

Guante Háptico de Realimentación Variable para Videojuegos y Aplicaciones de Realidad Virtual

Haptic Glove with Variable Feedback for Video Games and Virtual Reality Applications

Juan Sebastián Martínez¹ and Pablo Figueroa¹

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
{js.martinez777, pfiguero}@uniandes.edu.co

Abstract. Haptic gloves allow virtual reality environments and video games to increase their immersion levels by providing vibrational feedback while the user manipulates virtual objects. The present work describes the design of a haptic glove capable of providing vibratory stimuli with variable feedback based on the proposal of using the physical interaction between virtual objects and the user's hand as the source of vibration intensity. The design is coupled with the development of application in the *Unity* game engine. The usability of the prototype and its capability of producing differentiable levels of vibration was evaluated with real users. The levels of vibration were defined as levels of 25%, 50%, 75% and 100% of the maximum vibration intensity, for which the usability tests showed that 76.92% of the users identified differentiable levels of vibration. During the intensity tests, users were able to identify exact levels of vibration intensity with 56.19% of effectiveness and were able to identify levels within a range of 1 level of error with an effectiveness greater than 90%. The final prototype proved to be effective, light, low-cost and comfortable to the user.

Resumen. Los guantes hápticos permiten aumentar la inmersión en ambientes de realidad virtual y videojuegos mediante la realimentación de sensaciones vibratorias al manipular objetos virtuales. El presente trabajo describe el diseño de un guante háptico capaz de proveer estímulos vibratorios variables basados en la propuesta de utilizar la interacción física entre objetos virtuales y la mano del usuario para controlar la respuesta vibratoria. El diseño está acoplado al desarrollo de aplicaciones en el motor de videojuegos *Unity*. La usabilidad del prototipo y su capacidad de producir niveles diferenciables de vibración fue evaluada con usuarios reales. Los niveles de intensidad de vibración se definieron como niveles de 25%, 50%, 75% y 100% de la intensidad de vibración máxima, para los cuales las pruebas de usabilidad demostraron que el 76.92% de los usuarios percibieron niveles diferentes de vibración. En las pruebas de intensidad, los usuarios diferenciaron niveles de vibración exactos con una efectividad del 56.19% y diferenciaron niveles con un margen de error de 1 nivel de intensidad con una efectividad de más del 90%. El

prototipo final demostró ser efectivo, liviano, de bajo costo y agradable al usuario.

Keywords: Guante, Háptico, Unity, Variable, Vibratorio.

1 Introducción

El uso de guantes hápticos se ha popularizado en aplicaciones de realidad virtual y videojuegos gracias a sus capacidades para aumentar el grado de realismo en ambientes virtuales. Junto con exitosas técnicas de *hand tracking*, los guantes permiten una mayor inmersión por medio de la realimentación vibratoria de actuadores ubicados en diferentes puntos de la mano. La adición de sensaciones hápticas o pseudo-hápticas permite agregar un mayor nivel de inmersión en la experiencia virtual. Gracias a esto, es posible crear aplicaciones más eficaces para rehabilitación, entrenamiento quirúrgico, aprendizaje, y otras.

Actualmente, los desarrollos encontrados en la literatura muestran la implementación de soluciones capaces de variar la intensidad de vibración en los actuadores de los guantes hápticos. Los trabajos de [4] presentan el diseño de un guante con actuadores basados en cables de material con memoria SMA y un sistema propio de *hand tracking* para su uso en aplicaciones de realidad aumentada. También, en [7] y [8] se presentan guantes con actuadores vibratorios con niveles de potencia variable. Por otro lado, en [5] se explora el uso de actuadores piezoeléctricos y un esquema de control con realimentación. La forma de controlar la vibración en los actuadores también ha sido abordada mediante diferentes aproximaciones, por ejemplo, en [3] se documenta el desarrollo de interfaces hápticas basadas en la cinemática de la interacción entre la mano y objetos virtuales, lo cual permite traducir propiedades como el peso y la rugosidad de las superficies en las diferentes sensaciones que se inducen en la mano del usuario. Por otro lado, [6] presenta un guante cuyas fuerzas de vibración son controladas por un ambiente virtual mediante un proceso de renderizado háptico de tres fases, el cual incluye el cálculo de fuerzas y variables físicas en el mundo virtual.

Estos trabajos se han focalizado principalmente en el diseño de *hardware* de los guantes y actuadores hápticos, en los cuales el uso de motores vibratorios o vibrotáctiles ha presentado los mejores resultados. El uso de este tipo de guantes en videojuegos y aplicaciones de realidad virtual y aumentada se puede evidenciar en [2], donde se investiga el efecto de utilizar un guante háptico vibrotáctil en la sensación de presencia en un ambiente virtual utilizando un HMD (*Head Mounted Display*). También, el trabajo presentado en [1] propone una interfaz háptica pasiva para la mano del usuario con elementos pseudo-hápticos en ambientes inmersivos. En la industria, dispositivos comerciales como el guante *GloveOne* de la compañía *NeuroDigital Technologies* también han sido desarrollados con altas capacidades de acoplamiento en aplicaciones de videojuegos y

realidad virtual.

En el desarrollo de guantes hápticos, su uso en videojuegos y aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada requieren de una funcionalidad de *hand tracking*. Si bien algunos desarrollos como [4] incluyen estas capacidades, las interfaces de programación de soluciones comerciales como el dispositivo *Kinect* de *Microsoft* y el sensor *Leap Motion* permiten utilizar sus funciones de *hand tracking* con desarrollos externos, como el guante háptico desarrollado en [2].

Siguiendo estos antecedentes, se construyó un guante háptico con actuadores vibradores que explora, a través del diseño de *software*, la propuesta de utilizar la dinámica y la cinemática de la física de colisiones entre objetos virtuales para controlar la intensidad de vibración en los actuadores, esto como una propuesta inspirada en los resultados de [3] y [6] al utilizar la física virtual para controlar las respuestas hápticas. El dispositivo fue construido para su uso en aplicaciones de videojuegos y de realidad virtual construidas en el popular motor de videojuegos *Unity3D* junto con el sensor *LeapMotion* para desempeñar las funciones de *hand tracking*. El sistema fue evaluado mediante la metodología propuesta en [8] para determinar la capacidad de diferenciación entre los niveles de intensidad producidos.

2 Metodología de Pruebas

Para la evaluación del desempeño del prototipo se adoptó una variación de la metodología presentada en [8]. El diagrama en la Fig. 1 muestra la adaptación de esta metodología para la experimentación con el guante desarrollado.

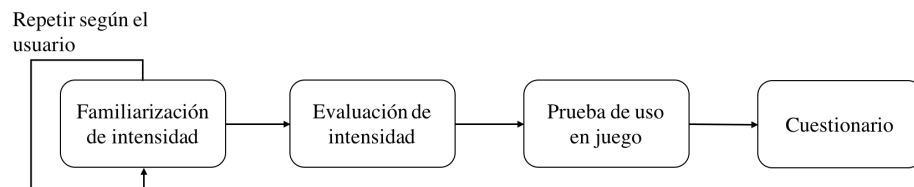


Fig. 1: Metodología de pruebas

A diferencia de [8], la metodología no incluye las pruebas de percepción relativa y absoluta de fuerzas que se realizan en dicho trabajo. Como explican sus autores, las pruebas de percepción absoluta de fuerzas no producen resultados relevantes en el experimento. Por otro lado, se consideró que las pruebas de percepción relativa no generan resultados significativos para el objetivo de la prueba, la cual es evaluar la capacidad del guante de generar niveles diferenciales de intensidad de vibración.

En la Fig. 1, durante la primera fase se familiariza al usuario con el dispositivo mediante la activación de los motores a diferentes intensidades, las cuales se definieron como 25%, 50%, 75% y 100% de la intensidad máxima de vibración. Estas intensidades se escogieron como valores equidistantes y fueron considerados suficientes para probar un nivel aceptable de diferenciabilidad por parte del guante. Por cada intensidad, los actuadores en el guante se encienden por 3 segundos y luego se desactivan por 3 segundos antes de continuar con el siguiente nivel de intensidad. La familiarización recorre los 4 niveles de intensidad en 3 ciclos. Una vez completados el usuario puede escoger la activación de más ciclos.

La etapa de evaluación de intensidad consiste en activar durante 3 segundos los motores a uno de los 4 niveles de intensidad de forma aleatoria. Una vez contados 3 segundos, se le pregunta al usuario qué nivel de intensidad percibió; la respuesta se registra y se le muestra al usuario la respuesta correcta. Como se realiza en [8], el proceso de activación y pregunta al usuario se hace un total de 30 veces.

Al finalizar la evaluación, el usuario hace uso del *hardware* completo en un juego que le permite manipular y sentir cilindros, esferas y cubos mientras los ubica en diferentes posiciones definidas por el juego. Finalmente, una encuesta de usabilidad se entrega al usuario para evaluar su experiencia en el juego.

3 Diseño de Hardware y Software

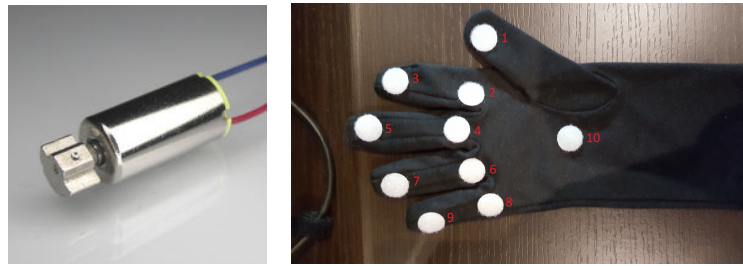
3.1 Hardware

El diseño de *hardware* comprende las funciones de *hand tracking* y las funciones hápticas de vibración en el guante. Dado que el punto central del diseño es el comportamiento háptico, el prototipo reutiliza las capacidades de reconocimiento de gestos del dispositivo *Leap Motion* para desempeñar las funciones de *hand tracking*.

Para el diseño del guante, se diseñó un sistema basado en el microcontrolador Atmega328p que controla la vibración de 10 motores vibradores con un rango de funcionamiento de 3.3V a 5V como el que se muestra en la Fig. 2a. Los puntos de ubicación de cada uno de los 10 motores se muestran en la Fig. 2b.

El sistema electrónico se diseñó con el fin de controlar la intensidad de vibración de los motores a partir de un porcentaje de corriente máxima que se puede suministrar a los mismos. Adicionalmente, el sistema puede activar y desactivar cada uno de los 10 motores de forma independiente. El diagrama de caja blanca que describe el *hardware* y su flujo de datos se muestra en la Fig. 3.

Inicialmente, el *software* envía una palabra de control de 18 caracteres por un puerto serial. Dicha palabra contiene la información del porcentaje de la corriente máxima que se ha de suministrar a los motores y 10 caracteres que



(a) Motor vibrador utilizado como actuador (b) Puntos de ubicación de los actuadores en la mano derecha

Fig. 2: Motores vibradores y sus puntos de ubicación en el guante háptico

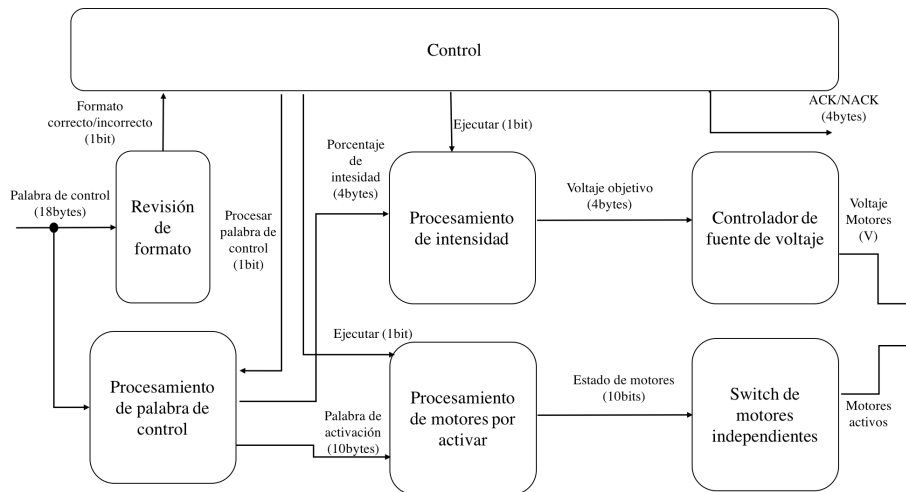


Fig. 3: Diagrama de caja blanca del sistema electrónico

indican qué motores han de ser activados, enumerados de acuerdo a como se ve en la Fig. 2b. Una posible palabra de control es:

“S0.540:UUDDDDDDDDE”

El mensaje indica que se ha de suministrar el 54% de la corriente máxima a los actuadores y los motores 1 y 2 deben ser activados, mientras que los demás motores deben estar apagados. Los caracteres “S” y “E” indican el inicio y terminación de la cadena de control. Al recibir el mensaje, el sistema verifica el correcto formato del mismo (bloque de “Revisión de formato”) para responder a la aplicación si la recepción fue satisfactoria o si hubo un error (mensaje ACK/NACK). A partir del mensaje, se obtiene el porcentaje de corriente máxima y los bits de control de los motores (bloque de “Procesamiento de palabra de control”). En una previa caracterización de la vibración de los mismos, se determinó que los 10 actuadores

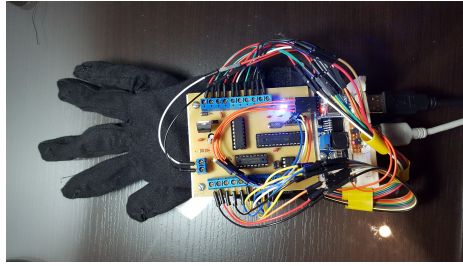


Fig. 4: Prototipo final del guante háptico

funcionarían en un rango entre 110mA y 200mA.

La alimentación de los motores está compuesta por un regulador de voltaje variable con una entrada de 9V y controlado por un potenciómetro digital. Tras recibir un valor de corriente desde el *software*, una regresión lineal entre la corriente de alimentación de los motores y el voltaje sobre el potenciómetro permite obtener el voltaje que corresponde a dicha corriente. El módulo de “Procesamiento de intensidad” realiza estos cálculos para que el “Controlador de la fuente de voltaje” ajuste el voltaje del potenciómetro hasta obtener el valor deseado, y por consiguiente la corriente deseada en los motores. Por otro lado, un módulo de “Procesamiento de motores por activar” controla un arreglo de compuertas que conectan y desconectan los motores de forma independiente de la fuente de poder mediante el módulo “Switch de motores independientes”.

La Tabla 1 muestra las características eléctricas y de conexión del guante construido¹. La Fig. 4 muestra el prototipo final.

Tabla 1: Características del dispositivo

Característica	Valor	Unidades
Conexión a PC	USB 2.0	
Tasa de comunicación serial	9600	baudio
Máximo tiempo de lectura de puerto serial	50	ms
Máximo tiempo de escritura en puerto serial	100	ms
Tipo de alimentación	Adaptador USB	
Voltaje de alimentación	5	V
Corriente de alimentación	550	mA

¹ La corriente de alimentación es una corriente mínima para el funcionamiento. Las pruebas de usuario se realizaron con un adaptador de hasta 2A de salida.

3.2 Software

Para la construcción de aplicaciones que utilizan el *hardware* se utilizó el popular motor de videojuegos *Unity 5.5*. Esta plataforma permite la integración con el sensor *Leap Motion* y la comunicación por puerto serial con el guante. Para calcular el nivel de intensidad de vibración en el guante, se evalúan propiedades cinemáticas y estáticas en las colisiones que existen entre los 10 puntos de los motores en el mundo virtual y los objetos a manipular. Se definió que la vibración está compuesta en un 50% por la energía cinética de los objetos y en un 50% por las fuerzas de fricción entre objetos y los 10 puntos de contacto. La componente de energía en la interacción por cada punto de contacto del guante y un objeto virtual se calcula como:

$$E_k = \frac{1}{2}m_p v_p^2 + \frac{1}{2}m_o v_o^2 , \quad (1)$$

Donde m_p y v_p son la masa y la velocidad del punto de contacto del motor; y m_o y v_o son la masa y la velocidad del objeto virtual manipulado. Por otra parte, la contribución dada por la fuerza de fricción entre el objeto manipulado y el punto de contacto esta dada por:

$$F_f = \mu |W_{proj}| , \quad (2)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción del objeto manipulado y W_{proj} es la proyección de su vector de peso sobre el vector normal que existe cuando se da la colisión entre el objeto y el punto de contacto. Una vez obtenidos estos valores de energía y fuerzas de fricción por cada motor que se encuentre en contacto con un objeto virtual, se realiza un promedio de fuerzas y energía:

$$\begin{aligned} \overline{E_k} &= \frac{\sum_{i=1}^n E_{k_i}}{n} , \\ \overline{F_f} &= \frac{\sum_{i=1}^n F_{f_i}}{n} , \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo n el número de motores en contacto con un objeto virtual. Estos promedios permiten definir un nivel global de intensidad de vibración para los motores, ya que el control independiente de los mismos solo comprende la activación y desactivación, más no niveles independientes de potencia por cada actuador.

Los promedios obtenidos son normalizados de acuerdo valores de energía y fuerza máximos parametrizables y establecidos en el inicio del juego. Para el prototipo se utilizó un valor de energía máxima de 0.75J y una fricción máxima de 58.8N; las cuales corresponden a sostener un objeto de 6Kg y trasladarlo a una velocidad máxima de 0.5 m/s. La normalización es calculada como:

$$\begin{aligned} \hat{E}_k &= \min(0.75, \overline{E_k})/0.75, \\ \hat{F}_f &= \min(58.8, \overline{F_f})/58.8 . \end{aligned} \quad (4)$$

Finalmente, la intensidad I de vibración es un promedio de estos valores normalizados:

$$I = \frac{1}{2}(\hat{E}_k + \hat{F}_f) . \quad (5)$$

Esta intensidad corresponde al porcentaje de corriente máxima que se ha de suministrar a los actuadores.

Para la implementación de todos los cálculos expuestos, se adicionaron cuerpos rígidos (componente *Rigidbody*) en *Unity* tanto en los puntos de la mano virtual que representan los actuadores como en los objetos manipulados. Luego, cada objeto que puede ser manipulado es marcado como un objeto háptico con una etiqueta “HapticObj” y se agrega un material físico con los coeficientes de fricción utilizados en los cálculos. En la aplicación, en cada cuadro que se ejecuta se verifica qué partes de la mano están en contacto con un objeto háptico mediante la función de *Raycasting* con una distancia de 0.05 unidades en *Unity* con la configuración de unidades dada por defecto². Por cada punto de la Fig. 2b en el mundo virtual se obtienen las componentes de energía y fuerza de fricción necesitadas si el objeto está en contacto con un objeto háptico (determinado por la función de *Raycasting*). Para determinar estos componentes, se implementó una clase *Calculator* que se encarga de realizar los cálculos físicos con las funciones *GetKineticEnergyOfCollision()* y *GetFrictionForceOfCollision()*:

Algorithm 1: GetKineticEnergyOfCollision

input : **RigidBody** *CRv*: Cuerpo rígido del punto virtual de la mano

input : **RigidBody** *CRh*: Cuerpo rígido del objeto háptico

output: **float** *Ke*: Energía cinética de la colisión

$$Ke \leftarrow \frac{1}{2}(CRh.mass * |CRh.velocity|^2 + CRv.mass * |CRv.velocity|^2)$$

Algorithm 2: GetFrictionForceOfCollision

input : **Vector3** *n*: punto normal de contacto de la colisión

input : **RigidBody** *CRh*: cuerpo rígido del objeto háptico

input : **PhysicMaterial** *pM*: material del objeto háptico con coeficientes de fricción

output: **float** *Fr*: Fuerza de fricción entre el objeto háptico y el punto virtual de la mano

$$\vec{w} \leftarrow CRh.mass * \langle 0, 9.8, 0 \rangle$$

$$\vec{pr}_j \leftarrow \text{proj}_n \vec{w}$$

$$Fr \leftarrow pM.dynamicFriction * |\vec{pr}_j|$$

Los valores obtenidos de energía y fricción son promediados de acuerdo a la cantidad de contactos hápticos determinados por la función de *Raycasting*. Estos son luego normalizados y ponderados según las ecuaciones 4 y 5. Finalmente se agrega la intensidad a la palabra de control enviada por el puerto serial. En la aplicación construida se diseñaron 3 escenas, una para la etapa de familiarización,

² 1 unidad corresponde a 1 metro y 0.05 unidades equivalen a 5 centímetros

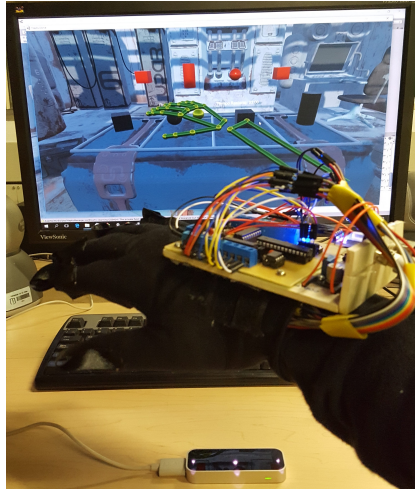


Fig. 5: Escena de juego

otra para la etapa de evaluación de intensidad, y el juego de manipulación de objetos. La Fig 5 muestra la escena de juego con el *hardware* completo.

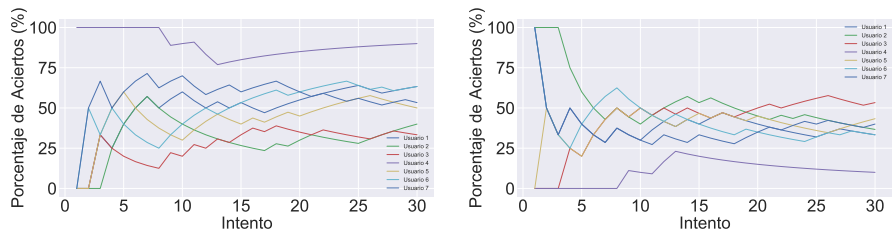
4 Resultados

4.1 Pruebas de Intensidad

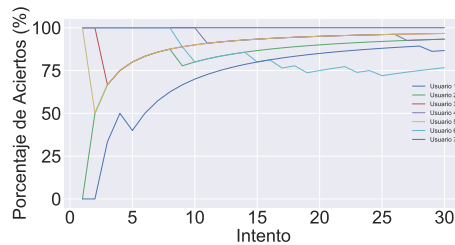
Se realizaron pruebas de intensidad con 7 usuarios entre los 22 y 24 años de edad. El grupo estaba compuesto por 3 mujeres y 4 hombres. Durante la fase de familiarización, luego de realizar el proceso descrito en la metodología de pruebas y en [8], ningún usuario solicitó más de 3 ciclos de activación de intensidades una vez completada la etapa. La Fig. 6 muestra el porcentaje de aciertos acumulado por cada usuario a lo largo de la prueba de 30 intentos para los aciertos exactos (Fig. 6a), los casos en los que el usuario se desvía por exactamente 1 nivel de intensidad (Fig. 6b) y los casos en los que el usuario acierta con a lo sumo 1 nivel de desviación (Fig. 6c); estos últimos resultan en una suma de los aciertos de las dos figuras anteriores.

En la prueba se vio que los porcentajes de acierto acumulados tienden a ser constantes luego de 20 intentos. Esto permite afirmar que con una prueba de 30 intentos se obtiene un resultado confiable por cada usuario. La Tabla 2 resume las estadísticas de la prueba.

En comparación con los resultados presentados en [8], el promedio de aciertos de los usuarios totales y sus aciertos dentro de un nivel de diferencia son mayores para el mismo número de usuarios en las pruebas. Sumando estas tasas de acierto, para el prototipo construido, los usuarios son capaces de diferenciar niveles de intensidad en un rango de desviación de 1 nivel con una efectividad



(a) Porcentaje acumulado de aciertos (b) Porcentaje acumulado de aciertos con exactamente 1 nivel de desviación



(c) Porcentaje acumulado de aciertos con a lo sumo 1 nivel de desviación

Fig. 6: Porcentajes de aciertos para cada usuario

del 91.9%. En cuanto al porcentaje promedio de aciertos de cada nivel de intensidad, se evidenció que los niveles de 25% y 100% son los más diferenciables, y el nivel de 50% tiene una tasa aceptable de identificación; sin embargo, en repetidas ocasiones los usuarios confundieron el nivel de 75% con el nivel de 100%. Adicionalmente, se vio que los aciertos son más altos en los hombres que en las mujeres, lo cual es un resultado que también se observa en los experimentos de [8].

4.2 Encuesta de Usabilidad

En la encuesta de usabilidad participaron un total de 13 personas, 2 de las cuales realizaron las pruebas de intensidad. La encuesta compuesta por 6 preguntas en una escala de Likert de 5 puntos indagó sobre la comodidad del dispositivo, la diferenciación de vibraciones en el juego de prueba, la velocidad de respuesta del guante, la coherencia entre las vibraciones y la interacción virtual entre los objetos y la mano del usuario, el nivel de inmersión que proporciona el dispositivo y la facilidad que proporciona el guante para manipular objetos virtuales.

Siendo 1 el nivel menos satisfactorio de la escala y 5 el nivel más asertivo, la Tabla 3 muestra los porcentajes de usuarios que respondieron valores entre 3 y 5 para cada tema evaluado por la encuesta, lo cual comprende el rango entre respuestas neutrales y respuestas completamente asertivas por cada pregunta.

Tabla 2: Porcentajes promedio de aciertos de la prueba de intensidad

Tipo de acierto	Porcentaje de aciertos	Porcentaje de aciertos con exactamente 1 nivel de desviación	Porcentaje de aciertos con a lo sumo 1 nivel de desviación
Mujeres	45.56%	41.11%	86.67%
Hombres	64.17%	31.67%	95.83%
Usuarios totales	56.19%	35.71%	91.9%
Nivel de 25% de intensidad	64.89%	-	-
Nivel de 50% de intensidad	54.5%	-	-
Nivel de 75% de intensidad	38.34%	-	-
Nivel de 100% de intensidad	58.16%	-	-

Adicionalmente, el 91.67% de los usuarios afirmaron que utilizarían el guante en videojuegos y aplicaciones de realidad virtual. En la encuesta, los usuarios estimaron un costo del dispositivo entre los \$27 USD y \$110 USD, el cual es el rango real del costo de fabricación del dispositivo y representa un costo relativamente bajo para sus capacidades.

Tabla 3: Resultados de la encuesta de usabilidad para puntajes entre 3 y 5

Ítem evaluado	Porcentaje de respuestas entre el puntaje 3 y 5
Comodidad del dispositivo	92.31%
Diferenciación de vibraciones	76.92%
Tiempo de respuesta del dispositivo	92.31%
Coherencia entre sensaciones e interacciones virtuales	53.85%
Nivel de inmersión	100%
Facilidad de manipulación de objetos virtuales	76.92%

De acuerdo a los resultados, el guante demostró cumplir con el objetivo de proveer estímulos variables basados en la física de interacción entre la mano y los objetos virtuales. Esto con tasas de aceptación superiores al 75% en los ítems evaluados, a excepción de la coherencia entre las sensaciones y las interacciones virtuales. Esto se evidenció visualmente en la realización de las pruebas en donde el dispositivo *Leap Motion* tuvo dificultades en reconocer la forma de la mano del usuario y sus gestos en el momento de utilizar el guante. Esto se debe principalmente a las dimensiones de la tarjeta de control ubicada en la región dorsal de la mano, las cuales resultaron ser mayores a las esperadas y, junto con las conexiones a los actuadores, generaban interferencia en los datos infrarrojos del

sensor *Leap Motion*, causando representaciones virtuales irreales de la mano en ciertas ocasiones.

A pesar de esto, los resultados reflejan la alta asertividad de los usuarios frente al dispositivo de acuerdo con la alta comodidad percibida por los mismos; así como la influencia que tiene el guante en mejorar la experiencia de realidad virtual, mejorando la manipulación de objetos virtuales y aumentando el nivel de inmersión en la experiencia. Además, la implementación de *hardware* demostró ser satisfactoria ya que los resultados demuestran que el guante tiene un tiempo de respuesta rápido y cumple efectivamente con el objetivo de producir niveles de intensidad diferenciables.

5 Conclusiones

Los resultados de evaluación de intensidad demostraron que la implementación de *hardware* del diseño de la Fig. 3 es capaz de producir estímulos diferenciables de vibración; esto con un porcentaje considerable de aciertos en los cuales un usuario distingue vibraciones con un margen de error de 1 nivel de intensidad.

Las pruebas realizadas en el juego de manipulación de objetos demostraron niveles satisfactorios en todos los ítems evaluados a excepción de la coherencia entre sensaciones e interacciones de objetos virtuales. Futuras implementaciones de *hardware* con componentes superficiales y diseños más pequeños pueden evitar estos problemas de coherencia encontrados en las encuestas. De acuerdo a las pruebas realizadas en el juego de manipulación de objetos, la capacidad de diferenciación de vibraciones producidas por los estímulos variables del guante indican que, el uso de propiedades estáticas y cinemáticas en la física de los objetos virtuales es una aproximación satisfactoria para la generación de sensaciones dinámicas en la mano del usuario.

Finalmente, el guante es una implementación de bajo costo, cómoda y agradable para el usuario. El diseño de *hardware* permite generar diferentes niveles de vibración con un alto grado de diferenciabilidad, los cuales son controlados efectivamente por la física de la interacción entre objetos virtuales y la mano del usuario.

Referencias

1. Achibet, M., Gouis, B.L., Marchal, M.: FlexiFingers: Multi-finger interaction in VR combining passive haptics and pseudo-haptics. *3D User Interfaces* (pp. 103–106 (2017), <http://ieeexplore.ieee.org/document/7893325/>
2. Ariza, O., Freiwald, J., Laage, N., Feist, M., Salloum, M., Bruder, G., Steinicke, F.: Inducing Body-Transfer Illusions in VR by Providing Brief Phases of Visual-Tactile Stimulation. In: *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction*. pp. 61–68. ACM Press, New York, New York, USA (2016), <http://doi.acm.org/10.1145/2983310.2985760>

3. Kwok, L.H., Sun, H., Bach, G.: Physics-based Virtual-hand Picking in Robotic Manipulation
4. Okumoto, S., Zhao, F., Sawada, H.: Tactoglove presenting tactile sensations for intuitive gestural interaction. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics. pp. 1680–1685. IEEE (may 2012), <http://ieeexplore.ieee.org/document/6237343/>
5. Olsson, P., Johansson, S., Nysjö, F., Carlbom, I.: Rendering stiffness with a prototype haptic glove actuated by an integrated piezoelectric motor. In: Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). vol. 7282 LNCS, pp. 361–372 (2012)
6. Popescu, V., Burdea, G.: Virtual reality simulation modeling for a haptic glove. *Computer Animation*, 1999. pp. 195 – 200 (1999), <http://ieeexplore.ieee.org/document/781212/>
7. Sziebig, G., Solvang, B., Kiss, C., Korondi, P.: Vibro-tactile feedback for VR systems. In: Proceedings - 2009 2nd Conference on Human System Interactions, HSI '09. pp. 406–410 (2009)
8. Winter, S., Bouzit, M.: Testing and Usability Evaluation of the MRAGES Force Feedback Glove. 2006 International Workshop on Virtual Rehabilitation pp. 82–87 (2006), <http://ieeexplore.ieee.org/document/1707532/>