

O uso do MPU-6050

Instrumentação Eletrônica para Engenharia

Filipe Menezes Ribeiro Antunes , Giulio Henrique de Andrade
Pasini

Engenharia Eletrônica
Universidade de Brasília - Faculdade do Gama
Gama, Distrito Federal

E-mails: 180041762@aluno.unb.br , 221029211@aluno.unb.br

I. INTRODUÇÃO

O MPU-6050 é um dispositivo de pequenas dimensões (24x4x9 mm) que oferece um rastreamento de movimento de seis eixos, proporcionando seis graus de liberdade. Ele combina um giroscópio triaxial, um acelerômetro triaxial e um processador de movimento digital em uma única unidade. Através de um barramento I2C, é possível acoplar uma bússola triaxial externa para obter uma saída de fusão de movimento de nove eixos. O MPU-6050 também possui três conversores analógico digital de 16 bits para digitalizar as saídas do giroscópio, além de outros três para digitalizar as saídas do acelerômetro [1]. Para assegurar um rastreamento preciso tanto de movimentos lentos quanto rápidos, o dispositivo conta com um giroscópio e um acelerômetro programáveis.

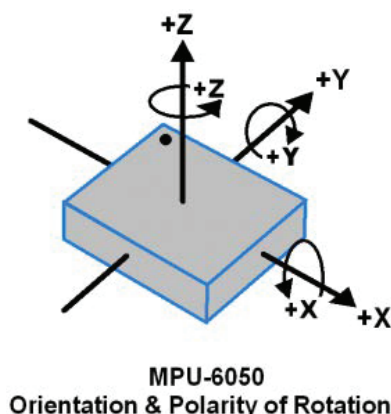


Figura 1. O MPU-6050 representa os 6 graus de liberdade por meio de 6 eixos, sendo 3 dedicados ao giroscópio e outros 3 dedicados ao acelerômetro.

II. FUNCIONAMENTO DO ACELERÔMETRO

A. Princípios de Funcionamento

Os sensores de movimento são dispositivos projetados para calcular a variação da posição, localização ou deslocamento de um objeto ao longo do tempo. Se a posição de um objeto é representada pela função $x(t)$, a primeira derivada dessa função nos dá a velocidade do objeto $v(t)$, desde que uma direção seja especificada. Se a velocidade do objeto está em constante mudança, então a primeira derivada da velocidade nos dá a aceleração,

que também é a segunda derivada da posição. Portanto, a equação para a velocidade do objeto pode ser expressa como:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (1)$$

Logo, a equação para a aceleração do objeto é dada por:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (2)$$

O acelerômetro é o principal sensor de movimento, responsável por medir a aceleração $a(t)$ de um objeto. Através da integração das equações 1 e 2, é possível determinar a velocidade e a posição do objeto [2]. Assim, o acelerômetro é capaz de fornecer dados sobre aceleração, velocidade ou posição. A aceleração em um acelerômetro é geralmente expressa em comparação com a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra, que é aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$. Existem diversos processos físicos que podem ser empregados para criar um sensor de aceleração. É possível encontrar acelerômetros baseados em massas rotativas, bem como designs que combinam a lei de Newton da aceleração da massa e a lei de Hooke da ação da mola [2].

B. Sistema Massa-mola Simplificado

A lei de Newton, em sua segunda formulação, afirma que quando uma força é aplicada a um objeto, este se movimenta com uma aceleração diretamente proporcional à sua massa. Isso pode ser expresso como:

$$F = m \cdot a \quad (3)$$

A lei de Hooke afirma que quando uma mola com constante k é esticada a partir de sua posição de equilíbrio por uma distância Dx , uma força é gerada na mola. Esta força pode ser calculada como:

$$F = k \cdot dx \quad (4)$$

Na Figura 2, podemos ver o funcionamento básico de um acelerômetro. Uma massa desliza livremente sobre uma base e está ligada a ela por uma mola em seu estado natural não deformado [2]. Quando uma aceleração é aplicada ao conjunto, a mola se estende para fornecer a força necessária para acelerar a massa. Essa relação pode ser descrita pela combinação das equações de Newton e de Hooke.

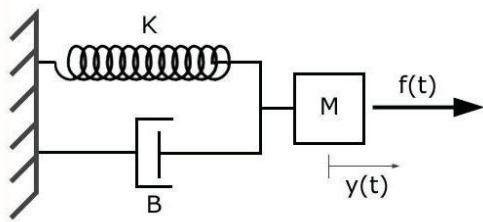


Figura 2. Sistema de um acelerômetro do tipo massa mola.

$$m \cdot a = k \cdot \Delta x \quad (5)$$

Onde:

k = Constante da mola $[N/m]$;

Δx = Extensão da mola $[m]$

m = Massa $[kg]$

a = Aceleração $[m/s^2]$

Por viés da equação 5, tem que se medir a aceleração ao reduzi-la a uma medida de extensão linear da mola:

$$a = \frac{k}{m} \cdot \Delta x \quad (6)$$

Nota-se que a equação 6 somente pode ser aplicada para casos estáticos [2].

C. Acelerômetro em Sistemas Estáticos e Não Estáticos

Há uma variedade de acelerômetros disponíveis para medir a aceleração, incluindo cristais piezoelétricos, capacitores diferenciais, sensores piezoresistivos, servos-acelerômetros e outros [2]. Contudo, a maioria desses dispositivos opera com base no mesmo princípio fundamental do sistema massa-mola simplificado mencionado anteriormente. Os acelerômetros podem ser categorizados em dois tipos com base em sua funcionalidade: aqueles que conseguem medir a aceleração estática, como a aceleração devida à gravidade, e aqueles que são insensíveis a esse tipo de aceleração. Para estudos cinéticos no corpo humano, os acelerômetros piezoresistivos ou capacitivos são frequentemente utilizados [2][3].

Os acelerômetros piezoresistivos são fabricados com um conjunto de microestruturas, onde molas de polissilício, cuja resistência elétrica é afetada pela aceleração, são organizadas em uma configuração de ponte de Wheatstone. Quando uma aceleração externa é aplicada, a deformação dessas molas desequilibra a ponte, gerando um sinal de saída proporcional à intensidade da aceleração [2].

Os acelerômetros capacitivos geralmente utilizam uma geometria diferencial (conhecida como capacitor diferencial) para minimizar os efeitos não lineares. Nessa configuração, a placa central móvel está conectada à massa sísmica e as placas externas são fixas. A aceleração aplicada provoca o movimento relativo das placas. Esse deslocamento resulta na variação da capacitância equivalente do sistema, expressa pela Equação 7,

onde A é a área de cada placa, ϵ é a constante dielétrica do material isolante e d é a distância inicial entre as placas. Essa variação de capacitância é então convertida em tensão pelo condicionador de sinais para produzir o sinal de saída do acelerômetro [2].

$$\Delta C = \frac{2 \cdot A \cdot \epsilon}{d^2} \cdot \Delta d \quad (7)$$

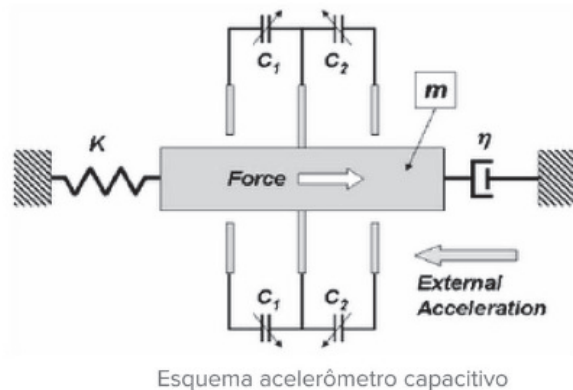


Figura 3. Esquema do acelerômetro capacitivo.

O MPU-6050 possui um acelerômetro produzido com a tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Esta tecnologia permite a combinação de elementos mecânicos, como sensores e atuadores, com componentes eletrônicos, tudo integrado em um único substrato de silício.

D. Especificações do acelerômetro o MPU-6050

Características do MPU-6050
O acelerômetro possui três eixos e é capaz de fornecer saída digital. Além disso, sua faixa de fundo de escala é programável e pode ser ajustada para $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$.
Os conversores analógico-digital (ADCs) integrados de 16 bits permitem a amostragem simultânea dos acelerômetros sem a necessidade de um multiplexador.
Corrente operacional normal do acelerômetro é de $500\mu A$
Corrente do modo de acelerômetro de baixa potência: $10\mu A$ a $1.25Hz$, $20\mu A$ a $5Hz$, $60\mu A$ a $20Hz$, $110\mu A$ a $40Hz$
Possui detecção e sinalização de orientação
Detecção de toque
Interrupções programáveis
Interrupção high-g e autoteste do usuário

Vejamos abaixo uma tabela com especificações do acelerômetro. com $V_{DD} = 2.375V - 3.46V$, VLOGIC (MPU-6050 only) = $1.8V \pm 5\%$ ou V_{DD} , $TA = 25^\circ C$ [1].

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		µg ² /Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		260	Hz	
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
			32		mg/LSB	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT						

Figura 4. Tabela com dados da funcionalidade do acelerômetro.

E. Extração dos dados e Visualização na tela do computador no tempo de execução do código

O acelerômetro é um dispositivo que tem a capacidade de medir a aceleração, que é a mudança de velocidade de um objeto ao longo do tempo. Ele pode detectar tanto forças estáticas, como a força da gravidade (9,8 m/s²), quanto forças dinâmicas, como vibrações e movimentos. O MPU-6050 é um exemplo de acelerômetro que pode medir a aceleração nos eixos x, y e z.

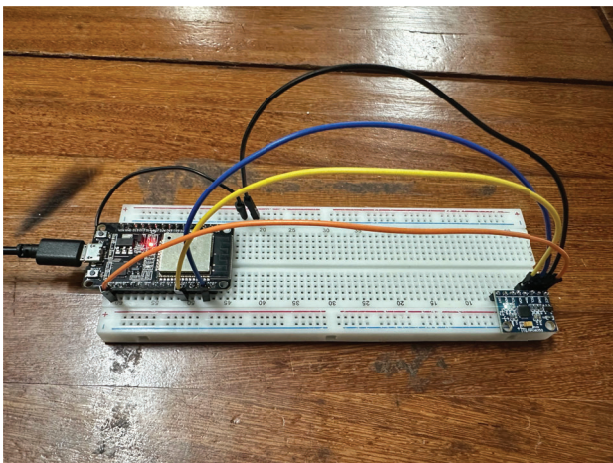


Figura 5. O circuito de conexão entre o sistema embarcado e a MPU-6050 foi utilizado para extrair dados de aceleração. O jumper laranja foi utilizado para conectar o VDD, o jumper preto para o GND, o jumper azul para o SDA e o jumper amarelo para o SCL.

Para coletar as leituras de aceleração (x, y, z) do MPU-6050, foi necessário o uso de uma ESP32, uma Protoboard e cabos de jumper. A coleta dos dados de aceleração foi feita através da implementação de um código na plataforma da IDE Arduino. Após a implementação do código, os dados foram transferidos para o sistema embarcado através do barramento serial I2C.

Para a criação do código, conforme anexo IV.I, foram empregadas as bibliotecas Adafruit_MPU6050 e Adafruit_Sensor. Com essas bibliotecas incluídas, um objeto “mpu” foi criado para interagir com o sensor. A taxa de transmissão do monitor foi estabelecida em 115200 e o sensor foi inicializado. Posteriormente, foi necessário ajustar a faixa de medição do acelerômetro e do giroscópio, bem como a largura de banda do filtro.

```
COM4
Acceleration X: 0.88, Y: 0.59, Z: 9.27 m/s^2
Acceleration X: 0.84, Y: 0.53, Z: 9.27 m/s^2
Acceleration X: 0.89, Y: 0.55, Z: 9.24 m/s^2
Acceleration X: 0.88, Y: 0.53, Z: 9.25 m/s^2
Acceleration X: 0.79, Y: 0.53, Z: 9.28 m/s^2
Acceleration X: 0.93, Y: 0.56, Z: 9.24 m/s^2
Acceleration X: 0.91, Y: 0.52, Z: 9.24 m/s^2
Acceleration X: 0.80, Y: 0.51, Z: 9.26 m/s^2
```

Figura 6. Dados coletados a partir da porta serial no Arduino IDE.

No loop do código, os valores do sensor foram coletados e as leituras de aceleração foram exibidas para cada eixo (x, y, z), com as unidades em metros por segundo ao quadrado. A leitura da velocidade angular do giroscópio também foi realizada para cada eixo (x, y, z), com as unidades em radianos por segundo (rad/s). Novas leituras do sensor foram apresentadas a cada 500 milissegundos.

O funcionamento do giroscópio baseia-se no princípio da inércia. O eixo em rotação tem um efeito de memória que mantém uma direção fixa em relação ao círculo máximo, dispensando as coordenadas geográficas¹. Isso significa que o giroscópio resiste a qualquer tentativa de mudar sua direção original¹.

Quando o rotor do giroscópio está girando, ele apresenta duas propriedades principais: a rigidez giroscópica e a precessão⁶. A rigidez giroscópica refere-se à tendência do giroscópio de manter o eixo de rotação apontando na mesma direção. A precessão é o movimento do eixo de rotação à resposta a um torque externo 5.

Os giroscópios são amplamente utilizados em muitas tecnologias modernas. Por exemplo, eles são usados em sistemas de navegação para aviões, naves espaciais e barcos. Na aviação, eles servem como girocompasso e piloto automático, permitindo o voo em condições de visibilidade zero¹. Além disso, os giroscópios também são usados para estabilizar grandes embarcações e alguns satélites ¹.

III. CONCLUSÕES

IEm um objeto em repouso, a aceleração no eixo z deve ser igual à aceleração da gravidade, enquanto nos eixos x e y deve ser zero. No entanto, ao analisar os dados coletados, notou-se que a aceleração nos eixos x e y apresentava pequenas flutuações próximas de zero. Essas flutuações podem ser atribuídas à tolerância de calibração inicial zero-g, que pode variar em ± 50 mg. Além disso, fatores de não linearidade que afetam 0,5% do valor da medida final e a sensibilidade limitada do dispositivo em relação ao que está sendo medido também podem contribuir para essas variações.

REFERÊNCIAS

- [1] InvenSense, "Mpu-6000 and mpu-6050 product specification revision 3.4," <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>, 2015, acesso em: 06 mai. 2023.
- [2] Y. Bruxel, "Sistema para análise de impacto na marcha humana," Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 12 2010.
- [3] M. Mathie, A. Côster, N. Lovell, and B. Celler, "Use of a triaxial accelerometer in unsupervised monitoring of human movement," in *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, Sydney, August 2003.
- [4] A. Industries, "Adafruit mpu6050," https://github.com/adafruit/Adafruit_MPU6050, 2019, acesso em: 06 mai. 2023.
- [5] S. Santos, "Esp32 with mpu-6050 accelerometer, gyroscope and temperature sensor (arduino)," <https://randomnerdtutorials.com/esp32-mpu-6050-accelerometer-gyroscope-arduino/>, 2021, acesso em: 06 mai. 2023.