

UN ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE ORIENTACIÓN ESPACIAL Y SU IMPLEMENTACIÓN EMBEBIDA UTILIZANDO SENSORES MICROELECTROMECAÓNICOS

AN ATTITUDE ESTIMATION ALGORITHM AND ITS EMBEDDED IMPLEMENTATION USING MICROELECTROMECHANICAL SENSORS

Ignacio Sánchez y Alejandro Limache

^a*CIMEC Centro de Investigación de Métodos Computacionales, UNL, CONICET, Col. Ruta 168 s/n, Predio Conicet "Dr Alberto Cassano", 3000 Santa Fe, Argentina*

Palabras clave: Orientación, Estimación, Unidad de Medición Inercial (UMI)

Resumen. La estimación de la orientación espacial de un objeto o cuerpo rígido es fundamental para muchas aplicaciones, tales como la estabilización y guiado de vehículos no tripulados y control de actuadores robóticos -en el ámbito de las aplicaciones de control-, así como el análisis y determinación de postura o deambulación -para estudios de biomecánica-. Un enfoque práctico para realizar dicha es la utilización de sistemas microelectromecánicos MEMS (del inglés, Microelectromechanical Systems), dado su bajo costo y exactitud relativamente alta. En este documento, presentamos un algoritmo de estimación de orientación espacial basado en filtrado complementario. Se estudian diferentes configuraciones de sensores, que proveen una orientación reducida (elevación y guiñada) o una orientación completa (elevación, guiñada y dirección). El algoritmo es simple y computacionalmente económico, permitiendo la ejecución en tiempo real sobre microcontroladores con limitados recursos computacionales. Finalmente, se presenta la implementación del algoritmo en un dispositivo de bajo costo de desarrollo propio, cuyos componentes destacados son un microcontrolador y una unidad de medición inercial de nueve grados de libertad, conformada por un acelerómetro, un magnetómetro y un giróscopo, cada uno de tres ejes. Se presentan estimaciones obtenidas para distintos escenarios de prueba.

Keywords: Attitude, Estimation, Telemetry, Inertial Measurement Unit (IMU)

Abstract. Attitude estimation is critical for many applications, such as unmanned vehicles stabilization and guiding and robotic actuators control -for control applications- or posture and gait detection -for biomechanics applications-. A very frequent approach for this is based on the use of Microelectromechanical Systems (MEMS) inertial sensors since they are low-cost and relatively accurate. In this document, we introduce an attitude estimation algorithm based on complementary filtering. Different sensor configurations for the attitude estimation are studied, providing reduced (pitch, roll) and complete (pitch, roll, heading) attitude information. The algorithm is simple and computationally economic in order to be run embedded in a limited-resources microcontroller. Finally our implementation of the algorithm on a low-cost device is presented, whose main components are a microcontroller and a low-cost 9-DoF MEMS Inertial Measurement Unit (IMU), which consists of an accelerometer, a magnetometer and a gyroscope, 3-axis each. We present the resulting estimations for different test scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

Las unidades de medición inercial (IMU, del inglés, inertial measurement unit) basadas en MEMS (microelectromechanical systems) se utilizan con frecuencia en diferentes aplicaciones, entre ellas son sobresalientes las aplicaciones de robótica, y biomecánica, entre otras. Las IMUs básicas más frecuentemente encontradas incluyen acelerómetro y giróscopo de tres ejes, y en muchos casos se incluye un magnetómetro. Los acelerómetros miden la fuerza de reacción sobre una masa de prueba, siendo útiles para calcular aceleración lineal. A partir de la dirección de la aceleración gravitacional, se puede estimar los ángulos de elevación y guiñada (*pitch* y *roll*). Los giróscopos miden la velocidad de rotación angular del instrumento. La integración de esta medición permitiría conocer la orientación en cada momento. Sin embargo, la exactitud de estos sistemas se ve afectada por bias, error de escalado y no ortogonalidad de los ejes de medición. Para una estimación adecuada de la orientación es necesario considerar y compensar estos defectos. Los algoritmos para la estimación de actitud son de interés investigativo, proponiendo el uso distintas de metodologías para la estimación (Kalman Lineal, Kalman No Lineal, Filtros Complementarios, etc.), también se aplica sobre distintas representaciones de rotaciones, por ejemplo Matrices de Cosenos Directores, Euler, ER, Cuaterniones (ver [Hyyti y Visala \(2015\)](#); [Wu et al. \(2016\)](#)). En este trabajo, considerando la aplicación en microcontroladores de mínimas prestaciones, proponemos el algoritmo con menor cómputo posible y la mínima representación, utilizando filtros complementarios y ángulos de Euler, respectivamente. Algunos trabajos presentan implementaciones en hardware relativamente complejo con respecto al número de componentes electrónicos y dispositivos interconectados ([Saealal et al. \(2017\)](#); [Vasconcelos et al. \(2011\)](#)). El presente trabajo está organizado en seis secciones. La sección 2 es una revisión preliminar del contexto de la estimación de orientación y filtrado complementario. La sección tres presenta el modelado de las mediciones y las estimaciones a realizar. La sección 4 presenta conceptualmente la implementación del algoritmo. En la sección 5 se presenta el hardware utilizado. Finalmente la sección 6 incluye la experimentación y análisis de resultados, seguidos por las conclusiones.

2. PRELIMINARES

2.1. Notación

Dado un vector \vec{v} , su expresión en una base A se indica como ${}^A v \in \mathbb{R}^3$ y sus elementos se denotan con los subíndices usuales $\{x, y, z\}$ ó $\{1, 2, 3\}$. Por ejemplo, en la base A :

$${}^A v = [{}^A v_x \quad {}^A v_y \quad {}^A v_z]^T$$

o, bien,

$${}^A v = [{}^A v_1 \quad {}^A v_2 \quad {}^A v_3]^T$$

Equivalentemente, cuando la base sea un marco de referencia tridimensional, el superíndice a la izquierda indica el marco de referencia en el que está expresado. En el caso de velocidades angulares se indicará con un subíndice A/B indicando que se trata de la velocidad del marco A con respecto del marco B , de ser necesario por claridad.

Grupo SO3 (Matrices de Rotación) El conjunto de matrices de rotación 3×3 forman un grupo, conocido como el grupo especial ortogonal, $SO(3)$, definido como

$$SO(3) = \{R : R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, R^T R = I_{3 \times 3}, \det(R) = 1\} \quad (1)$$

Para matrices de rotación, un subíndice y un superíndice a la izquierda indican los marcos de referencia de origen y destino de la rotación. Por ejemplo, ${}^{NI}R$ indica la rotación del marco I al

marco N .

Marco Norte-Este-Abajo (NED, del inglés North-East-Down): Este marco (N) tiene su eje x apuntando hacia el Norte, el eje y hacia el este y el eje z apuntando hacia abajo, y usualmente tomaremos su origen como coincidente con el marco de instrumentación.

Marco de Instrumentación (I): Es un marco fijo a la unidad de medida inercial.

Marco Magnético (M): Es un marco de referencia cuyo eje x apunta hacia el norte magnético terrestre, el eje z es coincidente con el eje z del marco NED y el eje y es normal a los ejes x y z .

Orientación: La orientación del marco de instrumentación respecto del NED está descripta por los tres ángulos de Euler $\Theta = (\phi, \theta, \psi)$, los que, en el ámbito de la aeronavegación, se denominan respectivamente ángulo de guiñada ($-\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$), elevación ($-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$) y dirección ($-\pi \leq \psi \leq \pi$). Dado un vector v , sus componentes en el marco NED ${}^N v$ y en el marco i están relacionadas por

$${}^N v = {}^{NI} R {}^I v \quad (2)$$

donde ${}^{NI} R$ es la matriz de rotación dada por

$${}^{NI} R = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - s\phi s\psi & s\phi c\psi s\theta + s\phi s\psi \\ s\theta s\psi & s\theta s\phi s\psi + c\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde c y s denotan \cos y \sin respectivamente. Las derivadas de los ángulos de Euler $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ con respecto al tiempo pueden expresarse como

$$\dot{\Theta} = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T = B(\phi, \theta, \psi) {}^I \omega \quad (4)$$

donde $B(\phi, \theta, \psi)$ es la matriz dada por

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) \sec(\theta) & \cos(\phi) \sec(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

y ${}^I \omega$ es la velocidad angular del marco I respecto del N , expresada en el marco I .

2.2. Filtrado complementario

Los filtros complementarios consisten en un banco de filtros tales que la respuesta en frecuencia del banco completo, es decir, la suma de las funciones de transferencia de cada uno de los filtros, es una respuesta plana

$$H_T(s) = \sum_{i=1}^N H_i(s) = 1$$

Considerando un banco de filtros formado por dos elementos $\{H_1(s), H_2(s)\}$, queda el filtro de la figura 1. El modelo del filtro complementario está dado por

$$\hat{\Theta} = H_1(s)\Theta_1 + H_2(s)\Theta_2 \quad (6)$$

donde Θ_1 y Θ_2 son dos mediciones de la misma variable y $\hat{\Theta}$ es la salida del filtro.

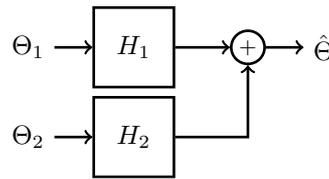


Figura 1: Esquema del filtro complementario de dos elementos

2.2.1. Filtros Pasa Bajo Discreto de primer orden

Utilizando la siguiente ecuación de un filtro pasabajos de primer orden con frecuencia de corte ω_0 :

$$H_{LP} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\frac{s}{\omega_0} + 1} \quad (7)$$

que corresponde a la ecuación temporal

$$\frac{\dot{y}(t)}{\omega_0} + y(t) = x(t) \quad (8)$$

Discretizando la ecuación anterior, aproximando la derivada por el método de Euler en el tiempo k obtenemos:

$$\frac{y[k] - y[k-1]}{\omega_0 \Delta t} + y[k] = x[k] \quad (9)$$

Resolviendo para $y[k]$:

$$y[k] + \omega_0 \Delta t y[k] = \omega_0 \Delta t x[k] + y[k-1] \quad (10)$$

$$y[k] = \frac{\omega_0 \Delta t x[k] + y[k-1]}{(1 + \omega_0 \Delta t)} \quad (11)$$

$$y[k] = \frac{\Delta t}{(\frac{1}{\omega_0} + \Delta t)} x[k] + \frac{\frac{1}{\omega_0}}{(\frac{1}{\omega_0} + \Delta t)} y[k-1] \quad (12)$$

Definiendo $\alpha_{LP} = \frac{\Delta t}{(\frac{1}{\omega_0} + \Delta t)}$

$$y[k] = \alpha_{LP} x[k] + (1 - \alpha_{LP}) y[k-1] \quad (13)$$

2.2.2. Filtros Pasa Alto Discreto de primer orden

Utilizando la siguiente ecuación de un filtro pasaaltos de primer orden con frecuencia de corte ω_0 :

$$H_{HP} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{s}{\omega_0}}{\frac{s}{\omega_0} + 1} \quad (14)$$

que corresponde a la ecuación temporal

$$\frac{\dot{y}(t)}{\omega_0} + y(t) = \dot{x}(t) \quad (15)$$

Discretizando la ecuación anterior, aproximando la derivada por el método de Euler en el tiempo k obtenemos:

$$\frac{y[k] - y[k-1]}{\omega_0 \Delta t} + y[k] = \frac{x[k] - x[k-1]}{\omega_0 \Delta t} \quad (16)$$

Resolviendo para $y[k]$:

$$y[k] - y[k-1] + \omega_0 \Delta t y[k] = x[k] - x[k-1] \quad (17)$$

$$y[k] = \frac{x[k] - x[k-1] + y[k-1]}{1 + \omega_0 \Delta t} \quad (18)$$

Definiendo $\alpha_{HP} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0} + \Delta t}$

$$y[k] = \alpha_{HP} (x[k] - x[k-1] + y[k-1]) \quad (19)$$

2.3. Filtrado Complementario para la estimación de orientación

La suma de la salida de ambos filtros resulta en una filtro pasa-todo de ganancia unitaria, que utilizaremos para la estimación de la orientación espacial. El filtrado complementario es útil para la estimación de orientación y en este trabajo se realizará por medio de la aplicación de un filtro pasa-bajos a una estimación de orientación con validez para baja frecuencia -correspondiente a la obtenida del acelerómetro- y un filtro pasa-altos a una estimación de orientación con validez para alta frecuencia, -que corresponderá a la obtenida por integración del girómetro. Entonces:

$$H_1(s) = H_{LP}$$

$$H_2(s) = H_{HP}$$

Considerando los datos obtenidos directamente de las mediciones, observamos que la información instantánea del girómetro es la velocidad angular ω . De esta velocidad debemos obtener una estimación de orientación. Para ello, preprocesamos el filtrado según la siguiente derivación:

$$\dot{\Theta}_\omega = B(\Theta)^T \omega_m \quad (20)$$

Y su transformada de Laplace

$$L\{\dot{\Theta}_\omega\} = s\Theta_\omega(s) \quad (21)$$

De este modo, el esquema de filtrado propuesto es el corresponde la Fig. 2a. Dicho esquema se puede reducir a una versión corta, presentada en Fig. 2b. Se puede notar que de esta manera se obtiene la misma respuesta aplicando un único filtro pasa bajos. La implementación corta por lo tanto consiste en aplicar un filtrado pasabajos con frecuencia de corte ω_0 a la señal Θ_s resultante de:

$$\Theta_s = \frac{\dot{\Theta}_{HF}}{\omega_0} + \Theta_{LF} \quad (22)$$

3. MODELADO DE SENSORES INERCIALES

Vamos a considerar a modelar datos provenientes de los tres tipos de sensores más frecuentemente encontrados en los controladores de micro vehículos aéreos no tripulados: acelerómetro, girómetro y magnetómetro, de 3 ejes cada uno. Los acelerómetros miden la fuerza específica aplicada a una masa de prueba, los girómetros la velocidad angular y los magnetómetros el campo magnético.

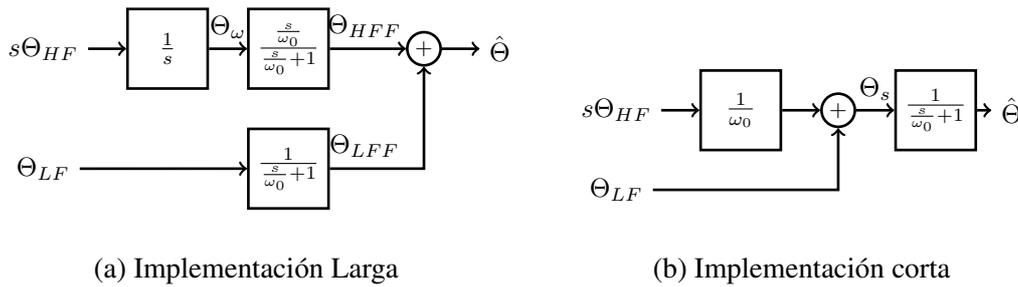


Figura 2: Filtro complementario

3.1. Gir6scopo

Los datos recolectados por los sensores se modelan como:

$${}^I\omega_m = {}^I\omega + {}^I\omega_b, \quad (23)$$

donde ${}^I\omega$ es la velocidad angular real del marco de instrumentaci3n respecto al marco inercial, ${}^I\omega_m$ es el valor de velocidad angular medida por la IMU y donde ${}^I\omega_b$ es el error de la medici3n.

3.1.1. Estimaci3n de orientaci3n espacial a partir de la velocidad angular

La velocidad angular del instrumento con respecto a un marco de referencia inercial expresada en el marco de instrumentaci3n se puede expresar como:

$${}^I\omega_m = [{}^I\omega_{mx}, {}^I\omega_{my}, {}^I\omega_{mz}]^T \quad (24)$$

y se relaciona con la derivada de los 3ngulos de Euler seg6n 4. La orientaci3n puede ser calculada por medio de integraci3n de (4) pero, en la pr3ctica esta utilizaci3n de la se1al provista por los gir6scopos suele presentar *drifting*, por lo que se utiliza en conjunto con otros sensores.

3.2. Aceler3metro

$${}^Ia_m = {}^Ia_g - {}^Ia + {}^Ia_b \quad (25)$$

Ia_m es la aceleraci3n lineal medida por la IMU, Ia_g es la aceleraci3n gravitacional expresada en el marco de la IMU, Ia es la aceleraci3n lineal real del marco de instrumentaci3n respecto al marco inercial y Ia_b es el bias de la medici3n de la aceleraci3n. En el caso de veh6culos rob3ticos peque1os, la IMU es solidaria al veh6culo. En estos casos, las aceleraciones reales son peque1as respecto de la aceleraci3n dominante, que es la gravitacional, por lo que la ecuaci3n anterior se simplifica:

$${}^Ia_m = {}^Ia_g + {}^Ia_b \quad (26)$$

Por medio de procesos de calibraci3n del sensor se puede obtener una estimaci3n del bias y cancelar su efecto. Considerando un sensor calibrado podemos aproximar:

$${}^Ia_m = {}^Ia_g \quad (27)$$

3.2.1. Cálculo de ángulo de guiñada y elevación utilizando la aceleración gravitatoria

Para obtener la expresión del vector gravedad ${}^I a_g$ en el marco de instrumentación, podemos tomar su expresión en el marco NED: ${}^N a_g = [0, 0, g]^T$, y aplicar la rotación ${}^I N R = {}^N I R^T$:

$${}^I a_g = {}^I N R {}^N a_g = g \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (28)$$

A partir de una medición de la aceleración gravitacional en el marco I , podemos hallar $\phi(t)$ y $\theta(t)$ según:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{{}^I a_{gy}}{{}^I a_{gz}} \quad (29)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-{}^I a_{gx}}{\sqrt{{}^I a_{gy}^2 + {}^I a_{gz}^2}} \quad (30)$$

Definimos para uso futuro, la estimación de actitud debida a la aceleración gravitacional como:

$$\Theta_{acc} = [\phi_{Ec.(29)}, \theta_{Ec.(30)}, 0]^T$$

3.3. Magnetómetro

El magnetómetro mide el campo magnético local, en general, este es la suma del campo magnético terrestre y el campo magnético debido a la presencia de material magnético en las cercanías. El efecto sobre la medición debido al campo inducido por material magnético se cancela en la calibración previa del sensor, por lo que no se tiene en cuenta en este análisis. El campo magnético terrestre será primordial en esta aplicación para permitirnos estimar la rotación del marco de instrumentación con respecto al norte terrestre. El campo magnético terrestre, en el sistema de coordenadas M se denota como ${}^M b_E$ y su componente horizontal respecto de la superficie terrestre apunta hacia el norte magnético. La magnitud y orientación del campo magnético terrestre varía con la posición, pero se puede asumir que en cada punto terrestre p_b , el campo magnético tendrá sus componentes exclusivamente en el plano definido por el vector con origen en el centro terrestre y apuntando al norte magnético y el vector posición p_b . Por lo tanto se puede decir que en el sistema NED, ${}^N b_E$ viene dado por la siguiente expresiones equivalentes:

$${}^N b_E = R_\alpha {}^M b_E \quad (31)$$

$${}^N b_E = \begin{bmatrix} \cos \alpha(p_b) \cos \gamma(p_b) \\ \sin \alpha(p_b) \cos \gamma(p_b) \\ \sin \gamma(p_b) \end{bmatrix} b_E(p_b) \quad (32)$$

donde

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

y donde α es el ángulo de declinación, b_E es la magnitud y γ es la inclinación del campo magnético en P_b . La expresión del campo magnético medido en componentes del marco de instrumentación está dado por ${}^I b_E = [{}^I b_{Ex}, {}^I b_{Ey}, {}^I b_{Ez}]^T$, y está expresada por:

$${}^I b_E = {}^I N R {}^N b_E \quad (34)$$

3.3.1. Cálculo de ángulo de dirección utilizando el campo magnético terrestre

Utilizando una estimación de los ángulos θ y ϕ podemos expresar el vector medido en un marco de referencia intermedio X cuyo eje z es coincidente con el eje z inercial. Llamando b^X al vector magnético medido expresado en el marco X, podemos expresarlo como:

$${}^X b_E = R_\theta^{-1} R_\phi^{-1} {}^I b_E \quad (35)$$

donde R_θ , R_ϕ , R_ψ son las matrices de rotación correspondientes a los ángulos de Euler θ , ϕ y ψ , respectivamente. Explícitamente:

$${}^X b_E = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} {}^I b_E = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta s\phi & -s\theta c\phi \\ 0 & c\phi & s\phi \\ s\theta & -c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} {}^I b_E \quad (36)$$

Por otro lado, podemos expresar ${}^X b_E$ en función de ${}^N b_E$:

$${}^X b_E = R_\theta^{-1} R_\phi^{-1} {}^I N R {}^N b_E = R_\theta^{-1} R_\phi^{-1} R_\phi R_\theta R_\psi {}^N b_E = R_\psi {}^N b_E \quad (37)$$

Como consecuencia,

$${}^X b_E = R_\psi R_\alpha {}^M b_E = {}^{MN} R {}^M b_E \quad (38)$$

donde:

$$\psi_M = \psi + \alpha(p_b);$$

y ${}^{MN} R$ está dada por:

$${}^{MN} R = \begin{bmatrix} c\psi_M & s\psi_M & 0 \\ -s\psi_M & c\psi_M & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

en componentes, tenemos:

$$\begin{bmatrix} {}^X b_{E_x} \\ {}^X b_{E_y} \\ {}^X b_{E_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi_M {}^N b_{E_x} + s\psi_M {}^N b_{E_y} \\ -s\psi_M {}^N b_{E_x} + c\psi_M {}^N b_{E_y} \\ {}^N b_{E_z} \end{bmatrix} \quad (40)$$

En el sistema M, la componente Este del campo magnético es nula (${}^N b_{E_y} = 0$), entonces ${}^N b_E = [{}^N b_{E_x}, 0, {}^N b_{E_z}]^T$. Luego:

$$\begin{bmatrix} {}^X b_{E_x} \\ {}^X b_{E_y} \\ {}^X b_{E_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi_M {}^N b_{E_x} \\ -s\psi_M {}^N b_{E_x} \\ {}^N b_{E_z} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Podemos calcular entonces ψ_M como:

$$\psi_M = \tan^{-1}\left(\frac{-{}^X b_{E_y}}{{}^X b_{E_x}}\right) \quad (42)$$

Operando, podemos obtener una expresión para calcular ψ_M como

$$\psi_M = \tan^{-1}\left(\frac{-{}^I b_{E_y} \cos \phi + {}^I b_{E_z} \sin \phi}{{}^I b_{E_x} \cos \theta + {}^I b_{E_y} \sin \phi \sin \theta + {}^I b_{E_z} \cos \phi \sin \theta}\right) \quad (43)$$

1:	Inputs: ${}^I\omega_m, {}^Ia_m, {}^Ib_E, \Delta t, \hat{\Theta}$
2:	$\Theta_{LF} = \Theta_{acc} + [0, 0, \hat{\Theta}_3]^T$
3:	$\dot{\Theta}_{HF}$ usando 4 y $\hat{\Theta}$
4:	Θ_s usando 22
5:	$\hat{\Theta}$, filtro pasa bajos según 13
6:	Volver a (1)

Tabla 1: Algoritmo de Estimación de Orientación Reducida

1:	Inputs: ${}^I\omega_m, {}^Ia_m, {}^Ib_E, \Delta t, \hat{\Theta}$
2:	$\Theta_{LF} = \Theta_{acc} + \Theta_{mag}$
3:	$\dot{\Theta}_{HF}$ usando 4 y $\hat{\Theta}$
4:	Θ_s usando 22
5:	$\hat{\Theta}$, filtro pasa bajos según 13
6:	Volver a (1)

Tabla 2: Algoritmo de Estimación de Orientación Completa

Si se desea utilizar este cálculo para navegación, es necesario obtener la dirección con respecto al norte geográfico, para lo que se debe compensar la declinación como:

$$\psi = \psi_M - \alpha \quad (44)$$

Definimos para uso futuro, la estimación de dirección obtenida a través del campo magnético terrestre como:

$$\Theta_{mag} = [0, 0, \psi_{Ec.(43)}]^T$$

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

4.1. Estimación de orientación reducida

La orientación reducida se refiere a la determinación, única, de los ángulos de elevación y guiñado, sin determinación del ángulo de dirección. Esta se puede usar cuando no existe magnetómetro. El algoritmo se presenta en Tabla 1

4.2. Estimación de orientación completa

Para obtener la estimación de orientación completa el algoritmo (1) se modifica, utilizando (43) para la obtención de la señal ψ_{LF} , necesaria por la definición de Θ_{mag} . El algoritmo se presenta en Tabla 2.

5. HARDWARE UTILIZADO

Para la implementación se consideró conveniente una solución de bajo costo, con comunicaciones inalámbricas integradas, compacta y versátil. Considerando estos puntos, seleccionamos el siguiente hardware:

5.1. Microcontrolador

Se integra un microcontrolador ESP8266EX, que contiene un procesador RISC Tensilica L106 de 32 bits, con un reloj de 80MHz. Incluyendo el stack de Wi-Fi y un sistema operativo en tiempo real, queda cerca del 80 % del poder de procesamiento disponible para el usuario.

5.2. Unidad de Medición Inercial

Los componentes destacados de la Unidad de Medición Inercial son: L3G4200D (Giróscopo de tres ejes), ADXL345 (Acelerómetro de tres ejes) y HMC5883L (magnetómetro de tres ejes) - <https://strawberry-linux.com/pub/17116.pdf>, <https://http://www.analog.com/en/products/sensors-mems/accelerometers/adxl345.html> y <http://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf>. Estos sensores se vinculan a través de un bus de datos I2C al microcontrolador. Esta configuración de sensores ha sido utilizada en otros trabajos de investigación publicados, ver (Shangari et al., 2015; Sadeghian y Masoule, 2016).

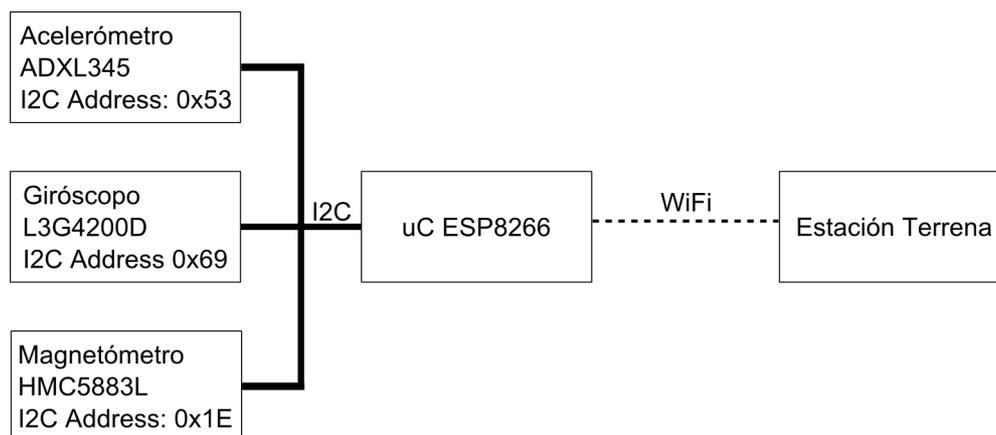


Figura 3: Principales componentes

5.3. Montaje

Para realizar los experimentos se utilizaron módulos comerciales vinculados con una placa integradora de diseño original. La placa Sparkfun ESP8266 Thing de hardware abierto y comercialmente disponible, la que contiene al microcontrolador y otros componentes requeridos para su funcionamiento básico, por ejemplo memoria flash, reguladores de voltaje, etc (<https://www.sparkfun.com/products/13231>). Los sensores están integrados en una placa GY-80, que permite vincularlos fácilmente al microcontrolador. Se cuenta con un diseño de una placa base integradora, que está disponible para descargas públicas en el sitio del grupo de desarrollo, y se puede replicar sin requerimientos de equipamientos especiales.

6. EXPERIMENTOS

6.1. Validación del Estimador

Para validar el algoritmo utilizamos un conjunto de datos disponible públicamente (<http://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/>) así como la implementación de los algoritmos basados en cuaterniones conocidos por los nombres de sus autores Mahony y Madgwick (Mahony et al. (2008); Madgwick et al. (2011)). El dataset incluye datos medidos por sensores calibrados incluyendo giróscopo, acelerómetro y magnetómetro registrada con un dispositivo comercial denominado x-IMU mientras secuencialmente fue rotado de 0 a 90° y luego a -90° alrededor de sus ejes x , y y z . En la Tabla 3 se muestran las estimaciones de los ángulos de Euler para cada estimador. Dado que la orientación de referencia no es conocida con precisión, para validar el algoritmo se comparan entre sí las orientaciones obtenidas con los distintos métodos. En la figura se muestran el error como el ángulo de la rotación que lleva de la una estimación a

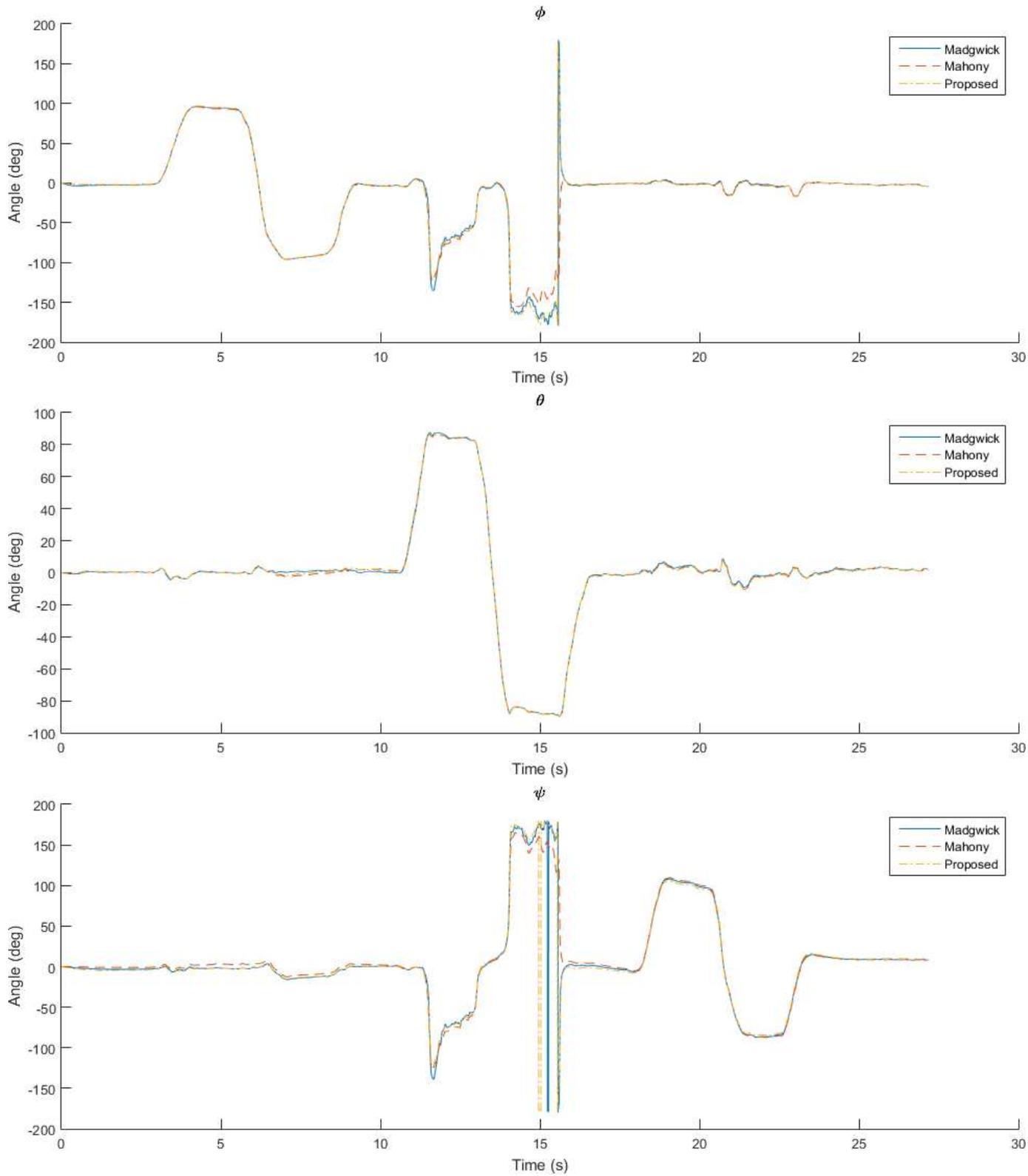


Tabla 3: Angulos estimados con distintos métodos para la maniobra de rotación secuencial a 90 y -90 grados alrededor de cada eje.

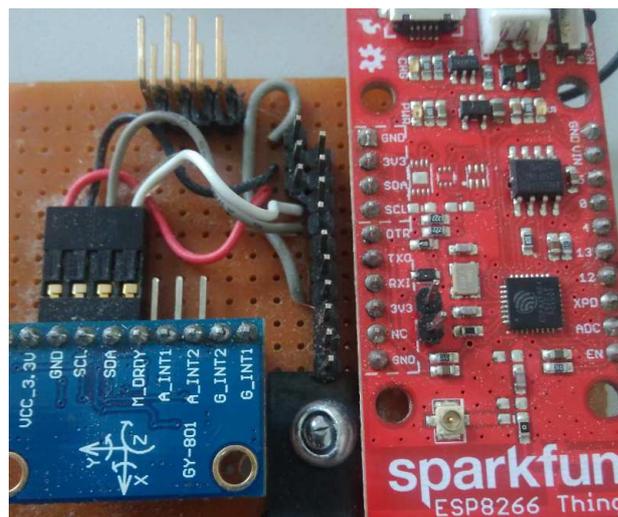
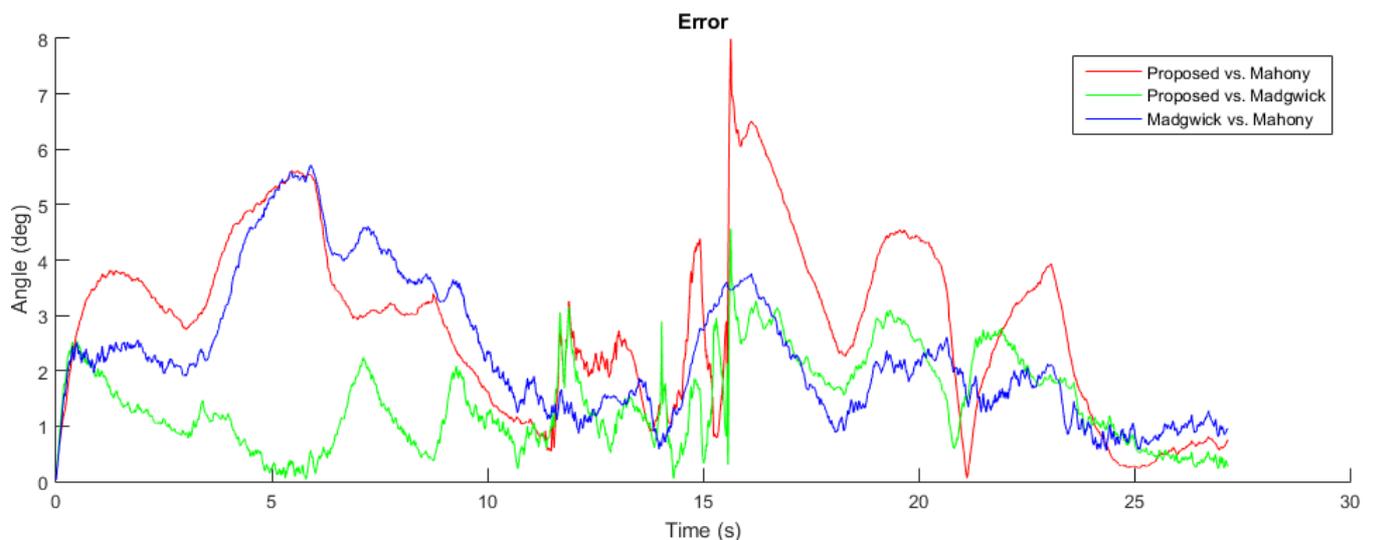


Figura 4: Prototipo

Método 1	Método 2	Error Cuadrático
Proposed	Madgwick	2.664
Proposed	Mahony	10.495
Madgwick	Mahony	6.905

Tabla 4: Error cuadrático medio

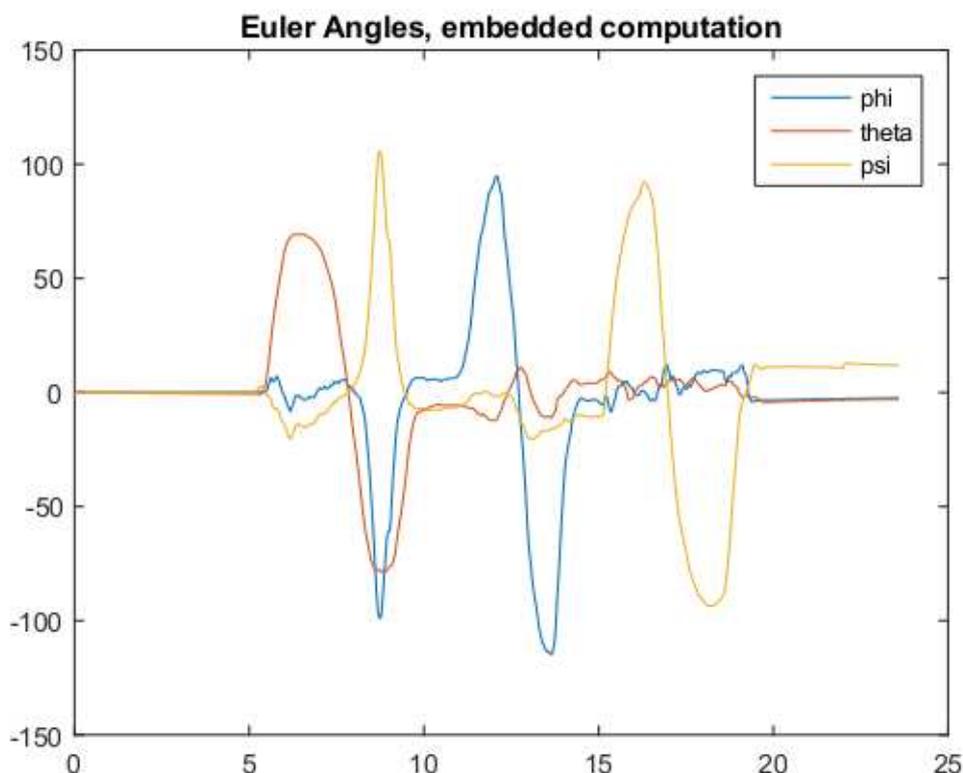
la otra. El error cuadrático medio entre los distintos métodos se muestra en la tabla y podemos ver que incluso el error entre el método propuesto y Madgwick es menor que el error entre Madgwick y Mahony.



6.2. Verificación en Dispositivo

Se implementa el algoritmo de estimación de la orientación reducida en el dispositivo. Posteriormente, a los fines de verificar el funcionamiento del algoritmo, se realiza una secuencia

de movimientos replicando la utilizada para la validación del estimador. Se utiliza solamente la información del acelerómetro y giróscopo, dado que no se cuenta con la calibración para corregir la distorsión magnética. Esta se puede realizar de distintas maneras, contemplándose esta actividad para un próximo trabajo.



6.3. Discusión y Conclusiones

Se presenta un algoritmo de estimación de orientación basado en mediciones provistas por distintas configuraciones de sensores y un dispositivo funcional de bajo costo, fácilmente replicable, que permite la experimentación y análisis del funcionamiento de distintos algoritmos y sensores. Respecto de otros dispositivos similares de estimación de orientación, el presente dispositivo es ventajoso dado que en un único procesador se realizan las tareas de recolección de datos, estimación de orientación y de comunicación inalámbrica de datos, siendo un diseño de mínimo costo en el mercado. El algoritmo se realiza íntegramente en el espacio de los ángulos de Euler. Como trabajos futuros, se analizará la utilidad del dispositivo y los algoritmos presentados para la estabilización de vehículos.

REFERENCIAS

- Hyyti H. y Visala A. A dcm based attitude estimation algorithm for low-cost mems imus. *International Journal of Navigation and Observation*, 2015, 2015.
- Madgwick S.O., Harrison A.J., y Vaidyanathan R. Estimation of imu and marg orientation using a gradient descent algorithm. En *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on*, páginas 1–7. IEEE, 2011.
- Mahony R., Hamel T., y Pflimlin J.M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on automatic control*, 53(5):1203–1218, 2008.
- Sadeghian R. y Masoule M.T. An experimental study on the pid and fuzzy-pid controllers on

- a designed two-wheeled self-balancing autonomous robot. En *Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2016 4th International Conference on*, páginas 313–318. IEEE, 2016.
- Saealal M.S., Derawi D., Salim N.D., y Tumari M.Z.M. Real-time nonlinear complementary filter on so (3) for attitude estimation of small-scale aerial robot. En *2017 International Conference on Vision, Image and Signal Processing (ICVISP)*, páginas 109–113. IEEE, 2017.
- Shangari T.A., Shamshirdar F., Heydari M.H., Sadeghnejad S., Baltes J., y Bahrami M. Aut-uofm humanoid teensize joint team; a new step toward 2050's humanoid league long term roadmap. En *Robot Intelligence Technology and Applications 3*, páginas 483–494. Springer, 2015.
- Vasconcelos J.F., Cardeira B., Silvestre C., Oliveira P., y Batista P. Discrete-time complementary filters for attitude and position estimation: Design, analysis and experimental validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(1):181–198, 2011.
- Wu J., Zhou Z., Chen J., Fourati H., y Li R. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost marg sensors. 16:1–1, 2016.