

# Parameter Identification for the Geomagic Touch Haptic Device <sup>\*</sup>

Evert J. Guajardo Benavides<sup>\*</sup> Marco A. Arteaga<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Depto. de Control y Robótica. DIE-FI. Universidad Nacional Autónoma de México. (e-mail: [evert\\_guajardobds@comunidad.unam.mx](mailto:evert_guajardobds@comunidad.unam.mx), [marteagp@unam.mx](mailto:marteagp@unam.mx))

---

**Abstract:** Haptic devices have become increasingly popular and have been part of different areas of research, such as medicine, teleoperation, 3D modeling, just to mention a few. However, given the demands required in some fields, such as automatic control, it is essential to know their parameters and model. Different efforts have arisen for this purpose, where parametric estimation and identification is the main purpose for the application of different control algorithms. One of the most widely used haptic devices in different areas is the *Geomagic Touch* from 3D company. This device has been used especially in haptic applications where kinematic and dynamic models are required. However, only a few contributions have taken into account the parametric identification of this device. The main contribution of this work is the identification of the parameters of the *Geomagic Touch* device where experimental tests were performed for validation by means of two control laws widely used in the literature.

*Keywords:* Haptic devices, parameter identification, tracking control.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos hápticos, hoy en día, se han vuelto muy populares debido a su amplia rama de aplicación, como por ejemplo en simulación para aplicaciones médicas, modelado en 3D, control robótico, detección de colisiones, etc. Sin embargo, muchas de las aplicaciones requieren un conocimiento exacto del modelo, tanto cinemático como dinámico. Por ejemplo, en Tahmasebi et al. (2005) exponen una identificación paramétrica para el dispositivo háptico *PHANTOM*; un dispositivo diseñado a mediados de los 90's que permite la exploración de algunas áreas de aplicación que requieren retroalimentación de fuerza. Uno de los trabajos relativamente recientes sobre identificación de parámetros, es el que presenta Karbasizadeh et al. (2018), en donde muestra la identificación de la dinámica del dispositivo *Novint Falcon*, un dispositivo háptico en configuración paralela, mediante la técnica de control por feedforward para validar los parámetros identificados. Sin embargo, el dispositivo háptico *Geomagic Touch* es más utilizado en distintas aplicaciones. Un ejemplo reciente de esto se ve en Saini et al. (2022), en donde proponen un control adaptativo para robot maestro-esclavo basado en un sistema quirúrgico con retroalimentación por medio del dispositivo *Geomagic Touch*. De igual manera, en Tang et al. (2020) utilizan el mismo dispositivo para reconstrucción de fuerza y reparación háptica. Un dispositivo háptico, con especi-

ficaciones similares al *Geomagic Touch*, es presentado en Jiang et al. (2016) cuya propuesta es la estimación del modelo cinemático del robot mediante una ley de adaptación en tiempo finito.

Algunas de las aplicaciones más empleadas es la de teleoperación bilateral, cuyo propósito es conseguir transparencia entre un robot maestro y uno esclavo; sin embargo, para obtener transparencia, es necesario contar con retroalimentación de fuerza (Yokokohji and Yoshikawa, 1994). Debido a esto, varios esfuerzos han surgido para estimar la fuerza entre ambos robots manipuladores. Por ejemplo, en De Luca and Mattone (2005); De Luca et al. (2006) se propone un algoritmo de detección de colisión sin usar sensores de fuerza; este algoritmo se basa en el conocimiento del modelo dinámico. En Chien et al. (2020), una comparación de desempeño entre diferentes técnicas de estimación es presentado, pero de igual manera, estas técnicas son empleadas bajo el supuesto del conocimiento del modelo del robot; es por ello, la importancia de una buena identificación paramétrica para el modelado dinámico de estos dispositivos. Otra aplicación relacionada al campo quirúrgico se expone en Zhang et al. (2022), en donde se utiliza el dispositivo *Geomagic Touch* para la construcción de un marco de control compartido humano-robot.

Dada la necesidad del conocimiento del modelo del robot, sobre todo del dispositivo háptico *Geomagic Touch* (de acuerdo con distintas aplicaciones en el campo), en este trabajo se propone realizar una estimación paramétrica

---

<sup>\*</sup> This work is supported by the DGAPA-UNAM under grant IN117820.

fuera de línea convencional específicamente para este dispositivo, cuya validación se realizará por medio de dos leyes de control muy conocidas: Par-Calculado y Compensación de gravedad.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: en la siguiente Sección 2 se revisan algunos preliminares relacionados con el modelado del dispositivo háptico, tanto cinemático como dinámico. En la Sección 3, se exponen los resultados principales sobre la estimación paramétrica de manera experimental. La validación de los parámetros identificados se presenta en la Sección 4. Por último, en la Sección 5 se presentan algunas conclusiones sobre este trabajo.

## 2. PRELIMINARES

### 2.1 Modelo cinemático

La estructura del dispositivo háptico *Geomagic Touch*, que se muestra en la Fig. 1, cuenta con 6 grados de libertad (GDL), sin embargo, dentro de sus especificaciones, solamente 3 de los 6 GDL están motorizados; es decir, se puede definir el par aplicado a los primeros 3 eslabones.



Fig. 1. Dispositivo háptico *Geomagic Touch* de 3D SYSTEMS.

Una de las configuraciones cinemáticas, ampliamente utilizadas para este manipulador, consiste en establecer un modelo simplificado para los 3 GDL actuados, esto es, manteniendo a las otras articulaciones en una posición fija (Arteaga et al., 2022).

Para esta configuración, se define cada marco de referencia empleando la representación de Denavit-Hartenberg como se muestra en la Fig. 2, en donde ciertas consideraciones son tomadas en cuenta (Spong and Vidyasagar, 2008; Arteaga et al., 2022):

- El eje de rotación de la primera articulación (eje  $z_0$ ) es opuesto al que especifica el fabricante, por

lo tanto, la posición medida se debe multiplicar por  $-1$ .

- El par aplicado a la primera articulación también se debe multiplicar por  $-1$ .
- El actuador y el sensor de posición para la tercera articulación están físicamente en la segunda articulación, por lo que no se podría considerar como un manipulador serial; sin embargo, podría verse como uno serial si se consideran los ajustes mostrados en la Tabla 1.

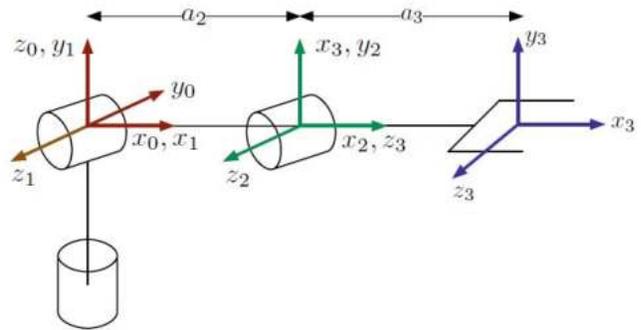


Fig. 2. Asignación Denavit-Hartenberg para configuración de 3 GDL.

Articulación	Ajuste
1	$q_1 = -q_{1\text{medido}}$
2	$q_2 = q_{2\text{medido}}$
3	$q_3 = q_{3\text{medido}} - q_{2\text{medido}}$

Table 1. Ajustes para la medición de posición.

Por lo tanto, los parámetros de la cinemática directa con el algoritmo de Denavit-Hartenberg son mostrados en la siguiente tabla

Articulación	$a_i$ [m]	$d_i$ [m]	$\alpha_i$ [rad]	$q_i$ [rad]
1	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$q_1$
2	0.145	0	0	$q_2$
3	0.178	0	0	$q_3$

Table 2. Parámetros de Denavit-Hartenberg para la configuración de 3 GDL.

en donde las cantidades  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  son variables dado que las articulaciones son rotativas. Dados los parámetros anteriores, el vector de posición del efector final  ${}^0\mathbf{p}_3 \in \mathbb{R}^3$  y la matriz de rotación  ${}^0\mathbf{R}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  con respecto a la base del manipulador quedarían de la siguiente manera:

$${}^0\mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} (a_2c_2 + a_3c_{23})c_1 \\ (a_2c_2 + a_3c_{23})s_1 \\ a_2s_2 + a_3s_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -c_1s_{23} & s_1 \\ c_{23}s_1 & -s_{23}s_1 & -c_1 \\ s_{23} & c_{23} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

en donde  $c_1 = \cos(q_1)$ ,  $c_2 = \cos(q_2)$ ,  $s_1 = \sin(q_1)$ ,  $s_2 = \sin(q_2)$ ,  $c_{23} = \cos(q_2 + q_3)$  y  $s_{23} = \sin(q_2 + q_3)$ . Así mismo,

la matriz de transformación homogénea  ${}^0\mathbf{T}_3 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  se denota como sigue

$${}^0\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_3 & {}^0\mathbf{p}_3 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2.2 Modelo dinámico

Sea el siguiente modelo dinámico del manipulador con estructura Euler-Lagrange

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

en donde  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^3$  son los vectores generalizados de posición y velocidad, respectivamente;  $\mathbf{H}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  corresponde a la matriz de inercia;  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis;  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , a la matriz diagonal de disipación o fricción viscosa;  $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^3$ , el vector de pares gravitacionales y  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$  corresponde al vector de pares de entrada de cada articulación, las componentes de cada matriz están dadas por lo siguiente:

*Componentes de la matriz de inercia  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$*

$$\begin{aligned} h_{11} &= m_2 c_2^2 \ell_{c2}^2 + m_3 (a_2 c_2 + c_{23} \ell_{c3})^2 + c_2^2 I_{yy2} + c_{23}^2 I_{yy3} \\ &\quad + s_2^2 I_{xx2} + s_{23}^2 I_{xx3} + I_{yy1} \\ h_{12} &= 0 \\ h_{13} &= 0 \\ h_{22} &= m_2 \ell_{c2}^2 + m_3 (2a_2 c_3 \ell_{c3} + a_2^2 + \ell_{c3}^2) + I_{zz2} + I_{zz3} \\ h_{23} &= m_3 \ell_{c3} (a_2 c_3 + \ell_{c3}) + I_{zz3} \\ h_{33} &= m_3 \ell_{c3}^2 + I_{zz3}, \end{aligned} \quad (5)$$

siendo  $m_i$ ,  $\ell_{ci}$ , la masa y la longitud hacia el centro de masa del eslabón  $i$ , respectivamente. Las componentes  $I_{xxi}$ ,  $I_{yyi}$ ,  $I_{zz}$  denotan los momentos principales del tensor inercia  $\mathbf{I}_i$ . Asumiendo que la distribución de masa de cada eslabón es simétrica con respecto a la base del manipulador, entonces los elementos fuera de la diagonal del tensor  $I_i$  son idénticamente cero (Sciavicco and Siciliano, 2001; Spong and Vidyasagar, 2008).

De acuerdo con la Fig. 1, se considera la base del manipulador como una simple esfera de radio  $r_1$  y masa  $m_1$ , por lo tanto, los momentos de inercia principales están dados por

$$I_{xx1} = I_{yy1} = I_{zz1} = \frac{2}{3} m_1 r_1^2. \quad (6)$$

Para el caso del segundo y tercer eslabón, estos son considerados como cuboides sólidos cuyos lados son  $b_2$  y  $h_2$ ,  $b_3$  y  $h_3$ , respectivamente, y longitudes  $a_2$  y  $a_3$ . Por lo tanto, aplicando el teorema de Steiner, los momentos principales de inercia de ambos eslabones resultan en lo siguiente

$$\begin{aligned} I_{xx2} &= \frac{m_2}{12} (b_2^2 + h_2^2) \\ I_{yy2} &= \frac{m_2}{12} (4a_2^2 + h_2^2) \\ I_{zz2} &= \frac{m_2}{12} (4a_2^2 + b_2^2) \\ I_{xx3} &= \frac{m_3}{12} (b_3^2 + h_3^2) \\ I_{yy3} &= \frac{m_3}{12} (4a_3^2 + h_3^2) \\ I_{zz3} &= \frac{m_3}{12} (4a_3^2 + b_3^2) \end{aligned} \quad (7)$$

*Componentes de la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$*

$$\begin{aligned} \bar{c}_{11} &= c_2 \dot{q}_2 s_2 I_{xx2} + c_{23} \dot{q}_2 s_{23} I_{xx3} + c_{23} \dot{q}_3 s_{23} I_{xx3} \\ &\quad - c_2 \dot{q}_2 s_2 I_{yy2} - c_{23} \dot{q}_2 s_{23} I_{yy3} - c_{23} \dot{q}_3 s_{23} I_{yy3} \\ &\quad - m_2 c_2 \dot{q}_2 s_2 \ell_{c2}^2 + m_3 (-a_2 c_2 \dot{q}_2 s_2 \ell_{c3} - a_2 c_2 \dot{q}_2 s_{23} \ell_{c3} \\ &\quad - a_2 c_2 \dot{q}_3 s_{23} \ell_{c3} - a_2^2 c_2 \dot{q}_2 s_2 - c_{23} \dot{q}_2 s_{23} \ell_{c3}^2 \\ &\quad - c_{23} \dot{q}_3 s_{23} \ell_{c3}^2) \\ \bar{c}_{12} &= c_2 \dot{q}_1 s_2 I_{xx2} + c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{xx3} - c_2 \dot{q}_1 s_2 I_{yy2} \\ &\quad - c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{yy3} - c_2 \dot{q}_1 m_2 s_2 \ell_{c2}^2 \\ &\quad + m_3 (-2a_2 c_2 c_3 \dot{q}_1 s_2 \ell_{c3} - a_2 c_2^2 \dot{q}_1 s_3 \ell_{c3} - a_2^2 c_2 \dot{q}_1 s_2 \\ &\quad + a_2 \dot{q}_1 s_2^2 s_3 \ell_{c3} + c_2 \dot{q}_1 s_2 s_3^2 \ell_{c3}^2 - c_2 c_3^2 \dot{q}_1 s_2 \ell_{c3}^2 \\ &\quad - c_2^2 c_3 \dot{q}_1 s_3 \ell_{c3}^2 + c_3 \dot{q}_1 s_2^2 s_3 \ell_{c3}^2) \\ \bar{c}_{13} &= c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{xx3} - c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{yy3} + m_3 (-a_2 c_2 \dot{q}_1 s_{23} \ell_{c3} \\ &\quad - c_{23} \dot{q}_1 s_{23} \ell_{c3}^2) \\ \bar{c}_{21} &= -c_2 \dot{q}_1 s_2 I_{xx2} - c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{xx3} + c_2 \dot{q}_1 s_2 I_{yy2} \\ &\quad + c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{yy3} + m_2 c_2 \dot{q}_1 s_2 \ell_{c2}^2 + m_3 (2a_2 c_2 c_3 \dot{q}_1 s_2 \ell_{c3} \\ &\quad + a_2 c_2^2 \dot{q}_1 s_3 \ell_{c3} + a_2^2 c_2 \dot{q}_1 s_2 - a_2 \dot{q}_1 s_2^2 s_3 \ell_{c3} \\ &\quad - c_2 \dot{q}_1 s_2 s_3^2 \ell_{c3}^2 + c_2 c_3^2 \dot{q}_1 s_2 \ell_{c3}^2 + c_2^2 c_3 \dot{q}_1 s_3 \ell_{c3}^2 \\ &\quad - c_3 \dot{q}_1 s_2^2 s_3 \ell_{c3}^2) \\ \bar{c}_{22} &= -m_3 a_2 \dot{q}_3 s_3 \ell_{c3} \\ \bar{c}_{23} &= -m_3 (a_2 \dot{q}_2 s_3 \ell_{c3} + a_2 \dot{q}_3 s_3 \ell_{c3}) \\ \bar{c}_{31} &= c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{yy3} - c_{23} \dot{q}_1 s_{23} I_{xx3} + m_3 \dot{q}_1 s_{23} \ell_{c3} (a_2 c_2 \\ &\quad + c_{23} \ell_{c3}) \\ \bar{c}_{32} &= m_3 a_2 \dot{q}_2 s_3 \ell_{c3} \\ \bar{c}_{33} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

*Componentes del vector de pares gravitacionales  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$*

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ g c_2 \ell_{c2} m_2 + g (a_2 c_2 + c_{23} \ell_{c3}) m_3 \\ g c_{23} \ell_{c3} m_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

en donde  $g = 9.81[\text{m/s}^2]$  es la aceleración de la gravedad.

## 3. RESULTADOS PRINCIPALES

En esta sección se presenta la identificación paramétrica del manipulador *Geomagic Touch*. Lo que se busca es, específicamente, la identificación de los parámetros constantes que constituyen la dinámica del manipulador mediante una parametrización lineal. La dinámica del robot

puede ser expresada como el producto de un regresor  $\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times p}$  y un vector de parámetros constantes  $\boldsymbol{\varphi} \in \mathbb{R}^p$ , en donde  $n$ ,  $p$  son el número de articulaciones y de parámetros, respectivamente (Arteaga et al., 2022); es decir:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\varphi} \quad (10)$$

Para este caso, solamente 8 parámetros son necesarios para la identificación; 3 de inercia, 3 de términos de fricción y 2 para los pares gravitacionales, respectivamente. Esto último es debido a que la primera articulación no es afectada por la gravedad.

El vector de parámetros  $\boldsymbol{\varphi}$  se define como sigue

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} m_2 \ell_{c2}^2 + m_3 a_2^2 + I_2 \\ m_3 a_2 \ell_{c3} \\ m_3 \ell_{c3}^2 + I_3 \\ c_{f1} \\ c_{f2} \\ c_{f3} \\ m_2 \ell_{c2} \\ m_3 \ell_{c3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

en donde las componentes  $c_{f1}$ ,  $c_{f2}$  y  $c_{f3}$  son los términos de fricción viscosa de cada articulación, respectivamente.

Por lo tanto, las componentes del regresor son las siguientes:

$$\begin{aligned} y_{11} &= c_2^2 \ddot{q}_1 - 2c_2 s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ y_{12} &= c_2 c_{23} \ddot{q}_1 - (c_2 s_{23} (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) + s_2 c_{23} \dot{q}_2) \dot{q}_1 \\ y_{13} &= s_{23}^2 \ddot{q}_1 + c_{23} s_{23} (\dot{q}_2 + 2\dot{q}_3) \dot{q}_1 + s_{23} c_{23} \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ y_{14} &= \dot{q}_1 \\ y_{15} &= y_{16} = y_{17} = y_{18} = 0 \\ y_{21} &= \ddot{q}_2 + c_2 s_2 \dot{q}_1^2 \\ y_{22} &= 2c_3 \ddot{q}_2 + c_3 \ddot{q}_3 + \frac{1}{2} (s_2 c_{23} + c_2 s_{23}) \dot{q}_1^2 - 2s_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3 - s_3 \dot{q}_3^2 \\ y_{23} &= \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - s_{23} c_{23} \dot{q}_1^2 \\ y_{24} &= 0 \\ y_{25} &= \dot{q}_2 \\ y_{26} &= 0 \\ y_{27} &= g c_2 \\ y_{28} &= g c_{23} \\ y_{31} &= 0 \\ y_{32} &= c_2 \ddot{q}_2 + \frac{1}{2} c_2 s_{23} \dot{q}_1^2 + s_3 \dot{q}_2^2 \\ y_{33} &= \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 - c_{23} s_{23} \dot{q}_1^2 \\ y_{34} &= y_{35} = 0 \\ y_{36} &= \dot{q}_3 \\ y_{37} &= 0 \\ y_{38} &= g c_{23} \end{aligned} \quad (12)$$

Para la identificación de los parámetros de manera experimental, un simple control PD para seguimiento de posición puede ser empleado, cuyas trayectorias deseadas se eligen con alto nivel de excitación (Tahmasebi et al.,

2005). De igual manera, un control PD con precompensación puede ser utilizado si se tiene alguna aproximación previa de los parámetros, por ejemplo, aquellos especificados por el fabricante (Lu et al., 1993).

Para este caso, se empleó el control PD con precompensación:

$$\boldsymbol{\tau} = \bar{\mathbf{H}}(\mathbf{q}_d)\ddot{\mathbf{q}}_d + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d)\dot{\mathbf{q}}_d + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}_d) - \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) - \mathbf{K}_p(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) \quad (13)$$

en donde  $\mathbf{K}_d, \mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  son matrices positivas definidas, mientras que  $\bar{\mathbf{H}}(\mathbf{q}_d), \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}_d) \in \mathbb{R}^3$  son las matrices aproximadas de inercia, de fuerzas centrífugas y de Coriolis y de pares gravitacionales evaluadas en las trayectorias deseadas, respectivamente. Los valores de las matrices se obtuvieron de las especificaciones del fabricante y se evaluaron en las siguientes trayectorias deseadas

$$q_{d1} = 30 \sin(0.476\pi t + 10^\circ) + 10 \sin(1.42\pi t + 10^\circ) + 10 \sin(2.85\pi t + 18^\circ) \quad (14)$$

$$q_{d2} = 30^\circ + 18 \sin(0.571\pi t + 5^\circ) + 6 \sin(1.71\pi t + 5^\circ) + 6 \sin(3.42\pi t + 5^\circ) \quad (15)$$

$$q_{d3} = -90^\circ + 15 \sin(0.909\pi t) + 5 \sin(2.72\pi t) + 5 \sin(5.45\pi t), \quad (16)$$

de tal manera que, con las mediciones de  $\mathbf{q}$ ,  $\dot{\mathbf{q}}$  y  $\ddot{\mathbf{q}}$  obtenidas utilizando el Kit de librerías *OpenHaptics* y el software VisualStudio 2022 C++, en donde tanto las velocidades y aceleraciones se calcularon con diferenciación numérica junto con un filtro pasa bajos adecuado, y aplicando mínimos cuadrados para la identificación fuera de línea del vector de parámetros como

$$\boldsymbol{\varphi} = (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{Y}^T \boldsymbol{\tau}, \quad (17)$$

se obtuvieron los siguientes valores:

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} 0.00251729 \text{ kg.m}^2 \\ 0.00108246 \text{ kg.m}^2 \\ 0.00137408 \text{ kg.m}^2 \\ 0.00076823 \text{ kg/s} \\ 0.03526735 \text{ kg/s} \\ 0.00744473 \text{ kg/s} \\ 0.00449158 \text{ kg.m} \\ 0.00534505 \text{ kg.m} \end{bmatrix} \quad (18)$$

La diferenciación numérica para calcular las velocidades y aceleraciones se realizó mediante la aproximación de Euler

$$y(t + \Delta t) \approx y(t) + \Delta t \frac{d}{dt} y(t). \quad (19)$$

Para el filtro pasa bajos, se utilizó un filtro de primer orden de la forma

$$Y_i(s) = \frac{\lambda_{fi}}{s + \lambda_{fi}} X_i(s) \quad (20)$$

para  $i = 1 \dots n$ , en donde  $X_i(s)$  es la señal a filtrar, mientras que  $Y_i(s)$ , la señal filtrada. La ganancia del filtro  $\lambda_{fi}$  se diseñó para una frecuencia de corte de aproximadamente  $3Hz$ , de tal manera que las frecuencias mayores a las de las trayectorias deseadas sean atenuadas.

La cantidad de datos adquiridos para la identificación paramétrica fue de 9740 muestras con un periodo de muestreo de  $2ms$ , lo cual equivale a un tiempo de  $19.48s$  de adquisición. Durante el experimento, los datos fueron almacenados en un archivo  $.m$  para después ser leídos y procesados en MATLAB; así mismo, realizar el cálculo de los parámetros del robot empleando mínimos cuadrados.

Por lo tanto, las componentes de la matriz de inercia  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ , de fuerzas centrífugas y de Coriolis  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ , la matriz de disipación  $\mathbf{D}$  y el vector de pares gravitacionales  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  se obtuvieron de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} h_{11} &= c_2^2 \varphi_1 + c_2 c_{23} \varphi_2 + s_{23}^2 \varphi_3 \\ h_{12} &= h_{13} = 0 \\ h_{21} &= 0 \\ h_{22} &= \varphi_1 + 2c_3 \varphi_2 + \varphi_3 \\ h_{23} &= c_3 \varphi_2 + \varphi_3 \\ h_{31} &= 0 \\ h_{32} &= c_3 \varphi_2 + \varphi_3 \\ h_{33} &= \varphi_3 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{c}_{11} &= -c_2 s_2 \dot{q}_2 \varphi_1 - \frac{1}{2} (c_2 s_{23} (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) + s_2 c_{23} \dot{q}_2) \varphi_2 \\ &\quad + c_{23} s_{23} (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \varphi_3 \\ \bar{c}_{12} &= -c_2 s_2 \dot{q}_1 \varphi_1 - \frac{1}{2} (s_2 c_{23} + c_2 s_{23}) \dot{q}_1 \varphi_2 + s_{23} c_{23} \dot{q}_1 \varphi_3 \\ \bar{c}_{13} &= -\frac{1}{2} c_2 s_{23} \dot{q}_1 \varphi_2 + c_{23} s_{23} \dot{q}_1 \varphi_3 \\ \bar{c}_{21} &= c_2 s_2 \dot{q}_1 \varphi_1 + \frac{1}{2} (s_2 c_{23} + c_2 s_{23}) \dot{q}_1 \varphi_2 - s_{23} c_{23} \dot{q}_1 \varphi_3 \\ \bar{c}_{22} &= -s_3 \dot{q}_3 \varphi_2 \\ \bar{c}_{23} &= -s_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \varphi_2 \\ \bar{c}_{31} &= \frac{1}{2} c_2 s_{23} \dot{q}_1 \varphi_2 - c_{23} s_{23} \dot{q}_1 \varphi_3 \\ \bar{c}_{32} &= s_3 \dot{q}_2 \varphi_2 \\ \bar{c}_{33} &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \varphi_4 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_5 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_6 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ g(c_2 \varphi_7 + c_{23} \varphi_8) \\ g c_{23} \varphi_8 \end{bmatrix} \quad (24)$$

#### 4. VALIDACIÓN DE PARÁMETROS

Una forma simple de probar que los parámetros fueron identificados es mediante la muy conocida técnica de control Par-Calculado:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{K}_d (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) \\ &\quad - \mathbf{K}_p (\mathbf{q} - \mathbf{q}_d), \end{aligned} \quad (25)$$

ya que calcula la dinámica directa del manipulador con el fin de cancelarlas en retroalimentación, y así, lograr un buen seguimiento de trayectoria (Kelly et al., 2006). Para este caso, se emplearon las mismas trayectorias utilizadas

para la identificación (14), (15) y (16), con sus respectivas derivadas. Las condiciones iniciales para el dispositivo háptico *Geomagic Touch* fueron arbitrariamente seleccionadas con un valor de  $\mathbf{q}_0 = [0^\circ, 45^\circ, -90^\circ]^T$  para este experimento.

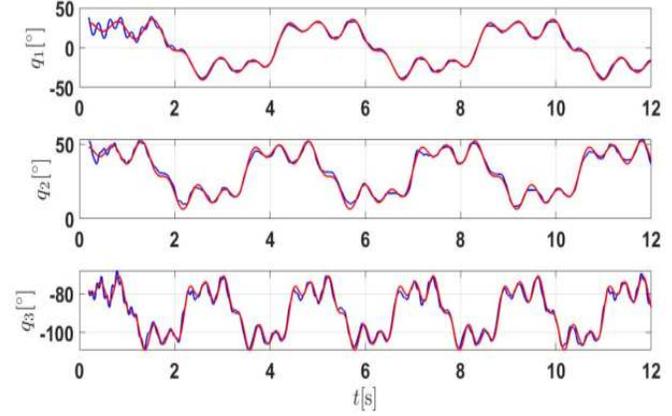


Fig. 3. Seguimiento de trayectoria con control Par-Calculado:  $\mathbf{q}_d(t)$ (—),  $\mathbf{q}(t)$ (- -).

Articulación	RMSE [°]
1	2.1953
2	1.7179
3	1.7126

Table 3. Errores cuadráticos medios de seguimiento con el control Par-Calculado.

Como se observa en la Tabla 3, los errores de seguimiento son aceptables; considerando que las unidades angulares son en grados [°].

Así mismo, los parámetros de pares gravitacionales fueron validados mediante un control únicamente con compensación de gravedad; es decir:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{g}(\mathbf{q}), \quad (26)$$

de manera que el robot permanezca en la posición inicial para todo tiempo  $t \geq 0$ .

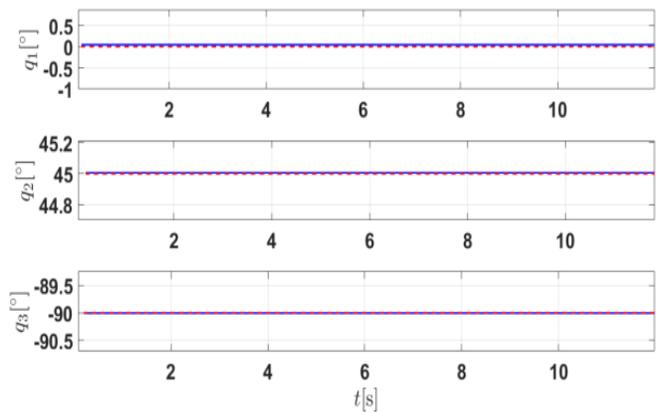


Fig. 4. Comp. de gravedad:  $\mathbf{q}_d(t)$ (- - -),  $\mathbf{q}(t)$ (—).

Articulación	RMSE [°]
1	0.0470
2	0.0122
3	0.0066

Table 4. Errores cuadráticos medios de seguimiento con el control Comp. de gravedad.

De la misma manera, como se observa en la Tabla 4, se concluye que los parámetros de gravedad fueron identificados correctamente.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la identificación paramétrica fuera de línea para el dispositivo háptico *Geomagic Touch*. De acuerdo a los resultados obtenidos en la Sección 3, se comprueba que el vector de parámetros (11) fueron exitosamente identificados empleando las leyes de control antes mencionadas. Sin embargo, fue necesario contar con excitación persistente para la identificación, ya que las trayectorias deseadas son señales periódicas con 3 componentes de frecuencia; esto podría no ser adecuado para la identificación de parámetros de robots industriales, cuya fuerza es superior a la de cualquier dispositivo háptico y podría representar un riesgo considerable en su entorno.

En relación a lo mencionado anteriormente, fue necesaria la calibración de los pares aplicados a los motores de las 3 articulaciones, así como también, la correcta selección de la ganancia del filtro pasa-bajas para evitar estimaciones erróneas; por ejemplo, en casos donde los parámetros resulten con valores negativos.

Una de las razones principales para la identificación paramétrica, en este tipo de dispositivos, es en aplicaciones en donde se requiere control de fuerza sin necesidad de utilizar sensores. Por ejemplo, en teleoperación bilateral, cuyo propósito principal es lograr transparencia entre el dispositivo maestro y el esclavo, es necesaria la retroalimentación de fuerza. Sin embargo, la mayoría de los trabajos sobre estimación de fuerza requieren del conocimiento total del modelo de los manipuladores.

## REFERENCES

Arteaga, M.A., Gutiérrez-Giles, A., and Pliego-Jiménez, J. (2022). *Local Stability and Ultimate Boundedness in the Control of Robot Manipulators*. Springer.

Chien, S.H., Wang, J.H., and Cheng, M.Y. (2020). Performance comparisons of different observer-based force-sensorless approaches for impedance control of collaborative robot manipulators. In *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, volume 1, 326–331. IEEE.

De Luca, A., Abu-Schaffer, A., Haddadin, S., and Hirzinger, G. (2006). Collision detection and safe reaction with the dlr-iii lightweight manipulator arm. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1623–1630. IEEE.

De Luca, A. and Mattone, R. (2005). Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control. In *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*, 999–1004. IEEE.

Jiang, Y., Yang, C., Wang, X., and Su, C.Y. (2016). Kinematics modeling of geomagic touch x haptic device based on adaptive parameter identification. In *2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, 295–300. IEEE.

Karbasizadeh, N., Zarei, M., Aflakian, A., Masouleh, M.T., and Kalhor, A. (2018). Experimental dynamic identification and model feed-forward control of novint falcon haptic device. *Mechatronics*, 51, 19–30.

Kelly, R., Davila, V.S., and Perez, J.A.L. (2006). *Control of robot manipulators in joint space*. Springer Science & Business Media.

Lu, Z., Shimoga, K.B., and Goldenberg, A.A. (1993). Experimental determination of dynamic parameters of robotic arms. *Journal of robotic systems*, 10(8), 1009–1029.

Saini, S., Orlando, M.F., and Pathak, P.M. (2022). Adaptive control of a master-slave based robotic surgical system with haptic feedback. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.

Sciavicco, L. and Siciliano, B. (2001). *Modelling and control of robot manipulators*. Springer Science & Business Media.

Spong, M. and Vidyasagar, M. (2008). *Robot Dynamics And Control*. Wiley India Pvt. Limited.

Tahmasebi, A.M., Taati, B., Mobasser, F., and Hashtrudi-Zaad, K. (2005). Dynamic parameter identification and analysis of a phantom haptic device. In *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005.*, 1251–1256. IEEE.

Tang, Y., Liu, S., Deng, Y., Zhang, Y., Yin, L., and Zheng, W. (2020). Construction of force haptic reappear-ance system based on geomagic touch haptic device. *Computer methods and programs in biomedicine*, 190, 105344.

Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T. (1994). Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(5), 605–620. doi: 10.1109/70.326566.

Zhang, D., Wu, Z., Chen, J., Zhu, R., Munawar, A., Xiao, B., Guan, Y., Su, H., Hong, W., Guo, Y., et al. (2022). Human-robot shared control for surgical robot based on context-aware sim-to-real adaptation. *arXiv preprint arXiv:2204.11116*.