



**André Jardim Pereira Pinto**

**Estimativa de Trajetória Baseada em Navegação Inercial e  
Odometria Visual para Dispositivo Biomédico Portátil**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo Costa da Silva

Rio de Janeiro  
Setembro de 2024

**André Jardim Pereira Pinto**

## **Estimativa de Trajetória Baseada em Navegação Inercial e Odometria Visual para Dispositivo Biomédico Portátil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

**Prof. Eduardo Costa da Silva**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Costa Monteiro**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Prof. Daniel Ramos Louzada**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de setembro de 2024.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**André Jardim Pereira Pinto**

Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica e Sinais de Potência na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-RIO, em 2021.

Ficha Catalográfica

Pinto, André Jardim Pereira

Estimativa de trajetória baseada em navegação inercial e odometria visual para dispositivo biomédico portátil / André Jardim Pereira Pinto; orientador: Eduardo Costa da Silva. – 2024.

68f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Estimativa de posição. 3. Navegação inercial. 4. Odometria visual. 5. Sensor IMU. 6. Raspberry PI. I. Silva, Eduardo Costa da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me motivou a estudar e buscar me desenvolver intelectual e pessoalmente. Também dedico aos meus amigos, que me apoiaram em todo o processo da pós-graduação.

## Agradecimentos

Aos meus pais, Marcia e Flávio, o meu pai por me apoiar em toda coleta de dados feita nessa dissertação, à minha mãe por sempre ouvir sobre meu progresso e feitos. Sem o apoio dos dois, não teria conseguido continuar até a última etapa, me auxiliaram a me manter motivado.

À minha família, que sempre me apoiou e motivou nos meus estudos e celebraram a conquista de mais um sonho.

Ao meu irmão, Gabriel Jardim, que mesmo em outro país, me ajudou com seus amplos conhecimentos de matemática e sua experiência de mestrando e doutorando.

Ao meu gato, Paçoca, por sempre me lembrar de fazer pausas frequentes para brincadeiras e para alimentá-lo. Por ficar sempre ao meu lado durante o desenvolvimento da dissertação.

À minha namorada, Laura Trompowsky, por, mesmo sem entender nada, escutar sobre o projeto, me apoiar nos momentos de dificuldade, por me assegurar momentos de descanso e me ajudar com o uso do *photoshop* para algumas fotos incluídas na dissertação.

Ao meu amigo, Gabriel Werneck, por diversos cafés da tarde, onde nos distraímos dos estudos e podíamos descansar a cabeça conversando sobre diferentes temas e por escutar meus devaneios sobre meu trabalho.

Aos meus amigos, pela ajuda, compreensão e curiosidade sobre o tema. Por me ajudarem a descontraír e conseguir um respiro depois de dias de trabalho e estudo.

Ao meu orientador, Eduardo Costa, por me orientar durante a graduação e seguir orientando no mestrado, por me apoiar durante os experimentos e me ajudar a clarear os pensamentos.

Ao professor Jan Kruger Siqueira, por me apoiar com as impressões 3D das peças necessárias para a dissertação.

À minha terapeuta, Waleria Regina, por me ajudar nos momentos difíceis e a desembaraçar os nós nos meus pensamentos, ajudando a continuar com o desenvolvimento do projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

Jardim Pereira Pinto, André; Costa da Silva, Eduardo (Orientador). **Estimativa de Trajetória Baseada em Navegação Inercial e Odometria Visual para Dispositivo Biomédico Portátil**. Rio de Janeiro, 2024. 68p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As práticas atuais de imageamento de corpos estranhos dentro do corpo humano utilizam técnicas de radiografia, que apresentam uma série de limitações e problemas para a saúde do operador e do paciente. Alternativas para localizar esses corpos estranhos vêm sendo estudadas, buscando o uso de magnetômetros, como o GMI e o GMR, para medir a intensidade do campo magnético de objetos metálicos. Para desenvolver um dispositivo portátil que utilize um magnetômetro capaz de identificar a intensidade do campo magnético de um corpo estranho metálico, é essencial que o mapeamento da posição deste dispositivo tenha alta precisão e replicabilidade, garantindo assim maior segurança para o paciente. Esta dissertação busca estudar métodos de navegação inercial, utilizando um IMU (*Inertial Measurement Unit*) para estimar a posição através da aceleração e velocidade de rotação, e odometria visual, que usa uma câmera para estimar a posição através de uma sequência de imagens de uma determinada trajetória. Estudos comparativos entre as duas metodologias foram realizados, destacando as principais fontes de erro de cada uma e suas vantagens e desvantagens para a aplicação desejada. Os dados do IMU e os vídeos foram coletados utilizando um *Raspberry Pi* dentro de uma caixa impressa em 3D, capaz de se encaixar em uma calha reta de alumínio. Esta configuração reduziu as principais fontes de erro humano, permitindo análises com menos graus de liberdade. Após as análises com a calha de alumínio, foram realizados ensaios adicionais envolvendo mais graus de liberdade, utilizando calhas curvas impressas em 3D e à mão livre, buscando verificar o desempenho das metodologias em situações mais próximas da aplicação final: um dispositivo portátil de localização de corpos estranhos.

## Palavras-chave

Estimativa de posição; Navegação Inercial; Odometria Visual; sensor IMU; *Raspberry PI*.

## Abstract

Jardim Pereira Pinto, André; Costa da Silva, Eduardo (Advisor). **Trajectory Estimation Based on Inertial Navigation and Visual Odometry for a Portable Biomedical Device**. Rio de Janeiro, 2024. 68p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Current practices for imaging foreign bodies within the human body use radiographic techniques, which present several limitations and health problems for both the operator and the patient. Alternatives for locating these foreign bodies are being studied, focusing on the use of magnetometers, such as GMI and GMR, to measure the magnetic field intensity of metallic objects. To develop a portable device that uses a magnetometer capable of identifying the magnetic field intensity of a metallic foreign body, it is essential that the positioning of this device is mapped with high precision and replicability, thus ensuring greater safety for the patient. This dissertation aims to study inertial navigation methods, using an IMU (*Inertial Measurement Unit*) to estimate position through acceleration and rotational velocity, and visual odometry, which uses a camera to estimate position through a sequence of images of a given trajectory. Comparative studies between the two methodologies were carried out, highlighting the main sources of error of each and their advantages and disadvantages for the desired application. The IMU data and videos were collected using a Raspberry Pi inside a 3D-printed box that fits into a straight aluminum rail. This setup reduced the main sources of human error, allowing analyses with fewer degrees of freedom. After the analyses with the aluminum rail, additional tests involving more degrees of freedom were conducted using curved 3D-printed rails and freehand, aiming to verify the performance of the methodologies in situations closer to the final application: a portable device for localizing foreign bodies.

## Keywords

Position Estimation; Inertial Navigation; Visual Odometry; IMU sensor; *Raspberry PI*.

## Sumário

1. Introdução.....	15
1.1. Contextualização .....	15
1.2. Motivação e objetivos.....	20
1.2.1. Motivação .....	20
1.2.2. Objetivos.....	20
1.3. Organização da dissertação .....	21
2. Materiais e Métodos .....	22
2.1. Raspberry PI .....	22
2.2. Câmera digital .....	23
2.3. Odometria Visual.....	25
2.4. IMU (Inertial Measurement Unit) e Navegação Inercial .....	27
2.4.1. Ações para redução do <i>offset</i> .....	29
2.5. Configurações de coleta .....	29
2.5.1. Configuração linear com caixa de papel cartão.....	29
2.5.2. Configuração linear com caixa impressa em 3D.....	31
2.5.3. Configuração linear com variação de distância focal.....	34
2.5.4. Configuração curva com calhas circular e quadrada impressas em 3 .....	35
2.6. Lógica da coleta de dados.....	37
3. Resultados e Discussões .....	39
3.1. Ensaios unidimensionais .....	39
3.1.1. Resultados com a caixa de papel cartão .....	40
3.1.2. Resultados com a caixa de PLA .....	43
3.1.3. Resultados com navegação inercial.....	43
3.1.4. Resultados com odometria visual.....	46
3.1.5. Comparação entre navegação inercial e odometria visual .....	49
3.1.6. Análise da variação de altura de medição .....	51
3.2. Ensaios bidimensionais .....	55
3.2.1. Análise das medições com a configuração de calhas impressas .....	56
3.2.2. Análise à mão livre.....	58
3.3. Problemas encontrados durante os ensaios.....	59
4. Conclusões e trabalhos futuros .....	62
Referências bibliográficas .....	66
Apêndice A.....	68
I. Coleta do erro de diferentes ensaios com trajetória linear de 8 cm.....	68



## Lista de figuras

Figura 1 - Radiografia de um paciente com um fragmento de agulha alojado em seu braço esquerdo. Obtido de [1].	16
Figura 2 - Mapa de fluxo magnético de uma agulha estacionária na horizontal, obtido por meio de uma varredura com magnetômetro GMI. Obtido de [10].	17
Figura 3 - Trajetória ideal a ser seguida na coleta dos dados de odometria visual do projeto [9].	18
Figura 4 - Trajetória 1, em pixels, obtida através da odometria visual no projeto [9].	19
Figura 5 - Trajetória 2, em pixels, obtida através da odometria visual no projeto [9].	19
Figura 6 – Raspberry Pi 4B, plataforma de prototipação utilizada na coleta de dados.	23
Figura 7 - PiCamera v2, câmera utilizada para a coleta de dados.	23
Figura 8 - Exemplo de comparação de pontos entre quadros sequenciais	25
Figura 9 - Padrão de calibração utilizado para calibrar a câmera em diferentes distâncias. O padrão utilizado para calibrar a câmera possui quadrados de 1 mm de lado. Obtida em [16].	26
Figura 10 - MPU 9250 utilizado na coleta de dados.	27
Figura 11 - Diagrama para o cálculo da posição em função do tempo com os dados do IMU	29
Figura 12 - Caixa de papel cartão feita a partir da caixa do <i>Raspberry PI</i> . (a) Calha de metal usada como guia durante as coletas. (b) LED vermelho para indicar que os dados estão sendo coletados. (c) LED amarelo para indicar que o sistema está ligado. (d) IMU. (e) Botão para iniciar captura de dados do IMU e da câmera. (f) <i>Protoboard</i> usada para realizar as conexões elétricas dos componentes. (g) Buraco para conectar fios entre <i>Raspberry PI</i> e <i>Protoboard</i> .	30
Figura 13 - Visão lateral da caixa de papel cartão. (a) Cabo de energia para alimentar o <i>Raspberry PI</i> . (b) Saída de vídeo do <i>Raspberry PI</i> .	30

Figura 14 - Visão inferior da caixa de papel cartão. (a) Pino de plástico para encaixar na calha de alumínio e impedir rotações em torno do eixo z.....	31
Figura 15 - Peça da calha de alumínio utilizada para a coleta de dados. ....	31
Figura 16 - Modelo 3D da caixa impressa. (a) Base da caixa onde o <i>Raspberry PI</i> é mantido. (b) Tampa da caixa com um buraco para passagem de fios e um guia para fixar a <i>proto board</i> . (c) Pinos para fixar a caixa na calha de alumínio e impedir rotações em torno do eixo x e z. (d) Peça para fixar a câmera na parte inferior da caixa. ....	32
Figura 17 - Visão superior da caixa impressa em PLA. ....	32
Figura 18 - Visão inferior da caixa impressa em PLA. ....	33
Figura 19 - Caixa de PLA utilizada para a coleta de dados sobre a calha de alumínio. (a) Padrão usado para auxiliar a odometria visual em todas as coletas. ....	33
Figura 20 - Madeira de 2 cm utilizada para aumentar a distância entre a câmera e o plano de coleta. ....	34
Figura 21 - Modelo 3D de um quinto da calha circular. ....	35
Figura 22 - Calha circular impressa em plástico PLA. ....	36
Figura 23 - Modelo 3D de um quarto da calha quadrada com bordas arredondadas. ....	36
Figura 24 - Calha quadrada com bordas arredondadas impressa em plástico PLA. ....	37
Figura 25 - Diagrama de blocos do código de coleta implementado no <i>Raspberry PI</i> . ....	38
Figura 26 - Posição do eixo x e y em função do tempo. Coletado utilizando odometria visual com a caixa de papel cartão. ....	40
Figura 27 - Trajetória de 12 cm utilizando odometria visual. Coletado com a caixa de papel cartão. ....	40
Figura 28 - Posição do eixo x e y em função do tempo. Coletado utilizando navegação inercial com a caixa de papel cartão. ....	41
Figura 29 - Trajetória de 12 cm utilizando navegação inercial. Coletado com a caixa de papel cartão. ....	42

Figura 30 - Aceleração obtida através da navegação inercial nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.....	45
Figura 31 - Velocidade obtida através da navegação inercial nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.....	45
Figura 32 - Posição obtida através da navegação inercial nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.....	45
Figura 33 - Trajetória obtida através da navegação inercial de um deslocamento de 8 cm. Coletado com a caixa de PLA. ....	46
Figura 34 - Posição obtida através da odometria visual nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA. ....	48
Figura 35 - Trajetória obtida através da odometria visual de um deslocamento de 8 cm. Coletado com a caixa de PLA. ....	48
Figura 36 - Posição ao longo do eixo x e y em função do tempo para um deslocamento de 10 cm com altura de 2,8 cm. Coletado com caixa de PLA. ....	50
Figura 37 - Trajetória de 10 cm com altura de 2,8 cm utilizando a caixa de PLA. Coletado com caixa de PLA.....	50
Figura 38 - Gráfico de velocidade no eixo x da odometria visual para um deslocamento de 10 cm com altura de 2,8 cm.....	51
Figura 39 - Foto de calibração com 2,8 cm de altura. ....	52
Figura 40 - Foto de calibração com 7,8 cm de altura. ....	52
Figura 41 - Gráfico de dispersão entre altura e Fator de conversão de metros para pixels. ....	54
Figura 42 - Posição ao longo do eixo x e y em função do tempo obtida através da odometria visual. Coletado com caixa de PLA e com a calha quadrada.....	57
Figura 43 - Trajetória de um quarto da calha quadrada utilizando a caixa de PLA obtida através da odometria visual. ....	57
Figura 44 - Posição ao longo do eixo x e y em função do tempo obtida através da odometria visual. Coletado com caixa de PLA à mão livre. ....	58

Figura 45 - Trajetória à mão livre utilizando a caixa de PLA. Obtida através da odometria visual. ....	59
Figura 46 - Erro causado por falta de pontos de interesse válidos na coleta de um ensaio de 10 cm de deslocamento e 4,8 cm de altura. Coletado com caixa de PLA. ....	60
Figura 47 - Velocidade obtida através da navegação inercial para um deslocamento de 10 cm com altura de 4,8 cm. Coletado com caixa de PLA. ....	60
Figura 48 – Trajetória obtida através da navegação inercial para um deslocamento de 10 cm com altura de 4,8 cm. Coletado com caixa de PLA.....	61

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Distância focal nos eixos x e y para as diferentes alturas de coleta.....	24
Tabela 2 - Erro obtido nos ensaios realizados utilizando a caixa de papel cartão.	42
Tabela 3 - Erro da navegação inercial em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo x. Coletado utilizando caixa de PLA.....	43
Tabela 4 - Erro da navegação inercial em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo y. Coletado utilizando caixa de PLA.....	44
Tabela 5 - Erro da odometria visual em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo x. Coletado utilizando caixa de PLA.....	46
Tabela 6 - Erro da odometria visual em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo y. Coletado utilizando caixa de PLA.....	47
Tabela 7 - Comparação de erro entre navegação inercial e odometria visual para ensaios de um deslocamento de 8 cm.....	49
Tabela 8 - Comparação de erro entre navegação inercial e odometria visual, para diferentes alturas em uma trajetória linear de 6 cm ao longo do eixo x.....	53
Tabela 9 - Fator de conversão de metros para pixel por altura. ....	54
Tabela 10 - Distância focal nos eixos x e y para as diferentes alturas de coleta...	55
Tabela 11 - Erro de diferentes ensaios de 8cm.....	68

# **1**

## **Introdução**

A detecção de corpos estranhos dentro do corpo humano é uma necessidade cotidiana no ambiente hospitalar. Esses objetos são comumente ferromagnéticos, como agulhas hipodérmicas ou de costura, e podem causar desconforto ou perfuração dos órgãos do paciente, sendo altamente recomendada a identificação e remoção do objeto [1-3]. Para que não sejam criadas mais sequelas na pessoa operada, a precisão da orientação e localização do objeto são fatores cruciais para o sucesso da operação.

### **1.1**

#### **Contextualização**

Atualmente, a detecção de corpos estranhos é feita a partir das técnicas de imageamento por radiografias e fluoroscopia. A radiografia gera imagens estáticas que precisam ser reveladas e a fluoroscopia gera imagens em tempo real. Porém, ambos os procedimentos utilizam raios x para a geração das imagens, o que expõe a equipe e o paciente a altos níveis de radiação [1,2]. Além disso, ambas as técnicas permitem apenas a localização bidimensional do objeto, não indicando sua profundidade em relação à pele do paciente. Ademais, esses procedimentos podem não ser bem-sucedidos e ter uma longa duração. A figura 1 apresenta uma radiografia de um paciente com um fragmento de agulha em seu braço esquerdo.



Figura 1 - Radiografia de um paciente com um fragmento de agulha alojado em seu braço esquerdo. Obtido de [1].

Outros métodos para a detecção desses corpos vêm sendo estudados, como a utilização do magnetômetro SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*), que é atualmente o magnetômetro comercial mais sensível, podendo medir campos magnéticos da ordem de  $5 \cdot 10^{-14}$  T. Essa sensibilidade do SQUID permite que ele seja idealmente utilizado para diagnósticos clínicos não invasivos em magnetocardiografias e magnetoencefalografias [4,5]. Para a detecção de corpo estranho com o SQUID, o paciente permanece deitado abaixo do dispositivo, em uma cama móvel, enquanto é realizada a coleta dos dados do sensor [1]. Após a coleta, os dados são processados de forma a estimar a posição do corpo. Embora o SQUID apresente resultados positivos para todas as suas aplicações, o alto custo de fabricação, operação e manutenção, além da necessidade de temperaturas criogênicas para seu funcionamento, impedem que esse sensor seja amplamente utilizado [1,2,5-7].

Visando manter as principais vantagens do SQUID e permitindo o desenvolvimento de dispositivos mais baratos e portáteis, estão sendo realizados estudos com outros magnetômetros, como o GMR (magnetorresistência gigante) e o GMI (magnetoimpedância gigante), que possuem alta sensibilidade, baixo custo de produção e facilidade de manutenção. Alguns estudos teóricos e experimentais já foram realizados, além de estudos comparativos entre o desempenho do SQUID, GMR e GMI [7-9]. Foi constatado que os sensores GMR e GMI apresentam

sensibilidade suficiente para a aplicação de localização de corpos estranhos ferromagnéticos, apesar de inferior à do SQUID, e apresentam inúmeras vantagens para o desenvolvimento de um dispositivo portátil de detecção. A figura 2 apresenta um mapa magnético gerado a partir de uma varredura com magnetômetro GMI realizada em uma região de 10 cm x 10 cm onde havia uma agulha disposta na horizontal. O magnetômetro estava afastado 7,5 cm do plano de medição. A figura apresenta a componente z de densidade de fluxo magnético da agulha, onde podemos observar os polos positivo e negativo do campo gerado pela agulha.

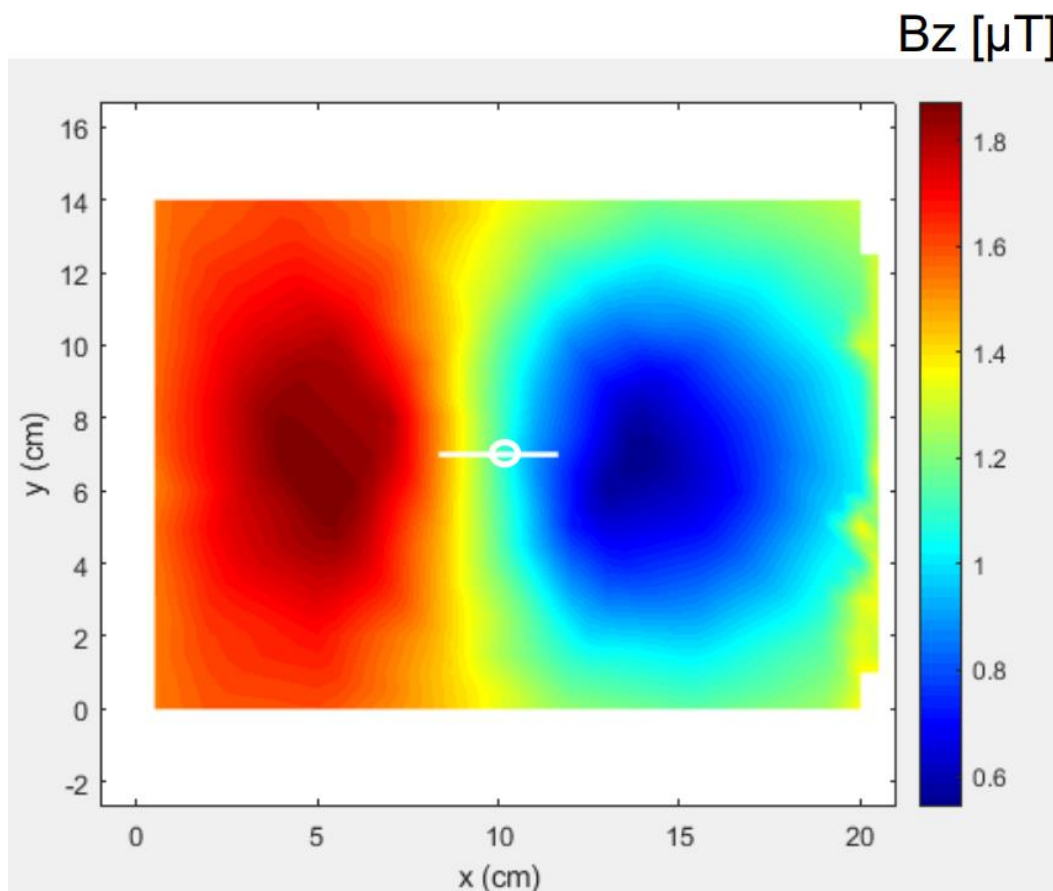


Figura 2 - Mapa de fluxo magnético de uma agulha estacionária na horizontal, obtido por meio de uma varredura com magnetômetro GMI. Obtido de [10].

Por sua dimensão e preço menor, é possível desenvolver um dispositivo portátil para a detecção de objetos ferromagnéticos (maior intensidade de fluxo magnético) com o GMR ou mesmo metálicos (menor intensidade de fluxo magnético) com o GMI, utilizando como base plataformas de prototipação como *Raspberry PI* ou Arduino, reduzindo assim o custo de fabricação e manutenção, além de facilitar a operação do equipamento.

A literatura da detecção de corpos estranhos ferromagnéticos utilizando magnetômetros está focada nas análises do campo magnético e no desempenho dos



sensores [7,8], porém para o desenvolvimento de um dispositivo portátil capaz de realizar o mapeamento magnético de uma região de interesse, além da adequada medição do campo é crucial também estimar a posição do dispositivo com precisão.

O projeto [9] tinha como objetivo unificar os estudos e projetos anteriores para o desenvolvimento de um dispositivo portátil de detecção de corpos estranhos ferromagnéticos, porém a precisão na estimativa de posição mostrou-se insuficiente, motivando a realização de novos estudos destinados ao aprimoramento desta estimativa.

Caso a posição esteja incorreta, poderá resultar em prolongamento do tempo cirúrgico ou o insucesso da remoção do objeto. Garantir a estimativa de posição com pequenos erros é essencial para garantir o sucesso do desenvolvimento do dispositivo portátil. As figuras 3, 4 e 5 apresentam a trajetória ideal e as coletadas no projeto [9]. Observa-se que as trajetórias coletadas apresentam grande erro em comparação com a ideal, impedindo assim sua utilização para a estimativa de posição com a precisão necessária para o dispositivo.

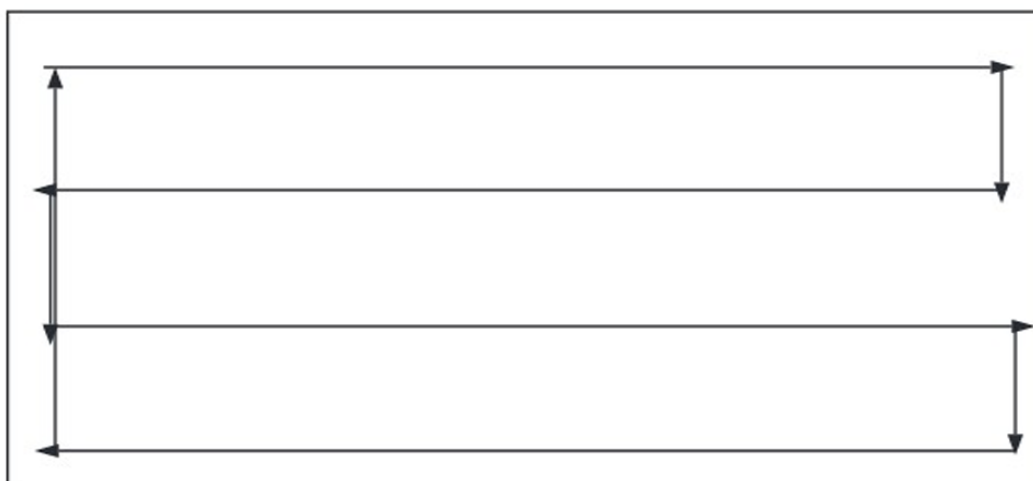


Figura 3 - Trajetória ideal a ser seguida na coleta dos dados de odometria visual do projeto [9].

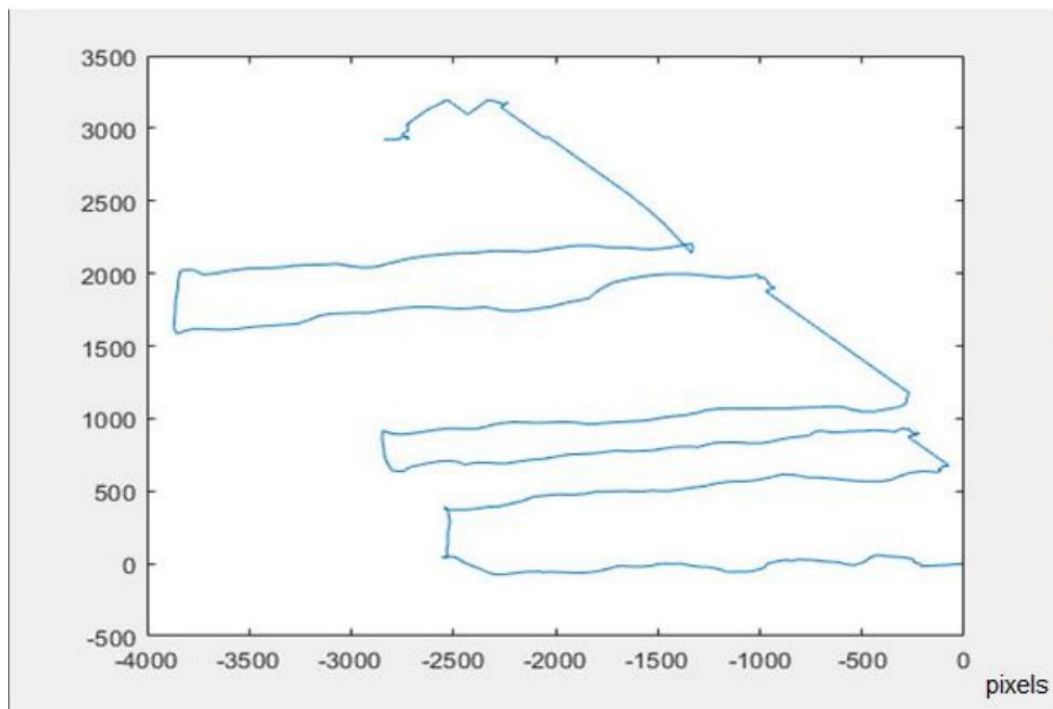


Figura 4 - Trajetória 1, em pixels, obtida através da odometria visual no projeto [9]

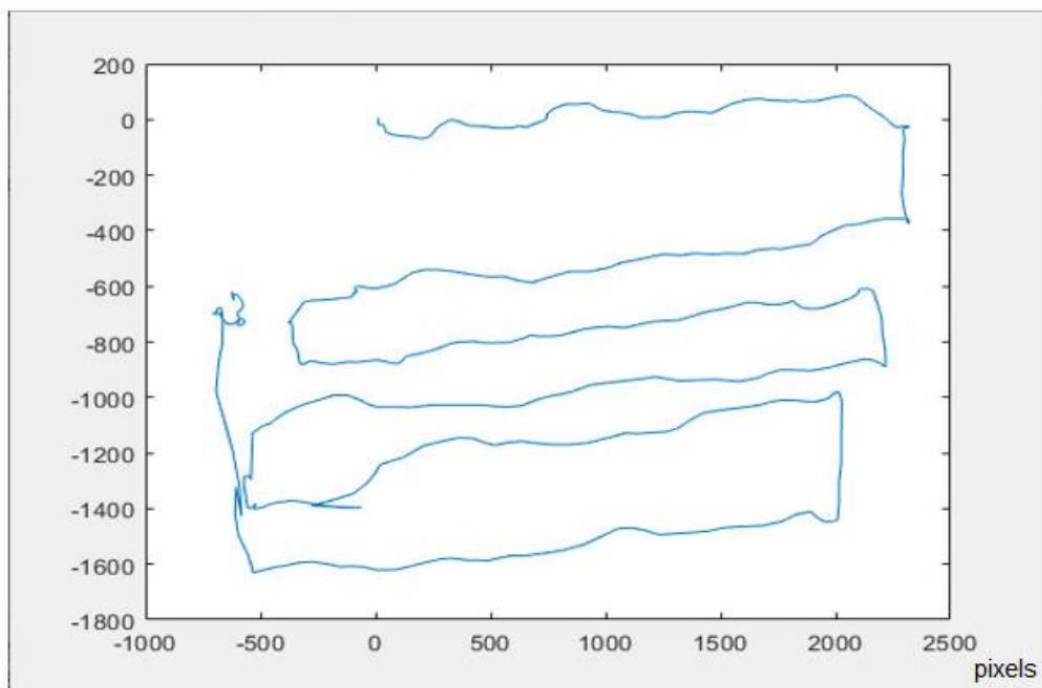


Figura 5 - Trajetória 2, em pixels, obtida através da odometria visual no projeto [9].

## **1.2** **Motivação e objetivos**

### **1.2.1** **Motivação**

Os avanços até então obtidos no uso de magnetômetros de alta precisão para determinar corretamente a posição e profundidade de objetos ferromagnéticos são extremamente relevantes para geração de novos processos de imageamento para auxiliar nas cirurgias de remoção, trazendo alternativas não invasivas e menos nocivas à saúde do paciente e dos operadores.

No entanto, além da alta precisão obtida através do SQUID, busca-se que o equipamento seja menos custoso e de mais fácil manuseio, características que compõem os princípios biometrológicos e que garantem uma maior capacidade de incorporação em ambiente clínico [5,6].

Os estudos relacionados à interpretação dos dados provenientes de mapeamentos magnéticos já apresentam avanços significativos, indicando a possibilidade do uso do GMR e GMI como alternativa do SQUID [8,9], porém a estimativa de posição do dispositivo ao longo do tempo, processo essencial para indicar a localização correta do corpo estranho, ainda mostra-se insuficiente [9] e requer uma análise específica das alternativas existentes.

### **1.2.2** **Objetivos**

Essa dissertação tem como objetivo investigar e comparar o uso da odometria visual e da navegação inercial como formas de obter a posição em relação ao tempo de um microcontrolador, visando futuramente integrar ao algoritmo de um dispositivo localizador de objetos ferromagnéticos no corpo humano. São considerados objetivos específicos:

- Desenvolvimento de um algoritmo de coleta dos dados de posição vindos do IMU simultaneamente com a captura de um vídeo para a odometria visual;
- Desenvolvimento de um algoritmo de odometria visual e de dupla integração, visando a redução dos erros; e

- Comparação dos resultados dos dois algoritmos, buscando encontrar um que entregue resultados consistentes com a realidade e que sejam altamente replicáveis.

### 1.3

#### Organização da dissertação

Esta dissertação está subdividida em 4 capítulos.

- ❖ O **Capítulo 1** – Introdução – apresentada uma contextualização histórica, de forma a apresentar o estado da arte atual e os avanços envolvendo magnetômetros de alta sensibilidade para a detecção de corpos estranhos, evidenciando os objetivos e motivações do projeto.
- ❖ O **Capítulo 2** – Materiais e Métodos – descreve os sensores e equipamentos utilizados, apresenta-se a lógica da coleta e interpretação dos dados, além do desenvolvimento da caixa e das calhas para a obtenção de dados, bem como um detalhamento dos ensaios realizados.
- ❖ O **Capítulo 3** – Resultados e Discussões – detalha os dados obtidos a partir dos ensaios realizados, fazendo uma comparação entre os dois métodos de estimativa de posição.
- ❖ O **Capítulo 4** – Conclusões e trabalhos futuros – discute o que foi observado nos ensaios de forma a exaltar os pontos de atenção dos resultados obtidos e os pontos que podem ser explorados em futuras pesquisas e projetos.

## 2

## Materiais e Métodos

Na seção 2.1 é apresentado o dispositivo de prototipação utilizado para a coleta dos dados dos sensores, o *Raspberry PI*. A seção 2.2 detalha a câmera utilizada nos ensaios para a captura de vídeos e imagens. Na seção 2.3 é detalhado o IMU, sensor utilizado para obter a aceleração e velocidade angular do dispositivo, além de detalhar o processo para estimar a posição e os diferentes ensaios realizados. A seção 2.4 detalha o processo de odometria visual, onde o vídeo é processado para obter a trajetória do equipamento ao longo do tempo. A seção 2.5 detalha as caixas desenvolvidas para coletar os dados nos diferentes ensaios. Finalmente, a seção 2.6 detalha a lógica utilizada para coletar os dados utilizando o *Raspberry PI*.

### 2.1

### Raspberry PI

Os *Raspberry PI* são minicomputadores baseados em Linux muito utilizados para a prototipação de projetos eletrônicos por ter facilidade de integração de componentes com a linguagem de programação *python* e ter portas de interface de fácil acesso, conforme indicado na figura 6. Diferente do Arduino, em que temos um microcontrolador programável, o *Raspberry PI* é um computador, podendo ser realizada a programação diretamente na sua memória interna, além de não haver necessidade de placas de extensão para visualização de dados, conexão com internet e armazenamento de dados.



Figura 6 – Raspberry Pi 4B, plataforma de prototipação utilizada na coleta de dados.

Para a realização do projeto, optou-se por utilizar o modelo 4B do Raspberry PI [11], com 8 GB de memória RAM, 4 portas USB, 2 portas micro-HDMI, um processador de 1.8 GHz de 64 bits, além de necessitar de apenas 15 W para o seu funcionamento. Para o armazenamento interno, utilizou-se um micro SD de 32 GB.

## 2.2 Câmera digital

Por ter uma grande facilidade de integração com o sistema, além de diversas bibliotecas *python* prontas para a captura de imagens e vídeos, optou-se por utilizar o módulo v2 de câmera do Raspberry PI, mostrada na figura 7.

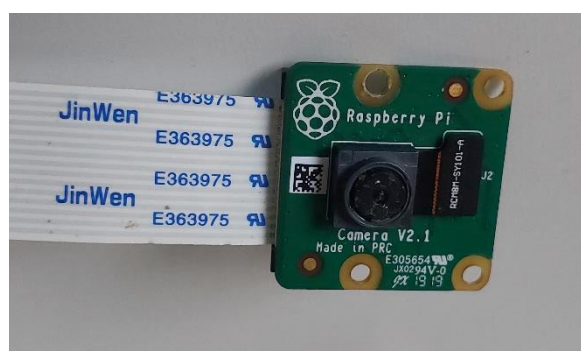


Figura 7 - PiCamera v2, câmera utilizada para a coleta de dados.

Esse módulo é capaz de capturar vídeos de 1920x1080 pixels a 30 fps (*frames per second* ou quadros por segundo), 1280x720 pixels a 60 fps e 640x480 pixels a 90 fps [12]. A câmera possui uma distância focal de 3.04 mm, tendo também um ajuste manual de foco. O sensor possui 3,68 por 2,76 mm, onde cada pixel tem 1,12

por 1,12  $\mu\text{m}$ . Como a resolução utilizada para os ensaios é diferente da resolução máxima real, não podemos nos basear no tamanho dos pixels do sensor para fazer a conversão de pixels para metros. Para isso, é necessário calibrar a câmera utilizando um padrão de calibração, normalmente uma malha xadrez com quadrados de tamanhos conhecidos, para remover a distorção da imagem nas bordas e calcular por software o centro da imagem e a distância focal. A tabela 1 apresenta os valores de distância focal para os eixos x e y em diferentes alturas, calculados através do software de calibração do MatLab.

Tabela 1 - Distância focal nos eixos x e y para as diferentes alturas de coleta.

Altura (cm)	Distância Focal x (mm)	Distância focal y (mm)
2,8	146	145
4,8	1310	1313
6,3	1310	1313
7,8	1469	1467

O *Raspberry PI* possui uma porta própria para conexão da câmera e já vem com uma biblioteca *python* de captura de fotos e vídeos pré-instalada em seu sistema operacional, a PiCamera [13]. Esse pacote gera vídeos no formato H264, que não possui os metadados de frames por segundo, informação importante para os ensaios. Para incluir essa informação corretamente, foi necessário utilizar um programa para a conversão do arquivo H264 para MP4, o formato de vídeo que o MatLab é capaz de ler.

Essa conversão foi feita utilizando o programa “ffmpeg”, baseado em linhas de comando, que suporta variados formatos de vídeo e garante a geração correta dos metadados do vídeo, gerando um arquivo sem erros e que pode ser lido pelo código de odometria visual. Por ser baseado em linhas de comando, sua inclusão no código de coleta é simples e não apresenta impacto no tempo de execução do código. Nos testes iniciais, utilizou-se páginas na internet ou o “VLC media player” para realizar a conversão do vídeo, porém o resultado era um vídeo com a informação de quadros por segundo errada e alguns *frames* eram perdidos na conversão, afetando a qualidade da odometria.

### 2.3 Odometria Visual

Como a estimativa de posição com base nos dados da aceleração apresenta o problema do *drift*, que afeta consideravelmente a qualidade da medição, buscou-se analisar o emprego de outros sensores para estimar a posição. Como deseja-se medir com precisão distâncias pequenas, entre 10 e 30 cm, não se pode usar algo como GPS (*Global Positioning System*) para estimar a posição, já que o erro típico de estimativa de posição com GPS é superior aos deslocamentos que se pretende estimar, que são da ordem de centímetros.

Uma alternativa viável para o projeto é o uso da odometria visual [14], que consiste em utilizar imagens advindas de uma câmera para estimar a trajetória realizada por ela. A odometria é realizada comparando pontos existentes entre dois quadros consecutivos de um vídeo e estimando a diferença, em pixels, nos eixos x e y [15]. Tal análise permite determinar o deslocamento e rotação entre quadros sucessivos. A figura 8 exemplifica a comparação realizada entre dois quadros consecutivos. As linhas amarelas indicam a posição inicial e final dos diferentes pontos semelhantes encontrados em duas imagens sucessivas. Pode-se observar que alguns pontos detectados não correspondem exatamente, porém costumam ser a minoria e são desconsiderados por serem outliers.

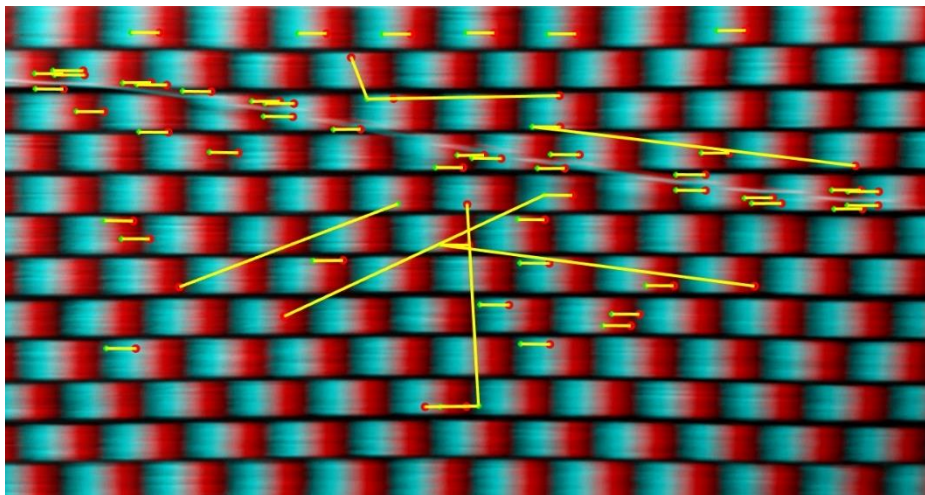


Figura 8 - Exemplo de comparação de pontos entre quadros sequenciais

Para evitar distorções na imagem, primeiro é necessário calibrar a câmera. O MATLAB possui um aplicativo para calibração de câmera, basta carregar pelo menos 20 fotos de um padrão de calibração, que usualmente consiste em um tabuleiro de xadrez com o tamanho dos quadrados conhecidos, conforme indicado



na figura 9. O aplicativo detecta os vértices dos quadrados e compara o resultado de todas as imagens para ajustá-las e reduzir possíveis distorções. A calibração precisa ser realizada somente uma única vez, visto que os valores encontrados são próprios da câmera.

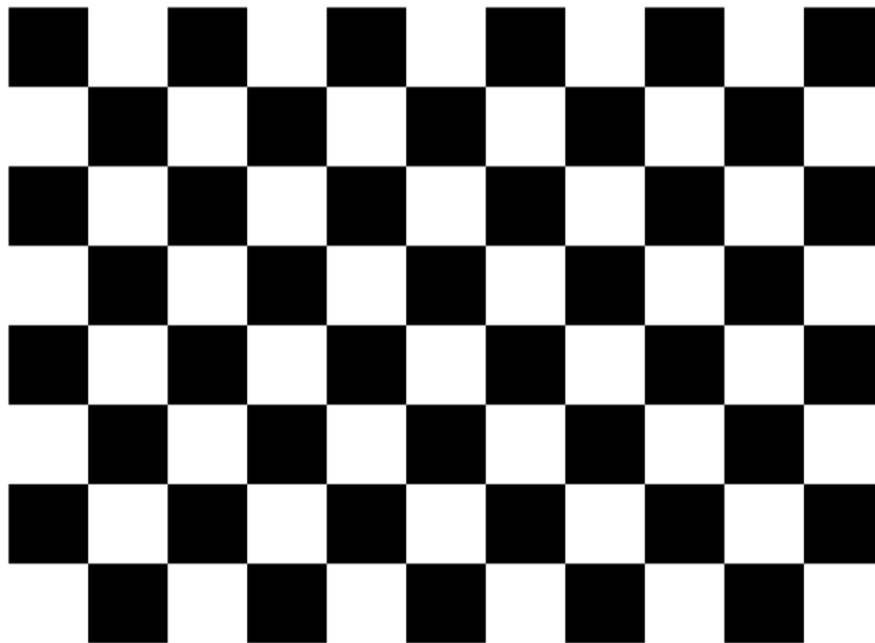


Figura 9 - Padrão de calibração utilizado para calibrar a câmera em diferentes distâncias. O padrão utilizado para calibrar a câmera possui quadrados de 1 mm de lado. Obtida em [16].

Para estimar a trajetória usando a odometria visual, foi criado um código em MATLAB que transforma a imagem em escalas de cinza, para facilitar a localização de pontos de interesse e reduzir o custo computacional. O algoritmo encontra pontos de interesse na imagem, normalmente regiões que possuem alto contraste nos pixels do entorno, e compara com os mesmos pontos de interesse encontrados no quadro seguinte. Várias das funções utilizadas já existem no MATLAB, como a responsável por estimar a trajetória e realizar a comparação entre os pontos.

A saída do código é uma trajetória em pixels. Por sua vez, para se converter de pixels para centímetros é necessário realizar a medição da quantidade de pixels de algo com tamanho conhecido. Ressalta-se que esse valor será válido para uma distância específica entre a câmera e o plano onde está sendo feita a medição. Para analisar o erro associado à odometria visual, fez-se uma coleta de dados semelhante à do IMU, em que, inicialmente, se realizou um deslocamento linear em apenas um eixo. Dessa forma, facilita-se o processo de cálculo do erro entre as posições

estimadas e reais. A coleta dos dados também foi realizada pelo *Raspberry PI*, com um código em *python*.

A odometria visual precisa de pontos de interesse para calcular sua trajetória e, conseqüentemente, para correta identificação destes pontos, o local precisa estar suficientemente iluminado. Além disso, é necessário conhecer a distância da câmera em relação ao plano de medição, a fim de se estimar adequadamente o deslocamento em centímetros. O ideal é manter a altura fixa.

## 2.4

### IMU (*Inertial Measurement Unit*) e Navegação Inercial

O IMU (*Inertial Measurement Unit*), apresentado na figura 10, é um conjunto de 3 a 4 sensores que garantem informações pertinentes ao posicionamento de um dispositivo. O IMU utilizado no projeto, o MPU9250, apresenta um acelerômetro, um giroscópio e um magnetômetro, todos de três eixos [17]. O acelerômetro indica a aceleração ao longo do tempo, o giroscópio a velocidade angular e o magnetômetro o campo magnético ao longo do tempo. Para a coleta de dados foi utilizada a biblioteca *imusensor* [18], feita em *python*. A biblioteca possui suporte para correção de desvios (*offset*) presentes no sensor e coleta de dados, além de implementação de filtros digitais para remoção do ruído. A figura 10 apresenta o sensor utilizado em conjunto com o *Raspberry Pi* para coletar os dados.



Figura 10 - MPU 9250 utilizado na coleta de dados.

O MPU9250 apresenta diferentes escalas de sensibilidade para o acelerômetro e giroscópio, sendo as menores a de maior interesse para o projeto. O

acelerômetro possui uma escala mínima de  $\pm 2 g$ , sendo  $g$  equivalente a  $9,8 \text{ m/s}^2$  e o giroscópio possui uma escala mínima de  $\pm 250 \text{ }^\circ/\text{s}$ , tendo ambos uma representação digital de 16 bits [17]. Para alimentação, o MPU9250 necessita entre 2,4 e 3,6 V, sendo o *RaspberryPI* capaz de oferecer uma tensão de 3,3 V para alimentação sem a necessidade de um circuito para reduzir a tensão. Comparado a outros IMUs do mercado, o MPU9250 apresenta uma boa resolução para o giroscópio e acelerômetro, apresenta filtros integrados no circuito e o menor preço para outros giroscópios semelhantes.

Inicialmente, de forma a simplificar a estimativa da posição e a comparação do erro com a odometria visual, considerou-se que todo o movimento do dispositivo será feito em um plano paralelo ao plano onde será feito o mapeamento magnético e admitiu-se que não haverá rotação do dispositivo. Dessa forma, para estimar a posição utilizando o IMU podemos usar as componentes dos eixos x e y do acelerômetro. Como tem-se acesso à aceleração, é necessário realizar uma dupla integração em relação ao tempo para obter a posição em função do tempo [19]. Nos ensaios seguintes, também foram extraídos os dados vindos do giroscópio, que indicam velocidade angular. Integrando a velocidade angular, podemos estimar a orientação do dispositivo a cada instante de tempo e com isso estimar a trajetória em x e y.

Neste intuito, foi utilizada duas vezes a função “cumtrapz” do MATLAB para realizar a dupla integração do vetor de aceleração. Como cada dimensão é independente da outra, pode-se realizar a dupla integração de forma separada para os eixos x e y. A função utilizada faz uma aproximação por trapézios da área sob a curva, ao invés de realizar uma aproximação por retângulos. Dessa forma, o erro esperado da integração tende a ser menor. A figura 11 apresenta um diagrama do processo necessário para calcular a posição com base nos dados do IMU.

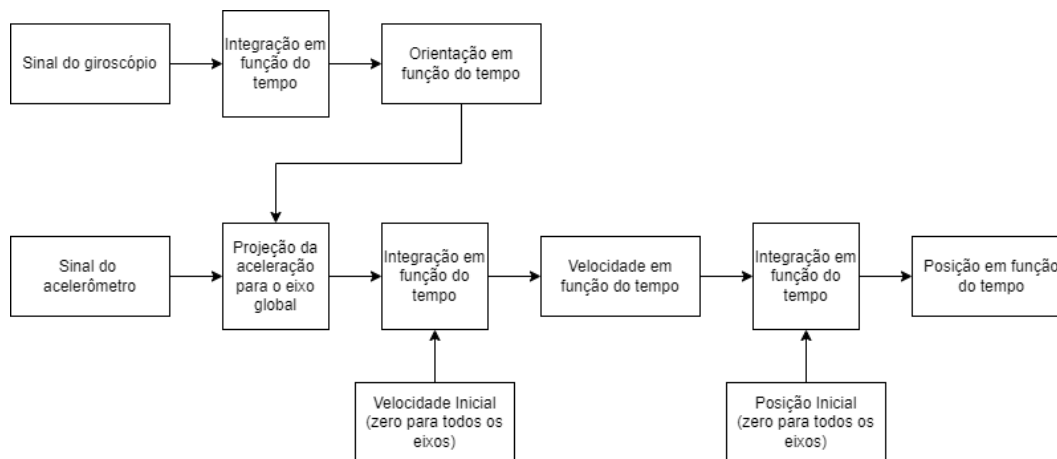


Figura 11 - Diagrama para o cálculo da posição em função do tempo com os dados do IMU

### 2.4.1

#### Ações para redução do *offset*

Uma das principais fontes de erro esperadas é o *drift* originário da dupla integração desse *offset*. O *drift* é observado como um valor crescente ou decrescente na estimativa da posição em função do tempo, quando o objeto está parado. Esse erro ocorre, pois, ao se encerrar o movimento, o acelerômetro ainda registra valores acima ou abaixo de zero, de modo que ao realizarmos a integração desses valores, não importa o quão pequenos sejam, o erro será acumulado no resultado causando esse efeito.

No código de coleta, foi implementado uma função para reduzir o *offset* do acelerômetro utilizando os valores do IMU parado. O código consiste em coletar os dados do IMU durante um segundo e calcular uma média para cada informação. Ao salvar os dados, é removido o valor médio calculado para aquela grandeza, garantindo uma redução do *offset*.

## 2.5

### Configurações de coleta

#### 2.5.1

#### Configuração linear com caixa de papel cartão

Inicialmente, de forma a validar os dados vindos da odometria visual e do IMU, foi feita uma caixa provisória usando a própria caixa de papel cartão do *Raspberry PI*, conforme apresentado nas figuras 12, 13 e 14. O controlador ficava por dentro da caixa de papel, onde foram feitos furos para a passagem dos fios de

alimentação, vídeo e de integração com os sensores. Na parte superior, uma pequena *protoboard* foi colada para incluir o IMU, um botão e dois LEDs para indicar o estado atual da coleta. Na parte inferior, a câmera foi presa com fita adesiva e uma peça de plástico foi colada para reduzir a rotação do dispositivo. Os ensaios foram realizados com uma calha de alumínio, exibida na figura 15, de 3,81 x 3,81 x 180 cm, porém os ensaios foram limitados em distâncias máximas de 20 cm ao longo do eixo x. A distância da câmera ao plano é de aproximadamente 2,8 cm, essa distância foi obtida através da diferença entre a altura da calha e a distância entre a parte inferior da *case* e a lente da câmera.

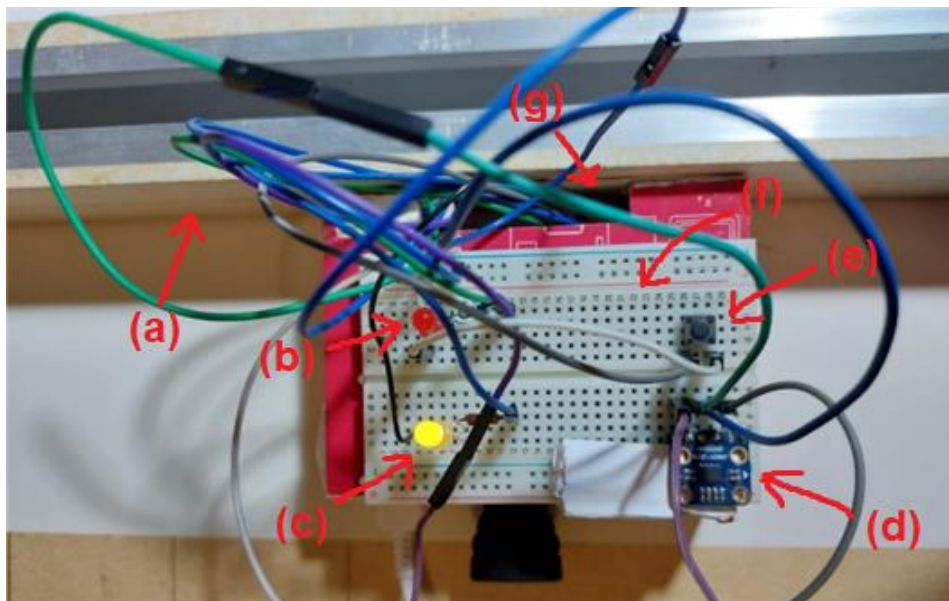


Figura 12 - Caixa de papel cartão feita a partir da caixa do *Raspberry PI*. **(a)** Calha de metal usada como guia durante as coletas. **(b)** LED vermelho para indicar que os dados estão sendo coletados. **(c)** LED amarelo para indicar que o sistema está ligado. **(d)** IMU. **(e)** Botão para iniciar captura de dados do IMU e da câmera. **(f)** *Protoboard* usada para realizar as conexões elétricas dos componentes. **(g)** Buraco para conectar fios entre *Raspberry PI* e *Protoboard*.

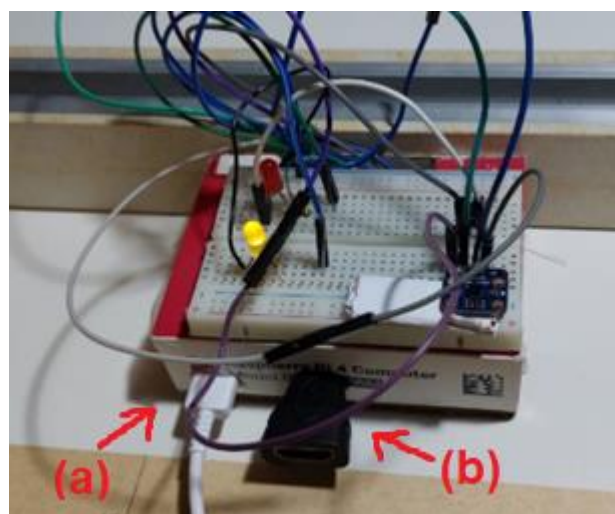


Figura 13 - Visão lateral da caixa de papel cartão. **(a)** Cabo de energia para alimentar o *Raspberry PI*. **(b)** Saída de vídeo do *Raspberry PI*.

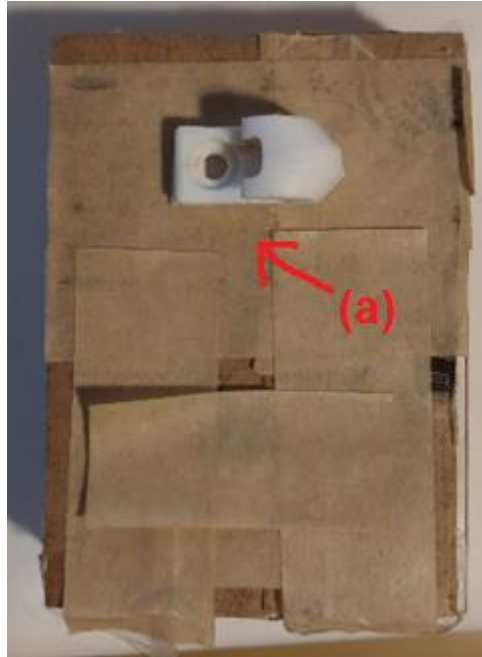


Figura 14 - Visão inferior da caixa de papel cartão. (a) Pino de plástico para encaixar na calha de alumínio e impedir rotações em torno do eixo z.



Figura 15 - Peça da calha de alumínio utilizada para a coleta de dados.

### 2.5.2 Configuração linear com caixa impressa em 3D

Buscando uma montagem mais robusta, foi desenvolvida uma caixa impressa em plástico PLA (ácido polilático) no *Fusion360*, da Autodesk. A caixa foi feita usando como base a apresentada anteriormente, e foram incluídos pinos na parte inferior para impedir a rotação do dispositivo e garantir o movimento em apenas um eixo. Dessa forma, o cálculo do erro entre posição real e estimada foi facilitado e os resultados deixaram de ser influenciados pela flexão do papel. A *protoboard* se encontra na tampa da *case*, fixada por fita adesiva, e a câmera na parte inferior. Diferente da caixa de papel, onde o Raspberry PI e a câmera foram fixados usando

fita adesiva, aqui, ambos foram fixados usando parafusos, melhorando a aderência à caixa e reduzindo vibrações indesejadas na câmera e no minicomputador.

Nesse ensaio, a mesma viga de alumínio foi utilizada. A figura 16 apresenta o modelo 3D da caixa e as figuras 17, 18 e 19 apresentam diferentes ângulos da caixa impressa.

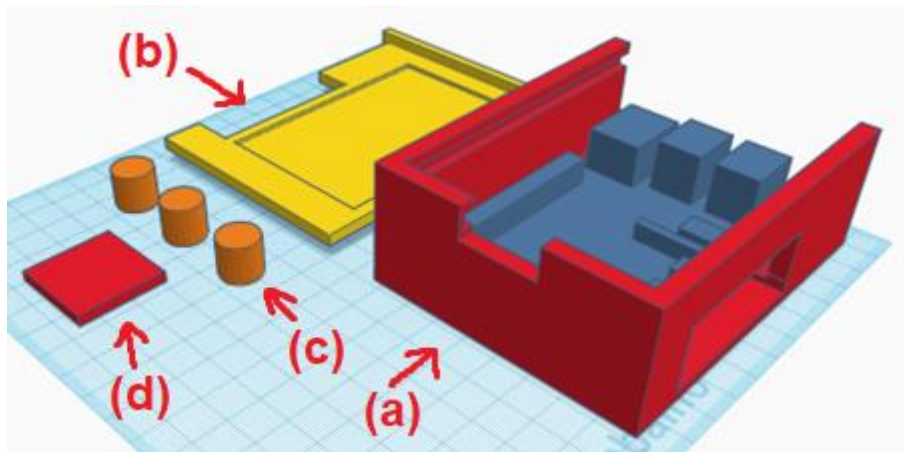


Figura 16 - Modelo 3D da caixa impressa. **(a)** Base da caixa onde o *Raspberry Pi* é mantido. **(b)** Tampa da caixa com um buraco para passagem de fios e um guia para fixar a *protoboard*. **(c)** Pinos para fixar a caixa na calha de alumínio e impedir rotações em torno do eixo x e z. **(d)** Peça para fixar a câmera na parte inferior da caixa.

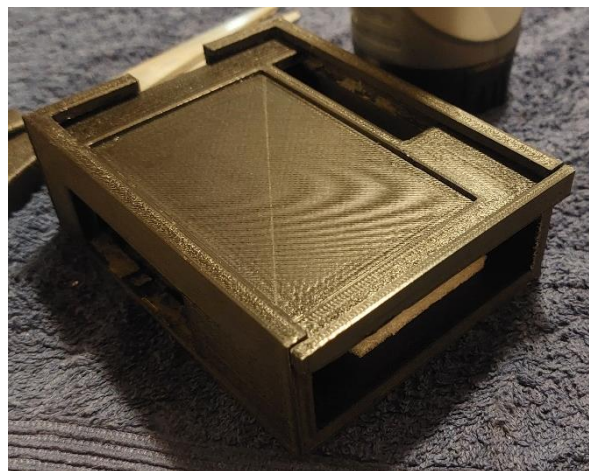


Figura 17 - Visão superior da caixa impressa em PLA.



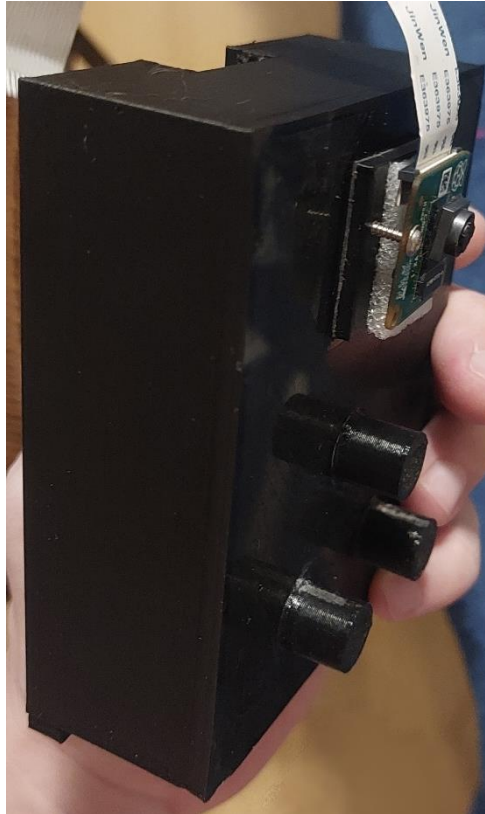


Figura 18 - Visão inferior da caixa impressa em PLA.

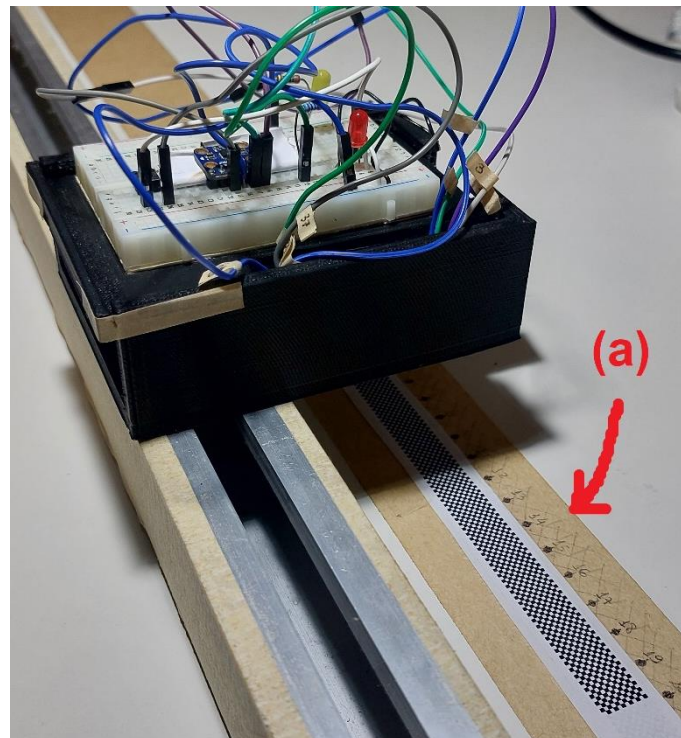


Figura 19 - Caixa de PLA utilizada para a coleta de dados sobre a calha de alumínio. **(a)** Padrão usado para auxiliar a odometria visual em todas as coletas.



Percebe-se, na figura 19, que a sombra da caixa afeta a gravação do vídeo. Em todas as coletas foram utilizadas duas luminárias de cada lado da mesa para iluminar a parte inferior da caixa.

### 2.5.3 Configuração linear com variação de distância focal

A fim de se avaliar a influência da variação de distância entre a câmera e o plano de medição nas estimativas de posição, foram utilizados pedaços de madeira com dimensões conhecidas para alterar a distância entre o plano de medição e a câmera. Mais especificamente, essas madeiras possuíam 2, 3,5 e 5 cm de altura, e foram colocadas abaixo da viga de alumínio. Assim como no ensaio anterior, aqui também foi utilizada a caixa impressa em 3D. A figura 20 exhibe a madeira de 2 cm utilizada para aumentar a distância entre a câmera e a mesa onde está o padrão para a odometria visual.

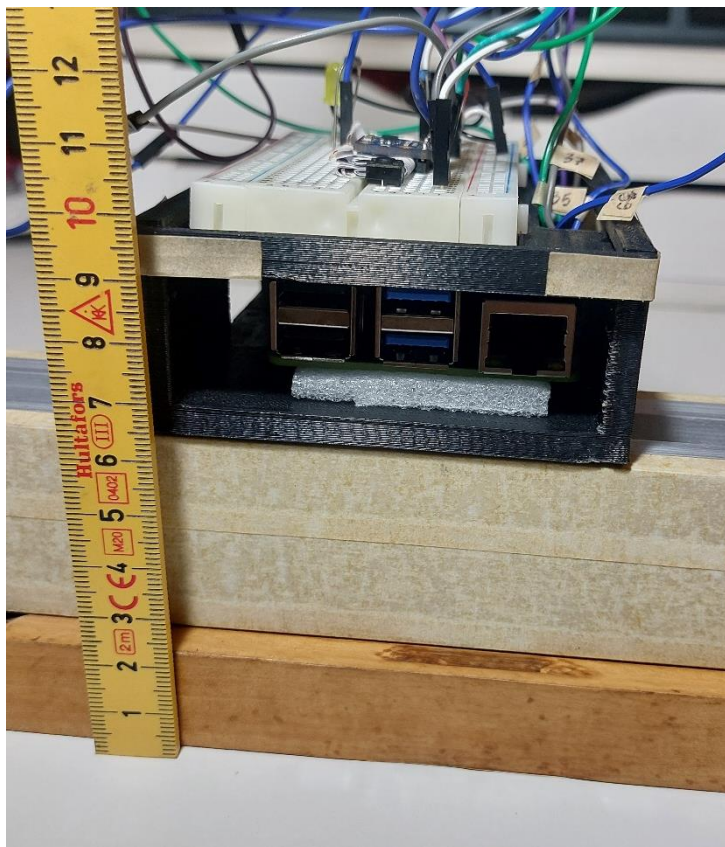


Figura 20 - Madeira de 2 cm utilizada para aumentar a distância entre a câmera e o plano de coleta.

#### 2.5.4

#### Configuração curva com calhas circular e quadrada impressas em 3D

De forma a estudar o comportamento ao realizar curvas, foram desenvolvidas e impressas duas calhas no Fusion360 com mesma seção de área da viga de alumínio que formam respectivamente um círculo e um quadrado de bordas arredondadas. A calha circular, apresentada nas figuras 21 e 22, possui um diâmetro interno de 250 mm e um externo de 326,2 mm. A calha quadrada, apresentada nas figuras 23 e 24, possui o lado interno e externo igual ao diâmetro da calha circular, porém as bordas da calha foram arredondadas para facilitar o deslizamento da caixa impressa em 3D. As calhas foram subdivididas em 4 partes, no caso da quadrada, e 5 partes, no caso da circular, de tamanhos iguais para facilitar a impressão.

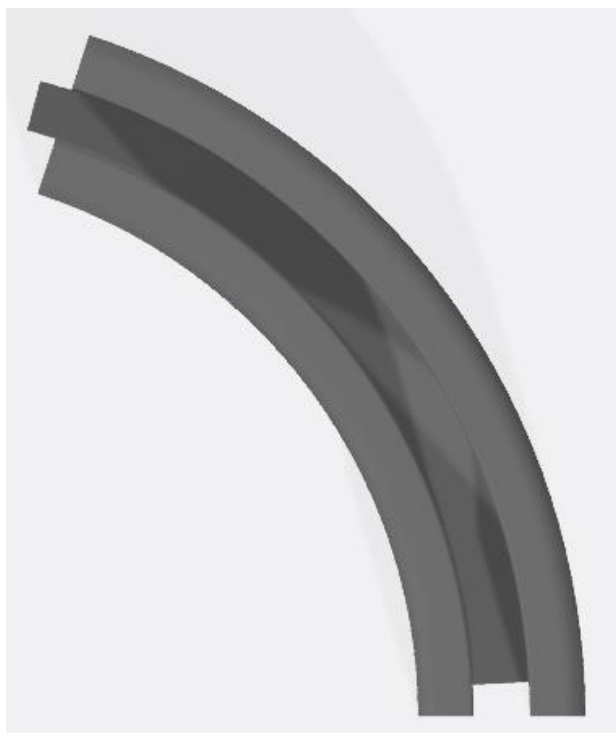


Figura 21 - Modelo 3D de um quinto da calha circular.

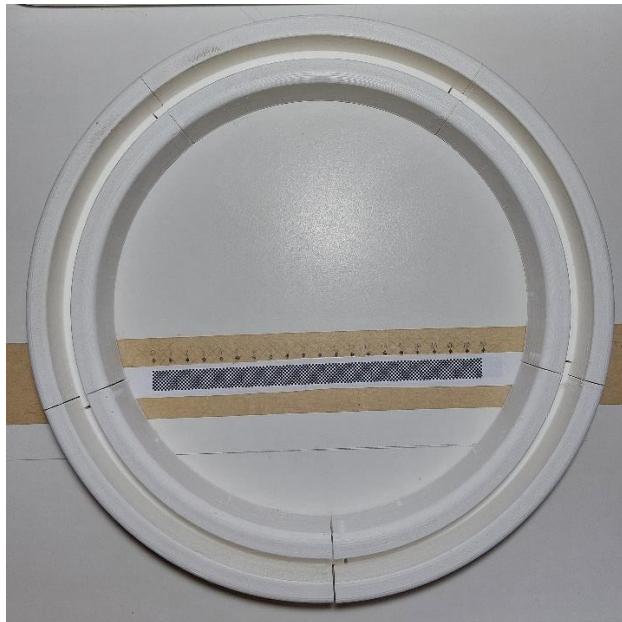


Figura 22 - Calha circular impressa em plástico PLA.

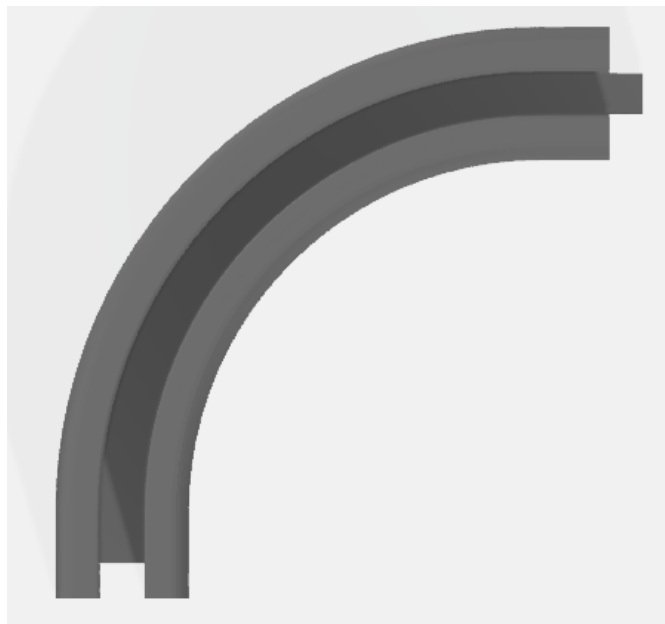


Figura 23 - Modelo 3D de um quarto da calha quadrada com bordas arredondadas.

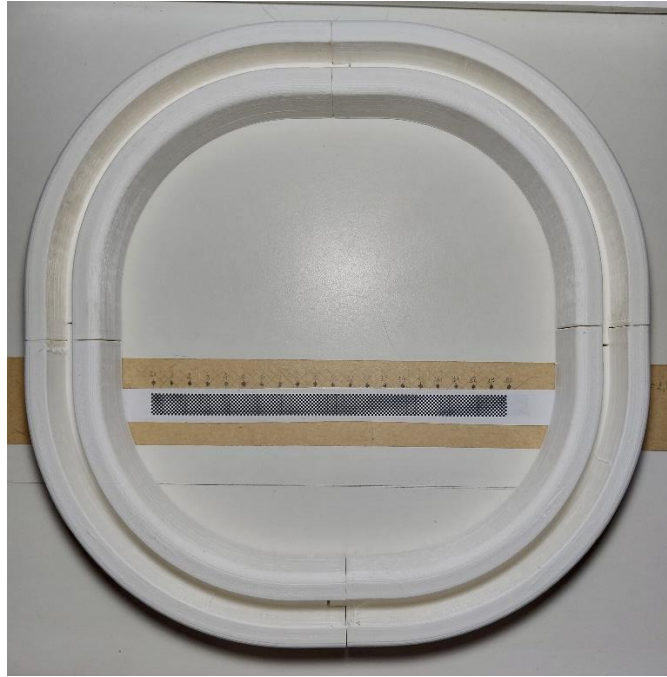


Figura 24 - Calha quadrada com bordas arredondadas impressa em plástico PLA.

## 2.6 Lógica da coleta de dados

A coleta dos dados foi desenvolvida em *python*, utilizando as bibliotecas *picamera*, para gravação dos arquivos de vídeo processados pela odometria visual, *gpiozero*, para controlar os LEDs de operação e configurar o botão de coleta, *imusensor*, para obter os dados do IMU e *xlsxwriter*, para gerar o arquivo .xlsx com os valores obtidos a cada instante de tempo.

A primeira etapa do código é inicializar a configuração dos sensores, o botão e os LEDs de operação. Para indicar o fim da configuração inicial, o LED amarelo é ligado para sinalizar que está aguardando que seja pressionado o botão para iniciar a coleta. Ao ser pressionado o botão, o LED vermelho começa a piscar para indicar que o IMU está sendo inicializado e o desvio está sendo corrigido, antes do início da coleta. Assim que o LED vermelho para de piscar e permanece ligado, a coleta é iniciada, tendo uma duração de 10 segundos. A função de iniciar a gravação do vídeo é executada por outro núcleo do *RaspberryPI*, permitindo que o enlace de coleta do IMU seja executado em paralelo.

Após os 10 segundos, ou seja, quando o enlace de coleta do IMU é encerrado, o LED vermelho é desligado e o amarelo começa a piscar. Na sequência, a gravação do vídeo e a aquisição do IMU são interrompidas. Em seguida, gera-se um arquivo .h264, com o vídeo, e um arquivo .xlsx com os dados do acelerômetro, giroscópio,

magnetômetro e o intervalo de tempo de cada dado. Como não podemos utilizar o arquivo .h264 diretamente para a odometria visual, é feita a conversão para .mp4 com o ffmpeg usando a biblioteca *subprocess* do *python*. Assim que o arquivo é convertido, o código retorna para o estado de aguardar o botão ser pressionado para iniciar uma nova coleta e o LED amarelo volta a ficar com sua cor fixa. Caso ocorra algum erro na execução do código ou o código seja encerrado, os LEDs são desligados e a câmera é encerrada.

O diagrama de blocos, apresentado na figura 25, sintetiza a lógica desenvolvida para a coleta dos dados do IMU e a gravação do vídeo da trajetória realizada pelo equipamento.

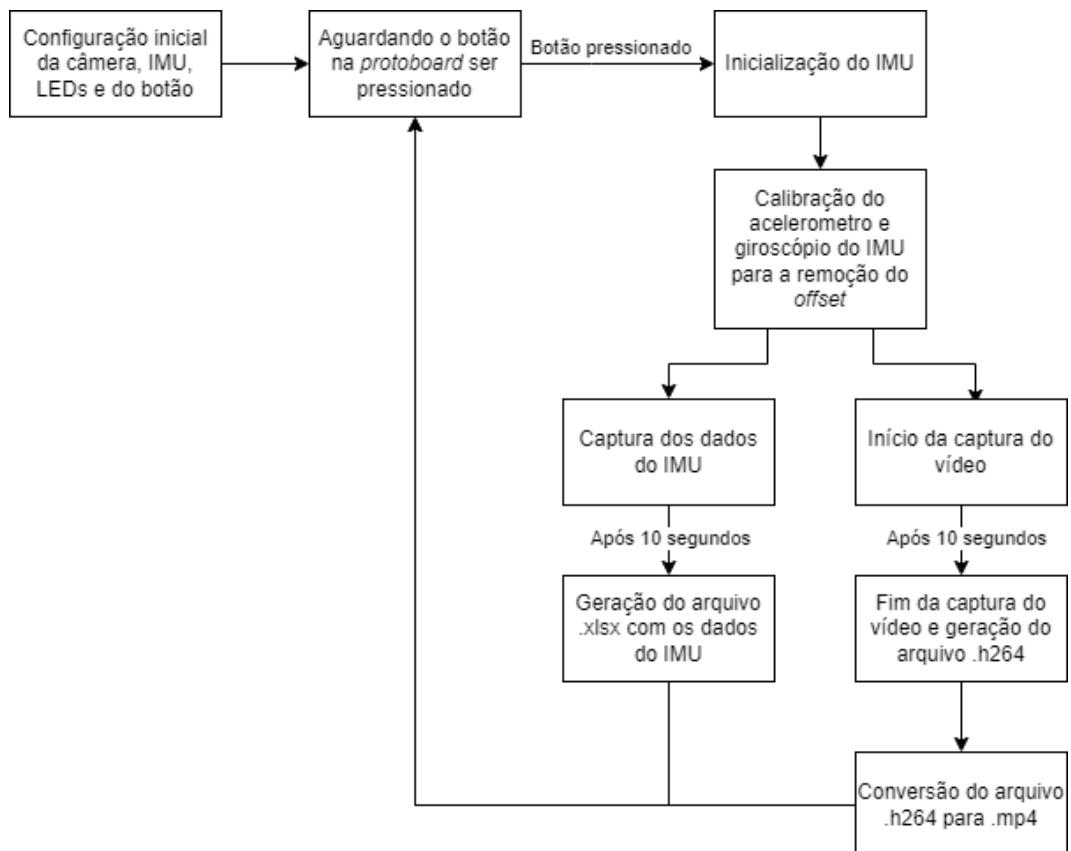


Figura 25 - Diagrama de blocos do código de coleta implementado no *Raspberry PI*.

### **3**

## **Resultados e Discussões**

Na seção 3.1, detalham-se todos os resultados obtidos a partir das análises com 1 grau de liberdade. As análises feitas em uma dimensão permitem uma melhor estimativa de erro, sendo possível analisar o erro médio, a variância e desvio padrão dos resultados da odometria visual e da navegação inercial.

A seção 3.2 apresenta os resultados aumentando o número de graus de liberdade, onde as coletas foram realizadas utilizando as calhas com curvaturas, possibilitando a validação dos algoritmos para a interpretação de curvas.

### **3.1**

#### **Ensaio unidimensionais**

As análises, em sua maioria, foram feitas em apenas uma dimensão para minimizar o erro existente na comparação dos resultados obtidos a partir do IMU e da câmera. Os ensaios unidimensionais foram feitos utilizando uma barra de alumínio como trilho, para garantir o movimento em apenas um sentido e a caixa foi montada visando evitar os movimentos de rotação que poderiam ocorrer em cima do trilho.

Em uma dimensão as fontes de erro são reduzidas, sendo majoritariamente associados ao erro humano na definição dos pontos iniciais e finais e aos erros dos instrumentos de medição usados para delimitar o deslocamento. Dessa forma, pode-se comparar as curvas de posição versus tempo obtidas por meio dos dois métodos estudados (navegação inercial e odometria visual) e estimar o erro médio e a repetibilidade dos resultados.

Com outros graus de liberdade, o número de fontes de erro é maior e, portanto, a comparação entre os resultados se torna mais complicada sem uma estrutura projetada para análise de mais dimensões.

### 3.1.1

#### Resultados com a caixa de papel cartão

Inicialmente, foi feita a coleta utilizando a caixa de papel cartão. Por apresentar uma estrutura pouco rígida, eram introduzidos no sistema muito ruído e erros na leitura da informação. As vibrações na caixa aumentavam a quantidade de ruído nos dados do IMU e a sua flexão causava efeitos semelhantes ao *drift* na odometria visual.

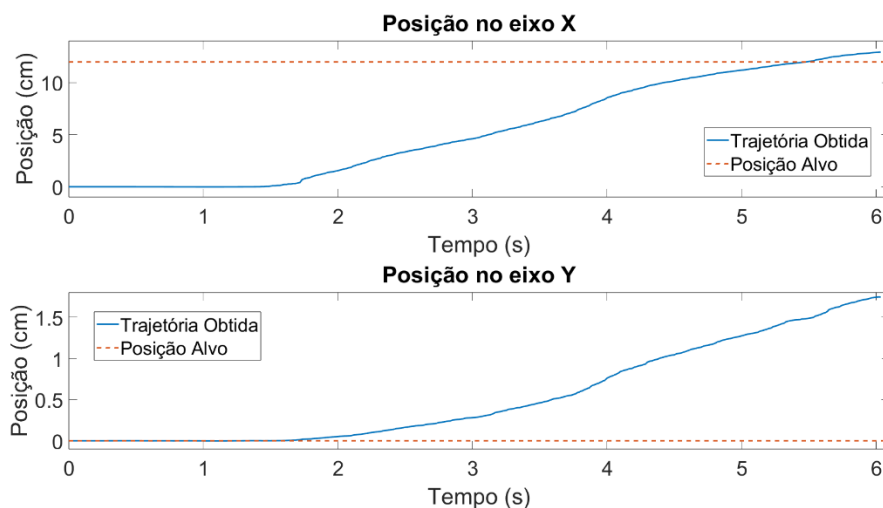


Figura 26 - Posição do eixo x e y em função do tempo. Coletado utilizando odometria visual com a caixa de papel cartão.

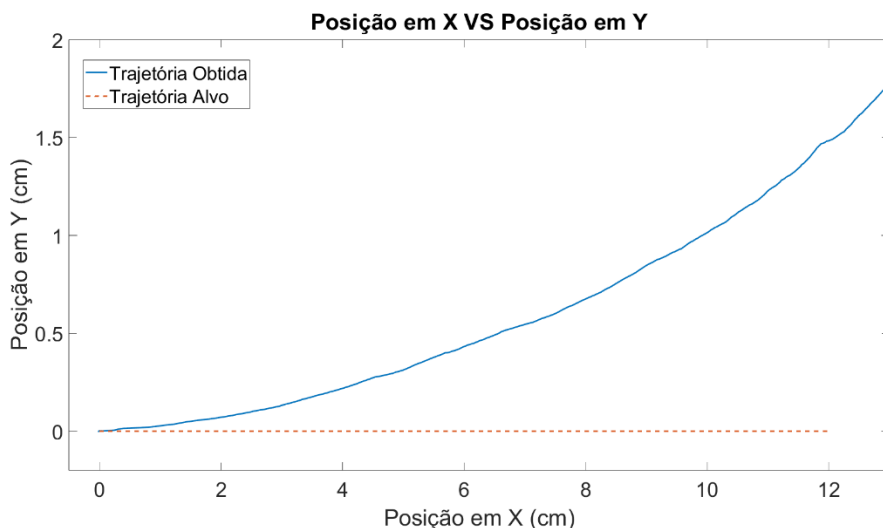


Figura 27 - Trajetória de 12 cm utilizando odometria visual. Coletado com a caixa de papel cartão.

Nas figuras 26 e 27 pode-se observar uma coleta de um percurso linear com aproximadamente 12 cm ao longo do eixo x e os efeitos da flexão da caixa de papel na coleta dos dados da odometria visual. Pode-se observar, que os resultados apresentados na figura 27 indicam que houve um movimento pequeno no eixo Y,

apesar de ter-se realizado um movimento estritamente unidimensional ao longo de x. Esse erro ocorre devido às deformações causadas na caixa de papel ao movimentá-la para realização da coleta. Apesar dessa deformação, nota-se que os resultados estimados para o deslocamento no eixo X foram bem próximos do esperado.

Pode-se observar que mesmo com a caixa de papel, a odometria visual possui uma resposta significativamente melhor à situação em que o sistema está parado, do que a dupla integração dos dados de aceleração provenientes do IMU. É interessante destacar que o *drift* observado usando-se os dados do IMU ocorre devido aos valores de aceleração obtidos após o fim do movimento serem, em média, diferentes de zero. Esse erro é integrado e com isso produz-se o *drift*. É possível verificar que o *drift* é menos significativo quando o objeto está em movimento com alguma aceleração, pois, enquanto o objeto está em movimento, a ordem de grandeza da aceleração tende a ser significativamente superior ao erro. Caso sejam feitas múltiplas paradas ao longo da trajetória, a dupla integração dos dados do IMU introduzirá um erro muito grande, que é muito difícil de se corrigir. As figuras 28 e 29 apresentam a posição em x e y em função do tempo e a trajetória utilizando a navegação inercial.

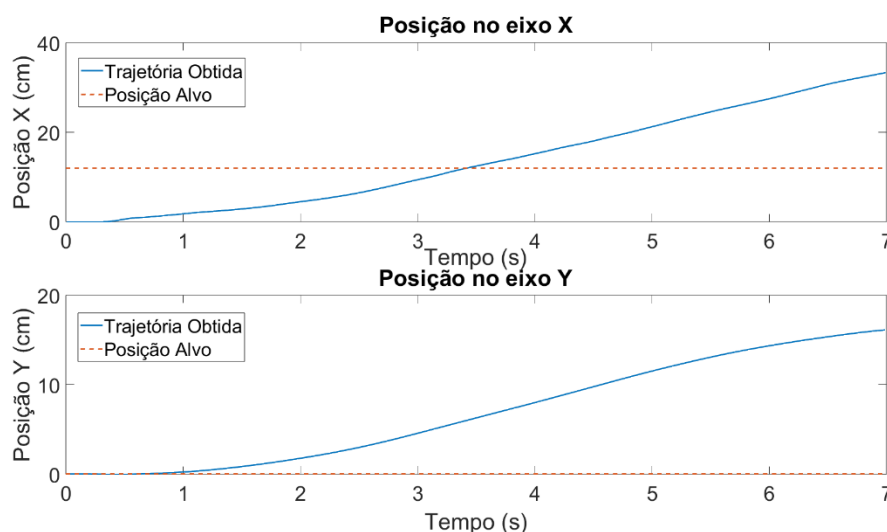


Figura 28 - Posição do eixo x e y em função do tempo. Coletado utilizando navegação inercial com a caixa de papel cartão.



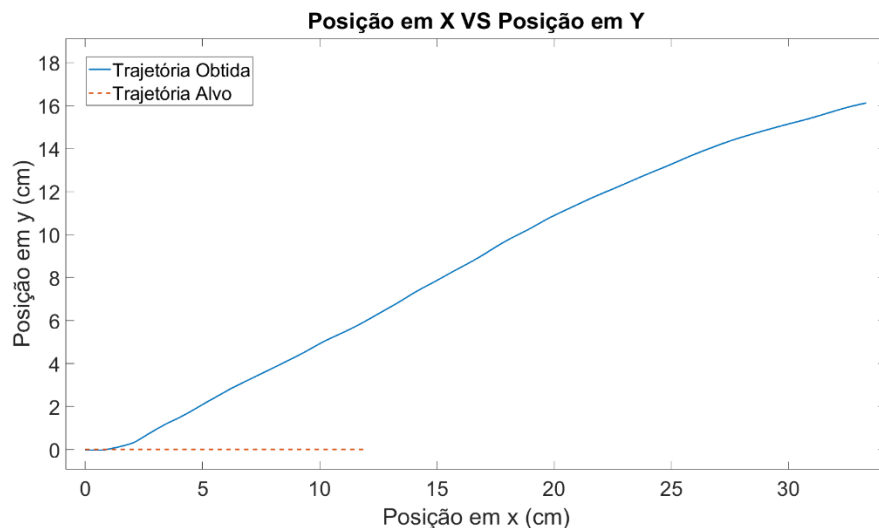


Figura 29 - Trajetória de 12 cm utilizando navegação inercial. Coletado com a caixa de papel cartão.

A dupla integração do ruído gera o efeito do *drift*, facilmente observável no eixo y, fazendo com que a trajetória estimada não represente de forma adequada o movimento realizado.

A tabela 2 apresenta os resultados do erro da navegação inercial e da odometria visual, onde foram feitas duas coletas para 4 distâncias diferentes. Observa-se que os erros obtidos através da navegação inercial são bem maiores em comparação aos obtidos pela odometria visual, conforme foi evidenciado pelas figuras 26, 27, 28 e 29. Tanto para odometria visual quanto para navegação inercial, é possível observar que existe *drift* no deslocamento do eixo y, que deveria permanecer próximo de zero. Para a coleta realizada com a caixa de papel, esse erro é exacerbado pelas distorções da caixa de coleta. As seções seguintes apresentam os resultados obtidos através da caixa de PLA, evidenciando a redução do erro observado em y, especialmente para a odometria visual.

Tabela 2 - Erro obtido nos ensaios realizados utilizando a caixa de papel cartão.

	Navegação Inercial Eixo X		Navegação Inercial Eixo Y		Odometria Visual Eixo X		Odometria Visual Eixo Y	
	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)
Distância Percorrida								
3 cm	-6,12	4,334	2,505	3,646	-1,448	0,492	0,063	0,233
6 cm	-2,37	-29,39	32,529	-3,051	-0,55	0,052	0,311	0,472
9 cm	-6,13	-17,46	11,598	17,905	0,264	-0,656	0,672	-0,452
12 cm	15,32	-5,974	14,284	11,345	0,88	-0,138	1,734	0,433

### 3.1.2

#### Resultados com a caixa de PLA

As seções a seguir apresentam os resultados utilizando a caixa de PLA, confeccionada a fim de minimizar os efeitos nocivos observados no ensaio anterior, associados às muitas vibrações e deformações que ocorrem durante o processo de coleta de informações com a caixa de papel cartão. Dessa maneira, espera-se que a coleta de dados com a caixa de PLA possibilite uma estimativa melhor do deslocamento realizado durante os ensaios, diminuindo as possíveis fontes de erro.

### 3.1.3

#### Resultados com navegação inercial

Foram realizados diferentes ensaios utilizando o IMU de forma a obter o erro, em centímetros, da coleta. Os ensaios envolvem percorrer uma distância conhecida diversas vezes e em diferentes alturas. As tabelas 3 e 4 abaixo apresentam os resultados do erro obtidos para diferentes alturas e distâncias percorridas nos eixos x e y respectivamente.

Tabela 3 - Erro da navegação inercial em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo x. Coletado utilizando caixa de PLA.

Navegação Inercial - Erro observado no eixo x						
Altura (cm)	Distância Percorrida (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 3 (cm)	Coleta 4 (cm)	Coleta 5 (cm)
2,8	6	0,76	0,543	0,832	0,723	1,825
	8	-0,104	0,538	-0,627	-0,435	2,14
	10	0,437	4,838	2,826	-1,334	-0,925
4,8	6	-2,528	-7,084	-0,842	-1,001	-1,686
	8	-3,453	-2,101	-8,097	-1,606	-0,992
	10	-0,646	-3,533	-2,641	-2,045	-1,361
6,3	6	-1,544	-1,009	-1,456	-0,517	-2,711
	8	-2,776	-0,549	-4,381	-3,774	-1,837
	10	-8,754	-6,56	-4,103	-1,198	-3,879
7,8	6	0,307	-0,913	-0,085	-1,082	-0,215
	8	-1,775	0,424	-0,176	-1,273	-2,884

	10	-1,027	-1,336	-0,858	-2,068	-0,693
--	----	--------	--------	--------	--------	--------

Tabela 4 - Erro da navegação inercial em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo y. Coletado utilizando caixa de PLA.

Navegação Inercial - Erro observado no eixo y						
Altura (cm)	Distância Percorrida (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 3 (cm)	Coleta 4 (cm)	Coleta 5 (cm)
2,8	6	-1,188	-0,49	1,675	4,602	0,721
	8	1,775	2,769	0,108	-0,988	4,396
	10	-4,566	0,33	1,785	-1,387	2,337
4,8	6	0,613	20,875	4,861	1,527	3,131
	8	4,3	1,697	16,426	3,837	2,14
	10	6,148	-3,355	5,245	6,143	16,532
6,3	6	14,711	-2,041	7,848	-2,324	10,467
	8	9,028	19,921	2,885	5,286	1,498
	10	4,27	11,452	5,695	5,11	-5,531
7,8	6	3,45	3,626	3,024	10,531	1,727
	8	-2,18	1,549	-0,776	0,365	4,226
	10	1,892	1,487	5,709	12,468	2,582

Pode-se observar que o erro apresenta uma variância muito grande para o IMU, variando entre -8,907 cm e 4,838 cm no eixo x e -4,566 cm e 20,875 cm no eixo y. Essa variação grande se dá graças ao *drift*, que ocorre ao realizar a dupla integração da aceleração em relação ao tempo. É visível que o *drift* afeta principalmente o eixo y, que nas coletas realizadas, não deveria ter valores de aceleração muito grandes além de um ruído ao redor de zero. Os valores de erro foram calculados no instante de tempo em que o movimento foi cessado para tentar reduzir o efeito do *drift* na análise de erro.

As figuras 30, 31 e 32 apresentam a aceleração, velocidade e posição em função do tempo para a coleta 3 com 2,8 cm de altura e um deslocamento de 8 cm.

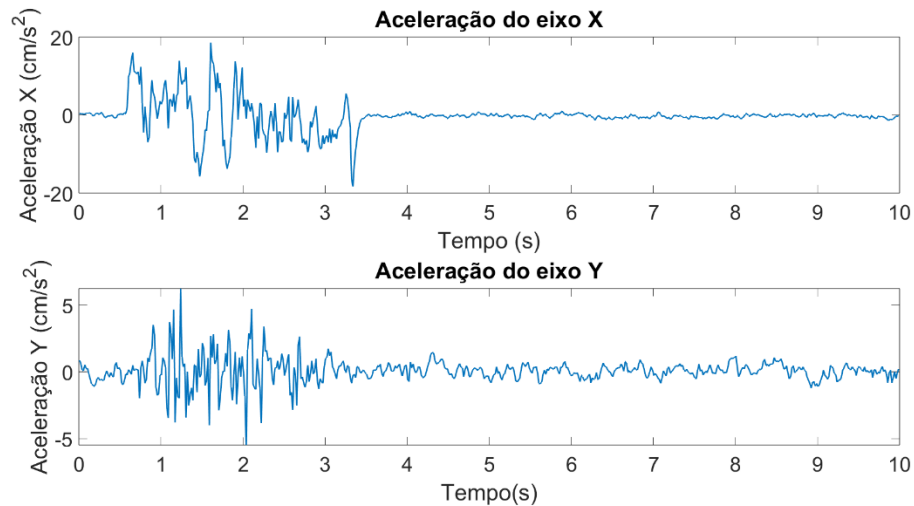


Figura 30 - Aceleração obtida através da navegação inercial nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.

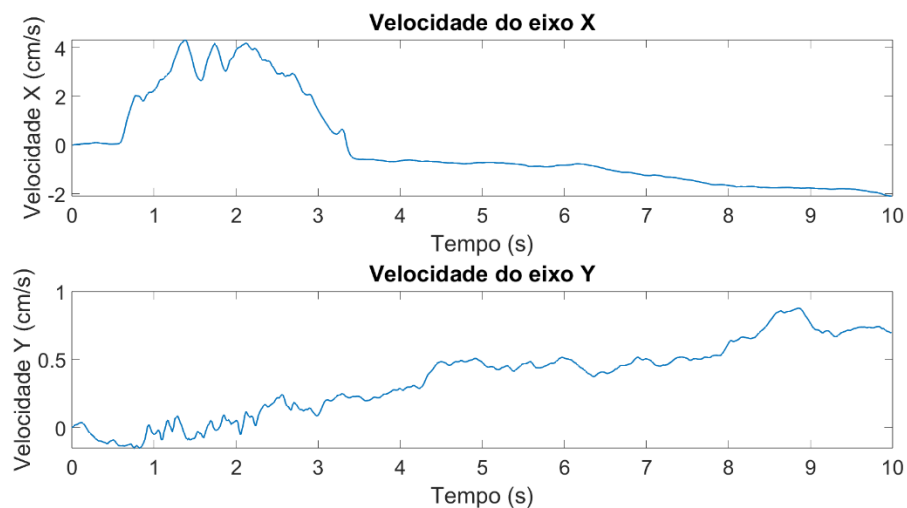


Figura 31 - Velocidade obtida através da navegação inercial nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.

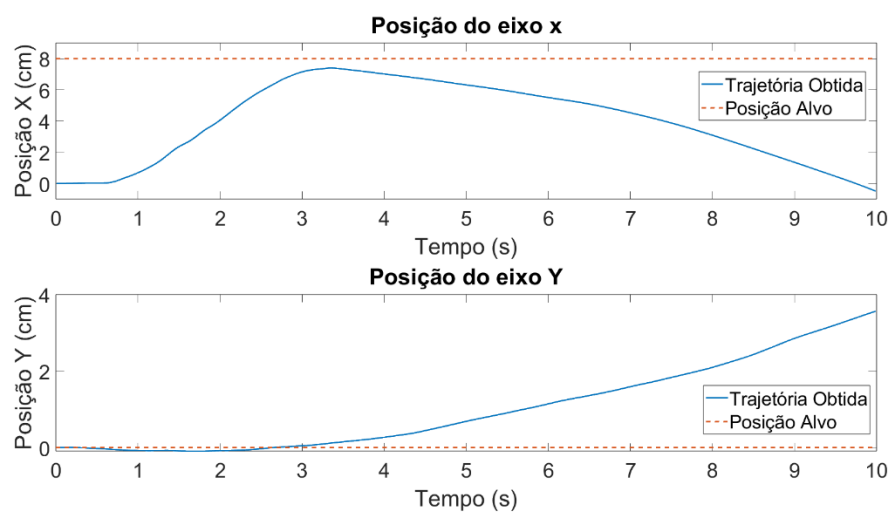


Figura 32 - Posição obtida através da navegação inercial nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.

Analisando os gráficos podemos verificar que durante o movimento o resultado obtido através do IMU é bem próximo do esperado, porém ao cessarmos o movimento, o *drift* afeta bastante o resultado. Nos gráficos apresentados, podemos observar que o movimento cessou em aproximadamente 3,5 segundos e a posição no eixo x alcançou um pouco menos que 8 cm. Após o fim do movimento, só é possível observar *drift*. A figura 33 apresenta a trajetória obtida através da navegação inercial. Nela pode-se observar o movimento próximo ao real e após ser alcançado aproximadamente 7,5 cm, um movimento que não foi realizado causado pelo *drift*.

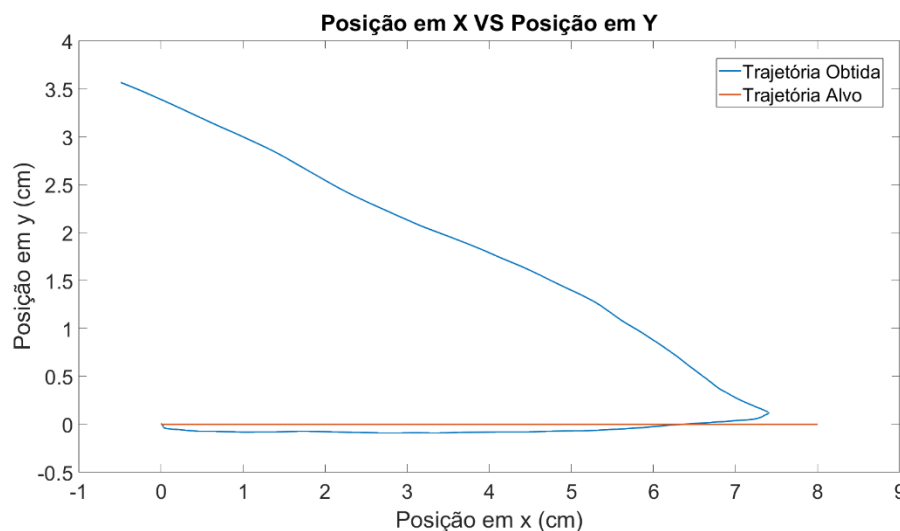


Figura 33 - Trajetória obtida através da navegação inercial de um deslocamento de 8 cm. Coletado com a caixa de PLA.

### 3.1.4 Resultados com odometria visual

Os mesmos ensaios realizados utilizando o IMU foram realizados utilizando a câmera. A tabela 5 e 6 apresentam o resultado do erro, em centímetros, obtidos para diferentes alturas e distâncias percorridas nos eixos x e y respectivamente utilizando a odometria visual.

Tabela 5 - Erro da odometria visual em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo x. Coletado utilizando caixa de PLA.

Odometria Visual - Erro observado no eixo x						
Altura (cm)	Distância (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 3 (cm)	Coleta 4 (cm)	Coleta 5 (cm)

2,8	6	-0,011	0,043	-0,035	-0,116	-0,019
	8	0,117	-0,02	0,026	-0,013	-0,038
	10	-0,065	-0,125	-0,069	-0,018	-0,076
4,8	6	-0,047	-0,135	-0,207	0,06	0,013
	8	0,018	-0,019	-0,058	-0,029	-0,015
	10	-0,108	-0,305	-0,212	-0,22	-0,255
6,3	6	0,163	0,352	0,034	0,186	0,274
	8	0,069	-0,056	0,066	-0,066	-0,008
	10	0,35	0,286	0,479	0,289	0,337
7,8	6	0,04	-0,089	0,009	0,048	-0,076
	8	-0,051	-0,062	-0,001	-0,027	0,096
	10	0,018	-0,022	0,015	-0,025	-0,135

Tabela 6 - Erro da odometria visual em diferentes ensaios variando altura e distância no eixo y. Coletado utilizando caixa de PLA.

Odometria Visual - Erro observado no eixo y						
Altura (cm)	Distância (cm)	Coleta 1 (cm)	Coleta 2 (cm)	Coleta 3 (cm)	Coleta 4 (cm)	Coleta 5 (cm)
2,8	6	0,121	0,021	0,047	0,094	0,115
	8	0,012	0,113	0,118	0,079	0,068
	10	0,226	0,248	0,093	0,049	0,168
4,8	6	0,113	0,154	0,134	0,138	0,117
	8	0,18	0,185	0,174	0,156	0,137
	10	0,11	0,101	0,146	0,127	0,152
6,3	6	0,105	0,174	0,137	0,163	0,165
	8	0,226	0,195	0,176	0,22	0,246
	10	0,397	0,288	0,365	0,329	0,312
7,8	6	0,064	0,075	0,11	0,073	0,113
	8	0,156	0,132	0,125	0,117	0,124
	10	0,211	0,222	0,214	0,209	0,197

Diferente dos resultados obtidos através da navegação inercial, os resultados da odometria visual apresentam um erro e uma variância menor, variando entre - 0,305 cm e 0,479 cm no eixo x e 0,012 cm e 0,397 cm no eixo y. As figuras 34 e 35

apresentam a posição em função do tempo e a trajetória percorrida no ensaio 3 de 8 cm com 2,8 cm de altura.

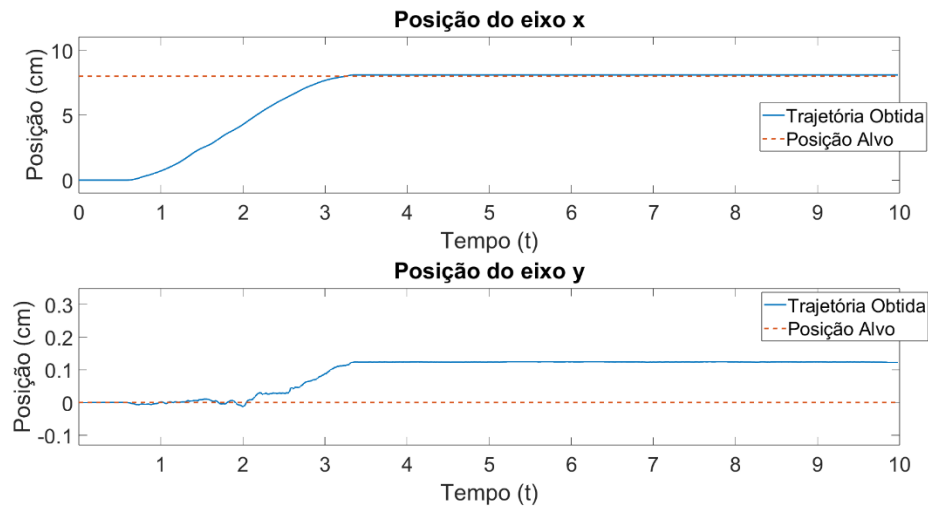


Figura 34 - Posição obtida através da odometria visual nos eixos x e y em função do tempo de um ensaio de deslocamento de 8 cm. Coletado com caixa de PLA.

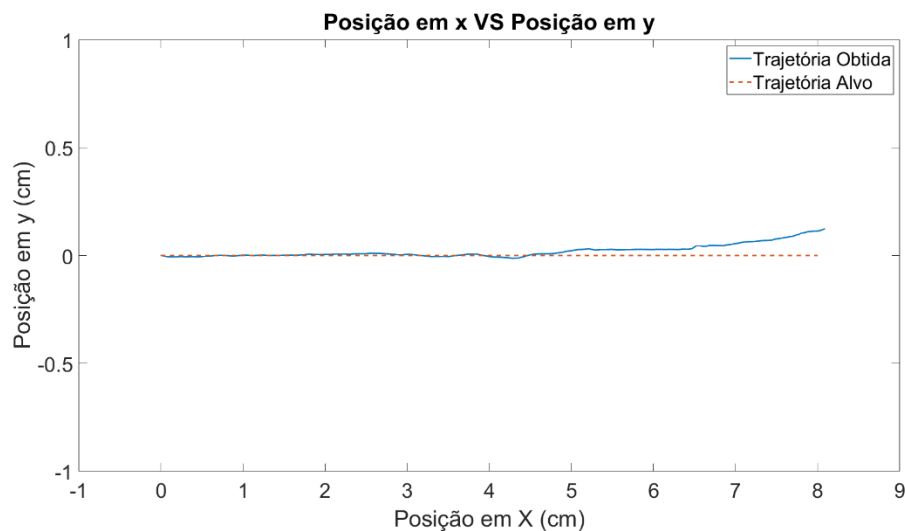


Figura 35 - Trajetória obtida através da odometria visual de um deslocamento de 8 cm. Coletado com a caixa de PLA.

Pode-se observar que existe um pequeno deslocamento no eixo y que não supera 2 milímetros, estando dentro de um nível satisfatório de erro. Outro ponto de observação é que, diferente da navegação inercial, a odometria visual apresenta uma ótima resposta ao interromper o movimento. Verifica-se que no eixo x, ao interromper o movimento, as variações de deslocamento não são significativas o suficiente para serem visíveis no gráfico.

### 3.1.5

#### Comparação entre navegação inercial e odometria visual

A dupla integração apresenta resultados melhores quando o sistema é submetido a acelerações mais altas. Por outro lado, com o aumento da aceleração, os frames sequenciais aquisitados pela câmera tendem a ficar “borrados”, impedindo o algoritmo da odometria visual de detectar corretamente os pontos necessários para o seu funcionamento. Sendo assim, existe uma restrição que impede os dois sensores avaliados de serem usados simultaneamente na sua condição ótima, já que um exige movimentos lentos (odometria visual) e o outros movimentos mais acelerados (navegação inercial).

É possível aumentar a taxa de quadros por segundo da câmera para reduzir o efeito “borrado” entre quadros sucessivos, porém a câmera utilizada alcança no máximo 90 fps, o que não é o suficiente para alcançar as acelerações de movimentos mais rápidos. Além disso, o sistema utilizado para a coleta de dados não consegue realizar simultaneamente a captura de vídeo e do IMU com taxas de amostragem altas para ambos os casos. Neste intuito, o ideal seria separar os processos em núcleos diferentes do processador ou utilizar controladores diferentes para cada sensor.

A tabela 7 apresenta dados obtidos a partir da análise de 26 coletas diferentes de um deslocamento ao longo do eixo x de aproximadamente 8 cm usando a caixa de PLA e a barra de alumínio com uma distância de 2,8 cm entre a câmera e o plano de medição.

Tabela 7 - Comparação de erro entre navegação inercial e odometria visual para ensaios de um deslocamento de 8 cm.

	Navegação Inercial eixo X	Navegação Inercial eixo Y	Odometria Visual eixo X	Odometria Visual eixo Y
Erro Absoluto Máximo (cm)	12,81	62,24	0,388	0,432
Erro Médio (cm)	-1,09	16,01	-0,184	0,266
Erro Absoluto Mínimo (cm)	0,104	0,108	0,013	0,012
Variância (cm <sup>2</sup> )	10,33	466,86	0,015	0,012
Desvio Padrão (cm)	3,21	21,61	0,121	0,107



Os resultados apresentados na tabela 7 indicam que os dados obtidos da dupla integração possuem uma variabilidade muito maior se comparados com os dados obtidos da odometria visual. Além disso, o erro proveniente da odometria é muito menor que o advindo da navegação inercial. O apêndice A apresenta os erros obtidos em cada um dos 26 ensaios utilizados para a geração da tabela 7.

As figuras 36 e 37 apresentam a posição no eixo x e y em função do tempo e a trajetória para a odometria visual e para a navegação inercial, para um movimento retilíneo com 10 cm ao longo do eixo x. Pode-se observar o efeito do *drift* nas linhas laranjas, também é possível verificar que o *drift* ocorre principalmente enquanto o dispositivo está em repouso. Nota-se ainda que o *drift* é muito mais significativo nos dados obtidos por meio da navegação inercial.

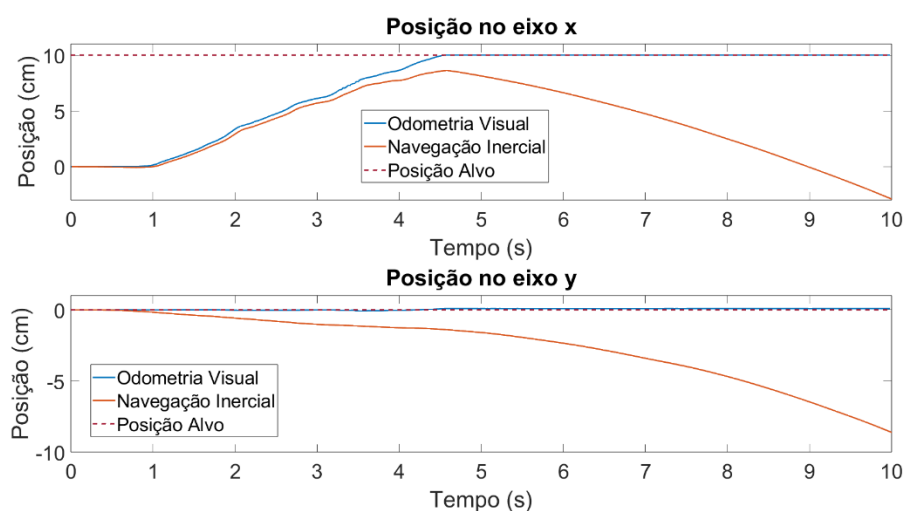


Figura 36 - Posição ao longo do eixo x e y em função do tempo para um deslocamento de 10 cm com altura de 2,8 cm. Coletado com caixa de PLA.

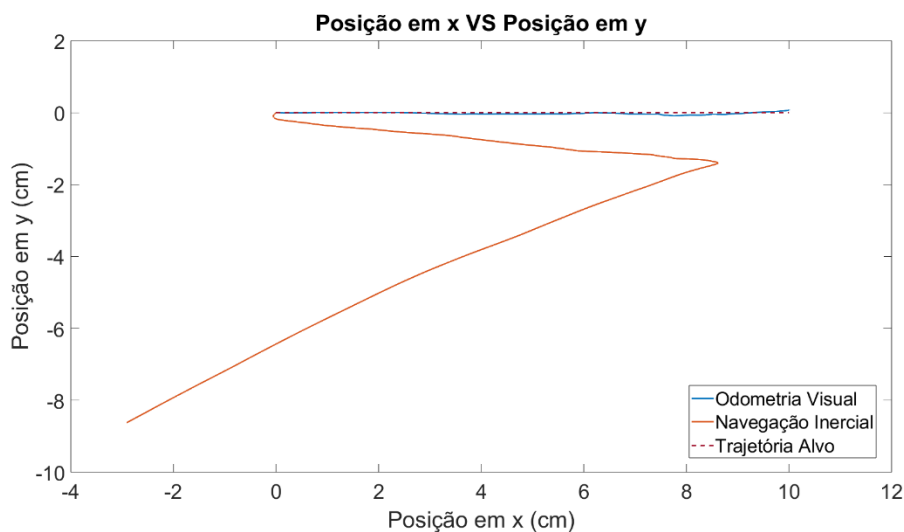


Figura 37 - Trajetória de 10 cm com altura de 2,8 cm utilizando a caixa de PLA. Coletado com caixa de PLA.

Considerando que o objetivo final do dispositivo é a detecção de objetos ferromagnéticos, por meio de mapeamento magnético, priorizou-se o movimento mais lento, em torno de 2,7 cm/s, que possibilita o melhor funcionamento da câmera, já que os pontos analisados estarão mais próximos entre si, aumentando assim a resolução espacial do mapa magnético que será gerado em conjunto com as medições provenientes do GMR. A figura 38 apresenta o gráfico de velocidade no eixo x, obtida pela derivação da curva de posição de um ensaio de odometria visual.

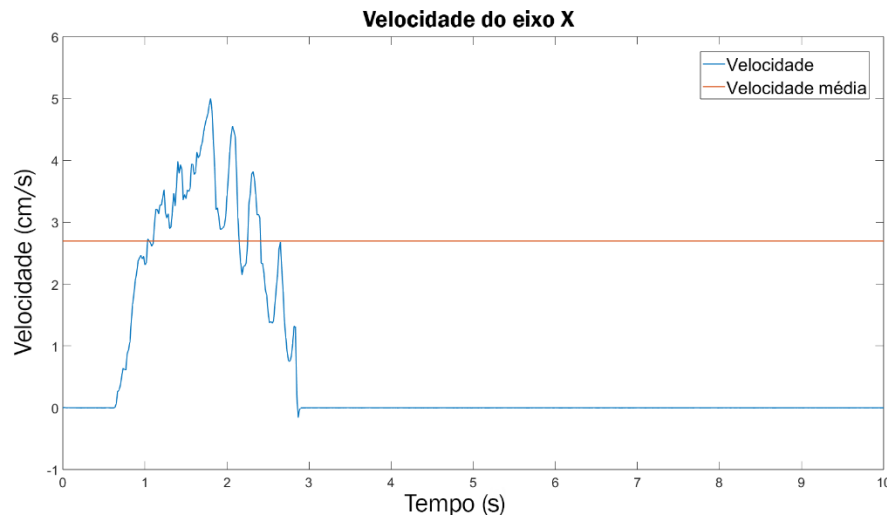


Figura 38 - Gráfico de velocidade no eixo x da odometria visual para um deslocamento de 10 cm com altura de 2,8 cm.

O IMU, por fornecer a informação durante o processo de coleta, pode ser usado em combinação com a câmera para a detecção de movimentos rápidos demais que impeçam a operação adequada da odometria, alertando o usuário, durante a coleta, para reiniciar o processo. Caso o processamento das imagens coletadas pela câmera seja feito em tempo real, durante o processo de coleta, não seria necessário o IMU para a detecção de movimentos que afetariam a odometria.

### 3.1.6 Análise da variação de altura de medição

Como o objetivo do equipamento desenvolvido é ser portátil, deseja-se que não seja necessário o emprego de estruturas mecânicas para o mapeamento magnético. Ademais, pretende-se que as leituras sejam de baixa complexidade, podendo ser efetuadas mesmo por profissionais não especializados. Neste intuito, é necessário estudar o impacto de diferentes distâncias da câmera e do IMU ao plano

de medição, visto que esta pode variar durante o procedimento de varredura, para obtenção dos mapas magnéticos.

No caso do IMU, a distância ao plano de medição não irá afetar em nada os resultados, já que os dados são todos baseados nas forças aplicadas sobre o sistema de medição. Já para a câmera, ao se alterar a distância entre o plano de medição e a câmera, afeta-se tanto a conversão de pixels para metros quanto o foco. As figuras 39 e 40 exibem a diferença do tamanho em pixels da malha quadriculada de 1 mm utilizada na calibração para diferentes alturas. Pode-se observar que, conforme esperado, quanto mais longe da câmera, menor será a quantidade de pixels.

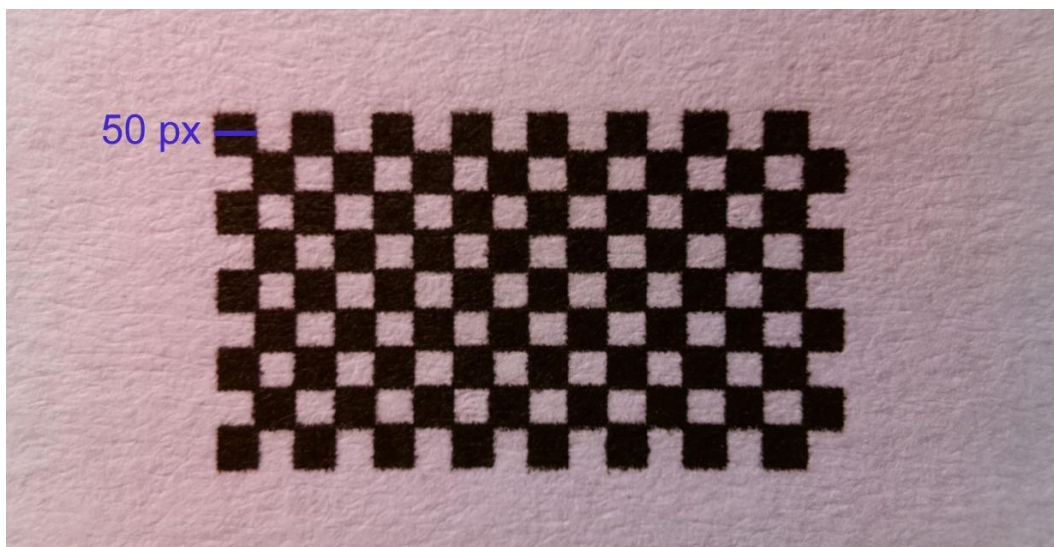


Figura 39 - Foto de calibração com 2,8 cm de altura.

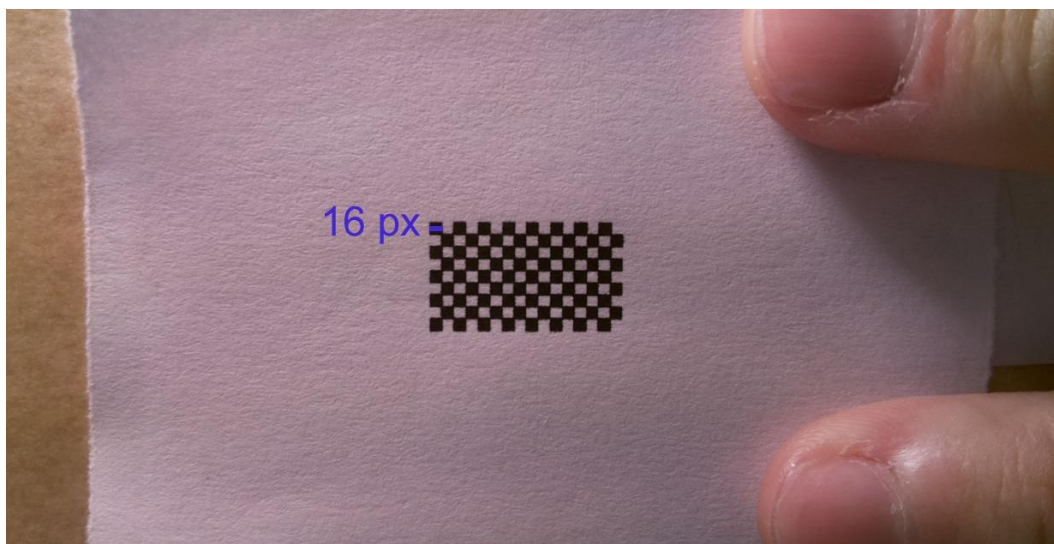


Figura 40 - Foto de calibração com 7,8 cm de altura.

Foi feita uma análise aumentando a altura do trilho, consequentemente aumentando a distância da câmera ao plano de medição. Para isso foram utilizados

calços de 2 cm, 3,5 cm e 5 cm, aumentando a distância de medição de 2,8 cm para 4,8 cm, 6,3 cm e 7,8 cm, respectivamente. A tabela 8 apresenta uma análise do erro para 5 coletas diferentes de uma trajetória linear de 6 cm em diferentes alturas. A tabela 8 foi montada com os resultados de erro obtidos nas tabelas 3, 4, 5 e 6.

Tabela 8 - Comparação de erro entre navegação inercial e odometria visual, para diferentes alturas em uma trajetória linear de 6 cm ao longo do eixo x.

Altura (cm)		Navegação Inercial eixo X	Navegação Inercial eixo Y	Odometria Visual eixo X	Odometria Visual eixo Y
2,8	Erro Médio (cm)	0,94	1,06	-0,03	0,08
	Desvio Padrão (cm)	0,49	2,26	0,06	0,04
4,8	Erro Médio (cm)	-2,63	6,20	-0,06	0,13
	Desvio Padrão (cm)	4,09	8,36	0,11	0,02
6,3	Erro Médio (cm)	-1,45	5,73	0,20	0,15
	Desvio Padrão (cm)	1,04	7,63	0,12	0,03
7,8	Erro Médio (cm)	-0,40	4,47	-0,01	0,09
	Desvio Padrão (cm)	0,55	3,47	0,06	0,02

Observa-se, na tabela 8, que, para a faixa de alturas avaliada, não ocorrem diferenças expressivas na qualidade de medição em relação ao caso base, onde a altura era mantida em 2,8 cm. Todavia, o desempenho da odometria mostra-se superior ao da navegação inercial. Conhecendo-se a altura do equipamento em relação ao plano de medição, é possível recalcular o fator de conversão de pixels para metros e obter resultados corretos, mesmo que ocorram alterações da altura durante o processo de medição.

Plotando a distância ao plano versus o fator de conversão de pixel para metro, observa-se que o comportamento da curva é linear. À medida que a distância

aumenta, o fator de conversão também tende a aumentar. Dessa forma, é recomendável o emprego de um sensor que meça o afastamento da câmera ao plano de medição a cada instante de tempo, a fim de se poder utilizar estes dados para ajuste do fator de conversão de pixels em metros. Esse processo possibilitará estimar de forma mais precisa o movimento, podendo corrigir pequenas variações na distância entre a câmera e o plano de medição durante a coleta. A tabela 9 possui os fatores de conversão associados a cada altura testada e a figura 41 exibe a relação linear entre esses pontos.

Tabela 9 - Fator de conversão de metros para pixel por altura.

Altura (cm)	Fator de conversão ( $10^{-5}$ m/px)
2,8	1,750
4,8	3,215
6,3	4,750
7,8	5,615

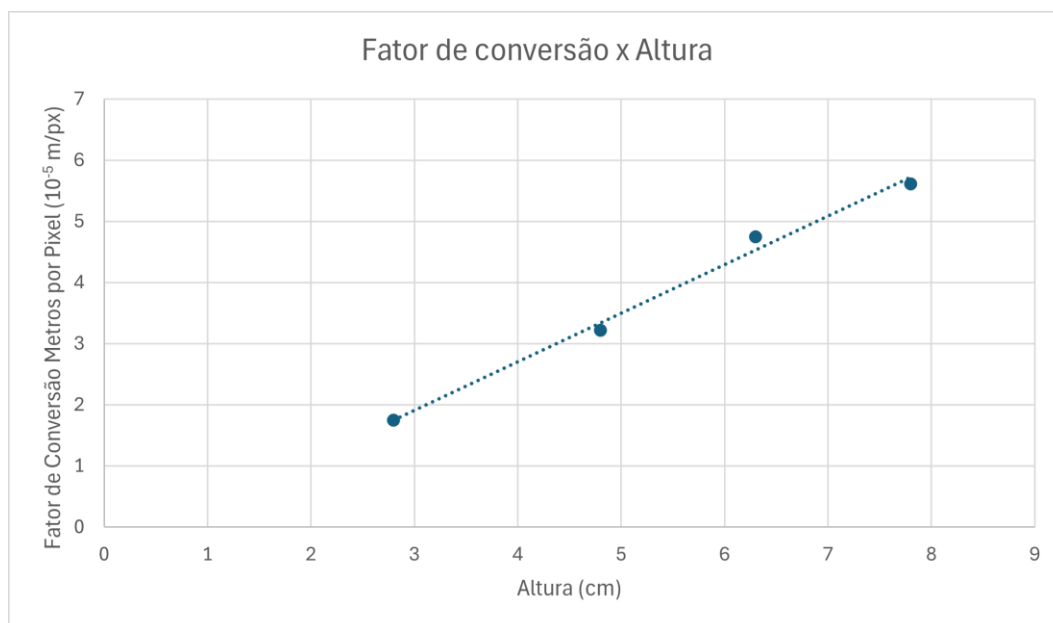


Figura 41 - Gráfico de dispersão entre altura e Fator de conversão de metros para pixels.

É importante ressaltar que para que a coleta dos dados advindos da câmera seja bem-sucedida, a imagem precisa estar em foco, ou seja, a variação de distância entre a câmera e o objeto não pode ser tão grande a ponto de causar a perda do foco.

Para isso, é importante que a distância mínima entre o plano e a câmera não perca o foco, para uma determinada faixa de variação.

A câmera utilizada para as medições apresenta ajuste de foco manual, sendo seu ajuste feito diretamente na câmera, sem a ação de uma lógica para realizar o ajuste. É possível que uma câmera com foco automático reduza os erros pela perda de foco, em contrapartida o tempo de ajuste automático do foco pode causar outros erros que não foram previstos. A tabela 10 apresenta os diferentes valores da distância focal, para as diferentes alturas analisadas. Para as alturas de 4,8 cm e 6,3 cm, a distância focal utilizada foi a mesma, já que ainda era possível observar adequadamente os detalhes do papel com o mesmo ajuste de foco.

Tabela 10 - Distância focal nos eixos x e y para as diferentes alturas de coleta.

Altura (cm)	Distância Focal x (mm)	Distância focal y (mm)
2,8	146	145
4,8	1310	1313
6,3	1310	1313
7,8	1469	1467

### 3.2 Ensaio bidimensionais

As coletas anteriores foram realizadas utilizando uma calha reta de forma a garantir um movimento unidimensional. Tanto para a odometria visual quanto para a navegação inercial é possível estimar a rotação do dispositivo, estimando a trajetória nas coordenadas da origem do movimento, mesmo que haja rotação.

O algoritmo de odometria visual encontra pontos semelhantes em dois frames sequenciais e calcula a média de deslocamento e o ângulo médio de rotação entre esses pontos [14,15]. Dessa forma, é gerada uma matriz em que, ao se multiplicar o vetor de posição atual, obtém-se as coordenadas da trajetória no próximo instante de tempo. A equação (1) apresenta a matriz e os vetores utilizados para estimar a posição nos eixos x e y a cada instante de tempo, com base no instante de tempo anterior. Essa matriz é composta por uma matriz de rotação, onde estão os termos seno e cosseno, obtido pela média do ângulo de rotação entre todos os pontos

observados, e um vetor de translação, onde estão os termos  $t_x$  e  $t_y$ , obtido pelo deslocamento médio entre os pontos.

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & t_x \\ -\sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

A equação (2) apresenta o caso unidimensional, quando o ângulo encontrado entre os pontos é aproximadamente zero, os termos de cosseno e seno viram 1 e 0, respectivamente, dessa forma, o movimento é composto somente pelo acúmulo da translação.

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

Para a navegação inercial, utilizando o giroscópio, pode-se estimar a orientação do dispositivo a cada instante de tempo. Dessa forma, cria-se uma matriz de rotação e multiplica-se o vetor de aceleração pela matriz de rotação, obtendo a aceleração corrigida para o referencial da origem do deslocamento [19]. A equação (3) apresenta a matriz de rotação e o cálculo para corrigir a aceleração para o eixo da origem. Nesse caso,  $\theta$  seria o ângulo formado entre o eixo da origem e o eixo no instante atual da coleta da informação. Podemos observar que caso não haja variação em  $\theta$ , a matriz se tornará a matriz identidade.

$$\begin{bmatrix} a_{x\_Corrigido} \\ a_{y\_Corrigido} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}; \quad (3)$$

### 3.2.1

#### **Análise das medições com a configuração de calhas impressas**

De forma a validar o movimento circular, deslocou-se o dispositivo por um quarto de uma calha circular, porém foi coletado somente os dados da câmera, uma vez que as velocidades mais baixas necessárias para a odometria visual impediam a coleta adequada dos dados do IMU, fazendo com que os valores medidos fossem da ordem do ruído. As figuras 42 e 43 apresentam uma coleta de um quarto da caixa quadrada.

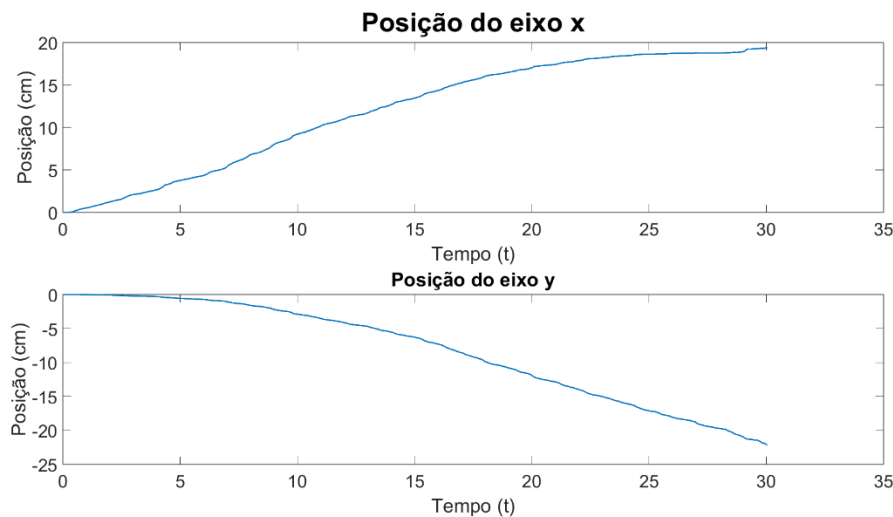


Figura 42 - Posição ao longo do eixo x e y em função do tempo obtida através da odometria visual. Coletado com caixa de PLA e com a calha quadrada.

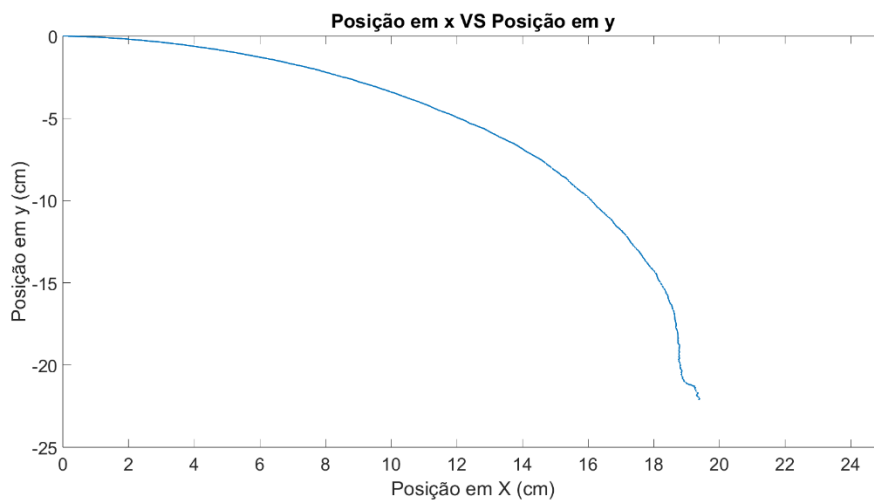


Figura 43 - Trajetória de um quarto da calha quadrada utilizando a caixa de PLA obtida através da odometria visual.

Inicialmente, a intenção era deslocar o dispositivo por todo o perímetro da circunferência, porém, por pequenas falhas na impressão 3D, em alguns pontos da calha era necessária uma força maior do que em outros, fazendo com que algumas sequências de frames resultassem em menos pontos de interesse em comum, o que aumenta o erro da odometria. Ao final da trajetória é possível reparar uma descontinuidade causada pela emenda feita entre duas peças da calha completa.

Um quarto da calha quadrada apresenta aproximadamente 16,31 cm no eixo x e y, porém a odometria se baseia na posição da câmera, então temos um adicional de aproximadamente 4 cm. A partir da análise dos gráficos, observa-se que o deslocamento em x foi de aproximadamente 20 cm e em y de aproximadamente 22 cm, próximo dos valores esperados para esse deslocamento.



O ensaio com mais graus de liberdade realizado é uma extrapolação do movimento que será realizado pelo operador, de forma a garantir que rotações no eixo de medição (eixo z) serão percebidos e considerados na odometria visual. Em uma análise real, o operador do dispositivo provavelmente não fará uma ou meia rotação para gerar o mapa magnético, rotações irão acontecer.

### 3.2.2 Análise à mão livre

Nas coletas anteriores foram utilizadas calhas como guia para auxiliar na análise do erro e reduzir os possíveis erros humanos existentes durante o processo de coleta. Porém, o dispositivo de detecção não fará uso de calhas para auxiliar a coleta, sendo necessário analisar o comportamento da odometria em um movimento feito à mão livre. As figuras 44 e 45 apresentam a posição ao longo do tempo e uma trajetória de uma coleta realizada à mão livre, onde foi desenhada como guia uma trajetória em zigue zague, dentro de uma região de 12 cm por 12 cm, que está representada em vermelho na figura 45. Para esse ensaio, buscou-se manter a linha desenhada centralizada na imagem da câmera.

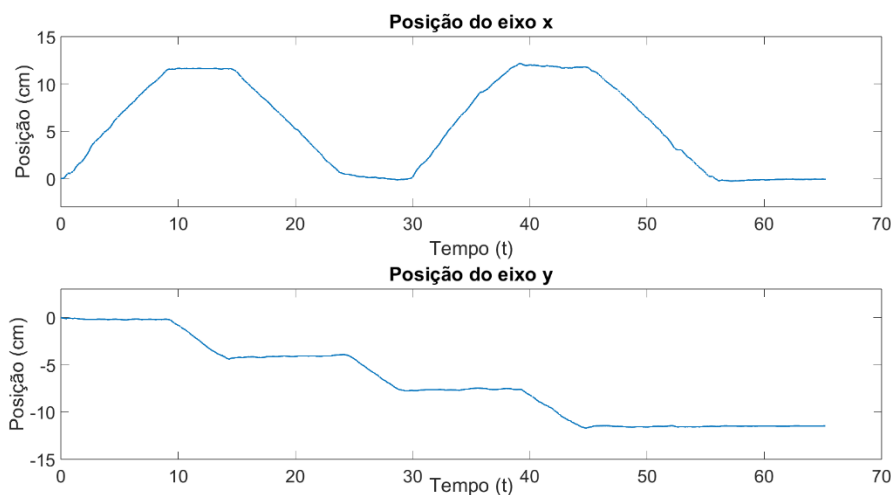


Figura 44 - Posição ao longo do eixo x e y em função do tempo obtida através da odometria visual. Coletado com caixa de PLA à mão livre.

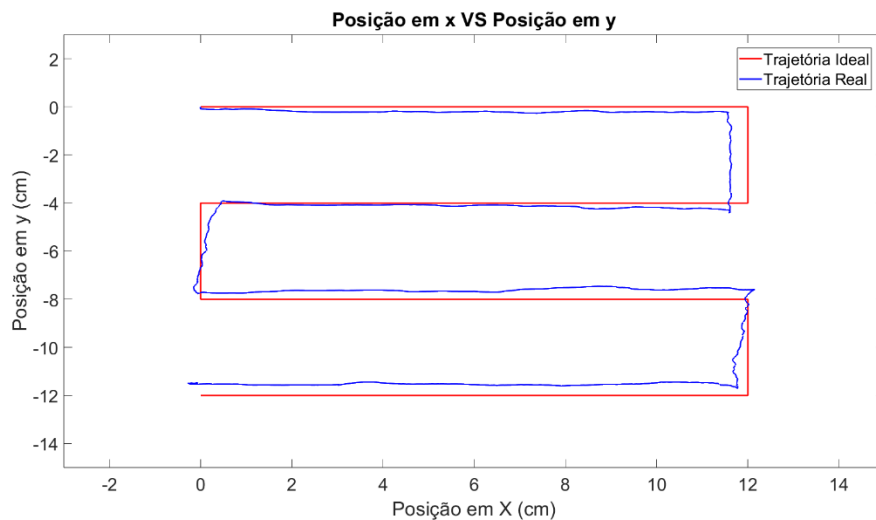


Figura 45 - Trajetória à mão livre utilizando a caixa de PLA. Obtida através da odometria visual.

Na figura 45, a linha vermelha representa a trajetória ideal e a azul a real, coletada pelo dispositivo. Ao comparar-se a trajetória real com a ideal, pode-se observar uma diferença nas trajetórias, especialmente na primeira descida, onde a distância entre a linha azul e vermelha é de aproximadamente 4 mm. A segunda e terceira descidas apresentam uma tentativa de manter a linha desenhada centralizada na câmera.

A coleta à mão livre apresenta um resultado bastante satisfatório, sendo a situação mais próxima do uso final do dispositivo. Apesar de não seguir exatamente a linha desenhada, a trajetória coletada possui uma forma próxima o suficiente da trajetória desejada, sendo relevante para o processo de mapeamento para detectar corpos estranhos. Ressalta-se ainda que, potencialmente, a fonte das diferenças observadas nesse ensaio é majoritariamente humana, causada por oscilações na altura da câmera e pela má centralização da linha.

### 3.3 Problemas encontrados durante os ensaios

Durante o processo de coleta e interpretação dos dados, encontraram-se alguns problemas que impossibilitaram a análise dos resultados.

O algoritmo da odometria visual necessita encontrar pelo menos dois pares de pontos correspondentes nos frames sequenciais que não sejam considerados como outliers. Caso não sejam localizados pelo menos três pares, a odometria é encerrada sem sucesso. Na maioria dos erros obtidos durante a execução do estudo, esse problema ocorre por foco mal ajustado e alta velocidade da coleta. A figura 46

abaixo apresenta a comparação de dois quadros consecutivos onde menos de dois pontos válidos foram obtidos. Os pontos mais à direita da imagem foram considerados outliers, portanto a quantidade de pontos válidos ficou abaixo de três.

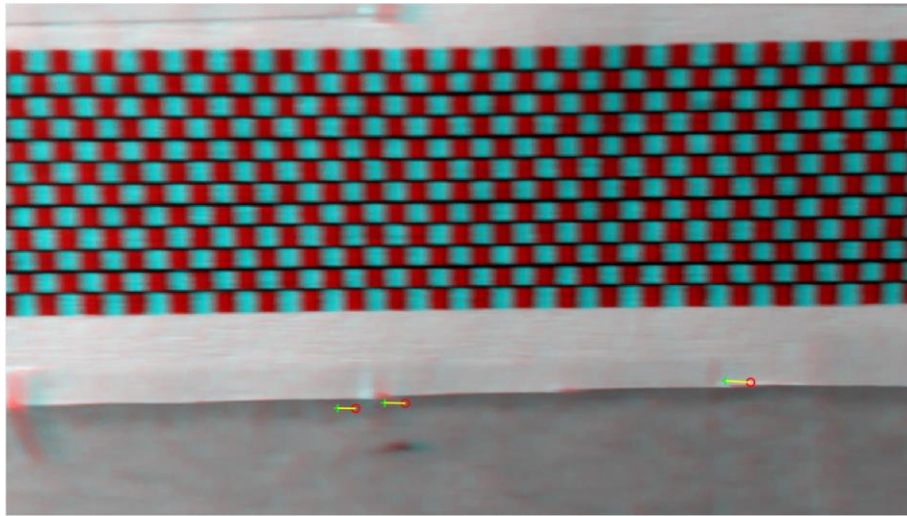


Figura 46 - Erro causado por falta de pontos de interesse válidos na coleta de um ensaio de 10 cm de deslocamento e 4,8 cm de altura. Coletado com caixa de PLA.

A odometria visual requer uma velocidade de coleta mais baixa para evitar que os quadros sequenciais fiquem muito borrados, porém a navegação inercial é favorecida quando a velocidade de coleta é mais alta, por implicar em valores de aceleração mais altos que levam a um menor impacto do ruído e consequentemente do *drift*. A figura 47 apresenta a velocidade no eixo x da mesma coleta apresentada na figura 46 obtida através da navegação inercial.

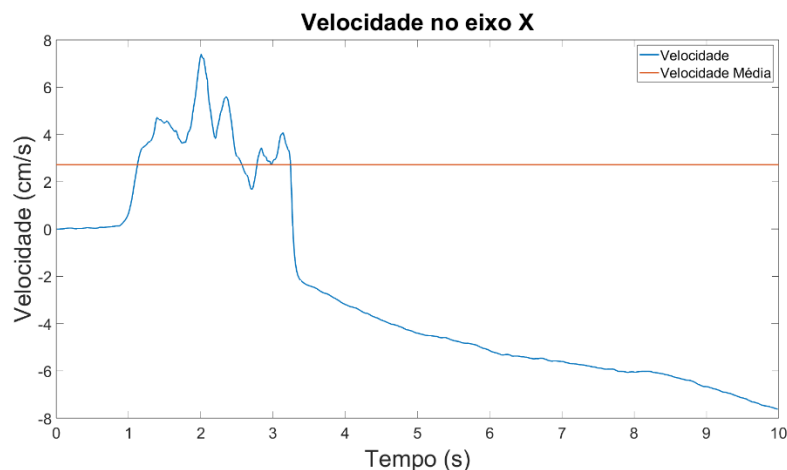


Figura 47 - Velocidade obtida através da navegação inercial para um deslocamento de 10 cm com altura de 4,8 cm. Coletado com caixa de PLA.

Pode-se observar que a velocidade média do movimento, entre o instante zero e 3.1 segundos, foi em torno de 2,75 cm/s, representada na figura 47 pela linha laranja, e a velocidade de pico quase alcançou 8 cm/s, representado pela linha azul.

A odometria visual com as configurações atuais de câmera necessita de uma velocidade de pico entre no máximo 5 e 6 cm/s, conforme verificado na figura 38. Mesmo a velocidade média sendo próxima a obtida nos casos de sucesso, a velocidade de pico causa o maior impacto na coleta de dados.

Uma forma de mitigar esse problema é desconsiderar o próximo *frame* do vídeo gerado pela câmera, inserindo o mesmo valor de deslocamento, e considerar o *frame* seguinte, repetindo esse processo por um determinado número de *frames*. A figura 48, apresenta a trajetória obtida após a implementação desse método. Pode-se observar que existe um pequeno deslocamento no sentido contrário do movimento, mas apesar disso, o resultado ainda se aproxima do valor desejado de 10 cm.

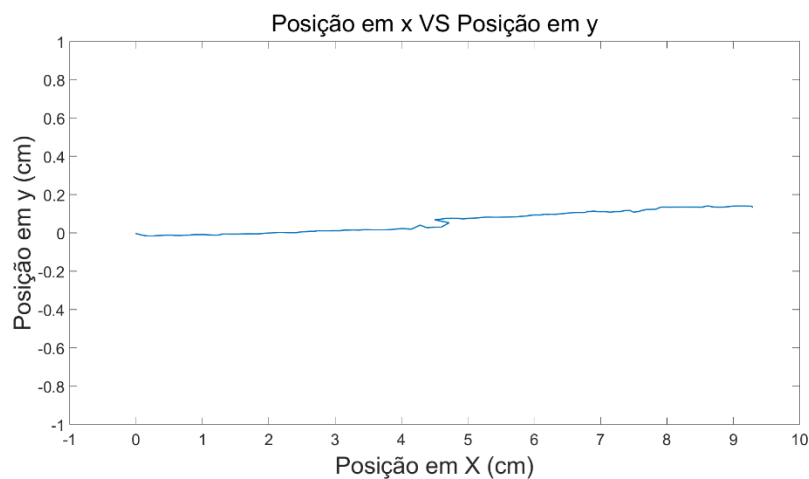


Figura 48 – Trajetória obtida através da navegação inercial para um deslocamento de 10 cm com altura de 4,8 cm. Coletado com caixa de PLA.

## 4

### Conclusões e trabalhos futuros

A partir dos estudos realizados é possível concluir que a odometria visual sozinha é capaz de representar com precisão o deslocamento do dispositivo no plano de medição. Embora necessite-se de uma velocidade mais baixa, até 5 cm/s, para a coleta adequada dos dados com a câmera, em relação ao IMU, a precisão dos resultados obtidos a partir da odometria é muito superior à daqueles obtidos a partir da dupla integração dos dados do IMU.

Para a aplicação desejada, a presença do *drift* impacta negativamente os resultados do IMU, causando erros que superam a ordem de grandeza das distâncias inerentes ao espaço de busca tipicamente considerado. A câmera não apresenta o problema de *drift* e responde adequadamente a paradas durante a coleta. Todavia, para a confecção do dispositivo de detecção de objetos ferromagnéticos, os dados do acelerômetro podem ser interessantes para indicar ao usuário movimentos abruptos que afetarão o processo da odometria visual.

Ressalta-se que os valores de posição deslocados pelo eixo x foram medidos manualmente, de modo que, para uma análise mais precisa, é necessário uma outra forma de coletar os dados, onde o deslocamento, a velocidade e aceleração sejam conhecidos previamente, idealmente com o movimento controlado por uma máquina CNC (Controle Numérico Computadorizado). Dessa forma, seria possível computar com melhor exatidão o erro proveniente de movimentos multidimensionais, descobrir a velocidade e aceleração máxima de operação do dispositivo e melhorar a replicabilidade dos ensaios.

Usando um equipamento capaz de controlar precisamente a velocidade e aceleração do dispositivo, seria possível gerar uma base de dados para o treinamento de uma rede neural, a fim de atenuar os erros de dupla integração vindos do IMU. Como o controle do equipamento é pré-programado com uma trajetória conhecida, em intervalos de tempo iguais e com velocidade e aceleração conhecidas, teríamos o necessário para formular uma base de dados com o alvo

ponto a ponto, referente a cada instante de tempo, e usando as informações coletadas pelo IMU como entradas da rede.

Para garantir o funcionamento adequado da odometria visual, é necessário que a câmera possua um foco que não se altere drasticamente com pequenas variações de altura, já que essas pequenas variações podem ser corrigidas ajustando a relação metros por pixel em função da altura. Além disso, o dispositivo final, precisa que a câmera, o magnetômetro GMR (Magnetorresistência Gigante) e o sensor de distância, para medição da distância do dispositivo à pele do paciente, estejam próximos o suficiente. Caso os sensores estejam distantes, o sensor de distância pode indicar uma altura incorreta para a correção do fator de conversão de metros para pixel, o que irá afetar negativamente a estimativa dos resultados.

A variação da distância entre o dispositivo e a pele do paciente pode introduzir um erro na conversão de pixels para metros, acarretando em um resultado incorreto na odometria visual. Uma forma de contornar esse problema seria introduzir no design do dispositivo pequenas colunas que garantissem a distância ideal entre o sensor e a pele. Dessa forma, a distância teria apenas pequenas variações, garantindo que a coleta de dados seja a mais fiel possível. O sensor de distância ainda seria importante para detectar as pequenas variações de altura que poderiam ser ajustadas pela relação linear apresentada na figura 41. Nesse caso, seria melhor o uso de um sensor de distância ótico, por apresentar uma melhor resolução em comparação às alternativas. Para garantir que não ocorram lesões na pele do paciente, as colunas devem possuir esferas em suas pontas ou serem arredondadas e sem arestas, para garantir o deslizamento sobre a pele, semelhante a uma caneta esferográfica. Dessa forma, a trajetória coletada seria mais completa, auxiliando na solução do problema inverso de localização de corpos estranhos ferromagnéticos.

A frequência de captura dos dados está em torno de 60 Hz ou 60 fps. Essa limitação foi imposta devido à câmera utilizada nos ensaios, que é capaz de gravar com resolução de 1280x720 pixels a 60 fps. Foram realizados testes reduzindo a qualidade da imagem e aumentando a taxa de quadros, porém não foi possível verificar variações expressivas nos resultados. Contudo, notou-se que o erro causado por um aumento muito grande da velocidade pode ser amenizado pelo aumento da taxa de quadros da câmera, já que os pontos nas imagens, utilizados pela odometria, estarão menos borrados em quadros sequenciais para uma maior taxa de quadros.

Todos os ensaios foram feitos em um protótipo utilizando a linguagem de programação *python* em um *Raspberry PI*, porém essa linguagem, como muitas outras, é procedural, ou seja, o código não é paralelizado. Com isso, existe uma diferença entre o tempo do início da gravação do vídeo e o início da coleta de dados do IMU. Nos ensaios, essa diferença não foi grande o bastante para impactar os resultados, porém, no desenvolvimento do dispositivo, é possível que essa diferença se torne grande e impacte negativamente os resultados obtidos pelo dispositivo. Seria interessante paralelizar a gravação do vídeo e a coleta dos dados dos sensores, para reduzir essa diferença de tempo do início das coletas. Essa paralelização pode ocorrer utilizando núcleos diferentes do processador ou utilizando um controlador para a gravação e outro para a coleta de dados, que tenham um controle síncrono que inicie as coletas no mesmo instante.

Ademais, a paralelização é essencial para o aumento da frequência de captura dos dados, visto que da forma atual o *Raspberry PI* não consegue, simultaneamente, gravar o vídeo utilizado para odometria visual e coletar os dados dos sensores em sua frequência de amostragem máxima, que seria em torno de 200 Hz.

A escolha de coletar os dados e depois realizar o processamento foi considerada após ensaios em que a odometria foi realizada durante o processo de coleta. Esses ensaios se mostraram muito custosos para o *Raspberry PI*, tendo uma baixa taxa de amostragem mesmo sem a coleta dos dados do IMU. Embora os resultados do processamento durante a coleta tenham se mostrado negativos neste momento, ressalta-se que a separação em diferentes controladores ou o emprego de um equipamento com mais poder de processamento podem trazer resultados positivos, que podem ser interessantes para indicar ao operador do dispositivo um retorno mais imediato da qualidade da estimativa de posição.

Os objetivos desse projeto foram alcançados, o erro do deslocamento foi reduzido consideravelmente, aumentando a precisão do equipamento e reduzindo possíveis erros por medições incorretas. Em estudos anteriores para o desenvolvimento do dispositivo de detecção de objetos ferromagnéticos dentro do corpo humano, a obtenção precisa da posição ao longo do tempo era um desafio para o funcionamento adequado do dispositivo portátil [9]. As figuras 4 e 5 apresentam os resultados de posicionamento obtidos no projeto [9] através da odometria visual, seus valores estão em pixels e não foram convertidos para o sistema métrico, mas pela forma é possível perceber que mesmo com a conversão,

as trajetórias obtidas estariam significativamente distantes da trajetória ideal, de modo que não representariam corretamente o caminho traçado pelo dispositivo portátil.

Realizando uma comparação com a figura 45, pode-se observar que o ensaio similar avaliado no presente trabalho indica que a trajetória seguiu corretamente o caminho esperado, com alguns erros humanos explicados anteriormente. Dessa forma, o objetivo do projeto foi alcançado, contribuindo para o adequado uso de odometria visual para a detecção da trajetória do dispositivo biomédico portátil.



## Referências bibliográficas

- [1] E. C. Monteiro, C. H. Barbosa, E. A. Lima, P. C. Ribeiro, e P. Boechat, **“Locating steel needles in the human body using a SQUID magnetometer”**, Phys. Med. Biol., vol. 45, no 8, p. 2389–2402, ago. 2000.
- [2] E. C. Monteiro et al., **“Magnetic Measurement Techniques for Locating Foreign Bodies in Humans”**, in Biomag 96, C. J. Aine, G. Stroink, C. C. Wood, Y. Okada, e S. J. Swithenby, Orgs. New York, NY: Springer New York, 2000, p. 28–31.
- [3] J. Clarke, Y.-H. Lee, e J. Schneiderman, **“Focus on SQUIDs in Biomagnetism”**, Supercond. Sci. Technol., vol. 31, no 8, p. 080201, ago. 2018.
- [4] E. C. Monteiro, R. Summers. **Metrological requirements for Biomedical Device Assessment and their Ethical Implications**. Measurement Sensors. In press 2022
- [5] E. C. Monteiro e L. F. Leon, **“Metrological Reliability of Medical Devices”**, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 588, p. 012032, fev. 2015.
- [6] L. G. S. Fortaleza, E. C. Monteiro, C. R. H. Barbosa, E. C. Silva, e L. A. P. Gusmão, **“Biomedical comparison of magnetometers for non-ferromagnetic metallic foreign body detection”**, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1044, p. 012013, jun. 2018.
- [7] C. Hall Barbosa, **“Localization of firearm projectiles in the human body using a superconducting quantum interference device magnetometer: A theoretical study”**, Review of Scientific Instruments, vol. 75, no 6, p. 2098–2106, jun. 2004.
- [8] F. Pompéia, L. A. P. Gusmão, C. R. H. Barbosa, E. C. Monteiro, L. A. P. Gonçalves, e F. L. A. Machado, **“Ring shaped magnetic field transducer based on the GMI effect”**, Meas. Sci. Technol., vol. 19, no 2, p. 025801, fev. 2008.
- [9] M. C. Costa, C. R. H. Barbosa, E. C. Monteiro, **“Proposta de Dispositivo Biomédico Multisensor Portátil para Localização de Corpos Estranhos Ferromagnéticos”**, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 69 páginas, out. 2021.
- [10] B. R. C. Oliveira, E. C. Monteiro, **“Sistema automatizado para**

**mapeamento de corpos estranhos ferromagnéticos utilizando magnetômetro GMI**", PUC-Rio, Rio de Janeiro, 129 páginas, jul. 2020.

[11] Raspberry Pi Foundation. **"Datasheet: Raspberry Pi Model 4 B"**. Eletronic Publication, mar. 2024

[12] Raspberry Pi Foundation. **"Raspberry Pi Camera Module Documentation"**, 2024. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>. Acesso em: 8 jan. 2024

[13] D. Jones. **"PiCamera Documentation"**, 2016. Disponível em: <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/index.html#>. Acesso em: 8 jan. 2024.

[14] Aqel, M.O.A., Marhaban, M.H., Saripan, M.I. *et al.* **"Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications"**. *SpringerPlus* **5**, 1897 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3573-7>.

[15] R. Szeliski, **"Computer Vision: Algorithms and Applications"**, Springer, c. 4, pp. 181-234, 2011.

[16] CALIB.IO. Camera Calibration Pattern Generator. Disponível em: <https://calib.io/pages/camera-calibration-pattern-generator>. Acesso em: 14 set. 2023.

[17] InvenSense. **"MPU-9250 Product Specification Revision 1.1"**, Eletronic Publication, jun. 2016

[18] N. Reddy. **"imusensor"**, 2022. Disponível em: <https://github.com/niru-5/imusensor>. Acesso em: 14 set. 2023.

[19] Woodman, O. J. **"An Introduction to Inertial Navigation"**. Cambridge: University of Cambridge, 2007. Disponível em: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>. Acesso em: 14 set. 2023.

## Apêndice A

### I.Coleta do erro de diferentes ensaios com trajetória linear de 8 cm.

A tabela 11 apresenta o erro de diferentes ensaios de uma trajetória linear de 8 cm. O erro apresentado é a diferença entre o valor obtido através da navegação inercial ou da odometria visual no instante em que o movimento é interrompido com o valor esperado do movimento. Os vinte e seis ensaios foram utilizados para computar o erro médio, a variância e o desvio padrão.

Tabela 11 - Erro de diferentes ensaios de 8cm.

Ensaio	Erro da Navegação Inercial eixo X (cm)	Erro da Navegação Inercial eixo Y (cm)	Erro da Odometria Visual eixo X (cm)	Erro da Odometria Visual eixo Y (cm)
1	-0,104	1,775	0,117	0,012
2	0,538	2,769	-0,02	0,113
3	-0,627	0,108	0,026	0,118
4	-0,435	-0,988	-0,013	0,079
5	2,14	4,396	-0,038	0,068
6	-1,225	1,773	-0,124	0,335
7	-0,811	4,356	-0,285	0,378
8	-0,876	0,59	-0,345	0,337
9	-0,29	4,632	-0,364	0,42
10	-0,516	3,795	-0,388	0,432
11	-3,838	10,587	-0,283	0,232
12	-12,814	24,27	-0,263	0,234
13	-5,274	48,935	-0,213	0,253
14	-2,449	23,587	-0,243	0,292
15	-4,799	57,879	-0,183	0,292
16	-1,995	9,444	-0,185	0,301

17	2,219	48,368	-0,214	0,27
18	1,473	6,853	-0,299	0,372
19	-3,644	26,796	-0,157	0,286
20	0,507	4,437	-0,167	0,321
21	-0,351	37,007	-0,209	0,278
22	1,492	62,24	-0,159	0,267
23	1,728	1,551	-0,163	0,338
24	3,504	11,257	-0,242	0,269
25	-0,401	45,043	-0,183	0,292
26	-1,4	-25,134	-0,185	0,335