

Sistema de detección omnidireccional de gestos corporales para entornos virtuales

Iván Cruz García, Héctor Ortiz Cruz, Marco Antonio Solís López

Instituto Politécnico Nacional,
México

Resumen En el presente documento se aborda el diseño detallado de un sistema de detección de gestos para un entorno virtual. Se propone el desarrollo de una plataforma de soporte para caminata omnidireccional en conjunto con un arnés de seguridad aunado a un sistema de clasificación que utiliza una técnica de Time Series Classification, que se vale de un traje de sensores inerciales para identificar los gestos del usuario, las lecturas de los mismos serán tratadas mediante un filtro de Kalman y finalmente se transmiten las señales a un entorno virtual mediante el uso de un dispositivo HID.

Palabras clave: Clasificación, entorno virtual, gestos, inmersión, interfaz, omnidireccional, realidad virtual.

Omnidirectional Body Gesture Recognition System for Virtual Reality Environments

Abstract. This paper presents the detailed design of a gesture detection system for a virtual environment. The proposed system includes the development of a support platform for omnidirectional walking combined with a safety harness, alongside a classification system that uses a Time Series Classification technique. The system leverages an inertial sensor suit to recognize user gestures. The sensor data is processed using a Kalman filter and subsequently transmitted to a virtual environment through a Human Interface Device (HID).

Keywords: Virtual environment, gestures, immersion, interface, omnidirectional, virtual reality.

1. Introducción

Actualmente, la mayoría de las interacciones de un usuario con un entorno virtual están limitadas al uso de un control remoto, lo cual implica el movimiento únicamente de las manos, específicamente de los dedos. Con el desarrollo por parte de consolas comerciales en los últimos años utilizando cámaras y mandos

inteligentes se ha perseguido una nivel cada vez mas avanzado de inmersión, y con los recientes intentos de realidad virtual en conjunto con visores hay un área de oportunidad de desarrollo para esta tecnología. Sin embargo, para lograr una experiencia inmersiva, los gestos motrices y/o movimientos del cuerpo completo deberían verse directamente reflejados en el entorno virtual. En las propuestas tecnológicas antes mencionadas, aunque el usuario puede moverse en un espacio específico, su desplazamiento en realidad está condicionado a que el usuario emule la marcha manteniéndose en su lugar (interpretando el movimiento de las piernas como tal y no como un gesto de caminata natural, en el caso de cámaras), o el desplazamiento obedece a movimientos de las manos (como en los VR Headsets).

Por otro lado, los alcances de la realidad virtual inmersiva en ramas como turismo, cultura y educación son cada vez más prometedores. Los posibles escenarios van desde la visita de museos, hasta apoyo a los modelos educativos actuales con la implementación de tecnología 4.0 que permita al usuario expandir los límites de su experiencia virtual.

Para atender estas circunstancias en esta propuesta de proyecto se plantea diseñar un sistema de detección omnidireccional de movimientos aunado a una plataforma capaz de ofrecerle al usuario mayor libertad para realizar movimientos corporales para su interacción con el entorno virtual, aumentando así el nivel de inmersión y la experiencia de **realidad virtual**. El sistema de detección conlleva una etapa de adquisición de señales de movimientos corporales, una de interpretación y de clasificación de los mismos, finalizando con la transmisión de estos como comandos al entorno virtual. Así mismo, la plataforma de soporte deberá poder restringir el desplazamiento horizontal del usuario sin limitar sus movimientos.

El presente documento comienza ofreciendo un marco histórico de interfaces con entornos virtuales, además, se consideran algunos de los antecedentes con más impacto en éste proyecto. Se plantea el desarrollo e implementación del proyecto así como las técnicas y algoritmos utilizados, además se enlistan los resultados obtenidos. Finalmente se debaten los aportes de este proyecto al estado del arte.

2. Estado del arte

Desde investigaciones en el campo de la Psicología hasta prototipos para entrenamiento militar, las caminadoras omnidireccionales enfocadas a la realidad virtual inmersiva han sido objeto de estudio para diversas compañías y organizaciones. Dentro de las propuestas tecnológicas existen tres principales sistemas(figura 1).

El primero consiste en un arreglo de dos caminadoras lineales independientes, colocadas de manera perpendicular, de modo que permiten el desplazamiento en cualquier dirección en el plano XY. Estas caminadoras están formadas por rodamientos y motorizadas para corregir la posición del usuario manteniéndolo siempre en el centro. Una de las partes más sobresalientes de esta propuesta

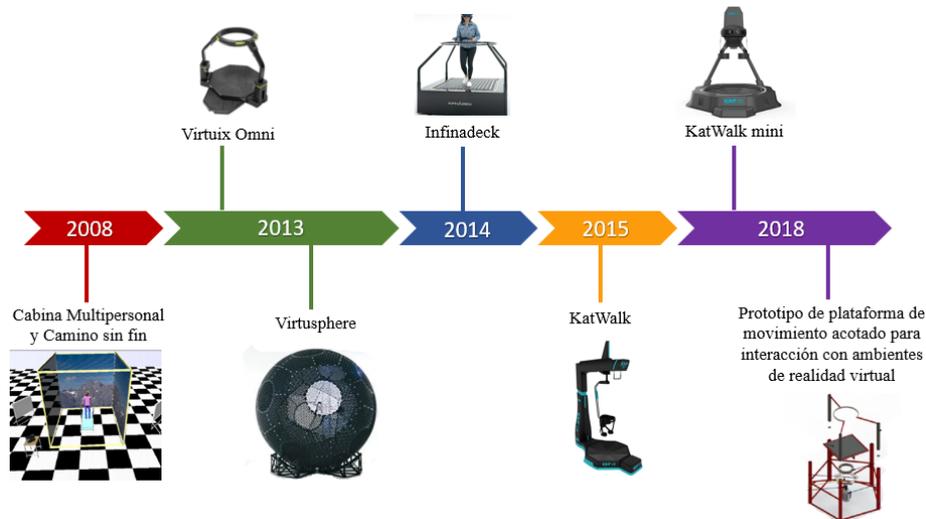


Fig. 1. Línea cronológica del estado del arte.

es el sistema de control, pues para recrear una sensación natural de caminata, la latencia entre el movimiento y la corrección de la posición de la caminadora deben de ser lo más pequeñas posibles, aumentando la complejidad del sistema de control [1].

La segunda propuesta tecnológica consiste en el uso de *wearables*, donde la complejidad del sistema es delegada a sensores colocados en las extremidades del usuario, siendo generalmente giroscopios, acelerómetros y los magnetómetros que detectan los movimientos del usuario para después caracterizarlos, discriminarlos e interpretarlos como comandos. Para mantener al usuario dentro de una zona segura, se utiliza una superficie cóncava donde los pies se ven obligados a regresar al centro por acción gravitatoria combinada con un bajo coeficiente de fricción con la superficie. Dentro de los sistemas comerciales que utilizan este tipo de tecnologías se encuentra el KatWalk VR™. Por último, se han implementado sensores capacitivos dentro de la base que soportará al usuario para medir su posición mientras que los pies se encuentren sobre ella, obteniendo así la posición y velocidad de los pies mientras se encuentren en contacto con la base.

En la tabla 1 se puede observar que la mayoría de estas plataformas están desarrolladas con un enfoque de inmersión en videojuegos o en su defecto en otros países, eso sin mencionar su excesivo costo. Es fundamental en esta propuesta hacer más accesible este tipo de sistemas de inmersión con un propósito más general, con el objetivo de su implementación en un amplio rango de aplicaciones de realidad virtual en nuestro país, además de aportar la detección de las combinaciones de gestos manuales con los del desplazamiento en el entorno.

Tabla 1. Análisis de antecedentes.

Proyecto	Componentes	Contribución	Empresa y año
Cabina Multipersonal y Camino sin fin	Caminadora unidireccional y cabina de espejos con proyector.	Sistema de espejos para proyección de entorno virtual.	CIDETEC, IPN, 2008
Virtuix Omni	Plataforma de soporte para movimiento omnidireccional.	Pionera en movimiento omnidireccional.	Virtuix, 2013
Kat Walk	Plataforma omnidireccional con sistema de detección de caminata.	Plataforma con sistema de detección de movimiento.	Kat VR, 2015
VirtusSphere	Esfera de caminata omnidireccional.	Esfera con sensores inferiores para detectar dirección.	Virtusphere, Inc ,2013
Infinadeck	Caminadora omnidireccional con soporte de usuario.	Caminadora omnidireccional.	Infinadeck, 2014
Prototipo de plataforma de movimiento acotado para interacción con ambientes de realidad virtual	Caminadora unidireccional con motor de redireccionamiento.	Dirección de la mirada y la caminadora alineados por un control PID y un motor.	UPIITA, IPN, 2018

3. Desarrollo

3.1. Plataforma omnidireccional

Se plantea primeramente el uso de una estructura hecha de perfiles unicanal de acero pregalvanizado en conjunto con una superficie cóncava hecha de fibra de vidrio. Se comprobó la funcionalidad de estos materiales para el presente proyecto mediante el uso del software CAD (computer-aided design) *Solid Works*.

En el caso de la plataforma de fibra de vidrio, se necesita que sea capaz de resistir el salto de un usuario y para ello se analizaron los esfuerzos y deformaciones que ocasionaría un impacto sobre la misma. Para ello se realizó un análisis no lineal dinámico. Se utilizó un proyectil de prueba, con un peso igual al del usuario, y se calculó con qué velocidad el objeto tocaría la superficie cóncava. Dicha velocidad se calculó analizando al objeto como un cuerpo en caída libre (ecuación 1), se conocía el peso del objeto (100 kg) y la altura desde la cual caería (20cm ya que fue el salto máximo definido para el proyecto) y un coeficiente de seguridad de tres (figura ??). Con estos datos se puede obtener el

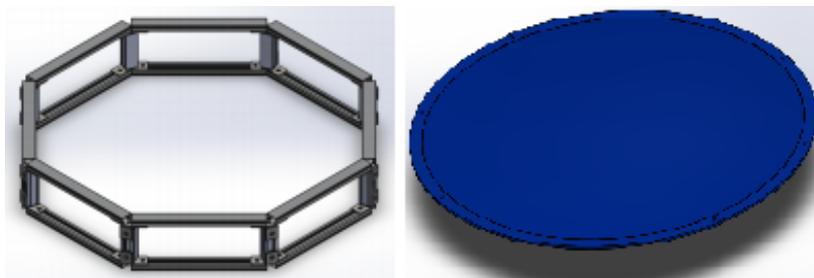


Fig. 2. Estructura de acero pregalvanizado y plataforma de fibra de vidrio.

tiempo de caída (ecuación 2). Por lo tanto, se puede conocer la velocidad con la que se impactaría el cuerpo contra la plataforma (ecuación 3 y ecuación 4).

$$y = y_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2, \quad (1)$$

$$t^2 = \frac{0,2m}{9,81m/s^2}, \quad (2)$$

$$v_f = v_0 + at, \quad (3)$$

$$v_f = 9,81m/s^2(,209). \quad (4)$$

La velocidad es (ecuación 5):

$$v_f = 2m/s. \quad (5)$$

Como se ve en los resultados (figura 3) el impacto del usuario al saltar no sobrepasara el limite elástico de la plataforma, asegurando así que funcionará como superficie de apoyo.

Para la estructura de soporte se necesita de un sistema capaz de resistir el peso del usuario, que no obstruya el movimiento del mismo en ningún momento, pero que también conserve el centro de masa lo más bajo posible y que guarde simetría con los ejes horizontales.

Se propone la construcción de una grúa triple, hecha de perfiles de acero pregalvanizado y ménsulas electrosoldadas. Al analizarla se tomó en cuenta el peso del usuario, el cual actuaría como fuerza vertical en la estructura, la fuerza ejercida por el usuario al generar desplazamiento de manera horizontal y los puntos fijos del sistema, los cuales se encuentran en la parte inferior. Los resultados arrojados por la simulación fueron de $9,32kN/m^2$ (figura 4) actuando en la punta de la grúa, y una deformación máxima de 1.9mm. Con esto se asegura que el material no llegará a su limite de tensión, lo cual asegura que no se romperá, y además no se deformará de una manera considerable, lo cual asegura su utilidad como estructura de soporte.

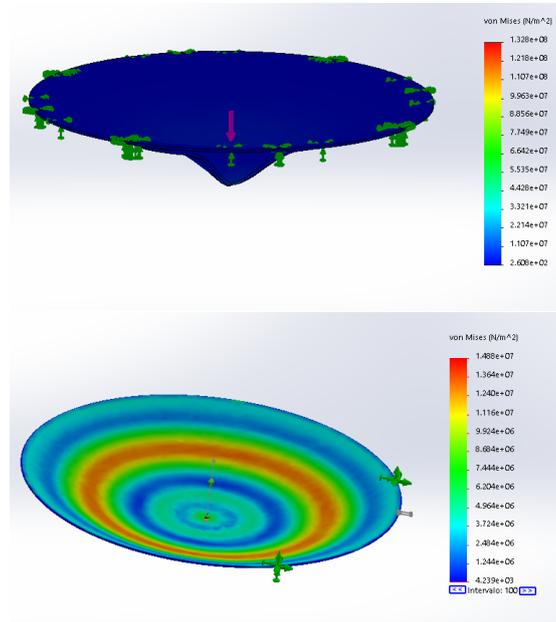


Fig. 3. Deformación máxima debido al impacto del usuario al saltar en la plataforma de vidrio(arriba) y esfuerzo máximo aplicado debido al impacto (abajo).

Finalmente se necesita una estructura que logre limitar el desplazamiento horizontal del usuario, sin limitar su giro y permitiéndole movimiento vertical reducido. Se diseñó un mecanismo que consiste en el uso de un par de tubos cilíndricos doblados, los cuales sujeten al usuario mediante un arnés de seguridad, y se acople a la grúa triple por medio de una plataforma giratoria ubicada en la parte superior de la estructura. Para el diseño del tubo, se tuvo que tener en cuenta las condiciones óptimas para el doblamiento de tubo en frío. Se necesita que el radio del doblado este en un rango de entre 1.5 y 5 veces el diámetro del tubo, ya que se utilizarán dos tubos de 42.1mm y 4.8mm de pared es necesario un radio de doblado entre 63.75mm y 213mm, se eligió un radio de 75mm. Al realizar los análisis de esfuerzos en los tubos se obtuvo un esfuerzo máximo vertical de $9.13 \times 10^7 \text{N/m}^2$ y un esfuerzo máximo horizontal de $1.1 \times 10^8 \text{N/m}^2$ (figura 5). Lo cual asegura que los tubos serán capaces de resistir la carga a la que estarán sometidos

3.2. Adquisición de señales de movimientos de los miembros del cuerpo

El proceso de investigación tuvo como objetivo encontrar el tipo de sensores que brindarán la información necesaria para poder medir los movimientos del usuario, buscando opciones que no interfirieran con el movimiento del mismo.

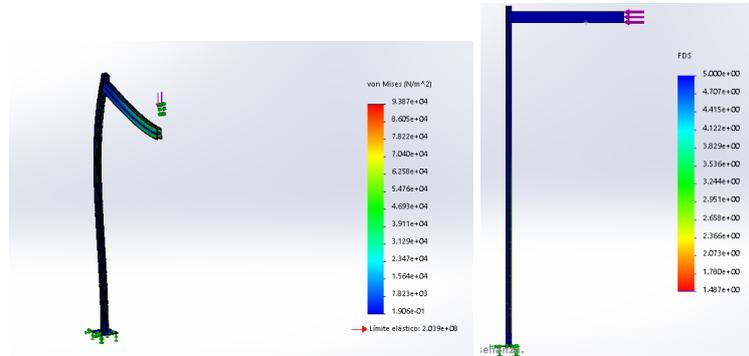


Fig. 4. Análisis de esfuerzo horizontal y vertical en la grúa de soporte de la plataforma.

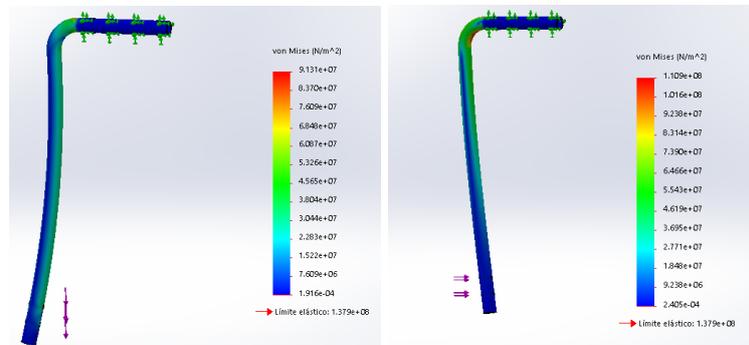


Fig. 5. Análisis de esfuerzo horizontal y vertical en los tubos de soporte para el arnés de la plataforma.

Se plantearon opciones como medición mediante sistemas como exoesqueletos, sistemas basados en visión, y sistemas inerciales. Filippeschi A et al. [4] hacen una reseña de distintos métodos utilizados para la captura del movimiento humano enfocada al miembro superior donde defienden que los sensores inerciales son una opción precisa y barata para la detección de movimientos humanos. Basándose en ésta reseña y otros artículos de investigación [11] [8] que demuestran las ventajas de los IMU sobre otro tipo de sensores, se decidió utilizar sensores inerciales de nueve ejes con acelerómetro, giroscopio y magnetómetro para capturar el movimiento del usuario del sistema. Los mismos envían la información a una unidad central de procesamiento. Para el proyecto se decidió utilizar una tarjeta Raspberry Pi 4, debido a su bajo costo y poder computacional. Se analizaron los puntos de interés para ésta aplicación y se propusieron 14 ubicaciones para la colocación de los sensores (figura 6), creando una red de sensores.

Debido a la naturaleza poco estable de los sensores inerciales, los giroscopios presentan derrapes en sus lecturas y los acelerómetros ruido excesivo, por esto

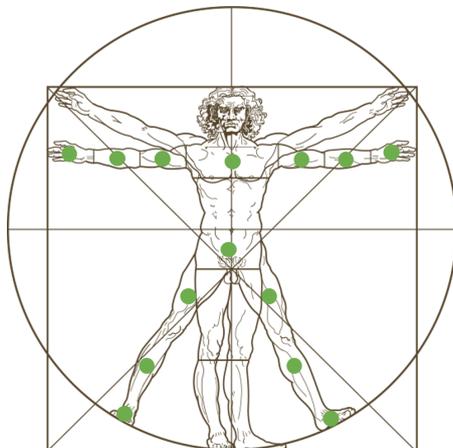


Fig. 6. Puntos de interés para el análisis de movimiento (Verde).

se utilizó un filtro de Kalman para una mejor estimación en las lecturas de los sensores. Las ventajas de este filtro radican en el uso de un modelo matemático, que estime el comportamiento de los sensores, y que al mismo tiempo considere las mediciones actuales [2]. El filtro de Kalman evalúa en cada ciclo el desempeño tanto de la estimación como de las mediciones y decide qué peso darle a cada uno. Se utilizaron las ecuaciones descritas en [9] para la implementación del filtro. La ecuación de estados utilizada (conocida comúnmente como matriz A) es:

$$A = \exp\left(\frac{T}{2}\omega\right), \quad (6)$$

donde ω es la matriz de velocidad angular, la cual puede ser calculada con las mediciones actuales del giroscopio:

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 & -w_z^i & w_y^i & 0 & 0 & 0 \\ w_z^i & 0 & -w_x^i & 0 & 0 & 0 \\ -w_y^i & w_x^i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -w_z^i & w_y^i \\ 0 & 0 & 0 & w_z^i & 0 & -w_x^i \\ 0 & 0 & 0 & -w_y^i & w_x^i & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$w_x^i w_y^i w_z^i$ son respectivamente las mediciones de cada eje de los giroscopios. Para el ruido de procesamiento se utilizó el ruido estimado de los giroscopios, ya que el cálculo de la orientación estimada depende de estos sensores, mientras que el ruido de medición se estima del ruido generado por los acelerómetros y magnetómetros respectivamente. Cabe recalcar que dichos valores, aunque se conocía un estimado gracias a las hojas de datos de los sensores, fueron calculados de manera experimental, aumentando y reduciendo cada uno hasta encontrar los valores óptimos.

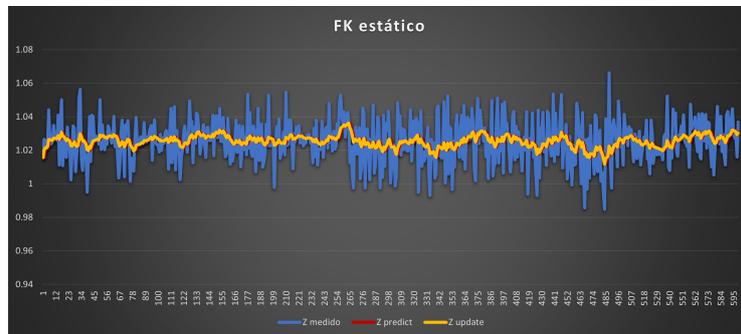


Fig. 7. Mediciones acondicionadas por el filtro de Kalman con el usuario estático.

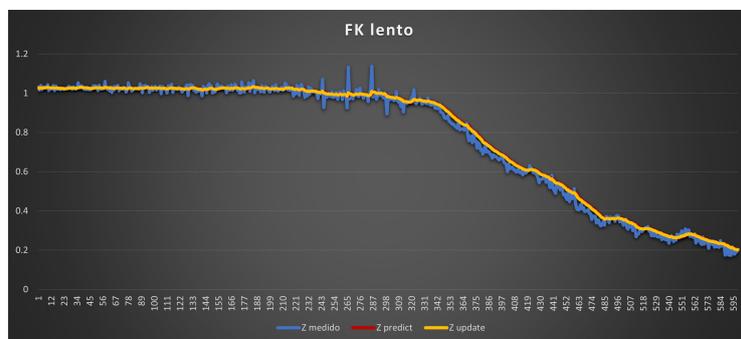


Fig. 8. Mediciones acondicionadas por el filtro de Kalman con el usuario realizando movimientos lentos.

Se probó el desempeño del filtro con mediciones de 3 casos diferentes, el sensor puesto sobre una superficie plana y sin movimiento (figura 7), el sensor siendo movido lentamente (figura 8) y el sensor siendo girado a través del eje x en múltiples ocasiones y de manera rápida (figura 9), siendo éste último el caso óptimo para la aplicación.

El usuario vestirá una red de sensores utilizando un arnés modificado, extendido a las extremidades del cuerpo (piernas y brazos) que se podrá usar sobre ropa ligera, donde se colocarán los IMUs utilizando un sujetador por cada IMU.

3.3. Adquisición de Señales de gestos Manuales

Para la adquisición de señales de gestos manuales se trabajó con la propuesta tecnológica de Shull et al. [7] que consiste un arreglo de sensores barométricos modificados colocados al rededor de la muñeca para la detección de gestos manuales. Un sistema como éste, además de no ser invasivo ya que deja libre el movimiento de los dedos, toma ventaja de la precisión de los barómetros para

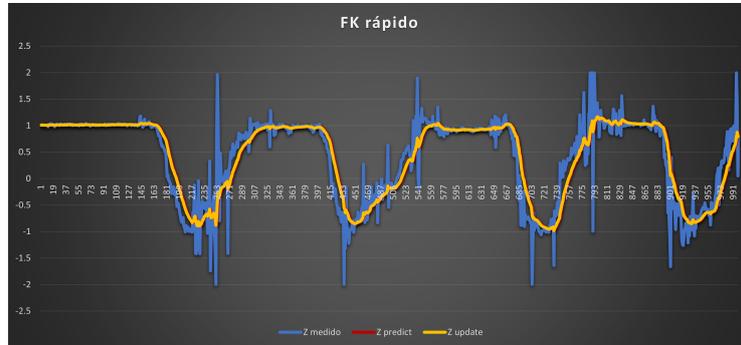


Fig. 9. Mediciones acondicionadas por el filtro de Kalman con el usuario realizando movimientos rápidos (caso ideal).

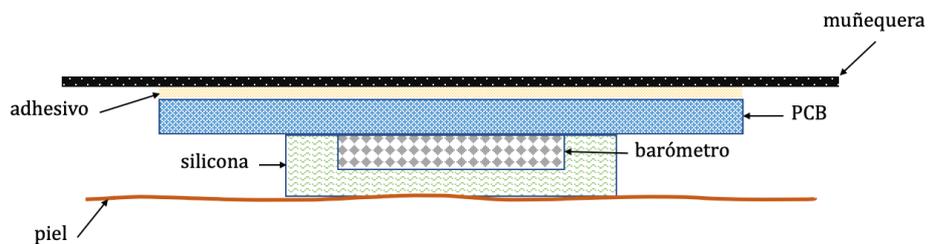


Fig. 10. Corte transversal de un barómetro modificado sujeto a la piel del usuario usando una muñequera.

medir la presión sobre su transductor y la utiliza para medir la tensión en los tendones de la muñeca encargados de articular los movimientos de la mano, alcanzando una precisión de hasta 94 % clasificando 10 gestos distintos.

Al igual que Shull et al. el proceso de la modificación de los barómetros se basa en el trabajo publicado por Tenzer et al. [13]. El objetivo es encapsular el transductor del barómetro en silicona para que en vez de que se detecte la presión atmosférica, al poner el sensor en contacto con la piel sobre los tendones de la muñeca, se detecte la presión ejercida sobre la silicona (figura 10). El diagrama de conexiones eléctricas entre el sistema de adquisición de señales de gestos manuales y la Unidad de procesamiento central incluye también el uso de multiplexores (figura 11). Estos sensores se adherirán en una muñequera ajustada con Velcro® en ambas manos del usuario.

La distribución de los sensores se eligió basándose en las pruebas hechas por Shull et al., donde se encontró que distribuyendo los sensores en estas posiciones se obtienen resultados de hasta 94 % de precisión (figura 12).

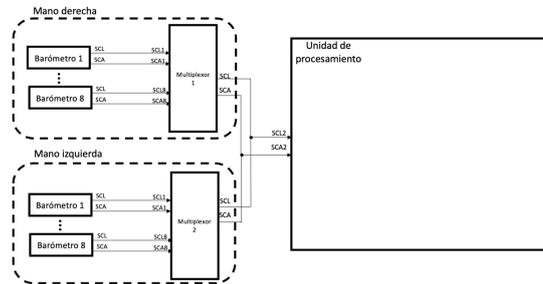


Fig. 11. Diagrama de conexiones eléctricas entre el sistema de adquisición de señales de gestos manuales.

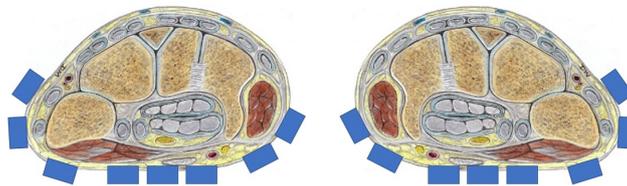


Fig. 12. Ilustración los puntos de contacto de los sensores con la muñeca izquierda y derecha. [3]

3.4. Traducción de datos a movimientos referenciados

Una representación matemática del cuerpo humano permitirá restringir las mediciones de los sensores IMU a ser interpretadas dentro de los límites físicos del cuerpo humano, previniendo así interpretar posiciones que serían imposibles de hacer por un ser humano, que podrían darse debido a errores en la medición.

En el 2004 Rong Zhu et al. [12] propusieron un método para obtener la posición de las partes del cuerpo basándose en el modelo matemático del cuerpo humano de Hanavan [6], el modelo fue modificado para aproximar los segmentos del cuerpo a líneas (figura 13).

Una vez optimizada la señal proveniente de los IMU se necesita traducirlas a las orientaciones relativas de los sensores entre ellos. Para esto se crearán cadenas cinemáticas conformadas por cada segmento del cuerpo como se propuso. El objetivo de esta referenciación es obtener las coordenadas finales de los miembros del cuerpo (manos, pies). Para esto fue fundamental ahondar en los métodos de estimación de orientación existentes para sensores inerciales. El algoritmo de Kalman provee una fusión de sensores para compensar las fallas de los magnetómetros y acelerómetros con las mediciones de los giroscopios, por esto, la proyección de la gravedad y de el norte geomagnético de la tierra son las herramientas a la mano para poder calcular la orientación de cada IMU. Para calcular la orientación de un marco de referencia con respecto a otro puede ser parametrizado utilizando una matriz de rotación entre el sistema coordenado de

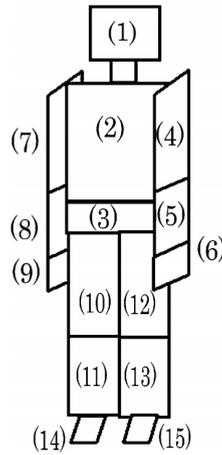


Fig. 13. Cuerpo humano recreado con 15 segmentos para su uso en el modelo matemático.

ejes ortogonales, a esta matriz de rotación se le conoce como matriz de cosenos directores (DCM). Normalmente se requiere conocer la orientación de un marco de referencia del cuerpo (BRF) y un marco de referencia fijo (FRF), en la mayoría de los casos de referenciación de orientación y dirección (AHRS por sus siglas en inglés) el marco de referencia fijo es el ofrecido por la tierra, usando la gravedad y el campo magnético, a este marco de referencia se le conoce como sistema NED (North, East, Down), y con base en este marco se calcula la orientación relativa del cuerpo a observar. Los métodos de estimación más comunes son la estimación con cuaterniones, el método TRIAD y el uso de ángulos euclidianos. Para éste proyecto conviene una parametización en la que se calcule la orientación relativa entre dos marcos de referencia, ya que la cadena cinemática nos dará finalmente la posición final del miembro del cuerpo. Debido a esto, se eligió la parametrización del método TRIAD. En el método TRIAD la DCM puede determinarse de al menos dos vectores observados [10]. Teniendo dos pares de vectores unitarios escritos como r_1 y r_2 en el marco de referencia fijo y b_1 y b_2 en el marco de referencia del cuerpo y por definición:

$$b_1 = Cr_1, b_2 = Cr_2, \quad (8)$$

donde C es la DCM. Esta ecuación puede ocuparse para determinar C de dos pares de vectores, sin embargo, la solución no es única, por lo que una solución balanceada se puede encontrar en la ecuación 9

$$C_{T3} = b_+r_+ + b_+r_+(b_+ \times b_-)(r_+ \times r_-)^T, \quad (9)$$

donde:

$$r_+ = \frac{r_2 + r_1}{|r_2 + r_1|}, r_- = \frac{r_2 - r_1}{|r_2 - r_1|}, \quad (10)$$

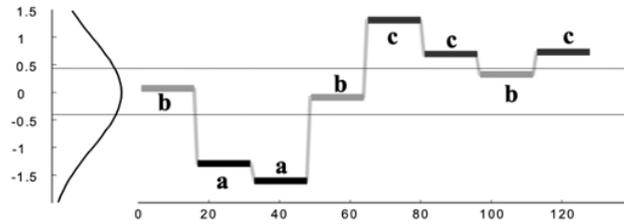


Fig. 14. Discretización realizada por el SAX.

$$b_+ = \frac{b_2 + b_1}{|b_2 + b_1|}, b_- = \frac{b_2 - b_1}{|b_2 - b_1|}. \quad (11)$$

Posteriormente, teniendo los dos vectores optimizados de g y H de los IMU_i e IMU_{i+1} es fácil notar que son correspondientes con el planteamiento del problema de estimación de orientaciones de un marco de referencia relativo entre segmentos del cuerpo humano, por esto se usó esa solución para proponer la matriz de rotación entre esos dos marcos de referencia con el método TRIAD, obteniendo matrices que fueron validadas en Matlab con diferentes pruebas donde se crearon cadenas cinemáticas para verificar los ejes de rotación y los ángulos relativos de los IMU.

Finalmente, con las matrices de rotación relativas entre los segmentos consecutivos de las cadenas cinemáticas del cuerpo humano se propusieron matrices de transformación y se verificó con coordenadas reales del traje de sensores.

3.5. Clasificación de movimientos

En esta sección se abordarán dos Sistemas de clasificación de movimientos, el Sistema de Clasificación de Movimientos Corporales (De ahora en adelante SCMC) y el Sistema de Clasificación de Gestos Manuales (De ahora en adelante SCGM).

Para el SCMC se utilizará un algoritmo de Time Series Classification, el cual constará de un algoritmo SAX (Aproximación de agregación simbólica por sus siglas en inglés), encargado de destemporalizar las medidas obtenidas de la referenciación y un clasificador 1-NN (Vecino más cercano por sus siglas en inglés) para identificar de qué movimiento se trata. El algoritmo SAX discretiza las señales obtenidas definiendo límites a partir de la media y desviaciones estándar de la curva (figura 14), les asigna un valor simbólico (en este caso letras) y las almacena dentro de un vector cada cierto tiempo. Posteriormente se realiza un barrido de dicho vector para determinar cuántas veces se repitieron secuencias de valores simbólicos iguales y dicha información la almacena en una matriz de frecuencia (para este proyecto de 9×9 , (figura 15)). Por otro lado, el clasificador 1-NN toma múltiples muestras de las matrices de frecuencia, creadas por el SAX, y crea una nueva matriz cuyos índices serán el promedio de los

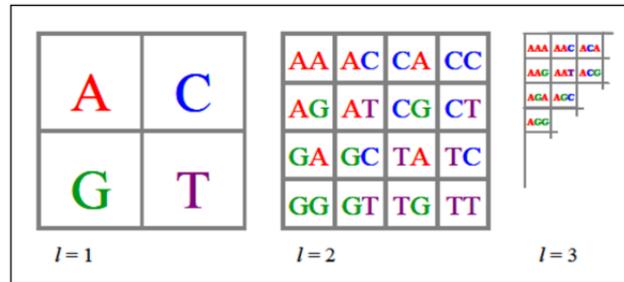


Fig. 15. Creación de matrices de frecuencia.



Fig. 16. Sujeto de pruebas realizando las acciones: agachado, correr y cambio de herramienta. Para el entrenamiento del algoritmo.

índices de todas la muestras obtenidas, a estas matrices se les conoce como centroides y existe un centroide por cada clase a clasificar. A este proceso se le conoce como "entrenamiento" del algoritmo, y para llevarlo a cabo se utilizó el traje de sensores y un sujeto de prueba. El entrenamiento consistió en el sujeto utilizando el traje y realizando continuamente durante 2 minutos uno de los movimientos a clasificar(figura 16), todas las matrices arrojadas por el SAX se almacenaban y procesaban para calcular el centroide correspondiente. Este proceso se repitió con cada uno de los movimientos a clasificar los cuales fueron: agacharse, saltar, correr, picar, usar, colocar, cambio de herramienta y permanecer parado. Finalmente, cada muestra nueva calculada por el SAX se compara con cada uno de los centroides calculados utilizando la distancia euclidiana (ecuación: 12). Aquel centroide al que la muestra es mas cercana es designado como su clase correspondiente (figura 17):

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - x_{kj})^2}. \tag{12}$$

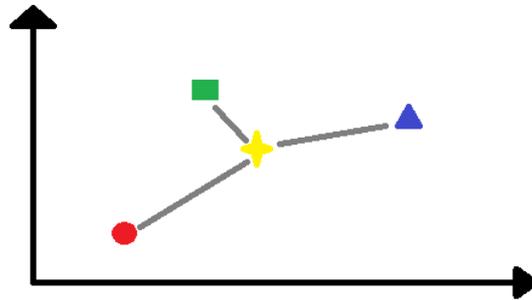


Fig. 17. Distancia a los centroides (modelo de 2 coordenadas).

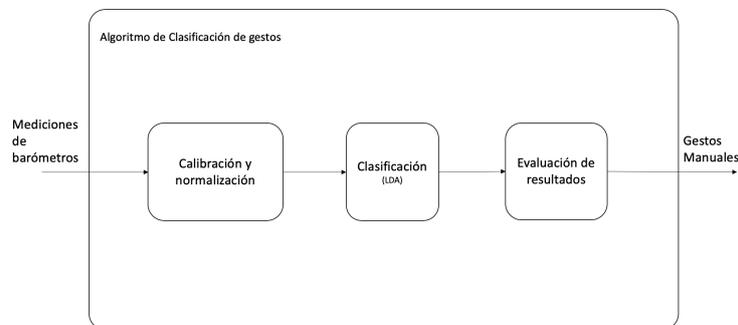


Fig. 18. Algoritmo de clasificación de gestos implementado.

Para el SCGM se desarrolló un algoritmo de clasificación parecido, también 1-NN, pero no se implementó el SAX en este caso pues no se necesitan clasificar movimientos sino solo gestos (figura 18). Al realizar las mediciones, la información de presión de los barómetros de ambas manos es ordenada en dos vectores para su clasificación.

El clasificador utilizado es un 1-NN. El entrenamiento supervisado se realizará midiendo la presión en los barómetros durante 3 minutos cuando la mano del usuario está abierta, cerrada y relajada. Finalmente se calculan los centroides de cada una y se comparan las nuevas mediciones con ellos. La implementación del clasificador seguirá la metodología propuesta por Ghogh B. y Crowley M. [5].

El funcionamiento integral del sistema de traducción de comandos puede representarse con el diagrama a bloques de la figura 19.

3.6. Transmisión de comandos

Teniendo los gestos del usuario identificados se procederá a enviar estos gestos definidos con su correspondiente traducción en el entorno virtual de

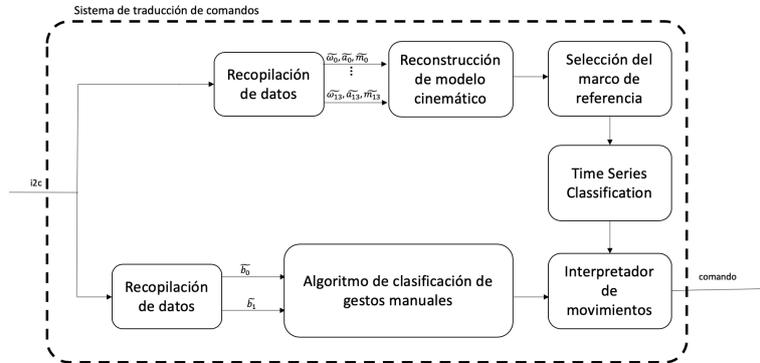


Fig. 19. Diagrama a bloques del sistema de traducción de comandos.

Tabla 2. Equivalencia entre las acciones a identificar, comando HID en el gamepad, comando AT enviado al modulo bluetooth y su boton respectivo en el entorno virtual.

Clase	Comando HID	Comando BLE	X-box
Parado	<i>else</i>	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x00	-
Correr	arrow_up	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,-1,0x00	Adelante
Saltar	a.button	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x01	a
Colocar	b.button	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x02	b
Usar	left_trigger	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x08	x
Atacar	right_trigger	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x10	y
Agachar	right.button	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x40	Lb
C. Herr.	right_stick	AT+BLEHIDGAMEPAD=0,0,0x80	Rb

pruebas. Y esto se hace mediante el uso de un módulo BLE (Bluetooth Low Energy) el cual puede interactuar con el entorno utilizando el protocolo de comunicación HID lo que le permite ser identificado como un Gamepad genérico.

El modo de operación que permitirá enviar la información deseada está descrito en el manual de usuario como “AT+BLEHIDGAMEPAD”, el cual envía una carga de datos específica de un HID gamepad por BLE.

Los parámetros de los movimientos naturales traducidos a comandos se almacenan en variables x y y para registrar el movimiento en esa dirección, tiene además, botones con direcciones 0x00-0xFF, lo cuál sirve como máscara para hasta 8 botones. Esta información se envía a módulo por medio de comandos AT y a su vez el módulo los comunica al entorno virtual el cual los identifica como activaciones de algún botón.

Las equivalencias de las clases identificadas a comandos AT y sus respectivas acciones en el entorno se presentan en la tabla 2.

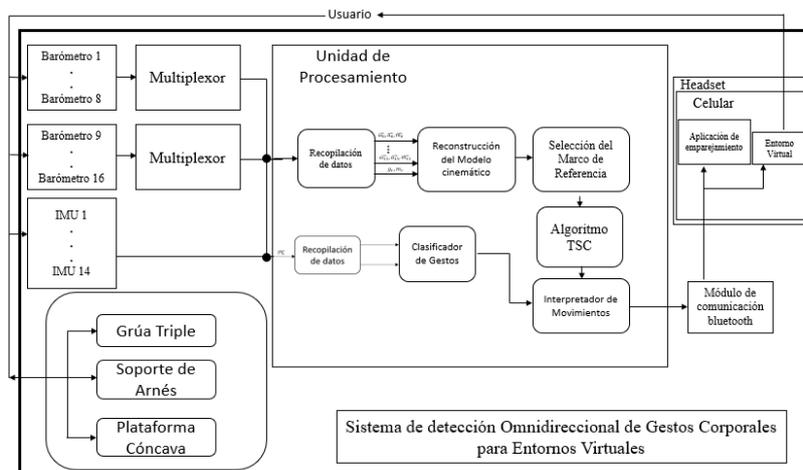


Fig. 20. Diagrama del funcionamiento completo del sistema.

3.7. Sistema completo

En el diagrama de la figura 20 se puede observar la estructura general del proyecto, tanto sus entradas como salidas, y la manera en la que interactúan unos elementos con otros. Se explica desde la manera en la que el usuario influye en el proyecto, también un apartado en el que se menciona la participación de la estructura en el proceso, siguiendo con la adquisición de señales de los sensores, la comunicación a través de I^2C , así como los multiplexores utilizados para la comunicación con los barómetros. Cabe recordar que la unidad de procesamiento mencionada en la cual se integró el proyecto fue una Raspberry Pi 4.

Un diagrama a bloques del funcionamiento y etapas del algoritmo de traducción de movimientos. Posteriormente su interpretación a la equivalencia en comandos para el entorno virtual y su posterior envío al teléfono móvil montado en un headset, para finalmente actuar como la salida por medio de su representación visual para el usuario.

4. Resultados

La integración de los subsistemas diseñados, resulta en un prototipo funcional con las siguientes características:

- La estructura es capaz de resistir las cargas máximas.
- La estructura permite al usuario saltar y agacharse.
- Se logró diseñar un sistema de caminata omnidireccional gracias a la forma de la plataforma elegida que brinda suficiente soporte para el usuario sin limitar el movimiento natural del mismo (figura 21).



Fig. 21. Prototipo de plataforma y sistema de detección integrados.

- Se implementó un algoritmo, basado en la teoría de Kalman, capaz de filtrar de manera confiable las lecturas del traje de sensores y posteriormente interpretarlas como gestos realizados por el usuario.
- El algoritmo de TSC implementado logra identificar 7 de 8 movimientos planteados. Tardando 0.8s en identificar la clase "corriendo", 2.1s "agachando", 1.5s "cambio de herramienta", 0.4s "colocando", "saltando" casi de manera inmediata, 0.8s "picando" 1.1s "parado". Desafortunadamente, durante las pruebas no se identificó la clase "golpear".
- Se logra transmitir los comandos al entorno virtual por medio de protocolo HID (figura 22).

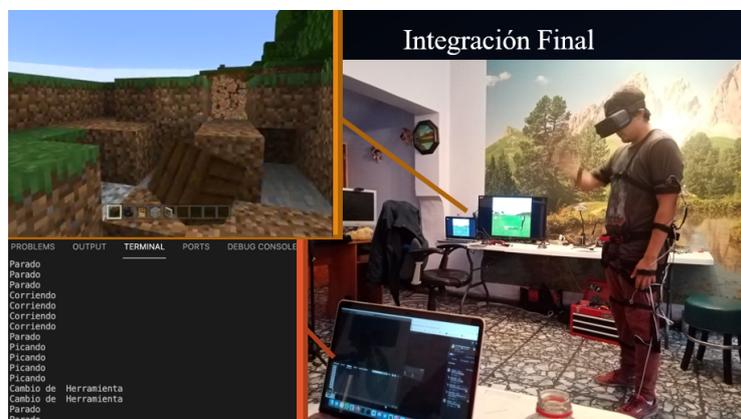


Fig. 22. Sistema integrado y funcional con usuario probando en entorno virtual de Minecraft VR (esquina superior izquierda) y monitoreado a través de la terminal de la Raspberry (esquina inferior izquierda).

5. Abreviaciones y acrónimos

- BLE- Bluetooth Low Energy
- CAD- Computer Aided Design
- HID- Human Interface Device
- IMU- Inertial Measurement Unit
- I²C- Inter-Integrated Circuit
- LDA- Lineal Discrimination Analysis
- TSC- Time Series Classification
- SCMC- Sistema de Clasificación de Movimientos Corporales
- SCGM- Sistema de Clasificación de Gestos Manuales
- VR- Virtual Reality

6. Conclusiones

Se desarrolló un sistema de sensores que propone una solución para capturar movimientos de todas las extremidades del cuerpo y los gestos manuales, sin necesidad de que el usuario sostenga con sus manos ningún dispositivo adicional ni del uso de cámaras, esto requirió la indagación en técnicas de clasificación y reveló las ventajas descubiertas en proyectos anteriores sobre el uso de algoritmos de TSC en conjunto con sensores IMU.

Se demostraron las ventajas de estructuras hiper estáticas, como la grúa triple aquí analizada, que brindaran mayor estabilidad debido a su simetría. El sistema de limitación del desplazamiento le permite al usuario simular movimiento omnidireccional sin desplazarse de su lugar. El soporte que se le brinda al usuario podrá resistir su peso total en caso de que éste pierda el equilibrio, por lo que su seguridad no se ve comprometida mientras esté en la plataforma.

Los análisis de esfuerzo realizados en la estructura demostraron la utilidad de los materiales seleccionados, desde la resistencia elástica de la plataforma de fibra de vidrio, así como la seguridad de que los soportes de acero pregalvanizado resistirán las cargas máximas a las que serán sometidos incluso tomando en cuenta un factor de seguridad de tres.

Se implementó un modelo matemático que en conjunto con el filtro de Kalman permite restringir las mediciones de los sensores y crear distintos marcos de referencia para la ubicación de las partes del cuerpo.

Se diseñó un Sistema de Detección de Gestos Manuales usando barómetros modificados que resulta favorable a ésta aplicación, dado que permite detectar los gestos de la mano realizando las mediciones desde la muñeca, dejando así que la mano se mueva de manera libre y natural, además de un sistema interpretador de comandos que permite traducir múltiples movimientos a la vez para enviar los comandos correspondientes a los gestos corporales que el usuario esté realizando. Todos estos algoritmos se ejecutan en una Raspberry Pi 4.

Por último, los comandos son transmitidos al entorno virtual por medio de Bluetooth Low Energy, debido a la estandarización de sus protocolos de envío de datos, mediante el uso de una tarjeta de desarrollo con una modalidad enfocada al envío de comandos compatibles con un HID gamepad, con compatibilidad de emparejamiento con dispositivos móviles.

En lo general, este diseño mecatrónico es una propuesta funcional, que implementa tecnologías multidisciplinarias que trabajan en conjunto. Éste proyecto integra alternativas de solución de diferentes áreas de la ingeniería, ofreciendo al usuario una experiencia de realidad virtual inmersiva. Con ello se comprueba la viabilidad del uso de sensores inerciales como una alternativa eficaz y de bajo costo para la interpretación de gestos corporales. En conjunto con la plataforma omnidireccional y los barómetros modificados, para la interacción entre el usuario y el entorno virtual, demuestran el potencial de esta tecnología en este nicho de desarrollo.

Referencias

1. Caminadora omnidireccional para realidad virtual, productos digitales moviles, <https://www.pdm.com.co/Noticias/2013/Marzo/04/Caminadora-omnidireccional-para-realidad-virtual.html>
2. van Biezen, M.: Lectures in the kalman filter, a
3. D'Antoni, A.: Clinically oriented anatomy, 7th edition, by keith l. moore, arthur f. dalley ii, and anne m. r. agur, baltimore, md: Lippincott williams & wilkins, 2014, 1134 pages, paperback, isbn 978-1-4511-1945-9. Clinical Anatomy, vol. 27 (03 2014) doi: 10.1002/ca.22316
4. Filippeschi, A., Schmitz, N., Miezal, M., Bleser, G., Ruffaldi, E., Stricker, D.: Survey of motion tracking methods based on inertial sensors: A focus on upper limb human motion. Sensors (Basel, Switzerland), vol. 17, no. 6 (June 2017) doi: 10.3390/s17061257
5. Ghogh, B., Crowley, M.: Linear and quadratic discriminant analysis: Tutorial, pp. 17 (06 2019)

6. Hatze, H.: A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments. *Journal of Biomechanics*, vol. 13, no. 10, pp. 833–843 (1980) doi: 10.1016/0021-9290(80)90171-2
7. Jiang, S., Zhu, Y., Zhu, X.: Hand gesture recognition and finger angle estimation via wrist-worn modified barometric pressure sensing. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. PP, pp. 1–1 (03 2019) doi: 10.1109/TNSRE.2019.2905658
8. Jirattigalachote, W., Hunt, M., Cutkosky, M., Delp, S.: Quantified self and human movement: A review on the clinical impact of wearable sensing and feedback for gait analysis and intervention. *Gait & Posture*, vol. 40 (05 2014) doi: 10.1016/j.gaitpost.2014.03.189
9. Manon Kok, J. D. H., Schön, T. B.: Using inertial sensors for position and orientation estimation, <https://www.tecnocurve.es/blog/2019/03/26/curvado-de-tubo-la-importancia-del-radio-de-curvado/>
10. MARKLEY, F.L., N.: Attitude determination using two vector measurements, http://www.archive.org/details/nasa_techdoc_19990052720
11. Patel, S., Park, H.-S., Bonato, P., Chan, L., Rodgers, M.: A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 9, pp. 21 (04 2012) doi: 10.1186/1743-0003-9-21
12. Rong Zhu, Zhaoying Zhou: A real-time articulated human motion tracking using tri-axis inertial/magnetic sensors package. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 295–302 (2004)
13. Tenzer, Y., Jentoft, L., Howe, R.: The feel of mems barometers: Inexpensive and easily customized tactile array sensors. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 21, pp. 89–95 (09 2014) doi: 10.1109/MRA.2014.2310152