

# Sistemas hápticos: Una revisión

## Haptic systems : A review

David Escobar Valencia <sup>a</sup>, Oscar Andrés Vivas Albán <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Popayán, Colombia

<sup>b</sup>Departamento de Electrónica, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Recibido: 06/06/2017; revisado: 22/10/2017; aceptado: 15/01/2018

**D. Escobar Valencia, O. A. Vivas Albán:** Sistemas hápticos: Una revisión *Jou.Cie.Ing.* **10** (1): 47-54, 2018. ISSN 2145-2628, e-ISSN 2539-066X.

### Resumen

Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre los sistemas hápticos, tratando inicialmente la definición formal del concepto, así como las respectivas ramas de clasificación. Posteriormente se enmarcan trabajos e investigaciones desarrollados con dispositivos hápticos en diferentes áreas del conocimiento. El objetivo de esta revisión es evidenciar el gran potencial futuro de esta tecnología, la cual impactará favorablemente a los procesos cotidianos en los años venideros.

**Palabras Claves:** Sistemas hápticos, realidad virtual, realimentación de fuerza, realimentación sensorial.

### Abstract

This article presents a bibliographical review of the haptic systems, initially treating the formal definition of the concept, as well as the respective classification branches. Subsequently, work and research developed with haptic devices in different areas of knowledge are framed. The objective of this review is to demonstrate the great future potential of this technology, which will favourably impact everyday processes in the years ahead.

**Keywords:** Haptic systems, virtual reality, force feedback, sensory feedback.

## 1. Introducción

El termino háptico fue mencionado en la literatura por primera vez en el año de 1931 en el campo de la psicología experimental. Este concepto proviene del griego haptō / haphthethai, interpretado como tocar, por ende, está relacionado para describir y comprender todo aquello basado con el sentido del tacto [1, 2].

Los sistemas hápticos se ven influenciados o complementados por otros sentidos, entre ellos el sentido de la vista, ya que por medio de esta unión se logra la captación de las diferentes características físicas de un objeto con el cual se esté realizando algún tipo de interacción, proporcionando un criterio de transmisión y recepción de información debido a la naturaleza de un

proceso activo por parte del usuario [3].

Esta captación de características físicas se obtiene generalmente por medio de las extremidades de los dedos, las manos o los brazos del usuario, el cual manipula un sistema háptico; por consiguiente, se puede definir de manera formal a un sistema háptico como un dispositivo que permite tocar, sentir, e interactuar con un objeto que se encuentra en un medio virtual o en un entorno de tipo remoto [4, 5].

En la actualidad existen diferentes sistemas hápticos que se encuentran ramificados o clasificados desde hace un tiempo en dos líneas.

La primera de ellas se enfoca en los estímulos producidos por la retroalimentación de fuerza obtenidos gracias al sistema cenestésico, en donde el usuario

interpreta el estado del cuerpo reflejado en la ubicación espacial, en las posiciones y los movimientos ejecutados, percibiendo entonces características de dureza, peso, e inercia [6,7].

De forma fisiológica la interpretación cenestésica se produce a través de receptores ubicados en los músculos, los tendones y las articulaciones [2,8].

La segunda línea de clasificación involucra a los mecano receptores cutáneos los cuales se encuentran en la piel, dichos mecano receptores deben ser excitados en estos casos por medio de actuadores; el propósito de estos actuadores es generar una señal de forma controlada para producir una respuesta de sensación [7,9].

Fisiológicamente estas respuestas se generan debido a que en la piel se encuentran cuatro tipos de mecano receptores, siendo estos: los corpúsculos de Meissner, los discos de Merkel, los corpúsculos de Pacini y finalmente las terminaciones de Ruffini, encargados de detectar los diferentes cambios de presión en la piel, respondiendo ante ellas por medio de un impulso nervioso, lo cual produce en el usuario sensaciones de contacto y texturas [10].

Por consiguiente, el enfoque principal de un sistema háptico, es producir o generar en el usuario un cierto grado de realismo, interpretado en un entorno virtual, directamente influenciado por el tipo de tecnología a utilizar, ya sea cenestésico o mecano receptor, complementado por acciones de tipo visual o auditivas que ayuden de forma positiva en la recepción de un estímulo [11].

El desarrollo de este artículo, se encuentra fundamentado en una revisión del estado del arte, para actualizar las diferentes áreas de aplicación en los que se utilizan sistemas basados en háptica, siendo de interés por parte de los autores proponer un dispositivo que utilice micro-corrientes para la generación de texturas, de igual manera, la sección 2 describe entonces los dispositivos hápticos utilizados comúnmente en las líneas de clasificación, seguidamente en la sección 3 se ilustra y ejemplifica la aplicación de sistemas hápticos en diferentes áreas del conocimiento tales como: medicina, automatización, vídeo juegos serios, y principios afectivos, en la sección 4 se desarrollan conclusiones apoyadas en las secciones anteriormente mencionadas.

## 2. Dispositivos hápticos

Los dispositivos hápticos de tipo cenestésico, tienden a interactuar sobre los aspectos activos del tacto,

estableciendo una inmersión corporal, debido a que el usuario obtiene una retroalimentación de fuerzas cuando interactúa con un objeto virtual. Este tipo de dispositivos proporciona estas sensaciones generalmente en los brazos, dedos y la mano por medio de exoesqueletos e interactuadores puntuales [6].

Los dispositivos hápticos basados en exoesqueletos interactúan con el usuario por medio del intercambio de energía, estos sistemas tienden a limitar en un cierto grado los movimientos del usuario debido al espacio en el cual ejecutan un trabajo, además producen la transferencia de fuerza por medio de un sistema de cables de tensión accionados por motores y posicionadores [12].

Generalmente los exoesqueletos se encuentran soportados en las extremidades superiores, aunque también se pueden sujetar en el suelo o en una pared, los ejemplares comerciales más utilizados son: Cybergrasp [13] , y CyberTeam [14].

En la figura 1, se visualiza un ejemplar basado en exoesqueletos.



Figura 1. Cybergrasp [13].

Por otra parte, los dispositivos hápticos denominados o llamados interactuantes puntuales establecen la comunicación entre el usuario y el entorno virtual gracias a un dispositivo intermedio, en donde la mano o los dedos se encuentran involucrados con la extensión del sistema háptico; normalmente esta extensión es de forma cilíndrica o esférica [13]. Este tipo de efectores finales propicia la sensación de realismo, debido al tipo de músculos involucrados en la manipulación de dichos dispositivos intermedios, ya que existe una diferencia de interacción entre unos con formas de pinza o tijera con respecto a otros de tipo lapicero [15]. Los dispositivos más utilizados son: Novint Falcon [16] y Phantom

Omni [17], en la figura 2 se visualiza un dispositivo basado en interactuadores puntuales.



Figura 2. Novint Falcon [16].

Seguidamente los dispositivos hápticos basados en mecano receptores, se emplean para proporcionar al usuario información de texturas, rugosidad y también de forma; los actuadores con mayor influencia son los de presión y vibración a bajas frecuencias [10].

No obstante, también se han generado trabajos, utilizando actuadores que generan electro estimulación en diferentes zonas corporales, este tipo de dispositivos son de un menor tamaño comparados con las anteriormente mencionados y no presentan algún tipo de resonancia mecánica [18].

De igual manera se han propuesto dispositivos basados en el principio electrostático, obteniendo sensaciones de fricción entre diferentes superficies del dedo evaluados en una pantalla táctil [19]. Por su parte, en el proceso de obtener sensaciones que involucren texturas, se utilizan dispositivos electromecánicos como los vibradores resonadores de inercia [20] o los motores con masa excéntrica rotativa [21], también se ha incursionado en la presentación de dispositivos de tipo neumático para generar una protuberancia por el paso de aire producido al generarse contacto con un objeto virtual [22].

### 3. Aplicaciones en áreas del conocimiento

Es de notar que los dispositivos hápticos están relacionados estrechamente con el concepto de realidad virtual, principio utilizado en cada área del conocimiento, por lo tanto, es de vital importancia sintetizar una definición formal: la realidad virtual está comprendida como una interface de usuario avanzada

para procesos y aplicaciones computacionales, que establecen interacción en tiempo real por medio de un ambiente tridimensional generado por computador [23, 24].

Los ambientes virtuales han servido como medios de entrenamiento siendo comunicados con dispositivos hápticos; en áreas como medicina, automatización, videos juegos serios y principios afectivos, estableciendo escenarios gráficos en los cuales el usuario interactúa en tiempo real, utilizando dispositivos de tipo sensorial para visión, audición y propiocepción [4, 25].

A continuación, se evidencian la utilización de sistemas hápticos en las áreas anteriormente mencionadas.

#### 3.1. Háptica en medicina

Los sistemas hápticos han sido considerados como beneficiosos en cualquier situación de aprendizaje en donde el estudiante experimenta por medio de simulaciones estados realistas. Con la incorporación de la tecnología háptica en la medicina los practicantes pueden tocar o palpar la superficie de un objeto, y sentir las fuerzas que se producen generadas por un dispositivo quirúrgico, reduciendo así los índices de riesgo gracias al entrenamiento con este tipo de tecnologías [26].

En cuanto a aplicaciones de sistemas hápticos en medicina, se enfocan en primera instancia en la cirugía de laparoscopia, definida como un procedimiento mínimamente invasivo, en el cual se ejecutan pequeñas incisiones en el abdomen insuflado del paciente, con el propósito de introducir un sistema de visión, así como instrumentos quirúrgicos determinados [27].

Al involucrar dispositivos hápticos en sistemas de educación quirúrgica, los practicantes mejoraran las habilidades de manipulación instrumental en un ambiente controlado, percibiendo estímulos de contacto y colisiones con los diferentes tejidos u órganos [28].

En [29] se presenta un sistema para realizar procesos de valoración por medio de una endoscopia, en donde el sistema háptico se encuentra comunicado de manera remota, proporcionando sensaciones de fuerza de inserción, con el fin de evitar daños en el colon, además por medio del entrenamiento facilita los movimientos del endoscopio de manera segura y en un menor tiempo.

Por su parte los simuladores de palpación se han convertido en gran apoyo para los estudiantes practicantes tanto de medicina humana como veterinaria, ya que por medio de los dispositivos hápticos aprenden a distinguir tamaños, texturas, formas

y rigidez de los diferentes órganos, para así generar un proceso de diagnóstico óptimo [30].

En el trabajo de [31], se ejecuta por medio de un amortiguador virtual ajustable en un entorno de manipulación de tejidos no homogéneos, la detección de vibración y retroalimentación de fuerzas de forma estable. En el campo de la veterinaria existen desarrollos basados en sistemas para el palpado del recto en un bovino aplicado al aprendizaje en problemas de fertilidad [32], o en el palpado del abdomen en felinos [33, 34].

Otra aplicación posible, es la extracción de tumores, en donde se utiliza un sistema háptico comunicado con un robot en configuración esclavo, el cual realizara la extracción de tejidos malignos. Estos sistemas generan una retroalimentación de fuerza al momento de ejercer el corte por medio de la evaluación de fuerzas deseadas contra fuerzas reales [35, 36].

Asimismo, los sistemas hápticos se han implementado en simuladores de cirugías denominadas PTR, que consisten en el reemplazo total de rodilla, en la cual los cortes del hueso y de cartílagos se remplazan por estructuras de tipo metálicas o plásticas; la funcionalidad de la PTR es corregir la alineación axial de la extremidad inferior, produciendo estabilidad y disminución de dolor articular [37, 38]. En el ámbito de la odontología, la inmersión de dispositivos hápticos se enfatiza en determinar la oclusión en modelos dentales que se encuentren en un formato virtual, en donde se realiza la alineación de referencias de forma háptica entre los modelos superior e inferior de un paciente, obteniéndose por medio de colisiones información referente a dichos procesos de alineación [39].



Figura 3. Simulador de palpado [32].

De igual manera se han desarrollado entornos para las buenas prácticas de higiene oral, proporcionándole

al usuario una enseñanza por medio de un simulador gráfico que contiene diferentes niveles de interacción, proporcionando al final del ejercicio el ajuste de movimientos a la hora del cepillado [40]. En esta rama también se han desarrollado prototipos para cirugías de carácter maxilofacial, lo que requiere la realización de un proceso de aserrado óseo, registrando por medio de los dispositivos hápticos estándares de fuerza comparados con un umbral permitido en este tipo de intervenciones [41]. En la figura 3, se ilustra una de las aplicaciones planteadas en el campo de la veterinaria.

### 3.2. Háptica en automatización

En la actualidad los procesos de automatización llevados a cabo por diferentes fabricantes han reconsiderado estrategias y metodologías para tareas de ensamblaje y montaje, apoyados por sistemas de simulación, con el fin de generar estados de entrenamiento en los trabajadores que se ven reflejados en la mejora de habilidades, en la reducción de tiempo en ciclos de diseño, lo que conlleva a un alza en la calidad de los productos, viéndose manifestado en proporciones de costo en los procesos de fabricación final [42, 43].

Por lo anteriormente expuesto se han desarrollado e investigado entornos de simulación con dispositivos hápticos enfatizados en la aceleración de la planificación de ensamblaje, por medio de técnicas de indexados, restricciones y alineaciones entre superficies [44].

Uno de los entornos de simulación planteados genera un método de ensamblaje de piezas cilíndricas dentro de una superficie de dos caras, obteniéndose como resultado relevante que el dispositivo Phantom Omni permite generar los movimientos necesarios sobre el área de trabajo, además de ilustrar una reducción en las diferentes ejecuciones realizadas [45].

Otro de los desarrollos se enfoca en el proceso de ensamblaje de un motor para extracción de aire, por medio de un dispositivo Phantom desktop, en donde los operarios arman el sistema recibiendo índices de retroalimentación de fuerzas y colisiones, datos relevantes para corregir movimientos al momento de agarrar un objeto, reduciendo así criterios de tiempo [46].

En [47], se presenta el desarrollo de un sistema de realidad virtual comunicado por medio de un dispositivo háptico, para procesos de ensamblaje y manipulación de componentes primitivos representados por estructuras geométricas, además el simulador permite que el trabajador manipule parámetros como:

tiempos de ejecución, peso de los objetos y sensaciones de colisiones por medio de un motor físico.

Por su parte en [48], se desarrolla un entorno de simulación para el proceso de montaje de componentes mecánicos, en donde los escenarios de trabajo se encuentran combinados con un dispositivo háptico, el cual genera en el trabajador sensaciones de estímulos de peso e inercia al momento de agarrar y manipular piezas virtuales creadas en tamaño real.

En [49], se plantea un entorno de simulación, para que el usuario realice entrenamientos en la operación de un eje, el cual está compuesto por cinco superficies, para realizar trabajos de acoplamiento con una pieza base la cual está compuesta por cuatro superficies, midiendo tiempos de ejecución, y vectores de fuerza aplicados.

En [50], se implementa un dispositivo tipo guante para obtener estándares de flexión de las manos en tareas de agarre, dentro de un escenario virtual de acople de elementos en un automóvil, obteniéndose por parte del dispositivo háptico sensaciones de retroalimentación de fuerza para mejorar trayectorias, lo que conlleva a mejorar el desempeño de dichas tareas.

En la figura 4, se ilustra una de las aplicaciones planteadas para el entrenamiento de ensamblajes mecánicos.

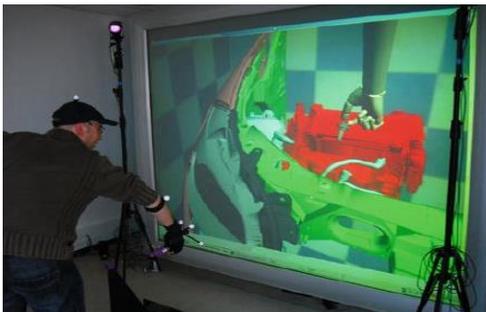


Figura 4. Simulador de ensamblajes [50].

De igual manera al relacionar las acciones anteriores surge el concepto de rehabilitación virtual, término utilizado de manera inicial por los profesores Daniel Thalmann y Grigore Burdea [52]. En consecuencia, la rehabilitación virtual está definida como el entrenamiento por medio de diferentes ejercicios de simulación mediante dispositivos o tecnologías de realidad virtual [53].

Los video juegos serios, se enfocan entonces en establecer un entorno virtual apoyado con percepciones de tipo auditivas, visuales y táctiles, en donde el paciente realiza la recuperación de una característica motriz debilitada por medio de un contexto de aprendizaje, realizando los ejercicios de manera periódica, seguido de un manejo de información vital para la evaluación de su proceso [54,55].

En [56], se plantea la construcción de un guante háptico con retroalimentación vibro-táctil, desarrollando dos entornos virtuales, para ejecutar ejercicios enfocados en la movilidad de los dedos por medio de la aprensión independiente de cada uno de ellos, evaluando medidas de desempeño como tiempo, fuerza e inclinación empleada, como se ilustra en la figura 5.



Figura 5. Guante háptico [56].

### 3.3. Háptica en video juegos serios

El área de los video juegos serios, se encuentra ligada al apoyo de procesos de rehabilitación, definiendo de manera formal el concepto de rehabilitación, dictada por la Real Academia Española como “un conjunto de métodos que tienen por finalidad la recuperación de una actividad o función perdida o disminuida por un traumatismo o enfermedad” [51].

Igualmente se plantea un sistema virtual, apoyado en un piano en donde el paciente en colaboración con un exoesqueleto soportado sobre la mano, ejecuta ciertas tareas, con el fin de rehabilitar brazo y mano de manera coordinada. En este caso se obtiene una retroalimentación de tipo auditiva, visual y táctil [57].

En [58] se implementa un entorno 2D, para realizar ejercicios de rehabilitación motriz, basado en un entorno virtual que tiene como objetivo guiar un anillo en trayectorias con especificaciones curvilíneas, con el

propósito de evaluar desempeños de la función firmeza mano-hombro.

Por otra parte, el trabajo de Poligerynos ilustra un guante háptico, diseñado para aumentar los procesos de rehabilitación aplicado en pacientes con déficit en agarre funcional. El sistema háptico presenta actuadores que generan torsión y suavizan movimientos curvos [59].

### 3.4. Háptica en las emociones humanas

Cuando se combinan sistemas hápticos con las diferentes emociones que puede experimentar el ser humano, surge el concepto de háptica afectiva, definida de manera formal como: “un nuevo campo interdisciplinario de investigación que se enfoca en el diseño de diferentes dispositivos para detectar, procesar o mostrar el estado emocional del ser humano por medio del sentido del tacto” [60].

En el trabajo de Obrist, se genera una interacción del sentido de la vista por medio de la interpretación de 30 usuarios, sometidos a un proceso de visualización de diferentes imágenes que generan inmediatamente una sensación háptica gracias a un actuador de flujo de aire, clasificando las emociones específicas experimentadas dentro de cada sensación, como felicidad, tristeza, miedo y emoción [61].

Por su parte [62], establece un test sobre el estado emocional, definido por diferentes pacientes al ver ciertas imágenes, acompañado de un proceso de retroalimentación de fuerza; en ciertas situaciones se producen y se registran cambios emocionales definidas en este trabajo como positiva, neutral o negativa.

En el trabajo de Réhman, se genera estimulación háptica por medio de vibraciones, con diferentes magnitudes, frecuencias, y tiempos, observando que los pacientes presentan emociones clasificadas como normal, feliz, sorpresa y tristeza, los cuales dependen en cierta forma por las zonas que hayan sido estimuladas [63].

En [64], se presenta la intercomunicación de forma inalámbrica de dos dispositivos hápticos para imitar y recrear estímulos físicos como besos o abrazos, con el fin de medir la respuesta afectiva de cada uno de los procesos de interacción íntima, al encontrarse un vacío físico entre dos personas.

Asimismo, se desarrolló un sistema para establecer el criterio de una emoción espontánea como lo es el estrés, evaluado por medio de un video juego, en donde los participantes se ven inmersos en contextos de cambios de decisiones lo que modifica su comportamiento [65].

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó una revisión sobre sistemas hápticos, concepto que abarca al sentido del tacto, y por medio de sus áreas de clasificación se evidencian los diferentes dispositivos o mecanismos utilizados para interactuar en un medio virtual. Posteriormente se utilizó una estructura propia para enmarcar los trabajos o investigaciones en diferentes áreas del conocimiento, compuesto por cuatro campos de aplicación: medicina, automatización, juegos serios y principios afectivos.

Las contribuciones más frecuentes en el campo de la medicina, surgen en el desarrollo de dispositivos con retroalimentación de fuerzas, debido a que los simuladores se aplican a una gran variedad de cirugías; gracias a estas investigaciones se han podido medir índices de tiempo, trayectorias, y fuerza, y a partir de estas variables producidas dentro de un proceso de entrenamiento se han podido reducir riesgos al momento de una intervención quirúrgica.

De igual manera, los sistemas hápticos han sido de gran utilidad en procesos que conlleven rehabilitación, vistos como una herramienta de tipo tecnológica dentro del campo de los videojuegos serios, ya que se convierten en una alternativa complementaria de las diferentes terapias a las cuales está sometido un paciente.

Con respecto a la inclusión de sistemas hápticos en procesos de automatización, han permitido en un cierto modo reducir costos en secuencias de producción final, establecido por ejecuciones de ensamblajes rápidos, precisos, y con menos riesgo para el operario.

Se puso en evidencia también un nuevo marco en el cual se emplean los sistemas hápticos, siendo este el campo de los principios afectivos, dirigidos de forma inicial al entendimiento del comportamiento humano frente a estímulos visuales y táctiles.

Finalmente se ha mostrado el gran potencial futuro de los sistemas hápticos, los cuales han alcanzado cierta madurez a nivel de software y hardware, sin embargo es de considerar el criterio de inmersión, aspecto de investigaciones a corto plazo para obtener entornos semejantes a la realidad, impactando de forma positiva los procesos cotidianos, educativos o de investigación avanzada.

## Referencias

- [1] W. Barfield, “The use of haptic display technology in education.,” *Themes in science and technology education*, vol. 2,

- pp. 11–30, 2009.
- [2] M. Eid, M. Orozco, and A. El Saddik, “A guided tour in haptic audio visual environments and applications,” *International Journal of Advanced Media and Communication*, vol. 1, no. 3, pp. 265–297, 2007.
  - [3] P. Do and D. Homa, *Haptics Rendering and Applications*. Intech, 2012.
  - [4] B. Varalakshmi, J. Thriveni, K. Venugopal, and L. Patnaik, “Haptics: state of the art survey,” *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, no. 5, pp. 234–244, 2012.
  - [5] H. Cortés, M. García, R. Acosta, and P. Santana, “Diseño y desarrollo de un dispositivo háptico con aplicaciones para entornos educativos,” in *Memorias de la Novena Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática (CISCI 2010)*, 2010.
  - [6] M. Bergamasco and E. Ruffaldi, “Haptic interfaces for embodiment in virtual environment,” in *Proc. of RO-MAN*, 2011.
  - [7] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, “Haptic perception: A tutorial,” *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 71, no. 7, pp. 1439–1459, 2009.
  - [8] M. H. Fogtman, J. Fritsch, and K. J. Kortbek, “Kinesthetic interaction: revealing the bodily potential in interaction design,” in *Proceedings of the 20th Australasian Conference on Computer-Human Interaction: Designing for Habitus and Habitat*, pp. 89–96, ACM, 2008.
  - [9] D. Pamungkas and K. Ward, “Tactile sensing system using electro-tactile feedback,” in *Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2015 6th International Conference on*, pp. 295–299, IEEE, 2015.
  - [10] V. G. Chouvardas, A. N. Miliou, and M. K. Hatalis, “Tactile displays: Overview and recent advances,” *Displays*, vol. 29, no. 3, pp. 185–194, 2008.
  - [11] T. Lim, G. G. Badillo, and H. I. M. Castillo, “Are you haptic a bad day?,” in *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. V01BT02A042–V01BT02A042, American Society of Mechanical Engineers, 2014.
  - [12] A. Gupta and M. K. O’Malley, “Robotic exoskeletons for upper extremity rehabilitation,” in *Rehabilitation Robotics*, InTech, 2007.
  - [13] L. Raya González, “Visión global sobre tecnología háptica,” *Manual formativo, La revista de ACTA*, no. 61, pp. 115–122, 2011.
  - [14] J. D. Ramírez-Zamora, G. Martínez-Terán, O. A. Domínguez-Ramírez, L. E. Ramos-Velasco, V. Parra-Vega, and I. Saucedo-Ugalde, “Wavenet control of a cyberforce system with human dynamic on passive haptic guidance tasks,” in *Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015 CHILEAN Conference on*, pp. 121–127, IEEE, 2015.
  - [15] S. R. Wagner, “Haptic and exoskeleton devices for neurorehabilitation of upper limb paralysis: A state of art and a night landing task,” 2014.
  - [16] J.-L. Rodríguez and R. Velázquez, “Haptic rendering of virtual shapes with the novint falcon,” *Procedia Technology*, vol. 3, pp. 132–138, 2012.
  - [17] S. Kawai, P. H. Faust, C. L. MacKenzie, et al., “Computer graphic and phantom haptic displays: Powerful tools to understand how humans perceive heaviness,” in *Haptics Rendering and Applications*, InTech, 2012.
  - [18] K. Sato and S. Tachi, “Design of electro-tactile stimulation to represent distribution of force vectors,” in *Haptics Symposium, 2010 IEEE*, pp. 121–128, IEEE, 2010.
  - [19] C. Xu, A. Israr, I. Poupyrev, O. Bau, and C. Harrison, “Tactile display for the visually impaired using teslatouch,” in *CHI’11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 317–322, ACM, 2011.
  - [20] D. Pyo, T.-H. Yang, S. Ryu, and D.-S. Kwon, “Novel linear impact-resonant actuator for mobile applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 233, pp. 460–471, 2015.
  - [21] Y. Yang, *Design and control of an integrated haptic interface for touch screen applications*. PhD thesis, Lille 1, 2013.
  - [22] A. Russomanno, R. B. Gillespie, S. O’Modhrain, and M. Burns, “The design of pressure-controlled valves for a refreshable tactile display,” in *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*, pp. 177–182, IEEE, 2015.
  - [23] F. J. P. Martínez, “Presente y futuro de la tecnología de la realidad virtual,” *Creatividad y Sociedad*, no. 16, 2011.
  - [24] L. Raya, P. Toharia, and M. García, “Metodología de enseñanza de realidad virtual mediante un laboratorio de bajo coste,” *Actas de las I Jornadas de Innovación y TIC Educativas*, pp. 69–72, 2010.
  - [25] M. F. Levin, H. Sveistrup, and S. K. Subramanian, “Feedback and virtual environments for motor learning and rehabilitation,” *Schedae*, vol. 1, pp. 19–36, 2010.
  - [26] E. Takahiro, K. Tomohiro, K. Mana, and K. Haruhisa, “Human perception test of discontinuous force and a trial of skill transfer using a five-fingered haptic interface,” *Journal of Robotics*, vol. 2010, 2010.
  - [27] D. R. R. Tovar and S. A. Salinas, “Simuladores virtuales para entrenamiento de habilidades para laparoscopia/virtual simulators for laparoscopic skills training/simuladores virtuales para laparoscopic skills training,” *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 10, no. 19, p. 45, 2016.
  - [28] M. Zhou, S. Tse, A. Derevianko, D. Jones, S. Schwaitzberg, and C. Cao, “Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition,” *Surgical endoscopy*, vol. 26, no. 4, pp. 1128–1134, 2012.
  - [29] J. Woo, J. H. Choi, J. T. Seo, T. I. Kim, and B.-J. Yi, “Development of a robotic colonoscopic manipulation system, using haptic feedback algorithm,” *Yonsei medical journal*, vol. 58, no. 1, pp. 139–143, 2017.
  - [30] N. Forrest, S. Baillie, and H. Z. Tan, “Haptic stiffness identification by veterinarians and novices: A comparison,” in *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pp. 646–651, IEEE, 2009.
  - [31] S.-Y. Kim, J.-H. Ryu, and W. Lee, “Palpation simulator with stable haptic feedback,” *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, vol. 24, no. 4, pp. 211–217, 2015.
  - [32] T. Kinnison, N. D. Forrest, S. P. Frean, and S. Baillie, “Teaching bovine abdominal anatomy: Use of a haptic simulator,” *Anatomical sciences education*, vol. 2, no. 6, pp. 280–285, 2009.
  - [33] R. Parkes, N. Forrest, and S. Baillie, “A mixed reality simulator for feline abdominal palpation training in veterinary medicine,” *Studies in health technology and informatics*, vol. 142, pp. 244–246, 2009.
  - [34] J. Williamson, K. Hecker, K. Yvorchuk, E. Artemiou, H. French, and C. Fuentealba, “Development and validation of a feline abdominal palpation model and scoring rubric,” *Veterinary Record*, vol. 177, no. 6, pp. 151–151, 2015.

- [35] Y.-H. Hwang, S.-R. Kang, S.-W. Cha, and S.-B. Choi, "An electrorheological spherical joint actuator for a haptic master with application to robot-assisted cutting surgery," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 249, pp. 163–171, 2016.
- [36] M. de Lara Ribeiro and F. L. Nunes, "Breast palpation simulation with haptic feedback: prototype and initial results," in *Virtual and Augmented Reality (SVR), 2014 XVI Symposium on*, pp. 268–276, IEEE, 2014.
- [37] M. Pinto, J. Sabater, J. Sofrony, N. Garcia, J. Azorín, and C. Perez, "Sistema de entrenamiento para operaciones de reemplazo total de rodilla," *Trauma (Majadahonda)*, pp. 197–205, 2011.
- [38] S. Rasool, A. Sourin, V. Pestrikov, and F. Kagda, "Virtual knee arthroscopy using haptic devices and real surgical images," in *International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management*, pp. 436–447, Springer, 2014.
- [39] W. Wu, Y. Cen, Y. Hong, A. Keeling, and B. Khambay, "A pilot study to assess the feasibility and accuracy of using haptic technology to occlude digital dental models," *Journal of dentistry*, vol. 46, pp. 54–60, 2016.
- [40] H. F. Rodrigues, L. S. Machado, and A. M. G. Valença, "Applying haptic systems in serious games: A game for adult oral hygiene education," *SBC*, vol. 5, no. 1, p. 17, 2014.
- [41] Y. Lin, X. Wang, F. Wu, X. Chen, C. Wang, and G. Shen, "Development and validation of a surgical training simulator with haptic feedback for learning bone-sawing skill," *Journal of biomedical informatics*, vol. 48, pp. 122–129, 2014.
- [42] M. C. Leu, H. A. ElMaraghy, A. Y. Nee, S. K. Ong, M. Lanzetta, M. Putz, W. Zhu, and A. Bernard, "Cad model based virtual assembly simulation, planning and training," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 2, pp. 799–822, 2013.
- [43] U. Zaldivar-Colado, J. Lizárraga-Reyes, S. Garbaya, X. Zaldivar-Colado, D. Murillo-Campos, and C. G. Martínez-Tirado, "Técnica de interacción para el agarrado y manipulación de objetos en ensamble virtual," in *XII Congreso Mexicano de Robótica (Comrob 2010)*, pp. 221–226, 2010.
- [44] J. Ritchie, T. Lim, H. Medellin, and R. Sung, "A haptic based virtual assembly system for the generation of assembly process plans," in *XV congreso internacional SOMIM*, pp. 23–25, 2009.
- [45] W. Jiang, J.-j. Zheng, H.-j. Zhou, and B.-k. Zhang, "A new constraint-based virtual environment for haptic assembly training," *Advances in Engineering Software*, vol. 98, pp. 58–68, 2016.
- [46] M. H. Abidi, A. Ahmad, S. Darmoul, and A. M. Al-Ahmari, "Haptics assisted virtual assembly," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 100–105, 2015.
- [47] G. Gonzalez-Badillo, H. I. Medellin-Castillo, and T. Lim, "Development of a haptic virtual reality system for assembly planning and evaluation," *Procedia Technology*, vol. 7, pp. 265–272, 2013.
- [48] M. Bordegoni, U. Cugini, P. Belluco, and M. Aliverti, "Evaluation of a haptic-based interaction system for virtual manual assembly," *Virtual and Mixed Reality*, pp. 303–312, 2009.
- [49] P. Xia, A. M. Lopes, M. T. Restivo, and Y. Yao, "A new type haptics-based virtual environment system for assembly training of complex products," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1-4, pp. 379–396, 2012.
- [50] D. Chamaret, S. Ullah, P. Richard, and M. Naud, "Integration and evaluation of haptic feedbacks: from cad models to virtual prototyping," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 4, no. 2, pp. 87–94, 2010.
- [51] Real Academia de la Lengua Española, "<http://dle.rae.es/?id=VkJT0WOU>," 5 de Mayo de 2017.
- [52] G. Burdea, "Keynote address: Virtual rehabilitation-benefits and challenges," in *1st International Workshop on Virtual Reality Rehabilitation (Mental Health, Neurological, Physical, Vocational) VRMHR*, vol. 2002, sn, 2002.
- [53] M. K. Holden, "Virtual environments for motor rehabilitation," *Cyberpsychology & behavior*, vol. 8, no. 3, pp. 187–211, 2005.
- [54] Z. M. Osman, J. Dupire, S. Mader, P. Cubaud, and S. Natkin, "Monitoring player attention: A non-invasive measurement method applied to serious games," *Entertainment Computing*, vol. 14, pp. 33–43, 2016.
- [55] S. Deng, J. A. Kirkby, J. Chang, and J. J. Zhang, "Multimodality with eye tracking and haptics: a new horizon for serious games?," *International Journal of Serious Games*, vol. 1, no. 4, pp. 17–34, 2014.
- [56] C.-Y. Lin, C.-M. Tsai, P.-C. Shih, and H.-C. Wu, "Development of a novel haptic glove for improving finger dexterity in poststroke rehabilitation," *Technology and Health Care*, vol. 24, no. s1, pp. S97–S103, 2016.
- [57] S. V. Adamovich, G. G. Fluet, A. Mathai, Q. Qiu, J. Lewis, and A. S. Merians, "Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 6, no. 1, p. 28, 2009.
- [58] Y. Z. Ordoñez, C. A. Luna, and C. F. Rengifo, "Herramienta de entrenamiento virtual en 2-d para rehabilitación de motricidad fina en miembro superior con incorporación de un dispositivo háptico (software para rehabilitación fina en miembro superior)," *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 7, no. 14, pp. 60–68, 2013.
- [59] P. Polygerinos, Z. Wang, K. C. Galloway, R. J. Wood, and C. J. Walsh, "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, pp. 135–143, 2015.
- [60] M. A. Eid and H. Al Osman, "Affective haptics: Current research and future directions," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 26–40, 2016.
- [61] M. Obrist, S. Subramanian, E. Gatti, B. Long, and T. Carter, "Emotions mediated through mid-air haptics," in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2053–2062, ACM, 2015.
- [62] E. Gatti, G. Caruso, M. Bordegoni, and C. Spence, "Can the feel of the haptic interaction modify a user's emotional state?," in *World Haptics Conference (WHC), 2013*, pp. 247–252, IEEE, 2013.
- [63] S. ur Réhman, L. Liu, and H. Li, "Vibrotactile rendering of human emotions on the manifold of facial expressions.," *Journal of Multimedia*, vol. 3, no. 3, pp. 18–25, 2008.
- [64] H. Samani, J. Teh, E. Saadatian, and R. Nakatsu, "Xoxo: Haptic interface for mediated intimacy," in *Next-Generation Electronics (ISNE), 2013 IEEE International Symposium on*, pp. 256–259, IEEE, 2013.
- [65] Y. Gaffary, J.-C. Martin, and M. Ammi, "Haptic expressions of stress during an interactive game," in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 266–274, Springer, 2014.