



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

# **Caixa Preta para Carros: Comparação de métodos de estimativa de inclinação usando dados do MPU9250**

José Luiz G. Nogueira

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador  
Prof. Dr. Ricardo Zelenovsky

Brasília  
2020



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

## **Caixa Preta para Carros: Comparação de métodos de estimativa de inclinação usando dados do MPU9250**

José Luiz G. Nogueira

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Prof. Dr. Ricardo Zelenovsky (Orientador)  
ENE/UnB

Prof. Dr. Membro da banca 1	Dr. Membro da banca 2
Instituição	Instituição

Prof.a Dr.a Ada Lovelace  
Coordenadora do Curso de Engenharia da Computação

Brasília, 18 de dezembro de 2020

# Dedicatória

-

# Agradecimentos

-

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

# Resumo

-

**Palavras-chave:** LaTeX, metodologia científica, trabalho de conclusão de curso

# Abstract

-

**Keywords:** LaTeX, scientific method, thesis

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	X1- Motivação . . . . .	1
1.2	X1- Objetivos . . . . .	2
1.3	X1- Metodologia . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Concluído no TCC1</b>	<b>4</b>
2.1	Tratamento dos dados . . . . .	4
2.2	Métodos de estimativa . . . . .	4
2.3	Dashboard com visualização dos dados . . . . .	6
<b>3</b>	<b>X1- Planejamento TCC2</b>	<b>8</b>
	<b>Referências</b>	<b>10</b>
	<b>Apêndice</b>	<b>10</b>
<b>A</b>	<b>Fluxograma do programa</b>	<b>11</b>

# Lista de Figuras

2.1 Imagem da visualização do painel, configurado com 4 linhas e 3 colunas, com dados de aceleração, giroscópio, magnetômetro, estimativas de inclinação e animação de inclinação. . . . .	7
--	---



# Lista de Tabelas

3.1 Tabela de planejamento da segunda parte do projeto final. . . . .	9
---	---

# Lista de Abreviaturas e Siglas

**ACM** Airbag Control Module.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 X1- Motivação

Em acidentes de trânsito que necessitam de laudo pericial, reconstituir o ocorrido é essencial. Por meio de fragmentos desprendidos, avarias, posição final dos veículos e marcas de frenagem, os peritos determinam a velocidade e a orientação dos veículos na colisão. Entretanto nem sempre os vestígios de interesse da perícia estão presentes no local do acidente. Dentre outros motivos, a falta de vestígios pode ocorrer por alteração da posição dos veículos, ou por uso de um freio ABS que não deixou marcas de frenagem.

Para os veículos que possuem airbag é possível utilizar o módulo Airbag Control Module (ACM), ele é responsável por ler sensores espalhados pelo veículo e controlar os airbags, mas também realiza o armazenamento das leituras realizadas por esses sensores, o que é extremamente importante para os peritos. Dentre esses dados armazenados pode-se encontrar aceleração, dados de impacto e pressão, velocidade linear e angular. Porém os sensores presentes em cada veículo variam, e os dados armazenados são feitos de forma não padronizada e pouco documentada, o que dificulta muito sua leitura e manipulação [1].

Com o objetivo de fornecer dados importantes para a perícia de forma padronizada, foi criado um projeto de graduação conjunta, orientada pelo Professor e Doutor Ricardo Zelenovsky, tendo como base o proposto por Vinícius Lima em sua dissertação de mestrado [1]. O projeto consiste na construção de um dispositivo de baixo custo, que realize o armazenamento de forma não volátil de dados úteis para a perícia. Dados esses que são mensurados por meio de sensores embarcados no próprio dispositivo.

Foi selecionado para este dispositivo, por meio de trabalhos de graduação anteriores, um conjunto de sensores composto por aceleração, giroscópio, magnetômetro e GPS, sendo assim possível entregar aos peritos dados como posição, velocidade, aceleração e inclinação

do veículo. O dispositivo funciona de tal forma que é possível identificar o momento da colisão e armazenar os dados antes, durante e após o evento de impacto.

No projeto supracitado, além da criação do próprio dispositivo também é deixado como ideia a criação de um software para a visualização desses dados para o público geral e peritos, como por exemplo um simulador 3D. A este projeto foi dado o nome Caixa Preta, por se assemelhar a funcionalidade de uma caixa preta de avião, entretanto com foco direcionado a carros.

Dado a natureza dos dados capturados pelos sensores do dispositivo é de extrema importância uma boa estimativa de inclinação, pois além de ser um dado muito útil para a perícia, ele é quem torna possível uma boa estimativa de velocidade e posição utilizando o acelerômetro.

Por fim, durante o decorrer das pesquisas bibliográficas surgiu a necessidade de uma plataforma para visualização dos dados, diferente do software já mencionado que possui como foco o uso geral e de peritos, a plataforma em questão possibilitaria uma melhor exploração do funcionamento de cada método de estimativa. Podendo este dashboard ser uma porta de entrada para demais membros que venham a agregar ao projeto Caixa Preta, onde o indivíduo pode além de visualizar e explorar os dados, entender seu funcionamento e cálculos de estimativas. Facilitando também no momento da criação do software de uso geral, uma vez que esta plataforma já terá todos os cálculos desenvolvidos em matlab, bastando sua tradução para outra linguagem ou inserção de uma interface gráfica amigável ao usuário final.

## **1.2 X1- Objetivos**

O presente trabalho tem por finalidade geral agregar ao projeto Caixa Preta indicando um método para estimativa de inclinação a partir de dados de sensores. Sendo 2 os objetivos específicos, criar um painel em matlab para cálculo, visualização e comparação de dados de inclinação utilizando de sensores de giroscópio, acelerômetro e magnetômetro e a seleção de um método de estimação de inclinação por meio da comparação dos métodos com dados em situações diversas.

O painel para visualização dos dados deve ser de fácil uso, manutenção e expansão, contando com documentação do código e manual de uso.

A comparação de métodos deve ser realizada com dados de diversas situações, advindos diretamente dos sensores, objetivando aproximar das situações que podem ser encontradas no uso real da Caixa Preta, onde possa ser exposto a acurácia, o tempo de convergência e tempo de execução de cada método.

E por fim realizar a indicação de um método de estimativa de inclinação e seus parâmetros de configuração para aplicação no software de uso geral, tendo como métricas a facilidade de implementação e uso, tempo de execução, tempo de convergência e acurácia.

## 1.3 X1- Metodologia

Tendo em vista o objetivo exploratório deste trabalho, será utilizada metodologia de pesquisa de caráter experimental e bibliográfico, e de natureza aplicada [2, 3]. No contexto do projeto isto significa que, será levantado por meio de artigos métodos de estimativa de inclinação que façam uso dos mesmos dados capturados pela Caixa Preta. Para cada método encontrado e compreendido, deverá ser implementado sua versão no matlab, construindo assim um dashboard com diversas visualizações. Durante a construção do painel, deve-se sempre ser levando em consideração a facilidade de uso do dashboard para alternar e comparar os métodos, permitindo selecionar os métodos e parâmetros que se deseja utilizar na simulação.

Uma vez construído o dashboard e compreendida as nuances de cada método, o projeto segue para uma segunda etapa na qual serão gerados dados de entrada. Os dados serão gerados utilizando os próprios sensores da Caixa Preta, e amostrados durante o repouso com o uso de transferidores, para posterior comparação e ajuste dos métodos.

Na terceira etapa será realizado o ajuste dos parâmetros dos métodos de forma empírica, objetivando se aproximar ao máximo dos valores base anotados durante a obtenção dos dados. Na quarta e última etapa será realizada a comparação dos métodos de forma quantitativa e qualitativa. Tendo como métricas principais a facilidade de implementação e uso, tempo de execução, tempo de convergência e acurácia.

Para a comparação de métodos será usado como base comparativa, as medidas de inclinação realizadas utilizando transferidor e, também medindo a capacidade do método em remover o vetor gravitacional dos dados do acelerômetro com o corpo em repouso. É sabido que os dados gerados pelo acelerômetro possuem alto ruído, e seu uso como comparador não é de alta precisão, entretanto o uso dele somado aos dados medidos trazem uma base sustentável para comparar os métodos utilizados para estimar a inclinação.

Comparativamente, entende-se um método como de maior facilidade de implementação, aquele que possui pouca complexidade de software na linguagem utilizada. E de maior facilidade de uso aquele que possui baixa complexidade matemática. Por mais que possa ser enviesada a definição de fácil e difícil, como todos os métodos foram utilizados e compreendidos pelo mesmo pesquisador, acredita-se ser justo.

# Capítulo 2

## Concluído no TCC1

Durante o decorrer da primeira metade do trabalho de conclusão de curso (TCC 1), foi realizado a construção parcial do dashboard, levantamento bibliográfico e implementação parcial dos métodos de estimativa de inclinação. Para isso também foi necessário o tratamento dos dados de entrada.

### 2.1 Tratamento dos dados

Utilizando de dados de calibração e as fórmulas indicadas no manual de especificação do MPU9250, os dados originados pelos sensores são convertidos para as devidas unidades de medidas e escalas. Os dados são recebidos no formato numérico de 16bits com sinal, em forma de string ASCII por meio da porta USB do computador ou por arquivo texto. Posteriormente são convertidos para o tipo numérico do matlab, realizado o ajuste para escala utilizada pelo sensor e, corrigido o offset usando dados obtidos previamente por meio da calibração dos sensores.

O último tratamento de dado realizado é a média móvel dos dados, objetivando suavizar os erros de leitura do sensor.

### 2.2 Métodos de estimativa

Durante o decorrer do projeto foi realizado o levantamento de métodos para estimativa de inclinação, que fizessem uso dos dados da Caixa Preta. Até o momento foram selecionados 5 métodos.

A primeira forma e mais simples delas, é a integração da velocidade angular, dado pelo sensor de giroscópio. Entretanto como estamos falando de integrar o dado no tempo, erros de leitura e offset causam erros nas estimativas. Também chamados de drift, esses erros levam o dado para uma constante adição de um valor errado na estimativa, tendendo ao

infinito. Contudo é uma forma de estimação que gera ótimo resultado em curtos intervalos de tempo.

A segunda forma é inferindo a inclinação por meio do acelerômetro e do magnetômetro. O acelerômetro contribui para a estimativa de inclinações de pitch e roll, isto é, rotações realizadas nos eixos que não ao eixo radial em relação ao centro da terra. Para isso é considerado que o vetor gravitacional sempre aponta para o eixo Z do sensor, logo o método calcula qual a variação de ângulo do eixo Z do sensor para o eixo que aparece o vetor gravitacional no momento. Este método gera ótimo resultado em longos intervalos de tempo, entretanto o corpo deve estar em inércia [4].

Já o magnetômetro contribui para a estimativa de inclinação de yaw, isto é, rotações realizadas no eixo radial em relação ao centro da terra. Para isso o sensor deve estar calibrado e longe de objetos que gerem campo magnético, para que seja possível identificar os polos magnéticos da terra e determinar a inclinação do corpo. Como o polo magnético da terra possui malha complexa, não apontando para o polo geográfico sempre, este método somente é útil em curtos espaços de deslocamento e é de difícil uso para orientação global. [5, 6]

O terceiro método faz uso de todos os dois já citados, conhecido como filtro complementar. É classificado como um método de fusão de dados, uma vez que realiza o cruzamento dos dois dados para gerar um dado de maior precisão.

O filtro complementar é o mais simples dos métodos de fusão de dados, uma vez que ele consiste em uma média ponderada dos ângulos, onde o fator de ponderação é complementar, isso significa que a soma dos pesos é sempre 1. De modo geral sempre se utiliza o peso menor para os dados estimados com o acelerômetro, uma vez que ele possui maior acurácia ao longo do tempo, já o giroscópio atua corrigindo momentaneamente o dado, tendo assim o peso maior. [7, 8]

Outro filtro que também pode ser utilizado para fusão de dados é o filtro de kalman. Ele é um filtro iterativo de uso genérico, podendo ser usado em tempo contínuo ou discreto. Sua principal função está em otimizar a covariância de vários dados por meio de fusão de dados e, também permitir o cálculo de um ou mais modelos diretamente no método, bastando configurar corretamente os parâmetros, em formato de matrizes. [9, 10]

Como quarto método foi selecionado uma das possíveis aplicações do filtro de kalman, na qual o modelo retorna a estimativa de inclinação utilizando o giroscópio. Desta forma o modelo recebe como entrada para estimativa, o offset do giroscópio e os dados do giroscópio, retornando assim uma estimativa de inclinação. E recebe como entrada para fusão os dados de inclinação estimados utilizando o acelerômetro. Esta abordagem utilizando o filtro de kalman é exatamente igual ao filtro complementar, entretanto aqui o método é capaz de definir os pesos de forma automática com o decorrer das iterações. O maior

desafio aqui encontra-se em acertar a matriz de covariância de cada medida (inclinação usando acelerômetro e do giroscópio). [11, 12]

Como quinto método foi selecionado o filtro de madgwick, que atua semelhante ao filtro de kalman, entretanto utilizando de quaternions, o que reduz as operações com matrizes de rotação em operações vetoriais. Sendo assim, um método muito mais leve computacionalmente e mais rápido. [13]

## 2.3 Dashboard com visualização dos dados

Durante o TCC1, foi construído parcialmente o dashboard, nele já se encontra todos os métodos supracitados, com parâmetros facilmente ajustáveis.

Dentre as funcionalidades do painel se encontram:

- A possibilidade de obter dados diretamente da Caixa Preta por meio da porta USB, ou por meio de um arquivo em mesmo formato;
- A possibilidade de visualizar os dados computados em tempo real, ou somente após processado todos os dados;
- O ajuste de parâmetros de cada método;
- A seleção de qual método e visualização se deseja ver na execução do código;
- A organização dos gráficos na interface gráfica;
- O intervalo de tempo que se deseja ver nos gráficos exibidos;
- A visualização dos métodos de estimativa de inclinação em formato de gráficos, ou em tempo real com a animação da rotação de um veículo;

O programa foi construído em 3 frentes distintas, uma parte que realiza a leitura dos dados via arquivo ou porta USB, outra que realiza os cálculos, e uma última que simplifica a interface de plotagem do matlab. Sendo o loop principal responsável por chamar a camada de leitura, realizar os cálculos e chamar a camada de plotagem. No Apêndice A se encontra um fluxograma do programa, abstraído dos módulos de leitura e renderização.



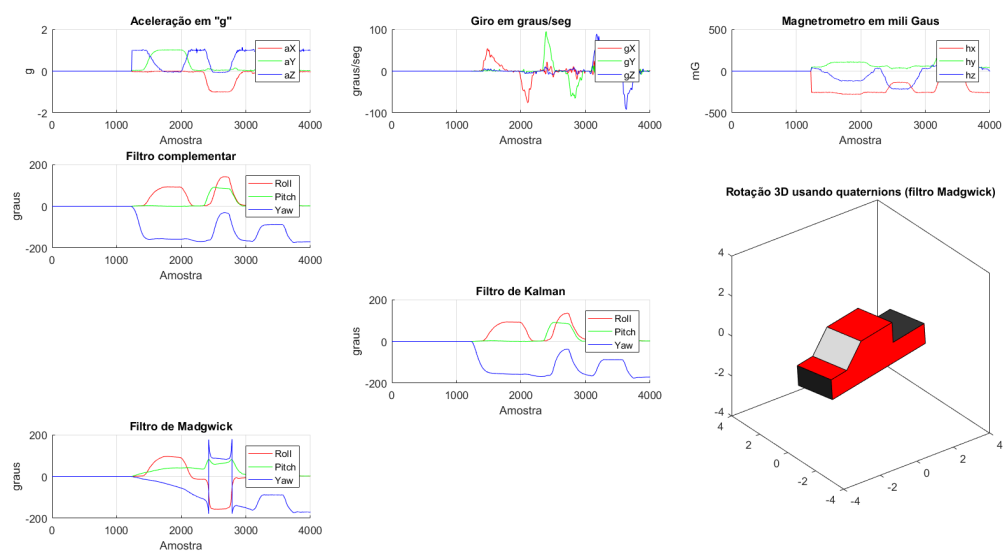


Figura 2.1: Imagem da visualização do painel, configurado com 4 linhas e 3 colunas, com dados de aceleração, giroscópio, magnetômetro, estimativas de inclinação e animação de inclinação.

# Capítulo 3

## X1- Planejamento TCC2

Para a segunda etapa do projeto de conclusão será separado em 14 semanas (média de semanas que possui um semestre).

Tabela 3.1: Tabela de planejamento da segunda parte do projeto final.

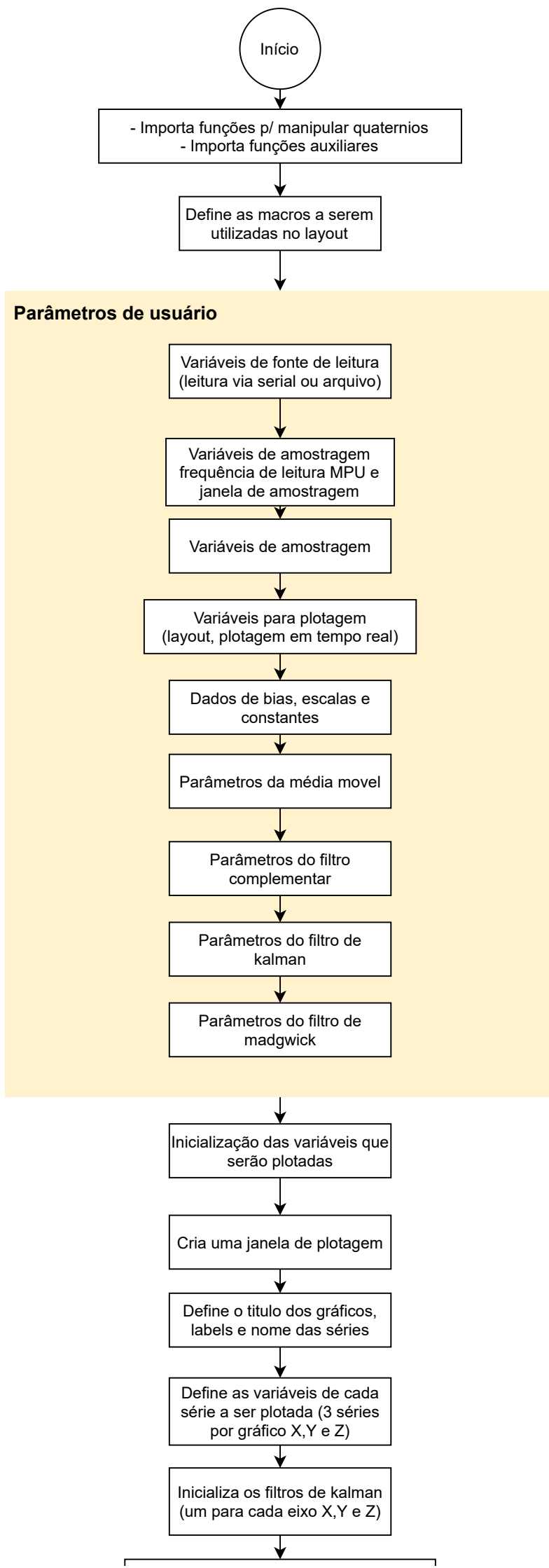
Semana	Objetivo	Descrição
1	Modularizar os gráficos	Criar arquivos separados para cada cálculo, bem como a configuração do gráfico
2	Adaptar o filtro de kalman para fusão correta de ângulos	O filtro de kalman realiza média ponderada simples, é necessário adaptá-lo para realizar média de ângulos corretamente
3	Criar modulo comparador	Função que irá criar um gráfico comparando métodos assumindo que os métodos entregam os mesmos tipos de dados
4	Criar modulo comparador	
5	Criar modulo para mensurar tempo de execução de cada método	Exibir ao final da execução o tempo médio de execução dos métodos, como conversão do dado, fusão dos dados usando filtro complementar ou outros
6	Criar modulo para mensurar tempo de execução de cada método	
7	Documentação e revisão dos códigos	
8	Geração de dados e análises	
9	Escrita da seção de fundamentação teórica	
10	Escrita da seção de fundamentação teórica	
11	Escrita da seção de análise dos dados	
12	Escrita do Resumo, Abstract e Conclusão	
13	Criação da apresentação e defesa	
14	Ajustes do texto	

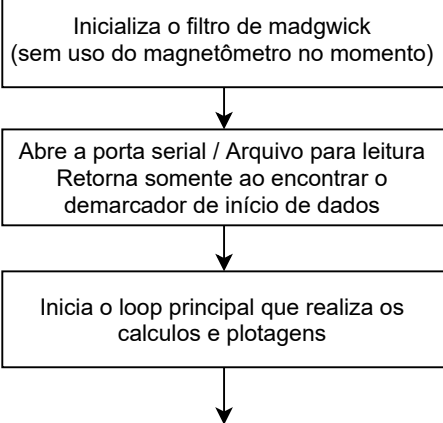
# Referências

- [1] Lima, Vinícius de Oliveira: *PROPOSTA DE PLATAFORMA INERCIAL PARA AUXILIAR NA PERÍCIA DE ACIDENTES DE TRÂNSITO*. página 68. 1
- [2] Tumelero, Naína: *Metodologia de pesquisa: guia rápido de possibilidades*. <https://blog.mettzer.com/metodologia-de-pesquisa/>, acesso em 2021-01-30. 3
- [3] Garcia, Fabíola Silva: *METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA: ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL e OS DESAFIOS PARA REDIGIR o TRABALHO DE CONCLUSÃO*. página 16. 3
- [4] Pedley, Mark: *Tilt sensing using a three-axis accelerometer*. página 22. 5
- [5] Ozyagcilar, Talat: *Implementing a tilt-compensated eCompass using accelerometer and magnetometer sensors*. página 22. 5
- [6] Bleything, Talesa: *How to convert magnetometer data into compass heading – diligent blog*. <https://blog.digilentinc.com/how-to-convert-magnetometer-data-into-compass-heading/>, acesso em 2020-11-23. 5
- [7] Brian Douglas: *Drone control and the complementary filter*. <https://www.youtube.com/watch?v=whSw42XddsU>, acesso em 2020-11-23. 5
- [8] MATLAB: *Understanding sensor fusion and tracking, part 2: Fusing a mag, accel, & gyro estimate*. <https://www.youtube.com/watch?v=0rlvvYgmTvI>, acesso em 2020-11-23. 5
- [9] Aguirre, Luis: *Filtro de kalman 1: Combinando medições*. <https://www.youtube.com/watch?v=urhaoECmCQk>, acesso em 2020-11-23. 5
- [10] MATLAB: *Understanding kalman filters, part 1: Why use kalman filters?* <https://www.youtube.com/watch?v=mwn8xhgNpFY>, acesso em 2020-11-23. 5
- [11] Kelly, Don: *Kalman filter for 6dof IMU implementation*. <https://www.youtube.com/watch?v=0s6V1lnUPZo>, acesso em 2020-11-23. 6
- [12] Ferdinando, Hany, Handry Khoswanto e Djoko Purwanto: *Embedded kalman filter for inertial measurement unit (IMU) on the ATMega8535*. páginas 1–5, ISBN 978-1-4673-1446-6. 6
- [13] Sanket, Nitin: *Madgwick filter*. <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/madgwick>, acesso em 2020-11-23. 6

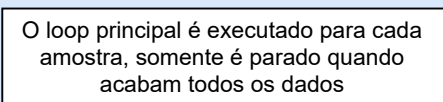
## Apêndice A

### Fluxograma do programa

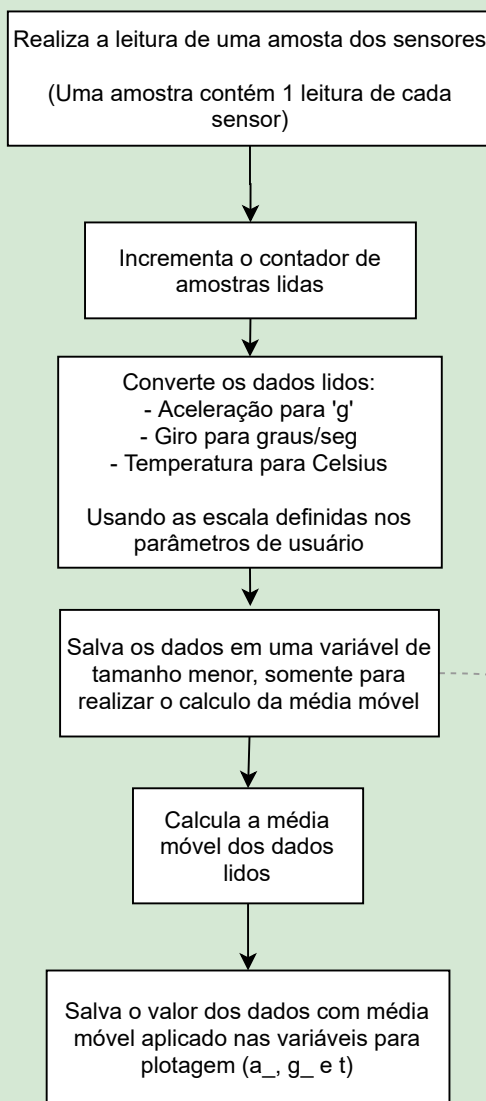




## Loop principal



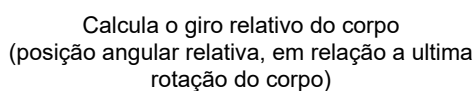
## Dados brutos



A média móvel é aplicada em cima dos dados brutos. Realizar a média móvel sobre dados que já passaram pela média movel, leva a convergencia para 0 (considerando que os dados inicializam em 0)

Por fim essa variável específica é um array do tamanho da janela de média móvel e, foi criada para manter em memória somente os dados necessários para o calculo da média movel, sem a necessidade de duplicar todos os dados

## Dados Calculados



Realiza a integral discreta sobre a amostra lida

Calcula a matriz de rotação, responsável por mover o corpo da posição anterior (amostra anterior) para a posição atual (amostra atual)

Calcula a matriz de rotação, responsável por mover o corpo da posição inicial (primeira amostra) para a posição atual (amostra atual)

Realizando a multiplicação das matrizes

Como o objetivo desta matriz é somente dizer a rotação em relação a primeira amostra, não é salvo todas as matrizes de rotação de todas as amostras, somente a matriz que realiza os movimento:

- 1 - Amostra anterior -> Amostra atual
- 2 - Primeira amostra -> Amostra atual

Bastando a cada interação multiplicar a matriz (1) com a matriz (2) calculada na interação anterior para obter a nova matriz (2)

Calcula o giro absoluto do corpo (posição angular absoluta, em relação a posição na primeira amostra)

Utilizando a matriz de rotação calculada (2) para extrair os angulos de euler

Calcula o giro absoluto do corpo (posição angular absoluta, em relação a posição na primeira amostra)

Utilizando agora os dados do acelerômetro, fazendo uso dos principios de matrizes de rotação

Como o corpo sofre pela aceleração da gravidade é possível utilizar deste vetor para calculo da posição angular, entretanto a diversas limitações deste uso, tais como:

- Somente é possível determinar 2 das 3 posições angulares (eixos X e Y)
- Limitação de angulação estimada (-180 a +180 para um eixo e -90 e +90 para o outro eixo)
- Alguma posições angulares causam erro na estimativa

Calcula giro usando o filtro complementar

Utilizando de dados do giroscópio e do giro absoluto obtido utilizando a aceleração

Por mais que a aceleração não dê o giro de forma acurada, o uso da fusão deste dado com os dado do giroscópio permite a remoção/suavização do bias contido no giroscópio

Calcula giro usando o filtro de kalman

Utilizando de dados do giroscópio e do giro absoluto obtido utilizando a aceleração

Este filtro tem o mesmo principio do filtro complementar, entretanto o parâmetro de ajuste deste filtro é dinâmico, se auto ajustando a cada amostra

A implementação deste filtro é própria e se encontra em um modulo a parte

Calcula giro usando o filtro de madgwick

Utilizando de dados do giroscópio e do acelerômetro (note que ele não utiliza dados do giro absoluto calculado)

Por fim, convertendo a saída do filtro para as representação em angulos de euler

Este filtro diferente dos demais, não possui implementação própria, é utilizado um modulo de terceiro, e realiza o calculo utilizando quaternions o que torna o calculo mais rápido e livre de gimbal lock

Entretanto, a conversão para angulos de euler ao final esta sujeita a gimbal lock, uma vez que a conversão de quaternions para angulo de euler utiliza dos principio de matrizes de rotação

Calcula a aceleração livre de gravidade

Relizando a rotação do vetor gravitacional em +Z do corpo para +Z relativo a primeira amostra (espera-se que na primeira amostra o corpo estivesse alinhado a terra) (considerando como valor do vetor gravitaciona a constante definida nos parâmetros de usuário)

Para realizar a rotação do vetor é utilizado o giro obtido via filtro de kalman, calculando a matriz de rotação inverça, que levará o vetor hipotético (+Z do corpo) para posição que seria da primeira amostra (+Z da primeira amostra)

Por fim realiza-se a subtração do vetor hipotético rotacionado dos valores atuais de aceleração do corpo

Calcula a velocidade do corpo, utilizando da aceliração livre de gravidade.

Realiza a integral discreta sobre a amostra de aceleração



Realiza a integral discreta sobre a amostra de aceleração livre de gravidade



Calcula a posição do corpo (deslocamento em relação a primeira amostra), utilizando da velocidade calculada.

Realiza a integral discreta sobre a amostra de velocidade calculada



Finalizando o loop realiza uma tentativa de plotagem.

Somente é plotado/atualizado o gráfico, caso já tenha passado um ou mais períodos de plotagem (respeitando a frequência de plotagem definida nos parâmetros de usuário ou ficando abaixo dela)

Note que a plotagem em tempo real, realizada utilizando esta abordagem, não é simultânea, logo não é tempo real, concorrendo assim com o tempo de cálculo dos dados, podendo ocasionar na queda de frequência de plotagem.

Entretanto, deixar a frequência de plotagem no máximo não é uma vantagem, uma vez que, a plotagem é o que mais consome tempo, portanto se você está notando algum erro nos dados, ou travamento reduza a frequência de plotagem



Por fim realiza uma plotagem forçada, não respeitando a frequência de plotagem definida



Exibe a quantidade de dados lidos, para verificação manual se todos os dados foram lidos corretamente

Note: a leitura incorreta, ou incompleta dos dados pode levar a erros nos gráficos ou travamento do programa



Fecha o arquivo/porta serial que estava sendo executado a leitura

