuentran usando cinemática inversa calculada a partir de una trayectoria cartesiana generada con datos de altura de elevación del pie y ancho del paso, los cuales son usados para interpolar una forma de paso para distintos rangos de velocidad de avance y tiempos de ciclo de caminata. Las referencias para los ángulos de los tobillos se obtienen considerando que el torso debe mantenerse siempre perpendicular

al suelo usando la [Ecuación (15), [11]]. Por lo tanto, las referencias son:

$$\mathbf{y}_2(t) = [q_{p_nsa} \quad q_{p_sa} \quad q_{p_nsk} \quad q_{p_sk} \quad q_{p_nsh} \quad q_{p_sh}]^T,$$

mientras que:

$$\mathbf{y}_{r,2}(t) = [q_{p_nsar} \quad q_{p_sar} \quad q_{p_nskr} \quad q_{p_skr} \quad q_{p_nshr} \quad q_{p_shr}]^T$$

son los ángulos reales del plano sagital.

III-C. Error de velocidad del giro

El error de velocidad de giro durante los intervalos de locomoción $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 1, 3, 5$, se describe como:

$$\dot{y}_3(t) = \dot{y}_3(t) - v_\delta(t), \quad (12)$$

donde \dot{y}_3 es la velocidad de giro de referencia y está dada por:

$$\dot{y}_3(t) = \begin{cases} v_{\delta ZOH} & t_{oi} \leq t \leq t_{fi} & i = 1, 3, 5 \\ 0 & t_{oi} \leq t \leq t_{fi} & i = 2, 4 \end{cases} \quad (13)$$

y $v_\delta(t) = f(q_{y_sh}, q_{y_nsh})$ es la velocidad actual de giro del robot humanoide obtenida de la derivada del ángulo de giro del robot $\delta(t)$:

$$v_\delta(t) = \frac{d}{dt} \delta(t). \quad (14)$$

La referencia de giro no afecta al control en el plano sagital debido a la propiedad de invariancia mostrada en [14], y los ángulos de referencia para el giro de la cadera dependen de la velocidad angular de referencia y se obtienen a través de una secuencia heurística basada en [15].

III-D. Error de manipulación

El error de manipulación en coordenadas cartesianas definido dentro de los intervalos de manipulación $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}; i = 2, 4$ se representa como:

$$\tilde{\mathbf{y}}_4(t) = \mathbf{y}_4(t) - \mathbf{y}_{sm}(t), \quad (15)$$

donde \mathbf{y}_4 es la referencia de manipulación del efector final en coordenadas cartesianas, dada por:

$$\mathbf{y}_4(t) = \begin{cases} 0 & t_{oi} \leq t \leq t_{fi} & i = 1, 3, 5 \\ \mathbf{k}_{gm} \mathbf{x}_{mm} & t_{oi} \leq t \leq t_{fi} & i = 2, 4 \end{cases} \quad (16)$$

\mathbf{y}_{sm} se obtiene usando cinemática directa para calcular la posición real del efector final (mano activa) en relación a un sistema de coordenadas que toma como referencia al hombro y conociendo los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. Finalmente, el error de coordinación del sistema bilateral retardado se define como:

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) := [\tilde{y}_1 \quad \tilde{y}_2 \quad \dot{\tilde{y}}_3 \quad \tilde{y}_4]. \quad (17)$$

III-E. Control de balance

Para llevar a cabo adecuadamente la tarea de manipulación, en la que un robot humanoide camina llevando un objeto para colocarlo en una posición deseada, hay que tener en cuenta el peso del objeto que llevará el robot y sus efectos durante la ejecución de la tarea. Si el patrón de caminata se genera sin considerar el objeto transportado ni el movimiento de los brazos, el robot humanoide puede caer. En este trabajo se aplican dos tipos de compensación: una en el plano frontal y otra en el plano lateral, como se muestra a continuación:

III-E1. Compensación frontal: El ángulo a compensar cuando el robot camina hacia adelante es $q_{torsomf}$ y se calcula a través de un análisis de fuerzas estáticas para mantener el torso en un ángulo de inclinación que compense las fuerzas causadas por la posición de los brazos y el objeto agarrado, como se muestra en la Fig.4a. En primer lugar, cuando se realiza la tarea de locomoción, luego que el brazo agarró el objeto, se ejecuta un cambio en la generación de referencias de caminata. Entonces, se mide el ángulo del torso respecto a un eje perpendicular al suelo como:

$$q_{torso} = q_{torsol} + q_{torsomf} = q_{p_sh} + q_{p_sk} + q_{p_sa} = 0 \quad (18)$$

donde q_{torsol} es el ángulo del torso durante la fase de locomoción y es aproximadamente cero, al igual que el ángulo del torso de manipulación $q_{torsomf}$. Al comenzar la tarea de manipulación, $q_{torsomf}$ se calcula de la siguiente manera:

$$\sum \tau_{aa} + \sum \tau_{nsl} = \sum \tau_{(torso+head)}(q_{torsomf}), \quad (19)$$

donde el subíndice aa se refiere al brazo activo y el subíndice nsl indica la pierna de no postura u oscilación. Con este ángulo se propone que, para mantener el torso perpendicular al suelo este valor se compensará en los ángulos del tobillo (plano sagital) como se describe a continuación:

$$q_{p_sa} = -(q_{p_sh} + q_{p_sk}) + q_{torsomf} \quad (20)$$

III-E2. Compensación lateral: El objetivo de este control es compensar el efecto del brazo mientras está estirado lateralmente durante la tarea de manipulación. Cuando el brazo está en la posición que se muestra en la Fig.4b, el robot comienza a girar involuntariamente a medida que el centro de masa se desplaza, por lo que se realiza un análisis de fuerza estática desde la vista frontal del robot. El ángulo a compensar $q_{torsoml}$ está representado por:

$$\sum \tau_{aa} = \sum \tau_{(torso+head)}(q_{torsoml}), \quad (21)$$

Este ángulo se aplica al ángulo del hombro del brazo pasivo q_{r_psh} para moverlo de manera similar a como lo hace una persona para mejorar su equilibrio con el objetivo de devolver el centro de masa a una posición que le permita caminar en línea recta.

III-F. Control del esclavo en lazo cerrado

El modelo dinámico (3) es usado para representar el error dinámico $\mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ a través de la notación de la derivada de Lie como:

$$\dot{\mathbf{y}}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = L_f^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + L_g L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + L_{g_e} L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{F}_e, \quad (22)$$

donde $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ se basa en el vector de error (17) y está adaptado para trabajar simultáneamente con errores de velocidad y posición. Luego, se define $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) := [f \dot{y}_1 \quad \tilde{y}_2^T \quad f \dot{y}_3 \quad \tilde{y}_4^T]^T$, y $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = [\mathbf{g}_1^T(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad \mathbf{g}_m^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})]^T$. El controlador de linealización de retroalimentación basado en [12] se establece como:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -L_g L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z})^{-1} (L_f^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + L_{g_e} L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mathbf{F}_e + \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{z})). \quad (23)$$

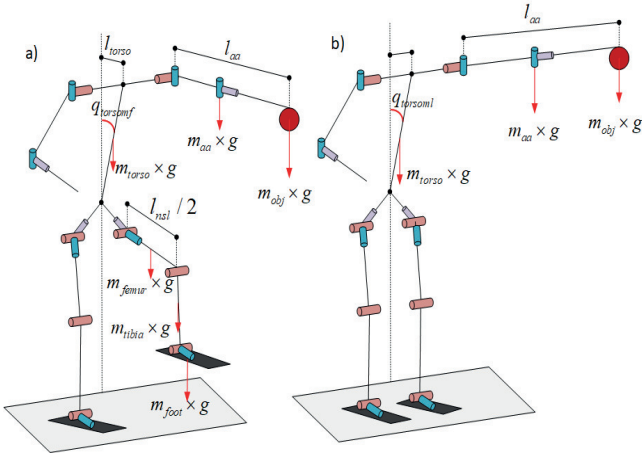


Figura 4. Análisis estático de fuerzas para manipulación. a) Compensación Frontal, b) Compensación Lateral

Una desventaja de (23) es que requiere un modelo dinámico exacto. Entonces, si consideramos incertidumbres en la dinámica y consideramos funciones estimadas, (23) queda reformulada como [16]:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z})^{-1}(L_{\hat{f}}^2\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + L_{\hat{g}_e}L_{\hat{f}}\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{F}_e + \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{z})). \quad (24)$$

Por lo tanto, reemplazando (24) en (22) se tiene:

$$\ddot{\mathbf{y}}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \boldsymbol{\theta}, \quad (25)$$

donde

$$\boldsymbol{\theta} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3\mathbf{v},$$

$$\Delta_1 = L_{\hat{f}}^2\mathbf{h}(\mathbf{x}) - L_gL_f\mathbf{h}(\mathbf{x})(L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}\mathbf{h}(\mathbf{x}))^{-1}L_{\hat{f}}^2\mathbf{h}(\mathbf{x}),$$

$$\Delta_2 = L_{g_e}L_f\mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{F}_e - L_gL_f\mathbf{h}(\mathbf{x})(L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}\mathbf{h}(\mathbf{x}))^{-1}L_{\hat{g}_e}L_{\hat{f}}\mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{F}_e,$$

$$\Delta_3 = L_gL_f\mathbf{h}(\mathbf{x})(L_{\hat{g}}L_{\hat{f}}\mathbf{h}(\mathbf{x}))^{-1}L_{\hat{f}}^2\mathbf{h}(\mathbf{x}) - I.$$

Para compensar las incertidumbres, se propone un controlador combinado con $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$, donde la primera parte \mathbf{v}_1 , permite seguir el modelo de referencia deseado considerando un perfecto conocimiento de la dinámica inversa, y la segunda parte \mathbf{v}_2 , compensa la incertidumbre no lineal $\boldsymbol{\theta}$. A partir de (22) la dinámica de lazo cerrado del error en el espacio de estados se representa como:

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{F}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{v}_1 + (\mathbf{v}_2 + \boldsymbol{\theta}), \quad (26)$$

donde $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\tilde{y}}_1, \dot{\tilde{y}}_2, \dot{\tilde{y}}_2, \dot{\tilde{y}}_3, \dot{\tilde{y}}_4, \dot{\tilde{y}}_4]^T$, $\mathbf{v}_1 = \mathbf{K}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{H}\mathbf{F}_e$,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{M}_{sm}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -\frac{M^{-1}k_v}{1+\sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\varepsilon^2} & -\frac{1}{\varepsilon} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{I^{-1}k_\delta}{1+\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{M}_{sm}^{-1}\mathbf{k}_{sm} & -\mathbf{M}_{sm}^{-1}\boldsymbol{\sigma}_{sm} \end{bmatrix}$$

donde σ, τ y $\boldsymbol{\sigma}_{sm}$ son los amortiguamientos inyectados, k_v, k_δ y \mathbf{k}_{sm} son ganancias proporcionales, $\varepsilon > 0$ es una ganancia de control, I, M y \mathbf{M}_{sm} son matrices de inercia del modelo de referencia y $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{\omega}, t)$ define las incertidumbres no lineales.

De [17] podemos encontrar $\boldsymbol{\psi}(t)$, $\boldsymbol{\phi}(t)$ y $\boldsymbol{\vartheta}(t)$ tal que:

$$\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{\omega}, t) = \boldsymbol{\psi}(t)\|\boldsymbol{\omega}\| + \boldsymbol{\phi}(t)\|\mathbf{F}_e\| + \boldsymbol{\vartheta}(t). \quad (27)$$

A partir de (26), el predictor de estado es expresado como:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}} = \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\omega}} + \hat{\mathbf{v}}_1 + (\mathbf{v}_2 + \hat{\boldsymbol{\theta}}), \quad (28)$$

donde

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\psi}}(t)\|\boldsymbol{\omega}\| + \hat{\boldsymbol{\phi}}(t)\|\mathbf{F}_e\| + \hat{\boldsymbol{\vartheta}}(t), \quad (29)$$

y \mathbf{v}_2 se escoge como $\mathbf{v}_2 = -\hat{\boldsymbol{\theta}}$. Definiendo $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \hat{\boldsymbol{\omega}} - \boldsymbol{\omega}$, su evolución puede ser escrita a partir de (26) y (28) como:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}} = \mathbf{F}\tilde{\boldsymbol{\omega}} + \tilde{\mathbf{v}}_1 + \tilde{\boldsymbol{\theta}}, \quad (30)$$

donde $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta} = [\tilde{\boldsymbol{\theta}}_v, 0, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_g, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_\delta, 0, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m]^T$. Como resultado, $\boldsymbol{\theta}$ es estimado indirectamente a través de $\boldsymbol{\psi}$, $\boldsymbol{\phi}$ y $\boldsymbol{\vartheta}$, y los valores $\hat{\boldsymbol{\psi}}$, $\hat{\boldsymbol{\phi}}$ y $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ son computados por las siguientes leyes de adaptación basadas en los operadores de proyección [17]:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}} = \boldsymbol{\Gamma}\text{Proj}(\hat{\boldsymbol{\psi}}, \mathbf{y}_\psi), \quad \dot{\hat{\boldsymbol{\phi}}} = \boldsymbol{\Gamma}\text{Proj}(\hat{\boldsymbol{\phi}}, \mathbf{y}_\phi), \quad \dot{\hat{\boldsymbol{\vartheta}}} = \boldsymbol{\Gamma}\text{Proj}(\hat{\boldsymbol{\vartheta}}, \mathbf{y}_\vartheta), \quad (31)$$

donde $\boldsymbol{\Gamma}$ es una matriz simétrica definida positiva y las funciones de proyección se definen como:

$$\mathbf{y}_\psi = \tilde{\boldsymbol{\omega}}\|\boldsymbol{\omega}\|, \quad \mathbf{y}_\phi = \tilde{\boldsymbol{\omega}}\|\mathbf{F}_e\|, \quad \mathbf{y}_\vartheta = \tilde{\boldsymbol{\omega}}.$$

III-G. Estabilidad Híbrida y de Teleoperación

■ Estabilidad Híbrida

El robot humanoide tiene un comportamiento híbrido (continuo y discreto). De (17) se obtiene que $\mathbf{e}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \rightarrow 0$ en la dinámica continua del robot humanoide (entre impactos) y para utilizar las leyes de teleoperación de tiempo continuo, se propone un esclavo equivalente continuo que acote por arriba, como se muestra en la Fig.5 y está dado por:

$$\mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{f}_{sl} - \mathbf{F}_e\mathbf{l} - \tilde{\boldsymbol{\theta}}_l, \quad (32)$$

$$\ddot{\mathbf{y}}_{sm} = \mathbf{M}_{sm}^{-1}(\mathbf{f}_{sm} + \mathbf{F}_{em} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m), \quad (33)$$

donde (33) esta basada en (26) y $\boldsymbol{\eta}$ es la velocidad del esclavo equivalente, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$, \mathbf{f}_{sl} es la acción de control

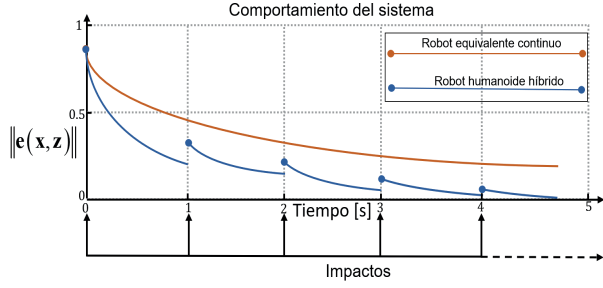


Figura 5. Evolución del comportamiento del sistema híbrido.

aplicada al esclavo y \mathbf{F}_{e1} es la fuerza del ambiente dada por: $\mathbf{F}_{e1} = \alpha_e \boldsymbol{\eta} + \mathbf{f}_{a_e}$ donde α_e es el coeficiente de amortiguamiento del ambiente y $\mathbf{f}_{a_e} \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ representa una perturbación de energía finita no modelada con $\|\mathbf{f}_{a_e}\| \leq \bar{f}_{a_e}$ y $\|\dot{\mathbf{f}}_{a_e}\|$ también acotada, siendo \bar{f}_{a_e} un valor positivo. $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_l = [\tilde{\boldsymbol{\theta}}_v \quad \tilde{\boldsymbol{\theta}}_\delta]^T$ y $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_m$ son las incertidumbres no lineales que sostiene $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_l, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m \in \mathcal{L}_\infty$.

■ Análisis de Estabilidad de Teleoperación

Las propiedades y suposiciones que se utilizan en este documento se detallan en [20], [21]. Aquí, se analiza la estabilidad del sistema de teleoperación propuesto.

Un funcional definido positivo para **Locomoción**: $V_l(t, \mathbf{x}_l)$ con $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}$ para $i = 1, 3, 5$, donde: $V_l(t, \mathbf{x}_l) = V_{l1} + V_{l2} + V_{l3} + V_{l4}$ con $\mathbf{x}_{lm} := [\dot{\mathbf{x}}_{ml}, \mathbf{k}_{gl}\mathbf{x}_{ml} - \mathbf{z}, \mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}]$ es construido para evaluar la evolución del sistema de locomoción a partir de una condición inicial finita. El funcional V_l esta dado por:

$$V_{l1} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}_{ml}^T \mathbf{M}_{ml}(\mathbf{x}_{ml}) \dot{\mathbf{x}}_{ml} + E_h, \quad (34)$$

$$V_{l2} = \frac{1}{2} \frac{\mathbf{k}_{ml}}{\mathbf{k}_{gl}} (\mathbf{k}_{gl}\mathbf{x}_{ml} - \mathbf{z})^T (\mathbf{k}_{gl}\mathbf{x}_{ml} - \mathbf{z}) \quad (35)$$

$$V_{l3} = \frac{1}{2} \gamma \frac{\mathbf{k}_{ml}}{\mathbf{k}_{sl}\mathbf{k}_{gl}} \dot{\mathbf{z}}^T \mathbf{D} \dot{\mathbf{z}}, \quad (36)$$

$$V_{l4} = \int_{-\bar{h}_2}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{z}}(\xi)^T \dot{\mathbf{z}}(\xi) d\xi d\theta + \mathbf{k}_{gl}^2 \int_{-\bar{h}_1}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{x}}_{ml}(\xi)^T \dot{\mathbf{x}}_{ml}(\xi) d\xi d\theta. \quad (37)$$

Un funcional definido positivo para **Manipulación**: $V_m(t, \mathbf{x}_m)$ con $t_{oi} \leq t \leq t_{fi}$ para $i = 2, 4$, donde: $V_m(t, \mathbf{x}_m) = V_{m1} + V_{m2} + V_{m3}$ con $\mathbf{x}_m := [\dot{\mathbf{x}}_{mm}, \mathbf{k}_{gm}\mathbf{x}_{mm} - \mathbf{y}_{sm}, \dot{\mathbf{y}}_{sm}]$ es construido para evaluar la evolución del sistema de manipulación a partir de una condición inicial finita. El funcional V_m esta dado por:

$$V_{m1} = \dot{\mathbf{x}}_{mm}^T \mathbf{M}_{mm} \dot{\mathbf{x}}_{mm} + \frac{\mathbf{k}_{mm}}{\mathbf{k}_{sm}} \dot{\mathbf{y}}_{sm}^T \mathbf{M}_{sm} \dot{\mathbf{y}}_{sm} + E_h + \frac{\mathbf{k}_{mm}}{\mathbf{k}_{sm}} E_e, \quad (38)$$

$$V_{m2} = \mathbf{k}_{mm} (\mathbf{x}_{mm} - \mathbf{y}_{sm})^T (\mathbf{x}_{mm} - \mathbf{y}_{sm}), \quad (39)$$

$$V_{m3} = \int_{-\bar{h}_1}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{x}}_{mm}(\xi)^T \dot{\mathbf{x}}_{mm}(\xi) d\xi d\theta + \int_{-\bar{h}_2}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{y}}_{sm}(\xi)^T \dot{\mathbf{y}}_{sm}(\xi) d\xi d\theta. \quad (40)$$

Siguiendo el procedimiento descrito en [18] para locomoción y [20] para manipulación. \dot{V}_l y \dot{V}_m a lo largo de las trayectorias del sistema de lazo cerrado, considerando el esclavo equivalente (32), la dinámica del brazo (33), la dinámica del maestro de locomoción y manipulación (1), retardo de tiempo, operador humano, y fuerzas del ambiente, están acotados por:

$$\begin{aligned} \dot{V}_l &\leq -\lambda_{ml} \dot{\mathbf{x}}_{ml}^T \dot{\mathbf{x}}_{ml} - \lambda_{sl} \dot{\mathbf{z}}^T \dot{\mathbf{z}} - \rho_{sl} |\dot{\mathbf{z}}|, \\ \dot{V}_m &\leq -\lambda_{mm} \dot{\mathbf{x}}_{mm}^T \dot{\mathbf{x}}_{mm} - \lambda_{sm} \dot{\mathbf{y}}_{sm}^T \dot{\mathbf{y}}_{sm} + \rho_{sm} |\dot{\mathbf{y}}_{sm}|, \end{aligned} \quad (41)$$

donde

$$\begin{aligned} \lambda_{ml} &= \alpha_{ml} \mathbf{I} - \mathbf{k}_{gl}^2 \bar{h}_1 \mathbf{I} - \frac{\mathbf{k}_{ml}^2}{4} \mathbf{h}_2 \mathbf{I}, \\ \lambda_{sl} &= \frac{\mathbf{k}_{ml}}{\mathbf{k}_{sl}\mathbf{k}_{gl}} (\sigma_{sl} \mathbf{I} + \mathbf{D}) - \frac{1}{4} \bar{h}_1 \frac{\mathbf{k}_{ml}^2}{\mathbf{k}_{gl}^2} \mathbf{I} - \bar{h}_2 \mathbf{I}, \\ \lambda_{mm} &= 2\alpha_{mm} \mathbf{I} - \bar{h}_1 \mathbf{I} - \bar{h}_2 \mathbf{k}_{mm}^2, \\ \lambda_{sm} &= 2 \frac{\mathbf{k}_{mm}}{\mathbf{k}_{sm}} \sigma_{sm} \mathbf{I} - \bar{h}_2 \mathbf{I} - \bar{h}_1 \mathbf{k}_{mm}^2 \\ \rho_{sl} &= \frac{\mathbf{k}_{ml}}{\mathbf{k}_{sl}\mathbf{k}_{gl}} (\bar{f}_{a_e} + \tilde{\boldsymbol{\theta}}_l), \quad \rho_{sm} = 2 \frac{\mathbf{k}_{mm}}{\mathbf{k}_{sm}} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m \end{aligned} \quad (42)$$

Resultado 1. Si α_{ml} , σ_{sl} , α_{mm} y σ_{sm} son lo suficientemente altos para cumplir $\lambda_{ml}, \lambda_{sl}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm} > 0$ de (42), entonces podemos señalar de (41) que las variables $\dot{\mathbf{x}}_{ml}, \mathbf{z}, \dot{\mathbf{x}}_{mm}, \dot{\mathbf{y}}_{sm} \in \mathcal{L}_\infty$. Como $\lambda_{ml}, \lambda_{sl}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ son más altas, elevando la amortiguación inyectada, entonces $\dot{\mathbf{x}}_{ml}, \mathbf{z}, \dot{\mathbf{x}}_{mm}, \dot{\mathbf{y}}_{sm}$ permanecerá en una bola más pequeña centrada en el origen. Luego, si (41) se integra con respecto al tiempo, obtenemos:

$$\begin{aligned} V_l(t) - V_l(0) &\leq -\lambda_{ml} \|\dot{\mathbf{x}}_{ml}\|_2^2 - \lambda_{sl} \|\mathbf{z}\|_2^2 - \int_0^t \mathbf{z}(\epsilon)^T \rho_{sl}(\epsilon) d\epsilon \\ V_m(t) - V_m(0) &\leq -\lambda_{mm} \|\dot{\mathbf{x}}_{mm}\|_2^2 - \lambda_{sm} \|\dot{\mathbf{y}}_{sm}\|_2^2 + \int_0^t \dot{\mathbf{y}}_{sm}(\epsilon)^T \rho_{sm}(\epsilon) d\epsilon \end{aligned} \quad (43)$$

Los términos $\int_0^T \mathbf{z}(\epsilon)^T \rho_{sl}(\epsilon) d\epsilon$ y $\int_0^T \dot{\mathbf{y}}_{sm}(\epsilon)^T \rho_{sm}(\epsilon) d\epsilon$ están acotados ya que $\dot{\mathbf{x}}_{ml}, \mathbf{z}, \dot{\mathbf{x}}_{mm}, \dot{\mathbf{y}}_{sm} \in \mathcal{L}_\infty$ y utilizando la demostración de estabilidad de la Sección III.F para estimar las incertidumbres, se concluye que los errores de estimación están acotados ($\tilde{\boldsymbol{\theta}}_l, \tilde{\boldsymbol{\theta}}_m \in \mathcal{L}_\infty$). Entonces, a partir de (43), nosotros inferimos que $V_l(t)$ y $V_m(t)$ están acotados para todo t y por lo tanto $\dot{\mathbf{x}}_{ml}, \mathbf{z}, \dot{\mathbf{x}}_{mm}, \dot{\mathbf{y}}_{sm} \in \mathcal{L}_2$ y $\dot{\mathbf{x}}_{ml}, \mathbf{k}_{gl}\mathbf{x}_{ml} - \mathbf{z}, \mathbf{z}, \dot{\mathbf{z}}, \dot{\mathbf{x}}_{mm}, \mathbf{k}_{gm}\mathbf{x}_{mm} - \mathbf{y}_{sm}, \dot{\mathbf{y}}_{sm} \in \mathcal{L}_\infty$.

IV. EXPERIMENTOS

En esta sección se presentan los resultados experimentales del esquema de control propuesto. La implementación se realizó usando un dispositivo háptico, dos computadores con sistema operativo Windows, un robot NAO, dos cámaras de video conferencia y una pantalla de visualización como se observa en la Fig.6. Para el sitio local hay un proceso para

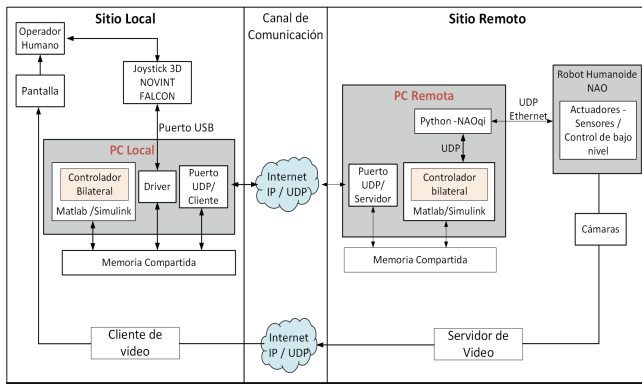


Figura 6. Esquema de implementación del control propuesto.

Leer y escribir al dispositivo Novint Falcon basado en el driver de Force Dimension a través del puerto USB cada 1ms, un proceso de comunicación cliente de datos UDP cada 10ms, un proceso cliente y visualizador de video y un modelo de simulink que implementa el controlador del maestro. Los procesos se comunican entre si por memoria compartida. En el sitio remoto corre el proceso de comunicación del servidor UDP de datos cada 10ms, un proceso servidor de video, un modelo de simulink que implementa el controlador del esclavo, un proceso de comunicación vía UDP entre Matlab/Simulink y el robot humanoide que corre en Python usando la librería API NAOqi proporcionado por el fabricante para enviar comandos a los actuadores y recibir datos desde los sensores del robot real vía Ethernet. En el robot NAO v5 se implementan los PID del control articular y se comunica con la PC externa del sitio remoto. La tasa de muestreo utilizada en la plataforma experimental es de 20 ms (es el período de comunicación entre el robot NAO y una PC externa, los lazos de control de cada actuador corren en un lazo rápido). Los procesos Novint, cliente y servidor fueron desarrollados en lenguaje C++.

Para llevar a cabo la propuesta de teleoperación bilateral por fases, las referencias tanto para locomoción como para manipulación se obtienen a partir de las ecuaciones de la Sección III. Cada fase se activa y desactiva utilizando botones del dispositivo maestro. Primero, se activa la fase de locomoción en donde se teleopera el robot humanoide utilizando 2 grados de libertad del Novint Falcon hasta desplazarse a la mesa en donde se activa la fase de manipulación que utiliza los 3 grados de libertad del joystick. En esta fase se agarra el objeto y para desplazar al humanoide se vuelve a activar únicamente la fase de locomoción y el brazo se queda en la última posición utilizada en la fase de manipulación, esto se realiza hasta que el robot llegue a la caja en donde se teleopera nuevamente el brazo para depositar el objeto, y por último se realiza la tarea de locomoción para llegar al objetivo final. Cada una de estas etapas se muestran en la Fig.7. A lo largo de la prueba, el operador humano recibe realimentación de fuerza y visual para conducir el robot por el camino deseado y realizar la tarea asignada. El operador humano ubicado en San Juan - Argentina utiliza un Novint Falcon como dispositivo maestro para controlar un robot NAO ubicado en Hannover – Alemania a través del Internet. Los

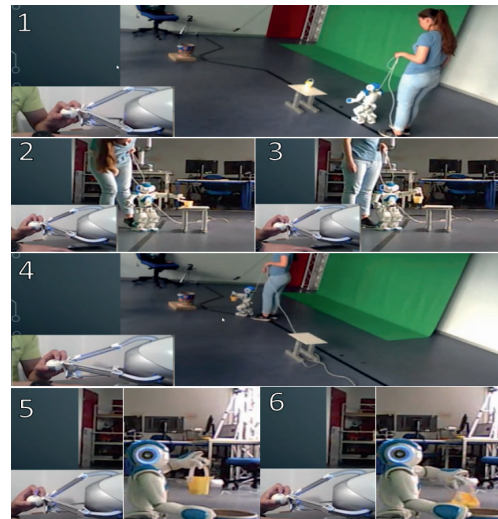


Figura 7. Fases del experimento y espacio de trabajo.

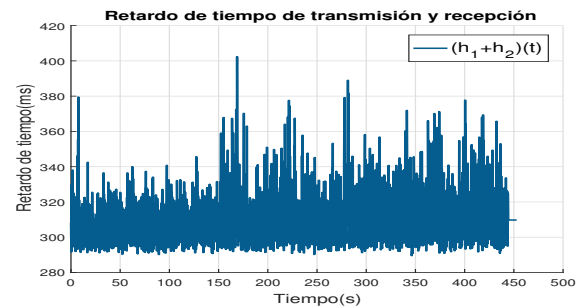


Figura 8. Retardo de tiempo total del canal de comunicación (Internet).

resultados que se muestran a continuación son transportando un objeto de 100g. El retardo de transmisión y recepción presente en el canal de comunicación durante el experimento se muestra en la Fig.8. Las Fig.9 y Fig.10 muestran las fases de teleoperación, con la etiqueta L para locomoción y M para manipulación. En la Fig.9 se muestra la velocidad de avance y giro junto con la realimentación de fuerza para locomoción en el sitio local. Los rangos de operación para cada control son: velocidad de avance de 0 a 10 [cm/s] y velocidad de giro de -10 a 10 [°/s]. En esta figura se visualiza que cuando la velocidad de avance es cero el robot humanoide está realizando la tarea de manipulación. La Fig.10 muestra las posiciones de cada eje de coordenadas del efector final del brazo, en donde se muestra los rangos de teleoperación para manipulación: de 0(s) a 55(s) el brazo está trabajando autónomamente, luego, entre 55 (s) a 105 (s) se teleopera el brazo y se envía realimentación de fuerza al operador, cuando se transporta el objeto durante el intervalo de 105(s) a 200(s) el efector final se queda en la última posición hasta llegar a la caja en donde se vuelve a teleoperar el brazo para depositar el objeto durante el intervalo de 200 (s) a 350 (s). Luego, en el intervalo final de 350 (s) a 450 (s), debido a la posición de la caja donde el objeto fue depositado y la posición del robot, se realiza un giro de radio pequeño con el brazo levantado, permitiendo al NAO volver a seguir el camino marcado sin impactar con la caja. Finalmente, el brazo vuelve a su posición normal, y se realiza

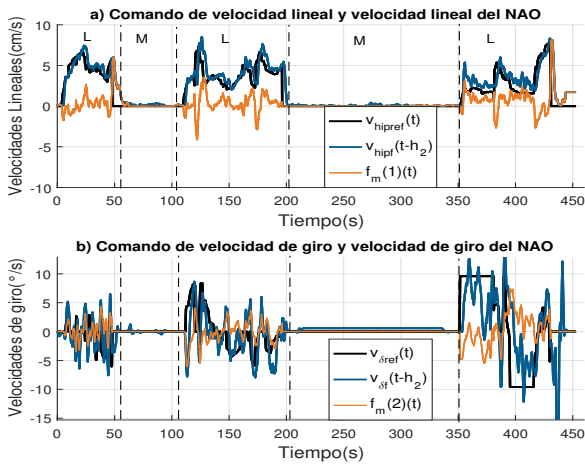


Figura 9. Error de coordinación de la velocidad de avance y giro y señales de realimentación de fuerza para locomoción.

locomoción hasta llegar al punto final. La Fig.11 muestra el camino de referencia que debe seguir el robot y el camino real seguido por el robot teleoperado para realizar la tarea de levantar, transportar y colocar un objeto. Como se pudo visualizar en las figuras anteriores los errores de coordinación están acotados en todo el rango de operación de la prueba. Adicionalmente existen algunas limitaciones que involucran un rango de velocidad de avance relativamente bajo y un bajo nivel de carga que puede levantar el robot. Un video de una de las pruebas realizadas se puede observar en el siguiente enlace: <https://youtu.be/zKrOd1s4Os0>.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un sistema de control de bajo costo para la teleoperación intercontinental de un robot humanoide en presencia de retardos de tiempo variables. Para llevar a cabo este objetivo se implementaron controles de locomoción, manipulación, realimentación de fuerza y balance. La unión de cada uno de estos controles permite desempeñar las distintas fases requeridas durante la ejecución de una prueba de levantar, transportar y colocar un objeto remoto. Adicionalmente se implementó un sistema de realimentación de fuerza que ayuda a controlar de mejor forma las subtareas de locomoción y manipulación. Los resultados obtenidos durante un experimento de teleoperación entre Argentina y Alemania muestran que el esquema propuesto puede ser utilizado en ambientes en donde la presencia humana puede ser difícil o incluso peligrosa.

Como trabajos futuros se pretende realizar un análisis de robustez del sistema propuesto como complemento de esta investigación, incluso se deben comparar cuantitativamente diferentes técnicas para compensar la dinámica del robot humanoide. Es importante remarcar que la técnica de control bilateral aplicada podría ser usada con distintas estrategias de compensación, tales como aquellas basadas en redes neuronales, machine learning, entre otras. También se recomienda la experimentación con múltiples operadores humanos y escenarios con múltiples obstáculos tanto estáticos como dinámicos,

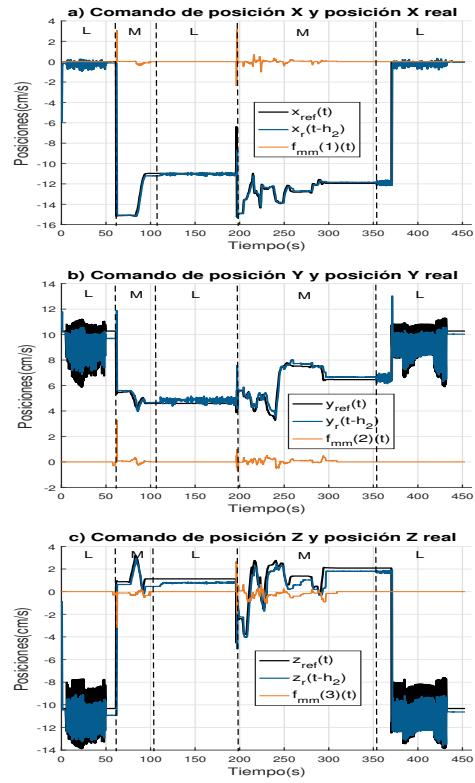


Figura 10. Error de coordinación de las posiciones del efector final del brazo y señales de realimentación de fuerza para manipulación.

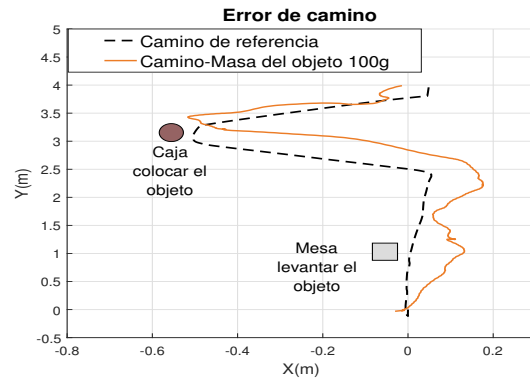


Figura 11. Camino de referencia y camino seguido por el robot transportando un objeto de 100g.

para así obtener un análisis estadístico más amplio. Además es importante analizar cuantitativamente el efecto de la convergencia de los parámetros e incluso una comparación entre diferentes técnicas de adaptación. Finalmente, en la Tabla.I se expone una comparación cualitativa entre la propuesta y otras técnicas del estado del arte, donde la principal diferencia es el mapeo utilizado para teleoperar el robot humanoide usando un solo joystick háptico 3GDL y con un análisis de estabilidad basado en Lyapunov-Krasovskii que considera los retardos de tiempo.

REFERENCIAS

[1] P. Vadakkepat, and A. Goswami, *Humanoid Robotics: A Reference*, Springer Netherlands, 2019, pp.2676.

Tabla I
ANÁLISIS COMPARATIVO

Variable	Propuesta	J.Barros [10]	T. Ando [9]
Escenario de implementación	Experimentos	Simulación	Simulación
Control de los grados de libertad	Control teleoperado de piernas y brazos de forma intermitente usando 1 joystick 3GDL	Control teleoperado de piernas usando 2 PHANTOM joystick(s) 6GDL	Control teleoperado de piernas y brazos de forma intermitente usando 2 joystick(s) 3GDL
Análisis de estabilidad del sistema con retardo	Si	No	No
Tipo de Caminata/Control	Dinámica basada en Lyapunov/Poincaré	Estática basada en ZMP	Estática basada en la posición del centro de gravedad
Realimentación de fuerza	Basado en el error de coordinación bilateral	Basado en el punto de momento cero (ZMP)	No

[2] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle, C. Chevallereau, J. H. Choi, and B. Morris, *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*. Crc Press, Boca Raton, FL, 2007, pp. 528.

[3] L. Penco, N. Scianca, V. Modugno, L. Lanari, G. Oriolo and S. Ivaldi, "A Multimode Teleoperation Framework for Humanoid Loco-Manipulation: An Application for the iCub Robot," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 26, no. 4, pp. 73-82, Dec. 2019.

[4] K. Harada et al., "A Humanoid Robot Carrying a Heavy Object," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1712-1717.

[5] T. B. Sheridan, "Space teleoperation through time delay: review and prognosis," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 592-606, Oct. 1993.

[6] J. Ramos and S. Kim, "Dynamic locomotion synchronization of bipedal robot and human operator via bilateral feedback teleoperation," *Sci. Robot.*, vol. 4, no. 35, pp. 1-12, Oct 2019.

[7] P. Kremer et al., "Multimodal telepresent control of DLR's Rollin' JUSTIN," 2009 in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, 2009, pp. 1601-1602.

[8] D. Kim, B.-J. You, and S.-R. Oh, "Whole Body Motion Control Framework for Arbitrarily and Simultaneously Assigned Upper-Body Tasks and Walking Motion," in *Modeling, Simulation and Optimization of Bipedal Walking*, K. Mombaur and K. Berns, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 87-98.

[9] T. Ando, T. Watari and R. Kikuuwe, "Master-Slave Bipedal Walking and Semi-Automatic Standing Up of Humanoid Robots," in *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Honolulu, HI, USA, 2020, pp. 360-365.

[10] J. J. O. Barros, V. M. F. d. Santos and F. M. T. P. d. Silvaeo, "Bimanual Haptics for Humanoid Robot Teleoperation Using ROS and V-REP," in *2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, Vila Real, Portugal, 2015, pp. 174-179.

[11] A. D. Ames, "Human-inspired control of Bipedal walking robots," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 59, no. 5, pp. 1115-1130, May 2014.

[12] A. D. Ames, K. Galloway, K. Sreenath, and J. W. Grizzle, "Rapidly exponentially stabilizing control lyapunov functions and hybrid zero dynamics," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 59, no. 4, pp. 876-891, April 2014.

[13] M. S. Motahar, S. Veer, and I. Poulakakis, "Composing limit cycles for motion planning of 3D bipedal walkers," in *IEEE 55th Conf. Decis. Control. CDC 2016*, Las Vegas, NV, 2016, pp. 6368-6374.

[14] C. L. Shih, J. W. Grizzle, and C. Chevallereau, "From stable walking to steering of a 3D bipedal robot with passive point feet," *Robotica*, vol. 30, no. 7, pp. 1119-1130, Dec. 2012.

[15] T. Yang, W. Zhang, X. Chen, Z. Yu, L. Meng, and Q. Huang, "Turning gait planning method for humanoid robots," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 1-16, July 2018.

[16] Q. Nguyen and K. Sreenath, "L1 adaptive control for bipedal robots with control Lyapunov function based quadratic programs," *2015 American Control Conference (ACC)*, Chicago, IL, pp. 862-867, 2015.

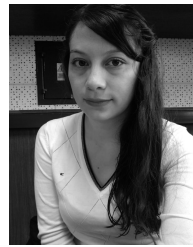
[17] E. Lavretsky, T. E. Gibson, and A. M. "Annaswamy. Projection operator in adaptive systems," [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1112.4232>.

[18] V. Moya, E. Slawinski, and V. Mut, "Delayed Bilateral Teleoperation of the Speed and Turn Angle of a Bipedal Robot," *Robotica*, pp. 1-19, July 2020.

[19] V. Moya, E. Slawiński, V. Mut, V. "Delayed Teleoperation with Force Feedback of a Humanoid Robot," *International Journal of Automation and Computing*, to be published.

[20] C. C. Hua and X. P. Liu, "Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, no. 5, pp. 925-932, Oct. 2010.

[21] E. Nuño, R. Ortega, N. Barabanov, L. Basañez, "A Globally Stable PD Controller for Bilateral Teleoperators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 753-758, 2008.



Viviana Moya received her degree in Electronics and Control Engineering from the Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito-Ecuador, in 2016. She is currently studying a PhD in Control Systems Engineering at the Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) with a scholarship from DAAD Germany. Her area of interest is teleoperation systems and automatic control.



Emanuel Slawiński received his PhD degree in Control Systems Engineering from the Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), San Juan, Argentina, in 2006. He is a Researcher of the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET) and is a Professor at the UNSJ in the electronic engineering careers, as well as in the doctorate. His areas of interest are: delayed bilateral teleoperation systems, human factors and haptic feedback.



Vicente Mut received his PhD degree in Control Systems Engineering from the Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), San Juan, Argentina, in 1995. Currently, he is a professor at the UNSJ, developing research and teaching activities in the undergraduate and graduate programs of the Institute of Automatics and the Department of Electronics and Automatics. His research interests focus on robotics, manufacturing systems, adaptive control and artificial intelligence applied to automatic control.



Bernardo Wagner received his M.Sc. degree (Dipl.-Ing.) 1984 and his Ph.D. degree (Dr.-Ing.) 1989 in electrical engineering from the University of Stuttgart, Germany. Full Professor at the University of Hannover since 1997. Member of the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science and is in charge of the Real-Time Systems (RTS) Group. In addition, he is director of the Center for Technical Didactics (ZDT). His main research interests focus on autonomous service robots, especially robot perception, as well as distributed real-time systems.