
Acelerómetro, Giroscopio y filtros

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecatrónica

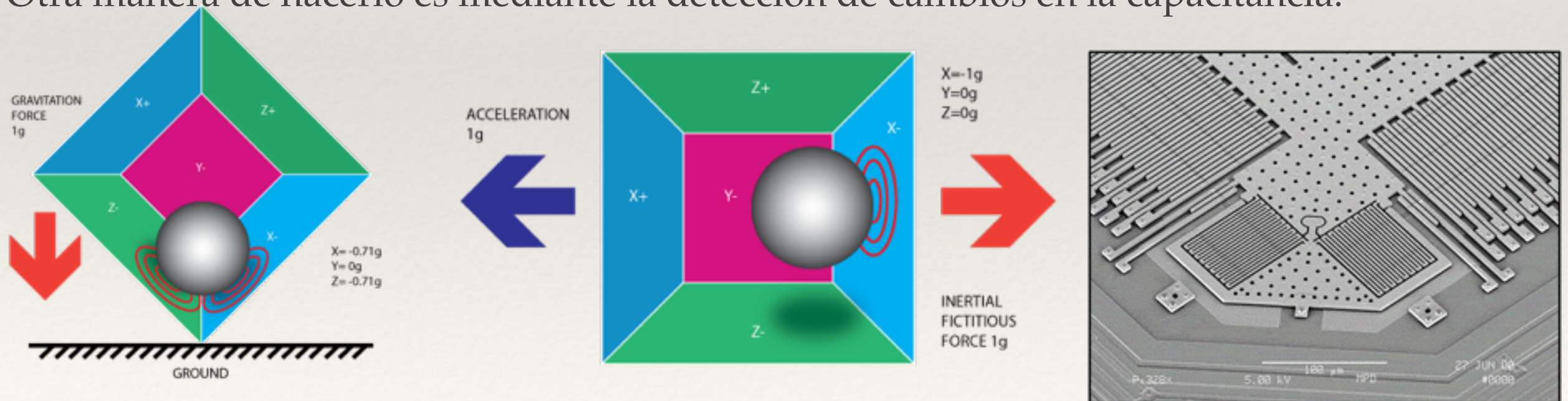
Miguel Angel Ruiz Gálvez

¿Qué es un acelerómetro?

¿Qué es un acelerómetro?

Un acelerómetro es un sistema micro electromecánico (MEMS) que permite medir fuerzas ocasionadas al movimiento. Estas fuerzas pueden ser estáticas, como la constante de fuerza de la gravedad, o pueden ser dinámicas, causadas por el movimiento o vibración de los cuerpos. Por convención los acelerómetros electrónicos utilizan los g's como unidad de medición.

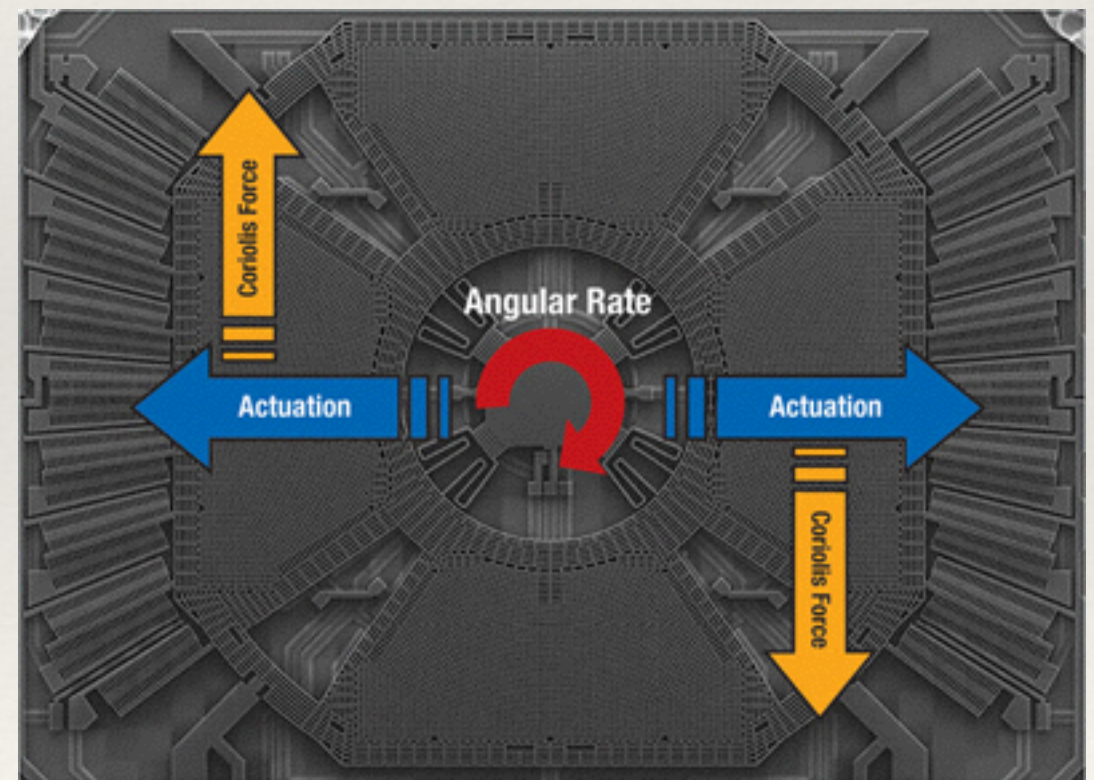
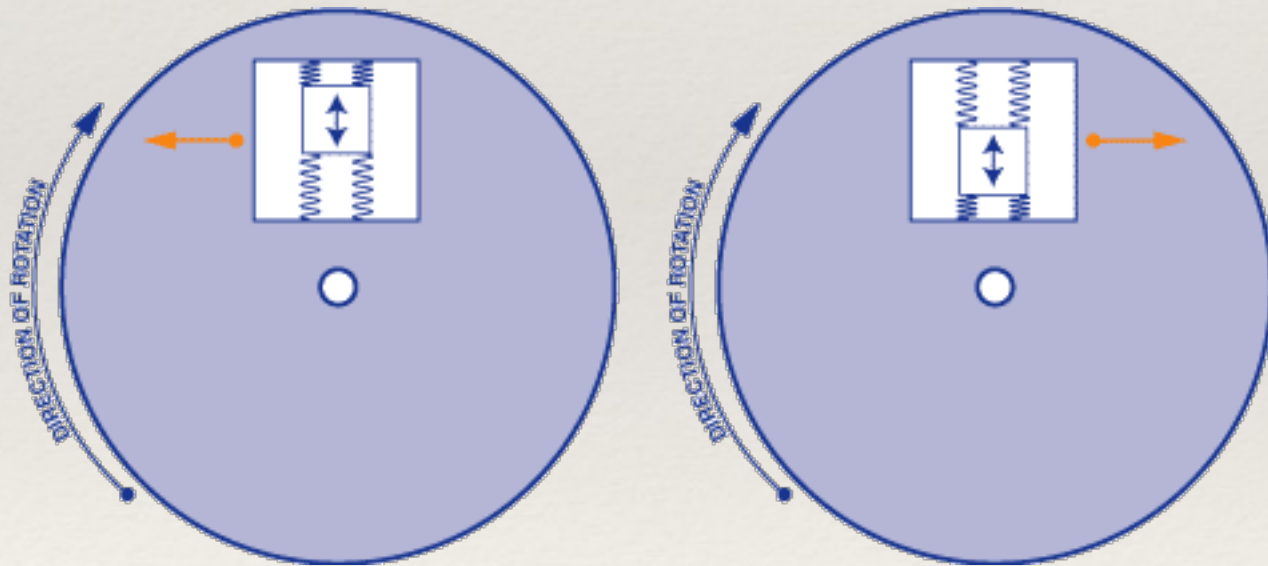
Algunos acelerómetros utilizan el efecto piezoeléctrico, contienen estructuras cristalinas microscópicas al deformarse por las fuerzas inerciales generan una diferencia de potencial. Otra manera de hacerlo es mediante la detección de cambios en la capacitancia.



¿Qué es un giroscopio?

¿Qué es un giroscopio?

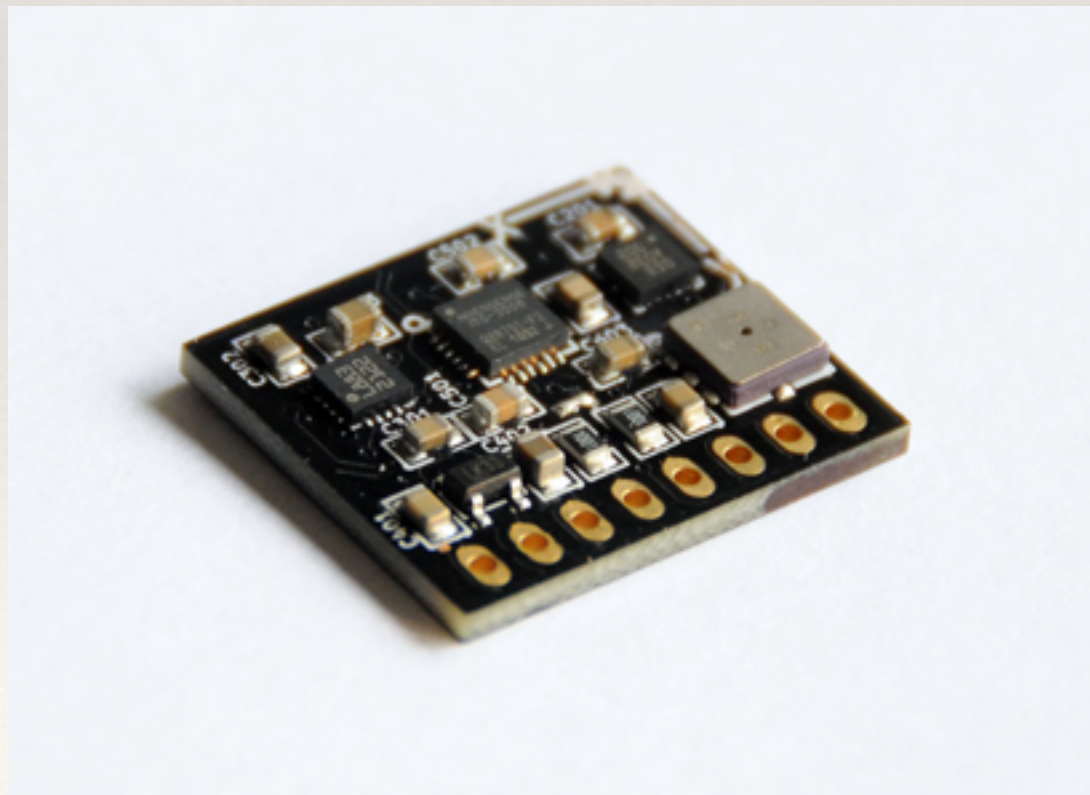
Un giroscopio es un dispositivo electromecánico que permite medir la velocidad angular ($^{\circ}/s$) medida en los 3 ejes de rotación. A diferencia de los acelerómetros los giroscopios no tienen una referencia fija. Los giroscopios pueden ser utilizados para determinar posición, así como cambios en la dirección de giro.



¿Qué es un IMU?

IMU

Unidad de medición inercial o IMU (del inglés inertial measurement unit), es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos. Algunos de estos dispositivos pueden contener otros sistemas de medición magnetómetros, barómetro, termómetros, altímetros o GPS.



¿Qué buscar?

Rango: Límites máximos y mínimos que el dispositivo puede medir ($\pm 1g$).

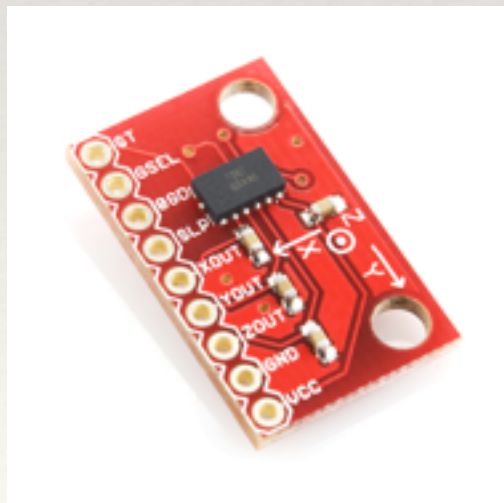
Interface: Los sistemas pueden tener diferentes tipos señales para interactuar.

- Analógicos: Producen una señal de voltaje directamente proporcional a el valor medido, normalmente se mantiene en un valor medio (por ejemplo 2.5 = a 0g en un acelerómetro), fácil de implementar, velocidad de respuesta alta.
- PWM, PAM, PPM, PDM: Produce una señal cuadrada de frecuencia constante y pulsos variables. Velocidad media de respuesta.
- Digital: Utilizan protocolos de comunicación estándar (SPI o I²C). Es necesario un modulo de comunicaciones y conocer las propiedades de cada comunicación. Velocidad media de respuesta.

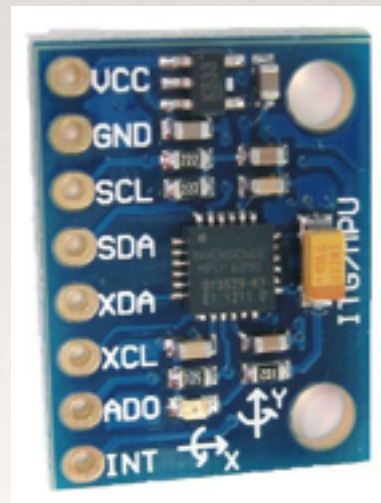
Numero de Ejes: Cantidad de grados de libertad necesarios para la aplicación.

Desempeño energético: Consumo energético del dispositivo, alimentación. Generalmente se dividen en 5V y 3.3V (low power).

Características extra: Modo "Sleep", detección de gravedad, selección de escala, filtros, interrupciones, bit de emergencia.



MMA7361

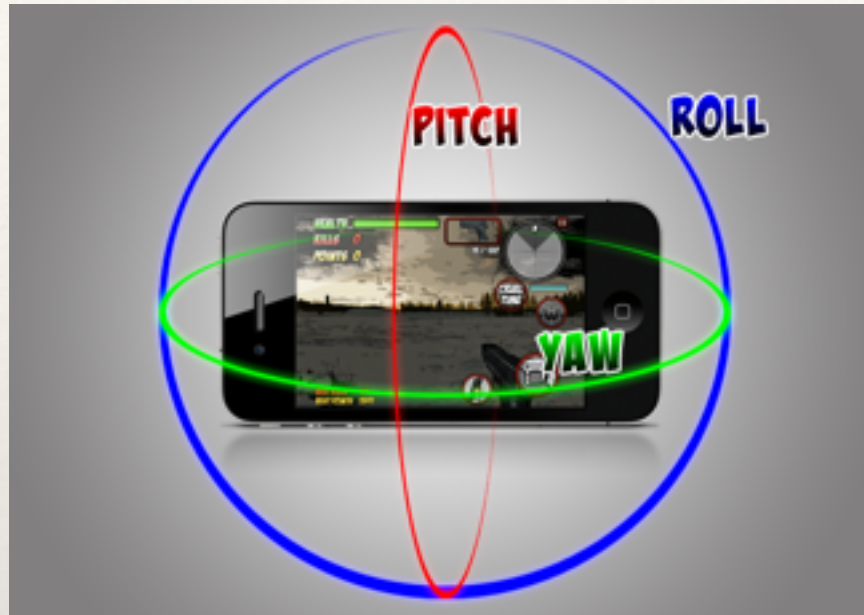


MPU 6050

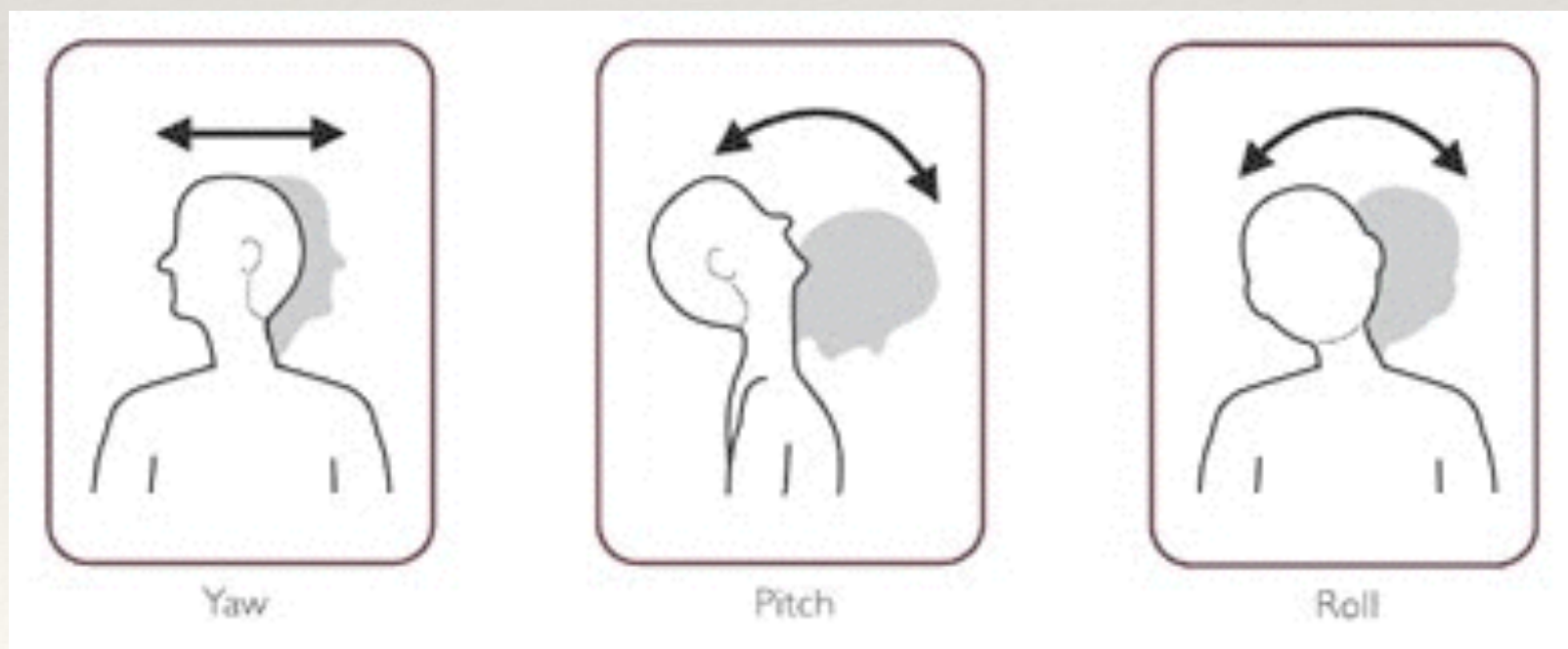
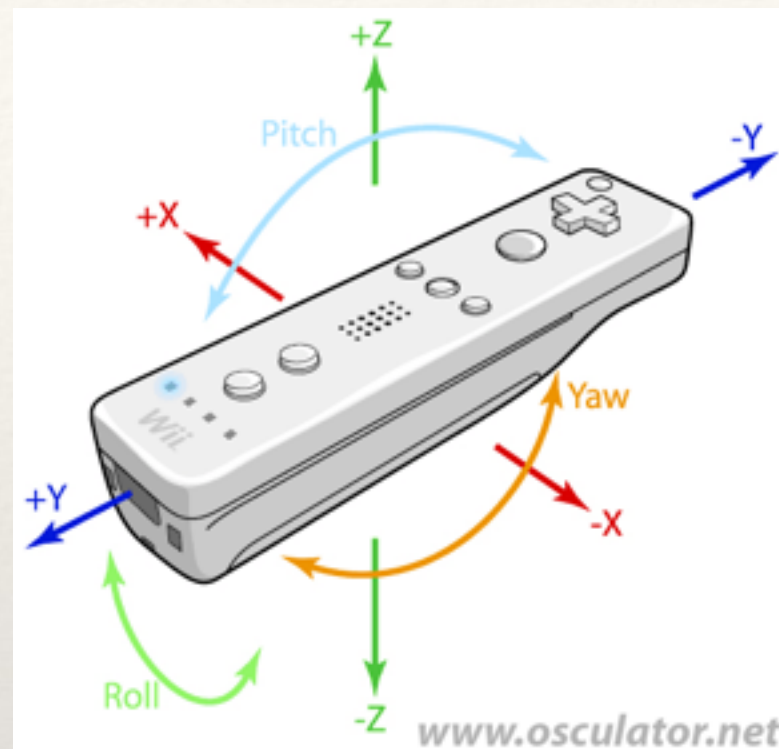


- **ADXL345** (Acelerómetro de 3 ejes)
- **HMC5883L** (Sensor de campo magnético de 3 ejes)
- **ITG3205** (Giroscopio de 3 ejes)

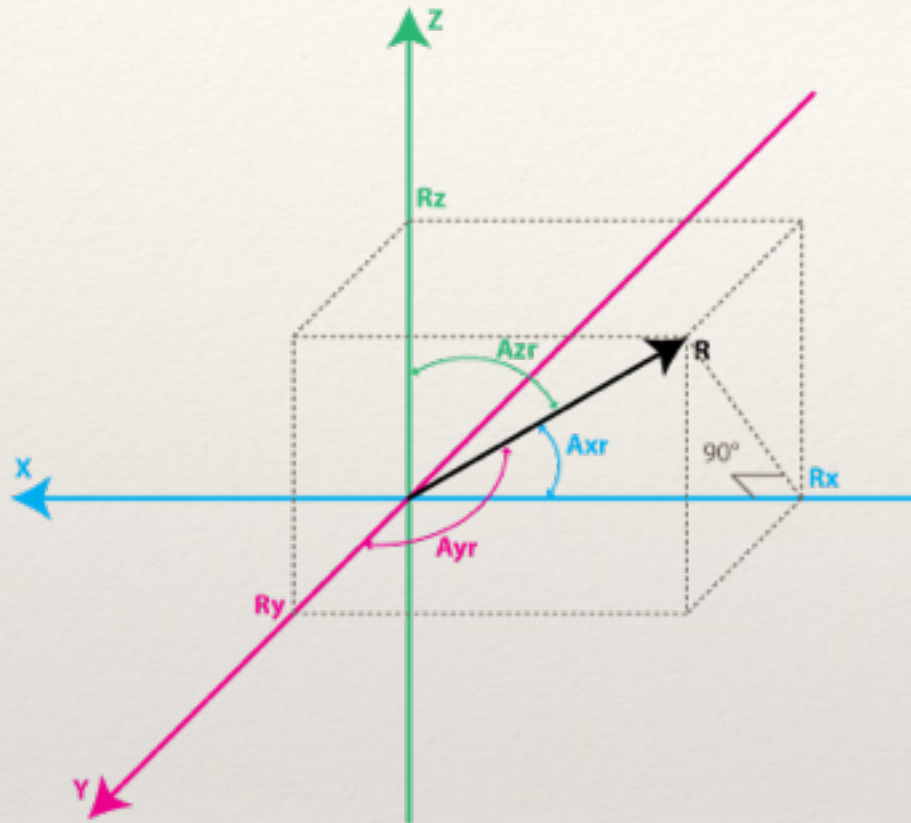
Aplicaciones



Pitch, Roll y Yaw



Cálculo de ángulos: Acelerómetro



Conversión para acelerómetros analógicos (ADC de 10 bits)

$$R_x = (\text{Valor en X} * V_{\text{ref}} / 1023 - V_{\text{zeroG}}) / \text{Factor de Escala}$$

$$R_y = (\text{Valor en Y} * V_{\text{ref}} / 1023 - V_{\text{zeroG}}) / \text{Factor de Escala}$$

$$R_z = (\text{Valor en Z} * V_{\text{ref}} / 1023 - V_{\text{zeroG}}) / \text{Factor de Escala}$$

Conversión para acelerómetros Digitales

$$R_x = (\text{Valor en X} / \text{Factor de Escala})$$

$$R_y = (\text{Valor en Y} / \text{Factor de Escala})$$

$$R_z = (\text{Valor en Z} / \text{Factor de Escala})$$

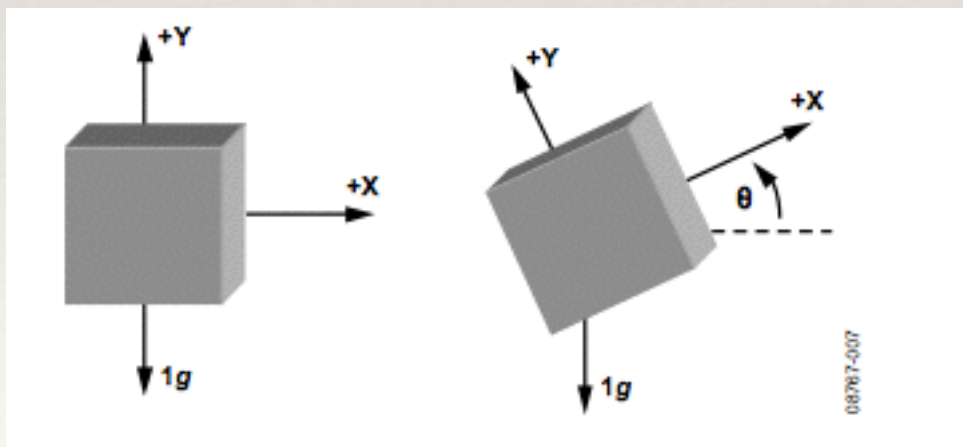
$$R = (R_x^2 + R_y^2 + R_z^2)^{(1/2)}$$

Se utiliza el vector de gravedad y sus respectivas proyecciones para el cálculo de los ángulos:

$$A_{xr} = \arctan(R_x / (R_y^2 + R_z^2)^{(1/2)})$$

$$A_{yr} = \arctan(R_y / (R_x^2 + R_z^2)^{(1/2)})$$

$$A_{zr} = \arctan((R_x^2 + R_y^2)^{(1/2)} / R_z)$$



NOTA: Nótese que A_{xr} y A_{yr} corresponden a Roll y Pitch, sin embargo A_{zr} no corresponde a Yaw

Cálculo de ángulos: Giroscopio

Conversión para giroscopio analógicos (ADC de 10 bits)

$$G_x = (\text{Valor en X} * V_{\text{ref}} / 1023) / \text{Factor de Escala}$$

$$G_y = (\text{Valor en Y} * V_{\text{ref}} / 1023) / \text{Factor de Escala}$$

$$G_z = (\text{Valor en Z} * V_{\text{ref}} / 1023) / \text{Factor de Escala}$$

Conversión para giroscopio Digitales

$$G_x = (\text{Valor en X} / \text{Factor de Escala})$$

$$G_y = (\text{Valor en Y} / \text{Factor de Escala})$$

$$G_z = (\text{Valor en Z} / \text{Factor de Escala})$$

NOTA: Por consecuencia de la integración a largos periodos de tiempo el giroscopio tiende a acumular el error, a esto se le llama deriva.

Un giroscopio mide la velocidad angular, es por ello que se debe de realizar un proceso de integración con respecto a un intervalo de tiempo (Δt).

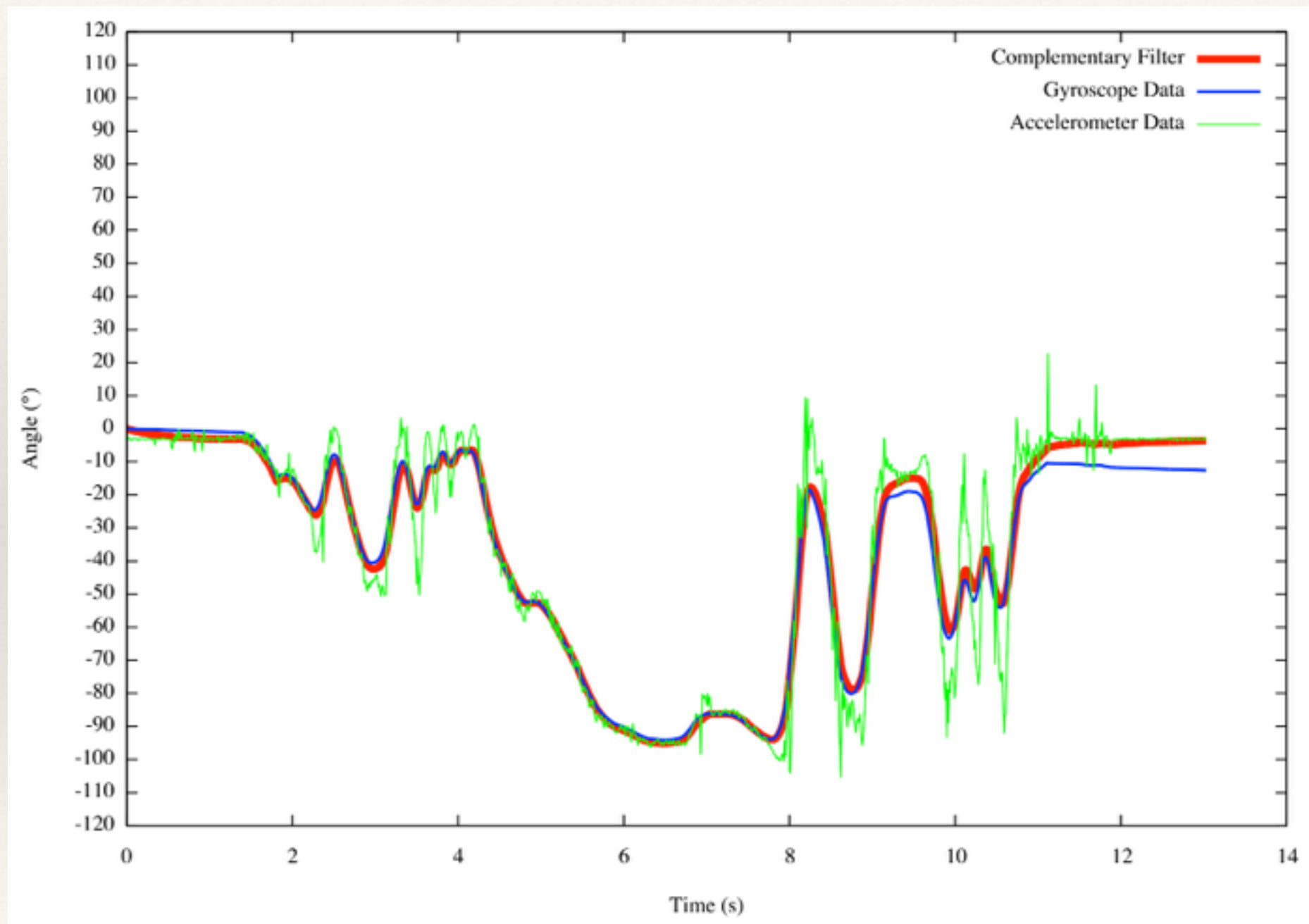
1. Se coloca el giroscopio en una superficie de ángulos conocidos.
2. Se toman por primera vez los valores del giroscopio se tomaran estos valores como referencia (G_{x_ref} , G_{y_ref} y G_{z_ref})
3. Se toma nuevamente el valor del giroscopio (G_x , G_y y G_z)
4. Se realiza la integración:

$$\text{AguloG}_x(n) = (G_x - G_{x_ref}) * \Delta t + \text{AguloG}_x(n-1)$$

$$\text{AguloG}_y(n) = (G_y - G_{y_ref}) * \Delta t + \text{AguloG}_y(n-1)$$

$$\text{AguloG}_z(n) = (G_z - G_{z_ref}) * \Delta t + \text{AguloG}_z(n-1)$$

Fusión de Sensores



Cálculo de ángulos: Filtro complementario

La solución a los distintos problemas que tiene cada dispositivo es la fusión de datos, para esto existen múltiples métodos (Filtro comparativo, Filtro Kalman, observadores, etc.)

$$\text{Angulo Filtrado}(n) = \alpha \times (\text{Angulo Giroscopio}) + (1 - \alpha) \times (\text{Angulo acelerómetro})$$

$$\alpha = \tau / (\tau + \Delta t)$$

$$\text{Angulo Giroscopio} = \text{Angulo Filtrado}(n-1) + (G - G_{\text{ref}}) \times \Delta t$$

Δt = intervalo de tiempo

τ = constante de tiempo mayor al tiempo de estabilización del acelerómetro, normalmente se aproxima a $\alpha \approx 0.96$.

Nota: Para reducción la acumulación de error se debe procurar mantener el Δt constante

Ejemplo

MPU 6050



MPU 6050

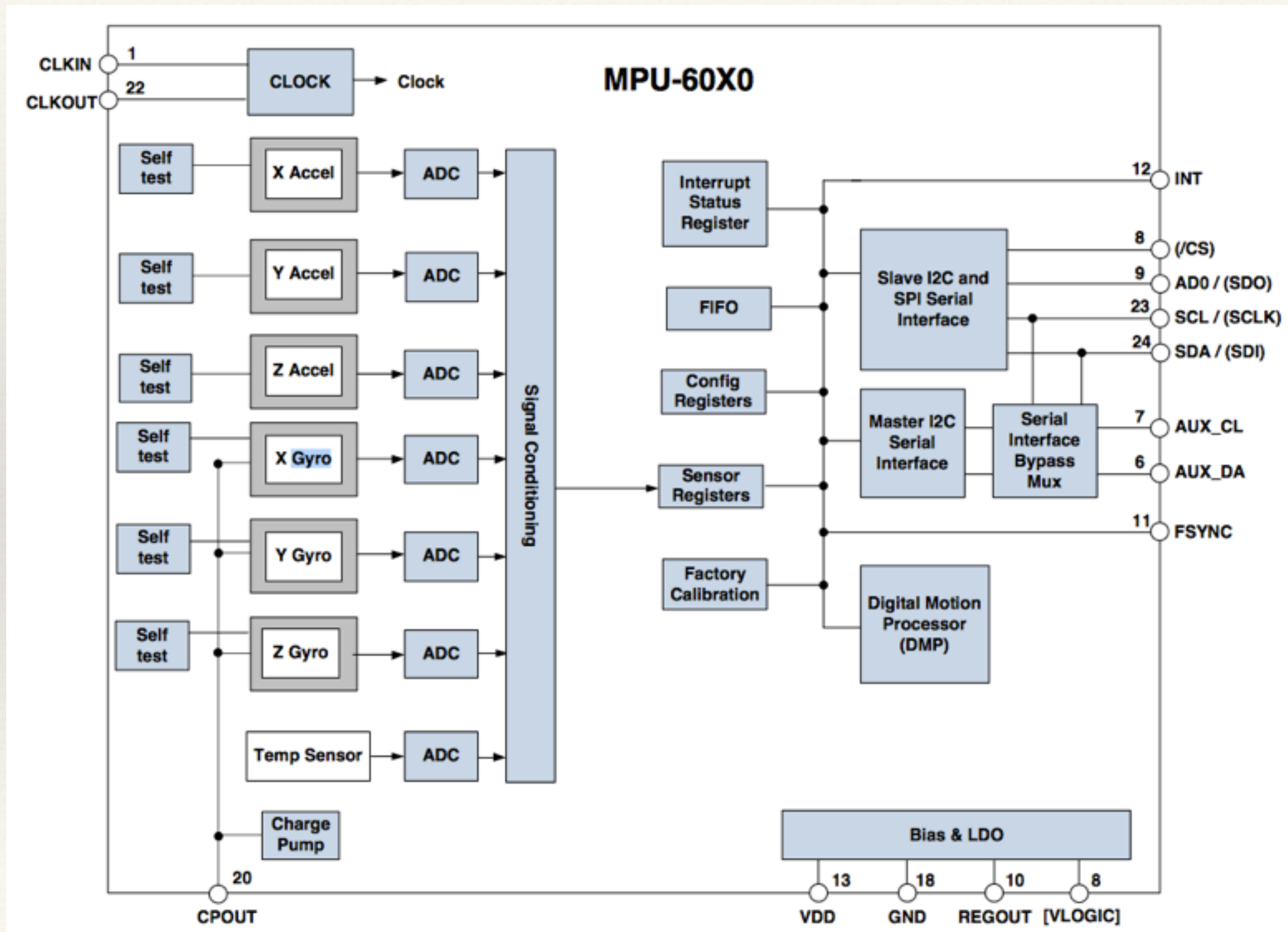
- ❖ Giroscopio: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 ($^{\circ}/\text{seg}$). Factor de escalamiento **131**, 65.5, 32.8, 16.4 ($\text{LBS}^{\circ}/\text{seg}$)
- ❖ Acelerómetro: ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 (g). Factor de escalamiento **16384**, 8192, 4096, 2048 ($\text{LBS}^{\circ}/\text{g}$)
- ❖ Resolución: 16 bits.
- ❖ Interfaz: I²C.
- ❖ Alimentación: 2.3V a 3.4V (Tarjeta ITG/MPU cuenta con regulador de 5V y resistencias a pull-up).
- ❖ 117 registros de configuración.
- ❖ **Reloj interno de 8Mhz.**
- ❖ **Por default se encuentra en modo "Sleep".**
- ❖ La dirección del dispositivo depende del estado de AD0

AD0 a pull-up ————— 0x69

AD0 a pull-down ----- 0x68

* LBS = Length Sensitivity Scale Factor

Arquitectura MPU 6050



Register Map Acelerómetro

ACCEL_XOUT_H, ACCEL_XOUT_L, ACCEL_YOUT_H, ACCEL_YOUT_L, ACCEL_ZOUT_H, and ACCEL_ZOUT_L

Type: Read Only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
3B	59	ACCEL_XOUT[15:8]							
3C	60	ACCEL_XOUT[7:0]							
3D	61	ACCEL_YOUT[15:8]							
3E	62	ACCEL_YOUT[7:0]							
3F	63	ACCEL_ZOUT[15:8]							
40	64	ACCEL_ZOUT[7:0]							

AFS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	$\pm 2g$	16384 LSB/g
1	$\pm 4g$	8192 LSB/g
2	$\pm 8g$	4096 LSB/g
3	$\pm 16g$	2048 LSB/g

Register Map Temperatura

TEMP_OUT_H and TEMP_OUT_L

Type: Read Only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
41	65	TEMP_OUT[15:8]							
42	66	TEMP_OUT[7:0]							

$$\text{Temperatura } C^{\circ} = (\text{TEMP_OUT})/340 + 36.5$$

Register Map Giroscopio

GYRO_XOUT_H, GYRO_XOUT_L, GYRO_YOUT_H, GYRO_YOUT_L, GYRO_ZOUT_H, and GYRO_ZOUT_L

Type: Read Only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
43	67	GYRO_XOUT[15:8]							
44	68	GYRO_XOUT[7:0]							
45	69	GYRO_YOUT[15:8]							
46	70	GYRO_YOUT[7:0]							
47	71	GYRO_ZOUT[15:8]							
48	72	GYRO_ZOUT[7:0]							

FS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	± 250 °/s	131 LSB/°/s
1	± 500 °/s	65.5 LSB/°/s
2	± 1000 °/s	32.8 LSB/°/s
3	± 2000 °/s	16.4 LSB/°/s

Register Map Power Management

PWR_MGMT_1

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
6B	107	DEVICE_RESET	SLEEP	CYCLE	-	TEMP_DIS	CLKSEL[2:0]		

DEVICE_RESET

When set to 1, this bit resets all internal registers to their default values.

The bit automatically clears to 0 once the reset is done.

The default values for each register can be found in Section 3.

SLEEP

When set to 1, this bit puts the MPU-60X0 into sleep mode.

CYCLE

When this bit is set to 1 and *SLEEP* is disabled, the MPU-60X0 will cycle between sleep mode and waking up to take a single sample of data from active sensors at a rate determined by *LP_WAKE_CTRL* (register 108).

TEMP_DIS

When set to 1, this bit disables the temperature sensor.

CLKSEL

3-bit unsigned value. Specifies the clock source of the device.

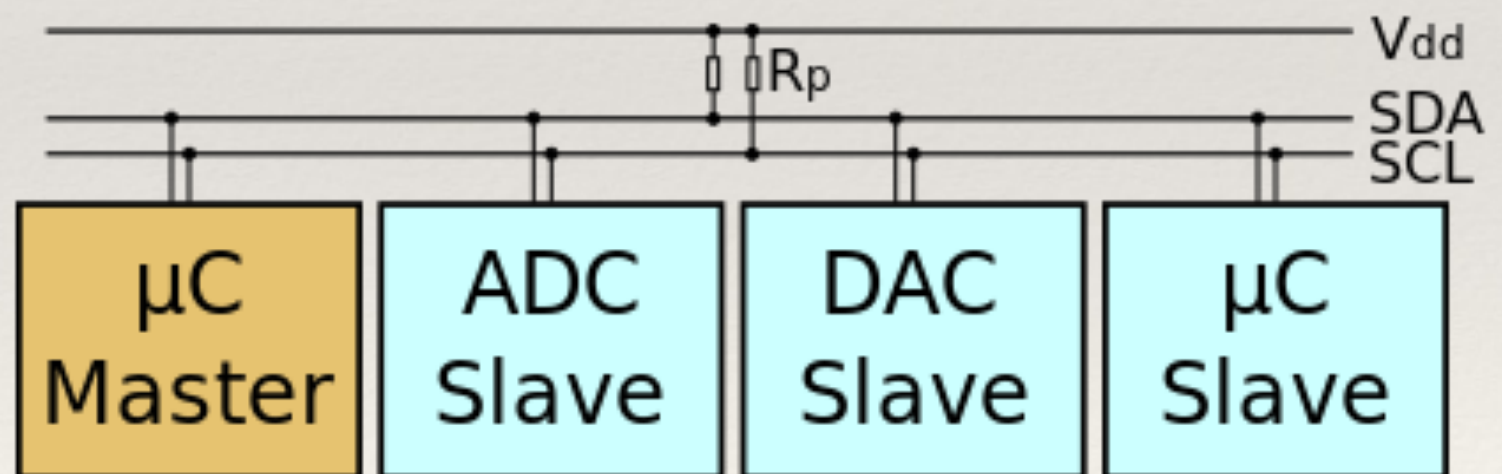
CLKSEL	Clock Source
0	Internal 8MHz oscillator
1	PLL with X axis gyroscope reference
2	PLL with Y axis gyroscope reference
3	PLL with Z axis gyroscope reference
4	PLL with external 32.768kHz reference
5	PLL with external 19.2MHz reference
6	Reserved
7	Stops the clock and keeps the timing generator in reset

I²C

Inter-Integrated Circuit o I²C es un bus de comunicaciones sincorno diseñado por Philips.

- La velocidad es de 100 kbit/s en el modo estándar.
- Esta comunicación permite la configuración de maestros y esclavos con uso de direcciones.
- Se utilizan registros para leer y escribir.
- Es un bus muy usado en la industria, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados. Corta distancia.
- Dos hilos de comunicación.

- SDA (Signal Data)
- SCL (Signal Clock)
- GND



I²C en MPU 6050

Single-Byte Read Sequence

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		

Single-Byte Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

Signal	Description
S	Start Condition: SDA goes from high to low while SCL is high
AD	Slave I ² C address
W	Write bit (0)
R	Read bit (1)
ACK	Acknowledge: SDA line is low while the SCL line is high at the 9 th clock cycle
NACK	Not-Acknowledge: SDA line stays high at the 9 th clock cycle
RA	MPU-60X0 internal register address
DATA	Transmit or received data
P	Stop condition: SDA going from low to high while SCL is high

Arduino + I²C + MPU 6050

Libreria Wire para UNO A4 (SDA), A5 (SCL)

```
Wire.begin()
```

```
Wire.beginTransmission(dirección)
```

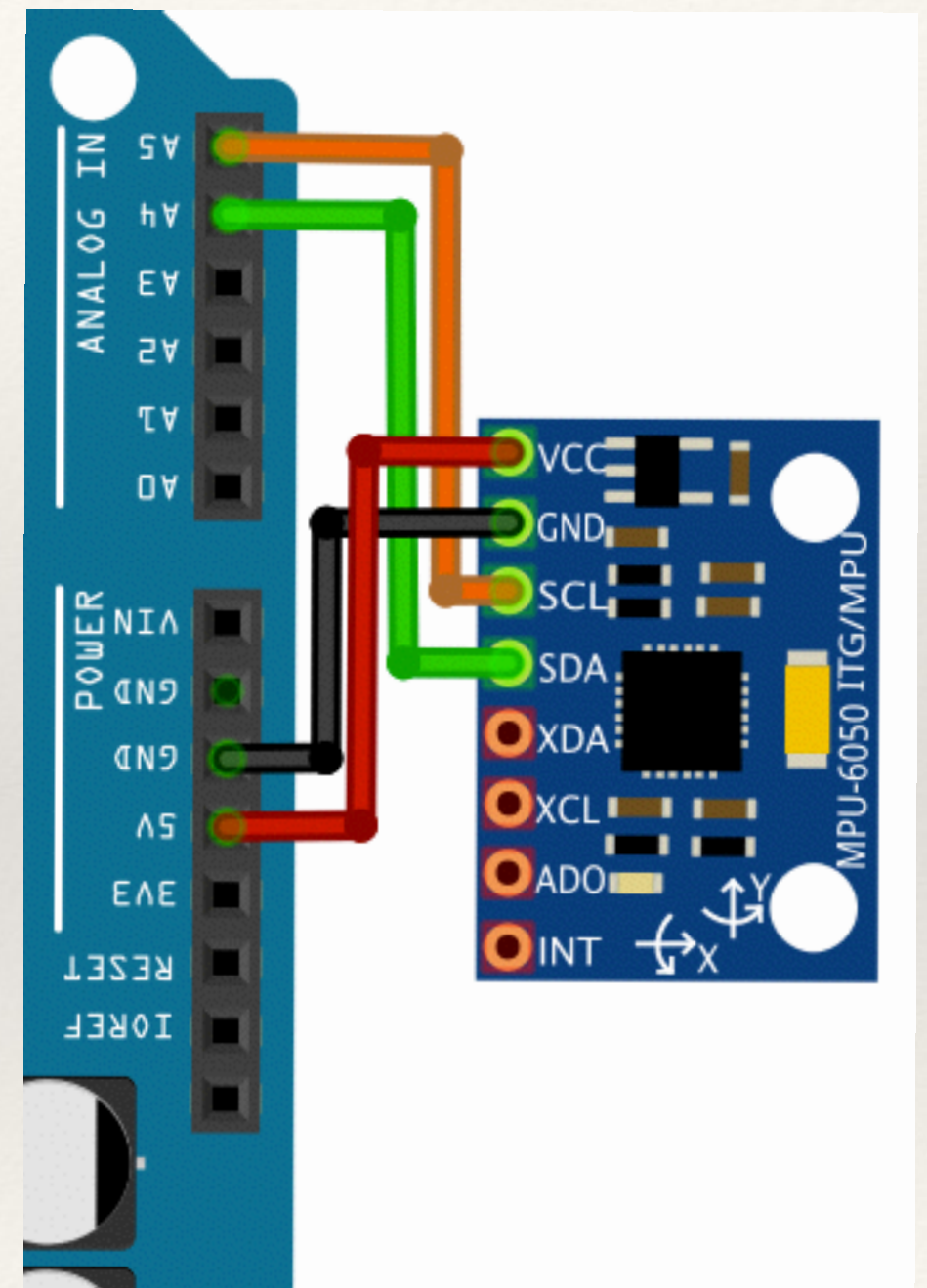
```
Wire.write(valor)
```

```
Wire.endTransmission(stop)
```

```
Wire.requestFrom(dirección,cantidad,stop)
```

```
valor = Wire.read()
```

Nota: STOP = TRUE / FALSE



Practica



Practica

Normal - 10 puntos:

- Lectura de los ángulos de posición del IMU por filtro complementario.
- Relacionar Pitch y Roll con X y Y respectivamente en una interfaz.
- Si la posición de la mira coincide con un objeto al presionar un botón se incrementa un Score y aparece un nuevo objeto en una posición diferentes.
- No importan los elementos de la interfaz.
- Sonidos de interacción.

Heroica - 20 puntos:

- Lectura de los ángulos de posición del IMU por filtro complementario.
- Relacionar Pitch y Roll con X y Y respectivamente en una interfaz.
- Si la posición de la mira coincide con un objeto al presionar un botón se incrementa un Score y aparece un nuevo objeto en una posición diferentes.
- Se lleva una cuenta de tiempo, únicamente el usuario puede disparar dentro de un tiempo estipulado.
- Importan los elementos de la interfaz.
- Sonidos de interacción.

Legendaria - 30 puntos:

- Lectura de los ángulos de posición del IMU por filtro complementario.
- Relacionar Pitch y Roll con X y Y respectivamente en una interfaz.
- Si la posición de la mira coincide con un objeto al presionar un botón se incrementa un Score y aparece un nuevo objeto en una posición diferentes.
- Se lleva una cuenta de tiempo, únicamente el usuario puede disparar dentro de un tiempo estipulado.
- Estructura completa como un video juego. (Pantalla de inicio, pantalla de partida).
- Importan los elementos de la interfaz.
- Mantener registro del máximo score.
- Sonidos de interacción.

NOTA: Pack de imágenes -5 punto, opcional.