

Integración y Control de Plataforma para Teleoperación de Manipuladores no Similares

Luis E. García-Estrada*, Marco A. Arteaga-Pérez**, A. Rodríguez-Angeles* y Tania Orozco-García*

*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., Departamento de Ingeniería Eléctrica
Av. I.P.N. No. 2508. Col. San Pedro Zacatenco
Apdo. Postal 14-740, C.P. 07360 Mexico, D.F., México.
Tel: (52) 55-57-47-38-00
lgarcia@cinvestav.mx, aangeles@cinvestav.mx

**Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Control y Robótica
Apdo. Postal 70-256, C.P. 04510, México, D.F., México.
Tel: (52) 55-56-22-30-13
arteaga@verona.fi-p.unam.mx

Resumen—Este artículo presenta la consolidación mecánica, electrónica, computacional, de redes y control para integrar una plataforma de experimentación con el objeto de probar esquemas de teleoperación. En los ambientes hostiles al ser humano es necesario incrementar las capacidades del operador con el fin de realizar una tarea lo más precisa posible y evitar los riesgos que estuvieran presentes. Una plataforma de teleoperación permite probar nuevos algoritmos de control en ambos sistemas: el local y el remoto; estudiar el canal de comunicación, experimentar con retardos, probar protocolos y resolver problemas específicos. En este trabajo se considera un robot de cadena cinemática cerrada de 5 barras como manipulador maestro, el cual por medio de un canal de comunicación, manda su posición a un manipulador esclavo de cadena cinemática cerrada tipo delta de 3 grados de libertad. Se presentan resultados experimentales realizados para probar el funcionamiento de la plataforma.

Palabras clave: Telemanipulación, Telerobótica, Canales de comunicación, Sistema bilateral.

I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos el ser humano se ha esforzado por facilitar las tareas en su vida diaria, en la búsqueda de la comodidad fue desarrollando diferentes herramientas las cuales hacen uso de los adelantos tecnológicos. Con la idea de realizar tareas a distancia, las primeras investigaciones en 1947 se enfocaban en que el trabajo a realizar no pusiera en riesgo al operador y que pudiera ser lo más precisa posible, (Goertz, R.C., 1954).

La evolución de los sistemas de comunicación suprime prácticamente las limitaciones de distancia. La incorporación de los desarrollos en los campos de la robótica y la tecnología multimedia incrementan las capacidades del sistema remoto tales como autonomía, puesto local de control, interfaz hombre máquina. Para la teleoperación de hoy en día se realizan investigaciones de vanguardia donde el desarrollo de este campo salta a la vista no sólo como objetivo de las sociedades productoras y consumidoras sino

también como toda una ciencia nueva con innumerables vertientes y atractiva a los investigadores de nuestra época.

Teleoperación se refiere a las tecnologías que permiten incrementar la capacidad humana de manipular objetos de manera remota con ayuda de sensores y actuadores, ya sea a unos centímetros o varios cientos de kilómetros de distancia, dotando al operador de condiciones similares a las del ambiente remoto, (Stassen et. al., 1997). Un telemanipulador se puede definir como un dispositivo que permite al operador moverse, sentir y manipular mecánicamente objetos para realizar tareas a distancia, en un ambiente hostil donde el acceso a humanos es imposible o inadmisibles, usualmente cuenta con sensores y efectores artificiales para manipulación y movilidad, incrementando la capacidad mecánica de una persona más allá de sus alcances.

Un sistema de teleoperación esta comunmente compuesto por dos manipuladores, un manipulador maestro y un manipulador esclavo, (Sheridan, T.B., 1995), (Raimondi, T., 1988). El manipulador maestro tiene la finalidad de que el operador envíe comandos de movimiento al manipulador esclavo. El operador ejerce fuerza sobre el maestro, lo cual provoca un desplazamiento en el efector final, el cual es transmitido al esclavo para que imite dicho movimiento, (Hokayem et. al., 2006). El manipulador esclavo recibe los comandos que envía el sistema local para realizar la tarea deseada reproduciendo fielmente los movimientos del manipulador maestro, (Kress, R.L., 1997).

En éste trabajo se aborda el desarrollo de una plataforma de teleoperación, utilizando el protocolo UDP (Protocolo de Datagramas de Usuario por sus siglas en ingles), la velocidad de intercambio de datos permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión. El protocolo no cuenta con mecanismos de confirmación ni de control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros; y tampoco

se sabe si han llegado correctamente, ya que no existe confirmación de entrega o recepción. Sin embargo, debido a su aplicación en la transmisión de audio y vídeo en tiempo real, donde no es posible realizar retransmisiones por los estrictos requisitos de retardo, es un protocolo eficiente y de alto desempeño para teleoperación; la primer cirugía asistida por teleoperación usando el sistema robótico ZEUS teniendo al cirujano y el robot maestro en Nueva York, Estados Unidos y al paciente y robot esclavo en Satrasburgo, Francia, se basó en el protocolo UDP/IP con retardo aproximado promedio de 224ms, (Ghodoussi, M, 2002), (Sheridan, T.B., 1995).

El presente trabajo logra la teleoperación de una plataforma maestro-esclavo siendo el sistema local (maestro) un manipulador paralelo de 5 barras y el sistema remoto (esclavo) un manipulador tipo delta a una distancia de 5 metros por medio del protocolo UDP/IP, mediante cable Ethernet, con el propósito de analizar el desempeño en la comunicación, precisión y movimiento entre los dos manipuladores no similares, tomando en cuenta las características de ambos robots.

II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE TELEOPERACIÓN

La plataforma de teleoperación esta compuesta por dos manipuladores no similares, debido a que las cinemáticas y dinámicas de ambos son distintas, es necesario considerar sus respectivos modelos.

Para un robot rígido con n -uniones articulares denotadas como $q \in \mathbb{R}^n$ la cinemática directa $F_{Dk}(q)$ es aquella que relaciona las coordenadas articulares q con las coordenadas cartesianas $X \in \mathbb{R}^m$ del efector final, es así que el modelo cinemático puede ser expresado como:

$$X = F_{Dk}(q) \quad (1)$$

A su vez la cinemática inversa $F_{Ik}(X)$ permite determinar las coordenadas articulares q a partir de la posición y orientación del efector final X

$$q = F_{Ik}(X) \quad (2)$$

Para efectos de control es necesario considerar los modelos dinámicos. Las ecuaciones correspondientes a la dinámica de un robot pueden ser planteadas en coordenadas generalizadas q como es el caso del robot paralelo de 5 barras y dependiendo de la complejidad del manipulador pueden también utilizarse como coordenadas generalizadas q y X como en el caso del manipulador tipo delta, el cual tiene ecuaciones diferenciales como las de la ec. (3).

$$M(q, X)\ddot{q} + C(q, \dot{q}, X) + G(q, X) = \tau \quad (3)$$

donde $M(q, X) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercias, $C(q, \dot{q}, X) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de términos referentes a las fuerzas centrífugas y de Coriolis, $G(q, X) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de términos afectados por la gravedad y $\tau \in \mathbb{R}^n$ son los torques de entrada.

Tanto las cinemáticas como las dinámicas son utilizadas para programar los movimientos de los robots y controlar

a los mismos mediante el canal de comunicación, como se muestra en la Fig. 1

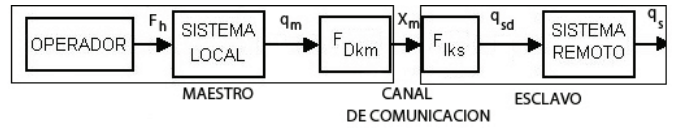


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema

Matemáticamente, se supone al sistema de teleoperación como dos subsistemas robóticos, un maestro y un esclavo, que intercambian señales (posiciones, velocidades y/o fuerzas); en el cual el esclavo intenta igualar el comportamiento del maestro, el cual a su vez, toma en cuenta los torques que actúan sobre el esclavo. Un modelo del sistema maestro esclavo puede ser escrito como:

$$\begin{aligned} M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m) + G_m(q_m) &= \tau_m + \tau_h \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s) + G_s(q_s) &= \tau_s - \tau_e \end{aligned} \quad (4)$$

Donde el subíndice m corresponde a la dinámica del manipulador maestro, así como el subíndice s corresponde a la dinámica del manipulador esclavo, se incluyen los términos $\tau_h \in \mathbb{R}^n$ y $\tau_e \in \mathbb{R}^n$ correspondiente a los pares externos generados por el operador y el ambiente respectivamente. Las fuerzas con las que el operador está dando movimiento al manipulador maestro se encuentran en coordenadas cartesianas, el Jacobiano del robot maestro, $J_m \in \mathbb{R}^{m \times m}$ puede ser utilizado para describir la relación existente entre los esfuerzos aplicados en el efector final $F_h \in \mathbb{R}^m$ y los torques de las articulaciones, en base al cálculo de trabajo realizado en el robot, se tiene la relación dada por (5), (Murray et. al, 1994).

$$\tau_h = J_m^T(q_m)F_h \quad (5)$$

III. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

III-A. Sistema Local

Se expone a continuación la cinemática, dinámica y control del robot paralelo de 5 barras (Cortés, R., 2007).

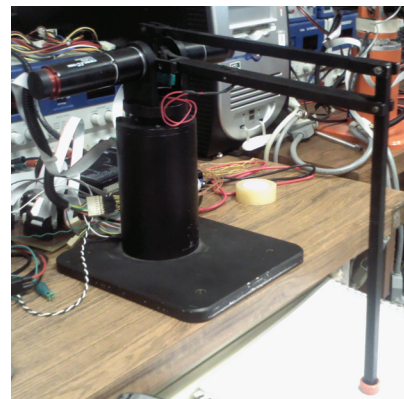


Figura 2. Robot paralelo de 5 barras

Parámetro	Variable	Magnitud
Altura	D_0	0.2100 m
(Eslabón 1)	D_1	0.0300 m
(Eslabón 2)	D_2	0.2500 m
(Eslabón 3)	D_3	0.2900 m
(Eslabón 4)	D_4	0.2500 m
Masa del eslabon D1	m_1	0.0091 kg
Masa del eslabon D2	m_2	0.0712 kg
Masa del eslabon D3	m_3	0.0687 kg
Masa del eslabon D4	m_4	0.1300 kg
Centro de masa del eslabon D1	d_1	0.0100 m
Centro de masa del eslabon D2	d_2	0.1270 m
Centro de masa del eslabon D3	d_3	0.1080 m
Centro de masa del eslabon D4	d_4	0.1070 m
Inercia del eslabon D1	I_1	$2.30 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
Inercia del eslabon D2	I_2	$1.54 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
Inercia del eslabon D3	I_3	$1.05 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
Inercia del eslabon D4	I_4	$2.23 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$

TABLA I
PARÁMETROS DEL ROBOT DE 5 BARRAS

Las ecuaciones cuentan con la abreviación de senos y cosenos denotada como cq_{mi} y sq_{mi} respectivamente. El marco de referencia utilizado se muestra en la Figura 3. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla I. La

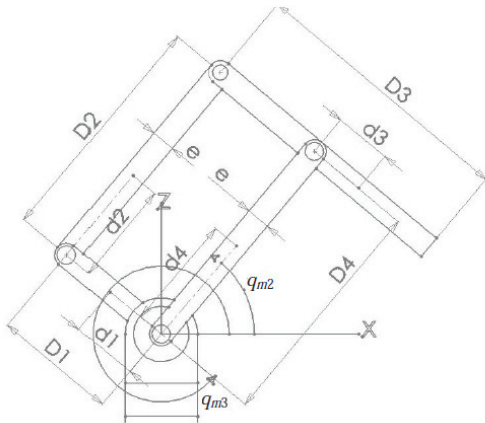


Figura 3. Marco de referencia del robot de 5 barras

ecuación (6) describe la cinemática directa obteniendo la posición X_m a partir de las coordenadas articulares q_m en base a la Figura 3.

$$\begin{aligned} x_m &= [D_4 c q_{m2} + (D_3 - D_1) c q_{m3}] c q_{m1} \\ y_m &= [D_4 c q_{m2} + (D_3 - D_1) c q_{m3}] s q_{m1} \\ z_m &= D_4 s q_{m2} + (D_3 - D_1) s q_{m3} + D_0 \end{aligned} \quad (6)$$

La cinemática inversa expresada en la ecuación (8) obtiene coordenadas articulares q_m a partir de la posición y orientación del efector final X_m en base a la Figura 4.

$$r = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \quad (7a)$$

$$k = \frac{r^2 + z_m^2 - D_4^2 - (D_3 - D_1)^2}{2D_4(D_3 - D_1)} \quad (7b)$$

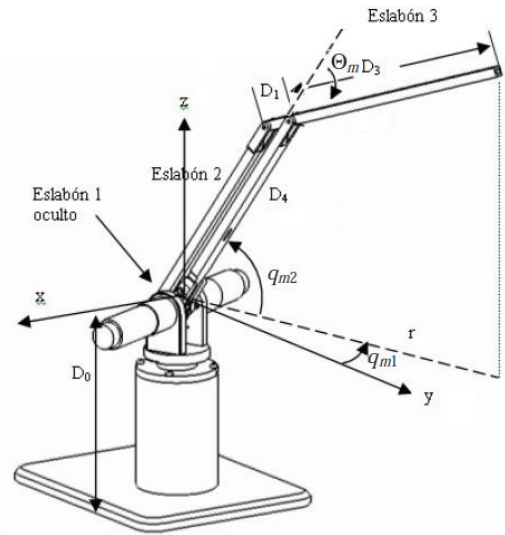


Figura 4. Diagrama del robot maestro para cinemática inversa

Si $|k| < 1$ existen dos raíces reales, si $|k| = 1$ existe solución única, pero si $|k| > 1$ no existen soluciones reales, es decir, la posición no es alcanzable. Se sigue la ecuación como:

$$\Theta_m = -\text{acos}(k) \quad (7c)$$

$$\Delta = D_4^2 + (D_3 - D_1)^2 + 2D_4(D_3 - D_1) c \Theta_m \quad (7d)$$

$$c q_{m2} = \frac{r [D_4 + (D_3 - D_1) c \Theta_m] + z_m (D_3 - D_1) s \Theta_m}{\Delta} \quad (7e)$$

$$s q_{m2} = \frac{-r (D_3 - D_1) s \Theta_m + z_m [D_4 + (D_3 - D_1) c \Theta_m]}{\Delta} \quad (7f)$$

$$q_{m1} = \text{atan2}(y_m, x_m)$$

$$q_{m2} = \text{atan2}(s q_{m2}, c q_{m2}) \quad (8)$$

$$q_{m3} = 2\pi + q_{m2} + \Theta_m$$

La ecuación (9) corresponde a la dinámica del sistema maestro, obtenida por medio de un paquete computacional especializado para operaciones con números simbólicos y aplicando la metodología de Euler-Lagrange:

$$M_m(q_m) \ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m) + G_m(q_m) = \tau_m \quad (9)$$

Donde:

$$M_m(q_m) = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$G_m(q_m) = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_2 d_2 + m_4 d_4 + m_3 D_4) g c q_{m2} \\ (-m_1 d_1 - m_2 D_1 + m_3 d_3) g c q_{m3} \end{bmatrix}$$

En la que los coeficientes de la matriz $M_m(q_m)$ son:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= m_1(d_1^2 c q_{m3}^2) + m_2(D_1^2 c q_{m3}^2 + d_2^2 c q_{m2}^2 - 2D_1 d_2 c q_{m2} c q_{m3}) + \\
 &\quad m_3(d_3^2 c q_{m3}^2 + D_4^2 c q_{m2}^2 + 2D_4 d_3 c q_{m2} c q_{m3}) + m_4(d_4^2 c q_{m2}^2) \\
 &\quad + I_1 \\
 a_{22} &= m_2(d_2^2) + m_3(D_4^2) + m_4(d_4^2) + I_2 + I_4 \\
 a_{23} &= m_2[-D_1 d_2 c(-q_{m3} + q_{m2})] + m_3(D_4 d_3) \\
 a_{32} &= m_2[-D_1 d_2 c(-q_{m3} + q_{m2})] + m_3(D_4 d_3) \\
 a_{33} &= m_1(d_1^2) + m_2(D_1^2) + m_3(d_3^2) + I_1 + I_3
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Los experimentos se realizan implementando una compensación de gravedad la cual es de la siguiente forma:

$$\tau_m = G_m(q_m)
 \tag{11}$$

III-B. Sistema Remoto



Figura 5. Robot paralelo tipo Delta

Se expone a continuación la cinemática, dinámica y control del robot paralelo de tres grados de libertad mejor conocido como Delta. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla II, (Ramirez, M., 1993).

El desarrollo de las ecuaciones toma en cuenta que $\cos(0) = 1$, $\sin(0) = 0$, $\cos(120) = -0.5$, $\cos(-120) = -0.5$. El marco de referencia utilizado es el que se muestra en la Figura 6.

La cinemática directa (13) y (14) permite determinar la posición y orientación del efector final X_s a partir de las coordenadas articulares q_s . Para éste robot Delta en específico se calcula como se muestra en (Lung-Wen, T., 1999)

Parámetro	Variable	Magnitud
Longitud del brazo	a	0.250 m
Longitud del eslabón de barras paralelas	b	0.500 m
Ancho de la plataforma móvil	h	0.045 m
Ancho de la base fija	r	0.100 m
Masa del brazo	m_a	0.168 kg
Masa del eslabón de barras paralelas	m_b	0.300 kg
Masa de la plataforma móvil	m_p	0.215 kg
Angulo del brazo 1	ϕ_1	0°
Angulo del brazo 2	ϕ_2	120°
Angulo del brazo 3	ϕ_3	-120°

TABLA II
PARÁMETROS DEL ROBOT DELTA

$$\begin{aligned}
 e_{12} &= -acq_{s1} - 3r + 3h - 2acq_{s1} \\
 e_{13} &= -acq_{s3} - 3r + 3h - 2acq_{s1} \\
 e_{22} &= 2s\phi_2(acq_{s2} + r - h) \\
 e_{23} &= 2s\phi_3(acq_{s3} + r - h) \\
 e_{32} &= 2asq_{s2} - 2asq_{s1} \\
 e_{33} &= 2asq_{s3} - 2asq_{s1} \\
 e_{42} &= (acq_{s1} + r - h)^2 + a^2sq_{s1}^2 - (acq_{s2} + r - h)^2 - a^2sq_{s2}^2 \\
 e_{43} &= (acq_{s1} + r - h)^2 + a^2sq_{s1}^2 - (acq_{s3} + r - h)^2 - a^2sq_{s3}^2
 \end{aligned}
 \tag{12a}$$

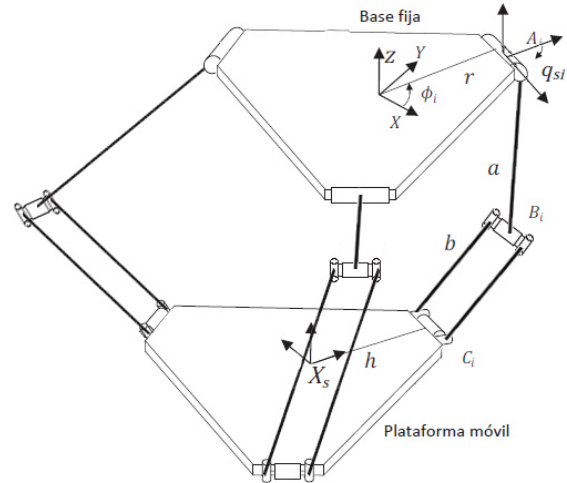


Figura 6. Diagrama del robot Delta

$$\begin{aligned}
 l_0 &= e_{32}e_{43} - e_{33}e_{42} \\
 l_1 &= e_{13}e_{32} - e_{12}e_{33} \\
 l_2 &= e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32} \\
 l_3 &= e_{23}e_{42} - e_{22}e_{43} \\
 l_4 &= e_{12}e_{23} - e_{13}e_{22} \\
 l_5 &= acq_{s1} + r - h
 \end{aligned}
 \tag{12b}$$

$$\begin{aligned}
k_0 &= 1 + \frac{l_1^2}{l_2^2} + \frac{l_4^2}{l_2^2} \\
k_1 &= \frac{2l_0l_1}{l_2^2} + \frac{2l_3l_4}{l_2^2} - 2l_5 - \frac{2al_4}{l_2}sq_{s1} \\
k_2 &= l_5^2 - b^2 + \frac{l_0^2}{l_2^2} + \frac{l_3^2}{l_2^2} + a^2s^2q_{s1} - \frac{2al_3}{l_2}sq_{s1} \quad (12c)
\end{aligned}$$

El valor de x_s se resuelve en la siguiente ecuación de segundo orden:

$$k_0x_s^2 + k_1x_s + k_2 = 0 \quad (12d)$$

Por lo tanto:

$$x_s = \frac{-k_1 \pm \sqrt{k_1^2 - 4k_0k_2}}{2k_0} \quad (13)$$

Si $k_1^2 - 4k_0k_2 > 0$, los espacios de trabajo de cada brazo no se intersecan por lo que no existen soluciones reales.

Si $k_1^2 - 4k_0k_2 = 0$, los espacios de trabajo de dos brazos son tangentes a la esfera formada por el espacio de trabajo del tercer brazo, solo existe una solución.

Si $k_1^2 - 4k_0k_2 < 0$, existen dos posibles soluciones

Después de obtener x_s se resuelve el sistema de ecuaciones para y_s y z_s :

$$\begin{aligned}
e_{12}x_s + e_{22}y_s + e_{32}z_s + e_{42} &= 0 \\
e_{13}x_s + e_{23}y_s + e_{33}z_s + e_{43} &= 0
\end{aligned} \quad (14)$$

La cinemática inversa (15) permite determinar las coordenadas articulares q_s a partir de la posición y orientación del efector final X_s . Se localiza primero el vector C_i como:

$$\begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi_i & s\phi_i & 0 \\ -s\phi_i & c\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15a)$$

Donde $\phi_i, i = 1, 2, 3$ es el ángulo de separación entre las tres articulaciones del robot, el ángulo q_{si} se obtiene conforme a la fórmula:

$$\begin{aligned}
K_1 &= \sqrt{b^2 - c_{yi}^2} \\
K_2 &= \frac{c_{xi}^2 + c_{zi}^2 + c_{yi}^2 - a^2 - b^2}{2aK_1} \\
K_3 &= \sqrt{1 - K_2^2} \\
K_4 &= \text{atan2}(K_3, K_2)
\end{aligned}$$

$$q_{si} = -\text{atan2}(c_{zi}, c_{xi}) - \text{atan2}[K_1 \sin(K_4), a + K_1 \cos(K_4)] \quad (15b)$$

Con respecto al modelo dinámico, debido a la complejidad del manipulador delta se requieren tres coordenadas redundantes, por lo que X_s, q_s , se toman como coordenadas generalizadas. El modelo dinámico encontrado en la literatura usando el método de Euler-Lagrange es:

$$M_s \ddot{q}_s + G_s(q_s) - R_s(q_s, X_s)\lambda = \tau_s \quad (16)$$

Donde:

$$M_s = \begin{bmatrix} (\frac{1}{3}m_a + m_b)a^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\frac{1}{3}m_a + m_b)a^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\frac{1}{3}m_a + m_b)a^2 \end{bmatrix}$$

$$G_s(q_s) = \begin{bmatrix} (\frac{1}{2}m_a + m_b)gacq_{s1} \\ (\frac{1}{2}m_a + m_b)gacq_{s2} \\ (\frac{1}{2}m_a + m_b)gacq_{s3} \end{bmatrix}$$

Donde el vector $R_s(q_s, X_s)\lambda \in \mathbb{R}^n$ correspondiente a los multiplicadores se pueden consultar en (Lung-Wen, T., 1999).

Los experimentos se realizan mediante un control PID con compensación de gravedad para poder establecer un seguimiento de trayectoria en el robot, el cual es de la siguiente forma:

$$\tau_s = G_s(q_s) + M_s \left(K_p e_s + K_i \int e_s dt + K_d \dot{e}_s \right) \quad (18)$$

Donde $K_p, K_i, K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales con los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa del control PID ($K_p = 75, K_i = 227, K_d = 5$) y el error de las coordenadas articulares es $e_s = q_{sd} - q_s, e_s \in \mathbb{R}^n$ y $q_{sd} \in \mathbb{R}^n$ son las coordenadas articulares deseadas.

III-C. Teleoperación

Los experimentos de teleoperación se realizan utilizando el protocolo UDP como canal de comunicación, con tiempo de muestreo de un milisegundo y enviando tres paquetes de 8 bytes en cada muestreo, cada paquete incluye la información de posición en coordenadas cartesianas del efector final en el manipulador maestro X_m , esta información conforma la trayectoria cartesiana deseada proporcionada por el operador humano, mediante cinemática inversa (15) se genera la trayectoria articular deseada q_{sd} . Se implementa un controlador para cada manipulador, ambos basados en la ecuación (4); el controlador para el sistema local disminuye los efectos de la gravedad (11), obteniendo como resultado una manipulación con sensación de que el mecanismo no tiene peso; para el sistema remoto se utiliza un control que garantiza el seguimiento de trayectoria (18), además un filtro paso bajos con el objeto de disminuir posibles vibraciones involuntarias del operador y seguimiento de posición suave.

IV. RESULTADOS

Se muestran a continuación los resultados experimentales, mediante gráficas de las trayectorias Cartesianas del sistema maestro y esclavo, así como los errores de seguimiento (Fig 7-12).

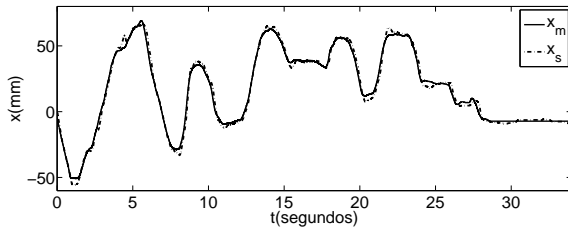


Figura 7. Gráfica de posición x para Teleoperacion

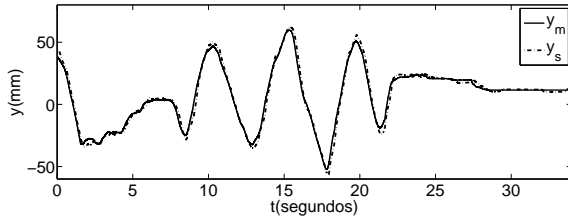


Figura 8. Gráfica de posición en y para Teleoperacion

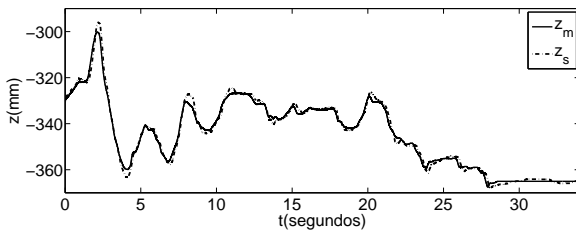


Figura 9. Gráfica de posición en z para Teleoperacion

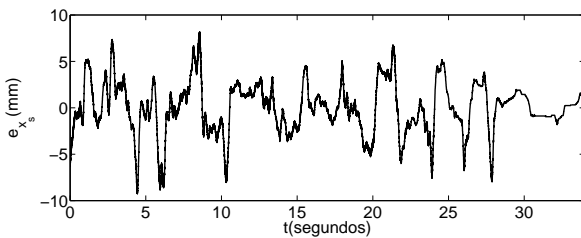


Figura 10. Gráfica de e_{x_s} para Teleoperacion

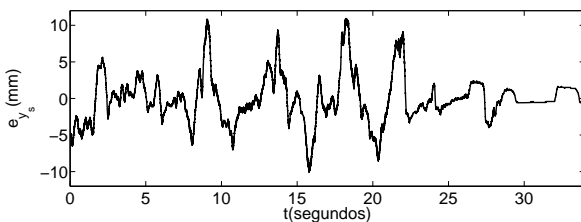


Figura 11. Gráfica de e_{y_s} para Teleoperacion

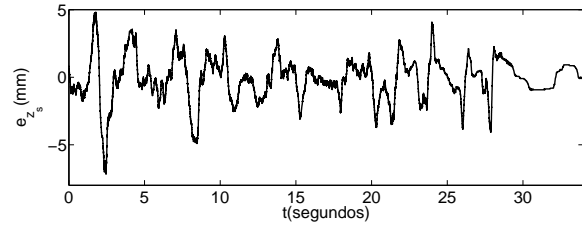


Figura 12. Gráfica de e_{z_s} para Teleoperacion

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Como se observa en las gráficas, la trayectoria del robot maestro es seguida por el robot esclavo con mínimas diferencias, lo cual es congruente con el tipo de controlador empleado. Los resultados permiten concluir que la comunicación es efectiva entre ambos manipuladores a través del protocolo UDP, herramienta que permite su aplicación en la comunicación de robots teleoperados. El control implementado es suficiente para la aplicación que se tiene aunque se pueden experimentar controles más avanzados en la búsqueda de un mejor desempeño del sistema. La electrónica y la plataforma pueden ser utilizadas para probar nuevos esquemas de control, retroalimentación háptica, protocolos y medios del canal de comunicación, retardos inducidos por el canal de transmisión, aplicaciones innovadoras, así como mejoras de los robots, diferentes diseños y construcción de nuevas plataformas de experimentación. Como trabajo futuro se establecerá un esquema de teleoperación bilateral.

REFERENCIAS

- CORTÉS MARTÍNEZ, Rolando. *Diseño y construcción de un sistema de teleoperación maestro esclavo no similar*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, 2007.
- GHODOUSSI M., BUTNER S. E., YULUN W. *Robotic Surgery the Transatlantic Case* IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, Vol. 2, pp. 1882-1888, 2002.
- GOERTZ, R.C. *Electronically Controlled Manipulator*. Neucleonics, Vol. 12, No. 11, 1954.
- HOKAYEM, Peter F. SPONG, Mark W. *Bilateral teleoperation: An historical survey*. Automatica, Vol. 42, pp. 2035-2057, 2006.
- KRESS, R.L. *The evolution of teleoperated manipulators at ORNL*. Presented at the ANS SIXTH TOPICAL MEETING on Robotics and Remote Systems, Augusta, Georgia, 1997.
- LUNG-WEN, Tsai *ROBOT ANALYSIS: The mechanics of serial and parallel manipulators*. A Wiley-Interscience Publication, EUA, 1999.
- MURRAY, Richard M. LI, Zexiang. SHANKAR SASTRY, S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, Electronic edition available at <http://www.cds.caltech.edu/murray/mlswiki>, 1994.
- RAIMONDI, T. *Advances in teleoperation for International Center for Mechanical Sciences in Udine*. Three Lectures given by T. Raimondi at Advances in Teleoperation for International Center for Mechanical Sciences in Udine, Italy, May 9-13, 1988
- RAMÍREZ NERIA, Mario. *Compensación de retardos mediante técnicas GPI en sistemas robóticos manipuladores*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, 2011.
- SHERIDAN, T.B. *Teleoperation, telerobotics and telepresence: a progress report*. Control Eng. Practice, Vol. 3, No. 2, pp. 205-214, 1995.
- STASSEN, H.G. SMETS, G.J.F *Telemanipulation and telepresence* Control Eng. Practice, Vol. 5, No. 3, pp. 363-374, 1997.