

**UNIVERSIDAD DEL CEMA  
Buenos Aires  
Argentina**

Serie  
**DOCUMENTOS DE TRABAJO**

**Área: Ingeniería Informática**

**ENSAYO Y CARACTERIZACIÓN  
DE UNA UNIDAD DE MEDICIÓN  
INERCIAL DE BAJO COSTO**

**Javier Luiso y Manuel Luna Muñoz**

**Noviembre 2018  
Nro. 667**

**[www.cema.edu.ar/publicaciones/doc\\_trabajo.html](http://www.cema.edu.ar/publicaciones/doc_trabajo.html)  
UCEMA: Av. Córdoba 374, C1054AAP Buenos Aires, Argentina  
ISSN 1668-4575 (impreso), ISSN 1668-4583 (en línea)  
Editor: Jorge M. Streb; asistente editorial: Valeria Dowding [jae@cema.edu.ar](mailto:jae@cema.edu.ar)**



---

# **ENSAYO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL DE BAJO COSTO**

---

Ing. Javier Luiso \*

Ing. Manuel Luna Muñoz \*

Universidad del CEMA

Buenos Aires, Argentina

---

\* Los puntos de vista del autor no necesariamente representan la posición de la Universidad del Cema

### **Abstract**

Se realizó el ensayo y modelado de una unidad de medición inercial (IMU) que contiene un acelerómetro, giróscopo y magnetómetro, disponible en el mercado local y de relativo bajo costo. Este ensayo fue importante para poder decidir su utilización en el desarrollo de un dispositivo para sensor la actitud de una pieza de combate para ser utilizada en un simulador para artillería. Disponer de un modelo de los sensores acelerómetro, giróscopo y magnetómetro permitió mejorar la etapa de fusión de datos agregando etapas previas que compensaron los errores y desvíos de los mismos.

## Introducción

Actualmente existen en el mercado varios dispositivos IMU (Inertial Measurement Unit) de relativo bajo costo que son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones. Las hojas de datos de estos dispositivos dan información sobre la sensibilidad de los sensores acelerómetro, giróscopo y magnetómetro, en las distintas escalas disponibles. Para un correcto diseño de los filtros de fusión de datos es necesario conocer la exactitud de la medición y para esto disponer de un modelo de cada tipo de sensor resulta de utilidad.

En este trabajo se adoptó el modelo propuesto por [1], [2], [3] y se buscó caracterizar los parámetros de dicho modelo. El objetivo es poder tener una mejor caracterización de estos dispositivos a la hora de decidir su utilización o no en un desarrollo.

## Modelo de un sensor de medición inercial

Una unidad de medición inercial es un dispositivo electrónico que cuenta con un acelerómetro y giróscopo y algunos modelos tienen integrado también un magnetómetro. La aceleración  $y_a$ , velocidad angular  $u$  y el campo magnético  $y_m$  medidos por los correspondiente sensores se modelan como:

$$\begin{bmatrix} y_{a_x} \\ y_{a_y} \\ y_{a_z} \end{bmatrix}^T = \mathbf{y}_a = \mathbf{G}_{\mathbf{y}_a} \left[ \mathbf{a}_{ib}^b - \mathbf{g}^b + \mathbf{x}_a + v_a \right]^T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \mathbf{u} = \omega_{ib}^b + \mathbf{x}_g + v_g \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} y_{m_x} \\ y_{m_y} \\ y_{m_z} \end{bmatrix}^T = \mathbf{y}_m = \mathbf{G}_{\mathbf{y}_m} \left[ \mathbf{m}_e^b + \mathbf{m}_b^b + v_m \right]^T \quad (3)$$

---

donde:

- $\mathbf{a}_{ib}^b$  es la aceleración del dispositivo (body) relativa al marco inercial externo representada en el sistema de coordenadas del dispositivo.
- $\mathbf{g}$  es el vector gravedad en el sistema de coordenadas del dispositivo.
- $\omega_{ib}^b$  es de la velocidad angular del dispositivo con respecto del marco inercial representado en el sistema de coordenadas del dispositivo.
- $\mathbf{m}_e^b$  es el vector de campo magnético terrestre representado en el sistema de coordenadas del dispositivo y  $\mathbf{m}_b^b$  representa un campo externo que afecta al dispositivo.
- $v_a$ ,  $v_g$  y  $v_m$  son ruido blanco Gaussiano con  $\mu_{v_a} = \mu_{v_g} = \mu_{v_m} = 0$  y sus respectivas varianzas  $\sigma_{v_a}^2$ ,  $\sigma_{v_g}^2$  y  $\sigma_{v_m}^2$ .  $\mathbf{x}_a$  y  $\mathbf{x}_g$  son errores aditivos.
- $\mathbf{G}_{y_m}$  y  $\mathbf{G}_{y_a}$  son matrices diagonales de  $\mathbb{R}^{3 \times 3}$  que representan el factor de ganancia de cada sensor.

Los términos  $\mathbf{x}_a$  y  $\mathbf{x}_g$  junto con  $v_a$ ,  $v_g$  y  $v_m$  y las matrices de ganancias dependen del dispositivo, por lo tanto mediante un procedimiento de ensayo de la IMU y un manejo estadístico de las muestras obtenidas se estimarán dichos parámetros.

## Ensayo

La IMU seleccionada para este trabajo fue el LSM9DS0 que contiene un acelerómetro de 3 ejes, un giróscopo de 3 ejes y un magnetómetro de 3 ejes [4].

---

Para el proceso de toma de datos se utilizó un computadora embebida a la cual se conectó la IMU. La computadora modelo BeagleBoneBlack [5] es la que se encarga de configurar y obtener las mediciones de los sensores. Se desarrolló un software que permite configurar el acelerómetro, giróscopo y magnetómetro en los parámetros que se requieran para cada medición como ser la escala a la que va a trabajar y la tasa de muestreo. El mismo software es quien se encarga, durante el ensayo, de leer las mediciones de los sensores y almacenarlas en un archivo para ser luego procesado.

El giróscopo se configuró con un data-rate de 95 Hz y en la escala de 245 dps, el acelerómetro con un data-rate de 100 Hz y en la escala 2G y en el caso del magnetómetro con un data-rate de 100 Hz y en la escala de 2 Gauss. En todos los casos las escalas fueron seleccionadas para asegurar que el estímulo correspondiente provoque la mayor excursión dentro de los valores de dicha escala.

Para realizar las mediciones se montó la computadora junto con la IMU sobre un goniómetro correctamente nivelado y con la previsión de eliminar en un radio de 2 metros cualquier material metálico que pudiese perturbar las mediciones del magnetómetro. Del mismo modo, libre de dispositivos electrónicos que pudieran interferir.

El goniómetro permite orientar la IMU en dos grados de libertad: alza y deriva (pitch y yaw). Los ensayos que se realizaron consistieron en sucesivos barridos en deriva de  $360^\circ$  a diferentes valores de alza. Los barridos se hicieron de a pasos de 5 milésimos. (El goniómetro tiene escalas graduadas en milésimas, donde  $360^\circ = 6400\text{mil.}$ )

De esta forma fue posible tomar muestras para caracterizar la respuesta de los sensores a los estímulos del vector  $\mathbf{g}$  y al vector  $\mathbf{m}_e$ .

---

## Estimación de los parámetros.

Los términos de errores aditivos, que se asumen de distribución gaussiana, y las matrices de ganancia se estimaron a partir de las muestras obtenidas en los ensayos antes mencionados.

El conjunto de muestras de cada sensor, interpretado como un punto en el espacio (por ej.  $[y_{a_x}, y_{a_y}, y_{a_z}]$ ) se distribuye formando una superficie elipsoide. Mediante la determinación del centro y los ejes del mismo es posible definir una matriz de transformación que convierta al elipsoide en una esfera centrada en el origen.

De esta manera se logra corregir un término aditivo (offset) y compensar las diferentes ganancias que pueda tener cada eje de un mismo sensor, debido principalmente a dispersiones propias de los procesos de fabricación

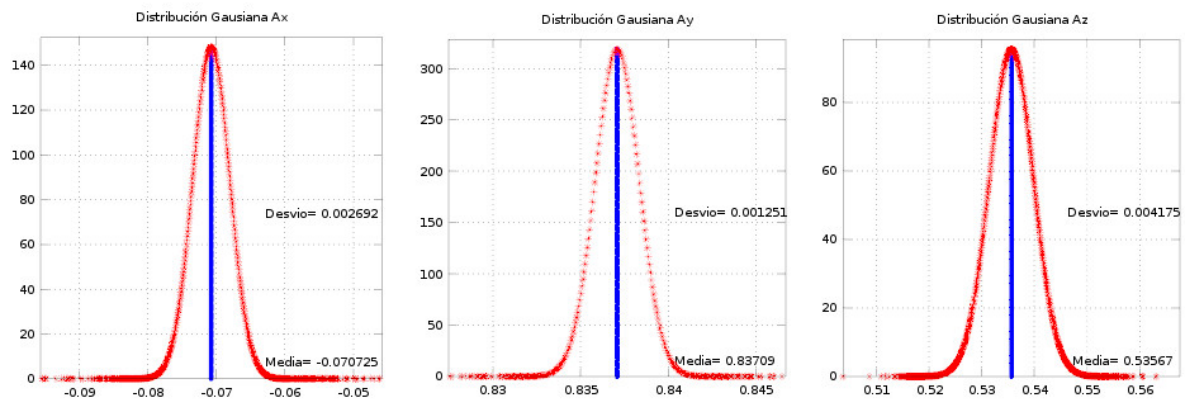
$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{y_a} & \mathbf{x}_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_a \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{y_m} & \mathbf{x}_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_m \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad (5)$$

A partir de las muestras de cada eje de cada sensor, se calcula la media muestral y varianza muestral usando los estadísticos apropiados. Ver figura 1

Las varianzas estimadas se observan en la tabla 1.





**Figure 1:** Se grafican las muestras obtenidas en el ensayo para los tres ejes del acelerómetro. Como se asume que la medición es una variable aleatoria de distribución normal se estiman la media  $\mu$  y la varianza  $\sigma_{v_a}^2$  para cada eje.

Desvíos estimados			
	Eje x	Eje y	Eje z
$\sigma_{v_a}$ [G]	$2.3701 \cdot 10^{-03}$	$1.7116 \cdot 10^{-03}$	$3.5875 \cdot 10^{-03}$
$\sigma_{v_g}$ [dps]	0.2231	0.18021	0.11749
$\sigma_{v_m}$ [gauss]	$1.2392 \cdot 10^{-03}$	$1.5802 \cdot 10^{-03}$	$5.6576 \cdot 10^{-03}$

**Table 1:** Valores de los desvíos estimados para cada sensor, discriminado por cada eje.

---

## Varianza vs Sensibilidad

En la hoja de datos de la IMU se puede leer un valor de sensibilidad,  $S$ , para cada tipo de sensor que surge de dividir la escala del sensor por la cantidad de bits utilizados la representación:

$$S = \frac{Escala}{2^n} \quad (6)$$

En particular este modelo de IMU utiliza una representación de  $n = 16$  bits, donde para todos los casos el primer bit esta destinado al signo de la medición. Por ejemplo para el acelerómetro, utilizando la escala de  $2G$ , tenemos que  $S_{accel} = \frac{2 G}{2^{15}} = 0.06103 mG$

Sin embargo el ruido gaussiano presente en todas las mediciones hace que esta sensibilidad indicada quede enmascarada. Ante esto resulta interesante saber la cantidad de bits efectivos de una lectura, considerando el error de los términos  $v_a$ ,  $v_g$  y  $v_m$ .

Tomando como mínimo valor distinguible igual al  $\sigma$  del error Gaussiano de cada sensor calculamos los bits eficaces correspondientes:

$$n = \frac{\log\left(\frac{Escala}{\sigma}\right)}{\log(2)} \quad (7)$$

Los resultados obtenidos se observan en la tabla 3. Puede observarse que los bits útiles de la representación son significativamente menor a los 15 bits que se informa en la hoja de datos.

Sensor	Configuración de escala	Sensibilidad teórica	Sensibilidad del fabricante
LSM9DS0			
Acelerómetro	2 G	0.06103 mG	0.061 mG
Giróscopo	245 dps	7.4768 mdps	8.75 mdps
Magnetómetro	2 Gauss	0.06103 mGauss	0.08 mGauss

**Table 2:** Sensibilidad teórica vs sensibilidad del fabricante.

Sensor	Bits eficaces	Sensibilidad real
Acelerómetro	9	3.90 mG
Giróscopo	10	239.25 mdps
Magnetómetro	8	7.81 mGauss

**Table 3:** Bits eficaces calculados y sensibilidad real resultante

Sensor	Factor eje x	Factor eje y	Factor eje z
Magnetómetro	$0.77 \frac{mGauss}{^{\circ}C}$	$0.97 \frac{mGauss}{^{\circ}C}$	$-0.98 \frac{mGauss}{^{\circ}C}$
Acelerómetro	$-0.18 \frac{mG}{^{\circ}C}$	$0.055 \frac{mG}{^{\circ}C}$	$1.7 \frac{mG}{^{\circ}C}$
Giróscopo	$-1.16 \frac{mdps}{^{\circ}C}$	$-10.00 \frac{mdps}{^{\circ}C}$	$-0.95 \frac{mdps}{^{\circ}C}$

**Table 4:** Factores de variación por la temperatura, estimados para cada eje de los 3 sensores

## Efecto de la temperatura

Los términos de errores aditivos  $\mathbf{x}_a$  y  $\mathbf{x}_g$  presentan una dependencia respecto de la temperatura. Mediante un ensayo se buscó determinar si la dependencia es lineal, al menos en el rango de interés, y realizar una regresión lineal que permita modelar y compensar dicha dependencia.

La IMU, estando en estado estacionaria, es sometida a una variación de temperatura dentro de un rango conocido que en el caso de nuestro ensayo fue de  $15^{\circ}$  a  $33^{\circ}$ . El rango seleccionado se debió simplemente a las posibilidades técnicas de generar esta excursión térmica de manera gradual en un lapso de 10 minutos y dicho intervalo es representativa de las condiciones de trabajo en el que se usará el simulador.

---

La tabla 4 muestra los factores de variación estimados para cada uno de los sensores de la IMU.

## **Conclusiones**

Se pudo estimar los términos y factores que forman parte del modelo adoptado para los sensores de la IMU. En este trabajo particular el interés estaba en modelar una IMU de bajo costo a fin de poder tener una mejor caracterización de la misma y poder evaluar su viabilidad en futuros desarrollos.

En particular, este interés surgió ante la posibilidad de utilizarla en un desarrollo para un Simulador, donde es necesario sensar la actitud de una pieza que puede apuntarse, (orientarse) en el espacio en un sistema de dos grados de libertad, eje vertical (pitch) y eje horizontal (yaw), denominados en el contexto el simulador como alza y deriva de la pieza.

Los resultados del modelo permitieron desarrollar un sistema de filtros y compensación, previos a la etapa de fusión de los datos de los sensores acelerómetro, giróscopo y magnetómetro consiguiendo una lectura estable en el orden de 9 milésimas lo que es equivalente a  $0.5^\circ$ .

# Referencias

- [1] JAY FARRELL, *Aided navigation, GPS with high rate sensors*, Mc-Graw Hill. DOI: 10.1036/0071493298. Edición 2008.
  
- [2] BAPTISTE DELPORTE, LAURENT PERROTON, THIERRY GRANDPIERRE, JACQUES TRICHET., *Accelerometer and Magnetometer Based Gyroscope Emulation on Smart Sensor for a Virtual Reality Application*, Sensor and Transducers Journal, 2012, 14-1 (Special Issue ISSN 1726-5479), p32-p47.
  
- [3] MILOS SOTAK, *Testing the Coarse Alignment Algorithm using rotation platform*, Department of Electronics - Armed Forces Academy, Demanova 393, 031 06 Liptovsky Mikulas 6, Slovakia. 2010.
  
- [4] Hoja de datos: [www.st.com/resource/en/datasheet/lsm9ds0.pdf](http://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm9ds0.pdf)
  
- [5] Datos Técnicos: <https://beagleboard.org/black>