

Tipo de artículo: Artículos originales

Temática: Tecnologías de la información y las comunicaciones

Recibido: 12/12/2020 | Aceptado: 26/02/2021 | Publicado: 30/03/2021

Dispositivo de Hardware Libre para Interacción en Entornos 3D

Free Hardware Device for Interaction in 3D Environments

Jorge Enrique Rodríguez Jiménez ¹[0000-0002-1910-9669]*, Ivan Pérez Mallea ²[0000-0001-8465-1086], Arianna Rodríguez Jiménez ³[0000-0002-4022-7379]

¹ Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. jerodriguez@uci.cu

² Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. mallea@uci.cu

³ Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. arjimenez@uci.cu

* Autor para correspondencia: jerodriguez@uci.cu

Resumen

Los dispositivos de interacción hombre-máquina han sufrido un aumento en su velocidad de evolución. Desde la aparición de los primeros teléfonos inteligentes, hasta la aplicación de la realidad aumentada, y más recientemente, la consolidación de la realidad virtual, el modo en que el ser humano percibe el entorno ha cambiado debido a la influencia de estas nuevas tecnologías. Si bien existe una tendencia hacia el software y hardware libre, promoviendo el desarrollo sin limitaciones y la construcción de dispositivos con un bajo costo económico, Cuba no posee los recursos necesarios para garantizar la adquisición y empleo de dispositivos de realidad virtual, por lo que su desarrollo en cuanto a tecnologías 3D puede verse retrasado con respecto al del resto del mundo. En esta investigación se presentan dos modelos de diseño y construcción de un dispositivo para la simulación de los movimientos e interacción de los miembros superiores e inferiores en entornos tridimensionales (dispositivo de realidad virtual), mediante el uso de tecnologías libres. Se utiliza la plataforma de hardware Arduino como centro de adquisición de datos físicos. Se realiza la selección de sensores y actuadores, así como un análisis de factibilidad y funcionalidad de los mismos.

Palabras clave: Arduino, hardware libre, interacción, realidad virtual, sensores.

Abstract

Human-machine interaction devices have experienced an increase in their speed of evolution. From the appearance of the first smartphones, to the application of augmented reality, and more recently, the consolidation of virtual reality, the way in which humans perceive the environment has changed due to the influence of these new technologies. Although there is a trend towards free software and hardware, promoting the development without limitations and the construction of devices with a low economic cost, Cuba does not have the necessary resources to guarantee the acquisition and use of virtual reality devices, so its Development in terms of 3D technologies may be lagging behind that of the rest of the world. This research presents two models of design and construction of a device for the simulation of the movements and interaction of the upper and lower limbs in three-dimensional environments (Virtual Reality

device), through the use of free technologies. The Arduino hardware platform is used as the physical data acquisition center. The selection of sensors and actuators is carried out, as well as an analysis of their feasibility and functionality.

Keywords: *Arduino, free hardware, interaction, sensors, virtual reality.*

Introducción

La sociedad, en crecimiento exponencial y constante cambio, ha variado su forma de pensar a través de los años, apartando los instintos básicos para la supervivencia y tendiendo a un mayor interés en la comodidad y el bienestar físico-espiritual. Con el fin de satisfacer las nuevas necesidades del hombre, la tecnología se ha visto obligada a una acelerada evolución y desarrollo, trayendo consigo el surgimiento de la era de las máquinas.

La metáfora de interacción hombre-máquina provista por las ventanas, el ratón, los íconos y el puntero ha sido ampliamente aceptada desde la llegada de los entornos de escritorios gráficos. Esto trajo consigo la estandarización de un conjunto de técnicas y tareas básicas para el uso de este tipo de entornos. Como resultado se desarrollaron interfaces gráficas de usuario maduras y estables, se formalizaron reglas para su manejo y se crearon nuevas funcionalidades como parte de entornos integrados de desarrollo, para potenciar este tipo de vinculación entre el usuario y la computadora. Estos entornos evolucionaron más allá de las dos dimensiones presentando programas que sentaron las bases para el desarrollo de videojuegos, simuladores, entrenadores y otros sistemas de realidad virtual.

Se puede definir a la realidad virtual como un sistema informático que genera un conjunto de representaciones de la realidad, las cuales se expresan como simulaciones interactivas mediante el uso de componentes especializados. Tomando como punto de partida lo antes expuesto, es necesario señalar que existen tres elementos básicos que se encuentran presentes en todos los sistemas de realidad virtual [1,2]:

- Simulación interactiva: en un sistema de realidad virtual, cada acción y movimiento del usuario es improvisado por el mismo durante la marcha, sin necesidad de establecer un guion, el usuario decide qué hacer y qué no, afectando de forma directa el entorno y posibilitando experiencias únicas en cada ejecución de la aplicación.
- Interacción implícita: en los sistemas de realidad virtual el equipo de cómputo captura la voluntad del usuario implícita en sus movimientos naturales.
- Inmersión sensorial: se puede definir la inmersión sensorial como la desconexión de los sentidos del mundo real y la conexión al mundo digital. El usuario deja de percibir el entorno que lo rodea y pasa a estar completamente sumergido en el espacio virtual que se ejecuta desde la computadora.

A la par de la evolución de los sistemas han tenido que evolucionar los dispositivos de interacción humana, que aún distan mucho de haber llegado a la madurez. Las últimas décadas han marcado un gran avance en este sentido, sin embargo, aún no se ha llegado a un consenso general en la estandarización o forma de realizar las interacciones en las interfaces que conforman estos tipos de software. Aunque la variedad de dispositivos para interactuar con estos entornos ha crecido exponencialmente, siguen siendo caros y difícil de adquirir, razón por la cual se siguen utilizando dispositivos 2D en programas que manejan 3D, limitando así la experiencia de usuario en estas interfaces gráficas.

Los dispositivos de realidad virtual son equipos diseñados especialmente para servir como periféricos de entrada y salida. Estos equipos se dividen en tres categorías fundamentales según los sentidos humanos a los cuales están destinados a estimular: los encargados de la visión, la audición y la interacción [3,4].

Existen varias compañías que han desarrollado dispositivos para realidad virtual, cada uno tiene características que los diferencian de los otros, no solo en la estructura, sino también en los requerimientos para su uso y el precio de venta. Algunas de las más requeridas por los usuarios son Oculus (Rift S, Quest y Go), HTC (Vive, Vive Pro y Vive Focus) y Sony (PlayStation VR) [5-8].

Cada uno de estos equipos está constituido por varios componentes como son las gafas, los auriculares y los mandos. Los mandos, gafas y controladores más avanzados, poseen sistemas de seguimiento que les permiten rastrear la posición de los miembros del cuerpo para luego proyectarlo dentro del mundo virtual y permitir la interacción con el mismo por parte de los usuarios [3,4].

Este seguimiento generalmente se realiza mediante el uso de un sistema de localización local, donde solo se tiene en cuenta el movimiento de la parte que se desea proyectar. También es posible calcular la posición de los miembros realizando un reconocimiento a los movimientos individuales que realizan cada una de sus partes [9]. Este último método es mucho más exacto y otorga un mayor control en la adquisición de datos por parte del dispositivo, permitiendo la posible adición de más funcionalidades, aunque para implementar el mismo es necesario conocer la estructura y funcionamiento de cada uno de los miembros del cuerpo humano en su totalidad.

Materiales y métodos

Se realizó un estudio fisiológico articular de cada uno de los miembros, tanto inferiores como superiores para obtener el conocimiento necesario sobre la estructura y el funcionamiento de los mismos. De ello se obtuvo los miembros superiores están compuestos por cuatro partes [10-13]:

- Cintura escapular: formada por la clavícula y la escápula.

- Brazo: el cual posee un solo hueso llamado húmero.
- Antebrazo: constituido por el radio y el cúbito.
- Mano: estructurada por tres grupos de huesos, el carpo, los metacarpianos y las falanges, todas estas partes unidas por articulaciones.

Los miembros inferiores están compuestos por: la región glútea, el muslo: el cual tiene un solo hueso llamado fémur, la pierna: compuesta por la tibia y el peroné y el pie: compuesto por tres grupos de huesos, el tarso, el metatarso y las falanges, todas las partes unidas mediante articulaciones. El estudio permitió dirigir el enfoque de acción del sistema hacia los movimientos de las partes que se deseaban simular. Para capturar las acciones realizadas por cada uno de los miembros, se exponen las variantes de construcción de un dispositivo de interacción humana de tipo dispositivo de realidad virtual.

Diseño y construcción del Modelo 1

Para lograr una experiencia de inmersión completa es necesario capturar las acciones y movimientos de cada uno de los miembros. Teniendo en cuenta que el cuerpo humano tiene dos miembros superiores y dos inferiores, además de la cabeza, el torso y la cadera, se divide el enfoque de construcción en las partes superior (cabeza, miembros superiores, torso) e inferior (cadera, miembros inferiores) del cuerpo.

Para capturar los movimientos de cada parte, es necesario el empleo de varios sensores [14-16]. Para obtener los valores de rotación se hace uso de 15 sensores BNO055, el mismo es un sensor de tipo IMU (Unidad de Movimiento Inercial) de 9 grados de libertad, contiene un acelerómetro, un magnetómetro y un giroscopio. Se utiliza además 10 sensores Flex, estos son utilizados normalmente para medir el ángulo de giro de articulaciones para aplicaciones robóticas y está diseñado para ser flexionado solo en una dirección. Para un mejor control de los BNO055 se emplean 2 multiplexores I2C TCA9548A, estos permiten manejar hasta 8 dispositivos I2C cada uno, haciendo uso de un solo puerto I2C en nuestro microcontrolador.

La distribución y ubicación de sensores en la parte superior se realiza de la siguiente forma:

- Un sensor BNO055 fijado a la cabeza y otro a la parte superior del torso para controlar los movimientos de los mismos.
- En cada miembro superior tres sensores BNO055, uno fijado en el brazo, uno en el antebrazo y otro en la mano.
- En cada dedo de la mano un sensor Flex para controlar su ángulo de flexión.
- Un multiplexor I2C TCA9548A para controlar los 8 sensores BNO055 de la parte superior.

La distribución y ubicación de sensores en la parte inferior se realiza de la siguiente forma:

- Un sensor BNO055 fijado en la cadera para obtener los movimientos realizados por la misma.

- En cada miembro inferior tres sensores BNO055, uno fijado en el muslo, uno en la pierna y otro en el pie
- Un multiplexor I2C TCA9548A para controlar los 7 sensores BNO055 de la parte inferior.

Tanto los sensores Flex como los multiplexores se conectan a un Arduino Mega 2560, el cual fue seleccionado como centro de adquisición de datos debido a que posee una mayor cantidad de puertos que el clásico Arduino Uno [17-20].

La conexión se realiza de la siguiente forma:

Tabla 1. Conexión de sensores Flex.

Sensor Flex	Arduino
Pin 1	Resistencia de 47K y GND
Pin 1	Pin A (1-10)
Pin 2	5V

Tabla 2. Conexión de Multiplexor I2C TCA9548A.

Multiplexor I2C TCA9548A	Arduino
VIN	5V
GND	GND
SDA	SDA (D 20)
SCL	SCL (D 21)

Tabla 3. Conexión de BNO055.

BNO055	Multiplexor I2C TCA9548A
VIN	5V (Arduino)
GND	GND (Arduino)
SDA	SD (0 - 7)
SCL	SC (0 - 7)

A continuación, se muestra en la Figura 1 el diagrama de conexión para cada componente:

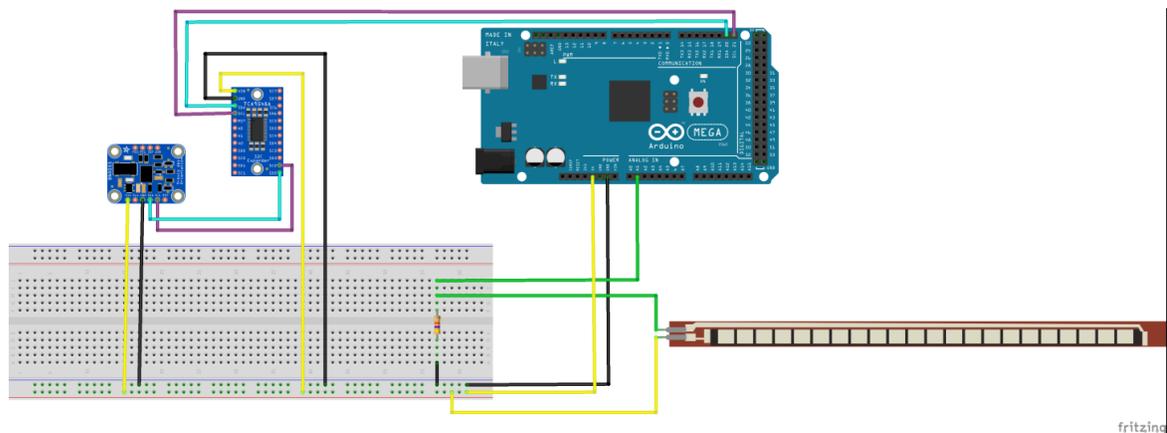


Figura 1. Diagrama de conexión de componentes del Modelo 1.

Con la construcción de este modelo se garantiza una completa proyección de los movimientos del cuerpo al espacio virtual, permitiendo una completa libertad de acción y desplazamiento por parte del usuario. Para lograr este resultado se hace obligatorio el uso de gran cantidad de componentes, por este motivo el costo de producción del dispositivo siguiendo este modelo es alto, a continuación, se presenta la relación del costo de cada componente:

Tabla 4. Análisis de costo del Modelo 1.

Componente	Cantidad	Costo unidad	Costo total
Arduino Mega 2560	1	\$ 14.00	\$14.00
Sensor Flex	10	\$ 13.37	\$ 133.7
BNO055	15	\$ 34.95	\$ 524.25
Multiplexor I2C TCA9548A	2	\$ 7.90	\$ 15.8
Total General			\$ 687.75

Diseño y construcción del modelo 2

Con la construcción del Modelo 1 se consigue una simulación total en el espacio virtual de los movimientos realizados por cada una de las partes del cuerpo. Sin embargo, el costo de construcción del mismo se eleva con relación a otros dispositivos que pudieran garantizar las mismas características funcionales.

El Modelo 2 está diseñado para sacrificar algunas de las funcionalidades con el objetivo de reducir el costo de construcción y aumentar la accesibilidad al dispositivo por parte de mayor cantidad de usuarios.

Este modelo se enfoca en la adquisición de los datos de la parte superior del cuerpo, permitiendo la rotación del cuerpo, pero imposibilitando la capacidad de desplazamiento del mismo en el espacio virtual. Para capturar los datos de rotación se hace uso de 4 sensores BNO055 y de 2 sensor MPU 6050, este último es un sensor de 6 grados de libertad, está compuesto por un acelerómetro y un giroscopio. Para un mejor control de los sensores BNO055 y MPU 6050, se emplean 1 multiplexor I2C TCA9548A. Para capturar las acciones relacionadas con las manos (tomar y soltar objetos) se hace uso de dos pulsadores (botones).

La ubicación y distribución de los sensores se realiza de la siguiente forma:

- Un sensor BNO055 fijado a la cabeza y otro a la parte superior del torso para controlar los movimientos de los mismos.
- En cada miembro superior un sensor MPU 6050 fijado al brazo y un sensor BNO055 fijado al antebrazo.
- Un pulsador fijado a la parte interna de cada mano.
- Un multiplexor I2C TCA9548A para controlar los 4 sensores BNO055 y los 2 sensores MPU 6050.

Al igual que en el Modelo 1, los sensores de la cabeza y el torso capturan los movimientos de los mismos de forma directa e individual. La diferencia está dada en el modo de obtención de los datos de rotación relacionados a los movimientos de los miembros superiores, para esto se realiza un estudio fisiológico articular del miembro superior y se determina que es posible garantizar las principales funcionalidades del mismo haciendo uso de los sensores especificados. Dejando de lado los movimientos de flexión / extensión y desviación radial / cubital de las manos, los grados de rotación del miembro superior se reducen a 5, por lo que tomando los 3 grados de rotación del BNO055 y los 2 del MPU 6050 es posible la obtención de los datos necesarios para la correcta simulación del mismo en el espacio tridimensional. Para las acciones de cada mano se utilizan los estados HIGH del pulsador para mano cerrada y LOW para mano abierta.

La conexión de los componentes se realiza de la siguiente forma:

Tabla 5. Conexión de Multiplexor I2C TCA9548A para el Modelo 2.

Multiplexor I2C TCA9548A	Arduino
VIN	5V
GND	GND
SDA	SDA (D 20)
SCL	SCL (D 21)

Tabla 6. Conexión de sensor BNO055 para Modelo 2.

BNO055	Multiplexor I2C TCA9548A
VIN	5V (Arduino)
GND	GND (Arduino)
SDA	SD (0 - 7)
SCL	SC (0 - 7)

Tabla 7. Conexión de sensor MPU 6050.

MPU 6050	Multiplexor I2C TCA9548A
VCC	3.3V (Arduino)
GND	GND (Arduino)
SDA	SD (0 - 7)
SCL	SC (0 - 7)

A continuación, se muestra en la Figura 2 el diagrama de conexión para cada componente:

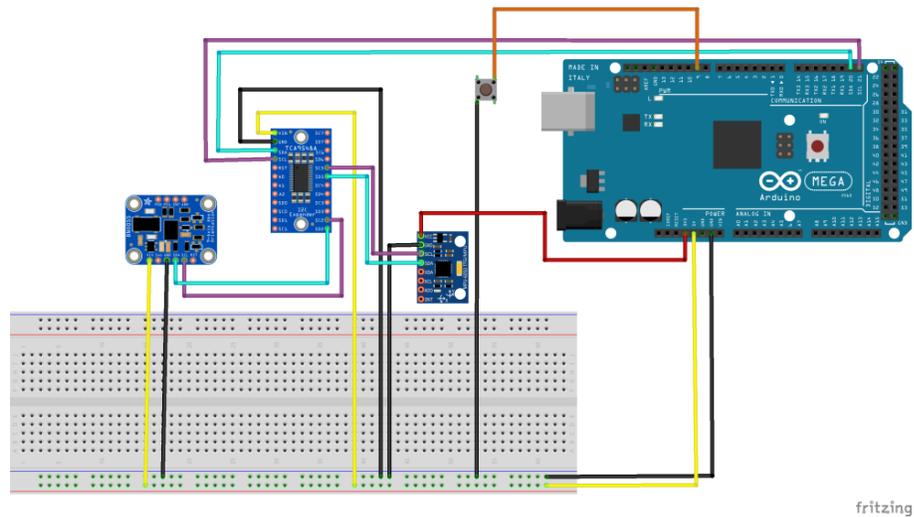


Figura 2. Diagrama de conexión de componentes del Modelo 2.

Con la construcción de este modelo se garantizan las principales funcionalidades de la parte superior del cuerpo permitiendo, aunque no de forma tan completa como el Modelo 1, la inmersión por parte del usuario en el espacio virtual. Debido a que para la construcción de este modelo se emplean pocos componentes, el precio de construcción del dispositivo siguiendo este modelo es bajo, a continuación, se muestra la relación del costo de cada componente:

Tabla 8. Análisis de Costo del Modelo 2.

Componente	Cantidad	Costo Unidad	Costo Total
Arduino Mega 2560	1	\$ 14.00	\$ 14.00
BNO055	4	\$ 34.95	\$ 139.8
MPU 6050	2	\$ 23.90	\$ 47.8
Multiplexor I2C TCA9548A	1	\$ 7.90	\$ 7.90
Pulsador	2	\$ 0.20	\$ 0.40
Total General			\$ 209,9

Resultados y discusión

Es más económicamente factible la construcción del Modelo 2 debido a que disminuye en gran medida el costo de construcción del dispositivo en relación al Modelo 1, sin afectar a grandes rasgos la eficiencia y funcionalidades necesarias para lograr una correcta interacción por parte del usuario en los entornos tridimensionales.

Como resultado de la investigación realizada para el diseño del Modelo 2, se determinó que los movimientos del miembro superior están dados por la combinación de los movimientos de rotación de cada una de las articulaciones,

expresando el vector de la forma: $X_i (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7)$, donde i es la parte en cuestión, X_i es el movimiento de la misma, y los θ son los valores angulares correspondientes a las articulaciones representadas en la Tabla 1, por lo que pueden ser simulados en una computadora mediante la utilización de sensores capaces de capturar estos ángulos.

Tabla 10. Relación movimiento - articulación del miembro superior.

θ_i	Movimientos del miembro superior	Articulaciones
θ_1	Rotación Interna / Externa	Hombro
θ_2	Abducción / Aducción	
θ_3	Flexión / Extensión	
θ_4	Flexión / Extensión	Codo
θ_5	Desviación Radial / Cubital	Muñeca
θ_6	Pronación / Supinación	Codo
θ_7	Flexión / Extensión	Muñeca

En la construcción de prototipos de hardware en los que no se requiera un excesivo procesamiento de datos externos, Arduino constituye una opción más acertada que otras plataformas debido a que el mismo es barato y permite la conexión y el control en tiempo real de varios tipos de sensores. Utilizándolo como plataforma de control se obtuvo un dispositivo capaz de capturar los movimientos de los miembros superiores e inferiores del cuerpo mediante el uso de diferentes sensores.

El sistema es capaz de adquirir los datos para cada articulación sin restringir u obstaculizar los movimientos de los miembros, permitiendo la simulación interactiva y la interacción implícita por parte del usuario en el espacio tridimensional, cumpliendo con las pautas objetivas de los dispositivos de realidad virtual.

Aunque los modelos presentados están diseñados para realizar una conexión mediante cable, se puede convertir la comunicación entre el dispositivo y la computadora en inalámbrica mediante el uso de un módulo de WIFI, *Bluetooth* o radio frecuencia y realizar la expansión del equipo en relación a la adición de un visor y un sistema de audio para garantizar la inmersión sensorial del usuario y completar la construcción del dispositivo como sistema integral de realidad virtual.

Conclusiones

El estudio fisiológico-articular del miembro superior, demostró que es posible simular en una computadora los principales movimientos y acciones desarrolladas por el mismo, mediante la utilización de sensores especializados en la obtención de ángulos de rotación, permitiendo la optimización en cuanto al uso de componentes para la construcción del dispositivo.

En un proyecto de construcción de un dispositivo de hardware en el cual no se requiera una gran capacidad de procesamiento de datos, la utilización de Arduino constituye una opción más viable que el empleo de otras plataformas similares. La construcción de ambos modelos validó la posibilidad de construir este tipo de dispositivos mediante el uso de tecnologías libres.

Referencias

- [1] A. L. García, “Realidad virtual,” Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2004.
- [2] M. Kim, C. Jeon and J. Kim, “A study on immersion and presence of a portable hand haptic system for immersive virtual reality,” *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 1141, 2017.
- [3] O. Bamodu and X. M. Ye, “Virtual reality and virtual reality system components,” *Advanced materials research*, 2013, vol. 765, pp. 1169-1172.
- [4] M. Edwards, “Virtual reality system including smart objects,” Google Patents, 2013.
- [5] V. Oculus, LLC, Oculus Gear VR.
- [6] M. Borges, A. Symington, B. Coltin, T. Smith and R. Ventura, “Htc vive: Analysis and accuracy improvement,” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018, pp. 2610-2615.
- [7] M. G. Solid, “Sony Playstation,” Tokyo, Japan: Konami Computer Entertainment, Inc, 1998.
- [8] C. Hillmann, “Comparing the Gear VR, Oculus Go, and Oculus Quest,” *Unreal for Mobile and Standalone VR*, Springer, 2019, pp. 141–167.
- [9] V. Bharath and R. Patil, “Solid modelling interaction with sensors for virtual reality welding,” *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144, p. 1008.
- [10] M. Latarjet and L. Testut, “Compendio de anatomía descriptiva,” Masson, 1997.
- [11] J. Sobotta, “Atlas de anatomía humana: Cabeza, cuello, miembro superior,” Ed. Médica Panamericana, vol. 1, 2006.

- [12] N. A. DFreitas, “Cinematica Articular,” Revista de la Sociedad Venezolana de Ciencias Morfológicas, vol. 18, no. 1, pp. 15-20, 2012.
- [13] J. Martín, “Cinética articular del hombro. Revisión de una década de investigaciones,” Fisioterapia, vol. 23, pp. 9-14, 2001.
- [14] U. G. Engine, “Unity game engine-official site,” [Online] Available: <http://unity3d.com>, pp. 1534-4320, 2008.
- [15] B. Sensortec, “Intelligent 9-axis absolute orientation sensor,” BNO055 datasheet, 2014.
- [16] D. Fedorov, A. Y. Ivoilov, V. Zhmud and V. Trubin, “Using of measuring system MPU6050 for the determination of the angular velocities and linear accelerations,” Automatics & Software Enginery, vol. 11, no. 1, pp. 75-80, 2015.
- [17] S. A. Arduino, “Arduino,” Arduino LLC, 2015.
- [18] A. Kurniawan, “Introduction to Arduino Boards and Development,” en Arduino Programming with. NET and Sketch, Springer, 2017, pp. 1-19.
- [19] D. Lastra Lamarca and others, “Modelo analógico y digital en SystemC-AMS de la placa Arduino Mega 2560,” 2015.
- [20] C. Arduino, “Arduino Software,” [Online], Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.

Roles de Autoría

Jorge Enrique Rodríguez Jiménez: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Validación, Redacción - borrador original. **Ivan Pérez Mallea:** Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción - borrador original. **Arianna Rodríguez Jiménez:** Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción - borrador original.