

CARACTERIZACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNIDADES DE MEDICIÓN INERCIAL DE BAJO COSTO

Ibrahim Jaime¹, Federico Beck Ferrero¹, Marco L. Miretti¹, Emanuel Bernardi¹

¹Applied Control & Embedded Systems - Research Group (AC&ES-RG, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco (UTN-FRSFCO), San Francisco, Córdoba, Argentina.
ibrahimjaime@gmail.com

Resumen

Considerando que la agricultura es una de las bases fundamentales de nuestra economía, su modernización resulta crucial para mejorar el rendimiento. La incorporación de tecnologías avanzadas permite una mejor gestión de los recursos, mayor precisión en las labores y una reducción significativa de los tiempos de trabajo. Además, estas tecnologías contribuyen a disminuir el impacto ambiental y a reducir la frecuencia de accidentes laborales.

Con el objetivo de contribuir a la tecnificación de los procesos agro-industriales, desde el grupo de investigación de control aplicado y sistemas embebidos se inició el desarrollo de un vehículo autónomo multipropósito, para la evaluación de estrategias de navegación y control.

Un componente fundamental para el seguimiento de trayectorias de manera autónoma es el sistema de adquisición de datos sobre la actitud del vehículo, en cada instante. Esto es, para determinar la orientación del mismo se utiliza una unidad de medición inercial (IMU), la cuál está compuesta por tres tipos de sensores: magnetómetro, giroscopio y acelerómetro. Dichos sensores son del tipo microelectromecánico y brindan mediciones de campo magnético, aceleración y velocidad angular. Las unidades de bajo costo comerciales cuentan con nueve grados de libertad, ya que poseen tres sensores de cada tipo, apropiadamente dispuestos.

En el presente trabajo se presentarán las técnicas empleadas para la caracterización y calibración de IMU's de bajo costo. Dicho proceso es fundamental para su correcto funcionamiento debido a las perturbaciones que los sensores reciben por parte del entorno y también por el movimiento y vibraciones del vehículo en movimiento. Esto es, se realizará la caracterización de los sensores empleando el método varianza de Allan. Dicha información será utilizada tanto en el desarrollo del algoritmo de control como también en la determinación del período de recalibración del sensor, para asegurar un correcto funcionamiento.

Palabras Clave: vehículo autónomo, sensor inercial, varianza de Allan.

Introducción

Las unidades de medición inercial (IMU), generalmente están compuestas por tres elementos sensores (Froyum et al., 2012). Siendo éstos: magnetómetro, giroscopio y acelerómetro, con los cuales se obtiene información de los ángulos azimut (yaw), cabeceo (pitch) y balanceo (roll) (López Revuelta, 2017). Las principales aplicaciones de este dispositivo incluyen el control de sistemas no tripulados, las aplicaciones cartográficas móviles ya sean terrestres, aéreas o marítimas y toda carga útil que requiera estabilización o apuntamiento (Ahmad et al., 2013).

Es conocido, que las IMU's desarrolladas a partir de sensores microelectromecánicos (MicroElectroMechanical Systems, MEMS) poseen errores de medición de considerable magnitud, complejos, no lineales y variantes en el tiempo. Es por esto que los mismos deben ser calibrados (Skog & Händel, 2006, entre otros).

Por lo tanto, el análisis de las mediciones de los sensores se realizó mediante el método varianza de Allan. Esta es una herramienta de análisis estadístico empleada para caracterizar varios tipos de contribuciones de error existentes en las mediciones de un sensor (Hussen & Jleta, 2015). Al aplicar el método se obtiene una curva característica cuya inspección proporciona una identificación sistemática de diversos errores aleatorios contenidos en los datos de salida del sensor inercial. Al ser una cantidad directamente medible, la varianza de Allan puede proporcionar información sobre los tipos y la magnitud de las distintas fuentes de error (El-Sheimy et al., 2007).

En consecuencia, la información obtenida brinda la posibilidad de generar un modelo matemático del sensor. Esto es necesario para simular su comportamiento y así diseñar métodos para reducir su error o determinar los parámetros adecuados al realizar una fusión con otros sensores (Miretti et al., 2018; Han et al., 2009).

Desarrollo

Calibración

A continuación se presentará el proceso de calibración de cada uno de los sensores que componen la unidad de movimiento inercial. Éstos se encuentran dispuestos en una misma placa representada en la figura 1.

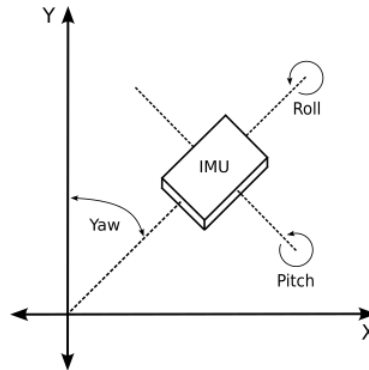


Fig. 1. Ejes de referencia de mediciones de unidad de movimiento inercial.

El proceso de calibración del elemento acelerómetro consiste en la adquisición de mediciones mientras el mismo se gira 360° en cada uno de los tres ejes. El giro debe ser lento para evitar inducir aceleraciones adicionales a la gravedad. En el mejor de los casos, las mediciones se deberían ubicar en el rango de $\pm 1 g$ en cada eje. Por otra parte, si el rango es mayor o menor al mencionado se debe incluir un factor de escala para corregir las mediciones. Teniendo en cuenta ambos fenómenos las mediciones calibradas se obtienen mediante la ec. 1,

$$A_{\text{calibrado}} = (A_{\text{medida}} - A_{\text{compensación}}) A_{\text{escala}} \quad (1)$$

Por otro lado, el proceso de calibración del giróscopo consiste en adquirir una gran cantidad de mediciones en estado de reposo. Luego se promedian los mismos para obtener el valor de compensación necesario para obtener valores de velocidad angular cercanos a cero. La ec. 2 muestra la velocidad angular calibrada,

$$G_{\text{calibrado}} = G_{\text{medida}} - G_{\text{compensación}} \quad (2)$$

Finalmente, con respecto al magnetómetro cabe destacar que en el presente trabajo sólo se considerarán las mediciones de los ejes 'X' e 'Y' (figura 1). Por otro lado, se sabe que las distorsiones que afectan a este dispositivo pueden ser del tipo 'hard iron' producidas por elementos ferromagnéticos que se encuentran magnetizados de forma permanente o 'soft iron' generados por objetos de alta permeabilidad magnética. Para determinar la influencia de cada efecto sobre los sensores se debe girar el dispositivo 360° en cada eje. El efecto 'hard iron' se manifestará como un desplazamiento en las mediciones al hacer una comparación entre los diferentes ejes. Esto se corrige mediante la ec. 3,

$$M_{\text{calibrado}} = M_{\text{medida}} - M_{\text{compensación}} \quad (3)$$

Idealmente, luego de aplicar la compensación la gráfica de las componentes 'X' e 'Y' del vector de campo magnético debería presentar un círculo perfecto y centrado. Sin embargo, si se encuentra presente el efecto 'soft iron' dicha gráfica mostrará una elipse. Para corregir este efecto se debe determinar la magnitud del eje mayor 'r', del eje menor 'q' y del ángulo de inclinación θ . Luego, con el objetivo de rotar la esfera se emplea la ec. 4,

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Finalmente, para escalar las mediciones se deben multiplicar las del eje 'X' por el factor:

$$\sigma = \frac{q}{r}. \quad (5)$$

En resumen, en el caso de contar con ambos efectos el valor medido es compensado, luego se multiplica el vector conformado por las mediciones de ambos ejes, por la matriz 'R' y finalmente uno de los eje es escalado con el factor σ .

Caracterización

El método consiste en la obtención de una gran cantidad de datos con el sensor quieto. Los N datos consecutivos, obtenidos en un tiempo de muestreo de t_0 se dividen en M subgrupos donde

$M = \frac{N}{n}$ (teniendo en cuenta que, $n < \frac{N}{2}$), siendo n el número de muestras por grupo.

Asociado a cada grupo hay un tiempo $T = n \times t_0$. Si la tasa de salida instantánea del sensor inercial es $\Omega(t)$, el promedio del grupo se define como:

$$\bar{\Omega}_k(T) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} \Omega(t) dt. \quad (6)$$

Donde $\bar{\Omega}(t)$ representa el promedio del grupo de la tasa de cambio para un grupo que comienza desde el punto k y contiene n datos. La varianza de Allan de una longitud T para tiempo discreto se define como,

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} \left[\bar{\Omega}_{k+1}(T) - \bar{\Omega}_k(T) \right]^2. \quad (7)$$

La varianza de Allan también se define en términos de ángulos como

$$\theta(t) = \int \Omega(t) dt. \quad (8)$$

A partir de ello, la varianza de Allan se estima como

$$\bar{\Omega}_k(T) = \frac{\theta_{k+n} - \theta_k}{T} \quad (9)$$

$$\bar{\Omega}_{prox}(T) = \frac{\theta_{k+2n} - \theta_{k+n}}{T}$$

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2T^2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} \left[\theta_{k+2n} - 2\theta_{k+n} + \theta_k \right]^2$$

Un gráfico logarítmico en ambos ejes de la raíz cuadrada de la varianza de Allan (desviación estándar), $\sigma(T)$ con respecto a T proporciona un medio para identificar y cuantificar varios términos de ruido que existen en el sensor inercial. Un ejemplo de este gráfico se muestra en la figura 2.

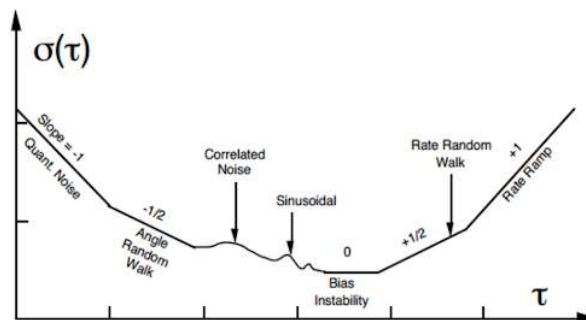


Fig. 2. Varianza de Allan.

A continuación se definirán los cinco términos de ruido que se pueden identificar empleando este método. Así, si las fuentes de ruido son estadísticamente independientes, entonces la varianza de Allan calculada es la suma de los cuadrados de cada tipo de error.

Ruido de cuantificación (Q): El ruido de cuantificación es un tipo de error que se introduce en una señal analógica durante el proceso de conversión a formato digital. Este ruido surge debido a las pequeñas discrepancias entre las amplitudes reales de los puntos muestreados y la precisión del convertidor analógico-digital, que está limitada por la resolución en bits del mismo. En la gráfica de desvío estándar este término es representado con una curva de pendiente -1 . Su valor se obtiene ubicando un punto en dicha parte de la gráfica y empleando la ec. 10,

$$\sigma(T) = Q \frac{\sqrt{3}}{T}. \quad (10)$$

Random Walk/Deriva (N): Cuando se integra una señal de salida ruidosa de un sensor, como una señal de velocidad angular para calcular un ángulo, el valor obtenido tenderá a aumentar con el tiempo debido al ruido, incluso si el sensor permanece inmóvil. Este fenómeno se conoce como "random walk" o "caminar aleatorio", ya que la integración parece seguir una trayectoria de pasos aleatorios de una muestra a la siguiente. En la gráfica de desvío estándar este término es representado con una curva de pendiente $-1/2$. El valor de N se obtiene mediante la siguiente ecuación,

$$\sigma(T) = \frac{N}{\sqrt{T}}. \quad (11)$$

Inestabilidad de sesgo (B): También conocido como ruido de parpadeo o "flicker", este tipo de ruido se manifiesta como fluctuaciones de sesgo de baja frecuencia en los datos medidos. Su origen suele ser la electrónica u otros componentes susceptibles a variaciones aleatorias. Debido a su baja frecuencia, el ruido de parpadeo se manifiesta como fluctuaciones en el sesgo de los datos a lo largo del tiempo. Su valor se obtiene cuando la varianza tiende a cero, en esta región se determina su valor empleando la ec. 12,

$$\sigma(T) = B \sqrt{\frac{2 \ln(2)}{\pi}}. \quad (12)$$

Rate Random Walk (K): Este término se refiere a un comportamiento en el que la tasa de cambio de una señal exhibe una caminata aleatoria. El Rate Random Walk (RRW) define la escala temporal en la que ocurren estos cambios y ofrece una base para planificar la recalibración en aplicaciones críticas que requieren una vida útil prolongada. El RRW está relacionado con el ruido browniano y se calcula mediante la ecuación 13 donde se observa una pendiente de $+1/2$.

$$\sigma(T) = K \sqrt{\frac{T}{3}}. \quad (13)$$

Drift Rate Ramp (R): El Drift Rate Ramp se manifiesta como una variación sistemática y continua en la tasa de cambio de la señal a lo largo del tiempo. Este error se caracteriza por una deriva gradual y predecible en la señal medida, que puede indicar un comportamiento sistemático en el sistema bajo estudio. Identificar y comprender el Drift Rate Ramp es crucial para ajustar y mejorar la precisión en aplicaciones que dependen de una alta estabilidad temporal. Este tipo de ruido es representado con una pendiente $+1$ en la gráfica de desvío estándar. Y se obtiene con la ec. 14,

$$\sigma(T) = R \frac{T}{\sqrt{2}}. \quad (14)$$

Herramientas

El sistema implementado para éste análisis consiste en la conexión de dos IMU's con la placa de desarrollo 'Raspberry Pi Pico W'. Una de las IMU's empleadas fue conformada empleando dos integrados. Uno de ellos es el 'MPU-6050' que cuenta con un giroscopio de tres ejes y un acelerómetro de tres ejes. El giroscopio fue programado con una sensibilidad de $\pm 250 [deg/s]$, mientras que el rango de medición del acelerómetro fue establecido en $\pm 4 [g]$. El filtro pasa bajos fue configurado con un ancho de banda de $5,05 [Hz]$. Mientras que la frecuencia de muestreo se empleada fue $1 [kHz]$. El otro integrado que compone el sistema es el 'QMC5883' que contiene tres sensores de campo magnético. Su rango de medición fue de $\pm 2 [Gauss]$ y su frecuencia de muestreo fue establecida en $200 [Hz]$. Además, se empleó una tasa de sobre-muestreo de con lo que se redujo al máximo el ancho de banda del filtro pasa-bajos incluido en el dispositivo. Cabe destacar que la frecuencia del sistema en conjunto fue de $100 [Hz]$ debido a restricciones en la decodificación y almacenamiento de los datos.

Resultados y discusiones

Para comenzar, se presentarán los resultados de calibración del sistema compuesto por los dispositivos ‘MPU6050’ y ‘QMC5883’. Luego de realizar la secuencia de calibración del acelerómetro se determinó que las mediciones eran correctas y no se realizó compensación ni se escalaron los datos. A continuación se presenta la gráfica de los datos del vector ‘xy’ y en la figura siguiente, la gráfica del vector ‘yz’.

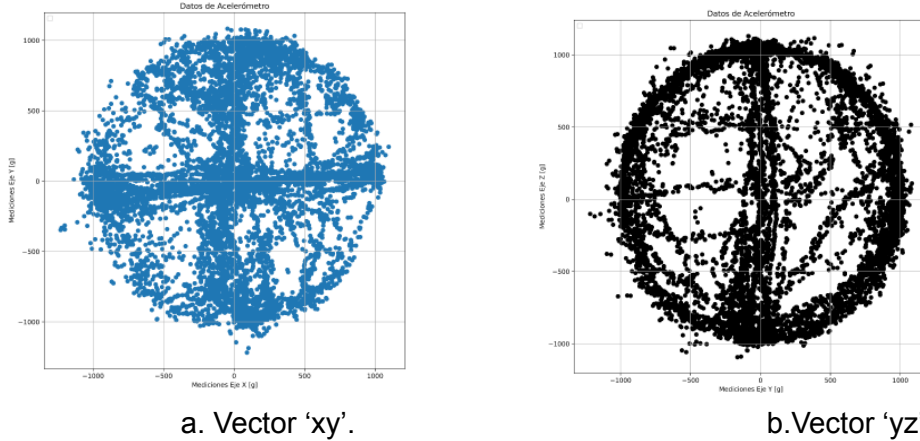


Fig. 3. Datos del acelerómetro.

Tras recopilar los datos del giroscopio en reposo durante 90 minutos, se determinaron los valores necesarios para su compensación. Los resultados obtenidos fueron: eje X = -1,6022 [°/s], eje Y = 0,2899 [°/s] y eje Z = 1,8464 [°/s]. Seguidamente, se realizó el procedimiento de calibración del magnetómetro y se determinó la presencia del fenómeno ‘hard-iron’. Se observa en la figura 4 las mediciones desplazadas, los valores empleados para compensar las mediciones fueron: eje X = -77272.842 [uGauss], eje Y = -4699.849 [uGauss] y eje Z = 13977,473 [uGauss].

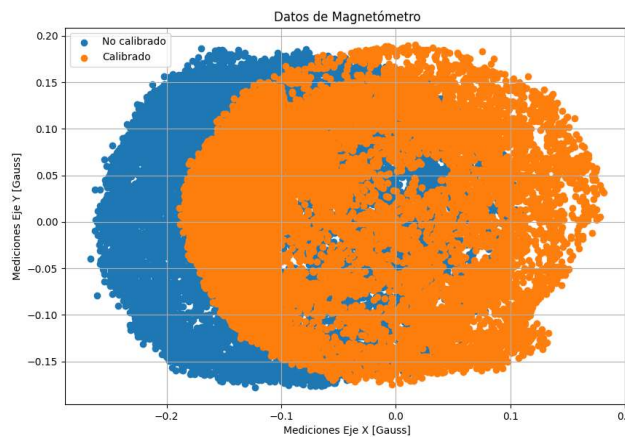


Fig. 4. Datos de magnetómetro (vector ‘xy’) anteriores y posteriores a la calibración.

Por otro lado, la tabla 1 muestra los resultados de la caracterización del giroscopio empleando el método de varianza de Allan.

Tabla 1. Valores de errores de giroscopio obtenidos de la gráfica de desvío de Allan.

Eje	Cuantización [deg]	Random Walk [deg/s/√h]	Inestabilidad de sesgo [deg/s]	Rate Random Walk [deg/s ²]	Drift Rate Ramp [deg/h]
x	0,4782	0,8050	0,2108	0,0120	2,8284e-5
y	0,4988	0,6932	0,1249	5,2494e-3	1,4142e-5
z	0,4919	1,1268	0,0820	3,1754e-3	8,4853e-6

A continuación, la tabla 2 presenta los datos obtenidos mediante el método de varianza de Allan para el acelerómetro.

Tabla 2. Valores de errores de acelerómetro obtenidos de la gráfica de desvío de Allan.

Eje	Cuantización [m/s]	Random Walk [m/s/ \sqrt{h}]	Inestabilidad de sesgo [m/s ²]	Rate Random Walk [m/s ² /s]	Drift Rate Ramp [m/s/h]
x	0,6640	1,3560	0,3839	0,0698	4,0992e-3
y	0,6351	1,6168	0,3989	0,0395	1,6638e-3
z	0,8660	1,9818	0,5269	0,0783	3,2056e-3

Seguidamente, en la figura 5 se observan los desvíos de Allan del giroscopio y acelerómetro.

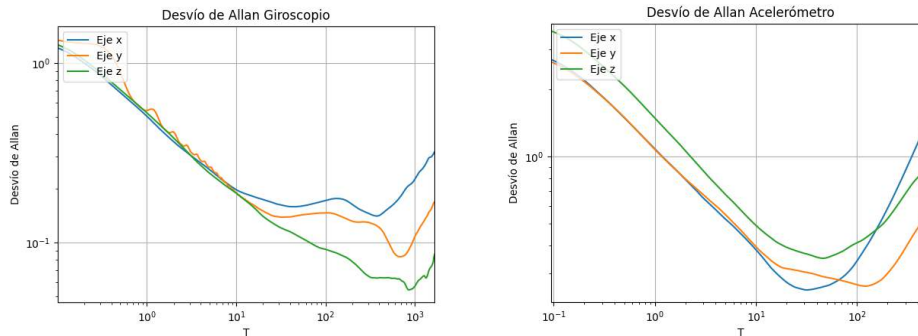


Fig. 5. Desvíos de Allan.

Conclusiones

En el presente trabajo se presentó un método de caracterización y calibración para IMU's. Además, se logró verificar este método en una IMU de bajo costo, donde se identificó y corrigió con éxito el error de tipo 'hard-iron' del magnetómetro y se analizaron las mediciones del giroscopio, determinando y aplicando la compensación necesaria para reducir el error en velocidad angular medida en estado de reposo.

Por otro lado, se llevó a cabo una caracterización de los sensores mediante el método de varianza de Allan, tanto para el acelerómetro como para el giroscopio. Este análisis permitió identificar que el error predominante en el acelerómetro y el giroscopio es del tipo Random Walk. Para mitigar este defecto, se procederá a implementar una fusión de datos entre el giroscopio y el acelerómetro. Esta estrategia permitirá corregir y compensar los errores acumulativos del Random Walk, mejorando así la precisión y fiabilidad del sistema de navegación del vehículo.

Referencias

- Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. (2013). Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), 256-262.
- El-Sheimy, N., Hou, H., & Niu, X. (2007). Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 57(1), 140-149.
- Froyum, K., Goepfert, S., Henrickson, J., & Thorland, J. (2012). Honeywell micro electro mechanical systems (MEMS) inertial measurement unit (IMU). *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* (pp. 831-836). IEEE.
- Han, S., Wang, J., & Knight, N. (2009). Using allan variance to determine the calibration model of inertial sensors for GPS/INS integration. In *6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*.
- Hussen, A. A., & Jleta, I. N. (2015). Low-cost inertial sensors modeling using Allan variance. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(5), 1230-1235.
- López Revuelta, Á. (2017). Orientation estimation and movement recognition using low cost sensors. Faculty of Computing at Blekinge Institute of Technology. Karlskrona, Sweden
- Miretti, M., Busano, F., Bernardi, E., Pipino, H., & Peretti, G. C. (2018). Estimación híbrida de posición angular en dispositivos de captura de imágenes aéreas.
- Skog, I., & Händel, P. (2006). Calibration of a MEMS inertial measurement unit. In *XVII IMEKO world congress* (pp. 1-6).