

Jornadas de Automática

Realimentación vibrotáctil de texturas virtuales en Unity para teleoperación inmersiva

Yepez-Figueroa, J. J.^{*}, Oña, E. D., Balaguer, C., Jardón, A.

Robotics Lab, Dpto de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Spain.

To cite this article: Yépez-Figueroa, J.J., Oña, E.D., Balaguer, C., Jardón, A. 2026. Vibrotactile rendering of virtual textures in Unity for immersive teleoperation. *Jornadas de Automática*, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13850>

Resumen

Este trabajo presenta un modelo de renderizado vibrotáctil de texturas implementado en Unity para integrarse con un guante háptico portable basado en dedales vibratorios. A diferencia de una realimentación háptica binaria, limitada a indicar el contacto con objetos virtuales, la propuesta genera estímulos variables asociados a propiedades superficiales como rugosidad, suavidad o relieve. El modelo calcula la intensidad vibrotáctil a partir del contacto dedo–objeto, la velocidad tangencial de exploración, la variación de normales de la superficie y los cambios en mapas de altura del material virtual. La señal resultante se convierte en valores PWM independientes para cada dedo, lo que permite modular de forma individual la vibración de los actuadores del guante. Esta aproximación busca enriquecer la teleoperación inmersiva mediante información táctil adicional sobre los objetos manipulados, con el fin de mejorar la percepción de contacto, la discriminación de texturas y la naturalidad de la interacción remota en entornos virtuales.

Palabras clave: Guante háptico, realimentación vibrotáctil, simulación de texturas, realidad virtual, teleoperación robótica.

Vibrotactile rendering of virtual textures in Unity for immersive teleoperation

Abstract

This work presents a vibrotactile texture rendering model implemented in Unity for integration with a portable haptic glove based on vibrating thimbles. Unlike binary haptic feedback, which is limited to indicating contact with virtual objects, the proposed approach generates variable stimuli associated with surface properties such as roughness, smoothness, and relief. The model computes vibrotactile intensity from finger–object contact, tangential exploration velocity, surface normal variation, and changes in height maps associated with the virtual material. The resulting signal is converted into independent PWM values for each finger, allowing the vibration of the glove actuators to be modulated individually. This approach aims to enrich immersive teleoperation by providing additional tactile information about manipulated objects, with the goal of improving contact perception, texture discrimination, and the naturalness of remote interaction in virtual environments.

Keywords: Haptic glove, vibrotactile feedback, texture rendering, virtual reality, robotic teleoperation.

1. Introducción

La teleoperación robótica en entornos inmersivos permite que un usuario controle un robot remoto mediante interfaces virtuales. Esta tecnología facilita la visualización del entorno y el control de los movimientos del robot. Sin embargo, la falta de información táctil limita la percepción del contacto con los objetos manipulados. En tareas de agarre, exploración o posi-

cionamiento, el operador necesita saber no solo si ha tocado un objeto, sino también cómo es su superficie.

En este contexto, la realimentación háptica puede mejorar la manipulación remota. Los sistemas vibrotáctiles colocados en los dedos permiten transmitir información táctil de forma ligera y portable, sin limitar demasiado el movimiento natural de la mano. Sin embargo, una vibración activada

^{*}Autor para correspondencia: johnnyjavier.yepes@uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

únicamente por contacto ofrece una respuesta básica. Este tipo de señal indica que existe contacto, pero no permite diferenciar propiedades como rugosidad, suavidad o relieve. Para lograr una interacción más natural, el estímulo háptico debe representar también algunas características del objeto manipulado (Santís Chaves et al., 2022).

La percepción de textura depende en gran medida del movimiento. Cuando el dedo se desliza sobre una superficie, las irregularidades del material producen vibraciones en la piel que ayudan a distinguir si un objeto es liso, rugoso o presenta relieve (Rätz et al., 2024). Por ello, distintos estudios han relacionado la vibración con el movimiento del usuario para generar sensaciones táctiles diferenciadas (Friesen and Vardar, 2024). En esta línea, este trabajo propone un modelo vibrotáctil en Unity que transforma la interacción dedo-superficie en señales PWM diferenciadas según la textura explorada.

2. Interfaces vibrotáctiles para texturas en entornos inmersivos

Diversos trabajos han explorado el uso de interfaces vibrotáctiles para enriquecer la interacción con objetos virtuales. En estos sistemas, los actuadores se colocan en los dedos para generar estímulos localizados durante la manipulación. Esta estrategia permite asociar diferentes respuestas hápticas a materiales u objetos virtuales y puede mejorar la sensación de realismo, inmersión y precisión percibida en entornos inmersivos (Gayathri and Nam, 2024).

También se han propuesto guantes hápticos de bajo coste orientados a simular texturas y eventos dinámicos en realidad virtual. A diferencia de los sistemas que solo activan una vibración uniforme ante una colisión, estos enfoques buscan representar propiedades de la superficie mediante patrones vibrotáctiles diferenciados (Faisal et al., 2024). En esta línea, el trabajo de Nikolov et al. (2020) mostró que la vibración de controladores comerciales podía transmitir información útil sobre distintos niveles de rugosidad en mallas 3D.

Otra aproximación consiste en utilizar interfaces vibrotáctiles colocadas directamente sobre la yema del dedo. En estos casos, la rugosidad puede representarse mediante diferentes niveles de intensidad de vibración, generando estímulos que los usuarios pueden distinguir y relacionar con superficies virtuales (Santís Chaves et al., 2022). Esta evidencia respalda el uso de dedales o módulos vibrotáctiles como una solución ligera para reproducir sensaciones táctiles diferenciadas sin emplear mecanismos hápticos complejos o voluminosos (Prechayasomboon and Rombokas, 2021).

Finalmente, algunos trabajos han combinado vibración con otros mecanismos de estimulación cutánea para modificar de forma más controlada la rugosidad percibida. Estos estudios muestran que la realimentación táctil no debe depender únicamente de detectar el contacto, sino también de cómo el usuario explora la superficie. Por ello, los modelos de textura en entornos virtuales deben considerar variables dinámicas, como el movimiento del dedo sobre el objeto, y no solo eventos discretos de colisión (Cai et al., 2024).

En relación con estos trabajos, la contribución de este artículo consiste en adaptar el renderizado vibrotáctil de rugosidad en mallas 3D a un guante háptico portable basado en

dedales vibratorios (Yepez-Figueroa et al., 2025). A diferencia de los enfoques basados en controladores VR comerciales, el modelo propuesto genera valores PWM independientes para cada dedo a partir de variables calculadas en Unity, como el contacto, la velocidad tangencial, la variación de normales y el mapa de altura del material virtual. Esta adaptación permite utilizar el guante como una interfaz vibrotáctil ligera y configurable, orientada a la diferenciación de texturas en objetos virtuales y como paso previo para su futura integración en el sistema de teleoperación inmersiva con realimentación háptica desarrollado por Yepez-Figueroa (2025), con el objetivo de incorporar posteriormente información táctil sobre rugosidad, suavidad y relieve durante la manipulación remota.

3. Modelo de renderizado vibrotáctil de texturas

El sistema háptico considerado en este trabajo se basa en un prototipo tipo dedal desarrollado previamente y compatible con seguimiento de mano basado en visión (Yepez-Figueroa et al., 2025). Dicho dispositivo emplea cinco actuadores vibrotáctiles por mano, uno por cada dedo, y permite controlar la intensidad de vibración mediante señales PWM independientes. A diferencia de un guante comercial que cubre una mayor superficie de la mano, el diseño tipo dedal mantiene libre gran parte de la anatomía visible, reduciendo posibles interferencias con sistemas de reconocimiento de mano en realidad virtual. La arquitectura electrónica y mecánica del dispositivo, así como su comparación preliminar frente a un guante comercial, han sido descritas en trabajos previos (Oña et al., 2026).

La idea principal del modelo es generar una señal vibrotáctil variable en función de la interacción entre el dedo y la superficie virtual. No se busca únicamente activar la vibración cuando existe contacto, sino modificar su intensidad de acuerdo con el movimiento del dedo y las características de la textura explorada. Este planteamiento toma como referencia el trabajo de Nikolov et al. (2020), donde la rugosidad se estima a partir de la variación de normales de una malla 3D y se transforma en una respuesta vibrotáctil. En este trabajo, dicho principio se adapta a un guante háptico, de manera que el resultado final del modelo no es una orden genérica de vibración, sino un valor PWM independiente para cada dedo en el rango de 0 a 255.

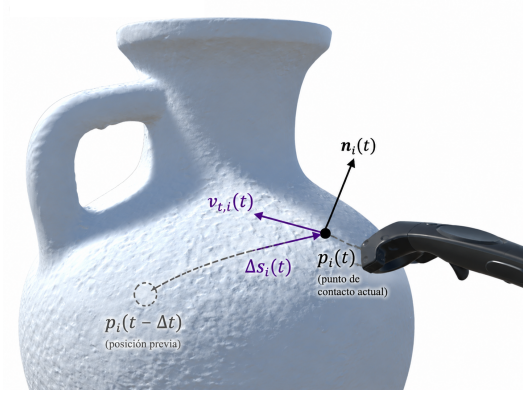
El modelo inicia con la detección del contacto entre el dedo virtual y el objeto en Unity. Luego se obtienen las variables de interacción, como el punto de contacto, la normal de la superficie, las coordenadas de textura y el estado de contacto. Con estos datos se calcula una intensidad vibrotáctil normalizada, que posteriormente se convierte en valores PWM independientes para los actuadores del guante háptico.

3.1. Captura de contacto y movimiento en Unity

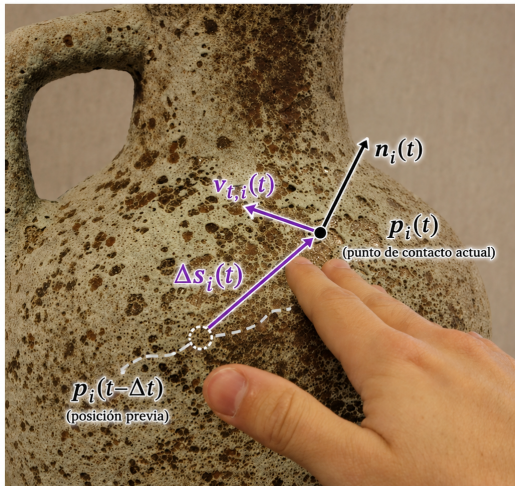
Para estimar la textura percibida, Unity debe conocer el estado de interacción entre cada dedo virtual y el objeto manipulado. Para cada dedo i , se obtiene el punto de contacto $p_i(t)$, la normal de la superficie $n_i(t)$, las coordenadas de textura $uv_i(t)$ y una variable binaria de contacto $C_i(t)$. Esta información puede obtenerse mediante *raycasting* desde la punta del dedo o mediante colisionadores asociados al modelo de la mano. La variable $C_i(t)$ se define como:

$$C_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{si el dedo } i \text{ está en contacto con el objeto,} \\ 0, & \text{si no existe contacto.} \end{cases} \quad (1)$$

La Figura 1(a) representa la interacción entre el efector virtual y la superficie del objeto en Unity. En este caso, el punto $p_i(t)$ corresponde al contacto actual del dedo con la malla, mientras que $p_i(t - \Delta t)$ representa la posición registrada en el instante anterior. A partir de ambos puntos se obtiene el desplazamiento $\Delta s_i(t)$, y la normal local $n_i(t)$ permite definir la orientación de la superficie en la zona de contacto. Esta información constituye la base para diferenciar el movimiento de presión del movimiento de deslizamiento.



(a) Interacción en entorno virtual.



(b) Interacción durante la exploración.

Figura 1: Variables utilizadas para la captura de contacto y movimiento tangencial del dedo sobre una superficie virtual: (a) Interacción en entorno virtual para la captura del punto de contacto, la normal local y el desplazamiento tangencial sobre la superficie; (b) exploración táctil de una superficie real como referencia conceptual del contacto dedo-objeto y del movimiento de deslizamiento. Fuente: Adaptado de Nikolov et al. (2020).

La Figura 1(b) muestra una situación análoga en un objeto físico, donde el dedo explora una superficie rugosa mediante contacto directo. Esta imagen permite relacionar el modelo virtual con la percepción táctil real: la textura no se percibe únicamente por tocar el objeto, sino por el desplazamiento del dedo sobre la superficie. Por ello, el modelo propuesto considera la posición previa, la posición actual y la dirección de

movimiento para generar una respuesta vibrotáctil coherente con la exploración táctil.

La Figura 2 resume la descomposición del movimiento del dedo respecto a la superficie. La componente normal está asociada al movimiento perpendicular, relacionado principalmente con la presión o aproximación al objeto. En cambio, la componente tangencial representa el desplazamiento paralelo a la superficie y resulta especialmente relevante para la percepción de textura. Por esta razón, el modelo utiliza la velocidad tangencial como una de las variables principales para modular la intensidad vibrotáctil.

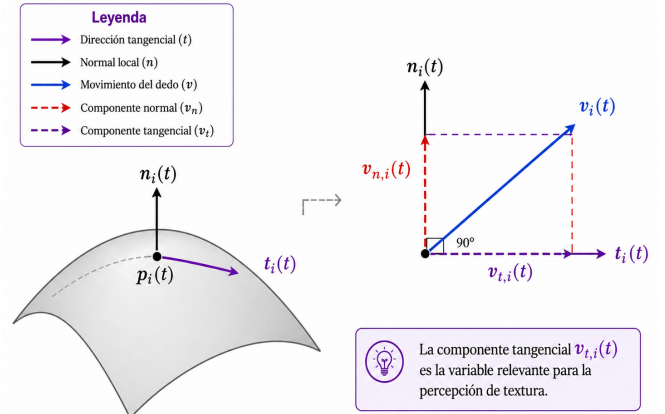


Figura 2: Descomposición del movimiento del dedo en componente normal y componente tangencial sobre la superficie.

El movimiento del dedo se estima comparando la posición actual del punto de contacto con la posición registrada en el instante anterior:

$$v_i(t) = \frac{p_i(t) - p_i(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

donde $v_i(t)$ representa la velocidad del dedo y Δt es el tiempo transcurrido entre dos actualizaciones consecutivas. Sin embargo, no todo el movimiento contribuye a la percepción de textura. Por ejemplo, presionar el dedo contra el objeto no produce la misma sensación que deslizarlo sobre su superficie. Por ello, se calcula la velocidad tangencial, correspondiente al movimiento paralelo a la superficie:

$$v_{t,i}(t) = v_i(t) - (v_i(t) \cdot n_i(t)) n_i(t) \quad (3)$$

A partir de esta velocidad tangencial se obtiene una magnitud normalizada entre 0 y 1:

$$S_i(t) = \text{clip}\left(\frac{\|v_{t,i}(t)\|}{v_{ref}}, 0, 1\right) \quad (4)$$

donde $S_i(t)$ representa la velocidad de exploración normalizada y v_{ref} es una velocidad de referencia definida experimentalmente. La función $\text{clip}(x, 0, 1)$ limita el valor de (x) al intervalo $[0,1]$, evitando que la magnitud normalizada tome valores fuera del rango definido. De esta forma, si el dedo está quieto, $S_i(t)$ tiende a cero; si se desplaza rápidamente sobre la superficie, $S_i(t)$ se aproxima a uno.

Tabla 1: Ejemplo de parámetros hápticos para diferentes materiales virtuales.

Material virtual	α_m	β_m	γ_m	δ_m	Interpretación
Liso	0.10	0.05	0.10	0.05	Contacto suave, vibración mínima
Tela	0.10	0.35	0.20	0.08	Variación ligera y continua
Madera	0.25	0.30	0.25	0.10	Rugosidad media con dirección perceptible
Goma	0.05	0.10	0.35	0.15	Sensación dependiente del arrastre
Lija	0.20	0.55	0.35	0.12	Rugosidad alta y clara

3.2. Cálculo de textura vibrotáctil

La textura virtual se estima a partir de dos fuentes de información: la geometría local de la superficie y el mapa de altura asociado al material. La primera fuente considera el cambio de normales entre puntos de contacto consecutivos. En una superficie lisa, las normales varían poco; en una superficie rugosa o con relieve, cambian de forma más evidente.

La variación geométrica se calcula mediante el ángulo entre las normales de dos instantes consecutivos:

$$\theta_i(t) = \arccos(\text{clip}(n_i(t) \cdot n_i(t - \Delta t), -1, 1)) \quad (5)$$

donde $n_i(t)$ y $n_i(t - \Delta t)$ son normales unitarias de la superficie. A partir de este ángulo, la rugosidad geométrica normalizada se define como:

$$R_{n,i}(t) = \text{clip}\left(\frac{\theta_i(t)}{\theta_{ref}}, 0, 1\right) \quad (6)$$

donde θ_{ref} es un ángulo de referencia definido experimentalmente. Cuando las normales son similares, $\theta_i(t)$ tiende a cero y $R_{n,i}(t)$ toma un valor bajo. En cambio, si las normales cambian bruscamente, $R_{n,i}(t)$ aumenta, indicando una mayor irregularidad geométrica.

La segunda fuente de rugosidad se obtiene a partir de un mapa de altura $h(u, v)$ asociado al material del objeto. Unity puede recuperar las coordenadas uv del punto de contacto mediante `RaycastHit.textureCoord`, siempre que el objeto cuente con un `MeshCollider` adecuado. La variación textural normalizada se calcula como:

$$R_{h,i}(t) = \text{clip}\left(\frac{|h(uv_i(t)) - h(uv_i(t - \Delta t))|}{h_{ref}}, 0, 1\right) \quad (7)$$

donde h_{ref} representa la variación máxima esperada del mapa de altura. Esta expresión mide cuánto cambia la textura bajo el dedo entre dos instantes consecutivos. Si el valor apenas cambia, la superficie se interpreta como más uniforme; si cambia de forma notable, se interpreta como una textura más rugosa o irregular.

A partir de estas variables se calcula una intensidad vibrotáctil normalizada $A_i(t)$ para cada dedo:

$$A_i(t) = C_i(t) \text{clip}(\delta_m + S_i(t) [\alpha_m R_{n,i}(t) + \beta_m R_{h,i}(t) + \gamma_m], 0, 1) \quad (8)$$

donde $A_i(t)$ es la intensidad de vibración normalizada del dedo (i), limitada al intervalo $[0, 1]$ mediante $\text{clip}(x, 0, 1)$. El término $C_i(t)$ actúa como interruptor de contacto: si no existe contacto, la salida es cero. Los parámetros α_m , β_m , γ_m y δ_m dependen del material virtual. El parámetro α_m pondera la influencia de la geometría, β_m pondera el efecto del mapa de altura, γ_m introduce una componente asociada al deslizamiento

y δ_m representa una vibración base del material cuando existe contacto.

De esta forma, el modelo genera una intensidad mayor cuando el dedo está en contacto, se desplaza sobre la superficie y detecta variaciones geométricas o texturales. Por el contrario, si no hay contacto o si la superficie es uniforme, la intensidad generada tiende a valores bajos.

La Tabla 1 muestra un ejemplo de perfiles hápticos para distintos materiales virtuales. Cada perfil modifica el peso de la rugosidad geométrica, la rugosidad asociada al mapa de altura, el efecto del deslizamiento y la vibración base del material.

Estos valores se proponen como parámetros iniciales de ajuste. Su función es permitir que el sistema genere sensaciones distinguibles entre materiales. Posteriormente, deben calibrarse mediante pruebas con usuarios, considerando tanto la percepción táctil obtenida como la respuesta real de los actuadores. Este ajuste permitiría mejorar la discriminación entre superficies y evitar vibraciones demasiado intensas o molestas.

3.3. Conversión de la intensidad a valores PWM

Una vez calculada la intensidad normalizada $A_i(t)$, Unity la transforma en un valor PWM compatible con el sistema de control del guante. Antes de realizar la conversión, puede aplicarse un suavizado temporal para evitar cambios bruscos en la vibración:

$$\hat{A}_i(t) = \lambda A_i(t) + (1 - \lambda) \hat{A}_i(t - \Delta t) \quad (9)$$

donde $\hat{A}_i(t)$ es la intensidad suavizada y λ es un coeficiente de suavizado definido entre 0 y 1. Valores altos de λ hacen que la respuesta sea más rápida, mientras que valores bajos generan una transición más progresiva.

El valor PWM final se calcula escalando la intensidad suavizada al rango de 0 a 255:

$$PWM_i(t) = \begin{cases} 0, & C_i(t) = 0, \\ \text{round}(255 \cdot \hat{A}_i(t)), & C_i(t) = 1. \end{cases} \quad (10)$$

donde $PWM_i(t)$ es el valor enviado al actuador del dedo i . Por tanto, la salida final del modelo es un número entero dentro del intervalo:

Un valor de $PWM_i(t) = 0$ indica ausencia de vibración, mientras que $PWM_i(t) = 255$ corresponde a la máxima intensidad permitida por el actuador. En la implementación, este valor puede limitarse adicionalmente si se desea evitar niveles de vibración demasiado intensos o si el actuador presenta una zona de funcionamiento no lineal.

$$PWM_i(t) \in [0, 255] \quad (11)$$

Como se observa en la Figura 3, la arquitectura se organiza en tres etapas principales. En primer lugar, el modelo implementado en Unity calcula la intensidad vibrotáctil normalizada para cada dedo y la convierte en un valor PWM entre 0 y 255. En segundo lugar, estos valores se empaquetan en una trama de comunicación serial y se envían al módulo RF conectado al ordenador. Finalmente, el guante háptico recibe la información de forma inalámbrica y aplica a cada actuador vibrotáctil el valor PWM correspondiente. De esta manera, cada dedo puede recibir una intensidad de vibración diferente según la textura simulada y el movimiento realizado por el usuario.

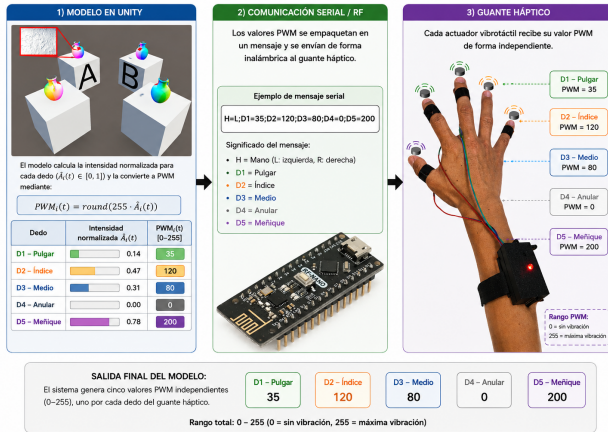


Figura 3: Arquitectura del sistema Unity con el guante háptico mediante RF.

Una posible trama de comunicación serial sería:

H=L;D1=35;D2=120;D3=80;D4=0;D5=0

En este ejemplo, H=L indica que el mensaje corresponde a la mano izquierda, mientras que D1 a D5 representan los valores PWM enviados al pulgar, índice, medio, anular y meñique, respectivamente.

De esta manera, el sistema no depende de plugins genéricos de vibración orientados a teléfonos o controladores comerciales, sino de una salida propia basada en valores PWM. Esto permite controlar de forma independiente la intensidad de cada actuador y adaptar la realimentación vibrotáctil a las propiedades de la textura virtual y al movimiento del usuario.

En conjunto, el modelo propuesto permite pasar de una realimentación binaria de contacto a una respuesta vibrotáctil variable. El resultado final del procesamiento en Unity es un conjunto de valores PWM entre 0 y 255, enviados de forma independiente a cada dedo del guante háptico. Así, el usuario no solo percibe que ha tocado un objeto virtual, sino que recibe una señal diferenciada según la textura simulada.

4. Resultados y discusión

Con el fin de comprobar el funcionamiento preliminar del sistema, se realizó un ensayo funcional de identificación de rugosidad. La Figura 4 muestra el escenario empleado durante la prueba. El ensayo fue realizado por un único participante en varios intentos. En cada intento se exploraron cuatro objetos virtuales asociados a distintos perfiles hápticos: liso, tela, madera y lija. Estos objetos se utilizaron para verificar si el

modelo implementado en Unity generaba valores PWM diferenciados y si dichos valores podían asociarse a distintos niveles de rugosidad.



Figura 4: Ensayo de la realimentación vibrotáctil con el guante háptico.

Durante el ensayo se registró el valor PWM medio generado por el modelo, el número de identificaciones correctas sobre un total de 20 intentos y el número de interacciones realizadas con cada objeto antes de tomar una decisión. En este caso, las interacciones corresponden al número de exploraciones o contactos realizados con cada material durante cada intento, expresadas como media y desviación estándar. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos.

Tabla 2: Resultados preliminares de la realimentación vibrotáctil mediante el guante háptico.

Objeto	Material virtual	PWM medio	Aciertos	Interacciones
A	Liso	30 ± 8	20/20	1,4 ± 0,5
B	Tela	85 ± 15	17/20	2,3 ± 0,8
C	Madera	140 ± 20	18/20	2,5 ± 0,9
D	Lija	210 ± 18	20/20	1,6 ± 0,6

Los resultados muestran una relación creciente entre el nivel de rugosidad esperado y el valor PWM generado por el modelo. El material liso produjo la menor intensidad de vibración, mientras que la lija generó los valores más altos. Esto indica que la salida del modelo es coherente con los perfiles hápticos definidos y que la conversión de intensidad vibrotáctil a PWM permite generar respuestas diferenciadas para cada material.

Las superficies extremas, correspondientes a los materiales liso y lija, fueron identificadas correctamente en todos los intentos. En cambio, los materiales intermedios, tela y madera, presentaron algunos errores y requirieron un mayor número de interacciones. Este comportamiento también se refleja en la Figura 5, donde los colores indican el porcentaje de aciertos obtenido en cada material.

Estos resultados deben interpretarse como una validación funcional preliminar del sistema. El ensayo permite comprobar que la comunicación entre Unity y el guante háptico funciona correctamente y que los valores PWM generados pueden asociarse a distintos niveles de rugosidad.

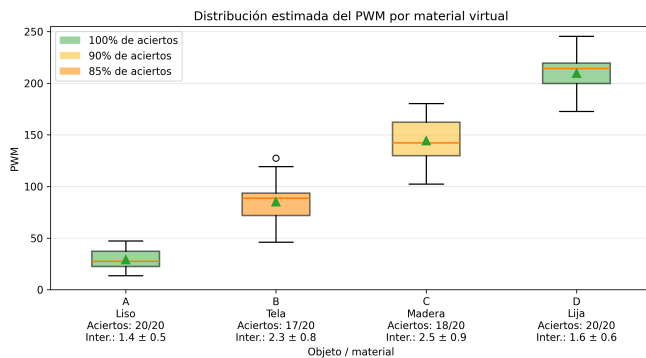


Figura 5: Representación gráfica de los resultados del ensayo funcional de realimentación vibrotáctil con el guante háptico.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Este trabajo presentó un modelo de renderizado vibrotáctil de texturas implementado en Unity para su integración con un guante háptico basado en dedos vibratorios. A diferencia de una realimentación simple por contacto, el modelo genera una señal vibrotáctil variable a partir del contacto dedo-objeto, la velocidad tangencial de exploración, la variación geométrica de la superficie y los cambios en mapas de altura asociados al material virtual.

La principal aportación consiste en transformar las propiedades superficiales de un objeto virtual en valores PWM independientes para cada dedo. De este modo, el guante no solo informa de la existencia de contacto, sino que también puede generar una respuesta diferenciada según la textura explorada.

La propuesta toma como referencia el trabajo de Nikolov et al. (2020), basado en la diferenciación vibrotáctil de rugosidad en mallas 3D, y adapta este principio a una arquitectura portable basada en un guante háptico de Yepez-Figueroa et al. (2025).

Los resultados preliminares, obtenidos mediante ensayos funcionales con objetos virtuales de diferente rugosidad, muestran que el sistema genera valores PWM coherentes con los perfiles hápticos definidos. Las superficies lisa y rugosa fueron identificadas con mayor facilidad, mientras que los materiales intermedios presentaron una mayor confusión. Esto sugiere que el modelo permite diferenciar niveles de rugosidad, aunque los perfiles hápticos requieren una calibración más precisa para mejorar la separación perceptual entre materiales similares.

Como limitación principal, el ensayo fue realizado por un único operador, por lo que no constituye todavía una validación perceptual con múltiples usuarios. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una prueba funcional preliminar del modelo y de la comunicación entre Unity y el guante háptico.

Como trabajo futuro, se plantea realizar un estudio con varios participantes para evaluar la capacidad de diferenciación de texturas, ajustar los perfiles hápticos y analizar la percepción subjetiva de la realimentación vibrotáctil. Posteriormente, se prevé integrar este modelo en el sistema de teleoperación inmersiva con realimentación háptica desarrollado previamente por Yepez-Figueroa (2025), con el objetivo de realizar prue-

bas de usabilidad y validar su funcionamiento en tareas de teleoperación robótica.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a este resultado ha recibido financiación de los proyectos “iRoboCity2030-CM, Robótica inteligente para ciudades sostenibles (TEC-2024/TEC-62)” y “FotoArt5.0-CM, Laboratorios inteligentes para la ciencia del futuro”, (TEC-2024/TEC-308) financiados por los “Programas de Actividades I+D en Tecnologías de la Comunidad de Madrid”; y del proyecto “iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation”, (DTS22/00105), financiado por el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) y cofinanciado con fondos FEDER de la UE.

Referencias

- Cai, S., Chen, Z., Gao, H., Huang, Y., Zhang, Q., Yu, X., Zhu, K., 2024. Vibopneumo: A vibratory-pneumatic finger-worn haptic device for altering perceived texture roughness in mixed reality. URL: <https://arxiv.org/abs/2403.05182>
- Faisal, M., Zhu, H., Laamarti, F., El Saddik, A., Dec. 2024. A Haptic Glove for Immersive VR Texture and Dynamic Event Simulation. In: 2024 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Reality (ICIR). IEEE, p. 43. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIR64558.2024.10976841>
- Friesen, R. F., Vardar, Y., 2024. Perceived realism of virtual textures rendered by a vibrotactile wearable ring display. IEEE Transactions on Haptics 17 (2), 216–226. DOI: <https://doi.org/10.1109/TOH.2023.3304899>
- Gayathri, R., Nam, S., 2024. Enhancing user experience in virtual museums: Impact of finger vibrotactile feedback. Applied Sciences 14 (15). DOI: <https://doi.org/10.3390/app14156593>
- Nikolov, I., Høngaard, J. S., Kraus, M., Madsen, C. B., 2020. Preliminary study on the use of off-the-shelf vr controllers for vibrotactile differentiation of levels of roughness on meshes. In: Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2020) - GRAPP. INSTICC, SciTePress, pp. 334–340. DOI: <https://doi.org/10.5220/0009101303340340>
- Oña, E. D., Yepez-Figueroa, J. J., Alonso-Camara, H., Jardón, A., Jul. 2026. Towards an affordable vibrotactile system for haptic feedback in serious games with vision-based hand tracking. In: 2026 IEEE 14th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH). IEEE, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil, conference held at Fluminense Federal University, July 29–31, 2026. URL: <https://easychair.org/cfp/seгах2026>
- Preechayasomboon, P., Rombokas, E., 2021. Haplets: Finger-worn wireless and low-encumbrance vibrotactile haptic feedback for virtual and augmented reality. Frontiers in Virtual Reality Volume 2 - 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.738613>
- Rätz, R., Conti, F., Thaler, I., Müri, R. M., Marchal-Crespo, L., 2024. Enhancing stroke rehabilitation with whole-hand haptic rendering: development and clinical usability evaluation of a novel upper-limb rehabilitation device. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 21 (1), 172. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01439-1>
- Santís Chaves, M., Franco Mesa, J. C., Zapata Berruecos, J. F., Hernández Calle, J. A., Salinas, S. A., Pérez Ariza, V. Z., feb 2022. Emulating textures using vibrotactile technology: HaptTech system and its adaptation to a commercial kinesthetic interface. Ingeniería e Investigación 42 (3), e87296. DOI: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.87296>
- Yepez-Figueroa, J. J., 2025. Desarrollo de sistema de teleoperación en entorno inmersivo vr con realimentación háptica para programación de robot abb crb 15000. Trabajo fin de máster, Universidad Carlos III de Madrid. URL: <https://hdl.handle.net/10016/50075>
- Yepez-Figueroa, J. J., Oña, E. D., Cámara, H. A., González, S. T., Balaguer, C., Jardón, A., September 2025. Sistema de realimentación háptica por vibración para mejorar evaluación de destreza manual con box and block test virtual. In: XLVI Jornadas de Automática. Cartagena, España. DOI: <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12192>