

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Desenvolvimento de algoritmo de visão para  
VANTS sobre Linux Embarcado**

**Autor:**        Nicolás dos Santos Rosa

**Orientador:**   Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos

2015



**Nícolas dos Santos Rosa**

# **Desenvolvimento de algoritmo de visão para VANTS sobre Linux Embarcado**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica

**ORIENTADOR:** Prof. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos

2015

Página com a ficha catalográfica (em página par).

página com a folha de aprovação (página ímpar).



# Dedicatória

Texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, Texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, Texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, Texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória, texto dedicatória.

[Nome do Aluno].





## Agradecimentos

Texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimen-  
 tos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimen-  
 tos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimen-  
 tos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos. Texto agradecimen-  
 tos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimen-  
 tos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimen-  
 tos, texto agradecimentos, texto agradecimentos, texto agradecimentos.

[Nome do Aluno].



*"Epígrafe epígrafe epígrafe epígrafe  
Epígrafe epígrafe epígrafe epígrafe."*  
[Autor Epígrafe]



# Resumo

**Dica:** Texto em um parágrafo apenas - deve conter "tudo" resumidamente (introdução, método(s), resultados e conclusões), de tal forma que seja possível compreender a proposta e o que foi alcançado; Palavras-chave: Logo abaixo do Resumo/Abstract.

Rosa, Nicolás **Desenvolvimento de algoritmo de visão para VANTS sobre Linux Embarcado**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

Atualmente, veículos aéreos não tripulado(VANT) vem tornando-se um assunto recorrente no âmbito científico. Estes veículos, devido a sua mobilidade e inteligência artificial, vem sendo adaptados para a atuação em diferentes ambientes, desempenhando assim diversas atividades que vão desde aplicações militares, agronômicas, espaciais, cinematográficas, entre outras. Entretanto, essa atuação só não é mais ampla devido a problemas relacionados ao reconhecimento do ambiente ao seu redor e detecção de objetos e obstáculos. Neste trabalho, estuda-se a utilização de visão estereoscópica em sistemas embarcados para reconhecimento de obstáculos que ameacem a locomoção do veículo autônomo. Por fim, será desenvolvido um algoritmo utilizando visão computacional que estime as distâncias de objetos próximos ao veículo móvel.

Palavras-Chave: Visão estereoscópica, Detecção de Obstáculos, Sistemas Embarcados, Veículos Aéreos Não Tripulado - VANT, Visão Computacional.



# Abstract

Currently, unmanned aerial vehicles (UAV) is becoming a recurring theme in the scientific realm. These vehicles, because of their mobility and artificial intelligence, have been adapted to perform in different environments, thus performing various activities ranging from military applications, agronomic, spacial, cinematographic, among others. However, this performance is not wider due to problems related to the recognition of the surrounding environment and the detection objects and obstacles. In this paper, it will be studied the use of stereoscopic vision in embedded systems to recognize obstacles that threaten the mobility of the autonomous vehicle. Finally, an algorithm using computer vision to estimate the distances of objects near the mobile vehicle will be developed.

Keywords: Stereo Vision, Obstacle Detection, Embedded Systems, Unmanned aerial Vehicle - UAV, Computational Vision.





# Lista de Figuras

1.1	Logo do LaTeX. . . . .	26
3.1	Modelo Idealizado de um sistema de Visão Estéreo . . . . .	32



# **Lista de Tabelas**



# Siglas

MVC	<i>Model-View-Controller</i> - Modelo-Visão-Controlador
POO	Programação Orientada a Objetos
UI	<i>User Interface</i> - Interface do Usuário
UML	<i>Unified Modeling Language</i> - Linguagem de Modelagem Unificada



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>25</b>
1.1	Objetivos . . . . .	26
1.2	Justificativa . . . . .	27
1.3	Motivação . . . . .	27
1.4	Organização do trabalho . . . . .	27
<b>2</b>	<b>Especificação do Projeto</b>	<b>29</b>
2.1	Seção 1 . . . . .	29
2.2	Seção 2 . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Visão Estereoscópica - <i>Stereo Imaging</i></b>	<b>31</b>
3.1	Triangulação - <i>Triangulation</i> . . . . .	31
3.2	Geometria epipolar - <i>Epipolar Geometry</i> . . . . .	33
3.3	Calibração <i>Stereo Calibration</i> . . . . .	33
3.3.1	Parâmetros intrínsecos . . . . .	33
3.3.2	Parâmetros extrínsecos . . . . .	33
3.4	Retificação de Imagens - <i>Stereo Rectification</i> . . . . .	33
3.5	Correspondência Estéreo - <i>Stereo Correspondence</i> . . . . .	33
3.6	Mapa de disparidades - <i>Disparity Map</i> . . . . .	33
3.7	Projeção Tridimensional - <i>3D Reprojection</i> . . . . .	33
3.8	Reconhecimento de Objeto - <i>Object Recognition</i> . . . . .	33
3.8.1	Segmentação - <i>Image Segmentation</i> . . . . .	33
3.8.2	Identificação - <i>Object Identification</i> . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>35</b>
4.1	Materiais . . . . .	35

4.2 Métodos . . . . .	35
<b>5 Resultados</b>	<b>37</b>
<b>6 Conclusão</b>	<b>39</b>
<b>A Apêndice 1</b>	<b>43</b>
<b>B Apêndice 2</b>	<b>45</b>
<b>I Anexo 1</b>	<b>47</b>
<b>II Anexo 2</b>	<b>49</b>



# Capítulo 1

## Introdução

A pesquisa em VANTs – Veículos Aéreos não Tripulado vem se tornando um assunto recorrente no âmbito científico. A real motivação para seu desenvolvimento levanta diversas questões éticas e legais, visto que foram inicialmente motivados para fins militares. Por outro lado, esse tipo de plataforma também possui aplicações tais como: cultivo e pulverização de culturas, produção cinematográfica, operações de busca e salvamento, inspeção de linhas elétricas de alta tensão, entrega de mercadorias e encomendas.

A navegação de um micro veículo aéreo em espaço confinado é um desafio significativo. Atualmente, a navegação autônoma enfrenta o problema de localização e mapeamento simultâneo, mais conhecido como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [1]. SLAM apresenta quatro etapas: Mapeamento, Percepção, Localização e Modelagem. A complexidade deste problema encontra-se no fato de que o veículo necessita navegar em um espaço desconhecido, extrair características importantes do ambiente, construir um mapa com os dados obtidos e simultaneamente localizar-se dentro deste. O sensoriamento pode ser realizado tanto por Visão computacional ou por sensores ópticos.

A proposta deste Trabalho de conclusão de Curso é auxiliar o primeiro passo de Mapeamento de ambientes através de visão estereoscópica. Este trabalho, é motivado a tentativa de reproduzir-se o desafio proposto pela Autonomous Aerial Vehicle Competition (AAVC)[2], competição organizada pelo Laboratório de Pesquisas da Força Aérea Americana (AFRL) e sediada em Dayton-OH. Esta competição incentiva o estudo de veículos aéreos autônomos, convidando diversas universidades a compartilhar seus avanços nesta área de pesquisa. O competidor é motivado a adaptar um modelo de quadricóptero 3DRobotics©, assim este veículo precisa cumprir um certo percurso com caixas como obstáculos, detectar e reportar à estação base a posição de um objeto.

O processo de desenvolvimento do veículo consiste em quatro passos: estrutura, circuito, controle e navegação. Os dois primeiros itens compõem o hardware, o qual estabelece as conexões físicas necessárias para integrar os sistemas de alimentação, comunicação e controle. A parte de software engloba o desenvolvimento de algoritmos visando o controle e navegação, mais especificamente o desenvolvimento do código para Visão Estéreo (Stereo Vision) [3], planejamento de caminho (Path Planning) e arquitetura de máquina de estados (Decision Making).

Um sistema autônomo também implica o processamento de imagens ser embarcado, isto é, o processamento para a navegação do veículo ser realizada *On-line*. Deste modo, as plataformas de desenvolvimento BeagleBone Black e Nvidia Jetson TK1 serão analisadas e avaliadas com relação performance ao executar o algoritmo desenvolvido [4].

---

Referência [5].

Outra referência para a bibliografia [6].

Referência para a figura 3.1.



Figura 1.1: Logo do LaTeX.

## 1.1 Objetivos

**Dica:** Apresente "somente" os objetivos - podem ser gerais e/ou específicos

1. Desenvolvimento de um algoritmo de controle para veículo aéreo autônomo
2. Estudo e aplicação do algoritmo de localização e mapeamento simultâneo baseado em Visão (Vision-based SLAM)
3. Desenvolvimento de código da Visão do Quadricóptero para Linux Embarcado

4. Utilização da Plataforma ROS (Robot Operating System)
5. Reproduzir o desafio proposto pela AAVC Competition

## 1.2 Justificativa

**Dica:** Explicação sobre porque o trabalho se justifica e quais os pontos de relevância do mesmo

## 1.3 Motivação

**Dica:** Um pequeno texto sobre o que motivou o desenvolvimento do Trabalho

## 1.4 Organização do trabalho

**Dica:** Apresente o que tem em cada capítulo.



## **Capítulo 2**

# **Especificação do Projeto**

Especificação do projeto.

### **2.1 Seção 1**

Seção dentro de um capítulo.

### **2.2 Seção 2**

Outra seção dentro do capítulo.



## Capítulo 3

# Visão Estereoscópica - *Stereo Imaging*

**Dica:** Embasamento Teórico ou Fundamentação Teórica: revisão da literatura dos tópicos que sustentam a ciência e o conhecimento, relativos aos objetivos e aos métodos escolhidos para o desenvolvimento do trabalho; - Itens como Considerações Iniciais e Finais não são obrigatórios, mas completam muito bem qualquer capítulo.

A visão estereoscópica possibilita uma boa identificação de um espaço tridimensional, visto que sua estrutura permite a triangulação de pontos chaves, assim determinando-se o seu correto posicionamento. Deste modo, compreende-se o porquê deste sistema visual ser amplamente difundido na evolução humana e animal. Em visão computacional, deseja-se emular os sistemas de visão mais eficientes para identificação de objetos e reconhecimento de ambientes. Computacionalmente, este processo pode ser realizado em quatro etapas: retificação, Nas próximas seções encontram-se apresentadas o modelamento matemático, a triangulação, a calibração, a retificação e a reprojeção tridimensional para este tipo de sistema.

### 3.1 Triangulação - *Triangulation*

Idealmente, a triangulação de um Ponto  $P$  de coordenadas globais  $(X,Y,Z)$  pode ser realizada caso tenha-se uma estrutura estéreo, cujas câmeras não apresentem distorção e estejam perfeitamente alinhadas. Deste modo, matematicamente, é possível abstrair os sensores das câmeras como dois planos coplanares entre si. Nessas condições, tem-se que os eixos ópticos das câmeras são paralelos. O eixo óptico, também conhecido como raio principal, é a reta que intercepta o ponto de centro de projeção  $O$  e o ponto principal da lente  $c$ . Assumindo que as câmeras sejam exatamente iguais e alinhadas, tem-se que os pontos focais da camera esquerda e da câmera direita são iguais  $f_l = f_r$  e os pontos principais  $c_x^{left}$  e  $c_x^{right}$  apresentam

as mesmas coordenadas [7].

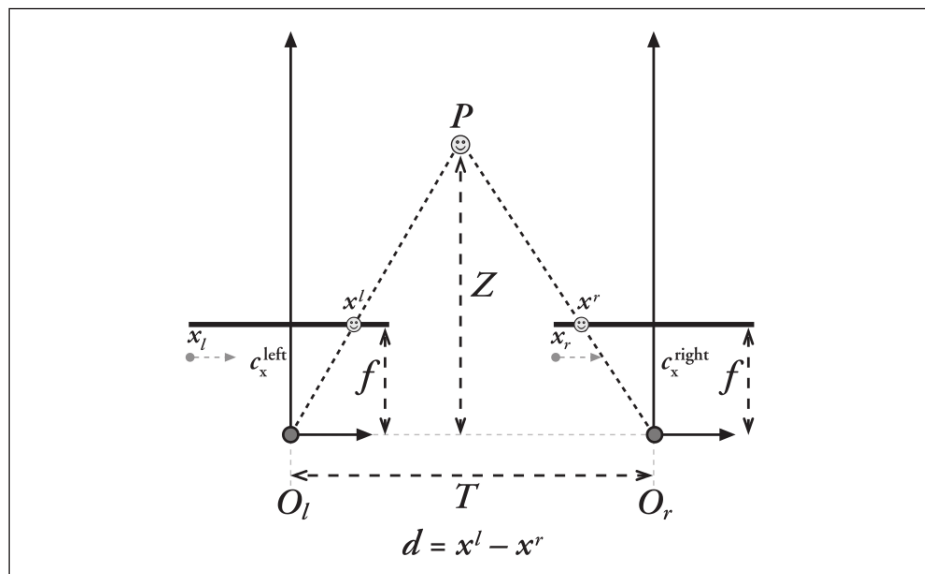


Figura 3.1: Modelo Idealizado de um sistema de Visão Estéreo

Referenciar esta imagem à figura 12-4 do livro do Bradski

A Figure 12-4. With a perfectly undistorted, aligned stereo rig and known correspondence, the depth  $Z$  can be found by similar triangles; the principal rays of the imagers begin at the centers of projection  $O_l$  and  $O_r$  and extend through the principal points of the two image planes at  $c_l$  and  $c_r$



## **3.2 Geometria epipolar - *Epipolar Geometry***

## **3.3 Calibração *Stereo Calibration***

### **3.3.1 Parâmetros intrínsecos**

### **3.3.2 Parâmetros extrínsecos**

## **3.4 Retificação de Imagens - *Stereo Rectification***

## **3.5 Correspondência Estéreo - *Stereo Correspondence***

## **3.6 Mapa de disparidades - *Disparity Map***

## **3.7 Projeção Tridimensional - *3D Reprojection***

## **3.8 Reconhecimento de Objeto - *Object Recognition***

### **3.8.1 Segmentação - *Image Segmentation***

### **3.8.2 Identificação - *Object Identification***



## Capítulo 4

# Materiais e Métodos

**Dica:** Materiais e Métodos: descrição clara dos procedimentos e dos materiais adotados para o desenvolvimento do trabalho (sem resultados) ? incluindo sua adequação ao trabalho. Tem que responder às perguntas: -está com um tamanho adequado (proporcional) à monografia? -há informação suficiente e clara sobre os materiais e sobre os métodos adotados? Não há necessidade de reproduzir (copiar) as obras que embasam o trabalho e sim colocar o suficiente para o entendimento do trabalho e citar as referências.

### 4.1 Materiais

Materiais utilizados no projeto.

### 4.2 Métodos

Métodos utilizados no projeto.



## Capítulo 5

# Resultados

**Dica:** Resultados/Discussões: aqui se mostra o que o trabalho permitiu produzir, e às vezes o que pode ser comparado com outros trabalhos - aqui ficam claras se as propostas do trabalho são relevantes ou não, pois devem permitir a discussão do trabalho; - Deve responder: Os resultados estão claros em bom número (nem muito nem pouco) que permitam avaliar realmente a proposta e o que foi produzido.



## Capítulo 6

### Conclusão

**Dica:** Conclusões: "fecha" com os objetivos? (respondem aos objetivos?) - aqui é que "se vende o peixe" - elas é que valorizam (ou não) o trabalho realizado. Normalmente é uma parte do trabalho "um pouco desprezada", pois o autor já está "cansado....". Mas é aqui que realmente se mede se o trabalho tem ou não valor. - Contém o item Trabalhos futuros, que é uma orientação sobre as possibilidades de continuação do desenvolvimento do trabalho.





## Referências Bibliográficas

- [1] M.W.M.G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte, and M. Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3):229–241, 2001.
- [2] Autonomous Aerial Vehicle Competition.
- [3] Thomas Lemaire, Cyrille Berger, Il-Kyun Jung, and Simon Lacroix. Vision-Based SLAM: Stereo and Monocular Approaches. *International Journal of Computer Vision*, 74(3):343–364, 2007.
- [4] Sunil Shah. Real-time Image Processing on Low Cost Embedded Computers. pages 1–29, 2014.
- [5] Autor da referência 1. Título da referência 1, 2007.
- [6] Google. <http://www.google.com.br/>, Acesso em: 04 de dezembro de 2014.
- [7] Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, volume 1. 2008.



## **Apêndice A**

### **Apêndice 1**

Texto do Apêndice 1.



## **Apêndice B**

## **Apêndice 2**

Texto do Apêndice 2.



## **Anexo I**

### **Anexo 1**

Texto do Anexo 1.





## **Anexo II**

## **Anexo 2**

Texto do Anexo 2.