

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

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

Autor: Nícolas 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

Este Trabalho de Conclusão de Curso é dedicado a minha mãe, meu pai, minha irmã, meus padrinhos e toda minha família.

Nícolas dos Santos Rosa.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por propiciar saúde e felicidade a todos aqueles que me rodeiam.

À minha família: à minha Mãe, Valdenilce, pela férrea dedicação em mostrar a mim e a minha irmã a importância da educação para nossa formação pessoal; ao meu pai, Francisco, por fazer o possível e o impossível para sustentar nossa família e por possibilitar condições para que me tornasse engenheiro; à minha irmã, Natália, pelo suporte e carinho e por ser a dupla perfeita para atazanar nossos pais; às minhas tias, Elisabeth, Vera Lúcia e Maria Regina, por serem minhas segundas mães, visto o tamanho do suporte, preocupação, e apreço dado.

Ao meu orientador, Prof. Evandro Luís Linhari Rodrigues, pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho e por despertar meu interesse em sistemas embarcados, confirmado ainda mais minha paixão pelo meu curso.

Aos meus orientadores de iniciação científica, Prof. Dr. Cláudio F. M. Toledo, Márcio S. Arantes, por introduzir-me ao âmbito da pesquisa acadêmica. Aos membros do SARLab: ao Prof. Dr. Samir Rawashdeh por ser o idealizador deste trabalho e por oferecer a oportunidade de desenvolvê-lo; a Benjamin Dale e a Miguel Rocha Jr., pelo companheirismo e por sempre estarem sempre de prontidão.

Aos meus amigos de curso, pelos ótimos momentos que vivemos juntos nestes anos, especialmente, Alexandre B. Moretti, Leonardo B. Farçoni, Plínio F. G. Bueno, Marília L. Dourado, Jéssica B. da Vida, Pedro Arantes, Augusto Martins, Gustavo Oliveira, Aline Midori, Vitor Martins, Anderson M. Tsai, Victor Morini, João F. Corsini, Caio Martins e à todos os outros amigos.

Aos membros do grupo extracurricular Warthog Robotics, por partilhar um interesse em comum e pelas incontáveis horas de dedicação gastos no laboratório.

Por fim, agradeço a todos os envolvidos no desenvolvimento deste trabalho.

Nícolas dos Santos Rosa.

"O dinheiro faz homens ricos, o conhecimento faz homens sábios e a humildade faz grandes homens."

Mahatma Gandhi

"You can't put a limit on anything. The more you dream, the farther you get."

Michael Phelps

"Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."

Isaac Newton

Resumo

Rosa, Nícolas **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	Caminhão Autônomo desenvolvido pelo Laboratório de Robótica Móvel - LRM - ICMC/USP	27
1.2	Plataformas experimentais de aeronaves com o Sistema Estéreo - FPGA (frente) e o Sistema Estéreo - Pushbroom (trás). Câmaras são montados na parte dianteira das asas na mesma linha de base (34 cm) em ambas células.	28
3.1	Modelo Idealizado de um sistema de Visão Estéreo	32
4.1	3D Webcam Minoru	35
4.2	Câmera Digital Fujifilm FinePix Real 3D W3	36
4.3	Quadricóptero 3DR X8 com suporte para a Câmera 3D	36
5.1	Interface Gráfica - Visualização simultânea dos quadros das câmeras esquerda e direita	38
5.2	Interface Gráfica - Visualização dos Mapa de disparidade em Escala de Cinza e RGB	38
5.3	Interface Gráfica - Visualização dos Mapa de disparidade em Escala de Cinza e RGB	39
5.4	Interface Gráfica - Visualização da Imagem da Câmera Esquerda com o indicador de objeto rastreado e da Imagem binária resultante da limiarização por distância	40
5.5	Interface Gráfica - Visualização da imagem resultante do processo de detecção de movimentos e imagem resultante do processo de detecção de movimentos limiarizada por distância	41
5.6	Interface Gráfica - Visualização da Imagem resultante da adição da imagem à direita com a Imagem da Câmera Esquerda e Imagem resultante do processo de realce das bordas dos objetos em movimento próximos ao veículo	42

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

1	Introdução	25
1.1	Objetivos	26
1.2	Justificativa	26
1.3	Motivação	26
1.4	Organização do trabalho	28
2	Especificação do Projeto	29
2.1	Seção 1	29
2.2	Seção 2	29
3	Visão Estereoscópica - <i>Stereo Imaging</i>	31
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
4	Materiais e Métodos	35
4.1	Materiais	35

4.2	Métodos	36
5	Resultados Parciais	37
6	Conclusão	43
A	Apêndice 1	47
B	Apêndice 2	49
I	Anexo 1	51
II	Anexo 2	53

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 significante. 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.

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) [2], 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 pla-

formas de desenvolvimento BeagleBone Black e Nvidia jetson TK1 serão analisadas e avaliadas com relação performance ao executar o algoritmo desenvolvido [3].

1.1 Objetivos

1. Estudo e aplicação de Técnicas de Visão Computacional para Visão Estéreo.
2. Desenvolvimento de uma interface de apoio o controle de um veículo autônomo.
3. Desenvolvimento de algoritmo de visão estéreo para Linux Embarcado e aplicação em Quadricópteros.
4. Comparativo de Desempenho do Algoritmo Desenvolvido em diferentes plataformas.

1.2 Justificativa

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

1.3 Motivação

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 pela tentativa de reproduzir-se o desafio proposto pela Autonomous Aerial Vehicle Competition (AAVC)[4], 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.

A segunda motivação para o desenvolvimento deste trabalho é o crescente número de aplicações de visão estereoscópica em plataformas robóticas. Atualmente, existem diversas pesquisas voltadas ao desenvolvimento de veículos autônomos para navegação terrestre, aérea e subaquática. Nesta seção, serão apresentados alguns dos trabalhos envolvendo cada um destes ambientes, os quais câmeras estereoscópicas auxiliam ou são os principais sensores destas plataformas.

Nos dias de hoje, as empresas automobilisticas vem participando de uma verdadeira corrida tecnológica para o desenvolvimento de automóveis totalmente autonomos e economicamente viáveis. As universidades não ficaram para trás e também participam desta corrida. Além disso, vêm apresentando resultados promissores, o que concretizam cada vez mais essa realidade tida até então como distante. Na figura 1.1 abaixo é possível observar o projeto de caminhão autônomo desenvolvido pelo laboratório de robótica móvel - LRM - ICMC/USP. O caminhão conta com diversos sensores, dentro eles câmeras estereoscópicas, que identificam outros automóveis, pessoas e faixas de sinalização [5].



Figura 1.1: Caminhão Autônomo desenvolvido pelo Laboratório de Robótica Móvel - LRM - ICMC/USP

No caso de navegação autônoma para ambiente áereo, o projeto utilizando *Micro Air Vehicle* - MAVS desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* - MIT permite que estas pequenas aeronaves consigam navegar autonomamente e desviar de obstáculos voando a um velocidade de 30 mph (48 km/h). A figura 1.2 abaixo apresenta o trabalho desenvolvido, o qual é um comparativo de desempenho de uma implementação em hardware utilizando FPGA e um processador ARM para processamento embarcado do método *Semi-Global Block Matching* [6].

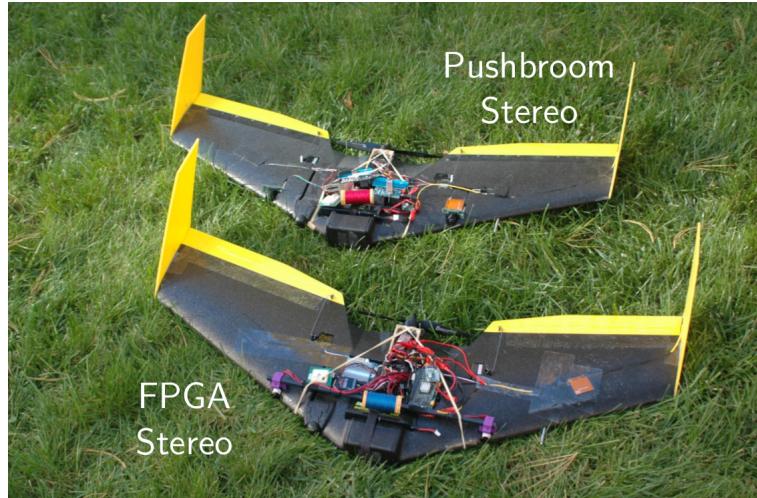


Figura 1.2: Plataformas experimentais de aeronaves com o Sistema Estéreo - FPGA (frente) e o Sistema Estéreo - Pushbroom (trás). Câmaras são montados na parte dianteira das asas na mesma linha de base (34 cm) em ambas células.

underwater [7]

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, comprehende-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 [8].

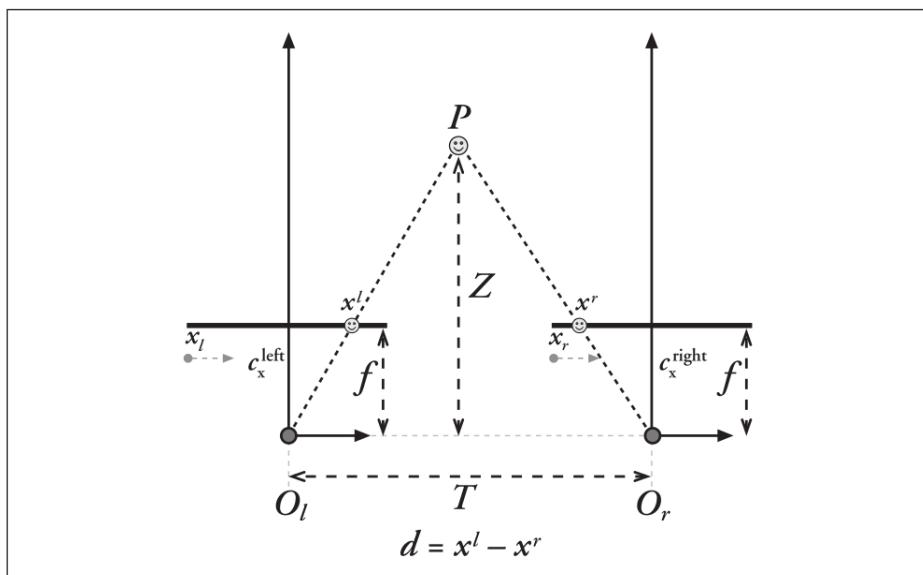


Figura 3.1: Modelo Idealizado de um sistema de Visão Estéreo

Referênciar 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 extrinsecos

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



Figura 4.1: 3D Webcam Minoru



Figura 4.2: Câmera Digital Fujifilm FinePix Real 3D W3



Figura 4.3: Quadricóptero 3DR X8 com suporte para a Câmera 3D

Capture high-resolution images in 2D and 3D Record HD 3D movies (720p resolution); dual 10-megapixel CCD and lens system 3.5-inch widescreen autostereoscopic LCD displays images and movies in 3D instantly, with no glasses required mini-HDMI output jack offers easy connection to a compatible 3D HDTV; view images and movies instantly in 3D Capture images and movies to SD/SDHC memory cards (not included)

4.2 Métodos

Métodos utilizados no projeto.

Capítulo 5

Resultados Parciais

Os resultados obtidos estão inteiramente relacionados ao desenvolvimento do programa e o algoritmo para a detecção de objetos e obstáculos. Nesta seção, serão apresentados os resultados desse *software* obtidos até então.

O software desenvolvido apresenta uma interface gráfica(GUI – *Graphical User Interface*) amigável, a qual facilita a visualização das imagens obtidas pela câmera estereoscópica e das imagens resultantes dos método de processamento de imagens desenvolvido. Atualmente, o software conta com 8 opções das quais 6 delas são destinadas a visualização das seguintes perspectivas:

1. Imagens retificadas das câmeras esquerda e direita
2. Mapa de disparidade em Escala de Cinza e RGB
3. Mapa tridimensional do ambiente reconstruído em Escala de Cinza e RGB
4. Imagem da Câmera Esquerda com o indicador de objeto rastreado e Imagem binária resultante da limiarização por distância.
5. Imagem resultante do processo de detecção de movimentos e Imagem resultante do processo de detecção de movimentos limiarizada por distância.
6. Imagem resultante da adição da imagem à direita com a Imagem da Câmera Esquerda e Imagem resultante do processo de realce das bordas dos objetos em movimento próximos ao veículo.

O botão *Show Left/Right* seleciona a opção na qual a interface gráfica permite a visualização simultânea das imagens retificadas de ambas câmera. A figura 5.1 ilustra o comporta-

mento do software quando essa opção é selecionada.

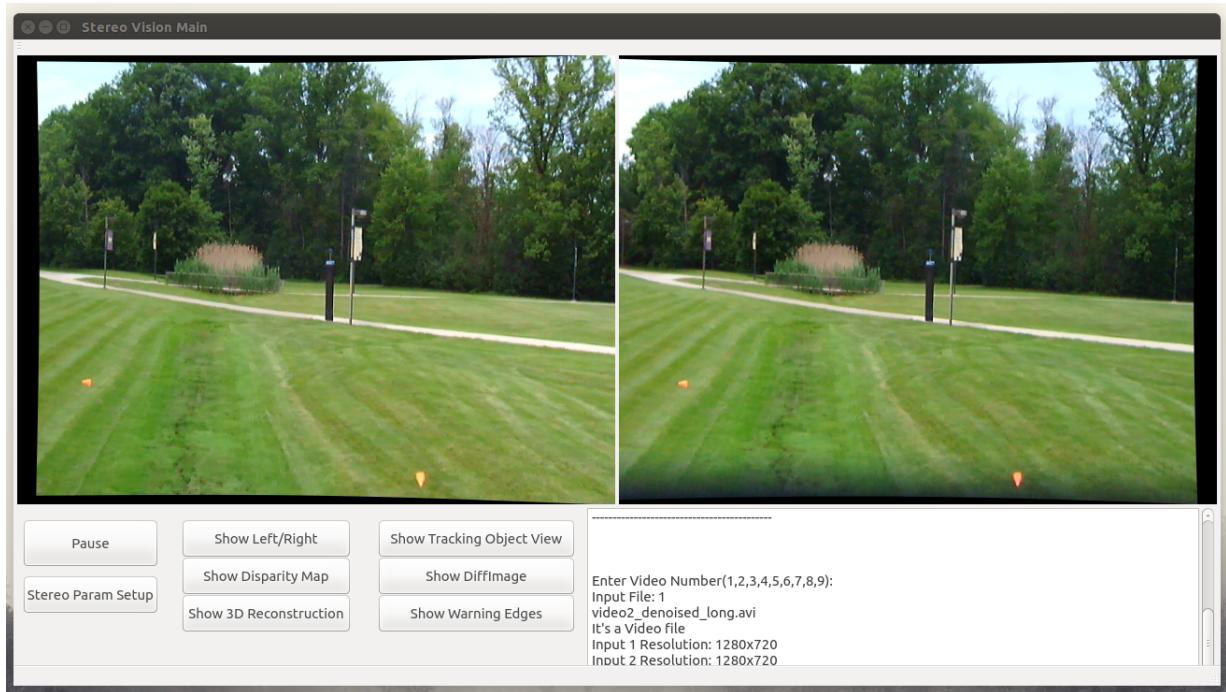


Figura 5.1: Interface Gráfica - Visualização simultânea dos quadros das câmeras esquerda e direita

O botão *Show Disparity Map* seleciona a opção na qual a interface gráfica permite a visualização simultânea dos mapas de disparidade em escala de cinza e RGB. A figura 5.2 ilustra o comportamento do software quando essa opção é selecionada.

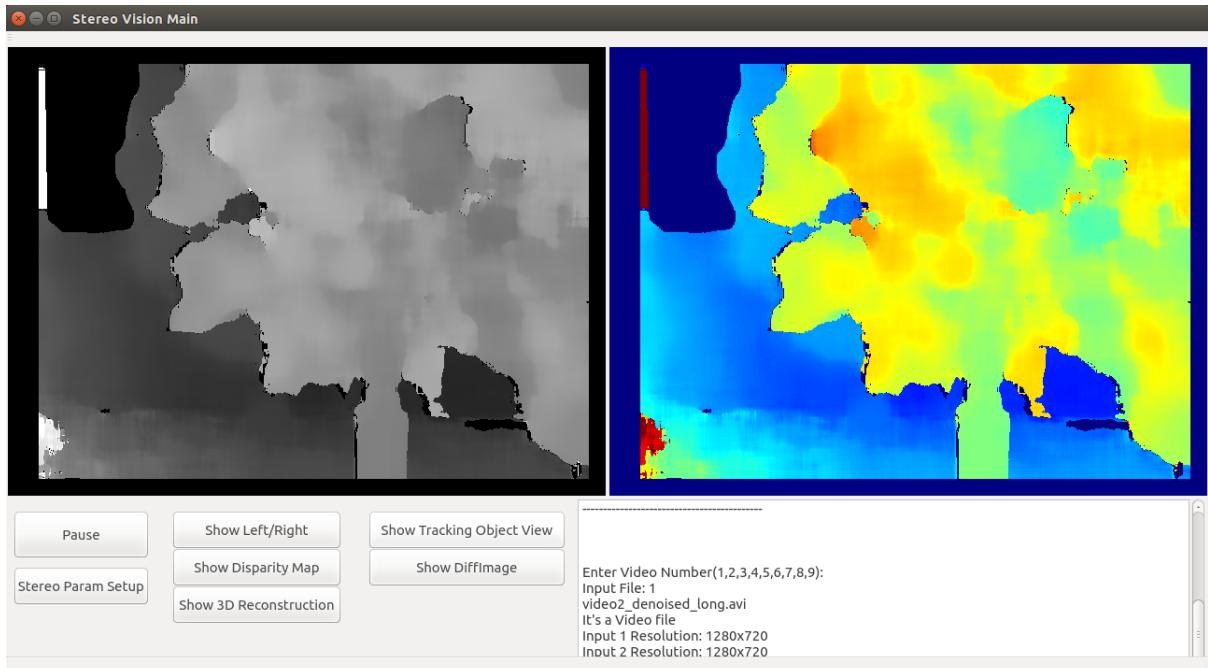


Figura 5.2: Interface Gráfica - Visualização dos Mapa de disparidade em Escala de Cinza e RGB

O botão *Show 3D Reconstruction* seleciona a opção na qual a interface gráfica permite a visualização simultânea dos mapas tridimensionais do ambiente reconstruído em escala de cinza e RGB. A figura 5.3 ilustra o comportamento do software quando essa opção é selecionada.

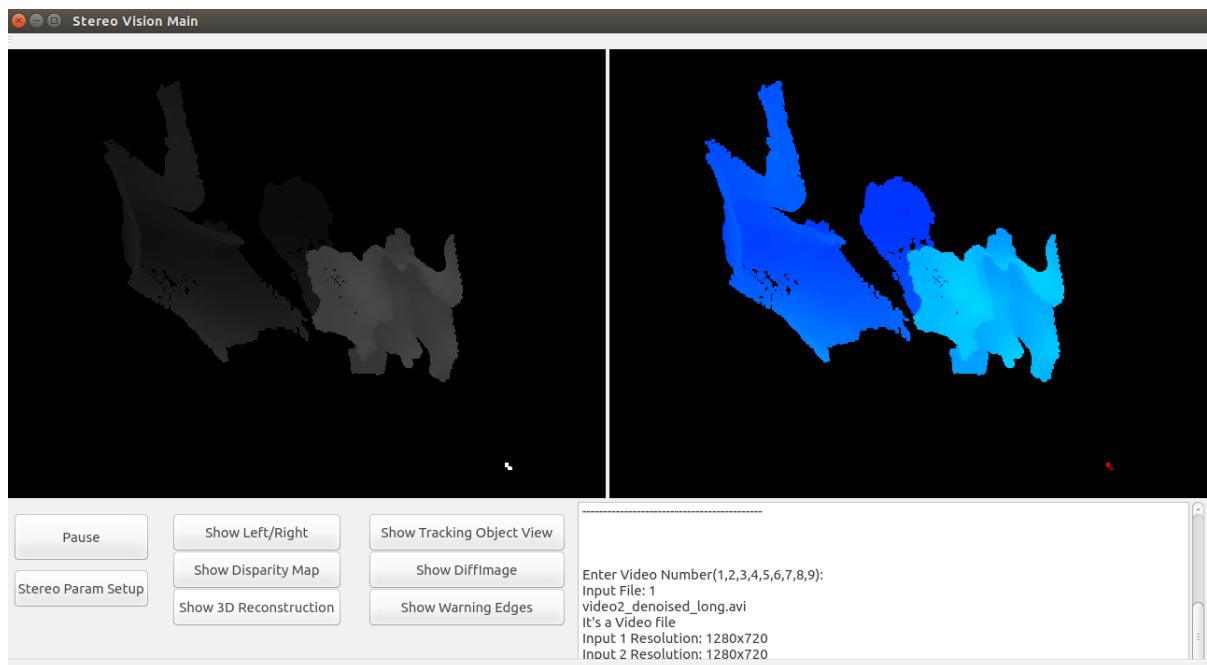


Figura 5.3: Interface Gráfica - Visualização dos Mapa de disparidade em Escala de Cinza e RGB

O botão *Show Tracking Object View* seleciona a opção na qual a interface gráfica permite a visualização simultânea da imagem da câmera Esquerda com o indicador de objeto rastreado e imagem binária resultante da limiarização por distância. A figura 5.4 ilustra o comportamento do software quando essa opção é selecionada.

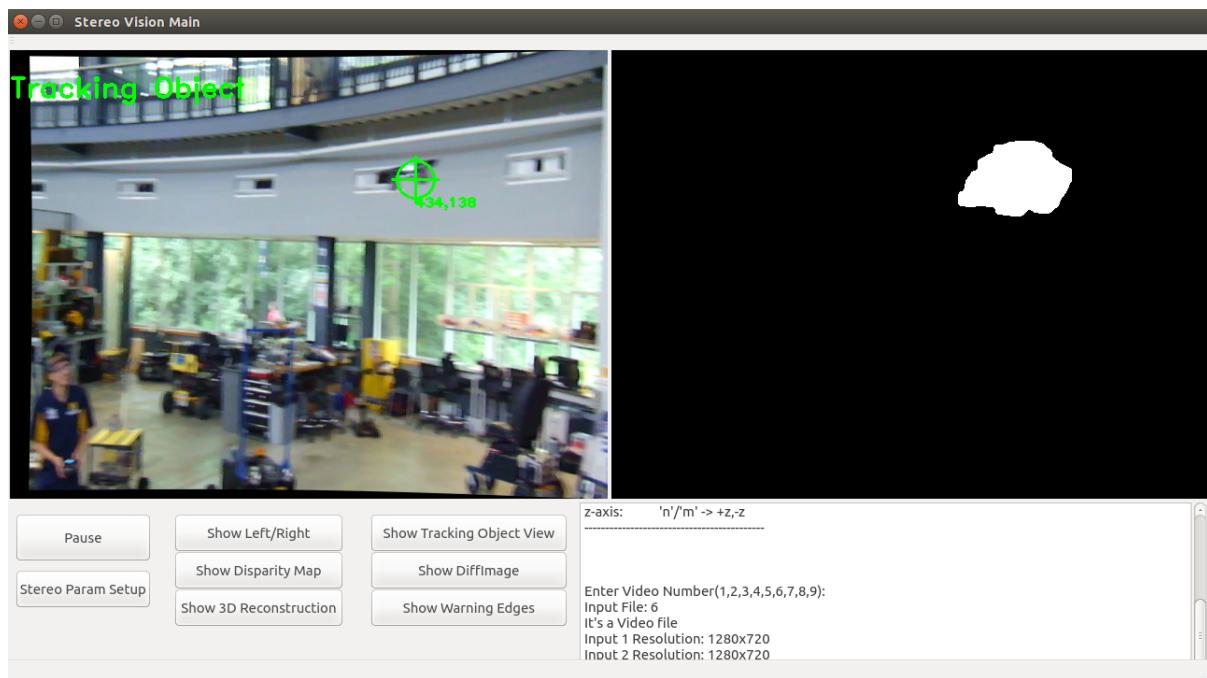


Figura 5.4: Interface Gráfica - Visualização da Imagem da Câmera Esquerda com o indicador de objeto rastreado e da Imagem binária resultante da limiarização por distância

O botão *Show DiffImage* seleciona a opção na qual a interface gráfica permite a visualização simultânea da imagem resultante do processo de detecção de movimentos e imagem resultante do processo de detecção de movimentos limiarizada por distância. A figura 5.5 ilustra o comportamento do software quando essa opção é selecionada.

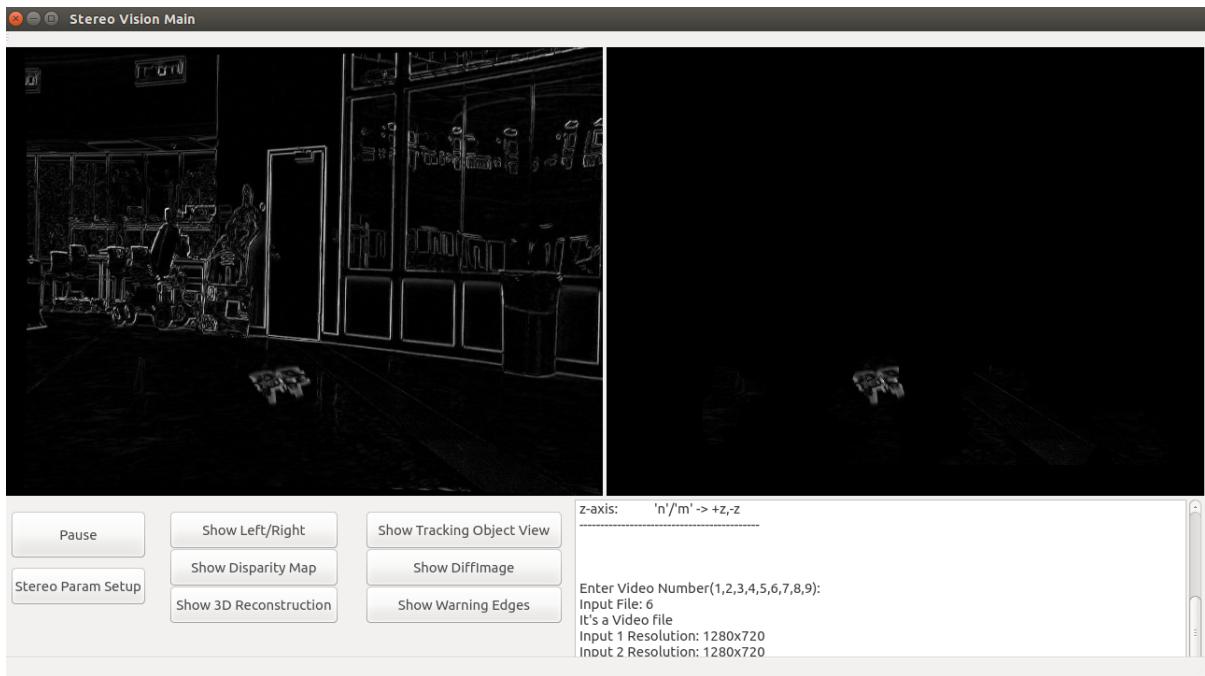


Figura 5.5: Interface Gráfica - Visualização da imagem resultante do processo de detecção de movimentos e imagem resultante do processo de detecção de movimentos limiarizada por distância

O botão *Show DiffImage* seleciona a opção na qual a interface gráfica permite a visualização simultânea da imagem resultante da adição da imagem à direita com a imagem da câmera esquerda e imagem resultante do processo de realce das bordas dos objetos em movimento próximos ao veículo. A figura 5.6 ilustra o comportamento do software quando essa opção é selecionada.

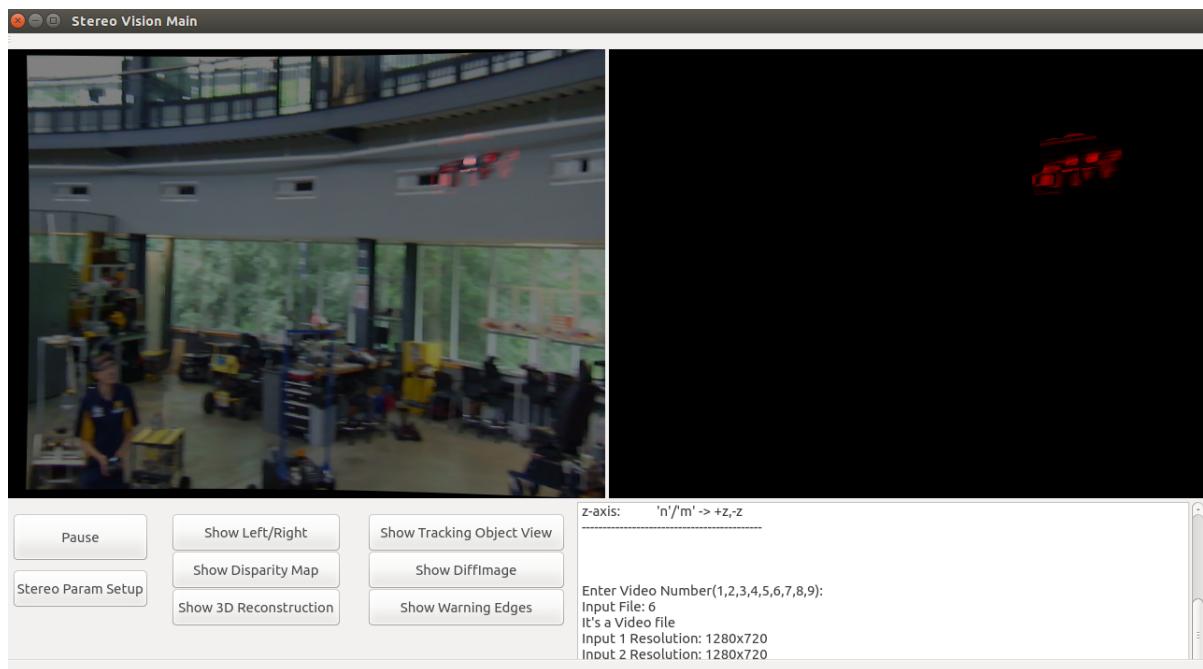


Figura 5.6: Interface Gráfica - Visualização da Imagem resultante da adição da imagem à direita com a Imagem da Câmera Esquerda e Imagem resultante do processo de realce das bordas dos objetos em movimento próximos ao veículo

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)\nproblem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3):229–241, 2001.
- [2] 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.
- [3] Sunil Shah. Real-time Image Processing on Low Cost Embedded Computers. pages 1–29, 2014.
- [4] Autonomous Aerial Vehicle Competition.
- [5] D. F. Shinzato, P. Y. ; Osório, F. S. ; Wolf. Visual Road Recognition Using Artificial Neural Networks and Stereo Vision. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS - Workshop*.
- [6] Andrew J Barry, Helen Oleynikova, Dominik Honegger, Marc Pollefeys, and Russ Tedrake. FPGA vs . Pushbroom Stereo Vision for MAVs. *Vision-based Control and Navigation of Small Lightweight UAVs, IROS Workshop*, pages 1–6, 2015.
- [7] G M Breivik, S A Fjerdingen, and O Skotheim. Robust Pipeline Localization for an Autonomous Underwater Vehicle using Stereo Vision and Echo Sounder Data. *Intelligent Robots and Computer Vision Xvii: Algorithms and Techniques*, 7539, 2010.
- [8] Gary Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, volume 1. 2008.

Apêndice A

Apêndice 1

Dica: Diferença entre Apêndice e Anexo:

- APÊNDICE – Documento ou texto elaborado pelo autor
- ANEXO – Documento ou texto não elaborado pelo autor

Texto do Apêndice 1.

Apêndice B

Apêndice 2

Texto do Apêndice 2.

Anexo I

Anexo 1

Dar Créditos à pela parte 3D Reconstruction: <http://opencv.jp/opencv2-x-samples/point-cloud-rendering>

Anexo II

Anexo 2

Texto do Anexo 2.