

23. Tecnologías de la Información y Comunicación

Uso de GPS y acelerómetro para medir performance en deporte de élite

Carrilao Ávila, Guillermo Federico

gcarrilao@linti.unlp.edu.ar

LINTI - Laboratorio de Investigación en Nuevas Tecnologías Informáticas.

Universidad Nacional de La Plata

Resumen

La evolución de la exigencia en los deportes de élite en los últimos años ha sido un disparador para incorporar nuevas ciencias aplicadas al rendimiento deportivo, como ya lo es el análisis de datos hace tiempo, el cual tiene como función buscar una mejora de rendimiento individual y colectivo, prevenir lesiones y obtener un panorama táctico mucho más amplio. A partir de este enfoque es que se ha decidido emprender este desarrollo que consiste en el análisis del rendimiento deportivo aplicando lo que se conoce como internet de las cosas (IOT), por el cual se intenta conseguir una sistematización de análisis de datos a través de información capturada por sensores. Aunque estos dispositivos nos dan datos útiles para conseguir lo planteado, se necesita aplicar un cierto análisis matemático para poder conseguir datos más precisos y fiables. Por consiguiente en este artículo se describe el análisis y las problemáticas experimentadas en el proceso de medición de la aceleración, velocidad y distancia en tiempo real en deportistas utilizando una arquitectura de software que es ampliamente usada en el ambiente de IOT.

Palabras claves: Internet de las cosas, MQTT, MadgwickFilter, rendimiento físico, ESP8266.

Introducción

La combinación del análisis matemático, IOT y análisis de datos es un área de la informática que aún no se ha explotado en profundidad, a lo largo de este artículo se utilizarán estas tres aristas para lograr un conjunto de información que cambie el paradigma del análisis de información para los deportistas de élite. Se han utilizados conceptos matemáticos que ha requerido un profundo análisis, teniendo en cuenta la reducción de errores, resultados más precisos y reducción del costo de procesamiento. A su vez se ha tenido en cuenta los protocolos de comunicación más conveniente teniendo en cuenta la necesidad de tiempo real como precondition del desarrollo, tomando en cuenta dos puntos importantes; velocidad de transmisión y confiabilidad. Respecto a la representación de los datos se ha utilizado una plataforma abierta de análisis y monitoreo para evitar perder tiempo de implementación en una etapa del desarrollo que tiene como objetivo principal buscar precisión sobre los datos.

Objetivos

Aprovechando los nuevos dispositivos electrónicos de tracking y performance, se propone desarrollar, a nivel de prototipo software que permita registrar y analizar información suministrada en tiempo real

por tales dispositivos. En particular se trabajará con dispositivos de posicionamiento global o GPS y acelerómetros para registrar información referente a la velocidad, y distancia recorrida durante situaciones de juego. Esta información permitirá analizar e interpretar las exigencias en las diferentes áreas de entrenamiento: perceptivo, técnico, táctico y físico.

Materiales y Métodos

Para el armado del prototipo wearable se seleccionó un microcontrolador AdafruitHuzzah ESP8266 para programar la lógica del desarrollo, un MPU-9250 que nos provee datos de un acelerómetro, giroscopio y un magnetómetro y por último un GPS NEO-M8N para realizar en un futuro cercano un análisis de posicionamiento del deportista en el campo de juego. En los siguientes párrafos explicaremos como se trabajo con estas herramientas y qué resultados se obtuvieron.

1. Acelerómetro: MPU 9250

Para analizar cómo calcular la aceleración la primera pregunta en hacernos es: ¿Cómo funciona un acelerómetro?

Los acelerómetros son sensores que miden la aceleración, en otras palabras miden la tasa de cambio de la velocidad de un objeto. La aceleración ejercida por

la fuerza de gravedad en nuestro planeta es equivalente a $9,8 \text{ m/s}^2$ o $1G$, pero esto varía ligeramente con la altitud [3]. En nuestro caso se utilizó un acelerómetro capacitivo los cuales no calculan la aceleración a partir de que la velocidad cambia con el tiempo, sino midiendo la fuerza. ¿Cómo lo hacen? En términos generales, detectan cuánto presiona una masa sobre algo cuando una fuerza actúa sobre él. En este caso, si una masa en movimiento altera la distancia entre dos placas de metal, medir el cambio en su capacitancia da una medida de la fuerza que está actuando. A partir de ecuaciones en función de la fuerza se calcula la aceleración ejercida en los tres ejes del plano tridimensional(x,y,z):

$$\text{fuerza} = \text{aceleración} \times \text{masa} \quad (1)$$

$$\text{aceleración} = \text{fuerza}/\text{masa} \quad (2)$$

Capacitive accelerometer

www.explainthatstuff.com

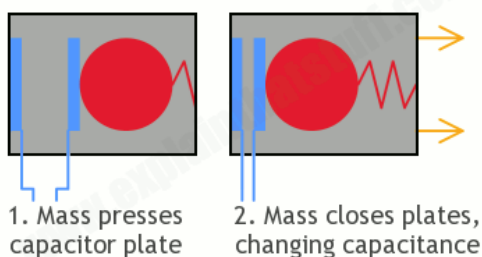


Figura 1 - La masa presiona los platos que se irán cerrando a medida que se aplique una fuerza

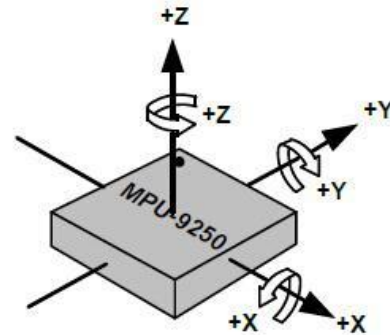


Figura 2

El principal problema para calcular la aceleración de un cuerpo en movimiento es cuando se tiene en cuenta la gravedad, si se deja el acelerómetro en una superficie plana en paralelo al suelo, los ejes tendrán los siguientes valores: $X=0; Y=0; Z=1$ (Medida en fuerza G , equivalente a 9.8 m/s^2) [2] [4] [7]. Pero el problema surge cuando esa aceleración ejercida sobre el eje Z se distribuye sobre los demás, si no se realiza algún tipo acción con respecto a esto, se tendrá como resultado una constante aceleración por parte del dispositivo; una manera de responder ante esto es utilizar el giroscopio, acelerómetro y magnetómetro del MPU para determinar la rotación de nuestra placa y poder sustraer la fuerza gravitacional ejercida sobre cada eje.

2. Aceleración lineal

La aceleración lineal es la aceleración de un cuerpo con la particularidad que no se tiene en cuenta la aceleración ejercida por

la fuerza de gravedad, para calcularla tomarán un papel importante los cuaterniones, estos son vectores que nos permitirán saber la orientación de un objeto en un momento dado con respecto al eje de la Tierra, el método elegido para calcular los cuaterniones fue el filtro desarrollado por SebastianMadgwick, la explicación del mismo excede a este artículo, pero explicaremos brevemente cómo funciona y cómo se aplicó. En los próximos párrafos se explicará qué es un cuaternión y que propiedades tiene para conseguir una mejor comprensión de lo que se realizó.

Un cuaternión es un número complejo de cuatro dimensiones que se puede usar para representar la orientación de un cuerpo en un espacio tridimensional [9][10]. Se puede lograr una orientación arbitraria desde un frame B con respecto a un frame A a través de una rotación del ángulo θ alrededor del eje ${}^A r$ definido en el frame A, tal como se representa en la figura 3. El cuaternión que describe esta orientación ${}^A_B q$, se define mediante la ecuación (1) donde $r_x r_y r_z$ definen las componentes del vector ${}^A r$ en los ejes x, y y z del frame A respectivamente.

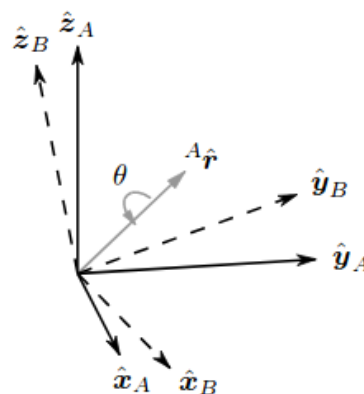


Figura 3

$${}^A_B q = [q_1 q_2 q_3 q_4] = \left[\cos \frac{\theta}{2} - r_x \sin \frac{\theta}{2} - r_y \sin \frac{\theta}{2} - r_z \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (3)$$

El cuaternión conjugado se denota con un *, por ejemplo ${}^A_B q^* = {}^B_A q$ es el conjugado de ${}^A_B q$, este nuevo cuaternión representa la orientación pero vista desde el otro lado, es decir que ${}^B_A q$ describe la

orientación relativa desde el frame A con respecto al frame B. Teniendo en cuenta esto al conjugado se lo define como:

$${}^A_B q^* = {}^B_A q = [q_1 - q_2 - q_3 - q_4] \quad (4)$$

Siguiendo con conceptos básicos, dados dos cuaterniones a y b , el producto cuaternión de ambos puede ser determinado utilizando una regla denominada Hamilton o también producto Hamiltoniano que es definida de la siguiente manera:

$$p = a \otimes b = [a_1 a_2 a_3 a_4] \otimes [b_1 b_2 b_3 b_4] = [p_1 p_2 p_3 p_4] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p_1 &= a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ p_2 &= a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 + a_4 b_3 \\ p_3 &= a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 - a_4 b_2 \\ p_4 &= a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_3 b_2 - a_4 b_1 \end{aligned}$$

Como describimos previamente, un vector en un plano tridimensional puede ser rotado utilizando un cuaternión, al ser un vector de tres dimensiones debemos insertar un valor arbitrario por ejemplo 0 para que sean vectores de cuatro dimensiones logrando una compatibilidad con los cuaterniones, por lo tanto si ${}^A v$ representa el vector del frame A, la rotación hacia un frame B tendrá como resultado un vector ${}^B v$ que representa el vector ${}^A v$ pero rotado hacia el frame B, lo descrito está enunciado a continuación:

$${}^B v = {}^A q \otimes {}^A v \otimes {}^B q \quad (6)$$

Teniendo en cuenta los conceptos y propiedades explicadas, lo que se logra con el método Madgwick es poder encontrar un cuaternión ${}^L_G q$ donde L sería el frame local, es decir la orientación del dispositivo en un momento dado y G el frame que representa la orientación con respecto a la Tierra, lo realizado para sustraer la gravedad de los ejes de la aceleración es rotar el vector de gravedad hacia a la orientación que tenga el dispositivo.

Por lo tanto es sencillo encontrar la orientación inversa aplicando las propiedades anteriormente vistas:

$${}^L_G q^* = {}^G_L q \quad (7)$$

$${}^L_G q = (q_1 q_2 q_3 q_4) \quad (8)$$

$${}^G_L q = (q_1 - q_2 - q_3 - q_4) \quad (9)$$

Una vez calculado ${}^G_L q$, para encontrar el vector de gravedad rotado debemos realizar la rotación cuaternión que describimos en la ecuación (6). La fuerza de gravedad se la puede representar como ${}^G g = (0,0,0,1)$ valuada en Fuerza G ($1G = 9.8m/s^2$) teniendo en cuenta que el primer valor del vector es insertado para que para que sea un vector de cuatro dimensiones.

$${}^L g = {}^G_L q \otimes {}^G g \otimes {}^L_G q \quad (10)$$

${}^L g$ es el vector de gravedad rotado

Como mencionamos el producto hamiltoniano realiza otro tipo de producto, y teniendo en cuenta que:

$${}^G_L q = (q_1 - q_2 - q_3 - q_4)$$

$${}^G g =$$

(0,0,0,1)

El resultado del primer producto es igual a:

$$p = {}^G_L q \otimes {}^G g = (p_1 p_2 p_3 p_4)$$

$$p_1 = q_1 g_1 - q_2 g_2 - q_3 g_3 - q_4 g_4$$

$$p_2 = q_1 g_2 + q_2 g_1 + q_3 g_4 + q_4 g_3$$

$$p_3 = q_1 g_3 - q_2 g_4 + q_3 g_1 - q_4 g_2$$

$$p_4 = q_1 g_4 + q_2 g_3 - q_3 g_2 - q_4 g_1$$

$$p_1 = q_1 0 - q_2 0 - q_3 0 - q_4 1 = -q_4$$

$$p_2 = q_1 0 + q_2 0 + q_3 1 + q_4 0 = q_3$$

$$p_3 = q_1 0 - q_2 1 + q_3 0 - q_4 0 = -q_2$$

$$p_4 = q_1 1 + q_2 0 - q_3 0 - q_4 0 = q_1$$

Dado p podemos proseguir a realizar el segundo producto hamiltoniano:

$${}^L g = p \otimes {}^L_G q = (g_1 g_2 g_3 g_4)$$

$$g_1 = p_1 q_1 - p_2 q_2 - p_3 q_3 - p_4 q_4$$

$$g_2 = p_1 q_2 + p_2 q_1 + p_3 q_4 + p_4 q_3$$

$$g_3 = p_1 q_3 - p_2 q_4 + p_3 q_1 - p_4 q_2$$

$$g_4 = p_1 q_4 + p_2 q_3 - p_3 q_2 - p_4 q_1$$

=

$$g_1 = q_4 q_1 + q_3 q_2 - q_2 q_3 + q_1 q_4$$

$$g_2 = q_4 q_2 - q_3 q_1 + p_2 q_4 - q_1 q_3$$

$$= 2(q_4 q_2 - q_1 q_3)$$

$$g_3 = q_4 q_3 + q_3 q_4 + q_2 q_1 + q_1 q_2$$

$$= 2(q_3 q_4 + q_2 q_1)$$

$$g_4 = q_1 q_4 - q_3 q_3 - q_2 q_2 + q_1 q_1$$

Una vez obtenido el vector de gravedad rotado pasamos el vector a tres dimensiones:

$${}^L g = (g_2 g_3 g_4) = (g_x, g_y, g_z) \quad (11)$$

${}^L g$ nos determina cuánta aceleración de gravedad influye en cada eje. Como mencionamos anteriormente hallar el cuaternión no es nada trivial por lo cual se evitó realizar una explicación exhaustiva, sin embargo es importante resaltar que el método Madgwick utiliza el acelerómetro, giroscopio y magnetómetro del MPU 9250 para encontrarlo.

Retomando con el problema inicial, solo nos queda restar el vector de gravedad rotado con las mediciones de aceleración que devuelve el acelerómetro. Teniendo en cuenta que las medidas se representan de la siguiente manera $a = (a_x, a_y, a_z)$

$$a_c = a - {}^L g \quad (12)$$

Finalmente hemos encontrados la aceleración lineal que utilizaremos para calcular el módulo de la aceleración, velocidad y distancia en un momento dado.

3. Aceleración, velocidad y distancia.

El análisis principal del proyecto tiene como objetivo calcular el rendimiento de los deportistas de élite, por lo tanto lo primero en analizarse es la velocidad y distancia recorrida en un entrenamiento o partido [2]. Los cálculos se realizan realizando una integración simple sobre la aceleración y luego una doble para calcular la distancia recorrida.

Dado los 3 ejes de aceleración de un objeto es sencillo calcular la aceleración total, realizando el módulo del vector a , calculando la magnitud total de la aceleración obtenida en un momento determinado, que no es más que número real que representa la longitud del vector a :

$$a_T = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (13)$$

Una vez calculada la aceleración podemos seguir con el cálculo de la velocidad.

$v(t) = v_0 + \int_a^b a * dt$ (14), donde v_0 es nuestra velocidad inicial, y la integración entre un intervalo de tiempo de una aceleración dada(a,b) [8]. Teniendo en cuenta las cuentas de integración se

buscaron alternativas para implementar dentro del arduino. La opción elegida fue la regla del trapecioide que realiza un cálculo numérico de integrales bastante precisos cuando se trata de intervalos de tiempos pequeños.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{k=1}^N \frac{f(x_{k-1})+f(x_k)}{2} \Delta x_k \quad (15)$$

Regla de Trapecioide

$$\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$$

Donde Δx_k representa el intervalo de tiempo entre cada muestra

Por lo tanto el análisis que se realizó fue tomar muestras de aceleraciones en pequeños intervalos de tiempo, en nuestro caso de 300 milisegundos, y realizar la sumatoria de manera constante. Utilizando lo visto anteriormente, se aplica los mismos mecanismos de integración para calcular el desplazamiento o también llamada distancia recorrida:

$$d(t) = d_0 + \int_a^b v * dt \quad (16)$$

Distancia recorrida

4. Marco de trabajo

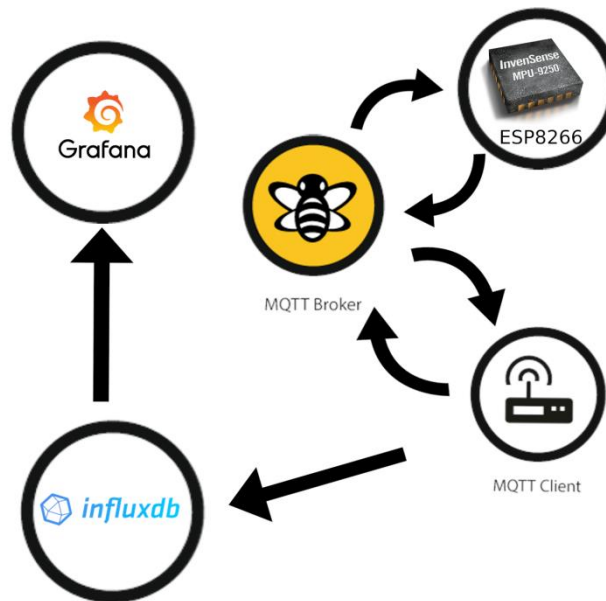


Figura 4

Para simplificar cuestiones de software se seleccionó Grafana como visualizador de los datos e InfluxDB como base de datos orientada a tiempo. La comunicación en esta parte del proyecto en una primera instancia se realizó a través de una API REST desarrollada en Python que se comunicaba con el ESP8266 para recopilar información, debido a la lentitud de HTTP por la carga de datos se migró el proyecto a MQTT, un protocolo de comunicación ampliamente usado en Internet de las cosas. El envío de datos se realiza cada 350 milisegundos utilizando un QOS (Qualityofservice) igual a 0, esto quiere decir que nuestro cliente MQTT alojado en el microcontrolador envía datos al Broker MQTT sin esperar una

confirmación. De esta manera se obtuvo una gran mejora reduciendo la carga de datos de nuestros paquetes y también liberando carga de procesamiento en el ESP8266.

Para realizar una reducción de ruido en la toma de datos se realizó un promedio de las muestras, las mismas se toman cada 10ms, calculando el promedio luego de 30 muestras [5]. Lo descrito anteriormente se puede representar de la siguiente manera:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (17)$$

Cálculo de reducción de ruido de datos de entrada

Donde x representa los datos de entrada, M la cantidad de muestras realizadas, y el índice i representa el momento en que se envían los datos al broker MQTT.

4. Resultados y Discusión

Los resultados a continuación fue el recorrido de 5 cuadras a ritmo acelerado de a tramos:

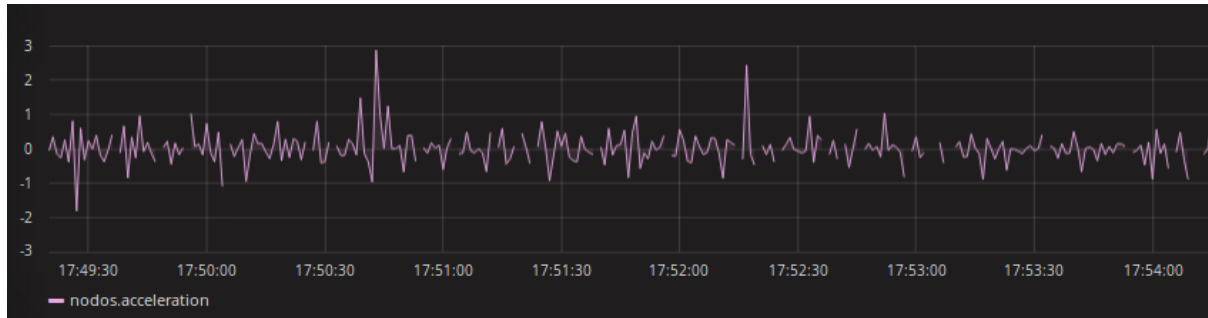


Figura 5 - Aceleración

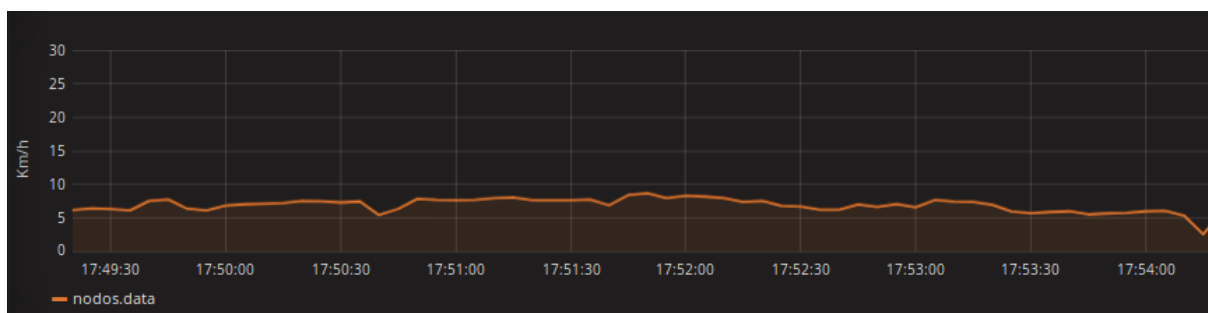


Figura 6 - Velocidad

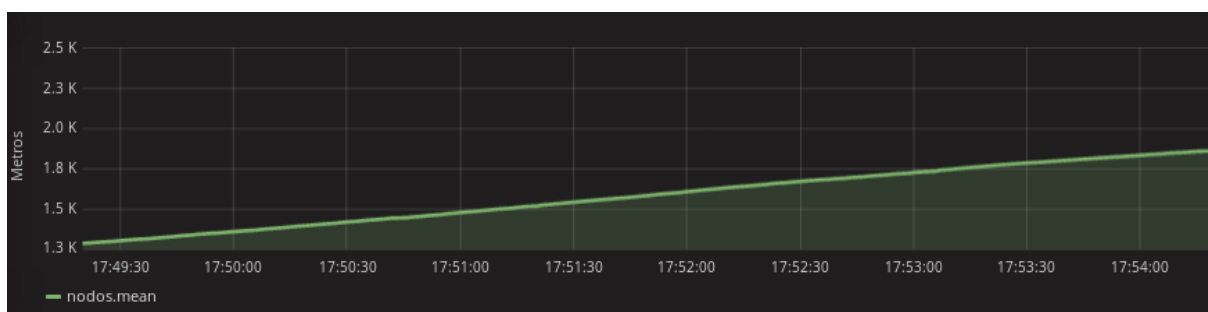


Figura 7 - Distancia

Conclusiones

Si bien el proyecto continúa en proceso de investigación, se ha analizado si los resultados obtenidos son suficientes. Por

características intrínsecas de los sensores que tienden a poseer errores de arrastre (drift) nos hemos visto obligados a investigar acerca de filtros que ayuden a

mejorar los resultados de las medidas realizadas [1] [6], también estos métodos son soluciones que proponen la colaboración del acelerómetro, giroscopio y GPS para realizar estimaciones mucho más precisas, sobre todo con lo respecta a la utilización del GPS reduciendo un error de 5 o 10 metros a simplemente un error menor a 2 metros. Como primera instancia de desarrollo, es una muy buena aproximación a lo que se denomina motion tracking, que nos servirá como base para realizar un producto fiable y preciso que genere un impacto en el análisis del ámbito deportivo.

Bibliografía

- [1] IMU Errors and Their Effects. February 2014.
- [2] Oscar Camacho and Kurt Seifert. Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers. page 13, February 2007.
- [3] Invensense. MPU - 9250 Product Specification Revision 1.1, June 2016.
- [4] Henry F. S. Martin. Overcoming the challenges of low-cost inertial navigation. PhD thesis, October 2016.
- [5] Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. PhD thesis.
- [6] Ch iChiu TSANG. Error Reduction Techniques for a MEMS Accelerometer-

based Digital Input Device. Master's thesis, March 2008.

- [7] Wikipedia. Inertial navigation system.
- [8] Wikipedia. Numerical integration.
- [9] Wikipedia. Quaternions and spatial rotation.
- [10] Xuan-cheng Zhou, Jian-xin Chen, Xi-roo Lu, and Yi Dong. A quaternion-based orientation estimation algorithm with adaptive interpolation for wearable computing. 2013

Agradecimientos

Agradezco a mis dos directores, Laura Fava y Diego Vilches que me han acompañado en todo momento durante la escritura de este artículo, y ayudándome a proyectar una posible tesis de fin de grado. Y al laboratorio de investigación LINTI por brindarme las herramientas necesarias y el espacio para poder llevar a cabo este proyecto.