

IMPLEMENTACION DE UNA PALETA HAPTICA PARA UTILIZACION EN ENTORNOS EDUCATIVOS EN LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Autores

MIGUEL ÁNGEL BAREÑO BERNAL¹

Docente

Javier Adolfo Corredor Camargo

Ingeniero

**INGENIERÍA MECATRÓNICA
DEPARTAMENTO MMI
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, abril 03 2018**

1.1. Palabras claves: Dispositivo háptico, Hapkit, entornos educativos, vred.

OBJETIVO GENERAL

- Reproducir un dispositivo háptico de un grado de libertad basado en el proyecto Hapkit de la universidad de Stanford en su versión 3.0.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar la información necesaria para la implementación del dispositivo.
- Comprobar la disponibilidad de las piezas fundamentales (tarjeta de desarrollo, motor y sensor angular).
- Imprimir y ensamblar el dispositivo háptico.
- Realizar la programación individual del dispositivo.
- Realizar el enlace y programación en el simulador de VREP.

1. INTRODUCCIÓN

La palabra háptica, que se cree deriva de la palabra griega haptesthai, significa relacionado con el conocimiento sensorial. En la literatura psicológica y neurocientífica, la háptica es el estudio de la percepción táctil humana, específicamente de los receptores kinestésicos (fuerza / posición) y cutáneos (táctiles), asociados con la percepción y la manipulación. En la literatura de robótica y realidad virtual, hápticos se define ampliamente como interacciones táctiles reales y simuladas entre robots, humanos y entornos reales, remotos o simulados, en diversas combinaciones[1].

DISPOSITIVO HAPTICO

Es un dispositivo mecánico, dotado de sensores actuadores y partes mecánicas que permiten la interacción de un usuario con una interfaz virtual la cual mediante los sensores reconocerá de la posición del usuario y moverá el punto de interfaz en el entorno virtual, y este a su vez realimentará una fuerza al momento de contacto con algún objeto dentro del mismo [2].

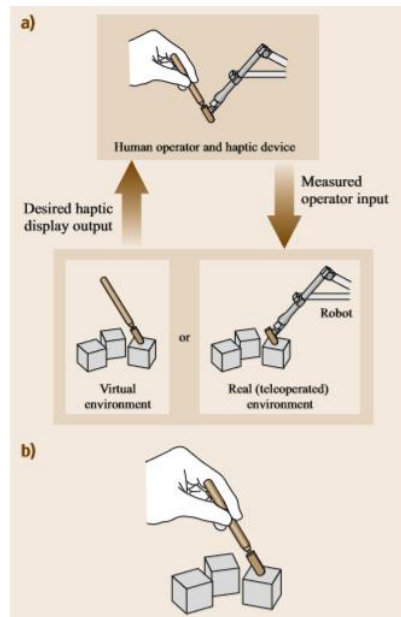


Fig. 1a) El ciclo háptico de una interfaz háptica genérica. Un dispositivo háptico detecta la entrada del operador humano, como la posición o la fuerza, y el sistema aplica esta entrada a un entorno virtual o teleoperador. La respuesta del entorno que se transmitirá al operador humano se calcula a través de modelos, representación háptica, detección y / o estimación. Finalmente, los actuadores en el dispositivo háptico muestran las sensaciones táctiles correspondientes para el operador humano. (b) El resultado ideal es que el operador humano siente que está interactuando directamente con un entorno real[1]

CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR EL MÉTODO DE CONTROL

Existen dos amplias clases de dispositivos los cuales son de admitancia e impedancia

DISPOSITIVOS DE ADMITANCIA: detectan la fuerza generada por el usuario sobre el dispositivo háptico y realiza la retroalimentación restringiendo la posición, de esta manera coincide el punto de contacto en el entorno virtual con el entorno físico[1]

DISPOSITIVOS DE IMPEDANCIA: detecta la posición manipulada por el usuario y realiza el control aplicando un vector de fuerza el cual es calculado por el contacto con el objeto o superficie virtual [1].

CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR EL TIPO DE ACTUADOR

Al igual que los elementos finales de control pueden dividirse en tres clases, hidráulicos, neumáticos y eléctricos.

DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS: Son de gran estabilidad, debido a las altas presiones que puede propagarse a través del aceite permiten producir fuerzas elevadas, con una actuación más rápida que los neumáticos, gracias a que la presión se propaga cuatro veces más rápido que en el aire, no presenta problemas de rozamiento gracias a la propiedad auto lubricante del aceite.

Posee desventajas debido a las elevadas masas de todos sus componentes, también requiere sistemas de alta presión los cuales son más complejos y costosos además de requerir intervalos de mantenimiento más cortos y debido al riesgo de producirse una

fuga de aceite dichos dispositivos no pueden utilizarse en entornos limpios como hospitales [2].

DISPOSITIVOS NEUMATICOS: estos dispositivos son más ligeros, pueden ser usados en entornos limpios pues el aire no es inflamable y en caso de falla no desprende residuos contaminantes.

Debido a la propiedad de compresión del aire su tiempo de respuesta es mayor que el hidráulico además de no poder producir las mismas fuerzas [2].

DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS: utilizan motores DC, de instalación sencilla, no posee fugas de fluido y son más silenciosos y económicos que los hidráulicos y neumáticos, y mucho más ligeros.

En comparación a los dispositivos hidráulicos y neumáticos, están por debajo de la fuerza que pueden producir [2].

MODELO ELÁSTICO

El modelo elástico mas común propone restituir una fuerza la cual es directamente proporcional a la penetración que es producida por la interacción entre dos objetos que puede representarse fácilmente mediante la ecuación del resorte

$$f_n = Kx$$

De esta manera los objetos virtuales tendrán cierto grado de rigidez virtual K . Acerca de la rigidez limitada de los objetos virtuales, Massic (1994) afirma que el hombre es capaz de apreciar rigideces mayores de 2000 N/m como una superficie completamente rígida, por otro lado Tan(1994) afirma que el umbral absoluto de rigidez en el cual un usuario no es capaz de distinguir rigideces mayores, debe situarse entre 15300 N/m y los 41500 N/m[2].

INTERFACE VIRTUAL

Una de las vías importantes de desarrollo de la realidad virtual se encuentra en la extensa área de la educación. Estudios diversos han demostrado que los estudiantes pueden aprender de mejor manera si interactúan directamente con sus temas de estudio a través de un sistema de realidad virtual. Las mismas sensaciones positivas que se presentan en una persona al momento en que está jugando un videojuego virtual, las puede experimentar esa misma persona utilizando un entorno virtual con fines académicos [3].

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN DISPOSITIVO HAPTICO

- Uniformidad del acondicionamiento cinemático en todo el espacio de trabajo objetivo.
- Favorecer diseños con menor inercia para dispositivos de impedancia.
- Garantizar que el espacio de trabajo objetivo sea accesible.

PERCEPCIÓN HÁPTICA EN LOS SERES HUMANOS

El sentido del tacto al igual que un dispositivo háptico presenta una interacción bidireccional con el entorno, mediante el cual podemos percibir texturas, contornos, temperatura, y solidez de los objetos que nos rodean también se habla de un sexto sentido correlacionado, el sentido kinestésico, el cual se puede definir como la capacidad de percibir los movimientos musculares y posiciones articulares, lo cual nos permite coordinar tareas como caminar hablar, agarrar un objeto esquivando obstáculos, entre otras [4].

FABRICACION 3D

La implementación de impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM)[5], es el método más convencional y comúnmente encontrado en los mercados de todo el mundo, debido a la asequibilidad de los componentes para la construcción de las impresoras 3D basadas en este método, y la internalización de producción y comercio de materia prima de esta tecnología en donde el mercado colombiano está incluido, facilita la implementación de mecanizado por medio de este proceso en la universidad de Pamplona.

Se aprovecha la asequibilidad y desarrollo de esta tecnología dentro de la universidad de Pamplona, con disponibilidad de diversas impresoras y con el objetivo de replicar partes físicas de dispositivo los cuales dentro del proyecto Hapkit son proporcionados como ficheros stl listos para ser impresos en 3D.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de periféricos novedosos y cada vez más completos para la interacción con entornos virtuales y tele operados mantienen un tema de estudio constante y en constante cambio, que los estudiantes de carreras como la ingeniería mecatrónica deben conocer como parte de su formación como profesionales.

Las tecnologías hápticas tienen un gran potencial en la interacción de los estudiantes con entornos virtuales y técnicas de tele operación, las cuales hasta el momento son temas teóricos vistos en clase, sin laboratorios que permitan verificar de manera física las condiciones y formulas estudiadas.

Dentro de la Universidad de Pamplona la háptica es un tema novedoso y poco tratado, debido a esto dicha entidad no posee equipos propios para realizar las practicas básicas que requieren los laboratorios sobre este tema, por ello es necesario disponer de un dispositivo capaz de suplir esta necesidad.

La Universidad de Stanford en su proyecto hapkit, provee el listado de componentes e instrucciones para la implementación de un dispositivo háptico básico de un grado de libertad, basado en código abierto, de fabricación 3D versátil y modificable, con el cual se podrían diseñar e implementar prácticas de laboratorio, donde los estudiantes apliquen los conocimientos aprendidos sobre la teoría háptica, además de incitar la curiosidad para realizar modificaciones y el desarrollo de nuevos dispositivos que a futuro superen la complejidad de esta primera propuesta.

3. DELIMITACIÓN

Este proyecto plantea la replicación de un dispositivo háptico de un grado de libertad basado en el proyecto Hapkit de la universidad de Stanford en su versión 3.0 el cual, De construcción utilizando tecnología de impresión 3D FDM y los componentes contenidos en el listado de piezas provisto por el proyecto, pretende ser enlazado dentro del entorno virtual VREP sobre el cual se realizará una práctica básica en donde se evidencie el buen funcionamiento del dispositivo y permita realizar una evaluación sobre el desarrollo y conclusiones.

4. ESTADO DEL ARTE

Los dispositivos hápticos han sido desarrollados principalmente para mejorar la correlación de los usuarios en entornos virtuales y tele operados, generando una manipulación más realista que permita minimizar los errores e incrementar la satisfacción de la interacción con los objetos y tareas realizables dentro de estos ambientes.

Una de las primeras interacciones hápticas fue presentada para el mando del sistema de juegos Nintendo 64 con su dispositivo Rumble pack, el cual ofrecía una retroalimentación vibro táctil en ciertas situaciones de juegos, esto permitió atraer la atención de los jugadores y sumergirlos en la acción [6].

Los dispositivos kinestecicos al permitir la reproducción de fuerzas presentan una ventaja en la facilidad de su construcción, utilizando principalmente motores, encoders, cables delgado y diferentes mecanismos de barras permiten de esta manera la interacción con objetos tridimensionales mediante ambientes virtuales [7]. Debido a su facilidad de producción han aparecido a nivel mundial gran cantidad de compañías que se encargan de desarrollar estas tecnologías principalmente estadounidenses [8] lo que ha permitido producir una gran variedad de librerías[9] y aplicaciones para dichos dispositivos.

A continuación, nombraremos algunos de los dispositivos comerciales más comunes con algunas de sus características.

El SPIDAR(sato 2002) y SPIDAR G&GO(Murayama et al,2004)[10] del instituto Tecnológico de Tokio, está construido basado en un motor DC, cables delgados que reflejan la fuerza, en su versión más moderna a 2 manos posee 3 GDL para el desplazamiento 3 GDL rotacionales y un grado extra para el agarre de objetos [11].



Fig. 2 SPIDAR[12]

El NOVINT FALCON (novit 2012) de la compañía novit, presenta una morfología paralela con 3 GDL en un área de trabajo de 4" x 4" x4" en resolución de posición de 400 dpi con una retroalimentación máxima de 8.9N [11].



Fig. 3 NOVINT FALCON [13]

7 DOF HAPTIC INTERFACE(MPB 2014) del MPB Technologies, posee un espacio de trabajo de 17 x 22 x 33 cm,2.5n, P-Y-R 170°-130-340°, TORQUE 370mN-310Nn-150mN y accionamiento de tigras de 40° a 450mN [11].

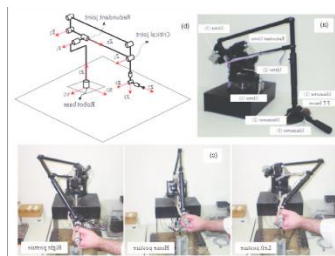


Fig. 4 7DOF haptic interface[14]

Thrustmaster TX Racing Wheel Ferrari 458 (Thrustmaster 2015) de la empresa Immersion diseñado para plataformas de juego proporciona fuerza en maniobras de juegos de conducción



Fig. 5 Thrustmaster TX Racing Wheel Ferrari 458 [15]

Haptic Master (Mimics 2015) de la empresa Mimics, con 3GDL, diseñado para la rehabilitación de movimiento utilizando entornos virtuales [11].



Fig. 6 Haptic Master [16]

HIRO III (Robothand 2015) de la empresa Robothand es uno de los sistemas kinestésicos más completos pues cuenta con 21 GDL de los cuales presenta 6GDL en el brazo y 15 en la mano, permite percibir la sensación de fuerza y tacto en todas la yemas de los dedos [11].

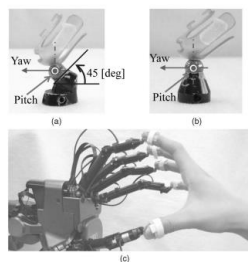


Fig. 6. Connection between finger holder and haptic fingertip. (a) Thumb and pinky. (b) Other fingers. (c) Close-up photo of the user's hand in the interface.

Fig. 7 HIRO III[17]

VIRTUOSETM 6D Desktop (Haption 2015) de la empresa Haption , cuenta con 6 grados de libertad y un área de trabajo de 521*370*400 mm, 270°*120°*250° , posee una fuerza de 10N máximos para la translación , 0.8N máximos en la rotación [11].

Maglev 200™ (Butterfly-haptics 2015) de la empresa Butterfly Haptis, posee 6GDL el cual emplea el principio de levitación de Lorentz para la aplicación de fuerzas [11].

DLR light-weight robot III (DLR 2015) de DLR-Robotics an Mechatronics Center, posee 7 GDL el cual permite una carga máxima de 14 Kg, Ejes R-P-R-P-R-P-P, alcance máximo 936 mm, velocidad de junta 120°/s, sensor de torque [11].

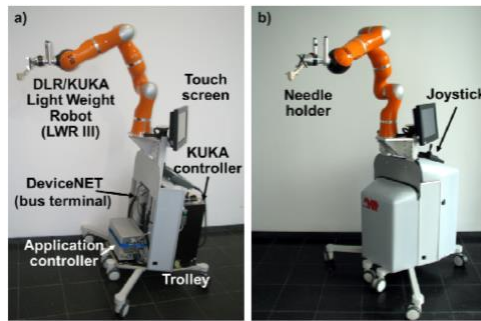


Fig. 8 plataforma robotica móvil con DLR7KUKA light weight Robot II, a) Controlador en tiempo real con dispositivo Net buss termina y pantalla táctil integrada. b) Plataforma con tapa puesta [18]

6 Dof DELTA (Forcedimension 2015a) de la empresa Force Dimension, posee 6 grados de libertad basados en una estructura paralela, la cual permite una fuerza máxima de 20N en un espacio semiesférico $\varnothing 400 \times 260$ mm, una rotación 22° y resolución de 0,02 mm [11].

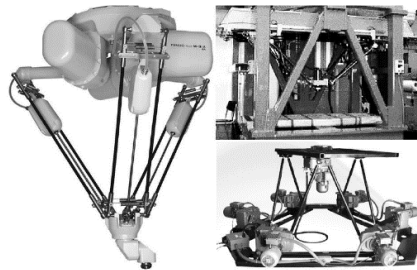


Fig. 9 Dof Delta [19]

CYBERGRASP (CybergloveSystems 2015a) de la empresa Cyberglobe Systems, posee 5 GDL específicamente uno por cada dedo y de 18 a 22 sensores de fuerza para medir flexión y abducción [11].



Fig. 10 Cybersgrasp [20]

OMEGA7 (Forcedimension 2015b) de la empresa Force Dimension, posee 3GDL en una estructura paralela con una fuerza máxima de 8N y rotación de $240^\circ \times 140^\circ \times 180^\circ$ [11].

PHANTOM (Sensable 2016) de la compañía Sensable, posee 6GDL, en disposición serial solo el primer grado de libertad activo y una resolución de posición de 1100 dpi [11].



Fig. 11 Phantom premium [21]

Omni™ Bundle (Quanser 2016a) de la empresa Quanser , con 6GDL permite una aplicación de fuerza máxima de 3.3 N en un espacio de trabajo 160mm x 120mm x70 mm [11].

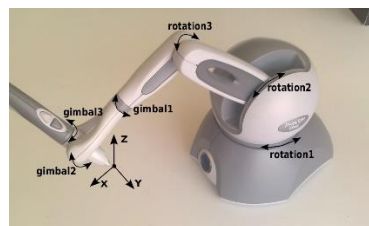


Fig. 12 Phantom omni device [22]

Quanser Haptic 3-DOF Planar Pantograph Blocks (Quanser 2016b) de la compañía Quanser, con solo 3GDL, Movimiento planar de la mano sujeta a una empuñadura, manejado por motores DC. La posición y orientación del efector final del robot como un vector de 3: coordenadas X e Y en milímetros, y la orientación, θ , en radianes [11].



Fig. 13 Quanser Haptic 3-DOF Planar Pantograph Blocks [23]

En cuanto a la implementación de estos dispositivos en los ámbitos educativos presentan grandes problemas notables, tales como costos elevados, implementación solo con un software en específico, y buen encapsulado, lo que no permite una comprensión clara de la funcionalidad física y desarrollo del software y programación del dispositivo. Debido a esto proyectos como Hapkit[24], Graphkit, haplink[25] y otros proyectos de dispositivos hápticos opensource de diferentes grados de libertad [26] [27] [28], son una solución viable en cuanto a implementación educativa se refiere, pues cuentan con diseño y software de código abierto, además de construcción basado en nuevas tecnologías de impresión 3D[29] que permite la modificación tanto física como del código interno adecuado a las necesidades propias de cada aplicación o caso de estudio, además de ser un libro abierto para el campo de estudio de los dispositivos hápticos.

Publicaciones anteriores han desarrollado practicas con modelos propios para el estudio de diversos temas relacionados con la háptica, tales como “desarrollo de modelo dinámico y control de un dispositivo para una interface háptica” [30], Desarrollo de un dispositivo háptico para enseñanza de conducción en el entorno REALTOWN”[3], “ desarrollo de una interfaz táctil táctica que incorpora almohadilla para dedos 1D y dispositivos de visualización de la fuerza con la yema del dedo en 3D”[31], “Diseño e implementación de un dispositivo táctil háptico para la representación de háptica híbrida táctil a gran escala”[32],” Implementación de una retroalimentación háptica de fuerza en la configuración robótica maestro esclavo”[33] he “implementación de pantallas táctiles portátiles de código abierto con colocación de retroalimentación táctil de fuerza Visual”[34] ,otras publicaciones se enfocan en tareas especializadas como el “Diseño e implementación de un dispositivo háptico para entrenamiento en operaciones urológicas”[35],”Diseño de un dispositivo háptico con capacidad de retroalimentación de fuerza push-pull para un robot quirúrgico en configuración maestro esclavo”[28], y por ultimo estudios sobre “Interacción física estudiante-robot con la paleta háptica ETHZ”[36].

En los próximos años se espera lograr grandes avances tanto en los dispositivos táctiles, como en los dispositivos kinestésicos, debido a que la experiencia diaria demuestra la correlación esencial de estas dos corrientes [37] por ende presentar un nuevo enfoque que combina estas dos tecnologías de la mano de nuevas tendencias de investigación que permitan aportar un poco más a la comprensión y replicación de las formas o métodos de interactuar de los humanos con el entorno y ver a futuro interacciones virtuales más amigables buscando siempre ser lo más cercano a la realidad.

5. RECURSOS

• Impresora 3D y material	\$ 10 000
• Hapkit board	\$ 149 109
• Motor mabuchi 12v	\$ 10 000
• Sensor angular magnético	\$ 19 000
• Partes varias	\$ 10 000
• TOTAL	\$ 198 109

6. RESULTADOS

Se logro obtener un dispositivo funcional de un grado de libertad, implementando el diseño del prototipo Hapkit 3.0 al cual se le realizaron pequeñas variaciones de diseño en algunas de sus piezas.

Se logro enlazar satisfactoriamente el dispositivo en el entorno de Vrep, logrando realimentar una fuerza contraria al movimiento en caso de colisión, así como la transmisión de una posición parara el control del modelo virtual, vasado en el desplazamiento angular del dispositivo, dicho porgrama fue realizado en un scrip de Vrep, este programa tiene un inconveniente en la velocidad de transmisión y recepción de datos, por lo cual el control en la simulación no ocurre de una manera fluida y en tiempo real.

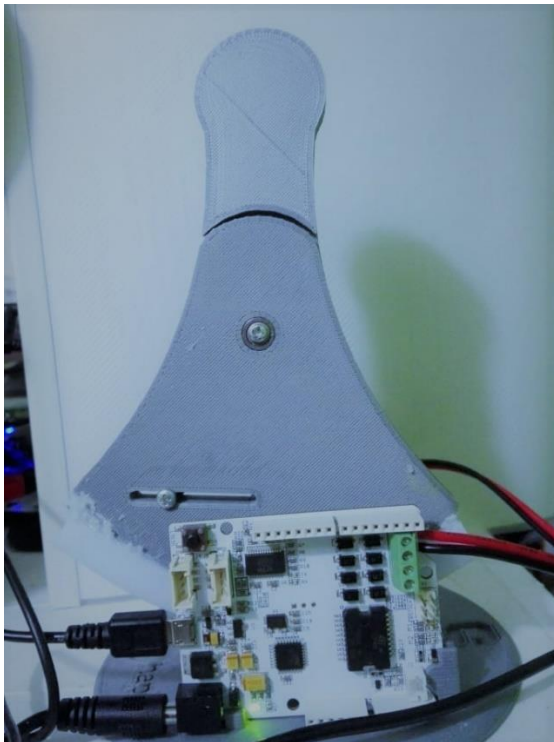


Fig. 14 Dispositivo construido

7. MANUAL DE OPERACIÓN

El dispositivo posee una tarjeta Hapkit a la cual previamente se le ha cargado el código para su correcto funcionamiento, el cual utiliza el puerto serial como medio de transmisión y recepción de información, por ello para su funcionamiento solo es necesario conectar el dispositivo y cargar drivers de Arduino previamente.

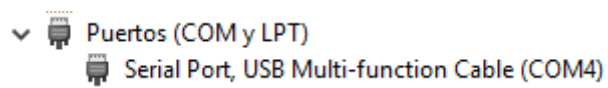


Fig. 15 verificación de conexión de la tarjeta en el puerto com virtual #4

- makes life better! : Phoenix Park, Korea, Feb. 15-18, 2009*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2009.
- [7] M. Bergamasco y E. Ruffaldi, «Haptic Interfaces for Embodiment in Virtual Environments», p. 6.
 - [8] «Companies | TCH Website». [En línea]. Disponible en: <http://www.worldhaptics.org/companies>. [Accedido: 06-abr-2018].
 - [9] F. Sanfilippo, P. B. T. Weustink, y K. Y. Pettersen, «A coupling library for the force dimension haptic devices and the 20-sim modelling and simulation environment», 2015, pp. 000168-000173.
 - [10] J. Murayama, L. Bougrila, Y. K. Akahane, S. Hasegawa, B. Hirsbrunner, y M. Sato, «SPIDAR G&G: A two-handed haptic interface for bimanual VR interaction», en *Proceedings of EuroHaptics 2004*, 2004, pp. 138–146.
 - [11] V. Z. Perez Ariza y M. Santís-Chaves, «INTERFACES HÁPTICAS: SISTEMAS CINESTÉSICOS Vs. SISTEMAS TÁCTILES», *Rev. EIA*, vol. 13, n.º 26, mar. 2017.
 - [12] A. Tatematsu y Y. Ishibashi, «3X3 Mapping Workspaces to Virtual Space in Work Using Heterogeneous Haptic Interface Devices», *Adv. Haptics*, p. 18.
 - [13] N. Karbasizadeh, A. Aflakiyan, M. Zarei, M. T. Masouleh, y A. Kalhor, «Dynamic identification of the Novint Falcon Haptic device», 2016, pp. 518-523.
 - [14] «a) 7-DOF haptic device, (b) kinematic model at home posture, and (c)...» [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/a-7-DOF-haptic-device-b-kinematic-model-at-home-posture-and-c-various-sample_fig2_274994752. [Accedido: 07-abr-2018].
 - [15] «TX Racing Wheel Ferrari 458 Italia Edition - Volante Xbox One / PC | Thrustmaster». [En línea]. Disponible en: http://www.thrustmaster.com/es_ES/productos/tx-racing-wheel-ferrari-458-italia-edition. [Accedido: 07-abr-2018].
 - [16] V. der L. R. . Ruiter B., «The HapticMaster, a new high-performance haptic interface».
 - [17] T. Endo *et al.*, «Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III», *IEEE Trans. Haptics*, vol. 4, n.º 1, pp. 14-27, ene. 2011.
 - [18] S. Tovar-Arriaga, J. Emilio Vargas, J. M. Ramos, M. A. Aceves, E. Gorrostieta, y W. A. Kalender, «A Fully Sensorized Cooperative Robotic System for Surgical Interventions», *Sens. 14248220*, vol. 12, n.º 7, pp. 9423-9447, jul. 2012.
 - [19] L. Zhang, H. Xiong, y L. Han, «Design and implementation of a 6 DOF delta force feedback controller for tele-operation», *2015 5th Int. Conf. IT Converg. Secur. ICITCS*, p. 943, ene. 2015.
 - [20] M. Aiple y A. Schiele, «Pushing the limits of the CyberGrasp for haptic rendering», 2013, pp. 3541-3546.
 - [21] «3D Systems Phantom Premium», *3D Systems*. [En línea]. Disponible en: <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium>. [Accedido: 07-abr-2018].
 - [22] «Cooperative Haptics for Humanoid Robot Teleoperation». .
 - [23] «Quanser Haptic 3-DOF Planar Pantograph Blocks :: QUARC Targets Library». [En línea]. Disponible en: http://quanser-update.azurewebsites.net/quarc/documentation/quanser_3dof_pantograph_blocks.html. [Accedido: 07-abr-2018].

- [24] M. O. Martinez, J. Campion, T. Gholami, M. K. Rittikaidachar, A. C. Barron, y A. M. Okamura, «Open source, modular, customizable, 3-D printed kinesthetic haptic devices», en *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2017, pp. 142-147.
- [25] M. O. Martinez *et al.*, «3-D printed haptic devices for educational applications», en *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 2016, pp. 126-133.
- [26] A. Lavatelli, F. Ferrise, y M. Bordegoni, «Design of an open-source low cost 2DOF haptic device», 2014, pp. 1-6.
- [27] E. Bengoechea, E. Sánchez, y J. J. Gil, «Palanca Háptica Versátil de Bajo Coste para Simuladores de Conducción y Entrenamiento», 2015.
- [28] Z. Hu, C.-H. Yoon, S. Park, y Y.-H. Jo, «Design of a haptic device with grasp and push-pull force feedback for a master-slave surgical robot», *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, vol. 11, n.º 7, p. 1361, jul. 2016.
- [29] J. M. Gandarias-Palacios, S. Akbari-Kalhor, y J. M. Góme-de-Gabriel, «Diseño y uso de una paleta háptica para prácticas de teleoperación con simulink», sep. 2016.
- [30] «The dynamics and control of a haptic interface device», *IEEE Trans. Robot. Autom. Robot. Autom. IEEE Trans. IEEE Trans Robot Autom.*, n.º 4, p. 453, 1994.
- [31] H. Kawasaki, Y. Doi, S. Koide, T. Endo, y T. Mouri, «Hand haptic interface incorporating 1D finger pad and 3D fingertip force display devices», en *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010, pp. 1869-1874.
- [32] Z. Liu, Y. Zhu, y J. Zhao, «Design and implementation of a finger haptic device for large-scale force-tactile hybrid haptic rendering», en *2012 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2012, pp. 709-714.
- [33] A. M. Sharma, S. Kumar, y A. Kumar, «Implementation of force feedback (haptic) in master slave robotic configuration», 2015, pp. 267-271.
- [34] C. Gallacher, A. Mohtat, S. Ding, y J. Kovecses, «Toward open-source portable haptic displays with visual-force-tactile feedback colocation», 2016, pp. 65-71.
- [35] K. Vlachos, E. Papadopoulos, y D. N. Mitropoulos, «Design and implementation of a haptic device for training in urological operations», *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 19, n.º 5, pp. 801-809, oct. 2003.
- [36] O. L. Roger Gassert, «Physical Student-Robot Interaction with the ETHZ Haptic Paddle», *February 2013*, vol. 56, n.º 1, p. 6.
- [37] T. Zeng, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, y M. Amberg, «Analysis of a New Haptic Display Coupling Tactile and Kinesthetic Feedback to Render Texture and Shape», en *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, 2010, pp. 87-93.