

El robot paralelo *Novint Falcon* como plataforma experimental háptica

Iván Torres-Rodríguez* J. Daniel Castro-Díaz**
Javier Pliego-Jiménez**

* Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México. C.P. 04510 (email: ivantr18@hotmail.com)

** Departamento de Control y Robótica, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México C.P. 04510 (email: jsdnlcstr@gmail.com, enzo-jp@hotmail.com)

Resumen: El robot paralelo *Novint Falcon* es un dispositivo háptico de bajo costo creado originalmente para la industria de los videojuegos. Su estructura cinemática cerrada le permite producir un amplio rango de fuerzas que a los robots seriales hápticos les resulta complicado, haciéndolo adecuado para aplicaciones en donde se produce una interacción con objetos virtuales rígidos o deformables y cuyo objetivo es reproducir en su efector final una fuerza resultante que el usuario sea capaz percibir. Además su uso experimental desde la perspectiva de la teoría de sistemas dinámicos y control ha sido poco explorado, por lo que en este artículo se establecen las bases matemáticas necesarias para su análisis. Más aún, se exploran sus capacidades hápticas como una plataforma experimental de fácil acceso en el ámbito de los sistemas de realidad virtual.

Palabras clave: Robot paralelo, dispositivo háptico, sistema de realidad virtual, renderizado de fuerza.

1. INTRODUCCIÓN

El primer trabajo acerca de un mecanismo paralelo fue presentado por Gwinnet (1928) pero aunque fue obtenida una patente, nunca fue llevado a la realidad. Posteriormente Pollard propuso de manera formal el diseño del primer robot paralelo (Pollard, 1942). Cinco años después Gough creó un robot de seis grados de libertad que revolucionó la naciente industria de la robótica: un hexápodo octaédrico que fue usado hasta 1962 en un mecanismo neumático de prueba de llantas (Gough y Whitehall, 1962). Tomando este diseño como base, Stewart publicó un trabajo en donde describía una plataforma que sería usada como simulador de vuelo (Stewart, 1965). Este hecho tuvo un impacto significativo en el posterior desarrollo de mecanismos paralelos y popularizó el diseño de Gough en la academia. Pero fue Raymond Clavel quien patentó el robot en configuración delta (Clavel, 1990) creando un nuevo paradigma en el diseño de robot paralelos. Llevó a cabo un mecanismo con tres actuadores montados en su base y una serie de paralelogramos cinemáticos que restringían el movimiento de un efector final a solamente un grado de libertad traslacional (Martin y Hiller, 2009). A diferencia de la plataforma de Stewart, sus dimensiones eran más compactas ya que su objetivo era realizar operaciones rápidas de traslado de piezas. La configuración delta inspiró la creación del robot *Novint Falcon*, muy similar al diseño de Tsai (Lung-Wen, 1999) y cuyas articulaciones esféricas del diseño original de Clavel fueron reemplazadas por articulaciones de revolución de un grado

de libertad, permitiendo el desacoplamiento de posición y orientación además de que el uso de este tipo de articulaciones redujo sus costos.

En cuanto al desarrollo de interfaces hápticas, Brooks fue pionero al construir un dispositivo visual-háptico con el fin de interactuar con moléculas de proteínas virtuales. Su primer prototipo fue el Grope-1 (Brooks y Batter, 1971) y contaba con una plataforma de tres grados de libertad capaz de producir retroalimentación de fuerza. Después, en la década de los ochenta, presentó el sistema final Grope-3, el primer dispositivo háptico de seis grados de libertad. Más adelante Burdea construyó un exoesqueleto usado en realidad virtual (Burdea et al., 1992) y cuyo mecanismo podía producir fuerza de reacción en los dedos, teniendo problemas cuando los usuarios se lo colocaban o retiraban. Esta desventaja impidió su uso práctico. Ante este problema Iwata presentó una solución que consistía en un dispositivo háptico en forma de pluma (Iwata, 1993) cuya fuerza era recreada mediante dos robots manipuladores. Después, investigadores del MIT presentaron el dispositivo PHANToM: un robot de seis grados de libertad con sólo tres actuados. El posterior crecimiento de la realidad virtual y de la industria de los videojuegos permitieron a dispositivos hápticos como el Phantom Omni de Sensable (basado en el diseño del PHANToM) ser lanzado al mercado masivo de consumo. Finalmente en 2007 el robot *Novint Falcon* llegó al mercado, siendo el primer robot paralelo en configuración delta usado de forma masiva en videojuegos y siendo reportado en diversos trabajos como los de Panarese y Edin (2010) y Yang (2013), ambos

orientados a su aplicación como dispositivo háptico. Sin embargo la literatura acerca del análisis cinemático y dinámico de este robot es escasa, siendo el trabajo de Michelotti (2011) el más relevante.

En este artículo se obtienen los modelos cinemático y dinámico del robot paralelo *Novint Falcon*, además de presentar una primera aproximación a la implementación de aplicaciones de realidad virtual que involucran tanto retroalimentación visual como háptica, planteando el uso de un controlador PID para esta última.

El texto está organizado de la siguiente manera: los modelos cinemáticos y sus propiedades se presentan en la Sección 2. En la Sección 3 se aborda el modelo dinámico. La Sección 4 presenta el desarrollo e implementación de un sistema de realidad virtual. Finalmente en la Sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. MODELOS CINEMÁTICOS

En esta sección se obtienen los modelos cinemáticos del robot *Novint Falcon* y se presentan algunas de sus propiedades, haciendo énfasis en las diferencias que guardan con los modelos de los robots seriales.

2.1 Análisis geométrico

Generalmente el análisis de robots de cadena cinemática abierta comienza con la aplicación de la convención de Denavit-Hartenberg pero en el caso de los robots de cadena cinemática cerrada esto no resulta conveniente. Para este tipo de robots normalmente se realiza un análisis geométrico previo para cada extremidad, lo que a continuación se presenta.

En el robot *Novint Falcon* se distinguen dos sistemas de referencia, el háptico $H(x, y, z)$ y el base $B(u, v, w)$ tal como se muestra en la Figura 1. El punto P del efector final se obtiene mediante la API¹ del fabricante y proporciona su posición en coordenadas del sistema de referencia háptico, esto implica realizar una transformación de coordenadas para pasar del sistema háptico H al sistema base B .

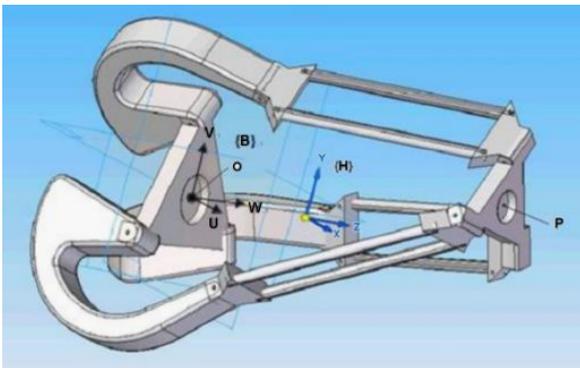


Fig. 1. Sistemas de Referencia Base y Háptico (Yang, 2013)

¹ *Application Programming Interface*: conjunto de rutinas y procedimientos que ofrecen una interfaz para interactuar con el robot

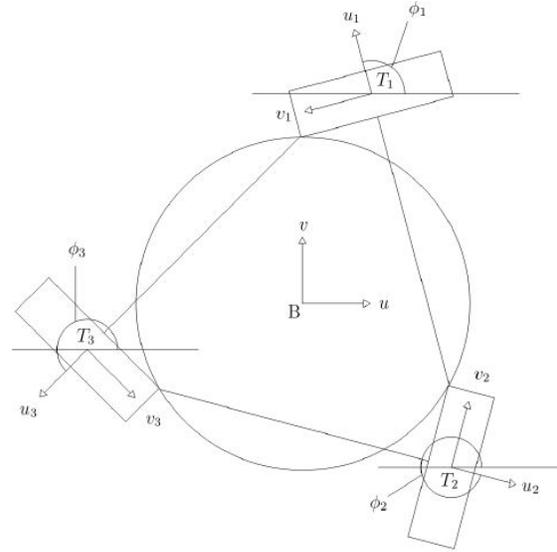


Fig. 2. Sistemas de Referencia Base B y de cada extremidad T_i

Además se requiere del uso de tres sistemas de referencia: $T_i(u_i, v_i, w_i)$ para $i = 1, 2, 3$, los cuales se encuentran en cada articulación actuada de la base, con cada eje u_i perpendicular al eje de la articulación y a un ángulo ϕ_i del eje u del sistema base, como se ilustra en la Figura 2.

Las transformaciones del sistema de referencia base B a los sistemas de referencia T_i son similares a las presentadas por Stamper (1997) y se obtienen usando la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} p_{ui} \\ p_{vi} \\ p_{wi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_i) & \sin(\phi_i) & 0 \\ -\sin(\phi_i) & \cos(\phi_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r \\ s \\ 0 \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

donde $(\phi_1, \phi_2, \phi_3) = (105, 345, 225)$ $[\circ]$ se obtienen a partir de la geometría del robot.

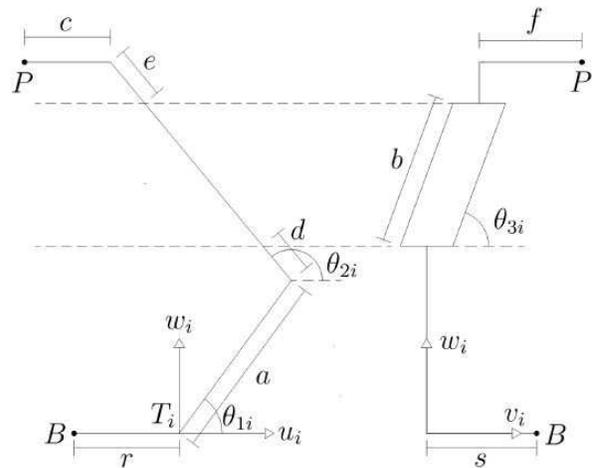


Fig. 3. Diagrama geométrico de la i -ésima extremidad.

El siguiente paso es obtener las expresiones para p_{ui} , p_{vi} y p_{wi} en función de los ángulos de cada articulación.

A partir de las relaciones geométricas presentadas en el diagrama de la Figura 3 se obtiene:

$$p_{ui} = a \cos(\theta_{1i}) - c + [d + e + b \sin(\theta_{3i})] \cos(\theta_{2i}) \quad (2)$$

$$p_{vi} = b \cos(\theta_{3i}) + f \quad (3)$$

$$p_{wi} = a \sin(\theta_{1i}) + [d + e + b \sin(\theta_{3i})] \sin(\theta_{2i}) \quad (4)$$

para $i = 1, 2, 3$. El valor de las longitudes $a-f$ pueden consultarse en (Torres-Rodríguez, 2017).

2.2 Cinemática Directa

Partiendo de las ecuaciones (2), (3) y (4), es necesario pasar al sistema de referencia háptico $H(x, y, z)$ substituyendo p_{ui} , p_{vi} y p_{wi} en la ecuación (1), esto da como resultado un sistema de nueve ecuaciones con nueve incógnitas:

$$0 = p_x \cos(\phi_i) + p_y \sin(\phi_i) - a \cos(\theta_{1i}) - [d + e + b \sin(\theta_{3i})] \cos(\theta_{2i}) + c - r \quad (5)$$

$$0 = p_y \cos(\phi_i) - p_x \sin(\phi_i) - b \cos(\theta_{3i}) + s - f \quad (6)$$

$$0 = p_z + z_0 - a \sin(\theta_{1i}) - [d + e + b \sin(\theta_{3i})] \sin(\theta_{2i}) \quad (7)$$

para $i = 1, 2, 3$. La solución de este conjunto de ecuaciones, obtenida por medio de eliminación dialítica de Sylvester, resuelve la cinemática directa y puede ser consultada en (Stamper, 1997). Ya que la API del *Novint Falcon* proporciona directamente la posición del efector final a partir del sistema de referencia háptico, para efectos prácticos no se resolvió la cinemática directa del robot en este trabajo.

2.3 Cinemática Inversa

A partir de la ecuación (3) se obtiene la expresión para θ_{3i}

$$\theta_{3i} = \pm \arccos\left(\frac{p_{vi} - f}{b}\right). \quad (8)$$

De igual forma se obtiene θ_{2i} de la ecuación (2)

$$\theta_{2i} = \arccos\left(\frac{p_{ui} - a \cos(\theta_{1i}) + c}{d + e + b \sin(\theta_{3i})}\right). \quad (9)$$

Finalmente, haciendo manipulaciones algebraicas, se obtiene

$$\theta_{1i} = 2 \arctan(\alpha_i) \quad (10)$$

en donde

$$\alpha_i = \frac{-A_{1i} - \sqrt{A_{1i}^2 - 4A_{0i}A_{2i}}}{2A_{2i}} \quad (11)$$

y a su vez

$$A_{0i} = (a - c)^2 - (d + e)^2 + p_{wi}^2 + p_{ui}^2 + 2p_{ui}(c - a) - 2b \sin(\theta_{3i})(d + e) - b^2 \sin^2(\theta_{3i}),$$

$$A_{1i} = -4ap_{wi} \quad \text{y}$$

$$A_{2i} = (a + c)^2 - (d + e)^2 + p_{wi}^2 + p_{ui}^2 + 2p_{ui}(c + a) - 2b \sin(\theta_{3i})(d + e) - b^2 \sin^2(\theta_{3i}).$$

2.4 Matriz Jacobiana

En un robot paralelo no todas las articulaciones pueden controlarse independientemente ya que algunas están actuadas mientras otras no. El robot *Novint Falcon* presenta tres articulaciones actuadas y todas se encuentran en la base (θ_{11} , θ_{12} y θ_{13}), por lo que estos tres ángulos forman el vector de coordenadas generalizadas \mathbf{q} .

La matriz Jacobiana de un robot paralelo representa la transformación de la velocidad del efector final denotada por $\dot{\mathbf{x}}$ a la velocidad de las articulaciones actuadas $\dot{\mathbf{q}}$:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} \quad (12)$$

en la cual $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ es la matriz Jacobiana, donde n es la dimensión del vector $\dot{\mathbf{x}}$ y m la dimensión del vector $\dot{\mathbf{q}}$. Puede notarse que la matriz Jacobiana de un robot paralelo es inversa a la de un robot en serie donde la transformación se realiza de la velocidad de las articulaciones a la velocidad del efector final.

Las restricciones cinemáticas impuestas por las extremidades pueden ser escritas de forma general como:

$$F(\mathbf{q}, \mathbf{x}) = 0, \quad (13)$$

donde F es una función implícita n -dimensional de \mathbf{q} y \mathbf{x} . Diferenciando la ecuación (13) con respecto al tiempo, resulta en la siguiente relación:

$$\mathbf{J}_x(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_q(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (14)$$

donde

$$\mathbf{J}_x(\mathbf{q}) = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{y} \quad \mathbf{J}_q(\mathbf{q}) = -\frac{\partial F}{\partial \mathbf{q}}.$$

En el caso del robot *Novint Falcon* las matrices Jacobianas son

$$\mathbf{J}_x \begin{bmatrix} \dot{p}_u \\ \dot{p}_v \\ \dot{p}_w \end{bmatrix} = \mathbf{J}_q \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} J_{x_{11}} & J_{x_{12}} & J_{x_{13}} \\ J_{x_{21}} & J_{x_{22}} & J_{x_{23}} \\ J_{x_{31}} & J_{x_{32}} & J_{x_{33}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} J_{q_1} & 0 & 0 \\ 0 & J_{q_2} & 0 \\ 0 & 0 & J_{q_3} \end{bmatrix},$$

y

$$\begin{aligned} J_{x_{i1}} &= \cos(\theta_{2i}) \sin(\theta_{3i}) \cos(\phi_i) - \cos(\theta_{3i}) \sin(\phi_i), \\ J_{x_{i2}} &= \cos(\theta_{3i}) \cos(\phi_i) + \cos(\theta_{2i}) \sin(\theta_{3i}) \sin(\phi_i), \\ J_{x_{i3}} &= \sin(\theta_{2i}) \sin(\theta_{3i}) \quad \text{y} \\ J_{q_i} &= a \sin(\theta_{2i} - \theta_{1i}) \sin(\theta_{3i}) \end{aligned}$$

para $i = 1, 2$ y 3 .

Finalmente se forma la matriz Jacobiana $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ de la ecuación (12) mediante la expresión

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_x. \quad (16)$$

Debido a su naturaleza la matriz Jacobiana $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ no existe cuando se presenta una singularidad en la cinemática inversa, y de igual forma su inversa $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ no existe en presencia de una singularidad en la cinemática directa.

3. MODELO DINÁMICO

Diversas aproximaciones han sido utilizadas para caracterizar la dinámica de los robots paralelos. Dentro de las

más comunes se encuentra el basado en la formulación de Lagrange (Miller, 1992), la aplicación del principio de Hamilton (Miller y Clavel, 1995) y empleando directamente las ecuaciones de movimiento de Newton (Guglielmetti y Longchamp, 1994). En este trabajo se realiza la aproximación basada en las ecuaciones de movimiento de Newton-Euler debido a que requiere un menor trabajo computacional que sus homónimas. Cabe señalar que el tiempo en que se realiza el cálculo del momento aplicado a cada actuador debe ser menor al tiempo de muestreo del robot (1 milisegundo).

La primer ecuación de movimiento es obtenida mediante la suma de momentos aplicados a la articulación actuada de la i -ésima extremidad:

$$M_{AI_i} = I_A \ddot{\theta}_{1i} + \tilde{\tau}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

donde M_{AI_i} es la suma de los momentos en la articulación T_i causados por la inercia rotacional y traslacional del robot, I_A es el momento de inercia debido a el eslabón de entrada, el rotor del motor y una de las dos bielas del paralelogramo, por último $\tilde{\tau}_i$ es el i -ésimo elemento de una matriz de cargas inerciales debido a la plataforma móvil y la segunda biela del paralelogramo de cada extremidad. Las relaciones para I_A y $\tilde{\tau}$ son:

$$I_A = I_r + \frac{1}{3} m_a a^2 + m_b a^2 \quad (18)$$

donde I_r es el momento de inercia del rotor, m_a y a son la masa y longitud del eslabón de entrada respectivamente y m_b es la masa de una de las bielas del paralelogramo. Además:

$$\tilde{\tau} = (\mathbf{J}^T)^{-1} (3m_b + m_c) \ddot{\mathbf{P}}_B \quad (19)$$

donde m_c es la masa de la plataforma móvil, \mathbf{J} es la matriz Jacobiana del robot y $\ddot{\mathbf{P}}_B$ es la aceleración de la plataforma móvil con respecto al sistema de referencia base.

La segunda ecuación de movimiento es obtenida al sumar los momentos aplicados en la articulación A_i causados por los motores, la fuerza gravitacional y la fricción viscosa:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{AT_1} \\ M_{AT_2} \\ M_{AT_3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} a m_a g \begin{bmatrix} \sin(\phi_1) \sin(\theta_{11}) \\ \sin(\phi_2) \sin(\theta_{12}) \\ \sin(\phi_3) \sin(\theta_{13}) \end{bmatrix} + \\ & a m_b g \begin{bmatrix} \sin(\phi_1) \sin(\theta_{11}) \\ \sin(\phi_2) \sin(\theta_{12}) \\ \sin(\phi_3) \sin(\theta_{13}) \end{bmatrix} \\ & + (\mathbf{J}^T)^{-1} m \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} - b_A \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

donde τ_i es el momento aplicado por el actuador de la i -ésima extremidad, $m = 3m_b + m_c$, y b_A es el coeficiente de fricción viscosa.

De acuerdo a la Segunda Ley de Newton los momentos en la articulación A_i se relacionan de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} M_{AT_1} \\ M_{AT_2} \\ M_{AT_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{AI_1} \\ M_{AI_2} \\ M_{AI_3} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Substituyendo las ecuaciones (17) y (20) en la ecuación (21) y resolviendo para los momentos aplicados por los actuadores se tiene:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} &= -a g \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) \begin{bmatrix} \sin(\phi_1) \sin(\theta_{11}) \\ \sin(\phi_2) \sin(\theta_{12}) \\ \sin(\phi_3) \sin(\theta_{13}) \end{bmatrix} - \\ & (\mathbf{J}^T)^{-1} m \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} + b_A \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix} \\ & + I_A \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{11} \\ \ddot{\theta}_{12} \\ \ddot{\theta}_{13} \end{bmatrix} + (\mathbf{J}^T)^{-1} m \ddot{\mathbf{P}}_B. \end{aligned} \quad (22)$$

Se puede encontrar una relación entre la aceleración de la plataforma móvil y la aceleración angular derivando la matriz Jacobiana de la ecuación (12)

$$\ddot{\mathbf{P}}_B = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{11} \\ \ddot{\theta}_{12} \\ \ddot{\theta}_{13} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} (\mathbf{J}^{-1}) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Substituyendo (23) en (22) y agrupando términos se tiene:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (24)$$

donde

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_{13} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = I_A \mathbf{I} + (\mathbf{J}^T)^{-1} m \mathbf{J}^{-1},$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = (\mathbf{J}^T)^{-1} m \frac{d}{dt} (\mathbf{J}^{-1}),$$

$$\mathbf{D} = b_A \mathbf{I} \quad \text{y}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = -a g \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) \begin{bmatrix} \sin(\phi_1) \sin(\theta_{11}) \\ \sin(\phi_2) \sin(\theta_{12}) \\ \sin(\phi_3) \sin(\theta_{13}) \end{bmatrix}$$

$$- (\mathbf{J}^T)^{-1} m \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix}.$$

La ecuación (24) describe la dinámica del robot *Novint Falcon* donde $\mathbf{q} \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de coordenadas generalizadas, $\mathbf{H}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia y presenta la característica de ser definida positiva, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis, $\mathbf{D} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ es una matriz definida positiva que contiene en su diagonal principal a los coeficientes de fricción del sistema y $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de gravedad. Finalmente $\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de entradas de control aplicados en cada articulación del robot.

4. SISTEMA DE REALIDAD VIRTUAL

Un ambiente virtual consiste en elementos que son representados mediante estímulos sensoriales de distintos tipos. Los objetos en un ambiente virtual, al igual que en la realidad, contienen propiedades como forma, peso, color, textura, densidad y temperatura. Estas propiedades son percibidas mediante diferentes estímulos sensoriales, por ejemplo, el color se percibe mediante estímulos visuales, mientras que la forma del objeto se percibe mediante estímulos hápticos (Mihelj y Podobnik, 2012). En esta sección se exploran las capacidades hápticas del robot

Novint Falcon mediante el desarrollo de un sistema de realidad virtual.

4.1 Arquitectura del sistema de realidad virtual

Un sistema de realidad virtual tiene como objetivo la interacción entre un usuario y un ambiente virtual. Idealmente dicha interacción debería involucrar los cinco sentidos pero en la actualidad estos sistemas sólo utilizan la visión, el sonido y más recientemente, el tacto. La arquitectura del sistema de realidad virtual implementado en este trabajo se muestra en la Figura 4. Sus elementos principales son tres:

- El motor de simulación.
- El renderizado visual y háptico.
- Los transductores.

El motor de simulación se encarga del comportamiento del entorno virtual en todo momento. El renderizado visual y háptico calcula las respuestas visuales y hápticas del entorno virtual hacia el usuario. Finalmente la función de los transductores es convertir las señales de video y fuerza en estímulos que puedan ser percibidos por el usuario. Para la señal de video una pantalla y para la señal de fuerza el robot *Novint Falcon*.

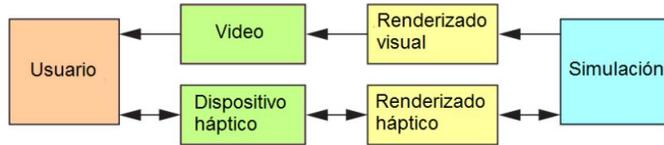


Fig. 4. Arquitectura del sistema de realidad virtual

Es importante notar que el canal de información de video es unidireccional, es decir, sólo se transmite en un sentido (hacia el usuario). Por otra parte el canal de información háptica es bidireccional, la información es transmitida desde y hacia el usuario, siendo ésta su característica más relevante.

4.2 Renderizado háptico

La parte central de un sistema de realidad virtual en cuanto a la estimulación táctil es el renderizado háptico. En la Figura 5 se ilustran los elementos que componen dicho renderizado, pudiendo identificar dos bloques principales: el de detección de colisiones y el de control de fuerza, siendo estos algoritmos los responsables de calcular la adecuada interacción entre el dispositivo háptico y el ambiente virtual.

4.3 Detección de colisiones

El algoritmo de detección de colisiones se encarga de procesar cuando existe algún contacto entre el usuario y el objeto virtual, proporcionando información sobre dónde y cuándo ocurre. El tipo de algoritmo a implementar se encuentra estrechamente relacionado con la geometría del objeto. Gran parte de los métodos se originaron a partir

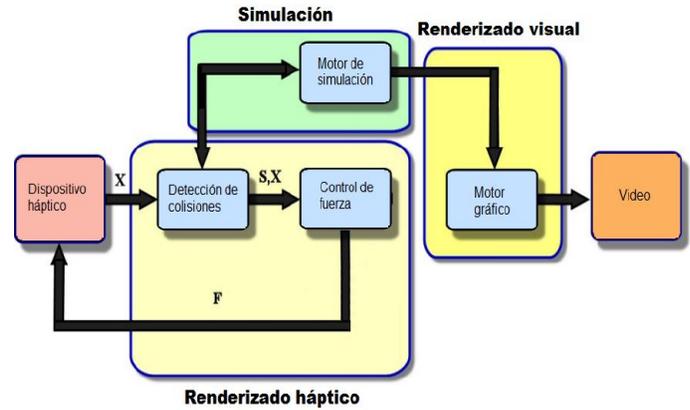


Fig. 5. Esquema de renderizado háptico

de la computación gráfica, algunos de los más utilizados son: superficie implícita, superficie paramétrica y modelo poligonal. En el caso de este trabajo, el método utilizado es el de superficie implícita que consiste en definir la superficie frontera mediante una función $f(x, y, z) = 0$, de esta forma se puede saber si algo se encuentra dentro de la superficie $f(x, y, z) < 0$, o fuera de ella $f(x, y, z) > 0$.

4.4 Control de fuerza

El ambiente virtual implementado se observa en la Figura 6-(a) y se basa en una esfera fija ubicada en el centro de la escena más un *avatar*. Usualmente se define como *avatar* a la representación virtual del dispositivo háptico que el usuario manipula y a través del cuál ocurre la interacción física con el ambiente virtual. La elección del *avatar* depende de lo que se está simulando, en este caso se optó por una esfera de color rojo debido a la forma del efector final del robot. La función que define la esfera es

$$f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - R^2 \triangleq 0 \quad (25)$$

donde R es el radio de la esfera.

El proceso consiste en calcular la fuerza resultante de la interacción entre el *avatar* y el objeto virtual ante la presencia de una colisión. En general podemos distinguir dos modelos de interacción: impedancia y admitancia. En el primero la interfaz háptica mide el desplazamiento y la simulación calcula la fuerza resultante. En el segundo se mide la fuerza entre el usuario y el dispositivo háptico y la simulación calcula el desplazamiento. El robot *Novint Falcon* puede medir el desplazamiento pero no fuerza por lo que se realizó un control por impedancia, donde la señal entrada del controlador es el desplazamiento y la señal de salida es fuerza.

Para la implementación se usaron tres algoritmos de respuesta basados en el esquema de control PID de la ecuación

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

- El primero de ellos se trata de un control P, el cual se basa en el algoritmo PID con $T_d = 0$ y $T_i \rightarrow \infty$. Este algoritmo recrea el comportamiento de un resorte con una constante elástica k_p .

- El segundo es un control PD, de igual manera se basa en el algoritmo del controlador PID pero con $T_i \rightarrow \infty$. Emula el comportamiento de un sistema resorte-amortiguador donde el producto $k_p T_d$ representa la constante de amortiguamiento.
- El último es un control PID. El cual agrega un término integral al sistema resorte-amortiguador y físicamente no tiene una representación.

Los algoritmos requieren de la posición del *avatar* $f(x, y, z)$ del cual se obtiene la señal de error definida como

$$e(t) = R - \sqrt{R^2 + f(x, y, z)}.$$

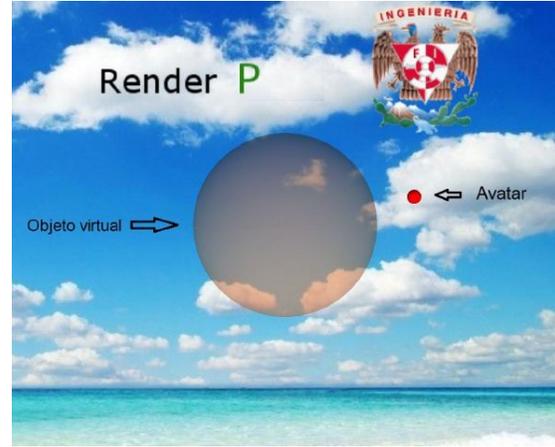
La respuesta del algoritmo $u(t)$ representa el módulo del vector de fuerza aplicado directamente al usuario mediante el dispositivo háptico. Para obtener dicho vector basta con multiplicar su módulo por el vector unitario que parte desde el centro de la esfera hacia la posición del *avatar*:

$$\mathbf{F} = \frac{u(t)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (26)$$

4.5 Implementación mediante HDAL

Para la implementación se utilizó la API proporcionada directamente por el fabricante llamada HDAL (*Haptic Device Abstraction Layer*), que ofrece soporte para una gran variedad de dispositivos con y sin retroalimentación de fuerza y fue creada para su implementación en lenguaje C++ únicamente. Se utilizó una PC con Windows 7 donde HDAL es el puente entre el driver del robot y el programa. Finalmente la conexión física de la PC al dispositivo fue realizada mediante USB 2.0.

El programa de la aplicación háptica se realizó en lenguaje C++ y se compone de dos partes principales: el renderizado visual y el renderizado háptico. El renderizado visual se realizó con el uso de la especificación OpenGL 4.5 y la biblioteca GLUT. Por otro lado la API HDAL ofrece una función síncrona con una frecuencia de 1 [kHz] y es donde se realiza el renderizado háptico; además proporciona una función asíncrona para comunicarse con el motor de simulación. En la Figura 6 se aprecia la interacción entre el usuario y el ambiente virtual en donde el tipo de renderizado utilizado es proporcional (P) con una constante $k_p = 984$ y la fuerza está dada en el sistema de referencia háptico $H(x, y, z)$. Se puede apreciar que en la Figura 6-(a) el usuario coloca al *avatar* lejos del objeto virtual produciendo fuerzas en el espacio cartesiano $F_x = F_y = F_z = 0$ mientras que en la Figura 6-(b), al entrar en contacto con la esfera virtual se activa el control proporcional. Al comenzar a penetrar en el objeto se dibuja una pirámide invertida de color amarillo y se arrojan fuerzas de reacción $F_x = 1.66$ [N], $F_y = -1.66$ [N] y $F_z = 1.9$ [N]. Finalmente en la Figura 6-(c) el usuario aplica más fuerza, produciendo fuerzas de $F_x = 4.07$ [N], $F_y = -3.91$ [N] y $F_z = 4.89$ [N] que se aprecian mayores que las anteriores a una mayor penetración.



(a): $F_x = 0$ [N], $F_y = 0$ [N], $F_z = 0$ [N]



(b): $F_x = 1.66$ [N], $F_y = -1.66$ [N], $F_z = 1.9$ [N]



(c): $F_x = 4.07$ [N], $F_y = -3.91$ [N], $F_z = 4.89$ [N]

Fig. 6. Secuencia de interacción con sistema de realidad virtual.

5. CONCLUSIONES

En este artículo presentamos una primera aproximación al uso del robot paralelo *Novint Falcon* como plataforma experimental háptica. Debido a su bajo costo este dispositivo es utilizado principalmente en la industria de los videojuegos. Sin embargo sus características permiten extender su uso al área académica convirtiéndolo en el primer robot paralelo de fácil acceso en áreas experimentales tales como la realidad virtual y la retroali-

mentación háptica. De manera formal se realizó el análisis matemático tanto cinemático como dinámico, estableciendo una base para el posterior desarrollo de experimentos con perspectiva de teoría de sistemas y control. Además se comprobó que utilizando el robot *Novint Falcon* pueden diseñarse e implementarse sistemas de realidad virtual en donde el usuario pueda interactuar de forma táctil con objetos virtuales. En este caso se implementó un sistema consistente en una esfera y un *avatar*, sentando así un precedente para el desarrollo de aplicaciones que impliquen interacciones con objetos más complejos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió apoyo de **PAPIIT-UNAM** bajo el número de proyecto **IN114617**.

REFERENCIAS:

- Brooks, F. y Batter, J. (1971). Grope-1: A computer display to sense of feel. *Proceedings of ITIP Congress*, 759–763.
- Burdea, G., Zhuang, J., Roskos, E., Silver, D., y Lagrana, N. (1992). A portable dextrous master with force feedback. *Presence*, 1:1.
- Clavel, R. (1990). *Device for the movement and positioning of an element in space*. Unites States Patent Office: 0250470.
- Gough, V.E. y Whitehall, S.G. (1962). Universal tyre test machine. *Proceedings 9th International Technical Congress FISITA*, 117–137.
- Guglielmetti, P. y Longchamp, R. (1994). A closed form inverse dynamics model of the delta parallel robot. *Proceedings from the International Federation of Automatic Control Conference on Robot Control*, 39–44.
- Gwinnet, J.E. (1928). Amusement device. *United States Patent Office*, 1789680.
- Iwata, H. (1993). Pen-based haptic virtual environment. *Proceedings of IEEE VRAIS*, 1:1.
- Lung-Wen, T. (1999). *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley and Sons.
- Martin, S. y Hiller, N. (2009). Characterisation of the Novint Falcon haptic device for application as a robot manipulator. *Australian Conference on Robotics and Automation*.
- Michelotti, M.B. (2011). *Application of the Novint Falcon haptic device as an actuator in real-time control*. Master's thesis, Univesity of Illinois.
- Mihelj, M. y Podobnik, J. (2012). *Haptics for Virtual Reality and Teleoperation*. Springer International.
- Miller, K. (1992). Experimental verification of modeling of delta robot dynamics by direct application of Hamilton principle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 532–537.
- Miller, K. y Clavel, R. (1995). The Lagrange based model of delta-4 robot dynamics. *Robotersysteme*, 8, 49–54.
- Panarese, A. y Edin, B. (2010). A modified low-cost haptic interface as a tool for complex tactile stimulation. *Medical Engineering and Physics*, 33, 386–390.
- Pollard, W. (1942). Position-controlling apparatus. *United States Patent Office*, 2286571.
- Stamper, R. (1997). *A three degree of freedom parallel manipulator with only translational degrees of freedom*. Ph.D. thesis, University of Maryland.
- Stewart, D. (1965). A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180, 371–386.
- Torres-Rodríguez, I. (2017). *Start up of the parallel robot Novint Falcon*. Master's thesis, Faculty of Engineering, UNAM.
- Yang, Y. (2013). *Exploring haptic feedback as an aid design*. Master's thesis, Nanjing Univesity of Aeronautics and Astronautics.