

PHANToM: una interfaz para retroalimentación kinestética, entrenamiento y teleoperación con propósitos de diagnóstico y rehabilitación médica.

Ing. Alejandro Jarillo Silva, Ing. Iván Hernández Ángeles y Dr. Omar A. Domínguez Ramírez.

Resumen.

En este trabajo se dan a conocer las características técnicas del dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0 para tareas de interacción hombre-máquina virtual, se presentan estrategias de control no lineal diseñadas de acuerdo a criterios de pasividad y segundo método de Lyapunov, para control de movimiento perturbado (operador humano en el lazo) con propósitos de guiado local y remoto, y cuyo objetivo final corresponde a establecer técnicas para el diagnóstico y rehabilitación de pacientes con discapacidad motriz como consecuencia de lesiones neurológicas. Se presentan resultados experimentales basados en caligrafía.

Palabras clave.

Pasividad, Lyapunov, control, interfaz háptica, estabilidad, PHANToM 1.0, diagnóstico y rehabilitación médica.

I.-Introducción.

En los recientes años, la realidad virtual (VR) ha sido aplicada en las diferentes áreas médicas. Rehabilitación con tecnologías (VR), es considerada una de las áreas de investigación mas recientes para la rehabilitación del ser humano. Una de estas investigaciones, se han realizado en U.S.A en el Departamento de Eléctrica e Ingeniería computacional de la Universidad de Calumet, donde se han realizado estudios de rehabilitación de la mano, en este caso se utilizó el dispositivo PHANToM 1.0, para escribir caracteres en inglés con un lápiz virtual. El usuario con disfunciones en la muñeca, realiza diferentes ejercicios con el lápiz virtual. El desempeño del operador humano es analizado en tiempo real, de tal manera que se pueden analizar las trayectorias que realizó y de esta manera serán supervisadas por especialistas [1].

El problema es diseñar estrategias de control no lineal con fines de guiado háptico para diagnóstico y rehabilitación médica, una de las soluciones es haciendo uso de las propiedad de pasividad que cumple un sistema electromecánico y utilizando la teoría de estabilidad de Lyapunov para el diseño del control. El contenido de este artículo se basa en el diseño de un control hiperbólico con fines de guiado háptico, se presentan experimentos obtenidos de diferentes personas que presentan dislexia y otras que no tienen ninguna discapacidad motriz o intelectual. La organización de este documento es el siguiente; en la sección II se hace una descripción de una interfaz háptica, en la sección III se describe la interfaz PHANToM 1.0, en la sección IV se describe el principio del guiado háptico y sus posibles aplicaciones, en la sección V se diseña un control hiperbólico de segundo orden para guiado háptico, en la sección VI se describe la tarea del experimento, en la sección VII se describe la plataforma experimental, en la sección VIII se presentan los resultados experimentales de las diferentes tareas, en la sección IX se realizan comentarios de los resultados experimentales, en la sección X se presentan las conclusiones y finalmente la sección XI se presentan las referencias.

II.-Descripción de una interfaz háptica

Las interfaces hápticas corresponden a un medio donde el humano interactúa con un ambiente de visualización virtual. El humano modifica a su antojo o voluntad el ambiente virtual y recibe señales como respuesta. Una interfaz háptica esta constituida por un operador humano, un ambiente de visualización virtual y un sistema electromecánico denominado dispositivo háptico. El humano es estimulado visual, táctil y kinestéticamente en base en esta información inicial, la

decisión de modificar el mundo virtual mediante el uso de un dispositivo háptico sujetado parcialmente en el extremo final de su mano o dedo. El dispositivo háptico esta dotado de sensores de posición y velocidad angular en las articulaciones, esta información es enviada al algoritmo para la asignación de comportamiento complejo, modificando la representación del humano en el ambiente de visualización virtual, y evaluando instantáneamente un algoritmo para la detección de contacto con objeto del mundo virtual. El contacto define el cálculo de la fuerza de reacción necesaria para determinar el par de los actuadores del dispositivo háptico que requieren para crear el estímulo sensorial [2]. Para una mejor visualización de una interfaz háptica se presenta la Figura 1y se describen cada uno de los puntos.

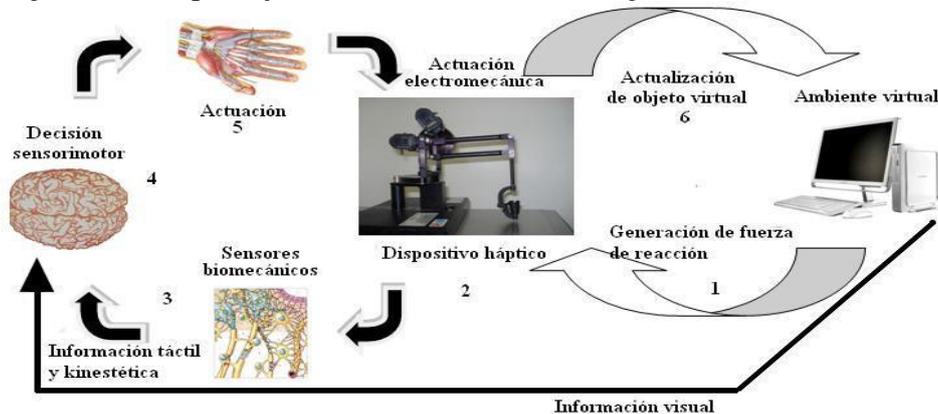


Figura 1.-Diagrama de interfaz háptica

1.-Biomecánica del contacto, el desempeño mecánico durante la interacción de los dedos de un operador humano con su mundo, es caracterizado utilizando robots de alta precisión, se emplean modelos de tiempo finito para entender como la fuerza sobre los dedos, debido al contacto con objetos es convertida en información táctil [3].

2.-Neuropsicología del contacto, las señales nerviosas enviadas de la piel del dedo al cerebro durante el sensado táctil de las propiedades de un objeto son grabadas y analizadas [4].

3.-Percepción humana, es la habilidad humana para percibir las propiedades de los objetos tales como forma, suavidad y textura es medida utilizando equipo controlado por computadoras y métodos psicofísicos [5].

4.-Acción motriz, habilidad humana para controlar fuerzas de contacto durante la exploración y manipulabilidad manual y es caracterizada para conocer los límites sensoriales [6].

5.-Evolución del dispositivo háptico, para estimular el sentido del tacto del usuario, el dispositivo háptico es programado con una computadora, que recibe los cambios instantáneos de posición y velocidad para actualizar el ambiente virtual [6].

6.-Herramientas de software, el software es utilizado para crear mundos virtuales interactivos y estimular con atributos visuales, auditivos y hápticos al operador humano [7].

7.-Interacción hombre-máquina, experimentos son realizados para investigar como controlar las alteraciones de despliegue visual, auditivo y háptico que afectan la percepción humana. Los resultados son empleados para conocer las limitaciones tecnológicas y son aplicables para el diseño óptimo de interfaces hombre-máquina [7].

III.-Descripción de la interfaz háptica

El dispositivo PHANToM Premium 1.0 es un dispositivo háptico de tipo mayordomo según la clasificación de cómo interactúan con el operador humano, consta de posicionadores

mecánicos. El PHANTOM PREMIUM puede ser alimentado por fuentes de CA a 50 y 60Hz, a 115 y 230 volts, con corrientes de 5 y 2.5 Ampers respectivamente (el cable de alimentación del dispositivo debe tener una capacidad de conducción en el rango 5 Ampers que satisfaga los requisitos eléctricos nacional y local). La corriente nominal de operación del dispositivo es 8.3 Ampers de CA. El PHANTOM PREMIUM realiza sensado de posición en X, Y y Z, efectuando respectivamente la retroalimentación de fuerzas. Tiene una inercia (masa aparente en la punta) sin el encoder gimbal de 0.17lbm igual a 75gr. Cuenta con una rigidez de 20lbp/pulg equivalentes a 3.5N/mm. Los motores de corriente continua con que cuenta permiten que este ejerza continuamente una fuerza (en posición nominal) de 0.3lbp iguales a 1.4N. Posee una fricción de 0.5oz o 0.04N. [8]

Dicho sensado es posible dado que PHANTOM PREMIUM cuenta con encoders HEDM-5500-B02 de dos canales de salida con pulso óptico indexado, los cuales no requieren ajuste de señal, tienen una resolución mayor a 1024 puntos por revolución, un rango de operación de -40°C a 100°C, compatible con TTL (Lógica Transistor a Transistor), es alimentado a 5 volts nominales. Dicho encoder permite la conversión de una señal rotatoria de un eje a dos o tres canales de salida digital, y cuenta con las siguientes especificaciones técnicas: [9]

PHANTOM PREMIUM tiene una resolución en posición nominal de 860dpi (puntos por pulgada), el equivalente a 0.03mm y un alcance de movimiento semejante al de una mano al girar la muñeca. Este dispositivo debe ser inicializado en una posición neutral, en esta posición, el delgado tendón de conexión se encuentra en estado horizontal, el botón interruptor sobre este punto también debe encontrarse en posición horizontal. Para el modelo 1.5/6DOF el Gimbal debe ser orientado de acuerdo a su posición derecha e izquierda, mientras que para los modelos 1.0A y 1.5A el Gimbal (si se encuentra instalado) debe ser orientado correctamente frente al PHANTOM PREMIUM. [8]

El espacio de trabajo del PHANTOM PREMIUM es 10(pulg) ancho x 7(pulg) alto x 5(pulg) fondo, que son 250(mm) ancho x 178(mm) alto x 127(mm) fondo, y tiene un peso aproximado de 19lb iguales a 8.55kgr. [10]



Figura 2.-Dispositivo háptico PHANToM 1.0

Modelos del PHANToM 1.0

Modelo cinemático directo de posición [11].

$$\begin{aligned}
 x &= s_1(l_1c_2 + l_2s_3) \\
 y &= l_2 - l_2c_3 + l_1s_2 \\
 z &= -l_1 + c_1(l_1c_2 + l_2s_3)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Modelo cinemático inverso de posición [11].

$$\begin{aligned}
\theta_1 &= -a \tan 2(x, z + l_1) & \theta_2 &= \gamma + \beta \\
R &= \sqrt{x^2 + (z + l_1)^2} & r^2 &= l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\alpha) \\
r &= \sqrt{x^2 + (z + l_1)^2 + (y - l_2)^2} & \alpha &= \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2l_1l_2}\right) \\
\beta &= a \tan 2(y - l_2, R) & \theta_3 &= \theta_2 + \alpha - \pi/2 \\
\gamma &= \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + r^2 - l_2^2}{2l_1r}\right)
\end{aligned} \tag{2}$$

Modelo cinemático directo de velocidad [11].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1c_1c_2 + l_2s_3c_1 & -l_1s_1s_2 & l_2s_2c_3 \\ 0 & l_1c_2 & l_2s_3 \\ -(l_1s_1c_2 + l_2s_1s_3) & -l_1s_2c_1 & l_2c_1c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Modelo cinemático inverso de velocidad [11].

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= J^{-1}\dot{x} \\
J^{-1} &= \frac{adj(J)^T}{\det(J)} \\
adj(J) &= \begin{bmatrix} l_1l_2c_1c_{2-3} & 0 & -l_1l_2s_1c_2c_{2-3} \\ -l_2s_1s_3K & l_2c_3K & -l_2s_3c_1K \\ l_1s_1c_2K & l_1s_2K & l_1c_1c_2K \end{bmatrix} \\
K &= l_1c_2 + l_2s_3 \\
\det(J) &= l_1l_2l_1s_2s_3c_2 + l_1c_2^2c_3 + l_2s_3c_2c_3 - l_2s_2c_3^2
\end{aligned} \tag{4}$$

Modelo dinámico [11].

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau$$

$$\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
d_{11} &= \left[(0.5l_1^2 + 0.125l_2^2)ma + (0.125l_1^2)mc \right] + 0.125l_1^2(4ma + mc)\cos(2q_2) + d'_{11} \\
d'_{11} &= -0.125(l_2^2ma + 4l_3^2mc)\cos(2q_3) + 0.125l_1(l_2ma + l_3mc)\cos(q_2)\sen(q_3) \\
d_{22} &= l_1^2(ma + 0.25mc) \\
d_{23} &= -0.5l_1(l_2ma + l_3mc)\sen(q_2 - q_3) \\
d_{32} &= d_{23} \\
d_{33} &= 0.25l_2^2ma + l_3^2mc
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= 0.25 \left\{ -2 \operatorname{sen}(q_2) \left[l_1^2 (4ma + mc) \cos(q_2) \right] + 2l_1 (l_2 ma + l_3 mc) \operatorname{sen}(q_3) \dot{q}_3 \right\} + c_{11} \\
\dot{c}_{11} &= 0.252 \cos(q_3) \left[2l_1 (l_2 ma + l_3 mc) \cos(q_2) + (l_2^2 ma + 4l_3 mc) \operatorname{sen}(q_3) \right] \dot{q}_3 \\
c_{12} &= -0.25 \left\{ l_1^2 (4ma + mc) \operatorname{sen}(2q_2) + 4l_1 (l_2 ma + l_3 mc) \operatorname{sen}(q_2) \operatorname{sen}(q_3) \right\} \dot{q}_1 \\
c_{13} &= -0.125 \left\{ -4l_1 (l_2 ma + l_3 mc) \cos(q_2) \cos(q_3) - (l_2^2 ma + 4l_3^2 mc) \operatorname{sen}(2q_3) \right\} \dot{q}_1 \\
c_{21} &= -c_{12} \\
c_{23} &= 0.5l_1 (l_2 ma + l_3 mc) \cos(q_2 - q_3) \dot{q}_3 \\
c_{31} &= -c_{13} \\
c_{33} &= 0.5l_1 (l_2 ma + l_3 mc) \cos(q_2 - q_3) \dot{q}_2
\end{aligned}$$

Donde sus parámetros están descritos en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor	Unidad
m_a	$17,5 \times 10^{-3}$	Kg
m_c	$10,4 \times 10^{-3}$	Kg
m_{be}	0,2214	Kg
m_{df}	0,1106	Kg
L_1	139,7	mm
L_2	139,7	mm
L_3	32,5	mm
L_4	36,8	mm
L_5	52,7	mm
g	9,81	m/s^2

Tabla1.- Parámetros de PHANToM 1.0

IV.-Guiado háptico

Estudios muestran que existe una fuerte relación entre las sensaciones sentidas por una mano humana, tal como un objeto deslizándose y los movimientos que la mano estaba haciendo para adquirir ese conocimiento. El sistema humano háptico esta constituido de dos subsistemas, subsistema motor, subsistema sensorial. Hay una fuerte relación entre ambos.

Los humanos usan dos diferentes formas de exploración háptica, la activa y la pasiva. La exploración háptica activa es cuando el usuario controla sus propios movimientos. La exploración háptica pasiva es cuando la mano o el dedo del operador humano es guiado por otra persona.

Una de las aplicaciones más sobresalientes del guiado háptico es la rehabilitación de pacientes con discapacidades motrices o inclusive para poder diagnosticar el inicio de una enfermedad como dislexia o inmovilidad de un musculo a temprana edad.

V.-Diseño de control hiperbólico.

Para el diseño de es controlador se hace uso de la teoría de estabilidad de Lyapunov y de las propiedades de pasividad de un sistema electromecánico, así como de las propiedades dinámicas del robot PHANToM 1.0.

Propiedades dinámicas

Propiedad 1.- Las matriz de inercias es una matriz definida positiva y simétrica tal que,

$$\begin{aligned}
D(q) &= D(q)^T \\
x^T D(q)x &> 0
\end{aligned} \tag{6}$$

Propiedad 2.- propiedad de antisimetría, existe un relación entre la matriz de inercias y la matriz de coriolis.

$$x^T \{ \dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q}) \} x = 0 \quad (7)$$

Propiedad de pasividad

Un sistema Euler-Lagrange esta descrito por:

$$\begin{aligned} L &= K - U \\ K &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \\ U &= \sum_{i=1}^n m_i h_i g = \dot{q}^T G(q) \end{aligned} \quad (8)$$

Dado que PHANToM es un dispositivo pasivo se tiene que debe cumplir con la siguiente propiedad [12].

$$\sum: \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = f(x, u), x(0) \in \mathbb{R}^n \\ y = h(x, u) \end{array} \right\} \quad (9)$$

Este sistema es disipativo con una velocidad de suministro de energía de

$$w(u, y) = u^T y \quad (10)$$

Derivando la función de energía del sistema se obtiene:

$$\begin{aligned} E(q, \dot{q}) &= K + U \\ E(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} + \dot{q}^T G(q) \\ \dot{E}(q, \dot{q}) &= \dot{q}^T \tau \end{aligned} \quad (11)$$

De tal manera que cumpliendo con la propiedad

$$\begin{aligned} V(x) - V(x_0) &\leq \int_0^t y^T(s) u(s) ds \\ E(t) - E(0) &\leq \int_0^t \dot{q}^T \tau dt \end{aligned} \quad (12)$$

Propiedad de pasividad del error

La siguiente propiedad de pasividad descrita es una interesante propiedad de un problema de regulación en sistemas de Euler-Lagrange, sin embargo esta propiedad puede ser extendida para la solución de una trayectoria [12].

$$\begin{aligned} D(q) \dot{S} + [C(q, \dot{q}) + K_d(q, \dot{q})] S &= \psi \\ \psi &= \tau - [D(q) \ddot{q}_r + C(q, \dot{q}) \dot{q}_r + G(q) + F(\dot{q})] = \tau \end{aligned} \quad (13)$$

Tomando en consideración las propiedades anteriores se plantea como una función candidata de Lyapunov a la función de energía, de tal manera que se tiene lo siguiente:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^T D(q) S + \int S^T K_L \ln[\cosh(s)] ds + c \quad (14)$$

Derivando la función candidata a Lyapunov se obtiene;

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} S^T D(q) \dot{S} + \frac{1}{2} S^T \dot{D}(q) S + \frac{1}{2} \dot{S}^T D(q) S + S^T K_L \ln[\cosh(s)] \\ D(q) \dot{S} + [C(q, \dot{q}) + K_d(q, \dot{q})] S &= \psi \\ \psi &= \tau - [D(q) \ddot{q}_r + C(q, \dot{q}) \dot{q}_r + G(q) + F(\dot{q})] = \tau \\ D(q) \dot{S} &= \tau - [C(q, \dot{q}) + K_d] S \\ \dot{V} &= S^T D(q) \dot{S} + \frac{1}{2} S^T \dot{D}(q) S + S^T K_L \ln[\cosh(s)] \\ \dot{V} &= S^T [\tau - K_d S + K_L \ln[\cosh(s)]] = \dot{V} = -S^T K_D S \\ \tau &= [K_d S - K_D S - K_L \ln[\cosh(s)]] \\ K_D &> K_d \\ \tau &= -K_d S - K_L \ln[\cosh(s)] \end{aligned} \quad (15)$$

VI.-Descripción de la tarea

En el primer experimento se muestra la trayectoria de referencia que debe seguir el efector final del dispositivo háptico PHANTOM 1.0. Además de las ecuaciones paramétricas que definen dicha trayectoria.

$$\begin{aligned} x(t) &= \rho(t) \cos(\omega\varphi(t)) + k & r &= 0.01m \\ y &= 0 & \varphi(t) &= \lambda t \\ z &= \rho(t) \cos(\omega\varphi(t)) + k & \rho(t) &= r \cos(n\omega\varphi(t)) \\ h &= 0.03m & \omega &= 2\pi/5 \\ k &= 0.02m & \lambda &= 1 \\ & & n &= 3 \end{aligned} \quad (16)$$

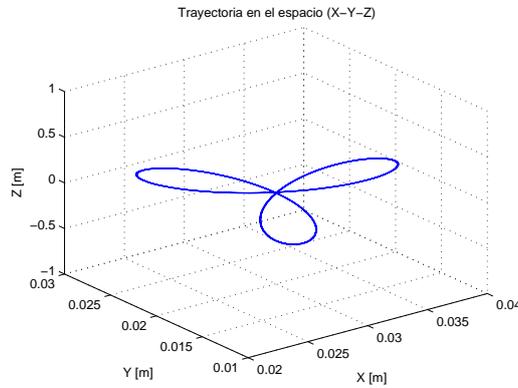


Figura 2.-Trayectoria deseada

En el segundo experimento se realiza con fines de caligrafía, por lo que la planificación de trayectorias en conjunto forman la palabra HOLA. En este experimento se realiza con el operador humano como se muestra en el siguiente diagrama.

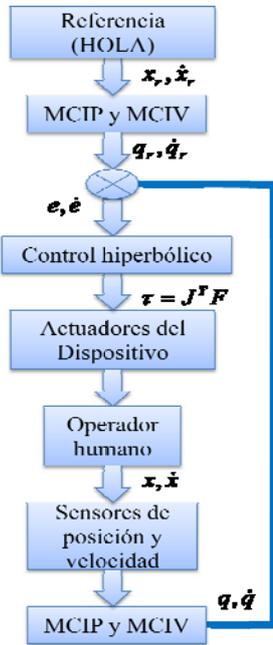


Diagrama de flujo con el operador en el lazo



Figura3.- Trayectoria deseada

VII.-Descripción de la plataforma experimental

Para poder evaluar el algoritmo del control hiperbólico se hace de la interfaz háptica PHANToM 1.0, que permitan mejorar el desempeño en tareas de exploración, entrenamiento y telepresencia, se superaron aspectos que consideran la arquitectura abierta del sistema, tales como:

- Disponer de la interfaz de aplicación programable (GHOST SDK 3.1).
- Desarrollar una clase con los manejadores de entrada y salida del sistema para adquisición de datos y control.
- Desarrollar en código el modelo cinemático del dispositivo háptico PHANToM.
- Desarrollar código en Visual C++ para protección de PHANToM, en este caso que no exceda los 5Nm en los motores para protección misma del robot.
- Hacer lo posible para que el experimento se aproxime a tiempo real, manejando una frecuencia de 1khz, que es la frecuencia de trabajo del PHANToM 1.0, cabe mencionar que cuenta con encoders ópticos de alta resolución (1024 pulsos por giro).

La plataforma se construyó con los siguientes elementos tanto de software como de hardware:

Hardware.

- Computadora pentium 4 a 1.4 GHz y 1 GB de memoria RAM.
- Tarjeta de video GForce3.

- Equipo PHANToM 1:0 (Sensable Technologies)

Software

Las características del software, en el que fueron desarrollados los experimentos son:

- Windows XP.
- Visual C++ 6.0.
- Matlab 7.1.
- API de Ghost 3.1.



Figura 3.- Espacio de trabajo

VIII.-Resultados experimentales

Primer experimento.

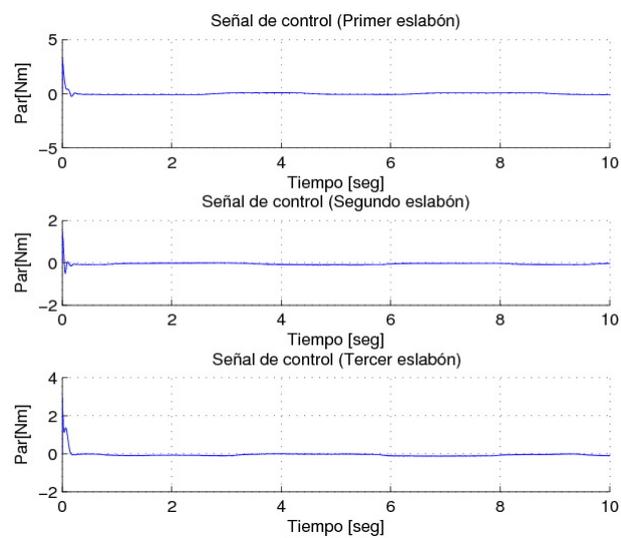


Figura 4.- Señal del control hiperbólico

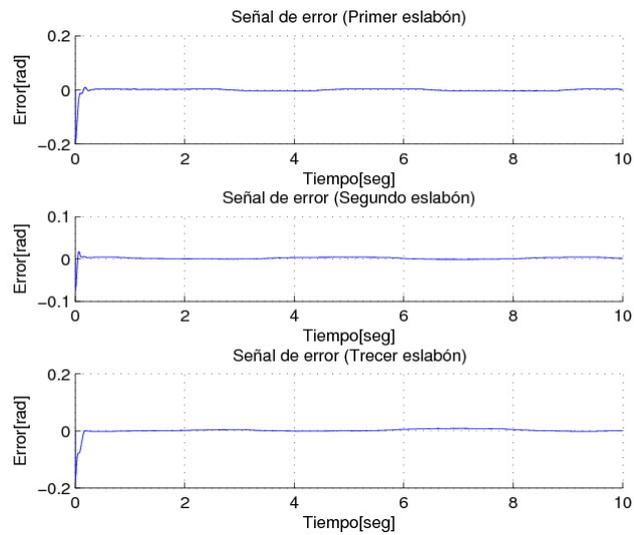


Figura 5.- Señal del error dinámico

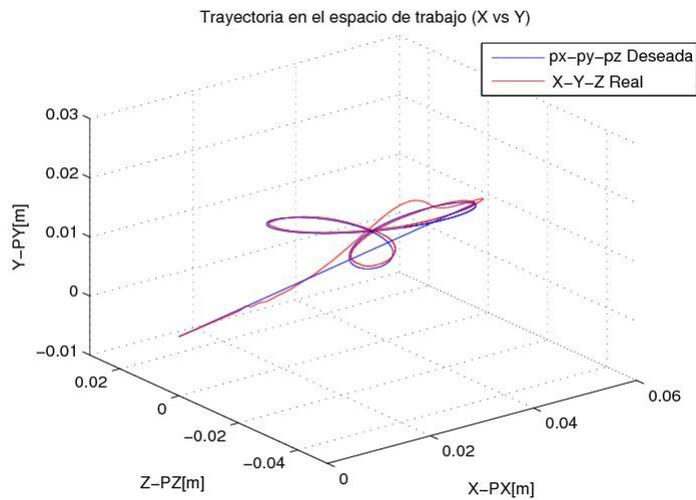


Figura 6.- Espacio de trabajo

Segundo experimento

Este experimento se realizo a un trabajador de seguridad del CITIS.

Nombre: Juan Esteban

Edad: 50 años

Discapacidad Motriz: Ninguna

Presenta dislexia

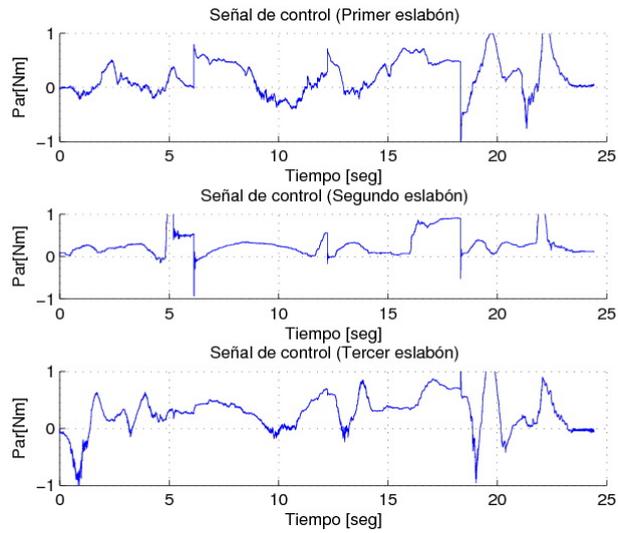


Figura 7.- Señal del control hiperbólico

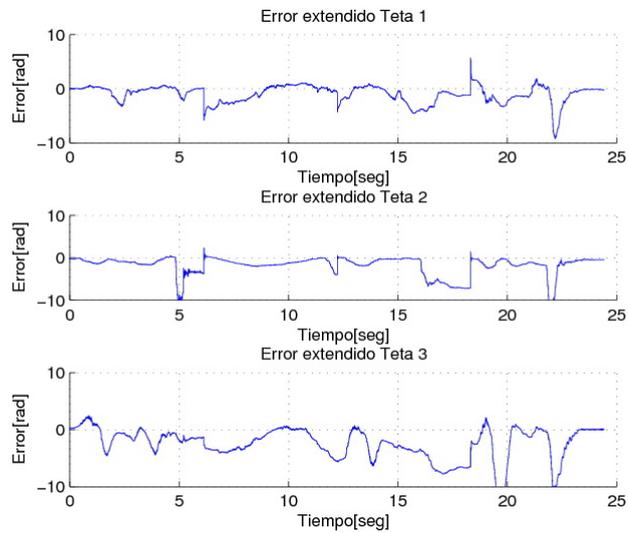


Figura 8.- Señal del error dinámico

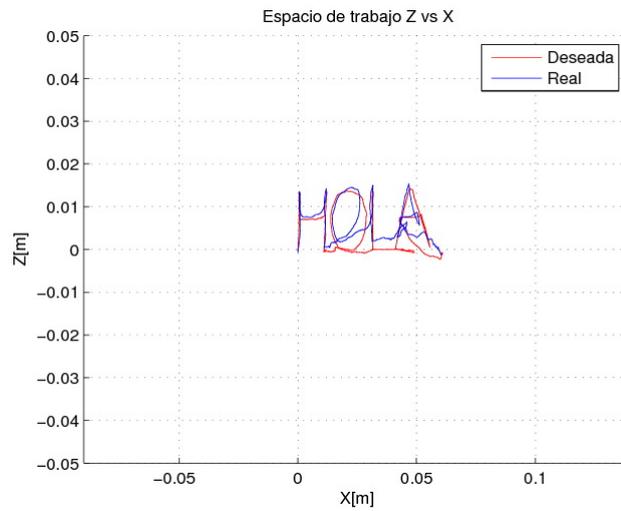


Figura 9.- Espacio de trabajo

IX.- Comentarios de los resultados experimentales

X.-Conclusiones

XI.-Bibliografía

[1].- Youn K. (Clara)Kim and Xiaolic(Lucy) Yang, Real-Time Performance Analysis of Hand Writing Rehabilitation Exercise in Haptic Virtual Reality, Department of Electrical and Computer Engineering, Purdue University Calumet Hammond, IN, U.S.A, 2007.

[2].- Srinivasan M. A., Haptics Research at the MIT Touch Lab, The First Phantom user`s Group Workshop, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, pp. 10-13, 1996.

[3].- Dandekar, K. and Mandayam A. Srinivasan,A 3-dimensional finite element model of the monkey ngertip for predicting responses of slowly adapting mechanoreceptors, Proceesings of the 1995 Bioengineering Conference, Eds: R.M. Hochmuth, N.A. Langrana, and M.S. Hefzy, BED-Vol.29, pp. 257-258, 1995.

[4].- Srinivasan, Mandayam A., Whitehouse, J.M. and LaMotte R.H., Tactile Detection of Slip: Surface Microgeometry and Peripheral Neural Codes, Journal of Neurophysiology, Vol. 63, No.6, pp. 1323-1332, 1990.

[5].- Virtual Reality Inc., MIS Training and Rehearsal System 323, Company Brochure, Pleasantville, NY, 1993.

[6].- Beauregard, G. L., Srinivasan, M. A. and Durlach, N.I., Manual Resolution of Viscosity and Mass, Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division, DSC-Vol.57.2, pp. 657-662, ASME, 1995.

[7].- Hou, I. A. and Srinivasan, M. A., Multimodal Virtual Environments: MAGIC Toolkit and Visual-Haptic Interaction Paradigms, 1996.

[8].- PHANTOM PREMIUM User Guide, SensAble Technologies, Part #02321 Revision 2.0, November 18. 2004.

[9].- Haptic SensAble PHANTOM, SensAble Technologies. 2003.

[10].- SPECIFICATIONS COMPARISON FOR THE PHANTOM® PREMIUM. 1.0, 1.5, 1.5 HIGH FORCE, AND 3.0 HAPTIC DEVICES. 1993-2006 SensAble Technologies. January 6. 2006.

[11].- Domínguez-Ramírez, Vicente-Parra, Diseño e integración de una interfaz háptica activa realista, CINVESTAV México, 2004.

[12].- Romeo Ortega, Antonio Loría, Per Johan Nicklasson, and Hebertt Sira-Ramírez, Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems, Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications, Springer, 1998.