

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## CALIBRACIÓN DE GIRÓSCOPO

### 1.1. Objetivos

- Realizar una serie de pruebas con el fin de calibrar el giróscopo de tres ejes de la IMU.
- Estudiar, proponer y validar un modelo posible para dicha calibración.
- Estimar las fuentes de error del mismo (ruido y bias).

### 1.2. Materiales

- Mongoose 9Dof IMU de *Ckdevices*
- Beagleboard xM
- Adaptador Wi-Fi
- Tocadiscos
- Cronómetro
- Cubo perfecto de madera
- 2 escuadras de 45°
- 2 escuadras de 30°
- Madera de 4 cm de ancho con lados paralelos

### 1.3. Marco teórico

Para la calibración del giróscopo se utiliza el mismo modelo que se utilizó para el acelerómetro en la sección ??.

$$\tilde{\mathbf{w}}^a = K_w (T_a^p)^{-1} \mathbf{w}^p + \mathbf{b}_w \quad (1.1)$$

con  $K_w$  matriz diagonal que representa el factor de escala para convertir del valor digital a la velocidad angular correspondiente,  $\mathbf{b}_w$  un término independiente para corregir la medida de velocidad angular nula y  $T_a^p$  una matriz que corrige la no ortogonalidad de los ejes:

$$T_a^p = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & \alpha_{zy} \\ \alpha_{xz} & 1 & -\alpha_{zx} \\ -\alpha_{xy} & \alpha_{yx} & 1 \end{pmatrix}$$

## 1.4. Procedimiento

### 1.4.1. Caracterización de las no idealidades variables

Para obtener más información sobre el *ruido inherente* y el *drift aleatorio* se toman datos durante una hora a una frecuencia de 100 Hz con el dispositivo quieto.

### 1.4.2. Determinación de parámetros estáticos

Para poder realizar la calibración pertinente es necesario determinar 12 parámetros: las ganancias y bias de los 3 ejes y los 6 ángulos de la matriz  $T_a^p$ . Para determinar dichos parámetros es conveniente obtener el doble o triple de medidas que de parámetros. Las medidas a realizar son las siguientes:

Eje de giro principal	Eje de giro secundario	Ángulo de giro
x	z	0
x	z	30
x	z	45
y	x	0
y	x	30
y	x	45
z	y	0
z	y	30
z	y	45

Cuadro 1.1: Configuraciones utilizadas para calibrar el giróscopo

Con un total de 9 configuraciones diferentes, donde cada una de ellas aporta 3 medidas (una por cada eje), se utilizarán un total de 27 medidas para determinar los 12 parámetros involucrados.

### Preparación

Las medidas consisten básicamente en dejar la IMU girar a la velocidad del tocadiscos en las posiciones listadas en la tabla 1.1.

La dirección de giro principal es la dirección de giro del tocadiscos cuando no hay giro en la dirección secundaria. Con el cubo de madera se resuelven las rotaciones de 90 grados para alinear los diferentes ejes de la IMU con el eje de giro del tocadiscos. Los giros en el eje secundario se realizan utilizando las escuadras y la madera de 4

cm de ancho y lados paralelos, como se muestra en la figura 1.1. Apoyando el cubo sobre la escuadra se logran los ángulos de  $30^\circ$  y  $45^\circ$  deseados en las direcciones de giro secundarias.



Figura 1.1: Escuadras  
calibración del girósopo se puede ver en la figura 1.2.

Si bien la velocidad de giro estándar del tocadiscos es 33.3 rpm, resulta conveniente medir la velocidad del tocadiscos para corroborarla. Se mide la velocidad con el dispositivo IR y se verifica el buen funcionamiento del tocadiscos.

Un esquema completo de la configuración utilizada para la

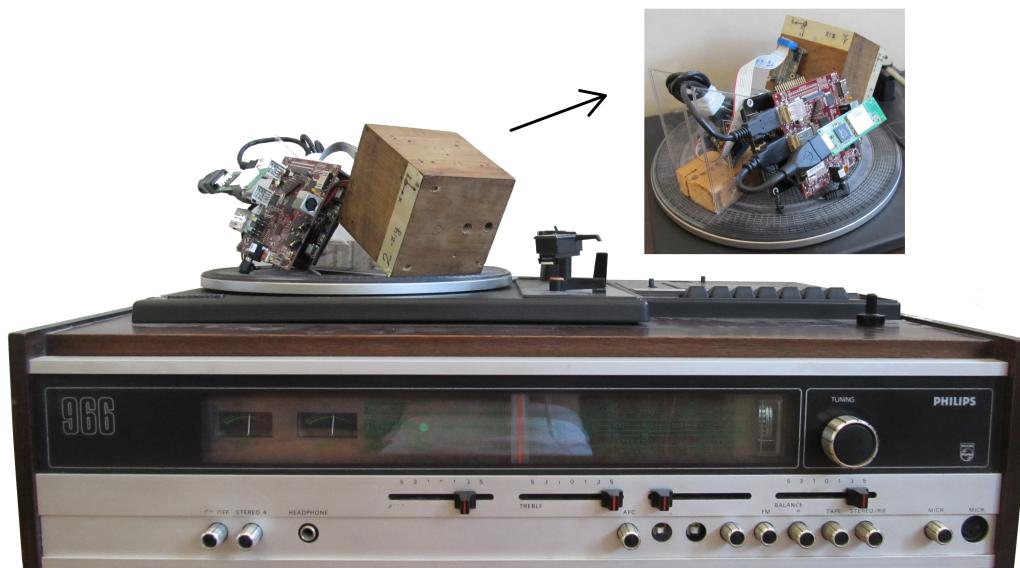


Figura 1.2: Tocadiscos

## 1.5. Resultados y análisis

### 1.5.1. Medias para la determinación de los parámetros estáticos del giróscopo

Se pone el tocadiscos a girar y mediante la conexión Wi-Fi se indica a la *BeagleBoard xM* que empiece y termine de logear los datos. Se trabaja con el promedio de las velocidades angulares obtenidas en series de datos de 20 segundos controlados por cronómetro. La velocidad del tocadiscos permanece constante en todas las pruebas y lo que se varía es el ángulo del plano donde se apoya el cubo, haciendo

uso de las escuadras (figura 1.1).

La IMU arroja datos enteros en complemento a dos. La hoja de datos del fabricante asegura que la relación entre bits y *grados/segundo* es:  $14,375 \text{ LDB}/(\text{°}/\text{s})$ . Como se desea trabajar con velocidades angulares en  $\text{rads}^{-1}$  se tiene que la ganancia será  $\approx 823,6$

Al igual que con la calibración del acelerómetro (capítulo ??), se utiliza la función *lsqnonlin* de *Matlab* para ajustar las medidas obtenidas contra los valores teóricos para cada configuración. Dado que las medidas ya vienen expresadas en  $(\text{°}/\text{s})$  y previamente pre-calibradas internamente a la IMU, se afirma que una buena semilla para las ganancias en los 3 ejes es el vector  $G = [823,6; 823,6; 823,6]$ . A su vez se supone que cada offset de cada eje será cercano a 0. Además suponiendo que los ángulos de no-ortogonalidad de los ejes es despreciable, se llega a que una buena semilla para la función *lsqnonlin* es la siguiente:

$$\theta_0 = (823,6, 823,6, 823,6, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

Los parámetros que minimizan la suma de los errores al cuadrado son los siguientes:

$$\theta = \begin{bmatrix} 796,6646; 808,2419; 803,4482; -25,3819; -15,7210; -1,8871; \\ 0,0093; 0,0659; 0,0093; 0,0128; -0,0250; 0,0552 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Es interesante destacar que el vector  $\theta$  hallado es similar a la semilla propuesta, por lo que podemos afirmar que el mínimo local encontrado por la función *lsqnonlin* es el deseado.

Una buena medida de los resultados obtenidos se puede obtener al analizar el promedio de los errores cometidos ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ):

$$\mu = 0,01877 \quad (\text{rad}/\text{s}) \quad (1.3)$$

$$\sigma = 0,0231 \quad (\text{°}/\text{s}) \quad (1.4)$$

El error promedio corresponde a una velocidad angular de  $1,07^\circ/\text{s}$  y  $2\sigma$  corresponde a una velocidad angular de  $2,64^\circ/\text{s}$ . Estos valores son suficientemente pequeños en comparación con las velocidades angulares típicas a las cuales se encontrará sometido el cuadricóptero y por ende puede considerarse que la calibración realizada es aceptable.

### 1.5.2. Variación con la temperatura

Como fue explicado en el capítulo ??, la temperatura de trabajo de la IMU es ampliamente mayor que la temperatura para la cual fueron calibrados los sensores. Para realizar la compensación de la medida del giroscopio por temperatura, se utiliza un método idéntico al utilizado para el acelerómetro: se varía la temperatura desde una temperatura aproximada de  $48^\circ\text{C}$  hasta  $35^\circ\text{C}$  y se releva la curva de velocidad angular medida contra temperatura.

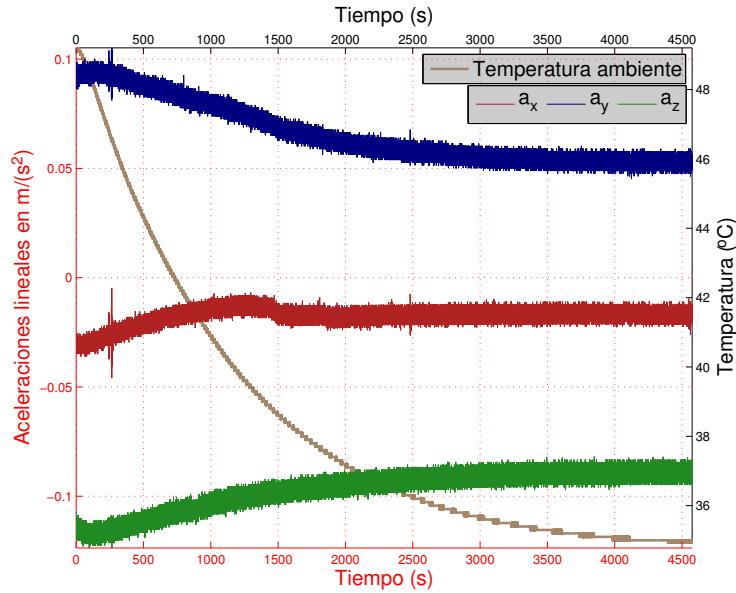


Figura 1.3: Variación de la velocidad angular con la temperatura

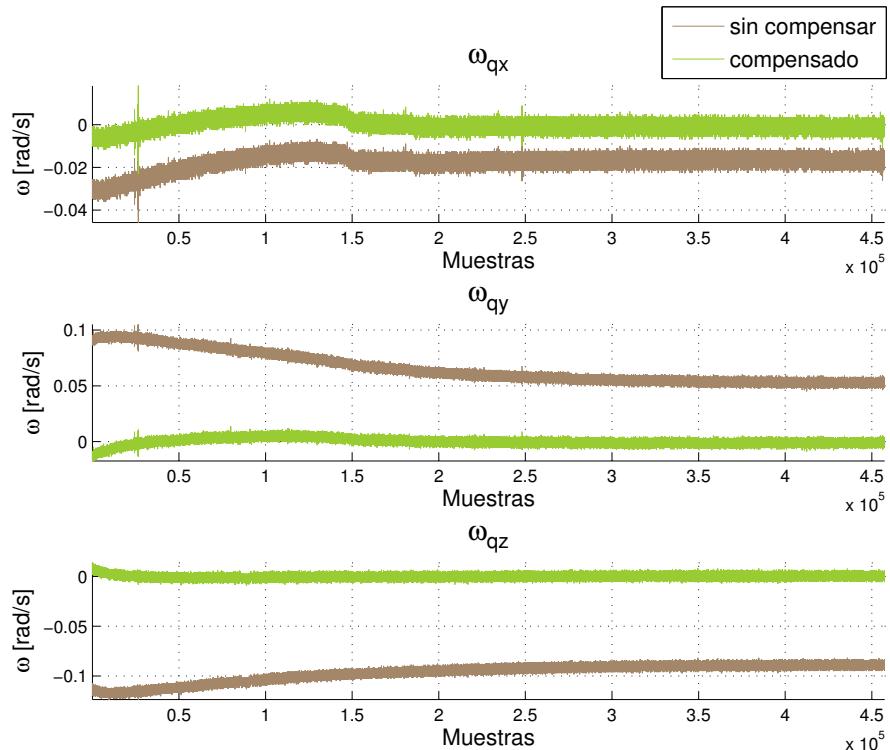


Figura 1.4: Velocidad angular compensada por temperatura

Aca decir como es el modelo q se usa para compensar la temperatura. tratar de explicar lo del offset que no depende de la temperatura

Recordando la ecuación 1.1, el nuevo modelo para la velocidad angular es el siguiente:

$$\tilde{\mathbf{w}}^a = K_w(T_a^p)^{-1} \mathbf{w}^p + \mathbf{b}_w + \mathbf{b}_1(t - t_0) + \mathbf{b}_0$$

simplemente definiendo  $\mathbf{b}_0 = \mathbf{b}_w + \mathbf{b}'_0$ :

$$\tilde{\mathbf{w}}^{\mathbf{a}} = K_w(T_a^p)^{-1}\mathbf{w}^{\mathbf{p}} + \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1(t - t_0)$$