INTERACCION
Revista Digital de AIPO
Asociación Interacción Persona-Ordenador
Vol. 2, No 2 (2021)
ISSN 2695-6578

Análisis de una experiencia multimodal de realidad mixta para la programación de un cobot a través de su gemelo digital

A multimodal mixed reality experience analysis for cobot programming through its digital twin

Andoni Rivera Pinto
Sistemas Autónomos e Inteligentes
BRTA Tekniker & Universidad del País Vasco
Eibar, Gipuzkoa, España
riverapinto.andoni@gmail.com

Johan Kildal Oquiñena
Sistemas Autónomos e Inteligentes
BRTA Tekniker
Eibar, Gipuzkoa, España
johan.kildal@tekniker.es

Elena Lazkano Ortega
Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad del País Vasco
San Sebastián, Gipuzkoa, España
e.lazkano@ehu.es

Recibido: 27.10.2021 | Aceptado: 15.12.2021
DOI: https://doi.org/10.65234/interaccion.40

Palabras Clave

Interacción Persona-Robot
Cobot
Realidad Aumentada
Háptica en el aire
Holograma
Multimodal

Resumen

La programación de un robot mediante el guiado manual requiere que dicho robot se encuentre disponible. Como consecuencia, la productividad de ese robot se reduce debido al tiempo que se encuentra parado mientras se está reprogramando. La posibilidad de reprogramar estos robots para nuevas tareas mediante la interacción con sus gemelos digitales permite paralelizar esta tarea sin interferir en su rendimiento y permite que un operario sin conocimientos técnicos pueda reprogramarlo. En este artículo se propone un sistema que permite realizar la tarea de guiado manual a través de una interfaz visual de realidad mixta. Debido a que los hologramas carecen de tangibilidad, se utiliza un dispositivo basado en ultrasonidos que ofrece una experiencia táctil. También se presentan los resultados de un estudio realizado, donde analizamos la factibilidad y la experiencia de usuario.

Keywords

Human-Robot Interaction
Cobot
Augmented Reality
Mid-air haptics
Hologram
Multimodal

Abstract

The robot programming through the hand guidance technique requires the robot to be available. Therefore, the productivity of that robot is reduced due to the time it is stopped while it is being reprogrammed.The possibility of programming these robots through their digital twins for the new tasks, allows to parallelize this task without interfering in its performance and allows a naïve worker to reprogram it. In this article we describe the development of a system that allows to perform the hand guiding task through a visual mixed reality interface. Due to the holograms lack of tangibility, we use an ultrasound-based device which offers a tactile experience. We also present the results of a study where we analyze the feasibility of this task and the user experience.

1. Introducción

Industria 4.0 es un término utilizado para referirse a la cuarta revolución industrial, según la cual las fábricas del futuro comprenderán maquinaria, instalaciones de almacenamiento y producción en forma de sistemas ciber-físicos.

Los robots colaborativos, también conocidos como 'cobots', son un tipo de conjunto tecnológico que interactúa y coopera con trabajadores en una misma zona de trabajo compartida.
Con el fin de poder denominar a un robot como colaborativo, es necesario que cumpla ciertos requerimientos de seguridad. Algunos de los requisitos necesarios para lograr la aceptación del operario para trabajar con este tipo de robots son: la confianza de este sobre el robot, la mejora o igualdad en cuanto a eficiencia de trabajo, que los usuarios sean capaces de percibir una sensación de control sobre el robot y, por último, los movimientos del robot deben de ser predecibles.

La facilidad de programar un 'cobot' por un trabajador novel es un requisito importante para una adopción más sencilla en las industrias. El guiado manual (la técnica de programación de un robot moviéndolo libremente con la mano a lo largo de la zona de trabajo) es una técnica muy útil al igual que utilizada para programar robots de una manera técnicamente sencilla y poco exigente. Mover un brazo robot con la mano es intuitivo para los trabajadores, que son capaces de transferir su experiencia laboral al robot sin necesidad de tener conocimientos técnicos de la cinemática del robot o de lenguajes de programación.
El hecho de programar un robot físico mediante el guiado manual supone sin embargo que dicho robot se encuentre disponible para que el trabajador tenga el acceso exclusivo mientras programa su nueva tarea. Este tiempo que emplea el usuario en la reprogramación tiene un impacto negativo en la productividad de la cadena de trabajo.

Con el fin de evitar el impacto de esta limitación, proponemos realizar el guiado manual en una representación holográfica del gemelo digital del 'cobot' que se quiere programar haciendo uso de los equipos disponibles en el mercado actual. Teniendo en cuenta que un holograma visual carece de la tangibilidad con la que cuenta el mover el robot real, se ha incorporado un sistema háptico con el fin de complementar la experiencia de usuario.
Es por ello por lo que proponemos reproducir ciertos aspectos tangibles durante la realización de la tarea. Para poder llevar a cabo este propósito sin necesidad de que el usuario lleve ningún dispositivo encima, exploramos las posibilidades ofrecidas por la háptica en el aire basada en ultrasonidos.

Tras un estudio piloto realizado previamente con 5 usuarios sin experiencia (Rivera-Pinto & Kildal, 2019), en este artículo se presenta un estudio más profundo del rendimiento del sistema, recogiendo un mayor conjunto de datos y empleando distintas métricas, validadas para estudios de usuario.

El sistema desarrollado hace uso de dispositivos Hololens de Microsoft para mostrar los hologramas, y Ultrahaptics Stratos para dar una respuesta táctil al usuario.

Nuestro objetivo ha sido el de conocer qué rol juega la sensación táctil ofrecida a través de ultrasonidos tanto en el rendimiento como en la experiencia de usuario durante la ejecución de tarea.

Con el fin de adaptar la tarea experimental a los usuarios que han participado en el estudio, decidimos simplificar la tarea a una tarea de 'pick-and-place' del extremo del brazo robótico.

Se han monitorizado más métricas cuantitativas, así como información subjetiva sobre la experiencia del usuario a través de un cuestionario ad-hoc y métricas validadas como son 'single ease question' (SEQ) y NASA-TLX.

Así pues, se han formulado las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Es posible programar un brazo robótico a través del guiado manual usando los dispositivos actuales de realidad mixta?
- ¿Qué impacto tiene Ultrahaptics Stratos en la aplicación durante el guiado manual?

En el resto del artículo se realiza una revisión del estado del arte del avance de la tecnología de realidad mixta, así como de las distintas sugerencias para realizar la programación de un gemelo digital. También se describirá la solución desarrollada, así como el estudio de usuario realizado posteriormente. Después se mostrarán los resultados obtenidos y conclusiones, y finalmente presentamos la línea de desarrollo actual tras realizar este trabajo.

2. Estado del arte

En la actualidad, la realidad aumentada se vincula casi de forma exclusiva al canal visual, con algunos ejemplos de aumentación auditiva también.
La propuesta de mezclar canales sensoriales fue propuesta por primera vez en 1962 con Sensorama (EE.UU Patente nº 3.050.870, 1962). Morton Heillig desarrolló un dispositivo multimodal que fusionaba una experiencia de realidad virtual visual estereoscópica con sonido en estéreo, percepción háptica (viento y movimientos del asiento) y efectos aromáticos. En 2002, la realidad virtual visual fue introducida en la medicina (Seymour, y otros, 2002) con el fin de entrenar y así mejorar la habilidad de los médicos en las operaciones. En los años posteriores y continuaron con distintos estudios en esta área (Gallagher, y otros, 2005) (Grantcharov, y otros, 2004) (Aggarwal, y otros, 2007) .

Los dispositivos de visualización parecidos a un casco han evolucionado tecnológicamente estos últimos años permitiendo representar escenas 3D más complejas en tiempo real con una calidad de imagen y tasa de refresco óptima. Ejemplos de esta evolución son Oculus Rift (Luckey, 2021), PlayStation VR, o HTC Vive, los cuales permiten simular una inmersión realista en un mundo virtual.
En cuanto a gafas de realidad aumentada, las Google Glasses presentadas en 2012 son una de las primeras referencias del mercado reciente que pretendían coexistir dentro de la sociedad actual.
La interacción persona-robot ha hecho un uso reiterado de la realidad aumentada. En (Makhataeva & Varol, 2020) se plasmó el camino a seguir en distintos campos relacionados con la interacción persona-robot. Del mismo modo, en (Zhou, y otros, 2020) se analizaron los métodos avanzados de la programación de robots y, entre ellos, las aproximaciones basadas en realidad aumentada.

La realidad aumentada y la realidad virtual encajan a la perfección en el mundo industrial como sistema de ayuda a los operarios. Un claro ejemplo se muestra en (Makris, y otros, 2016) donde desarrollaron un sistema para programar robots de montaje, o en (Burghardt, y otros, 2020) donde consiguieron programar robots industriales mediante realidad virtual.

A través de otras metodologías, algoritmos y herramientas como en (Andersson, y otros, 2016), es posible mejorar el entrenamiento, la programación y el mantenimiento y el proceso de monitorización.
Mediante marcadores conectados directamente con el robot real (Pettersen, y otros, 2003) o definiendo la trayectoria que el robot debe seguir (Ong, y otros, 2020), se puede también simplificar la dificultad de la tarea.

Con relación a la seguridad para la colaboración humano-robot en un contexto industrial, en (Hietanen, y otros, 2020) los autores presentaron un modelo basado en un sensor de profundidad que monitoriza la zona de trabajo y una interfaz de usuario de realidad aumentada para una colaboración más segura entre el operario y el robot.

En 2017 Ni et al. (Ni, y otros, 2017) desarrollaron un sistema de realidad aumentada multimodal (haciendo uso de PHANToM para la experiencia háptica y la pantalla de ordenador para visualizar el robot virtual) que permitía programar robots de soldadura.

Puljiz et al. (Puljiz, y otros, 2019) presentaron un trabajo para programar un robot colaborativo (KUKA KR-5) a través de Microsoft Hololens y el sistema operativo ROS.
Luebbers et al. (Luebbers, y otros, 2019) desarrollaron una novedosa interfaz de realidad aumentada para la visualización y control dirigido de la habilidad de aprendizaje por demostración.
En (Rosen, y otros, 2019) , los autores desarrollaron una aplicación que mostraba la intención de movimiento del robot permitiendo así a los usuarios ajustar la pose del extremo del robot a través de gestos con las manos.

En (Bambusek, y otros, 2019), los autores proponen una solución basada en un casco de realidad aumentada visual para interactuar con la escena virtual y sensores Kinect con los que se detecta los distintos objetos situados en la zona de trabajo del robot y los convierte en objetos interactivos en la escena virtual.

En el artículo de (Xue, y otros, 2020), los autores desarrollan una aplicación en la que el usuario puede desplazar una esfera en una escena 3D a través de Hololens y ROS se encarga de seguir la esfera. La comunicación entre Hololens y ROS la establecen a través del paquete ROS#.

Haciendo uso de los brazaletes MYO y WAM, en (Chan, y otros, 2020) mejoran la interacción con la escena virtual. Estos brazaletes comparados con los sistemas basados en cámaras solventan el problema de oclusión. Además, los brazaletes no sólo miden la orientación de la mano del usuario, sino que también la aceleración. Los usuarios pueden ejecutar trayectorias a través de gestos y visualizarlas además de utilizar la mirada y la voz para su creación.

Más sistemas que hacen uso de dispositivos de realidad mixta han sido presentados con el fin de programar brazos robot industriales sin necesidad de manipular directamente el robot real (Ostanin & Klimchik, 2019) (Rosen, y otros, 2020) (Rückert, y otros, 2018).

Una limitación de los trabajos previamente citados es la ausencia de tangibilidad en sus soluciones a excepción del que utilizaban PHANToM, aunque en este caso la experiencia de usuario se veía limitada al no utilizar un sistema de visión estereoscópico.

Con los actuales cascos de realidad mixta, la capacidad de representar el holograma de un robot y su zona de trabajo permite crear un mejor contexto para realizar la tarea de guiado manual (Brooks, 1988). Con tecnología de seguimiento de la mano, el usuario puede realizar la tarea de

'pick-and-place' de una manera similar a como lo haría con el robot real.

En los ejemplos de la literatura mencionados previamente, la manipulación se realiza en el aire sin sujetar ni percibir ningún tipo de sensación háptica. El uso de un dispositivo háptico haría potencialmente más intuitiva y natural la ejecución de la tarea (Ikits & Brederson, 2005).

Nuestro objetivo es el de combinar el uso del dispositivo háptico (Ultrahaptics Stratos) con un entorno virtual de realidad mixta (a través de Microsoft Hololens) con el fin de explorar las posibilidades de esta fusión sin no antes experimentada dentro del ámbito de la robótica, y analizar la posible mejora que ofrece.

3. Diseño del escenario para el estudio de usuario

El objetivo de este trabajo es responder las preguntas de investigación formuladas previamente con respecto a la programación de robots a través del guiado manual sobre su gemelo digital.

Para esta implementación hemos utilizado las gafas Microsoft Hololens que ofrecen al usuario una experiencia de realidad mixta audiovisual.

En relación con la percepción háptica, se utiliza el actuador de ultrasonidos Ultrahaptics Stratos Explore (Carter, y otros, 2013). La opción del uso del 'feedback' en el aire se ha tenido en cuenta con el fin de que el usuario pueda prescindir de tener que portar dispositivos adicionales (e.g. guantes hápticos). Por otra parte, se ha considerado más adecuado el uso de ultrasonidos frente a otras alternativas como es AIREAL (Sodhi, y otros, 2013) que emite vórtices de aire.

El dispositivo cuenta con Leap Motion que es el encargado de monitorizar la posición de la mano en relación con el dispositivo háptico dentro de su zona de actuación. Tiene un alcance de 70 cm sobre el panel de actuación.

Para representar los distintos objetos 3D sobre una escena, se ha utilizado el motor de videojuegos Unity. Dicho motor gráfico, compatible con ambos dispositivos, permite la manipulación y percepción táctil de un holograma a la vez que permite visualizar los cambios en la pose del manipulador robótico.

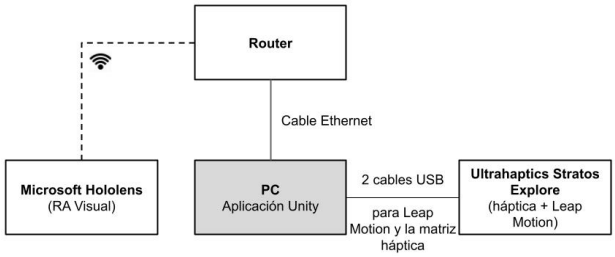


Figura 1: Esquema de configuración para la puesta en marcha de la aplicación con los dispositivos conectados.

La configuración para poder correr la aplicación se muestra en la Figura 1. El PC controla la visualización del entorno 3D mientras que recoge información relacionada con la ejecución del usuario. El dispositivo háptico se conecta a través de un puerto USB al PC, y Hololens a través de una conexión WiFi.

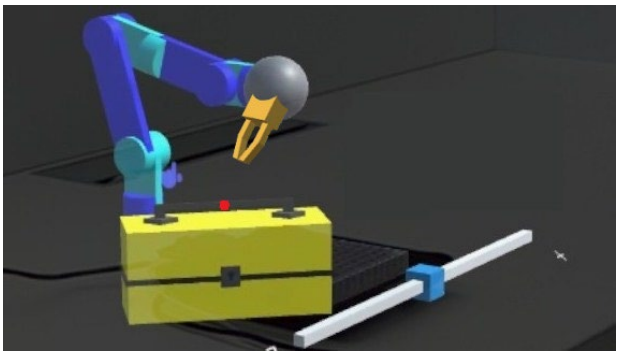


Figura 2: Vista general de la escena a través de las gafas de realidad mixta Microsoft Hololens.

La Figura 2 muestra un plano general de la escena interactiva. El dispositivo háptico se representa como un ortoedro en el centro de la escena (de color gris detrás de la caja de herramientas) que delimita de forma virtual la región en el espacio que ocupa el dispositivo real.

Detrás del ortoedro se encuentra el robot con 6 grados de libertad. Se muestra una esfera en el extremo del robot a modo de muñeca. Esta esfera puede ser agarrada por el usuario y así poder definir el punto al que el usuario pretende llegar con el robot ejecutando la tarea del 'pick-and-place'. Unido a dicha esfera se encuentra la herramienta que en este caso es una pinza.

La tarea que los usuarios han tenido que realizar en el estudio es la de aproximar el extremo de la pinza (punto final de la herramienta) al punto objetivo situado en el asa de la caja de herramientas amarilla. Dicho punto está marcado en color rojo. Pese a que en la figura se vea un control deslizante cuya funcionalidad es la de rotar el cabezal, en el estudio de usuario no se ha utilizado y se ha automatizado su rotación.

En el momento que el usuario aproxima la mano a la escena (concretamente a la zona de interacción con Ultrahaptics Stratos) se visualiza una mano holográfica que representa la mano real del usuario en el mundo virtual. Esta mano virtual muestra la pose captada por Leap Motion.

Cuando la mano virtual sujeta la esfera del extremo del robot, Ultrahaptics Stratos emite sobre la palma de la mano del usuario una sensación táctil en forma de esfera pretendiendo simular la sensación de contacto físico. Si el usuario suelta la esfera (ya sea de forma intencionada o involuntaria), la sensación desaparece. Se considera que el usuario está sujetando la esfera cuando cierra todos los dedos de la mano.

La interacción con la escena incluye también comandos de voz para parar o reanudar el movimiento del robot. Si el usuario activa el comando de parar el robot, no podrá manipular la pose del robot. Para ello tendrá que volver a ejecutar el comando para reanudar su movimiento.

La decisión de utilizar comandos de voz se tomó debido a la limitación del campo visual dentro de la percepción de los hologramas a través de Hololens. El uso de menús acapara mucho campo de visión y perjudica a la experiencia de usuario.
Por último, el usuario tiene la opción de utilizar un comando de voz adicional que muestra la lista de comandos disponibles junto a la base del holograma del brazo robot.

4. Estudio de usuario

Para llevar a cabo el estudio de usuario, se reunió a un grupo de 16 participantes sin experiencia. La mayoría de los participantes (12) se encontraban en el rango de edad de entre 18 y 30 años, dos participantes en el rango de 31 y 50 años y otros dos participantes en el rango de entre 51 y 65 años.

Previo al inicio del estudio, los participantes fueron notificados de que se iba a recoger información sobre su rendimiento en las pruebas, así como el de los cuestionarios con el fin de realizar este estudio. Toda esta información sería tratada de tal forma que tras realizar el estudio no se supiese qué datos corresponden a qué usuario protegiendo así su privacidad. Por otra parte, los usuarios podrían abandonar el estudio en cualquier caso o pedir que se eliminasen los datos recogidos de sus distintas ejecuciones.

Se repiten aquí las preguntas a las que se pretende dar respuesta, previamente mencionadas en la introducción.

- ¿Es posible programar un brazo robótico a través del guiado manual usando los dispositivos actuales de realidad mixta?
- ¿Qué impacto tiene Ultrahaptics Stratos en la aplicación durante el guiado manual?

Para poder investigar dichas cuestiones, cada usuario ha repetido varias veces el estudio donde el factor variante era la presencia o ausencia de la sensación táctil por parte del dispositivo Ultrahaptics Stratos.

Los participantes ejecutaron la tarea de 'pick-and-place' tres veces por cada condición (con y sin percepción táctil). Con el fin de compensar efectos de orden en el cual se presentan las condiciones, se escogió de forma aleatoria a 8 participantes para que comenzasen realizando la tarea con sensación táctil y concluyeron el estudio realizando la tarea con la condición opuesta. Los otros 8 participantes comenzaron realizando la tarea sin 'feedback' háptico.

Durante el estudio, se recogieron dos tipos de datos: cuestionarios validados y también personalizados rellenados por cada participante en distintos momentos durante el estudio, y datos registrados por el ordenador sobre la ejecución del usuario sobre la aplicación.

Los datos recogidos por el ordenador son: el tiempo total en completar la tarea, el número de veces que el usuario soltaba accidentalmente la esfera del robot, el tiempo moviendo el extremo del 'cobot', la distancia de error entre la pinza y la posición objetivo, y la relación entre tiempo moviendo el extremo del robot y tiempo total empleado.

Debido a que las métricas cuantitativas no son capaces de capturar la diferencia en la experiencia de usuario, los participantes rellenaron los cuestionarios Raw NASA-TLX (Hart, 2006) y SEQ (10 Things To Know About The Single Ease Question (SEQ), 2021) (Ver ANEXO A).

Decidimos extender el cuestionario SEQ. Además de conocer la dificultad de la tarea, queríamos conocer de forma subjetiva su satisfacción con el trabajo realizado.

Así mismo, optamos por extender también el NASA-TLX con dos categorías adicionales: control percibido sobre el holograma y carácter físico de la tarea.
Se ha decidido añadir estas dos categorías al cuestionario con el fin de añadir una evaluación de carácter háptico al estudio. A través de la primera de las dos categorías añadidas se pretende analizar si existe una diferencia sustancial en cuanto a la sensación de control sobre el gemelo digital haciendo uso del dispositivo háptico frente a no utilizarlo.

En el caso de la segunda categoría, se quiere observar cuánto aporta Ultrahaptics Stratos al carácter físico de la tarea y si es suficiente la respuesta que ofrece el dispositivo para considerar que aporta un extra al sistema definido en este artículo.

Hemos analizado los valores obtenidos realizando un análisis estadístico utilizando el 't-test' (Student, 1908) así como el test de Wilcoxon (Wilcoxon, 1992) en función a la normalidad del conjunto de datos (para lo cual se ha utilizado el test de Shapiro-Wilk).Todo el análisis de los datos se ha realizado utilizando el lenguaje R (R Core Team, 2018) y el valor p utilizado fue 0.05.

Debido al tiempo que se debe dedicar a la realización de la tarea original y teniendo en cuenta el número de ejecuciones que se pretenden realizar por usuario, se ha decidido reducir la tarea realizada a la previamente descrita. El usuario únicamente tenía que desplazar la esfera hasta que el extremo de la pinza se encontrase en el objetivo final. La orientación de la pinza se automatizó omitiendo así la necesidad de ajustarla.

Antes de que el participante comenzase con el estudio, se le explicó qué era cada dispositivo y cómo podía actuar con él. A través de un escenario de prueba, pudieron interactuar con distintos objetos a través de la interfaz de interacción desarrollada con ambos dispositivos para comprender cómo debían interactuar en la evaluación.

Por cada ejecución de la tarea, el objetivo se encontraba en una posición diferente. Entre cada ejecución los participantes respondían a las 2 preguntas del SEQ extendido y después de las 3 ejecuciones en cada una de las dos condiciones, respondían la NASA-TLX extendido.
La intención del cuestionario SEQ tras cada ejecución era el de conocer la impresión más inmediata del participante.

La prueba comenzaba cuando el usuario decía el comando de voz para poder mover el robot y finalizaba cuando decía el comando de voz para parar el robot.

Con el fin de conocer de manera más precisa la opinión de los usuarios, tras finalizar todo el estudio, completaron un test ad-hoc con cuatro afirmaciones donde tenían que mostrar su nivel de acuerdo o desacuerdo en una escala de Likert de 7 puntos.

5. Resultados

A continuación, se muestran los resultados que se han obtenido tras la realización del estudio con los participantes.

Los resultados se muestran agrupados en dos categorías: cualitativos y cuantitativos.

Podemos hablar de datos pareados puesto que, para cada ejecución con percepción táctil (V + H), se realizaba la misma ejecución sin ella (V).

5.1 Resultados cuantitativos

5.1.1 Error cometido (distancia)

El error cometido corresponde a la distancia existente entre el punto central del objetivo marcado y el punto central de la pinza (Figura 3).

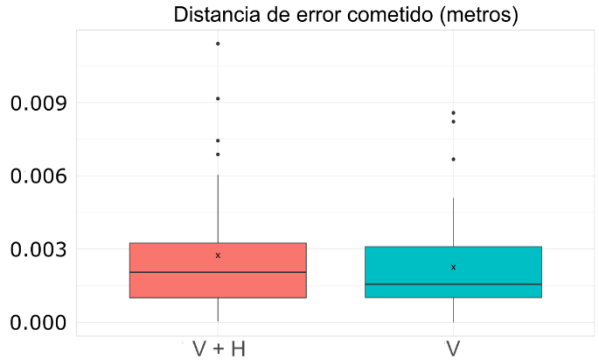


Figura 3: Distribución de los datos de la distancia de error cometido con 'feedback' háptico y sin 'feedback' háptico.

((M_{V+H} = 2,706 mm, SD_{V+H} = 2,351 mm, CI_{V+H} = [2,023 ; 3,339]); (M_V = 2,259 mm, SD_V = 1,998 mm, CI_V = [1,679 ; 2,839]))

El valor p obtenido con el test de Wilcoxon es mayor que 0,05 (0,418) por lo que la diferencia no es significativa.

5.1.2 Tiempo dedicado a la tarea

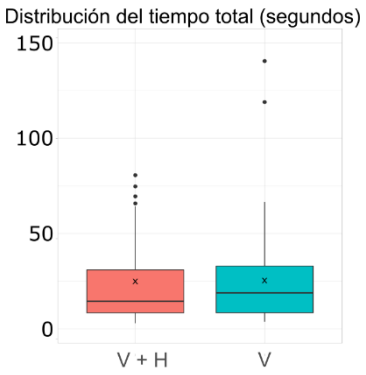


Figura 4: Distribución de los tiempos totales necesitados para realizar la tarea en ambas condiciones.

Esta métrica mide el tiempo comprendido desde el momento en el que se inicia el primer movimiento hasta el momento en el que se detiene el movimiento del robot con el comando de voz (Figura 4).

Seguidamente, se reportan los valores de las medias geométricas e intervalo de confianza al 95% de los datos obtenidos.
(($GeoM_{V+H}$ = 16,54, CI_{V+H} = [12,75 ; 21,44]); ($GeoM_{V}$ = 17,90, CI_{V} =[13,78 ; 23,25]))

Se ha eliminado del análisis temporal una ejecución correspondiente a la primera ejecución con 'feedback' táctil de uno de los participantes debido a lo mucho que difiere este valor con respecto al resto de ejecuciones del estudio, así como ejecuciones propias. Para poder realizar una comparación equilibrada, también se ha eliminado la primera ejecución del mismo usuario cuando realizó la tarea propuesta en el estudio sin 'feedback' táctil.

El valor p (0,962) del test de Wilcoxon no mostró una diferencia significativa entre las condiciones.

5.1.3 Tiempo moviendo el 'cobot'

En este caso, el tiempo recogido es en el que el usuario se encontraba desplazando la esfera del extremo del robot (Figura 5). Al igual que con el apartado anterior, no se han tenido en cuenta el valor del 'outlier' y el valor pareado.

La media geométrica y el intervalo de confianza obtenido al 95% de estos valores son los siguientes:
(($GeoM_{V+H}$ =12,51, CI_{V+H} = [10,07 ; 15,55]); ($GeoM_{V}$ =12,61, CI_{V} = [10,19 ; 15,61]))

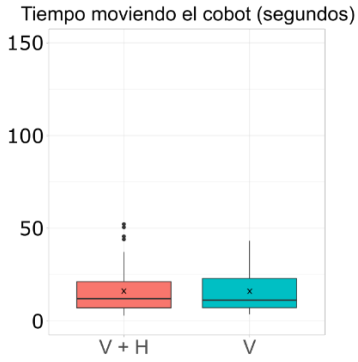


Figura 5: Distribución de los tiempos en los que los participantes se encontraban desplazando el extremo del 'cobot' holográfico en las dos condiciones.

Al igual que con el tiempo total de la tarea, el valor p (0,987) es superior al umbral de 0,05 por lo que no se aprecia una diferencia significativa.

5.1.4 Relación tiempo en movimiento y tiempo total

Esta métrica es el resultado de la división entre el tiempo que el usuario ha estado manipulando el 'cobot' holográfico y el tiempo total dedicado a la tarea. Puesto que el primer valor siempre va a ser menor o igual que el segundo, estos valores están comprendidos entre 1 y 0 (Figura 6).
((M_{V+H} = 0,748, SD_{V+H} = 0,165, CI_{V+H} = [0,661 ; 0,836]); (M_{V} = 0,715, SD_{V} = 0,197, CI_{V} = [0,610 ; 0,821]))

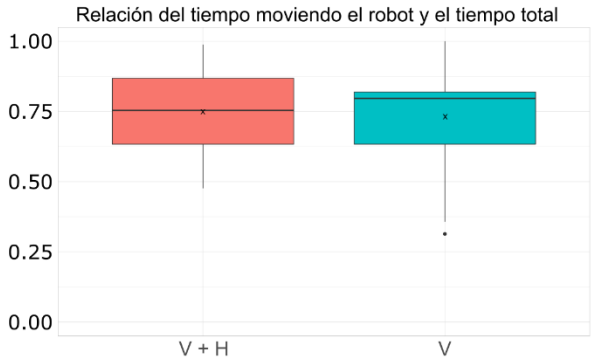


Figura 6: Distribución de los valores resultantes de la división entre el tiempo que el participante estaba moviendo la esfera y el tiempo total empleado en la tarea.

En este caso nos volvemos a encontrar un valor p superior al umbral (0,578) tras aplicar el t-test.

5.1.5 Esfera perdida

Se ha analizado el número de veces que el usuario perdió la esfera que permite mover el 'cobot' (Figura 7).
((M_{V+H} = 6,681, SD_{V+H} = 7,553, CI_{V+H} = [4,463 ; 8,898]); (M_{V} = 7,319, SD_{V} = 8,577, CI_{V} = [4,8 ; 9,837]))

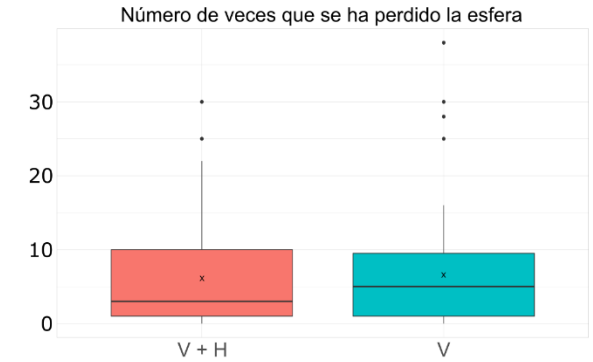


Figura 7: Distribución de número de veces que el participante ha perdido el control de la esfera del extremo del holograma en ambas condiciones.

El resultado valor p obtenido (0,698) indicaba que la diferencia no era estadísticamente significativa.
Resumiendo, los datos presentados hasta ahora, se puede apreciar que, en cuanto a los datos cuantitativos, ninguna métrica ha mostrado una diferencia significativa entre ambas condiciones.

5.2 Resultados cualitativos

A continuación, se van a analizar los datos cualitativos extraídos de los test SEQ, NASA-TLX y el cuestionario ad-hoc.

5.2.1 SEQ - Dificultad de la tarea

En una escala del 1 al 7, los participantes indicaban si les había sido complicado realizar la tarea (1) o sencillo (7) (Figura 8). ((M_{V+H} = 6,291, SD_{V+H} = 1,031, CI_{V+H} = [5,992 ; 6,591]); (M_V = 6,104, SD_V = 0,973, CI_V = [5,822 ; 6,387]))

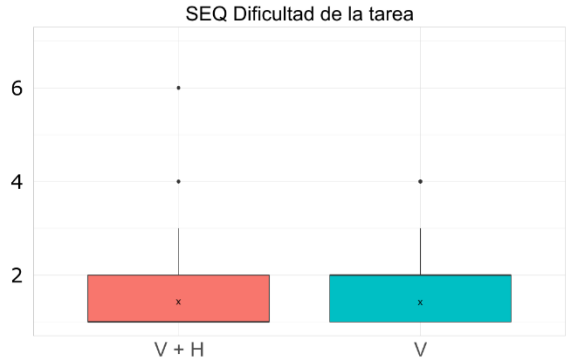


Figura 8: Distribución de respuestas a la dificultad de cada ejecución de la tarea realizada.

No se percibió ninguna diferencia significativa entre ambos conjuntos de datos (valor p = 0.147).

5.2.2 SEQ – Satisfacción con el resultado

La segunda pregunta corresponde a la extensión realizada. Manteniendo el mismo formato de pregunta (escala del 1 al 7), preguntamos a los participantes qué de satisfechos estaban con el resultado logrado tras cada ejecución (Figura 9).
((M_{V+H} = 6,354, SD_{V+H} = 0,887, CI_{V+H} = [6,096 ; 6,612]); (M_V = 6,0, SD_V = 1,167, CI_V = [5,661 ; 6,339]))



Figura 9: Distribución de las respuestas a la satisfacción con el resultado de cada ejecución de la tarea realizada.

En este caso, tras realizar el test de Wilcoxon, obtenemos un valor p menor a 0,05 (0,033) con el que se puede decir que existe una diferencia significativa entre ambos conjuntos de datos.

5.2.3 NASA-TLX

El índice obtenido del NASA-TLX es una medida de la carga de trabajo experimentada por los participantes cuando ejecutan la tarea experimental. El cuestionario consta de 6 categorías valoradas del 0 al 20 que son: demanda mental, demanda física, demanda temporal, nivel de rendimiento alcanzado, esfuerzo requerido y frustración experimentada. Se ha realizado un análisis de los valores de manera individual, así como del índice del cuestionario original.

Entre los resultados obtenidos, destaca el resultado obtenido con los índices del NASA-TLX original ((M_{V+H} = 6,781, SD_{V+H} = 3,009, CI_{V+H} = [5,178 ; 8,385]); (M_V = 7,583, SD_V = 3,338, CI_V = [5,804 ; 9,362])). Como se puede ver en la Figura 10, los valores sugieren una mejora con el uso del 'feedback' táctil. Sin embargo, el t-test devuelve un valor p de 0,096 que es próximo al umbral, aunque estadísticamente no podemos decir que exista una diferencia entre los conjuntos de datos.

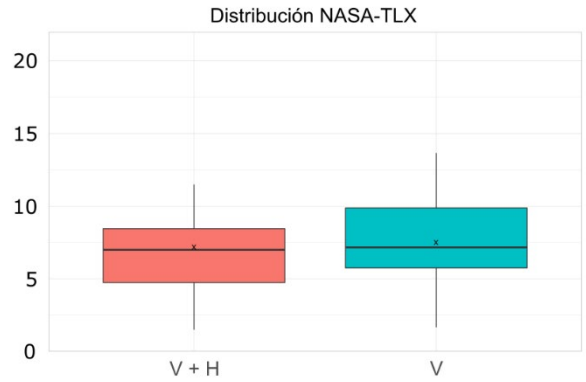


Figura 10: Distribución de la media obtenida por los test NASA-TLX de los participantes en las dos condiciones del estudio.

Si realizamos un análisis entre las distintas categorías del NASA-TLX extendido, podemos observar en el caso de la percepción de control del holograma ((M_{V+H} = 14,625, SD_{V+H} = 4,470, CI_{V+H} = [12,243 ; 17,007]); (M_V = 12,25, SD_V = 4,524, C_V = [9,839 ; 14,661])) que sí existe una diferencia estadísticamente significativa (valor p = 0,04)

Lo mismo ocurre con los datos de los datos relativos al carácter físico de la tarea ((M_{V+H} = 15.437, SD_{V+H} = 3.521, CI_{V+H} = [13,437 ; 17,313]); (M_V = 6.375, SD_V = 4.843, CI_V = [3,795 ; 8,955])). En este caso, la diferencia es aún más perceptible tanto visual (Figura 11) como estadísticamente (valor p < 0.001).

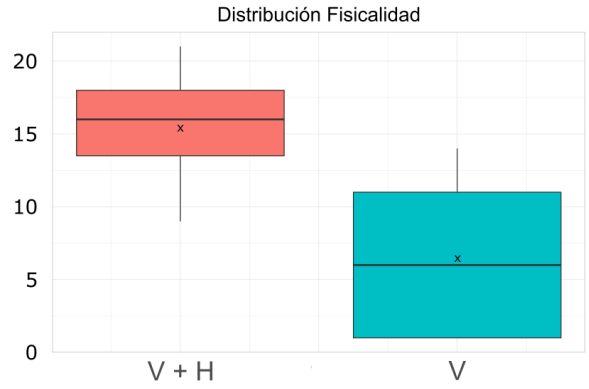


Figura 11: Distribución del índice de fisicalidad (extensión del NASA-TLX) del holograma manipulable en la aplicación.

5.2.4 Cuestionario ad-hoc

Por último, tras el análisis de las distintas afirmaciones del cuestionario ad-hoc (ver ANEXO A), los participantes mostraron su acuerdo con que tenían cierta percepción de ventaja utilizando Ultrahaptics Stratos (Q1) y su desacuerdo con que la percepción con y sin 'feedback' háptico era la misma mientras manipulaban la pose del robot (Q4).

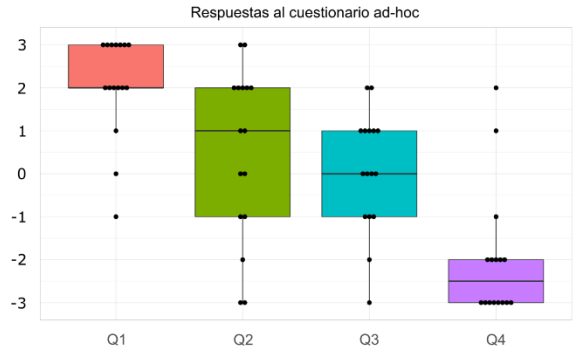


Figura 12: Distribución de las respuestas a las 4 afirmaciones planteadas en el cuestionario ad-hoc.

Pregunta	*Media*	*SD*	*$CI_{95\%}$*
Q1	2,06	1,18	[1,43 ; 2,69]
Q2	0,50	2,00	[-0,56 ; 1,56]
Q3	0,06	1,39	[-0,67 ; 0.8]
Q4	-2,00	1,51	[-2,8 ; -1,19]

Por otra parte, en las afirmaciones "el hecho de sentir la esfera no ha hecho que haya realizado más rápido la tarea" (Q2) y "he logrado una mayor precisión con el uso de la sensación táctil" (Q3) se puede observar que no hubo un consenso en las respuestas dadas por los participantes ya que se encuentran distribuidas por todo el rango de respuestas posibles (Figura 12).

6. Discusión de resultados

Tras analizar los datos extraídos en el estudio de usuario, no se puede decir que la percepción háptica del holograma del robot haya influido en el rendimiento de los participantes ni para perjuicio ni para mejora en el tiempo ni en la precisión de la tarea.

En cambio, el análisis de los datos extraídos a través de los cuestionarios muestra ciertas diferencias estadísticamente significativas en la experiencia de usuario.

Pese a no haber encontrado diferencias significativas en las preguntas del SEQ ni en el índice del NASA-TLX, se ha podido ver que existe una mejora favorable en el carácter físico de la tarea y en la sensación de control haciendo uso del dispositivo háptico (extensión realizada al NASA-TLX).

Por otra parte, del cuestionario ad-hoc con las 4 afirmaciones planteadas a los participantes, se muestra que notaron una diferencia cuando movían el holograma con y sin sensación háptica, y que la presencia de esta sensación táctil ofrecía una ventaja para la ejecución de la tarea.

Nuestra hipótesis acerca de estos resultados es que esta sensación de mejora procede de la utilidad que ofrece este dispositivo para indicar si el participante se encuentra controlando el extremo del robot holográfico o lo ha soltado/perdido.

Cuando no utilizaban el dispositivo háptico, no sabían realmente cuándo se encontraban sujetando la esfera o cuándo la habían perdido. Con 'feedback' táctil, los usuarios podían entender inmediatamente que habían soltado el extremo del robot.

7. Conclusiones

Tras el estudio realizado, se ha podido observar los beneficios y limitaciones de una experiencia multimodal (visuo-táctil) sobre una tarea de guiado manual del gemelo digital de un brazo robótico.

Se ha podido dar respuesta a las dos preguntas de investigación.
En cuanto a la primera pregunta en la que se planteaba si era o no posible la programación de un brazo robótico a través de su gemelo digital, podemos decir que sí es posible al menos realizar la tarea de pick-and-place (que es una parte dentro de toda la programación de un brazo robótico) teniendo en cuenta el margen de error que existe debido a la precisión con

la que cuenta el dispositivo Leap Motion integrado en Ultrahaptics Stratos.

Respecto a la segunda pregunta de investigación, la aportación del dispositivo Ultrahaptics Stratos se ha analizado desde dos puntos de vista.
Desde el punto de vista de eficiencia, no se ha podido observar una diferencia significativa temporal ni relativa a la precisión. En cuanto a la experiencia de usuario, podemos decir que la mejora ha sido relativa a la percepción tangible y relativa a la sensación de control durante la manipulación.

8. Trabajo desarrollado post-estudio

Tras haber realizado el estudio y analizado los resultados obtenidos, hemos podido observar que el sistema háptico favorece a la experiencia de usuario. Sin embargo, su limitada zona de actuación impide la posibilidad de trabajar con robots y escenarios que no estén representados a escala.

Analizando las distintas variantes que han sido tomadas para resolver esta tarea, hemos considerado acercarnos más a trabajos como (Bambusek, Materna, Kapinus, Beran, & Smrž, 2019), (Xue, y otros, 2020) y (Chan, y otros, 2020) previamente descritos en el estado del arte.

Teniendo en cuenta el avance de la tecnología durante el tiempo transcurrido en el periodo de desarrollo y estudio de esta aplicación experimental, han surgido nuevos dispositivos tecnológicos que favorecen a la mejora de la interacción entre el usuario y el escenario virtual a través de realidad mixta.

Este es el caso de las Hololens de Microsoft. Su segunda versión, además de incorporar mejoras en calidad de visualización y procesamiento de información, cuenta con un sistema de posicionamiento de la mano en el frontal del dispositivo permitiendo así la interacción del usuario con la escena al igual que lo permitía el dispositivo de Leap Motion integrado en Ultrahaptics Stratos Explore.

Siguiendo con la línea de evitar cargar al usuario con dispositivos, hemos decidido prescindir en este ciclo del sistema háptico y nos hemos centrado más en la mejora del sistema de interacción entre el usuario y la escena.

Partiendo de los conocimientos adquiridos en este proyecto, el nuevo objetivo planteado es el de poder programar el gemelo digital de un brazo robot real de tal forma que éste replique el comportamiento plasmado en las gafas de realidad mixta. Además, se pretende diseñar una interfaz para la interacción entre el usuario y el gemelo digital de tal forma que, un usuario que carece del conocimiento necesario sea capaz de programar un robot de la manera más sencilla e intuitiva posible dentro de los requisitos de este tipo de tarea a través de realidad mixta.

En cuanto al diseño de la aplicación actual, hemos podido observar que es factible e intuitivo el uso de una esfera como representación de un holograma manipulable y, por consecuente, es válido para representar el extremo del robot que se pretende programar en el mundo virtual.

Hemos querido probar con una solución similar al diseño que hemos propuesto en el trabajo utilizado para el estudio de tal forma que, como se ve en la Figura 13, la esfera más grande (de color rojo) es la encargada de definir la posición del extremo del robot mientras que la esfera pequeña (de color naranja) es la encargada de indicar la orientación del extremo del robot, es decir, hacia dónde tiene que mirar. La esfera naranja 'orbita' sobre la esfera roja a una distancia constante en todo momento impidiendo así la pérdida de esta mientras se define su ubicación por alejarla demasiado de la esfera roja.

En este nuevo desarrollo, puesto que los cálculos de la cinemática no se van a realizar en tiempo real en la propia aplicación de Unity, la esfera no se encuentra unida al extremo del robot, sino que, se calcula y visualiza su posición segundos más tarde, cada vez que se define una nueva pose del robot.

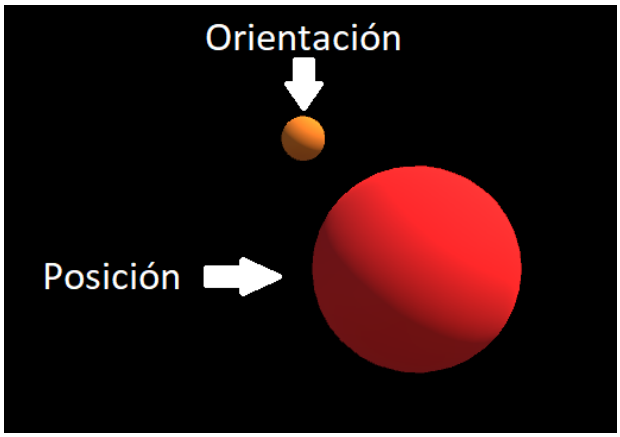


Figura 13: Diseño del holograma que representa la pose del extremo del robot. Consta de dos esferas que definen posición (la más grande) y orientación (la más pequeña).

Por otra parte, con el fin de conservar esa información que Ultrahaptics Stratos ofrecía al usuario, se ha decidido expresar esa misma información a través del canal auditivo. Cuando el usuario sujeta la representación del extremo del robot, el sistema emite un sonido que indica dicha acción. Lo mismo ocurre cuando el usuario suelta el holograma. El sistema emite un sonido diferente para este caso.

Teniendo en cuenta que el objetivo es el de poder programar un brazo robótico a través de su gemelo digital, hemos

decidido utilizar ROS (Robot Operating System) en la nueva implementación. A través de distintos módulos es posible calcular la cinemática real del brazo robot a programar, comunicarse con el brazo robótico real y compartir información de interés entre los distintos dispositivos.

Para poder comunicar las gafas de realidad mixta Hololens 2 con ROS hemos utilizado una adaptación para Hololens del paquete ROS#[12], el cual permite una comunicación bidireccional y provee los componentes necesarios para la suscribirse y publicar información en 'topics' al igual que generar servicios y acciones. Además, permite crear mensajes personalizados e importar robots de ROS a Unity.

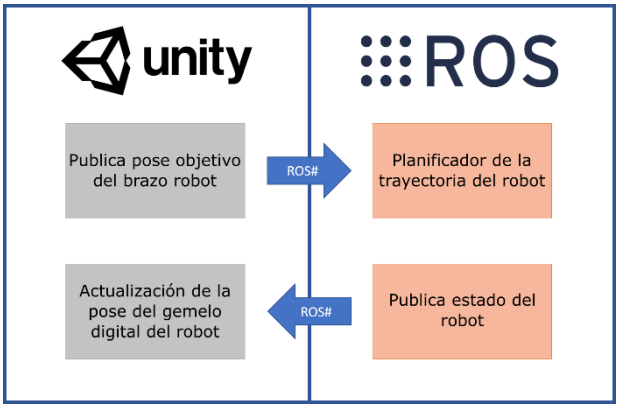


Figura 14: Esquema de la propuesta para el flujo de eventos e información entre Hololens 2 y ROS.

Este nuevo sistema consiste entonces de dos partes (Figura 14) que se ejecutan de forma simultánea. En Hololens 2 una aplicación se encarga de la petición de planificación y ejecución de trayectorias por parte del brazo robótico al igual que de la representación de estas.

En el lado de ROS se encuentra un nodo gestionando las peticiones procedentes de las Hololens 2 y los distintos 'topics' donde se están publicando información de interés acerca de las peticiones solicitadas.

MoveIt! es un software permite calcular la cinemática de distintos robots en función a la descripción de este. La intención por la cual se quiere utilizar este software es, entre otras cosas, para liberar carga de trabajo a las Hololens 2 y por otra parte porque es un sistema validado para distintos brazos robot.

Por otra parte, se ha desarrollado una primera aproximación de un módulo encargado de limitar el movimiento del brazo robot en función al entorno que le rodea.

Para ello se ha hecho uso de las distintas cámaras de las que dispone Hololens 2 que son capaces de percibir el entorno en el que se encuentra.

Una vez el dispositivo de realidad mixta ha mapeado el entorno en el que se encuentra, se envía esta información (a un nodo de ROS encargado de añadir objetos a la escena) tomando como referencia la posición en la que se ha ubicado la base del gemelo digital en el mundo real.

El resultado se podría visualizar en la aplicación Rviz como se puede apreciar en la Figura 15.

Con estas mejoras en el diseño pretendemos obtener una experiencia de usuario muy mejorada, además de una mayor precisión y eficiencia del sistema.

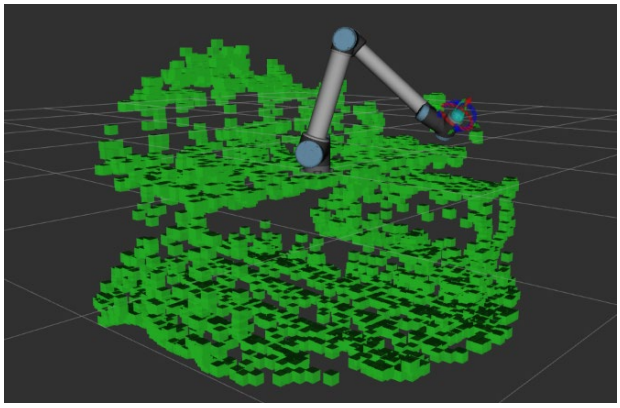


Figura 15: Visualización en Rviz de la escena generada a partir del mapeado realizado por las cámaras de Hololens 2 junto al brazo robótico virtual.

Referencias

10 Things To Know About The Single Ease Question (SEQ). (2021, October 14). Retrieved from https://measuringu.com/seq10/

Aggarwal, R., Ward, J., Balasundaram, I., Sains, P., Athanasiou, T., & Darzi, A. (2007). Proving the effectiveness of virtual reality simulation for training in laparoscopic surgery. Ann. Surg., 246, 771-779.

Andersson, N., Argyrou, A., Nägele, F., Ubis, F., Campos, U., de Zarate, M., & Wilterdink, R. (2016). AR-Enhanced Human-Robot-Interaction - Methodologies, Algorithms, Tools. Procedia CIRP, 193-198.

[12] https://github.com/siemens/ros-sharp

Bambusek, D., Materna, Z., Kapinus, M., Beran, V., & Smrž, P. (2019). Combining Interactive Spatial Augmented Reality with Head-Mounted Display for End-User Collaborative Robot Programming. 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 1-8.

Brooks, F. (1988). Grasping reality through illusion - interactive graphics serving science. In CHI '88: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1-11.

Burghardt, A., Szybicki, D., Gierlak, P., Kurc, K., Pietru´s, P., & Cygan, R. (2020). Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins. Appl. Sci., 10, 486.

Carter, T., Seah, S., Long, B., Drinkwater, B., & Subramanian, S. (2013). UltraHaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 505-514.

Chan, W., Sakr, M., Quintero, C., Croft, E., & Van der Loos, H. (2020). Towards a Multimodal System combining Augmented Reality and Electromyography for Robot Trajectory Programming and Execution. 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 419-424.

Gallagher, A., Ritter, E., Champion, H., Higgins, G., Fried, M., Moses, G., . . . Satava, R. (2005). Virtual reality simulation for the operating room: Proficiency-based training as a paradigm shift in surgical. Ann. Surg., 241, 364.

Grantcharov, T., Kristiansen, V., Bendix, J., Bardram, L., Rosenberg, J., & Funch-Jensen, P. (2004). Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. Br. J. Surg., 91, 146-150.

Hart, S. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 50, 904-908.

Heilig, M. (1962). EE.UU Patente nº 3.050.870.

Hietanen, A., Pieters, R., Lanz, M., Latokartano, J., & Kämäräinen, J. (2020). AR-based interaction for human-robot collaborative manufacturing. Robot. Comput. Integr. Manuf., 63,101891.

Ikits, M., & Brederson, J. (2005). The Visual HapticWorkbench. Visualization Handbook, 431-447.

Luckey, P. (14 de August de 2021). Oculus Rift. Obtenido de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Oculus_Rift

Luebbers, M., Brooks, C., Kim, M., Szafir, D., & Hayes, B. (2019). Augmented Reality Interface for Constrained Learning from Demonstration. In Proceedings of the 2nd InternationalWorkshop on Virtual, Augmented, and Mixed Reality for HRI (VAM-HRI).

Makhataeva, Z., & Varol, H. (2020). Augmented Reality for Robotics: A Review. Robotics, 9, 21.

Makris, S., Karagiannis, P., Koukas, S., & Matthaiakis, A. (2016). Augmented reality system for operator support in human-robot collaborative assembly. CIRP Ann., 65, 61-64.

Ni, D., Yew, A., Ong, S., & Nee, A. (2017). Haptic and visual augmented reality interface for programming welding robots. Adv. Manuf., 5.

Ong, S., Yew, A., Thanigaivel, N., & Nee, A. (2020). Augmented reality-assisted robot programming system for industrial applications. Robot. Comput. Integr. Manuf., 61,101820.

Ostanin, M., & Klimchik, A. (2019). Interactive Robot Programing Using Mixed Reality. IFAC-PapersOnLine, 51, 50-55.

Pettersen, T., Pretlove, J., Skourup, C., Engedal, T., & Lokstad, T. (2003). Augmented reality for programming industrial robots. In Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 319-320.

Puljiz, D., Stöhr, E., Riesterer, K., Hein, B., & Kröger, T. (2019). Sensorless Hand Guidance using Microsoft Hololens. In Proceedings of the 2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 632-633.

R Core Team. (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Rivera-Pinto, A., & Kildal, J. (2019). Visuo-Tactile Mixed Reality for Offline Cobot Programming. Companion of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (pp. 403-405). Cambridge: ACM.

Rosen, E., Whitney, D., Phillips, E., Chien, G., Tompkin, J., Konidaris, G., & Tellex, S. (2019). Communicating and controlling robot arm motion intent through mixed-reality head-mounted displays. Int. J. Robot. Res., 1513-1526.

Rosen, E., Whitney, D., Phillips, E., Chien, G., Tompkin, J., Konidaris, G., & Tellex, S. (2020). Communicating robot arm motion intent through mixed reality head-mounted displays. Robotics Research, 301-316.

Rückert, P., Meiners, F., & Tracht, K. (2018). Augmented Reality for teaching collaborative robots based on a physical simulation. In Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 41-48.

Seymour, N., Gallagher, A., Sanziana, R., O'Brien, M., Vipin, B., & Andersen, D. (2002). Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance. Ann. Surg., 236, 458-463.

Sodhi, R., Poupyrev, I., Glisson, M., & Israr, A. (2013). AIREAL: Interactive tactile experiences in free air. ACM Trans. Graphics, 32, 134.

Student. (1908). The probable error of a mean. Biometrika, 6, 1-25.

Wilcoxon, F. (1992). Individual comparisons by ranking methods. Breakthroughs in Statistics, 196-202.

Xue, C., Qiao, Y., & Murray, N. (2020). Enabling Human-Robot-Interaction for Remote Robotic Operation via Augmented Reality. IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM), 194-196.

Zhou, Z., Xiong, R., Wang, Y., & Zhang, J. (2020). Advanced Robot Programming: A Review. Curr. Robot. Rep.

ANEXO

Cuestionario ad-hoc

	←En desacuerdo						De acuerdo →
He percibido cierta ventaja con el uso de Ultrahaptics a la hora de realizar la tarea.	o	o	o	o	o	o	o
El hecho de poder sentir la bola NO ha hecho que realice la tarea más rápido.	o	o	o	o	o	o	o
He logrado una mayor precisión gracias a Ultrahaptics que sin él.	o	o	o	o	o	o	o
La sensación de manejar el robot ha sido igual con y sin Ultrahaptics.	o	o	o	o	o	o	o

SEQ Extendido

En general, desempeñar esta tarea ha sido:

Muy difícil o o o o o o o **Muy fácil**

Satisfacción con el resultado logrado:

Nada satisfech@ o o o o o o o **Muy satisfech@**

NASA-TLX Extendido

Exigencia mental (¿Cuánta actividad mental y perceptiva fue necesaria?):

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Exigencia física (¿Se trata de una tarea fácil o difícil, lenta o rápida, relajada o cansada?):

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Exigencia temporal (¿Era el ritmo lento y pausado o rápido y frenético?):

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Esfuerzo requerido (físico o mental):

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Muy baja o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o o **Muy alta**

Rendimiento (¿Cuál es su grado de satisfacción con su nivel de ejecución?):

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Nivel de frustración (Inseguro/a, desalentado/a, irritado/a, tenso/a, …):

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Sensación de control (¿Has sentido que has controlado el brazo robot a tu gusto?):

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Sensación de fisicalidad (Sujetando la bola, sentía que realmente la estaba cogiendo):

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**

Muy baja O O O O O O O O O O O O O O O O O O O O **Muy alta**