

Mapeamento 3D de Cavernas com Drone em Ambiente Sem GPS: Fusão LiDAR-IMU para Reconstrução

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

por

Gabriel Holsback Dantas - gabriel.dantas@sempreceub.com - RA: 22310899
Rafael De Queiroz Lavoyer - rafael.lavoyer@sempreceub.com - RA: 22208760

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para mapeamento tridimensional de ambientes internos utilizando um drone operando sem sinal de GPS, com aplicação voltada para ambientes confinados, como cavernas. A proposta baseia-se na integração de sensores embarcados, especialmente uma Unidade de Medição Inercial (IMU) e sensores LiDAR, combinando dados de aceleração, atitude e distância para reconstrução espacial do ambiente em forma de nuvem de pontos.

Orientador: Hudson Capanema Zaidan
Turma: UN2026/07
Curso: Engenharia da Computação
Campus: Asa Norte
Turno: Noturno

Sumário

1	Dedicatória	5
2	Resumo	6
3	Abstract	7
4	Abreviaturas	8
5	Lista de Símbolos	9
6	Introdução	10
6.1	Considerações Preliminares	10
6.2	Objetivos	10
6.3	Contribuições	11
7	Conceitos	12
7.1	Microcontroladores	12
7.1.1	Definição	12
7.1.2	Módulos integrados	12
7.2	Drone	12
7.2.1	Arquitetura geral	12
7.2.2	Eixos de controle	12
7.3	Sensores embarcados	13
7.3.1	LiDAR	13
7.3.2	Unidade de Medição Inercial (IMU)	13
7.4	Referenciais e sistemas de coordenadas	13
7.4.1	Referencial do corpo	13
7.4.2	Referencial do mundo	13
7.5	Aceleração e posição inercial	13
7.5.1	Aceleração específica	13
7.5.2	Relação entre aceleração, velocidade e posição	13
7.6	Matrizes de rotação	14
7.6.1	Ângulos de Euler (roll, pitch e yaw)	14
7.6.2	Transformações de coordenadas	14
7.7	Integração numérica	14
7.7.1	Métodos de integração para sinais discretos	14
8	Metodologia	15
8.1	Visão geral da metodologia	15
8.2	Plataforma de desenvolvimento	15
8.2.1	Ambiente de testes	15
8.2.2	Drone terrestre como plataforma inicial	15
8.3	Coleta de dados	15
8.3.1	Configuração dos sensores	15
8.3.2	Ambiente controlado de coleta	15
8.4	Dados obtidos	15
8.4.1	Descrição das variáveis coletadas	15
8.5	Processamento dos dados	15

8.5.1	Transformação de coordenadas	15
8.5.2	Estimativa da posição inercial	15
8.6	Geração da nuvem de pontos	15
9	Conclusão	16
9.1	Dificuldades	16
9.2	Resultados obtidos	16
9.2.1	Interpretação dos resultados	16
9.3	Trabalhos futuros	16
9.3.1	Comunicação com o drone em cavernas	16
9.3.2	Navegação autônoma com os dados obtidos	16

1

Dedicatória

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Bibendum enim facilisis gravida neque convallis a. Senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas maecenas. Ac tortor vitae purus faucibus ornare suspendisse sed nisi lacus. Eu facilisis sed odio morbi quis. Pulvinar neque laoreet suspendisse interdum. Rhoncus est pellentesque elit ullamcorper. Lorem sed risus ultricies tristique nulla aliquet. Cras sed felis eget velit aliquet sagittis id. Lacus sed viverra tellus in hac habitasse. Orci eu lobortis elementum nibh. Vitae congue eu consequat ac felis donec et. Aenean vel elit scelerisque mauris pellentesque pulvinar pellentesque habitant morbi. Velit laoreet id donec ultrices tincidunt arcu non sodales. Ac auctor augue mauris augue neque. Sit amet consectetur adipiscing elit. Urna molestie at elementum eu facilisis sed odio morbi. Adipiscing commodo elit at imperdiet dui.

In eu mi bibendum neque egestas congue quisque egestas diam. Semper risus in hendrerit gravida rutrum. Venenatis a condimentum vitae sapien pellentesque habitant. Elementum nibh tellus molestie nunc non blandit massa. Dui vivamus arcu felis bibendum. Volutpat blandit aliquam etiam erat velit scelerisque. Sed blandit libero volutpat sed cras ornare. Dignissim sodales ut eu sem. Tristique risus nec feugiat in fermentum posuere urna nec tincidunt. Nec feugiat in fermentum posuere. Leo duis ut diam quam nulla. Tincidunt dui ut ornare lectus. Orci porta non pulvinar neque. Amet commodo nulla facilisi nullam vehicula ipsum a arcu cursus.

2

Resumo

O sistema utiliza princípios das equações do movimento newtoniano para estimar a posição do drone ao longo do tempo, realizando integrações sucessivas da aceleração após a correção das inclinações do veículo. Para isso, as acelerações medidas no referencial do corpo são convertidas para o referencial do mundo por meio de matrizes de rotação baseadas em roll, pitch e yaw, permitindo remover corretamente a influência da gravidade e obter o deslocamento real do equipamento.

A partir da estimativa de posição do drone, os pontos medidos pelo LiDAR passam por transformações entre referenciais — LiDAR e drone possibilitando a determinação da posição global de cada ponto capturado. Esse processo resulta na construção de uma nuvem de pontos capaz de representar o ambiente tridimensionalmente com maior precisão.

Além da modelagem matemática, o projeto contempla a definição da arquitetura de hardware embarcado, incluindo microcontrolador, sensores, módulos de armazenamento, sistema de alimentação e estrutura física, considerando critérios de peso, consumo energético e autonomia necessários para execução do mapeamento.

Como resultado esperado, o trabalho busca demonstrar a viabilidade de uma solução de baixo custo e independente de infraestrutura externa para mapeamento 3D, contribuindo para aplicações em exploração, inspeção e documentação de ambientes onde sistemas tradicionais de posicionamento não estão disponíveis.

Palavras-chave: Palavra-chave1, Palavra-chave2, Palavra-chave3

3

Abstract

SOBRENOME, A. B. C. **Título do trabalho em inglês.** 2020. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Centro Universitário de Brasília, 2020.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Tincidunt eget nullam non nisi. Eget velit aliquet sagittis id. Augue interdum velit euismod in pellentesque massa placerat duis. Senectus et netus et malesuada fames ac. Dolor sit amet consectetur adipiscing elit duis tristique. Morbi tristique senectus et netus et malesuada. Natoque penatibus et magnis dis parturient montes.

Keywords: Keyword1, Keyword2, Keyword3

4

Abreviaturas

CFT	Transformada contínua de Fourier (<i>Continuous Fourier Transform</i>)
DFT	Transformada discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
EIIP	Potencial de interação elétron-íon (<i>Electron-Ion Interaction Potentials</i>)
STFT	Tranformada de Fourier de tempo reduzido (<i>Short-Time Fourier Transform</i>)

5

Lista de Símbolos

ω	Frequência angular
ψ	Função de análise <i>wavelet</i>
Ψ	Transformada de Fourier de ψ

6

Introdução

Escrever bem é uma arte que exige muita técnica e dedicação. Há vários bons livros sobre como escrever uma boa dissertação ou tese. Um dos trabalhos pioneiros e mais conhecidos nesse sentido é o livro de Umberto Eco [4] intitulado *Como se faz uma tese*; é uma leitura bem interessante mas, como foi escrito em 1977 e é voltado para teses de graduação na Itália, não se aplica tanto a nós.

Para a escrita de textos em Ciência da Computação, o livro de Justin Zobel, *Writing for Computer Science* [15] é uma leitura obrigatória. O livro *Metodologia de Pesquisa para Ciência da Computação* de Raul Sidnei Wazlawick [14] também merece uma boa lida. Já para a área de Matemática, dois livros recomendados são o de Nicholas Higham, *Handbook of Writing for Mathematical Sciences* [6] e o do criador do T_EX, Donald Knuth, juntamente com Tracy Larrabee e Paul Roberts, *Mathematical Writing* [8].

O uso desnecessário de termos em língua estrangeira deve ser evitado. No entanto, quando isso for necessário, os termos devem aparecer *em itálico*.

Modos de citação:

indesejável: [AF83] introduziu o algoritmo ótimo.

indesejável: (Andrew e Foster, 1983) introduziram o algoritmo ótimo.

certo : Andrew e Foster introduziram o algoritmo ótimo [AF83].

certo : Andrew e Foster introduziram o algoritmo ótimo (Andrew e Foster, 1983).

certo : Andrew e Foster (1983) introduziram o algoritmo ótimo.

Uma prática recomendável na escrita de textos é descrever as legendas das figuras e tabelas em forma auto-contida: as legendas devem ser razoavelmente completas, de modo que o leitor possa entender a figura sem ler o texto onde a figura ou tabela é citada.

Apresentar os resultados de forma simples, clara e completa é uma tarefa que requer inspiração. Nesse sentido, o livro de Edward Tufte [12], *The Visual Display of Quantitative Information*, serve de ajuda na criação de figuras que permitam entender e interpretar dados/resultados de forma eficiente.

6.1 Considerações Preliminares

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Eu volutpat odio facilisis mauris sit. Semper auctor neque vitae tempus. Pellentesque massa placerat duis ultricies lacus sed. Aliquam etiam erat velit scelerisque in dictum non consectetur.

6.2 Objetivos

Congue nisi vitae suscipit tellus mauris a diam. Aliquet sagittis id consectetur purus. Nullam non nisi est sit amet. Vestibulum mattis ullamcorper velit sed ullamcorper morbi tincidunt ornare. Id diam vel quam elementum pulvinar. Bibendum neque egestas congue quisque egestas diam in arcu. In vitae turpis massa sed elementum tempus egestas sed. Cursus euismod quis viverra nibh cras pulvinar mattis nunc. Aliquet porttitor lacus luctus accumsan tortor. Enim lobortis scelerisque fermentum dui.

6.3 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são as seguintes:

- Item 1: Lacus vestibulum sed arcu non odio euismod lacinia. Nulla posuere sollicitudin aliquam ultrices sagittis. Aliquam ut porttitor leo a diam. Elit at imperdiet dui accumsan sit amet nulla facilisi morbi. Parturient montes nascetur ridiculus mus mauris vitae ultricies leo.
- Item 2: Nulla pellentesque dignissim enim sit amet venenatis urna cursus. Id eu nisl nunc mi ipsum faucibus. Quisque id diam vel quam elementum pulvinar etiam non. Quis lectus nulla at volutpat diam ut venenatis tellus in. Sed euismod nisi porta lorem mollis aliquam ut. Dui nunc mattis enim ut. Nulla pharetra diam sit amet nisl suscipit adipiscing.

Conceitos

7.1 Microcontroladores

7.1.1 Definição

Um microcontrolador é um sistema computacional completo integrado em um único circuito, tipicamente composto por unidade central de processamento (CPU), memórias de programa e dados, e periféricos de entrada/saída, sendo projetado para aplicações embarcadas com restrições de custo, energia e tempo real. Em contraste com microprocessadores de propósito geral, microcontroladores tendem a incorporar recursos de temporização, aquisição de sinais e comunicação serial no próprio chip, reduzindo a necessidade de componentes externos e simplificando o projeto de hardware e firmware. [13, 9]

7.1.2 Módulos integrados

A arquitetura típica de um microcontrolador inclui, além da CPU e das memórias (Flash/ROM para código e SRAM para variáveis), módulos de temporização e contagem (timers/counters), geradores de PWM para acionamento de atuadores, conversores analógico-digitais (ADC) para leitura de sensores analógicos, e interfaces de comunicação como UART, SPI e I²C para integração com sensores digitais e periféricos externos. Em cenários de sistemas ciberfísicos, esses módulos permitem amostragem periódica, timestamping, controle de atuadores e transmissão confiável de telemetria, formando a base para aquisição e processamento de sinais em tempo discreto. [13, 9]

7.2 Drone

7.2.1 Arquitetura geral

Um drone multirrotor pode ser modelado como um corpo rígido atuado por forças e torques gerados por múltiplos rotores, geralmente comandados por um controlador de voo que executa estimação de estados (atitude e, quando aplicável, posição/velocidade) e leis de controle em malha fechada. Em termos de arquitetura, é comum separar os subsistemas em: geração de empuxo (motores/ESC/hélices), sensoriamento (IMU, barômetro, GNSS e/ou sensores de distância), processamento embarcado (microcontrolador/MCU ou SoC) e alimentação (bateria e reguladores), com rotinas de controle em diferentes frequências (por exemplo, atitude em alta taxa e navegação em menor taxa). [1]

7.2.2 Eixos de controle

A dinâmica e o controle de multirrotores são frequentemente descritos por três eixos rotacionais do corpo (rolagem/roll, arfagem/pitch e guinada/yaw) e pelo eixo de empuxo total (thrust), que determina a aceleração do centro de massa. O controle de atitude busca estabilizar e rastrear referências de roll, pitch e yaw por meio de torques, enquanto o controle de altitude/velocidade vertical atua principalmente via empuxo total. Em uma formulação padrão, roll e pitch inclinam o vetor de empuxo, acoplando diretamente a atitude à aceleração translacional no referencial inercial. [1]

7.3 Sensores embarcados

7.3.1 LiDAR

Sensores LiDAR estimam distâncias a partir do princípio de tempo de voo (time-of-flight) de pulsos laser, retornando medições de alcance em função de ângulos de varredura, o que permite representar o ambiente como um conjunto de pontos em um plano (LiDAR 2D) ou em volume (LiDAR 3D). Em aplicações robóticas com varredura angular, o LiDAR fornece pares (ângulo, distância) com resolução angular definida pelo mecanismo de varredura e precisão dependente do alvo e do alcance, sendo amplamente utilizado em mapeamento e detecção de obstáculos. [7]

7.3.2 Unidade de Medição Inercial (IMU)

Uma IMU combina acelerômetros e giroscópios (e, em muitos casos, magnetômetro), medindo respectivamente aceleração específica e velocidade angular do corpo, o que viabiliza estimação de atitude e de variações de movimento em altas taxas de amostragem. Entretanto, a integração temporal de sinais inerciais está sujeita a deriva (drift) por vieses, ruído e erros de calibração, exigindo modelagem cuidadosa e, frequentemente, fusão sensorial para limitar o crescimento do erro. [11, 5]

7.4 Referenciais e sistemas de coordenadas

7.4.1 Referencial do corpo

O referencial do corpo (body frame) é rigidamente acoplado ao drone e se move com ele, sendo útil para expressar medições da IMU e forças/torques gerados pelos atuadores. Nesse referencial, grandezas como velocidade angular e aceleração específica são naturalmente medidas, e a orientação do corpo em relação ao mundo é descrita por uma rotação pertencente ao grupo $SO(3)$. [1, 3]

7.4.2 Referencial do mundo

O referencial do mundo (world/inertial frame) é tomado como fixo no ambiente, servindo para expressar posição, velocidade e aceleração do drone em relação ao cenário. A escolha do referencial inercial e suas convenções (por exemplo, eixos X, Y no plano horizontal e Z vertical) impacta diretamente a interpretação de sinais e a implementação de transformações entre corpo e mundo, especialmente quando se deseja mapear medições de distância para coordenadas globais. [10, 1]

7.5 Aceleração e posição inercial

7.5.1 Aceleração específica

Acelerômetros não medem diretamente a aceleração linear absoluta do corpo; eles medem a aceleração específica, isto é, a aceleração não gravitacional por unidade de massa, o que inclui o efeito da gravidade dependendo do estado de movimento e orientação do sensor. Assim, para recuperar aceleração translacional no referencial inercial, é necessário transformar a medição do corpo para o mundo e compensar a contribuição gravitacional de acordo com a convenção adotada, sob pena de introduzir erro sistemático que cresce rapidamente após integrações sucessivas. [11, 5]

7.5.2 Relação entre aceleração, velocidade e posição

Em cinemática contínua, a relação fundamental estabelece que a aceleração é a derivada temporal da velocidade e a velocidade é a derivada temporal da posição, de modo que a estimativa de velocidade e posição pode ser obtida por integrações sucessivas da aceleração. Em implementação discreta, essa operação implica aproximar integrais por somatórios numéricos, tornando a qualidade da estimativa altamente sensível a ruídos, vieses e ao método de integração escolhido, o que motiva o uso de técnicas numéricas adequadas e, quando possível, correções via medições externas. [5, 2]

7.6 Matrizes de rotação

7.6.1 Ângulos de Euler (roll, pitch e yaw)

Uma forma clássica de parametrizar a orientação de um corpo rígido é por ângulos de Euler (roll, pitch e yaw), que representam uma sequência de rotações elementares em eixos definidos. Embora sejam intuitivos, ângulos de Euler apresentam singularidades (gimbal lock) para certas configurações e dependem da ordem de composição (por exemplo, ZYX), aspectos que devem ser explicitados para garantir consistência na conversão entre representações e na implementação computacional. [3, 1]

7.6.2 Transformações de coordenadas

Transformações entre corpo e mundo são realizadas por matrizes de rotação $\mathbf{R} \in SO(3)$, que preservam normas e ângulos e permitem mapear vetores entre referenciais por multiplicação matricial. Em robótica e navegação, é comum expressar a transformação como $\mathbf{v}_W = \mathbf{R}_W^B \mathbf{v}_B$, onde a notação explicita o sentido da rotação, sendo essencial manter consistência notacional para evitar inversões indevidas e erros de sinal em etapas como compensação de gravidade e projeção de medições no espaço. [10, 3]

7.7 Integração numérica

7.7.1 Métodos de integração para sinais discretos

Para sinais amostrados, integrais são aproximadas por métodos numéricos como Euler explícito (primeira ordem) e regra do trapézio (segunda ordem), que assumem comportamento local do sinal entre amostras e produzem estimativas recursivas em tempo discreto. A regra do trapézio é frequentemente preferida para integração de dados experimentais por reduzir o erro de truncamento em relação ao Euler, embora ambos permaneçam sensíveis a ruído e vieses, o que reforça a necessidade de filtragem e modelagem de incertezas quando se integra aceleração para obter velocidade e posição. [2]

8

Metodologia

8.1 Visão geral da metodologia

8.2 Plataforma de desenvolvimento

8.2.1 Ambiente de testes

8.2.2 Drone terrestre como plataforma inicial

a primeira etapa será de teste em um ambiente controlado, utilizando um drone terrestre (Carro de controle remoto) equipado com os sensores necessários para a coleta de dados. Isso permitirá validar a eficácia dos sensores antes de realizar testes em um drone aéreo. Os sensores serão configurados para registrar dados de aceleração, posição inercial e outros parâmetros relevantes durante o movimento do drone.

8.3 Coleta de dados

8.3.1 Configuração dos sensores

8.3.2 Ambiente controlado de coleta

A coleta de dados será realizada em um ambiente controlado, como um laboratório ou uma área interna segura com medidas previamente obtidas e onde o drone poderá se mover livremente. Com os dados adquiridos, podemos comparar os resultados obtidos com os dados previamente medidos, permitindo avaliar a precisão e a confiabilidade dos sensores utilizados.

8.4 Dados obtidos

8.4.1 Descrição das variáveis coletadas

8.5 Processamento dos dados

8.5.1 Transformação de coordenadas

Sequência de transformações

LiDAR → Drone → Referencial global

8.5.2 Estimativa da posição inercial

8.6 Geração da nuvem de pontos

9

Conclusão

Fringilla urna porttitor rhoncus dolor. Iaculis urna id volutpat lacus laoreet. Nullam non nisi est sit amet facilisis magna etiam. Ultrices vitae auctor eu augue. Cursus vitae congue mauris rhoncus aenean vel. Donec ultrices tincidunt arcu non. Id diam vel quam elementum pulvinar etiam non quam. Faucibus a pellentesque sit amet porttitor eget dolor. Tellus at urna condimentum mattis pellentesque. Ut sem viverra aliquet eget sit amet tellus cras adipiscing.

9.1 Dificuldades

9.2 Resultados obtidos

9.2.1 Interpretação dos resultados

9.3 Trabalhos futuros

9.3.1 Comunicação com o drone em cavernas

9.3.2 Navegação autônoma com os dados obtidos

Bibliografia

- [1] Randal W. Beard and Timothy W. McLain. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press, 2012. ISBN: 9780691149219.
- [2] Richard L. Burden, J. Douglas Faires, and Annette M. Burden. *Numerical Analysis*. 10th ed. Brooks/Cole, Cengage Learning, 2016. ISBN: 9781305253667.
- [3] James Diebel. *Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors*. Tech. rep. Technical report. Stanford University, Oct. 2006.
- [4] Umberto Eco. *Como se Faz uma Tese*. 22^o. Tradução Gilson Cesar Cardoso de Souza. Perspectiva, 2009.
- [5] Paul D. Groves. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. Artech House, 2013. ISBN: 9781608070053.
- [6] Nicholas J. Higham. *Handbook of Writing for the Mathematical Sciences*. segunda. SIAM: Society for Industrial and Applied Mathematics, Aug. 1998.
- [7] Ltd. Hokuyo Automatic Co. *UTM-30LX Scanning Laser Rangefinder: Specification / Datasheet*. Ficha técnica do sensor LiDAR UTM-30LX (varredura 2D e especificações de alcance, resolução angular e taxa de varredura). 2010.
- [8] Donald E. Knuth, Tracy Larrabee, and Paul M. Roberts. *Mathematical Writing*. The Mathematical Association of America, Sept. 1996.
- [9] Muhammad Ali Mazidi, Rolin D. McKinlay, and Danny Causey. *PIC Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C for PIC18*. Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN: 9780131194045.
- [10] Bruno Siciliano et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer, 2009. ISBN: 9781846286414.
- [11] David H. Titterton and John L. Weston. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2004. ISBN: 9781563476938.
- [12] Edward Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. 2nd. Graphics Pr, May 2001.
- [13] Jonathan W. Valvano. *Embedded Systems: Introduction to Arm Cortex -M Microcontrollers*. 5th ed. Volume 1. 2019. ISBN: 9781477508992.
- [14] Raul S. Wazlawick. *Metodologia de Pesquisa em Ciencia da Computação*. Primeira. Campus, 2009.
- [15] Justin Zobel. *Writing for Computer Science: The art of effective communication*. Segunda. Springer, 2004.