



Leonardo Rodrigues Miranda

**Servovisão não métrica baseada
em intensidade aplicada a robôs
do tipo uniciclo**

CAMPINAS
2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

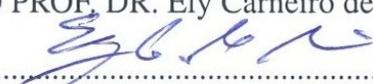
Leonardo Rodrigues Miranda

Servovisão não métrica baseada em intensidade aplicada a robôs do tipo uniciclo

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos sólidos e Projetos Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Ely Carneiro de Paiva
Coorientador: Dr. Geraldo Figueiredo da Silveira Filho

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO Leonardo Rodrigues Miranda, E ORIENTADO PELO PROF. DR. Ely Carneiro de Paiva.


.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES, 33003017

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

M672s Miranda, Leonardo Rodrigues, 1985-
Servovisão não métrica baseada em intensidade aplicada a robôs do tipo unicycle / Leonardo Rodrigues Miranda. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Ely Carneiro de Paiva.

Coorientador: Geraldo Figueiredo da Silveira Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Sistemas de controle por realimentação. 2. Visão artificial. 3. Rastreabilidade. 4. Robôs - Sistemas de controle. 5. Robôs móveis. I. Paiva, Ely Carneiro de, 1965-. II. Silveira Filho, Geraldo Figueiredo da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Visual servoing non-metric based intensit application of robots the type of unicycle

Palavras-chave em inglês:

Feedback control systems

Artificial vision

Traceability

Robots - Control systems

Mobile robots

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Ely Carneiro de Paiva [Orientador]

Eric Fujiwara

Paulo Augusto Valente Ferreira

Data de defesa: 20-05-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

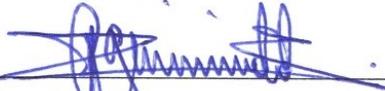
Servovisão não métrica baseada em intensidade aplicada a robôs do tipo uniciclo

Autor: Leonardo Rodrigues Miranda
Orientador: Ely Carneiro de Paiva
Coorientador: Geraldo Figueiredo da Silveira Filho

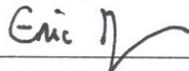
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Ely Carneiro de Paiva, presidente
DSI/FEM/UNICAMP



Dr. Geraldo Figueiredo da Silveira Filho
DRVC/CTI



Prof. Dr. Eric Fujiwara
DSI/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Augusto Valente Ferreira
DT/FEEC/UNICAMP

Campinas, 20 de maio de 2016.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é o resultado da operação coletiva diária e iniciada em longa data. Nela as primeiras sementes plantadas vieram da educação dos meus pais e do meu irmão. O trabalho árduo dos diversos professores que um dia eu tive o privilégio de tê-los como meus mentores. Estes dedicaram parte da suas vidas na missão de transmitir o conhecimento e “trazer a tona” o sofrido despertar da “força” por meio de interrogações para ativar a capacidade mais refinada de um ser que é o “pensar-refletir”. A presença dos familiares – avós, tios, primos – foram os adubos e irrigações de nutrientes diferenciados para que eu chegasse ao atual estágio da vida. Os amigos íntimos que me cultivaram como filho, irmão, tio ... e findaram o circulo mais estreito para que a condição moral se instalassem na minh’alma. Sou grato a todos e este é meu gesto em reconhecê-los pelo que fizeram por mim ao longo desta vida. Em ressalva cito um dos nobres mentores, Luiz Carlos Rocha, e por meio desta dedico cada página do meu trabalho, cada capítulo, seção, subseção, parágrafos, orações e frases, bem como cada palavra e letra por letra.

AGRADECIMENTOS

À Deus sendo esta minha fonte de renovação de força, fé determinação e busca pela excelência.

Aos emissários de Deus que me auxiliaram por meio da permissão divina no meu caminhar.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa pois muito contribuíram com o meu trabalho.

A toda minha família que me apoiou na realização deste objetivo.

Aos amigos e companheiros de toda a jornada que me ensinaram por vivência quais caminhos eu deveria escolher e quais eu não deveria percorrer.

Aos amigos e companheiros da FEM e CTI-Renato Archer que me apoiaram e incentivaram nos momentos difíceis.

Aos meus orientados de graduação, EMC - UFG, Marco Antônio Assfalk de Oliveira e Gisele Guimarães pelos ensinamentos prestados.

Aos meus orientadores de mestrado pelo excelente trabalho que prestaram a mim.

Aos funcionários que representam a Unicamp por meio de uma complexa rede de trabalho e dedicação que proporcionam a todos nós ambientes propícios para a pesquisa.

A minha namorada, Ana Cláudia, pelo suporte dentre outros gestos neste período da minha vida.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo indispensável apoio financeiro.

*“Que os meus inimigos sejam fortes e
bravos para que eu não sinta remorso ao
derrotá-los”*

Provérbio Sioux - Clã do Lobo

Resumo

Este trabalho considera o problema de controle de robôs por realimentação visual, usualmente chamado de servovisão, onde o estado de equilíbrio é definido através de uma imagem de referência. Diferentemente da maioria das soluções, este estudo foca em técnicas de controle que utilizam apenas informações não métricas e exploram diretamente a intensidade dos pixels, sem etapas intermediárias. Técnicas baseadas em intensidade fornecem maior precisão, enquanto que dispensar informações métricas aumenta a versatilidade. Neste contexto, este trabalho objetiva principalmente aplicar e comparar duas dessas técnicas de servovisão em robôs não-holonômicos do tipo unicycle. Dado que elas foram projetadas para robôs holonômicos, adaptações foram realizadas no veículo, notadamente a adição de outro grau de liberdade e o adequado posicionamento da câmera em relação ao eixo das rodas. Diversos resultados experimentais são apresentados neste trabalho, utilizando um robô do tipo unicycle com câmera montada sobre um *pan-tilt* de baixo custo, em tarefas de posicionamento e rastreamento em relação a um objeto planar de dimensões, orientação, textura e profundidade desconhecidas.

Palavras-chave: controle baseado em visão, servovisão direta, servovisão direta desacoplada, robôs não holonômicos, posicionamento de robôs, rastreamento de objetos.

Abstract

This work considers the problem of vision-based robot control, usually called visual servoing, where the equilibrium state is defined through a reference image. Unlike most solutions, this study focuses on control techniques which use only nonmetric information and explore directly the intensity of pixels, with no intermediate steps. Intensity-based techniques provide higher accuracy, while dispensing metric information increases versatility. In this context, this work aims mainly to apply and compare two of these visual servoing techniques to unicycle-type nonholonomic robots. Since they are designed for holonomic robots, adjustments were made in the vehicle, particularly the addition of another degree of freedom and the adequate camera positioning in relation to the wheels axle. Several experimental results are presented in this dissertation, using a unicycle-type robot with a camera mounted on a low cost pan-tilt, for positioning and tracking tasks with respect to a planar object of unknown dimensions, orientation, texture, and depth.

Keywords: control based on vision, direct visual servoing, decoupled direct visual servoing, robots non-holonomic, task positioning of robots, tracking objects.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Plataforma experimental e seus componentes	31
2.1	O funcionamento da câmera de orifício	36
2.2	Projeção do ponto P sobre o plano Π	37
2.3	Plano imagem discretizado	38
2.4	Geometria epipolar	40
2.5	Geometria entre duas imagens de um objeto não planar.	41
4.1	Sistema de coordenadas do espaço Euclidiano	56
4.2	Robôs de atuação planar	58
4.3	Veículo robótico diferencial	60
4.4	Veículo robótico com o pantilt atrás do centro inercial	62
5.1	Cenário experimental	68
5.2	Técnica DVS: comparação entre os casos 1 e 2	70
5.3	Técnica DVS: caso 1 - ganhos constantes	72
5.4	Técnica DVS: caso 2 - ganhos variáveis	72
5.5	Técnica DDVS: comparação entre os casos 1 e 2	74
5.6	Técnica DDVS: caso 1	76
5.7	Técnica DDVS: caso 2	76
5.8	Técnica DVS: Perseguição com ganho variável	79
5.9	Registros da Perseguição usando a técnica DVS	80
5.10	Técnica DDVS: Perseguição com ganho variável	82
5.11	Registros do rastreamento DDVS referente a figura 5.10.	83

A.1	Cenário experimental	97
A.2	Técnica DVS: experimento de posicionamento para as poses 1 e 5	99
A.3	Técnica DVS: experimento de posicionamento para as poses 2 e 4	100
A.4	Técnica DVS: experimento de posicionamento para a pose 3	101
A.5	Técnica DDVS: experimento de posicionamento para as pose 1 e 5	102
A.6	Técnica DDVS: experimento de posicionamento para as poses 2 e 4	103
A.7	Técnica DDVS: experimento de posicionamento para a pose 3	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Matrizes e Vetores

- K** - Matriz de calibração da câmera
- $[\mathbf{a}]_{\times}$ - Matriz antissimétrica do vetor \mathbf{a}
- T** - Matriz de transformação linear
- R** - Matriz de rotações
- G** - Matriz de homografia projetiva
- \mathbf{G}_{∞} - Matriz de homografia projetiva
- H** - Matriz de homografia normalizada
- W** - Matriz de transformação de velocidades
- I** - Matriz identidade
- Λ - Matriz de ganhos
- Λ_{ν} - Matriz de ganhos para velocidades translacionais
- Λ_{ω} - Matriz de ganhos para velocidades angulares
- L** - Matriz de iteração
- M** - Matriz de desacoplamento de erros
- t** - Vetor coluna que guarda informações de translação
- P** - Notação para representar o ponto no espaço 3D
- s** - Notação para representar o ponto do espaço 3D projetado no plano projetivo
- \mathbf{P}_r - Origem do espaço Euclidiano localizado no centro de massa do veículo robótico

\mathbf{P}_m	- Origem do espaço Euclidiano para um ponto pertencente ao veículo, mas não ao centro de massa
\mathbf{q}^*	- Representação na imagem de referência da linha do infinito do plano dominante do objeto
$\mathbf{q}^{*/}$	- Representação normalizada na imagem de referência da linha do infinito do plano dominante do objeto
\mathbf{p}	- Vetor responsável por guardar informações de um pixel qualquer da imagem
\mathbf{p}_0	- Vetor responsável por guardar informações do pixel pertinente ao eixo focal do sensor
\mathbf{p}_c^*	- Vetor responsável por guardar as informações do ponto de controle da imagem de referência
\mathbf{p}_Φ^*	- Vetor responsável por guardar as informações do ponto de controle localizado no plano dominante
\mathbf{m}^*	- Vetor responsável por guardar as informações do ponto de controle normalizado da imagem de referência
\mathbf{m}_Φ^*	- Vetor responsável por guardar as informações do ponto de controle do plano dominante normalizado
$\mathbf{e}, \mathbf{e}', \mathbf{e}_{\Pi_\alpha}, \mathbf{e}_{\Pi_\beta}$	- Vetor responsável por guardar as posições referentes ao sensor visual do epipolo
\mathbf{v}_r	- Vetor velocidade do centro de massa do veículo
\mathbf{v}_m	- Vetor velocidade de um ponto qualquer sobre a superfície do veículo
$\boldsymbol{\varepsilon}$	- Vetor erro de controle
$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$	- Vetor erro de controle desacoplado
\mathbf{o}	- Centro da câmera em coordenadas normalizada
$\mathbf{C}, \mathbf{C}', \mathbf{C}_{\Pi_\alpha}, \mathbf{C}_{\Pi_\beta}$	- Centro focal e origem do sistema de coordenadas Euclidianas localizado no centro focal da câmera
$\vec{\mathbf{x}}, \vec{\mathbf{y}}, \vec{\mathbf{z}}$	- Eixos de sistemas de coordenadas
$\vec{\mathbf{x}}_l, \vec{\mathbf{y}}_l$	- Eixos de sistemas de coordenadas de referência local
$\vec{\mathbf{x}}_b, \vec{\mathbf{y}}_b$	- Eixos de sistemas de coordenadas localizado no centro de massa do robô
$\vec{\mathbf{x}}_c, \vec{\mathbf{z}}_c$	- Eixos de sistemas de coordenadas localizado no centro focal da câmera
$\vec{\mathbf{u}}, \vec{\mathbf{v}}$	- Eixos do sistemas de coordenadas do sensor visual

Letras Latinas

- f - Distância focal entre o plano imagem e o centro focal da câmera
- C - Refere-se a quantidade de pixels presente e uma fileira disposto na transversal
- L - Refere-se a quantidade de pixels presente e uma fileira disposto na longitudinal
- l - Tamanho em milímetros do sensor visual na transversal
- c - Tamanho em milímetros do sensor visual na longitudinal
- $g_{ij}; i, j = \{1, 2, 3\}$ - Elementos da matriz homografia projetiva
- $h_{ij}; i, j = \{1, 2, 3\}$ - Elementos da matriz homografia normalizada
- xy, yz, xz - Representação do plano através de dois eixos cartesianos
- $\mathcal{I}, \mathcal{I}_\alpha, \mathcal{I}_\beta$ - Funções de intensidade referentes a imagem
- P_x, P_y, P_z - Componentes do ponto \mathbf{P} no espaço Euclidiano
- xy, yz, xz - Representação do plano através de dois eixos cartesianos
- z - Profundidade existente entre o centro focal da câmera em relação ao ponto objeto no instante corrente
- z^* - Profundidade existente entre o centro focal da câmera em relação ao ponto objeto no instante referencial
- z_Φ^* - Profundidade existente entre o centro focal da câmera em relação ao plano dominante no instante referencial
- l_1, l_2 - Distâncias em relação a \vec{x} e \vec{y} entre dois pontos
- d - Distância longitudinal do centro de massa do veículo até a câmera
- u_1, u_1 - Sinais de entrada impostas ao veículo
- \dot{x}_r, \dot{y}_r - Velocidades do robô em relação ao sistemas de coordenadas local
- \dot{x}_m, \dot{y}_m - Velocidades de um ponto de interesse desde que esse ponto pertença a estrutura do veículo

Letras Gregas

Ω	- Domínio da região planar do sensor visual
$\Pi, \Pi_\alpha, \Pi_\beta, \Phi$	- Representação do plano através de letras gregas
α_u, α_v	- Correspondem às distâncias focais em pixels nas direções de \vec{u} e \vec{v}
α_{uv}	- Fator de obliquidade
ρ^*	- Paralaxe referente ao instante referencial
λ	- Variável de Ganho
ϑ	- “Ângulo projetivo de rotação”
$\dot{\psi}_d, \dot{\psi}_e$	- Velocidades angulares das rodas do veículo diferencial
α	- Relação entre a profundidade corrente e a profundidade do instante de referência
σ	- Refere-se ao espectro de uma matriz
$\dot{\theta}_b$	- Velocidade rotacional da base do veículo diferencial
θ_b	- Deslocamento angular da base do veículo diferencial
β_p	- Deslocamento angular da câmera
γ	- Valor constante para modelar ganho variável
β	- Quando utilizado como expoente corresponde a valor constante para modelar ganho variável

Siglas

ROS	- Sistema Operacional de Robôs (do inglês - <i>Robot Operating System</i>)
SLAM	- Mapeamento e localização simultânea Operacional de Robôs (do inglês - <i>simultaneous localization and mapping</i>)
HD, full HD	- Alta definição (do inglês - <i>High Definition</i> e <i>full High Definition</i>)
VGA	- <i>Video Graphics Array</i>
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>
UVC	- Dispositivo de video <i>USB</i>
DVS	- Servovisão direta (do inglês, <i>direct visual servoing</i>)
DDVS	- Servovisão direta desacoplada (do inglês, <i>deocoupled direct visual servoing</i>)
GDL	- Graus de liberdade
CCD	- <i>Charge-coupled device</i>
CMOS	- <i>Complementary metal-oxide semiconductor</i>

Outras Notações

- δA - Área em mm^2 de um pixel
- ν - Refere-se a elementos translacionais, como erros e velocidades
- ω - Refere-se a elementos rotacionais, como erros e velocidades
- x - Refere-se a elementos que pertençam ao eixo \vec{x}
- y - Refere-se a elementos que pertençam ao eixo \vec{y}
- z - Refere-se a elementos que pertençam ao eixo \vec{z}
- b - Refere-se a elementos que pertençam ao centro de massa do veículo
- \langle , \rangle - Produto interno entre dois vetores
- \top - Transposto de um vetor ou de uma matriz quando sobrescrito
- $*$ - Notação para referir a informações obtidas pela imagem de referência, quando sobrescrito
- $\| \|$ - Norma dois aplicada em um vetor qualquer
- 2D - Elemento bidimensional
- 3D - Elemento tridimensional

Um plano qualquer poderá ser representado de duas maneiras: a primeira corresponde ao uso de letra grega maiúscula: Π , Φ , etc. Também podem ser representados pela junção de duas letras minúsculas e em itálico, por exemplo, xy , yz , xz . Os eixos de um sistema de coordenadas serão escritos em letras minúsculas, em negrito e com uma seta sobre a mesma, por exemplo, \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} .

Em um plano o ponto $\mathbf{A} = [A_x, A_y] \in \mathbb{R}^2$ é representado por um par de coordenadas. Este modelo de representação é chamado de notação não homogênea. Sua forma homogênea é construída da seguinte maneira: $\mathbf{A} = [A_x, A_y, 1]$. Caso o ponto agora pertença ao espaço, $\mathbf{A} = [A_x, A_y, A_z] \in \mathbb{R}^3$, a sua representação no formato homogêneo será: $\mathbf{A} = [A_x, A_y, A_z, 1]$. Logo, para representar um ponto no espaço n -dimensional em notação homogênea basta reescrever este ponto no espaço $(n+1)$ -dimensional, adicionando 1 na última dimensão.

Os vetores em linha estão apresentados com o símbolo \top sobre escrito, \mathbf{x}^\top ; vetores em coluna são representados em letras minúsculas e em negrito, \mathbf{x} . As matrizes seguem o mesmo raciocínio dos vetores, entretanto, são representados por letras maiúsculas, por exemplo, \mathbf{X} . Os conjuntos numéricos são representados por letras vazadas e maiúsculas, por exemplo, \mathbb{Z} e \mathbb{R} .

As matrizes $\mathbf{G}, \mathbf{H} \in \mathbb{SL}(3)$, $\mathbf{R} \in \mathbb{SO}(3)$ e $\mathbf{T} \in \mathbb{SE}(3)$ são pertencentes aos grupos especiais do tipo linear, ortogonal e Euclidiano, respectivamente, e pertencentes a álgebra de Lie. A matriz antissimétrica, vide equação (0.1), é discriminada pelo termo $[\mathbf{a}]_\times$ cujo vetor é expresso como $\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3]$.

$$[\mathbf{a}]_\times = [\mathbf{a}^\top]_\times = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (0.1)$$

Lista de figuras**Lista de Abreviaturas e Siglas****Notações**

1	Introdução	27
1.1	Motivação	27
1.2	Revisão bibliográfica	28
1.3	Objetivos	30
1.4	Plataforma experimental	30
1.4.1	Hardware	30
1.4.2	Software	32
1.5	Estrutura do trabalho	32
2	Fundamentação teórica	35
2.1	Modelo de câmera de orifício	35
2.2	Geometria <i>epipolar</i> entre duas imagens	39
2.2.1	Descrição Euclidiana	40
2.2.2	Descrição projetiva	41
2.3	Registro direto de imagens	43
3	Técnicas de servovisão não métrica baseada em intensidade	45
3.1	Servovisão direta	45
3.1.1	Erro de controle e algumas propriedades	46

3.1.2	Lei de controle e algumas propriedades	48
3.2	Servovisão direta desacoplada	50
3.2.1	Erro de controle e algumas propriedades	50
3.2.2	Lei de controle e algumas propriedades	52
4	Aplicação das técnicas de servovisão para robôs do tipo monociclo	55
4.1	Sistemas holonômicos irrestritos e restritos	56
4.2	Modelo cinemático e adaptação para sistemas holonômicos	59
4.3	Transformação de velocidades entre sistemas de coordenadas	61
5	Resultados experimentais	67
5.1	Ambiente experimental para o posicionamento	68
5.2	Experimentos de posicionamento	69
5.2.1	Servovisão direta	69
5.2.2	Servovisão direta desacoplada	71
5.2.3	Discussão	75
5.3	Experimentos de rastreamento	78
5.3.1	Servovisão direta	79
5.3.2	Servovisão direta desacoplada	81
5.3.3	Discussão	84
6	Conclusão	87
7	Trabalhos publicados	89
	Referências	91
	APÊNDICE	97
A	APÊNDICE	97
A.1	Servovisão direta	98
A.2	Servovisão direta desacoplada	98

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A imaginação é mais importante que o conhecimento.

Albert Einstein

1.1 Motivação

Os avanços tecnológicos nas últimas décadas contribuíram para a redução de custos na produção de câmeras e de computadores, bem como para o aumento da velocidade e da quantidade de dados possíveis de serem em tempo real. De maneira exemplificativa, as câmeras convencionais disponíveis no mercado podem amostrar imagens com resoluções satisfatórias, por exemplo, as câmeras em formatos *HD* ou *full HD* capturam imagens com maior detalhamento da imagem do que câmeras do tipo *VGA*. Além disso, o uso de placas de vídeo dedicadas para realizar o processamento paralelo, permite a operação de grandes volumes de dados em um único ciclo; isto torna o processo eficaz em quesito de velocidade.

Ademais, o aprimoramento dos modelos matemáticos e o avanço dos métodos computacionais capazes de apresentar resultados factíveis em tempo real foi um outro marco, sobretudo na determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, das características do cenário observado ou, ainda, em obter informações referentes a mudança de pose da câmera em relação ao cenário e das fontes de luz. Isto é, os algoritmos recentes apresentam soluções que permitem analisar uma quantidade muito maior de dados em cada instante.

Todos estes atrativos propiciam hoje o uso de câmeras para mapeamento e localização simultânea (*SLAM* do inglês, *simultaneous localization and mapping*) (SILVEIRA, 2014b), controlar robôs em tarefas de estabilização em relação a objetos desconhecidos (CHAUMETTE E HUTCHINSON, 2006b), controlar veículos em formação (BENHIMANE *et al.*, 2005a), dentre inúmeras aplicações. Por fim, este trabalho objetiva averiguar o comportamento de uma plataforma experimental

a ser controlada por uma câmera embarcada no robô nas tarefas de estabilização em relação a objetos fixos e móveis.

1.2 Revisão bibliográfica

Algumas das aplicações de câmeras para controlar robôs recaem a classe de técnicas de servovisão (CHAUMETTE E HUTCHINSON, 2006b) cujo conceito pode ser dado como: a arte de controlar um sistema eletromecânico em relação a um objeto por meio de visão computacional cuja câmera é o sensor principal nesta atuação de controle. Para este tipo de aplicação é possível utilizar uma, duas ou mais câmeras de maneira simultânea para controlar o sistema eletromecânico. Porém, existe uma relação direta entre a quantidade de sensores visuais e os recursos computacionais necessários para garantir o rastreamento visual do objeto em tempo real. Além disso, um outro ponto a dificultar o uso de muitas câmeras na tarefa de rastreamento é o recurso financeiro para implantar esta ideia, pois esta ambição onera diretamente o produto final, podendo no pior dos casos impedir a implantação do mesmo em âmbito comercial.

Outra vertente acerca do tema está no conjunto de métodos de estimação visual. Irani e Anandan (1999); Szeliski (2005) classificam estas técnicas em dois grupos. O primeiro grupo diz respeito aos métodos baseados em características geométricas tipificados principalmente pela necessidade de reconhecer pontos, retas, curvas nas imagens, ou seja, em características visuais. Este aglomerado de técnicas são caracterizadas pela necessidade de rastrear o objeto no campo visual através de três etapas intermediárias cujas etapas acontecem entre a captura da imagem e procedimento de correspondência entre as imagens. A primeira etapa consiste na extração das primitivas geométricas particulares da imagem; este procedimento acontece de maneira distinta e esparsa em cada uma das imagens, e requer um algoritmo eficiente para cada uma das características que se busque detectar. Na etapa seguinte, um algoritmo de correspondência é empregado para relacionar as informações detectadas entre duas ou mais imagens. Posteriormente, na terceira e última etapa, um algoritmo de estimação entra em operação para determinar os parâmetros desejados, tais como: rotação, translação e distâncias da câmera em relação a cena. Exemplos de técnicas de servovisão baseadas em características visuais podem ser encontradas, por exemplo, em (CHAUMETTE E HUTCHINSON; SILVEIRA *et al.*, 2006b; 2001a).

Por outra perspectiva, o segundo grupo abrange os métodos diretos, ou seja, a estimação do movimento ou a forma do objeto em relação a câmera é realizada a partir da correspondência dos pixels presentes em duas ou mais imagens. Isto é, esta técnica reconstrói os parâmetros desconhecidos ao relacionar duas ou mais imagens por meio das intensidades dos pixels de maneira

direta, e por isso é dita que não utiliza etapas intermediárias. Pode-se, ainda, considerar que essa equiparação entre as imagens ocorra ao utilizar parte ou todas as intensidades de pixels presentes na imagem para construir o erro. Existem outras nomenclaturas utilizadas para referir-se aos métodos diretos, tais como: métodos baseados em intensidade, baseados em aparência ou aspecto e, também, baseada em *templates* (SILVEIRA, 2014b).

O aglomerado de métodos diretos podem ser subdivididos em técnicas que necessitam ou não de informação métrica para estimar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. Isto é, existem técnicas que necessitam de pelo menos uma informação métrica seja ela do formato do objeto, seja ela da distância do objeto à câmera, (CHAUMETTE E HUTCHINSON; SILVEIRA *et al.*; SILVEIRA, 2006a; 2008; 2014a). Do outro lado, existem técnicas que não necessitam de nenhuma informação métrica, ou seja, o desconhecimento destas informações não afetam o processo de determinação dos parâmetros em nada; conferindo a estes métodos versatilidade. Esta robustez é ofertada pela sub-classe denominada de servovisão não métricas pois este grupo dispensa qualquer informação métrica (SILVEIRA; BENHIMANE E MALIS; SILVEIRA E MALIS; SILVEIRA *et al.*, 2014b; 2006; 2012a; 2013a).

Um dos primeiros trabalhos em controle não métrico é apresentado em (BEARDSLEY *et al.*, 1995), onde um robô de superfície é considerado. Neste caso, portanto, apenas três g.d.l. são controlados. Outros exemplos desses trabalhos são as técnicas baseadas exclusivamente em homografia, e.g., (BENHIMANE E MALIS, 2006). Embora elas possam controlar todos os seis g.d.l. de um robô holonômico e não precisem de informações métricas acerca do objeto observado, elas são projetadas para lidar apenas com objetos planares ou deslocamentos puramente rotacionais. De maneira mais abrangente, as técnicas de servovisão direta (DVS) (SILVEIRA E MALIS, 2012b) e a direta desacoplada (DDVS) (SILVEIRA *et al.*, 2013a) podem ser utilizadas com objetos planares e não planares, para movimentos quaisquer da câmera. Em todo caso, elas requerem que os objetos observados sejam rígidos.

A grande maioria das pesquisas sobre servovisão não métrica baseada em intensidade ainda são projetadas e aplicadas apenas a robôs holonômicos, e.g., braços robóticos. Os robôs não holonômicos são fundamentalmente objetos de pesquisa sobre servovisão métrica baseada em características visuais (TSAKIRIS *et al.*; SILVEIRA *et al.*; MAYA-MENDEZ *et al.*; BENHIMANE *et al.*, 1998; 2001b; 2006; 2005b). A formulação proposta por Morin e Samson acerca de veículos que possuam cinemática de um unicycle (ou monociclo), em (MORIN E SAMSON, 2008), abriu um leque de questionamentos e contribuiu para verificar a viabilidade do uso das técnicas *DVS* e *DDVS* em veículos não holonômicos, em particular aos veículos diferenciais. Certamente que a obtenção de resultados positivos, expande a proposta inicial das técnicas. Estas soluções possibilitarão, ainda, ensejar o controle em outros sistemas eletromecânicos mesmo que estes apresentem

alguma restrição holonômica.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivos principais:

- aplicar as técnicas de servovisão direta e direta desacoplada para a tarefa de posicionamento de plataforma experimental cuja mobilidade é equivalente a de um monociclo;
- aplicar as técnicas de servovisão direta e direta desacoplada para a tarefa de perseguição de objetos móveis utilizando uma plataforma experimental cuja mobilidade é equivalente a de um monociclo;
- verificar o comportamento das técnicas supracitadas em uma plataforma experimental;
- comparar os comportamentos das técnicas supracitadas entre si;

1.4 Plataforma experimental

Esta seção é reservada à descrição da plataforma experimental controlada de maneira autônoma. Sua estrutura é formada por um veículo diferencial robótico; um sensor visual facilmente encontrado no mercado e um atuador que interliga este sensor ao robô.

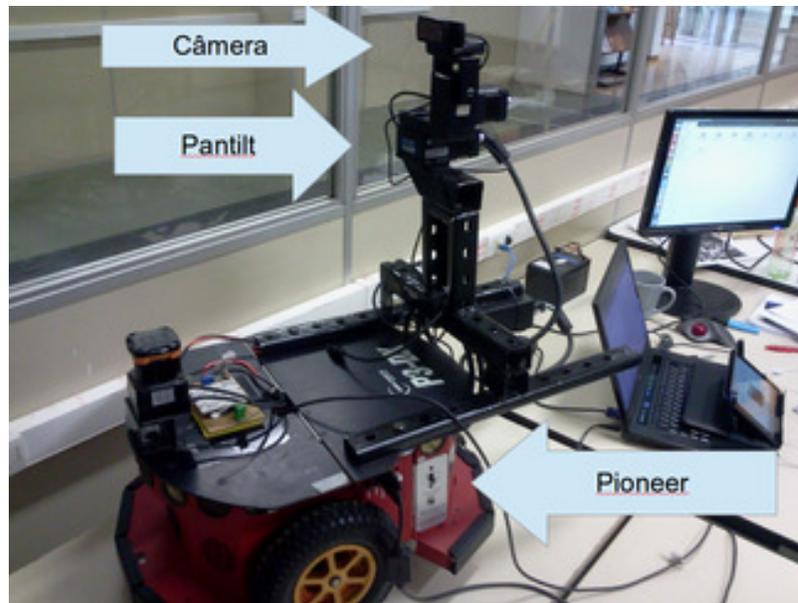
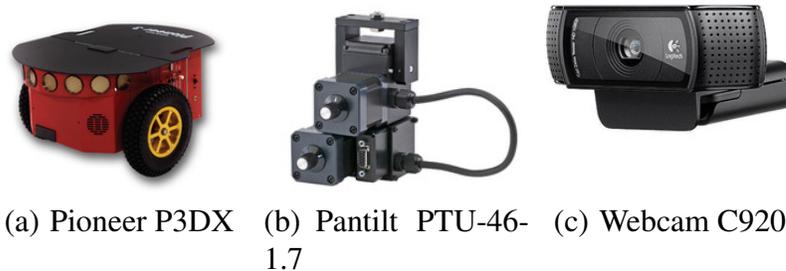
1.4.1 Hardware

O veículo utilizado no teste é um robô do modelo Pioneer P3-DX, conforme mostrado na figura 1.1(a). Este possui dois motores elétricos alinhados em um mesmo eixo, sendo este eixo a restrição holonômica do veículo quando ele percorre o plano (restrição transversal). A roda livre do tipo castor é afixada em aproximadamente 30 cm fora do eixo dos atuadores para manter a estrutura estável e permitir que o robô percorra ambientes com pequeninas disformidades.

Os motores pertencentes ao robô são comumente conhecidos como servomotores, pois atuam em malha fechada para garantir o controle de velocidades. Esta retro-alimentação faz parte de uma outra malha fechada cujo objetivo é garantir que ambos os motores atuem com as velocidades adequadas para que o veículo tenha movimentos longitudinais, rotacionais ou ambos. O único recurso disponível para os usuários é a imposição da velocidade que o veículo deve ter por meio dos movimentos de translação e rotação do veículo. Todo o controle de velocidade rotacional dos rotores

¹ acontecem por meio de *encoders*, um para cada motor; estes sensores possuem 500 pontos de leitura, perfazendo uma leitura a cada $0,72^\circ$ de rotação do rotor.

A comunicação física entre o computador e o controlador do Pioneer ocorre por meio de um cabo USB-RS232 e a comunicação lógica é dada pelo *driver* p2os. Este modelo de veículo possui outras características. Todavia, como não foram utilizadas de forma direta, não serão aqui mencionadas.



(d) Plataforma experimental

Figura 1.1: Plataforma experimental e seus componentes

O *pan-tilt*, modelo PTU-46-1.7 se comunica fisicamente com o computador através de um controlador. Este é conectado ao computador por um cabo USB-RS232, como mostrado na figura 1.1(b). Estes atuadores são construídos por meio de motores de passo, e eles possuem excelência

¹Rotor corresponde a parte girante de um motor, a parte estática é chamada de estator; o motor é dado pela combinação do estator e do rotor.

em mover-se precisamente a valores predeterminados pela sua fabricação. Para informações acerca do assunto vide (BOLTON, 2010).

Neste modelo, o *pan* rotaciona $0,013^\circ$ a cada passo dado, ou seja, este tipo de atuador não girará valor menor do que $0,013^\circ$ ou, ainda, valores intermediários entre um passo e outro, pois o passo é a menor angulação que o sistema pode girar. Este tipo de mecanismo é excelente para mover-se precisamente em questão de giro. Tanto o controle de posição como um possível controle de velocidade deste tipo de equipamento se dá por meio de *software*.

O sensor visual utilizado é uma câmera de perspectiva convencional, também conhecida como câmera de orifício, modelo HD Pro webcam C920, figura 1.1(c), da Logitech. Este dispositivo possui resolução *Full HD*, cuja comunicação é estabelecida via USB, utilizando o modo de dispositivo de vídeo *UVC*. Possui resolução muito boa quando comparada as câmeras de resolução *VGA*.

1.4.2 Software

Para gerir a plataforma robótica, foi utilizado o ROS (Sistema Operacional de Robôs, do inglês - *Robot Operating System*), versão *Hydro Medusa*. ROS é um arcabouço de *software* baseado em computação distribuída cujo objetivo é operar várias tarefas em paralelo ou em um mesmo período de tempo. Isto permite gerir atuadores, sensores e processamento de dados simultaneamente, utilizando conceitos de nós.

Sua licença é aberta (do inglês, *open source*) e é desenvolvida para fins de pesquisa em universidades, assim como, para a indústria em geral; ou, ainda, para a área educacional e entretenimento. O ROS possui flexibilidade na sua programação, podendo utilizar as linguagens C/C++ e Python. As imagens utilizadas para controlar o veículo vieram da interação do arcabouço ROS, bibliotecas e *drivers* desenvolvidos por parceiros ROS, bem como de bibliotecas previamente desenvolvidas pelo grupo de colaboradores do Centro Tecnológico da Informação Renato Archer de Campinas/SP (CTI/SP).

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto com mais 5 capítulos. O capítulo 2 trata da fundamentação teórica acerca de visão computacional e destacando os princípios básicos utilizados pela servovisão para mapeamento de informações de interesse. O capítulo 3 apresenta a teoria consolidada das técnicas de servovisão utilizadas no presente trabalho. O capítulo 4 explicita as hipóteses empregadas para aplicar os métodos de servovisão em sistemas não holonômicos equiparadas a cinemática de

um monociclo. O capítulo 5, por meio dos resultados obtidos, analisa os dados obtidos a partir das aplicações das técnicas de servovisão na tarefa de posicionamento; além disso, introduz estudos iniciais voltados ao rastreamento de objetos móveis, que foram desempenhados sem utilizar qualquer tipo de técnica que elimine o erro de estado estacionário, por exemplo, integradores. O capítulo 6 apresenta as considerações finais relativos ao trabalho.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma experiência nunca é um fracasso,
pois sempre vem demonstrar algo.

Thomas Edson

Neste capítulo são abordadas algumas noções acerca da formação da imagem a partir do conceito de óptica e seu modelamento na área de visão computacional. Nesta perspectiva, serão introduzidos alguns conceitos básicos geometria “epipolar”, calibração de câmeras e estimação paramétrica.

2.1 Modelo de câmera de orifício

As câmeras fotográficas de orifício (do inglês, *pin-hole*) — ou também, câmeras estenopeicas — são dispositivos que originalmente não possuem qualquer tipo de lente seja ela convergente, seja ela divergente ou ainda, outro tipo de lente; o seu funcionamento se baseia, apenas, no transpassar da luz, exclusivamente, através de um furo tão pequeno quanto a cabeça de um alfinete; estes feixes de luz ao atravessar este pequeno buraco colidirão em um anteparo, resultando, assim, na formação da imagem invertida. Este anteparo delimitado fisicamente pelas dimensões de um sensor¹, pertence ao plano imagem e está localizado na parte interna da câmera e oposta ao orifício.

A figura 2.1², ilustra a projeção do objeto no anteparo. O furo é definido como o centro focal da câmera. A distância entre o anteparo da câmera, pertencente ao plano imagem, e o furo é chamado de distância focal e ela possui valor f .

¹Este sensor pode ser papel sensível a luz, pode ser outro tipo de material conhecido como filme ou, ainda, sensores eletrônicos.

²A imagem foi retirada do blog Áurea Fotográfica, escola de fotografia no endereço eletrônico: https://fotografiafacil.files.wordpress.com/2010/09/camara_escura.jpg.

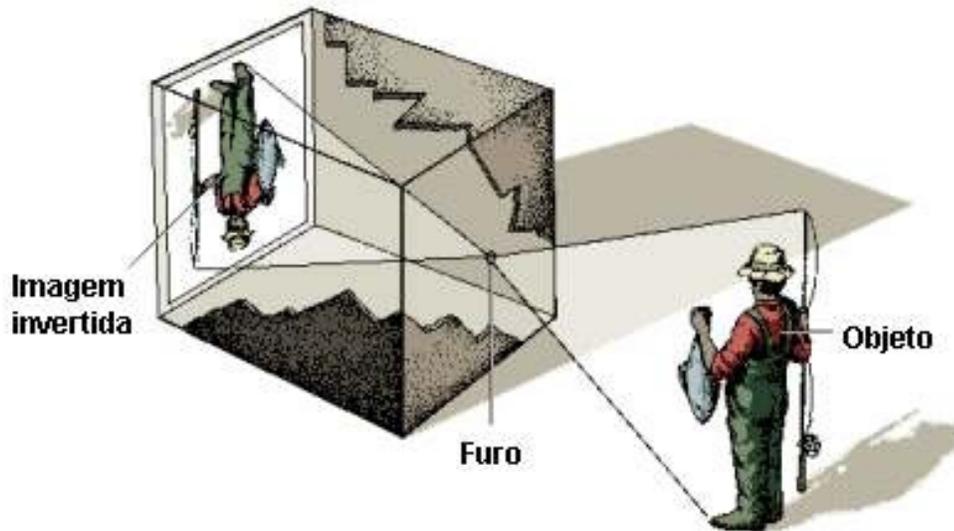


Figura 2.1: O funcionamento da câmera de orifício

Para o desenvolvimento do modelo de câmera de orifício, utilizou-se um artifício geométrico. Foi inserido um plano paralelo ao plano imagem e este será chamado de anteparo projetivo ou plano Π . A área do anteparo projetivo possui as mesmas dimensões do anteparo projetivo. Além disso, o centro focal está entre estes dois planos, imagem e Π , ou seja, entre os anteparos, e concomitantemente equidistante dos mesmos. Logo, o plano Π é posicionado à distância de $2f$ do plano imagem e a distância f do centro focal.

Os feixes de luz que colidem no anteparo do plano imagem obrigatoriamente terão atravessado o anteparo projetivo; como estes anteparos estão equidistantes do centro focal, infere-se que ambas projeções da imagem serão idênticas, ressalvadas que a sua projeção no plano imagem estará invertida, tanto em relação ao anteparo projetivo quanto ao mundo real.

Na figura 2.2, é ilustrado o comportamento do ponto no espaço 3D, definido por $\mathbf{P} = [P_x, P_y, P_z, 1] \in \mathbb{R}^4$, sobre o anteparo projetivo. Esta projeção gera o ponto $\mathbf{p} = [p_u, p_v, 1] \in \mathbb{P}^2$, em coordenadas normalizadas no plano. E o prolongamento do segmento de reta que passa por \mathbf{P} e \mathbf{p} concentra-se no centro focal \mathbf{C} , assim como todos os os feixes de luz que atravessam o anteparo projetivo são aglutinados no centro focal.

O centro focal \mathbf{C} corresponde a origem do espaço Euclidiano em relação ao cenário que a câmera está imersa. O ponto $\mathbf{o} = [o_x, o_y, 1] \in \mathbb{R}^3$, em coordenadas normalizadas, é chamado de centro da câmera ou ponto principal e quando em condições ideais pertencerá ao eixo \vec{z} do referencial Euclidiano. Ao combinar o centro de câmera com a técnica de semelhança de triângulos é possível construir o mapeamento entre o o espaço Euclidiano e o plano Π em coordenadas normalizadas pela profundidade P_z do ponto \mathbf{P} , esta relação é dada pela equação a seguir.

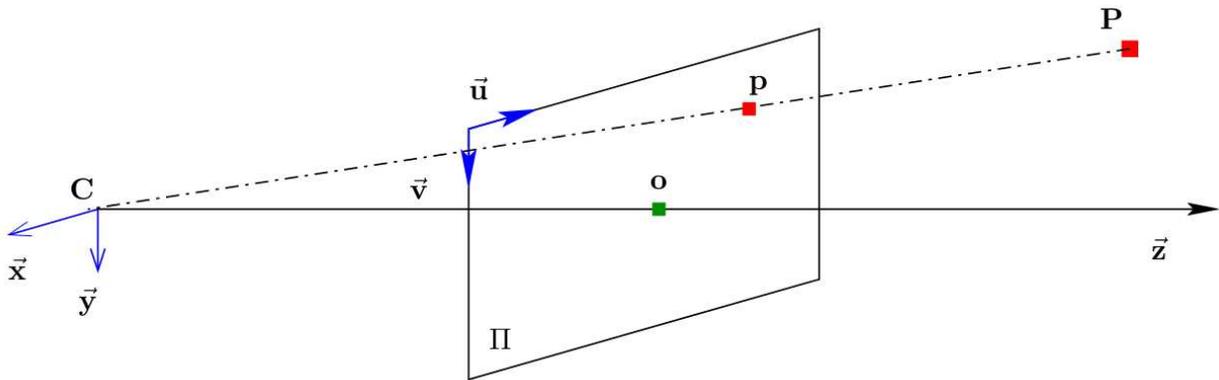


Figura 2.2: Projeção do ponto P sobre o plano Π

$$P_z \underbrace{\begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ 1 \end{bmatrix}}_{\text{coord. normalizada}} = \begin{bmatrix} fP_x + o_xP_z \\ fP_y + o_yP_z \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & o_x & 0 \\ 0 & f & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (2.1)$$

A equação 2.1 modela o mapeamento do plano real para o plano Π realizado por meio do sensor de câmeras digitais. Seja este sensor de tecnologia CCD (do inglês, *charge-coupled device*), seja ele de tecnologia CMOS (do inglês, *complementary metal-oxide semiconductor*), ou ainda, de outro tipo de tecnologia, são estruturas formadas por pequenas áreas δA , ou ainda, chamado de pixels, $\mathbf{p} \in \mathbb{P}^2$, cuja premissa assume que estas áreas são idênticas.

A figura 2.3 apresenta as principais informações físicas do sensor visual, tais como: c e l que correspondem as medidas totais em milímetros que o sensor possui; C e L definem a quantidade total de pixels contidos por linha e coluna do sensor; $m_u = \frac{L}{c}$ e $m_v = \frac{C}{l}$ armazena a razão entre a quantidade de pixels pelas unidades de comprimento e largura, o que resulta na unidade pixel/mm. Isto é, enquanto os parâmetros c , m_u e C apresentam informações pertinentes na disposição longitudinal do sensor, os demais parâmetros correspondem à posição transversal.

Dessa maneira, o sensor é utilizado para amostrar uma matriz $C \times L$ intensidades de pixel de uma região do espaço 3D, cujo pixel $\mathbf{p} = [u, v, 1]$ armazena a composição das cores — ou, ainda, a cor quando se tratar da escala de cinza — de uma região contínua do espaço 3D. Os parâmetros $u = 1, 2, \dots, C$ e $v = 1, 2, \dots, L$ — C e $L \in \mathbb{Z}_+^*$ — são combinados para acessar o respectivo elemento de área, δA . Logo, o centro da câmera definido por $\mathbf{p}_o = [u_o, v_o, 1]$ quando coincidente com o eixo \vec{z} , do espaço Euclidiano, terão os respectivos valores: $u_o = \frac{C}{2}$ e $v_o = \frac{L}{2}$.

Assim, podemos atribuir à imagem mensurada pelo sensor da câmera uma função de inten-

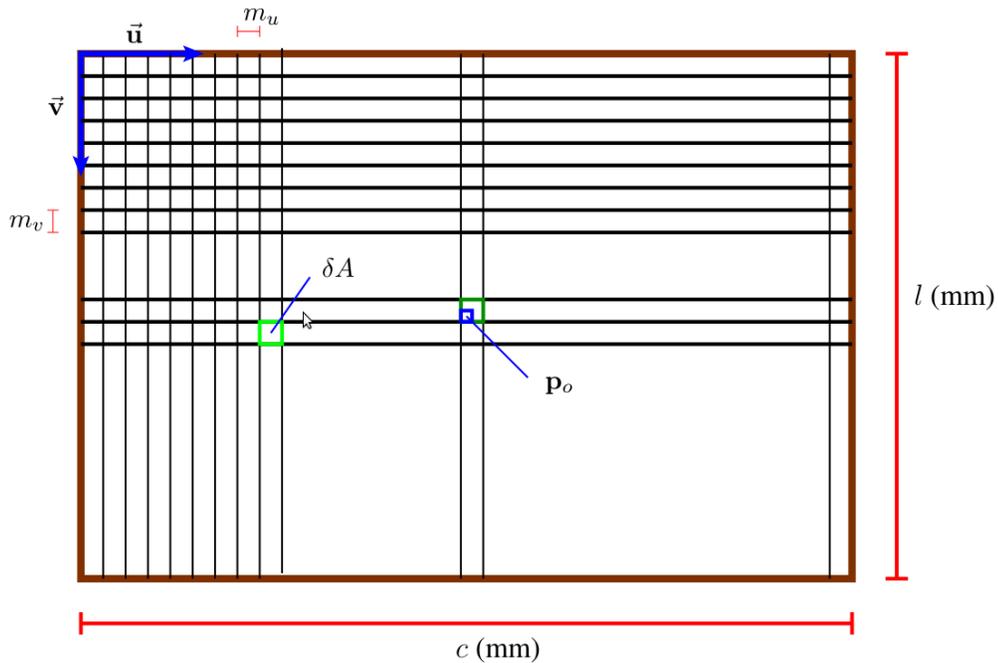


Figura 2.3: Plano imagem discretizado

tidade $\mathcal{I} : \Omega \subset \mathbb{Z}^2 \rightarrow \mathbb{R}_+$ e $\mathbf{p} \mapsto \mathcal{I}(\mathbf{p})$ (SILVEIRA, 2014b), cujo $\Omega = [1, L] \times [1, C]$ define o tamanho da imagem, ou seja, a quantidade de pixels que a compõem, sendo esta, comumente, conhecida como resolução do sensor. As câmeras são facilmente encontradas no mercado com resoluções VGA, por exemplo, $L = 640$ pixels e $C = 480$ pixels (proporção da imagem 4:3), e superiores, por exemplo, com $L = 1080$ pixels e $C = 720$ pixels ou $L = 1920$ pixels e $C = 1080$ pixels (seguindo a proporção 16:9).

É possível inferir, ainda, que entre um pixel e outro, nas regiões representadas pelas linhas em preto tanto na horizontal e como na vertical, as informações não serão amostradas, figura 2.3. Todavia, estas informações podem ser recuperadas por meio de técnicas, tais como: interpolação de imagens bilinear ou bi-cúbicas, (SZELISKI; SILVEIRA, 2005; 2014b). Além disso, é possível utilizar estes métodos para realocar as intensidades de pixels cujas coordenadas não possuam valores inteiros.

Adicionalmente, fatores de fabricação e montagem destas câmeras influenciam na amostragem correta do espaço 3D inserido sobre o plano Π . Estes parâmetros podem ser estimados por técnicas de calibração, por exemplo, propostas por Tsai (1987) e Zhang (2000). O modelo de calibração convencional é descrito pela matriz $\mathbf{K}^{3 \times 3} \in \mathbb{R}^3$ de posto 3 e triangular superior, transcrito na equação abaixo. Os parâmetros $\alpha_u = fm_u$ e $\alpha_v = fm_v$, correspondem às distâncias focais f em pixels nas direções \vec{u} e \vec{v} — referente a figura 2.2 —, respectivamente. O fator de obliquidade

indica quão próximos da ortogonalidade estão os eixos \vec{u} e \vec{v} do sensor da câmera modelado por $\alpha_{uv} \propto \tan \theta$; quando $\theta \approx 90^\circ$ ter-se-á $\alpha_{uv} = 0$, sendo este o caso ideal cuja tendência é observada nas câmeras digitais modernas (SILVEIRA, 2014b).

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_{uv} & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (2.2)$$

O modelo desenvolvido a partir do sistema de coordenadas do centro da câmera \mathbf{C} pode ser reescrito a partir de um outro sistema de coordenadas rotacionado e/ou translacionado \mathbf{C}' , vide equação (2.3), cujos parâmetros $\mathbf{R} \in \mathbb{SO}(3)$ e $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$, representam, respectivamente, a rotação e a translação entre os sistemas de coordenadas \mathbf{C} e \mathbf{C}' cujas informações correspondem aos parâmetros geométricos intrínsecos e extrínsecos da câmera e da sua pose, respectivamente.

$$P_z \mathbf{p} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \mathbf{P} \quad (2.3)$$

2.2 Geometria epipolar entre duas imagens

Hartley e Zisserman (2004), definem a geometria “epipolar” como sendo a geometria projetiva intrínseca e extrínseca entre duas vistas, cuja relação depende apenas dos parâmetros internos da câmera e a pose relativa entre o sensor e o objeto. A figura 2.4 exemplifica as duas vistas por meio dos planos projetivos Π_α e Π_β ; os parâmetros \mathbf{R} e \mathbf{t} são utilizados para modelar a transformação entre os dois sistemas de coordenadas — cujas referências são os centros focais sejam de duas câmeras, seja de uma câmera reposicionada para observar a figura geométrica $\overline{ABCD} \in \Phi$ de um outro ponto de vista.

A figura 2.4 exemplifica, ainda, um segmento de reta pontilhado formado pelos centros focais que intersepta os planos Π_α e Π_β , dessas intersecções gerará um ponto, em cada um dos planos, chamado de “epipolo”, e_{Π_α} e e_{Π_β} , parâmetro importante para o presente trabalho. As imagens a surgir nos anteparos projetivos dos planos Π_α e Π_β são definidas pelas funções \mathcal{I}_α e \mathcal{I}_β , respectivamente.

A figura 2.5³ exemplifica de maneira ampla duas projeções de um objeto amorfo. Nota-se que o plano Φ , é o plano dominante dentre os infinitos planos que cortam transversalmente o objeto, por esta razão todas as informações serão referenciadas a partir do plano dominante.

Inferre-se ainda, na figura 2.5, a diferença entre os pontos \mathbf{m}^* e \mathbf{m}_Φ^* , pertencentes ao objeto,

³Imagem cedida por Geraldo Figueiredo da Silveira Filho, coorientador deste trabalho.

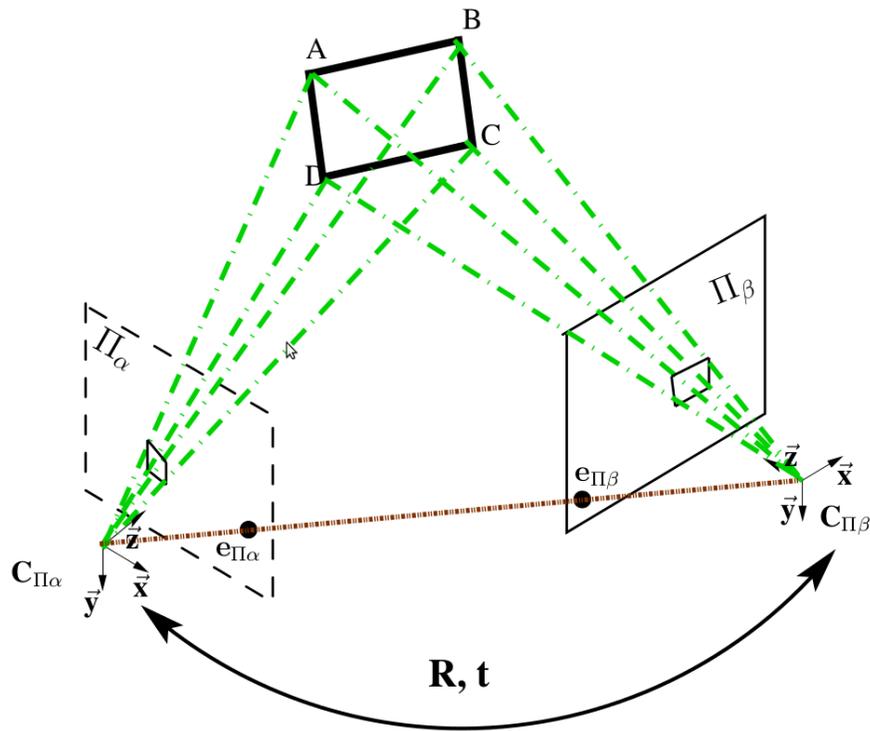


Figura 2.4: Geometria epipolar

e suas respectivas projeções em Π_α através de \mathbf{p}_c^* e \mathbf{p}_Φ^* e em Π_β como \mathbf{p}_c e \mathbf{p}_Φ . As disposições destas informações surgem por consequência de este objeto não ser planar; logo, esta característica amorfa influencia na observância do objeto por uma ou duas câmeras em poses distintas.

2.2.1 Descrição Euclidiana

A abordagem Euclidiana dentro da geometria “epipolar” adequando sua modelagem ao plano discreto pode ser compreendida pela relação (2.4). Esta função é desenvolvida a partir da equação do movimento dos corpos rígidos, do teorema de Tales e do modelo de câmera de orifício cujos parâmetros intrínsecos são modelados pela matriz \mathbf{K} , (SILVEIRA E MALIS, 2012a).

$$\mathbf{p} \propto \mathbf{K}\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{p}^* + \frac{\mathbf{K}\mathbf{t}}{z^*} \quad (2.4)$$

Da equação de corpos rígidos extraí-se as seguintes premissas: o corpo não pode sofrer deformação ou alterações físicas quaisquer durante todo o decorrer de tempo; quando o corpo for deslocado por meio de movimento translacional e/ou rotacional, sabe-se que todos os pontos deste corpo serão proporcionalmente deslocados. O teorema de Tales relaciona as características proporcionais

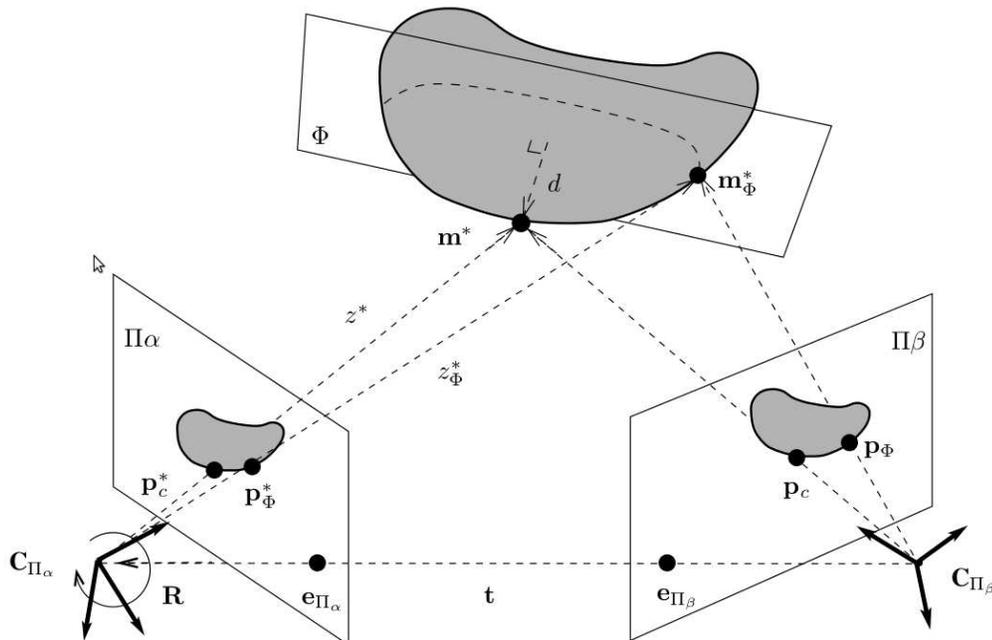


Figura 2.5: Geometria entre duas imagens de um objeto não planar.

entre os seguimentos de retas criados a partir de duas retas concorrentes, concomitantemente, ao serem interceptadas por feixes de retas paralelas. Pode-se inferir, ainda, que as propriedades angulares da matriz \mathbf{R} permanecem as mesmas, desde que, as devidas proporções do teorema sejam mantidas. Por fim, a matriz \mathbf{R} e o vetor \mathbf{t} guardam as informações de rotação e translação entre dois campos de visão de uma ou duas câmeras em relação ao objeto, como foi verificado na seção 2.2 e suas ilustrações. O parâmetro z^* corresponde à profundidade existente entre o centro focal da câmera até seu ponto correspondente no espaço 3D. O símbolo \propto indica a proporção direta existente entre duas grandezas.

2.2.2 Descrição projetiva

A abordagem dada a imagens projetivas através da geometria “epipolar”, e restringidas aqui a imagens digitais, relaciona as projeções de objetos planares e não planares em duas cenas distintas a partir do plano dominante, nos quais alguns parâmetros são mantidos invariantes ao longo da transformação, tais como: retas colineares e concorrentes; retas tangentes; o ponto de inflexão de uma curva; dentre outros (HARTLEY E ZISSERMAN, 2004). A transformação projetiva possui oito graus de liberdade, é modelada pela homografia projetiva $\mathbf{G}_{3 \times 3} \in \mathbb{S}\mathbb{L}(3)$, sendo esta não singular. A relação existente entre as imagens está transcrita na equação a baixo.

$$\mathbf{p} \propto \mathbf{G}\mathbf{p}^* + \rho^*\mathbf{e} \quad (2.5)$$

O paralaxe⁴ $\rho^* \in \mathbb{R}$, corresponde a profundidade proporcional existente entre o ponto \mathbf{m}^* , que está sobre a superfície do objeto, em relação ao plano definido como dominante, Φ , cuja projeção modelada pela função $\mathcal{I}_\alpha \in \Pi_\alpha$ recairá sobre o pixel \mathbf{p}^* , vide figura 2.5. Sabe-se, ainda, que ρ^* é inversamente proporcional a profundidade do centro focal ao ponto \mathbf{m}^* . O termo $\mathbf{e} = [e_u, e_v, 1]^\top \in \mathbb{P}^2$ corresponde as coordenadas do “epipolo” presente na imagem corrente. Portanto, se $\rho^* = 0$, isto implica que \mathbf{m}^* pertence ao plano dominante. É possível inferir, ainda, que se todos os pontos pertencerem ao plano dominante, então o objeto é planar e conseqüentemente todos seus pontos tem paralaxe igual a zero.

A relação (2.5) abrange objetos planares e não planares. Contudo, existem modelos que são restritas a objetos planares, ou seja, para $\rho^* = 0$, como em (HARTLEY E ZISSERMAN; MALIS *et al.*, 2004; 1999). As as definições 2.1 e 2.2, e o teorema 2.1 são transcrições extraídas de Hartley e Zisserman (2004), no qual é possível encontrar essas relações utilizadas exclusivamente para objetos planares.

Definição 2.1 (Hartley e Zisserman (2004)). Existirá a relação de homografia entre duas projeções provenientes de um objeto planar quando: a função que mapeia o plano Π_α para o plano Π_β permitir escolher três pontos quaisquer desde que estes pontos na forma de $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ e $\mathbf{A}_3 \in \Pi_\alpha$ sejam colineares; conseqüentemente, as homografias de $h(\mathbf{A}_1), h(\mathbf{A}_2)$ e $h(\mathbf{A}_3)$, serão igualmente colineares. Devendo, ainda, existir a função mapeamento inverso $h^{-1}(\mathbf{x})$ capaz de fazer o processo reverso.

Definição 2.2 (Hartley e Zisserman (2004)). Uma transformação projetiva planar é uma transformação linear de um vetor homogêneo representado por uma matriz não singular 3×3 :

$$\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Teorema 2.1 (Hartley e Zisserman (2004)). Um mapeamento h de $\mathbb{P}^2 \rightarrow \mathbb{P}^2$ é uma relação entre duas imagens, se somente se, existir uma matriz $\mathbf{H}_{3 \times 3}$ não singular; para qualquer ponto em \mathbb{P}^2 que possa ser representada por um vetor \mathbf{a} e, obrigatoriamente, sendo verdade que $h(\mathbf{A}) = \mathbf{H}\mathbf{A}$.

Demonstração 2.1 (Hartley e Zisserman (2004)). Seja $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ e \mathbf{A}_3 pontos pertencentes a uma reta \mathbf{r} , ou seja, $\mathbf{r}^\top \mathbf{A}_i = 0$ para $i = 1, \dots, 3$. Seja \mathbf{H} matriz 3×3 e não singular. Além disso, verifica-se,

⁴Deslocamento aparente de um objeto, quando se muda o ponto de observação.(DA LÍNGUA PORTUGUESA, 2009)

ainda, que $\mathbf{r}^\top \mathbf{H}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{A}_i = 0$. Conseqüentemente, para qualquer $\mathbf{H} \mathbf{A}_i$ corresponde a $\mathbf{r}^\top \mathbf{H}^{-1}$; pois, a colinearidade é preservada pela transformação.

2.3 Registro direto de imagens

O registro direto de imagens é o procedimento utilizado para a obtenção simultânea dos parâmetros geométricos $\mathcal{G} = \{\mathbf{G}, \mathbf{e}, \rho^*\}$ que relacionam duas imagens não calibradas. Ele consiste em encontrar os parâmetros que melhor transformam a imagem corrente $\mathcal{I}(\mathbf{p})$ de forma que as intensidades se casem com suas correspondentes na imagem de referência $\mathcal{I}^*(\mathbf{p}^*)$.

Portanto, torna-se necessário definir um modelo adequado de transformação geométrica projetiva (do inglês, *warping operator*) (BACHTA *et al.*; MALIS *et al.*, 2010; 2010) de imagem. Este modelo pode ser definido a partir da relação geral (2.5) combinada com a transformação geométrica projetiva descrito nas equações (2.7) e (2.8).

$$\mathbf{w}: \text{SL}(3) \times \mathbb{P}^2 \times \mathbb{R} \times \mathbb{P}^2 \rightarrow \mathbb{P}^2 \quad (2.7)$$

$$(\mathcal{G}, \mathbf{p}^*) \mapsto \mathbf{p} = \mathbf{w}(\mathcal{G}, \mathbf{p}^*) \quad (2.8)$$

A forma explícita da equação (2.8) foi discriminada abaixo.

$$\begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_u^* \\ p_v^* \\ 1 \end{bmatrix} + \rho^* \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ 1 \end{bmatrix}}{g_{31} p_u^* + g_{32} p_v^* + g_{33} + \rho^*} \quad (2.9)$$

Por conseguinte, a ação deste modelo de transformação nos pixels é definida pela equação abaixo.

$$\mathcal{I}_{\mathcal{G}}(\mathcal{G}, \mathbf{p}_i^*) = \mathcal{I}(\mathbf{p}) = \mathcal{I}(\mathbf{w}(\mathcal{G}, \mathbf{p}_i^*)) \quad (2.10)$$

Um sistema típico de registro direto geométrico de imagens não calibradas pode ser formulado como um problema de otimização não linear descrito na equação (2.11) cujo objetivo é minimizar a norma do vetor das diferenças das imagens $\mathbf{d}_i(\mathcal{G}) = \{d_i(\mathcal{G})\}_{i=1}^n$, enfatizado na equação (2.12).

$$\min_{\mathcal{G}=\{\mathbf{G}, \mathbf{e}, \rho_i^*\}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \underbrace{[\mathcal{I}_{\mathcal{G}}(\mathcal{G}, \mathbf{p}_i^*) - \mathcal{I}(\mathbf{p}_i^*)]^2}_{d_i(\mathcal{G})} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{d}_i(\mathcal{G}) = \begin{bmatrix} \mathcal{I}_{\mathcal{G}}(\mathcal{G}, \mathbf{p}_1^*) - \mathcal{I}(\mathbf{p}_1^*) \\ \mathcal{I}_{\mathcal{G}}(\mathcal{G}, \mathbf{p}_2^*) - \mathcal{I}(\mathbf{p}_2^*) \\ \vdots \\ \mathcal{I}_{\mathcal{G}}(\mathcal{G}, \mathbf{p}_n^*) - \mathcal{I}(\mathbf{p}_n^*) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n. \quad (2.12)$$

Dado a necessidade de satisfazer as restrições de tempo real nos sistemas robóticos, em geral apenas métodos locais de otimização não linear podem ser utilizados. Assim, este problema pode ser resolvido por técnicas iterativas convencionais, e.g., Gauss–Newton. Para uma solução com maiores domínios e taxas de convergência, o leitor pode consultar (SILVEIRA E MALIS, 2010).

Observação 2.1. Dado que o modelo de transformação geométrica (2.7) foi definido a partir da descrição projetiva da geometria epipolar (2.5), não existem parâmetros métricos envolvidos no problema de otimização. As técnicas de servovisão a serem apresentadas no próximo capítulo utilizam o registro direto aqui definido para estimar os parâmetros necessários. Elas são chamadas, portanto, de técnicas de servovisão não métrica e baseadas em intensidade de pixels.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE SERVOVISÃO NÃO MÉTRICA BASEADA EM INTENSIDADE

Porque o medo mata tudo, Mo lhe dissera um dia, a razão, o coração e até mesmo a fantasia.

Cornelia Funke - Coração de tinta

Este capítulo é moldado de maneira que abarque as duas técnicas de servovisão direta e seu desacoplamento. Elas são ditas diretas, pois exploram diretamente as intensidades dos pixels sem etapas intermediárias. Ressalvadas, ainda, a dispensa de quaisquer informações métricas; além disso, estas técnicas foram desenvolvidas para controlar sistemas robóticos holonômicos, ou seja, de 6 graus de liberdade.

3.1 Servovisão direta

Esta seção apresenta a técnica de controle por realimentação visual chamada de servovisão direta (do inglês *Direct Visual Servoing – DVS*) proposta por Silveira e Malis (2012b). A técnica DVS é inspirada pela técnica de servovisão não métrica baseada em homografia, cujos proponentes foram Benhimane e Malis (2006), projetada para objetos planares, e pela técnica de controle convencional baseada em pose (CHAUMETTE E HUTCHINSON, 2006b). O arranjo entre as vantagens dos métodos supracitados possibilita o controle no espaço não métrico, buscando uma trajetória ótima da câmera no espaço Euclidiano.

3.1.1 Erro de controle e algumas propriedades

O primeiro passo para construir o erro de controle consiste em normalizar os parâmetros projetivos \mathbf{G} , $\mathbf{e} \in \mathbb{P}^2$, $\mathbf{p}_c^{*1} \in \mathbb{P}^2$ por \mathbf{K} , matriz de calibração da câmera, vide (3.1), o processo foi discriminado nas equações abaixo.

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{G} \mathbf{K}, \quad (3.1)$$

$$\mathbf{e}' = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{e}, \quad (3.2)$$

$$\mathbf{m}^* = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}_c^*, \quad (3.3)$$

Definição 3.1 (Silveira *et al.* (2015)). O erro de controle representado por $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbb{R}^6$ é modelado pela equação (3.4), cujo termo $\boldsymbol{\varepsilon}_\omega$ corresponde ao erro rotacional e pode ser calculado a partir da matriz homografia $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ através das equações (3.5), (3.6), (3.7).

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_\nu \\ \boldsymbol{\varepsilon}_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{H} - \mathbf{I}) \mathbf{m}^* + \rho^* \mathbf{e}' \\ \vartheta \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{r} = \frac{1}{2} \text{vex}(\mathbf{H} - \mathbf{H}^\top) \quad (3.5)$$

$$\vartheta = \begin{cases} \text{real}(\text{asin}(\|\mathbf{r}\|)), & \text{se } \text{tr}(\mathbf{H}) \geq 1 \\ \pi - \text{real}(\text{asin}(\|\mathbf{r}\|)), & \text{se } \text{tr}(\mathbf{H}) < 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\mathbf{r}}{\|\mathbf{r}\|} \quad (3.7)$$

O termo $\boldsymbol{\mu}$, equação (3.4), pode ser interpretado como um “eixo projetivo de rotação” unitária; ϑ como o “ângulo projetivo de rotação”. Se $\|\mathbf{r}\| = 0$, então a solução de $\boldsymbol{\mu}$ é indeterminada e poderá ser escolhido arbitrariamente, por exemplo, $\boldsymbol{\mu} = [0; 0; 1]^\top$.

Lemma 3.1 (Silveira *et al.* (2015)). [Erro de controle e a pose da câmera] O erro de controle (3.4) pode ser expresso em função da pose da câmera — por exemplo, por meio da rotação $\mathbf{R} \in \mathbb{S}\mathbb{O}(3)$

¹O ponto de controle é um pixel da imagem e não necessariamente um ponto notável, poderá ser escolhido de maneira que o paralaxe desse ponto em relação ao plano dominante seja zero. Entretanto, deve-se priorizar a escolha do ponto de controle próximo ao centro da imagem, pois isso reduz a possibilidade do objeto sair do campo de visão por razões oriundas dos erros de calibração da câmera e do robô. O fato de possuir alguma parte do objeto sob controle é uma característica atrativa do método. Técnicas de servovisão que a possui são mais robustas a esses erros de calibração (CHAUMETTE E HUTCHINSON, 2006b).

e da translação $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ — através das equações (3.8) e (3.9) e utilizando o plano dominante do objeto representado pelo vetor $\mathbf{q}^* \in \mathbb{R}^3$.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_v = ((\mathbf{R} - \mathbf{I}) \mathbf{m}^* + \mathbf{t}) / z^* \quad (3.8)$$

$$\mathbf{r} = \sin(\theta) \mathbf{u} + [\mathbf{q}^*]_{\times} \mathbf{t} / 2 \quad (3.9)$$

Demonstração 3.1 (Silveira *et al.* (2015)). A prova será iniciada a partir da relação projetiva geral (2.5), a qual será multiplicada pela esquerda por \mathbf{K}^{-1} , pela direita por \mathbf{K} e posteriormente, será utilizada a equação que define \mathbf{H} , equação (3.1), será obtido a equação abaixo para $\alpha = z/z^* > 0$.

$$\alpha \mathbf{m} = \mathbf{H} \mathbf{m}^* + \rho^* \mathbf{e}' \quad (3.10)$$

A expansão de $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ da equação (3.4) combinada com a equação (3.10) e o teorema de Thales resultará na equação (3.13).

$$\boldsymbol{\varepsilon}_v = \mathbf{H} \mathbf{m}^* + \rho^* \mathbf{e}' - \mathbf{m}^* \quad (3.11)$$

$$= \alpha \mathbf{m} - \mathbf{m}^* \quad (3.12)$$

$$= (\mathbf{m} - \mathbf{m}^*) / z^* \quad (3.13)$$

Finalmente, substituindo a equação do movimento de corpos rígidos $\mathbf{m} = \mathbf{R} \mathbf{m}^* + \mathbf{t}$ na equação (3.13), obtém-se a relação (3.8) entre $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ e a pose da câmera. Para o erro de controle $\boldsymbol{\varepsilon}_\omega \in \mathbb{R}^3$, considere a possível caracterização (FAUGERAS *et al.*, 2001) de \mathbf{G} em (2.5), dada por $\mathbf{G}_\infty \propto \mathbf{K} \mathbf{R} \mathbf{K}^{-1}$; $\mathbf{e} \propto \mathbf{K} \mathbf{t}$; $\mathbf{q}^* \in \mathbb{R}^3$. Sendo \mathbf{q}^* uma representação na imagem de referência da linha no infinito do plano dominante do objeto.

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_\infty + \mathbf{e} \mathbf{q}^{*\top} \quad (3.14)$$

Agora, na equação (3.14) multiplique pela esquerda em ambos os lados por \mathbf{K}^{-1} e pela direita por \mathbf{K} ; além disso, relacione \mathbf{H} da equação (3.1) de maneira a obter a equação (3.15) cujo termo $\mathbf{q}^{*\prime} = \mathbf{K} \mathbf{q}^*$.

$$\mathbf{H} = \mathbf{R} + \mathbf{t} \mathbf{q}^{*\prime\top} \quad (3.15)$$

Ao aplicar o operador inverso na equação (3.5) será obtido a equação abaixo.

$$[\mathbf{r}]_{\times} = (\mathbf{H} - \mathbf{H}^{\top})/2 = (\mathbf{R} + \mathbf{t} \mathbf{q}^{*\prime\top} - \mathbf{R}^{\top} - \mathbf{q}^{*\prime} \mathbf{t}^{\top})/2 \quad (3.16)$$

Por meio da equação (3.17), obtida da formula de Rodriguez, com a equação (3.18) é lograda a equação (3.8).

$$\mathbf{R} - \mathbf{R}^{\top} = 2 \sin(\theta) [\mathbf{u}]_{\times} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{t} \mathbf{q}^{*\prime\top} - \mathbf{q}^{*\prime} \mathbf{t}^{\top} = [[\mathbf{q}^{*\prime}]_{\times} \mathbf{t}]_{\times} \quad (3.18)$$

A relação entre ϵ_{ω} e a pose da câmera é uma consequência direta da substituição das equações (3.17) e (3.18) na equação (3.16).

Corolário 3.1 (Silveira *et al.* (2015)). [Generalidade] O erro de controle não métrico modelado pela equação (3.4) é uma generalização do erro de controle baseado em homografia (BENHIMANE E MALIS, 2006) por englobar objetos não planares e deslocamentos quaisquer entre imagens. De fato, a equação (3.4) e a relação geral (2.5) não assumem que $\rho^* \mathbf{e} = \mathbf{0}$, como acontece em (BENHIMANE E MALIS, 2006).

3.1.2 Lei de controle e algumas propriedades

Considere uma câmera embarcada em um veículo holonômico, seis graus de liberdade, que é utilizada para observar um objeto amorfo, imóvel e rígido.

Definição 3.2 (Silveira e Malis (2012b)). Assuma que a câmera possua velocidades aos moldes de $\mathbf{v} = [\mathbf{v}^{\top}; \boldsymbol{\omega}^{\top}]^{\top} \in \mathbb{R}^6$; enquanto \mathbf{v} armazena as velocidades translacionais instantâneas, $\boldsymbol{\omega}$ armazena as velocidades rotacionais instantâneas. A proposta da lei de controle é apresentada na equação (3.19) cujo ganho $\boldsymbol{\Lambda}$ é definido na equação (3.20) para $\boldsymbol{\Lambda}_v > \mathbf{0}$ e $\boldsymbol{\Lambda}_{\omega} > \mathbf{0}$.

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\epsilon} \quad (3.19)$$

$$\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\boldsymbol{\Lambda}_v; \boldsymbol{\Lambda}_{\omega}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Lambda}_{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Teorema 3.1 (Silveira e Malis (2012b)). (Estabilidade Local): A lei de controle, equação (3.19), assegura estabilidade exponencial nas imediações do ponto de equilíbrio $\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{0}$ se o ponto de controle $\mathbf{p}_c^* \in \mathbb{P}^2$ é escolhido de tal forma que seu paralaxe for suficientemente pequeno, $\rho \approx 0$.

Demonstração 3.2 (Silveira e Malis (2012b)). A prova do teorema 3.1 consiste em analisar o sistema em malha fechada em torno da condição de equilíbrio. Ao realizar a diferenciação do erro de controle (3.4) em relação ao tempo e aplicar a lei de controle proposta em (3.19), então será obtida a equação (3.21) cujo termo $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ é dada pela equação (3.22) e para \mathbf{L}_ω dado pela equação (3.23). Estas equações são obtidas usando os resultados do Lema 3.1.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = [\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v^\top; \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_\omega^\top]^\top = \mathbf{L}[\mathbf{v}^\top; \boldsymbol{\omega}^\top]^\top = \mathbf{L}\mathbf{v} = \mathbf{L}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -\mathbf{I}/z^* & [\boldsymbol{\varepsilon}_v + \mathbf{m}^*]_\times \\ -[\mathbf{q}^{*\prime}]_\times/2 & -\mathbf{L}_\omega + [\mathbf{q}^{*\prime}]_\times[\mathbf{t}]_\times/2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{L}_\omega = \mathbf{I} - \sin(\theta)/2[\mathbf{u}]_\times - \sin^2(\theta/2)(2\mathbf{I} + [\mathbf{u}]_\times^2) \quad (3.23)$$

Ao linearizar a equação (3.21) em torno do ponto de equilíbrio é lograda a equação (3.24) cujos autovalores da matriz $\mathbf{L}|_{\boldsymbol{\varepsilon}=\mathbf{0}} \boldsymbol{\Lambda}$ são $-\lambda_\omega$, $-\lambda_v/z^*$ e dois pares de $-(\lambda_\omega z^* + \lambda_v \pm \sqrt{\Delta})/2z^*$, com $\Delta = \lambda_\omega^2 z^{*2} + \lambda_v^2 - 2\lambda_v \lambda_\omega z^*(1 - z^* \mathbf{q}^{*\prime\top} \mathbf{m}^*)$; por definição, $\lambda_v, \lambda_\omega, z^* > 0$. Portanto, se $\Delta < (\lambda_\omega z^* + \lambda_v)^2$ cuja manipulação fornece a equação (3.25), então todos os autovalores tem parte real estritamente negativa.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{L}|_{\boldsymbol{\varepsilon}=\mathbf{0}} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} -\lambda_v \mathbf{I}/z^* & \lambda_\omega [\mathbf{m}^*]_\times \\ -\lambda_v [\mathbf{q}^{*\prime}]_\times/2 & -\lambda_\omega \mathbf{I} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{q}^{*\prime\top} \mathbf{m}^* < 2 \quad (3.25)$$

A condição de estabilidade apresentado na inequação (3.25) expressa uma distância entre o plano de referência e o ponto 3D correspondente ao ponto de controle $\mathbf{p}^* \in \mathbb{P}^2$. Logo, essa condição é facilmente satisfeita se o ponto de controle é escolhido de tal forma que seu paralaxe seja suficientemente pequeno.

Corolário 3.2 (Silveira *et al.* (2015)). (Condição de paralaxe) O ponto de equilíbrio $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0}$ do sistema de controle em malha fechada sempre pode ser realizado localmente, o qual será exponencialmente estável. De fato, o plano dominante, por definição, atravessa o objeto. Assim, sempre existe pelo menos um ponto de controle $\mathbf{p}^* \in \mathbb{P}^2$ (3.1) cujo paralaxe é zero (e pode ser escolhido como ponto de controle).

Embora qualquer ponto com paralaxe nulo possa ser selecionado como ponto de controle, por motivações de robustez é pertinente que esse ponto esteja o mais próximo possível do centro da

imagem. Isso reduz a possibilidade do objeto sair do campo de visão devido a erros de calibração da câmera e do robô. O fato de possuir alguma parte do objeto sob controle é uma característica atrativa da abordagem de servovisão direta conferindo-lhe uma grande robustez.

3.2 Servovisão direta desacoplada

A técnica de servovisão direta desacoplada (*DDVS*), proposta por Silveira *et al.* (2013b), é uma expansão da técnica de servovisão direta (*DVS*), seção 3.1. No entanto, ela propõe o desacoplamento entre os movimentos translacionais dos rotacionais da câmera.

3.2.1 Erro de controle e algumas propriedades

A partir do erro de controle calculado em (3.4) é possível realizar a separação dos erros translacionais dos erros rotacionais.

Definição 3.3 (Silveira *et al.* (2013a)). O erro de controle desacoplado é definido por meio da equação (3.26) por meio da utilização de uma matriz constante $\mathbf{M}_{6 \times 6}$ e de posto 6, não nula, equação (3.27).

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{M}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.26)$$

A matriz \mathbf{M} é composta pelas matrizes antissimétricas $[\mathbf{m}^*]_{\times}$ e $[\mathbf{c}^*]_{\times}$, dos quais \mathbf{m}^* é determinado na equação (3.3). A escolha do vetor \mathbf{c}^* será discutida posteriormente.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{I} & [\mathbf{m}^*]_{\times} \\ -[\mathbf{c}^*]_{\times} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Teorema 3.2 (Silveira *et al.* (2013b)). O erro de controle $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$, equação (3.26), é localmente difeomórfico à pose da câmera em torno da imagem de referência desde que as condições (3.28) e (3.29) sejam satisfeitas. O termo z^* guarda a medida de profundidade do centro focal da câmera até o ponto de controle \mathbf{p}_c^* . O termo \mathbf{q}^* corresponde ao plano dominante e o termo $\mathbf{q}^{*'} = \mathbf{K}\mathbf{q}^*$ a sua normalização. Além disso, a linearização da matriz de interação de $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ nesta configuração é dada pela equação (3.30).

$$\mathbf{m}^{*\top} \mathbf{c} \neq 2 \quad (3.28)$$

$$\mathbf{m}^{*\top} \mathbf{q}^* \neq \frac{2}{z^*} \quad (3.29)$$

$$\bar{\mathbf{L}}|_{\bar{\varepsilon}=0} = - \begin{bmatrix} \frac{2}{z^*} \mathbf{I} + [\mathbf{m}^*]_{\times} [\mathbf{q}^*]_{\times} & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{z^*} [\mathbf{c}^*]_{\times} + [\mathbf{q}^*]_{\times} & 2\mathbf{I} + [\mathbf{c}^*]_{\times} [\mathbf{m}^*]_{\times} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Demonstração 3.3 (Silveira *et al.* (2013a)). Seja $\bar{\varepsilon} = \mathbf{M}\varepsilon$ cujo o termo \mathbf{M} é uma matriz constante; o termo $\bar{\mathbf{L}}$ representa a matriz interação de $\bar{\varepsilon}$ calculada por $\bar{\mathbf{L}} = \mathbf{M}\mathbf{L}$. Conforme fora apresentado por Silveira e Malis (2007), a linearização de $\bar{\mathbf{L}}$ para $\varepsilon = \mathbf{0}$ é dada pela equação abaixo.

$$\bar{\mathbf{L}}|_{\bar{\varepsilon}=0} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{z^*} \mathbf{I} & -[\mathbf{m}^*]_{\times} \\ [\mathbf{q}^*]_{\times} & 2\mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

A conclusão da prova ocorrerá após mostrar que a matriz $\bar{\mathbf{L}}$, equação (3.30), é inversível quando as condições (3.28) e (3.29) forem satisfeitas. De maneira similar, se $\bar{\mathbf{L}}|_{\bar{\varepsilon}=0} = \mathbf{M}\mathbf{L}|_{\bar{\varepsilon}=0}$, então poderá ser provado que $\bar{\mathbf{L}}|_{\bar{\varepsilon}=0}$ será inversível ao demonstrar que ambas as matrizes \mathbf{M} e $\mathbf{L}|_{\bar{\varepsilon}=0}$ são inversíveis. Logo, ao combinar a formula de Schur's e a condição (3.27) é possível provar que \mathbf{M} é inversível e isso acontece por meio da solução explicitada pela equação (3.32) que também é inversível.

$$\mathbf{M}_0 = 2\mathbf{I} + [\mathbf{c}^*]_{\times} [\mathbf{m}^*]_{\times} \quad (3.32)$$

Considere uma matriz qualquer \mathbf{Q} sujeita a condição $\mathbf{Q}\mathbf{m}^* = \|\mathbf{m}^*\| \mathbf{b}_3$, para $\mathbf{b}_3 = [0; 0; 1]^{\top}$. Lembrando que um vetor \mathbf{x} de três elementos obedece à relação de $\mathbf{Q}[\mathbf{x}]_{\times} \mathbf{Q}^{\top} = [\mathbf{Q}\mathbf{x}]_{\times}$, então a verificação por meio de multiplicação por \mathbf{Q} pelo lado esquerdo e \mathbf{Q}^{\top} pelo lado direito na equação (3.32) obter-se-a a equação a seguir.

$$\mathbf{Q}\mathbf{M}_0\mathbf{Q}^{\top} = 2\mathbf{I} + [\mathbf{Q}\mathbf{c}^*]_{\times} [\|\mathbf{m}^*\| \mathbf{b}_3]_{\times} \quad (3.33)$$

Seja o determinante $\det(\mathbf{Q}\mathbf{M}_0\mathbf{Q}^{\top}) = \det(\mathbf{M}_0)$, então por inferência é obtido o resultado apresentado na equação (3.35).

$$\det(\mathbf{M}_0) = 2(2 - \langle \mathbf{Q}\mathbf{c}^*; \|\mathbf{m}^*\| \mathbf{b}_3 \rangle)^2 \quad (3.34)$$

$$= 2(2 - \langle \mathbf{c}^*; \mathbf{m}^* \rangle)^2 \quad (3.35)$$

Isto mostra que \mathbf{M}_0 e consequentemente \mathbf{M} são inversíveis quando a condição (3.28) for satisfeita. De maneira similar $\bar{\mathbf{L}}|_{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}=0}$ é inversível quando a condição (3.29) for satisfeita.

3.2.2 Lei de controle e algumas propriedades

Considere uma câmera embarcada em um veículo holonômico, seis graus de liberdade, que é utilizada para observar um objeto amorfo, rígido e imóvel. Assuma que a câmera possua velocidades aos moldes de $\mathbf{v} = [\mathbf{v}^\top; \boldsymbol{\omega}^\top]^\top \in \mathbb{R}^6$.

Definição 3.4 (Silveira *et al.* (2013a)). A lei de controle é definida pela equação (3.36), cujo ganho $\boldsymbol{\Lambda}$ é modelado pela equação (3.37) para $\boldsymbol{\Lambda}_v = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ e $\boldsymbol{\Lambda}_\omega = \text{diag}(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6)$.

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Lambda} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}, \quad (3.36)$$

$$\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\boldsymbol{\Lambda}_v; \boldsymbol{\Lambda}_\omega) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Lambda}_\omega \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Teorema 3.3 ((SILVEIRA *et al.*, 2013a)). (Estabilidade Local) A lei de controle não métrica garante estabilidade exponencial nas imediações do ponto de equilíbrio $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{0}$ caso as condições (3.38), (3.39) e (3.40) sejam satisfeitas.

$$\text{sign}(\lambda_1) = \text{sign}(\lambda_2) = \text{sign}\left(\frac{2}{z^*} - \mathbf{m}^{*\top} \mathbf{q}^*\right), \quad (3.38)$$

$$\text{sign}(\lambda_4) = \text{sign}(\lambda_5) = \text{sign}(2 - \mathbf{m}^{*\top} \mathbf{c}^*), \quad (3.39)$$

$$\lambda_3, \lambda_6 > 0. \quad (3.40)$$

Demonstração 3.4 (Silveira *et al.* (2013a)). Ao combinar $\bar{\mathbf{L}}$, equação (3.30), com a lei de controle (3.36), obtém-se a dinâmica do erro dada pela equação (3.41), cuja matriz \mathbf{A} é modelada pela equação (3.42) e os os termos \mathbf{A}_{vv} e $\mathbf{A}_{\omega\omega}$ são discriminados nas equações (3.43) e (3.44), respectivamente.

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \mathbf{A} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{A} = \bar{\mathbf{L}}|_{\bar{\varepsilon}=0} \mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{vv} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{\omega v} & \mathbf{A}_{\omega\omega} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\mathbf{A}_{vv} = -\left[\frac{2}{z^*} \mathbf{I} + [\mathbf{m}^*]_{\times} [\mathbf{q}^{*'}]_{\times} \right] \mathbf{\Lambda}_v \quad (3.43)$$

$$\mathbf{A}_{\omega\omega} = -\left[2\mathbf{I} + [\mathbf{m}^*]_{\times} [\mathbf{c}^*]_{\times} \right] \mathbf{\Lambda}_\omega \quad (3.44)$$

Os autovalores de \mathbf{A} , para o caso triangular, consistem da união dos autovalores de \mathbf{A}_{vv} e $\mathbf{A}_{\omega\omega}$ como foi discriminado na equação (3.45). Ressalta-se que $\sigma(\cdot)$ denota o espectro de uma matriz.

$$\sigma(\mathbf{A}) = \sigma(\mathbf{A}_{vv}) \cup \sigma(\mathbf{A}_{\omega\omega}) \quad (3.45)$$

Assuma que \mathbf{x} denota o autovetor de \mathbf{A}_{vv} associado ao autovalor μ . Além disso, ressalva-se que para qualquer matriz de rotação \mathbf{Q} os autovalores são invariantes as transformações lineares, $\sigma(\mathbf{Q}\mathbf{A}_{vv}\mathbf{Q}^\top) = \sigma(\mathbf{A}_{vv})$. Logo, temo que o autovetor \mathbf{x} estará associado ao autovetor $\mathbf{Q}\mathbf{x}$. Escolhendo $\mathbf{Q}\mathbf{m}^* = \|\mathbf{m}^*\| \mathbf{b}_3$, para $\mathbf{b}_3 = [0; 0; 1]^\top$, logra-se a equação (3.46).

$$\sigma(\mathbf{Q}\mathbf{A}_{vv}\mathbf{Q}^\top) = \sigma(\mathbf{A}_{vv}) = \left\{ -\lambda_1 \left(\frac{2}{z^*} - \mathbf{m}^{*\top} \mathbf{q}^{*'} \right); -\lambda_2 \left(\frac{2}{z^*} - \mathbf{m}^{*\top} \mathbf{q}^{*'} \right); -\lambda_3 \frac{2}{z^*} \right\} \quad (3.46)$$

Ao adotar o mesmo procedimento para $\mathbf{A}_{\omega\omega}$ serão obtidos os resultados explicitados na equação (3.47).

$$\sigma(\mathbf{Q}\mathbf{A}_{\omega\omega}\mathbf{Q}^\top) = \sigma(\mathbf{A}_{\omega\omega}) = \left\{ -\lambda_4 (2 - \mathbf{m}^{*\top} \mathbf{c}^*); -\lambda_5 (2 - \mathbf{m}^{*\top} \mathbf{c}^*); -\lambda_6 2 \right\} \quad (3.47)$$

O **teorema 3.3** provê condições explícitas para os ganhos de controle de modo a garantir a estabilidade exponencial local para o sistema em malha fechada. Como ambos \mathbf{m}^* e \mathbf{c}^* são definidos pelo usuário, a única restrição importante é a escolha de λ_1 e λ_2 .

Contudo, como $\mathbf{m}^{*'} = z\mathbf{m}^*$, uma consequência direta das restrições (3.38)–(3.40) é a garantia da estabilidade para $\forall \lambda_i > 0, i = 1; 2; \dots; 6$ se as condições (3.48) e (3.49) forem satisfeitas.

$$\mathbf{m}^{*'\top} \mathbf{q}^{*'} < 2 \quad (3.48)$$

$$\mathbf{m}^{*\top} \mathbf{c}^* < 2 \quad (3.49)$$

Infere-se que essas condições poderão ser atendidas sempre. Ademais, a condição (3.48), que também existe no *DVS*, expressa a distância perpendicular entre o ponto de controle e o plano de referência. Afinal, este plano corresponde ao plano dominante do objeto e a condição será facilmente satisfeita se o ponto de controle for escolhido de tal maneira que sua paralaxe $\rho^* \in \mathbb{R}$ seja suficientemente pequena. Uma escolha simples do ponto de controle será para $\rho^* = 0$, pois o plano dominante atravessa o objeto. Em relação a condição (3.49), esta representa o comprimento da projeção do objeto de \mathbf{m}^* para \mathbf{c}^* , podendo ser facilmente satisfeita definindo-se, por exemplo, $\mathbf{c}^* = \beta \mathbf{m}^* / \|\mathbf{m}^*\|, \forall \beta < 2$. Assim, o sistema em malha fechada (3.41) é exponencialmente estável nos arredores do ponto de equilíbrio $\forall \lambda_i > 0$. Além disso, o comportamento do erro de controle translacional é desacoplado do rotacional, como mostra (3.42).

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SERVOVISÃO PARA ROBÔS DO TIPO MONOCICLO

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.

Ayrton Senna

A servovisão por meio das técnicas não métricas e baseadas em intensidade, apreciadas no capítulo anterior, são projetadas para sistemas mecânicos não restritos, ou seja, sistemas holonômicos no espaço Euclidiano, possuindo assim, três graus de liberdade (GDL) na translação e três GDL na rotação simultaneamente. De fato, as técnicas de servovisão direta (DVS), Silveira e Malis (2012b), e servovisão direta desacoplada (DDVS), Silveira *et al.* (2013a), foram aplicadas inicialmente a manipuladores robóticos sem quaisquer restrições de movimento.

Os bons resultados obtidos em validação experimental ao utilizar braços robóticos, possibilitou investigar o uso dessas técnicas em veículos que não possuem os seis GDL. Contudo, para avaliar as técnicas em sistema não holonômico foi necessário realizar algumas considerações, as quais serão abordadas posteriormente. A apresentação dessa configuração especial é o tema abordado nesse capítulo. Na seção 4.1 será versado os fundamentos teóricos sobre sistemas holonômicos restritos e irrestritos, enquanto que o alicerce da aplicação das técnicas em um robô diferencial será tratado na seção 4.2. A terceira e última seção deste capítulo, 4.3, será destinada ao tema de transformação de velocidades entre sistemas de coordenadas distintas para um corpo rígido.

4.1 Sistemas holonômicos irrestritos e restritos

Holonômico é uma terminologia proposta por Heinrich Hertz¹. Este termo está vinculado a sua análise acerca de um sistema mecânico qualquer por meio da segunda lei de Newton, princípio fundamental da dinâmica, equação (4.1).

$$m_v \ddot{\mathbf{r}}_v = \mathbf{F}_v + \mathbf{R}_v \quad (4.1)$$

O termo m_v , corresponde a massa da partícula $v = \{1, \dots, N\}$ dentre as N partículas existentes do sistema mecânico em estudo. Além disso, é assumido que todas as N partículas possuem massas idênticas entre si; $\ddot{\mathbf{r}}_v$, corresponde a aceleração da partícula no espaço cartesiano; $\mathbf{F}_v = F_{xv}\mathbf{i} + F_{yv}\mathbf{j} + F_{zv}\mathbf{k}$, corresponde as forças atuantes sobre o ponto m_v ; e $\mathbf{R}_v = R_{xv}\mathbf{i} + R_{yv}\mathbf{j} + R_{zv}\mathbf{k}$, modelam as forças de reação sobre o ponto m_v . Por fim, as análises são baseadas nas forças que cada partícula do corpo material em estudo proporciona ao centro de massa e com isso, obter as forças resultantes. O sistema de coordenadas do espaço Euclidiano é ilustrado pela figura 4.1, a qual apresenta os eixos translacionais e rotacionais deste sistema. E mais, o centro de massa do sistema mecânico está localizado na origem do espaço Euclidiano.

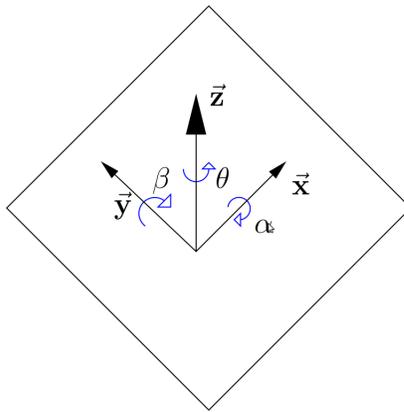


Figura 4.1: Sistema de coordenadas do espaço Euclidiano

Por meio de análise conceitual referente a equação (4.1) infere-se que um sistema ao se mover, por exemplo, no eixo \vec{x} , ele será um sistema holonômico em \vec{x} , podendo ter um grau de liberdade quando apenas translacionar ou rotacionar e dois GDL quando o movimento for combinado (translação e rotação). Quando o sistema mover-se nos três eixos e obrigatoriamente nos seis GDL ele será chamado de sistema holonômico irrestrito ou apenas sistema holonômico. Para

¹Heinrich Rudolf Hertz: nasceu em Hamburgo no dia 22/02/1857 e faleceu em 1/01/1894, contribuiu em áreas como mecânica e eletrodinâmica; dentre seu legado está "Os princípios da Mecânica", sendo esta sua última obra.

os demais casos, será chamado de sistema holonômico restrito ou não-holonômico. Além disso, estão explícitos dois tipos de força: forças de atuação que são produzidas por atuadores afixados ao sistema mecânico; forças de reação que são efeitos gerados de maneira involuntária, indesejáveis, provenientes dos efeitos do ambiente, forças de atrito, dentre outros. Para esclarecimentos e definições matemáticas completas e rigorosas a respeito deste assunto, recomenda-se acessar a obra Soltakhanov *et al.* (2009a,b), ou quaisquer outra que aborde este tema de maneira acurada.

A comunidade de robótica móvel, no entanto, aplica os conceitos propostos por Hertz de maneira restrita, ou seja, o estudo realizado para classificar o sistema como holonômico não leva em consideração as forças reativas \mathbf{R}_v . Além disso, realizam essa classificação utilizando considerações como: a cinemática do veículo; os graus de liberdade passíveis de controle; “área de trabalho” do robô. Todavia, é unânime a concordância da divisão dos veículos a respeito desse tema em dois grupos: sistemas holonômicos propriamente dito e sistemas não holonômicos.

Logo, a terminologia de holonômico para veículos pode ser reescrita a partir da simbiose entre as noções apresentadas por Murphy (2000) e Siegwart e Nourbakhsh (2004). Eles conceituam o sistema de acordo com o comportamento do veículo em relação aos seus graus de liberdade — translações e rotações — e do seu ambiente de atuação; os graus de liberdade aqui citados são inerentes ao centro de massa. O sistema mecânico definido como holonômico deve possuir os GDL equivalentes ao ambiente de trabalho no qual desempenha a função. Caso exista ausência de algum GDL necessário para realizar a tarefa imposta, este veículo será taxado como não holonômico naquele grau de liberdade, ou seja, será um sistema com restrições de mobilidade.

Ademais, um veículo que desempenha suas funções apenas em ambiente planar, ele possuirá até três GDL. Um exemplo de configuração está no sistema possuidor de dois GDL correspondentes as velocidades translacionais nos eixos \vec{x} e \vec{y} e um GDL para a velocidade rotacional em relação ao eixo \vec{z} , representado por θ , figura 4.1. Quando ele possuir apenas os três GDL contemplados pelo plano, este será classificado como robô holonômico; embora este mecanismo não seja holonômico quando o mesmo for tratado no espaço Euclidiano. Afinal, o veículo possui ausência de três GDL, por exemplo, velocidade translacional em \vec{z} , assim como, velocidades rotacionais em α e β referentes aos eixos \vec{x} e \vec{y} , respectivamente.

O robô omnidirecional com rodas suecas, vide figura 4.2(a), por exemplo, desempenha movimentos restritos ao plano e é classificado como holonômico. Pois, sua capacidade de movimentação compreende as direções \vec{x} e \vec{y} ; pode, ainda, rotacionar sobre o próprio eixo em θ ; conferindo a este tipo de sistema os três GDL — dois de translação e um de rotação — necessários para mover-se no plano.

Por outro lado, não é observado no robô diferencial, vide figura 4.2(b), grau de liberdade translacional em \vec{y} , transversal ao chassis, embora haja movimentos em \vec{x} — movimento longitu-

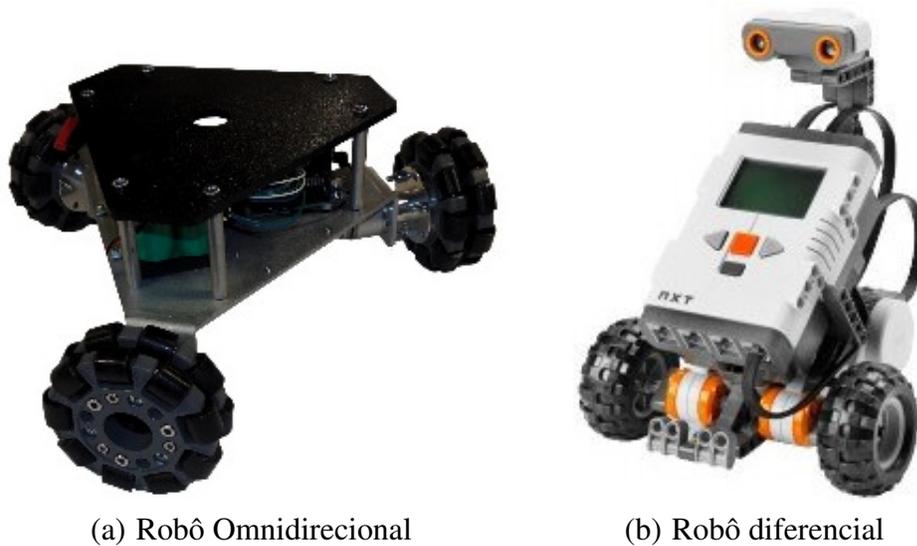


Figura 4.2: Robôs de atuação planar

dinal — ou, ainda, mobilidade rotacional em θ . Isto é, o robô diferencial é classificado como não holonômico, pois este não se move na transversal. Todavia, caso não necessite de realizar velocidades laterais, o mesmo poderá ser admitido como holonômico.

Ao analisar a trajetória de um trem sobre os trilhos — em condições normais de operação— é notório as restrições de movimento, tais como: movimento transversal, movimentos rotacionais. Além disso, seus movimentos são guiados pela via férrea, sendo esta definida como “área de trabalho”. Embora, seja um sistema com restrições de movimento, este veículo não desempenha movimentos no âmbito de suas restrições para percorrer o trajeto desejado.

Os conceitos supracitados por Murphy, Siegwart, Nourbakhsh, acercam de maneira satisfatória os conceitos de robôs, sendo eles holonômicos ou não; embora não contemplem situações de reação entre o veículo e o ambiente no qual está inserido.

Como pode ser observado, um sistema dito holonômico em algum momento pode não ser holonômico em outro. Logo, os conceitos acerca do tema até então estão fragmentados. Muito embora, existam maneiras plausíveis de tratá-lo. Na prática, os grupos, por questões de necessidade precisam definir as premissas utilizadas para a formalização do problema embasando-o seja no controle dos GDL, seja ao estabelecer a “área de trabalho” ou, ainda, em outras considerações necessárias para definir o veículo como holonômico ou não.

4.2 Modelo cinemático e adaptação para sistemas holonômicos

A abordagem de Morin e Samson (2008), por meio da proposição desenvolvida por Campion e Chung (2008), permite averiguar a holonomicidade de um ponto qualquer pertencente a um veículo robótico que possua comportamento cinemático equivalente a um monociclo. Nesta seção é realizada a adequação de um ponto holonômico baseado na assertiva proposta por eles acerca do controle deste tipo de veículo para ambientes planares de trabalho. Além disso, a análise realizada sobre um veículo monociclo pode ser estendida ao veículo diferencial pois ambos possuem o mesmo modelo e o mesmo comportamento cinemático. O sistema de equações abaixo foi formulado a partir do centro de massa do veículo, assumindo que este mecanismo possui corpo rígido.

$$\begin{cases} u_1 = \frac{r}{2}(\dot{\psi}_d + \dot{\psi}_e) \\ u_2 = \frac{r}{2R}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}_e) \\ \dot{x}_r = u_1 \cos \theta_b \\ \dot{y}_r = u_1 \sin \theta_b \\ \dot{\theta}_b = u_2 \end{cases} \quad (4.2)$$

O modelo matemático pode ser detalhado por meio da combinação das velocidades rotacionais das rodas da direita, $\dot{\psi}_d$, e da esquerda, $\dot{\psi}_e$, respectivamente; r representa o raio das rodas e R denota a distância entre as rodas atuadas. As equações: u_1 e u_2 são resultados da combinação entre as velocidades angulares das rodas motorizadas cujas atuações podem promover velocidades translacionais, rotacionais. Enquanto, u_1 modela a somatória de torques que resultam na velocidade longitudinal $\dot{x}_r \vec{i} + \dot{y}_r \vec{j}$; u_2 relaciona os momentos produzidos pelos torques, ocasionando assim, rotação ao veículo, $\dot{\theta}_b$. As velocidades \dot{x}_r e \dot{y}_r quantificam as variações do centro de massa \mathbf{P}_r — vide figura 4.3, localizado na origem do sistema de coordenadas do robô $\vec{x}_b \mathbf{O} \vec{y}_b$ — em relação a um sistema de coordenadas de referência $\vec{x}_l \mathbf{O} \vec{y}_l$; Ademais, a variável θ_b estabelece a disparidade entre os sistemas de coordenadas local e do robô.

Na figura 4.3 nota-se que o ponto \mathbf{P}_m está arrolado a cinemática do diferencial por meio das distâncias l_1 e l_2 e também em relação ao ponto \mathbf{P}_r . Logo, as velocidades dos atuadores, u_1 e u_2 ditará a velocidade a ser desempenhada no ponto \mathbf{P}_r cujos efeitos cinemáticos produzirão em \mathbf{P}_m ora cinemáticas diferentes, ora cinemática semelhante. A equação (4.3) permite averiguar os efeitos produzidos pelos atuadores em relação a um ponto qualquer \mathbf{P}_m . Estes resultados podem ser qualificados como soluções trivial e resultado desejado. A primeira, quando \mathbf{P}_m possui a distância longitudinal $l_1 = 0$ e qualquer valor para l_2 ; Morin e Samson (2008) caracterizam este resultado como trivial; pois, não será possível controlar a velocidade em \dot{y}_m como é o desejado, como pode ser inferido ao analisar a equação 4.2. A segunda solução cujo desfecho é o desejado, pois é possível

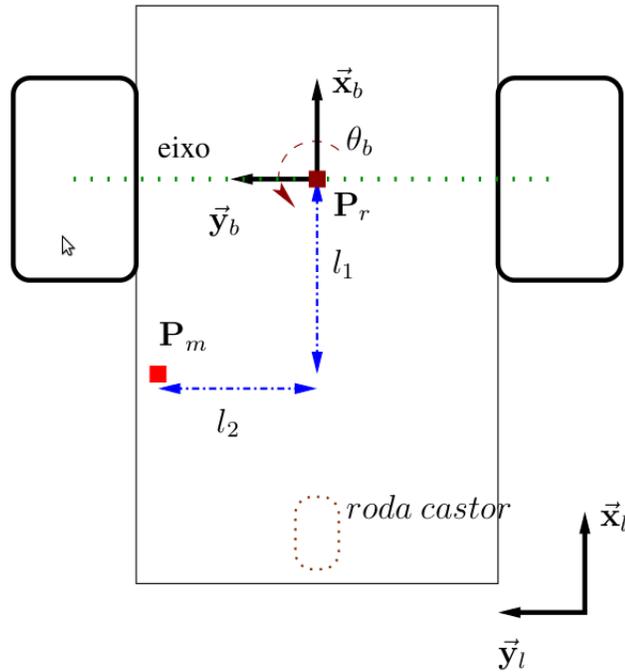


Figura 4.3: Veículo robótico diferencial

controlar a velocidade em \dot{x}_m e \dot{y}_m , esta imposição de velocidades nesse ponto acontece quando P_m possui a distância longitudinal $l_1 \neq 0$ e transversal l_2 assumindo um valor qualquer; Morin e Samson (2008) definem este ponto como holonômico, embora ele seja holonômico apenas quando empregado o conceito de “área de trabalho” apresentada por Murphy (2000), ou seja, se a orientação no ponto P_m for desnecessária então pode-se assumir que o sistema é holonômico.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_b & -\sin \theta_b \\ \sin \theta_b & \cos \theta_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -l_2 \\ 0 & l_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Todavia, Morin e Samson (2008) fazem ressalvas sobre o controle proposto para a velocidade longitudinal; a estabilidade de controle na orientação do ponto P_m é provada para um intervalo de $(-\pi/2; \pi/2)$ e $u_1 > 0$; quando $u_1 < 0$ a dinâmica torna-se instável. Além disso, para intervalos diferentes $(-\pi/2; \pi/2)$ o veículo apresentará comportamento não holonômico.

A implementação das técnicas de servovisão em um veículo não holonômico se deu por meio de análise da proposta de Morin e Samson (2008). Porém, ajustes foram necessários para garantir que a câmera capturasse em todos os instantes a imagem do alvo. Por isso, adicionou-se um atuador em P_m capaz de permitir orientação da câmera independente ao corpo da plataforma. Este *pan-tilt* é construído a partir de motores de passo, embora não tenha utilizado a função *tilt* especificamente neste trabalho. Esta inserção, precisamente, possibilita a mudança de orientação

antes feita pelo sistema de coordenadas do robô, \mathbf{P}_r , para \mathbf{P}_m quando modelado em relação ao sistema de coordenadas local. E o ponto \mathbf{P}_m , agora, possuirá grau de liberdade máximo concedido ao plano.

4.3 Transformação de velocidades entre sistemas de coordenadas

Após a análise da solução exposta por Morin e Samson (2008), nota-se que as velocidades — a princípio definidas no centro de massa, agora observadas em um local genérico e não pertencente ao eixo das rodas motorizadas — não garante a mobilidade irrestrita do veículo diferencial. Sua abordagem apenas facilita o posicionamento de \mathbf{P}_m no local desejado.

O acréscimo de um grau de liberdade (GDL) por meio de um atuador está vinculado as restrições impostas pelas técnicas de servovisão DVS e DDVS, pois estas técnicas são capazes de atuar apenas quando o objeto está no seu campo de visão em todos os instantes. Embora elas ainda continuem operantes quando parte do objeto sai do campo de visão da câmera, oclusão parcial, desde que o ponto de controle definido na imagem continue observável pela câmera. O segundo e último ajuste realizado consiste em transferir a disparidade entre o sistema de coordenadas do robô em relação ao sistemas de coordenadas local para o sistema de coordenadas da câmera. Essa mudança é justificada pelo objetivo de controlar a pose da câmera e não a pose do veículo em relação ao objeto, e mais, os sinais que controlarão a plataforma são provenientes das imagens extraídas pela câmera. A figura 4.4 apresenta a disposição da câmera afixada ao *pan-tilt* e este fixado ao veículo, também detalha as disposições dos ângulos θ_b e β_p e os sistemas de coordenadas do robô e da câmera.

A álgebra de Lie por meio de transformações rígidas do espaço 3D propõe solução para relacionar o comportamento de translação e rotação entre dois pontos quaisquer de um mesmo corpo, representado pela matriz de transformação linear $\mathbf{T} \in \mathbb{SE}(3)$, de tamanho 4×4 , vide equação (4.6). A matriz $\mathbf{R} \in \mathbb{SO}(3)$ de dimensão 3, pertence ao grupo de rotação no espaço 3D; o vetor $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ — constituído de três elementos. A matriz \mathbf{R} e o vetor \mathbf{t} armazenam a orientação entre elos, equação (4.4), e a translação entre juntas, equação (4.5), respectivamente, cujas informações possibilita construir a matriz que relacionará estas juntas e elos, equação (4.6).

$${}^r\mathbf{R}_m(\beta_p) = \begin{bmatrix} \cos \beta_p & 0 & \sin \beta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

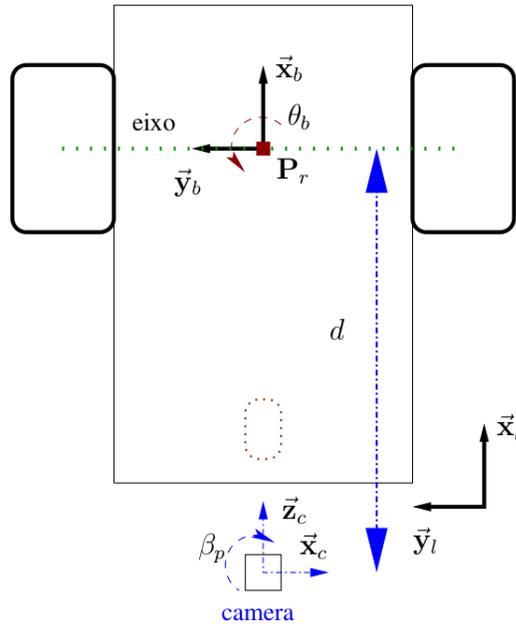


Figura 4.4: Veículo robótico com o pantilt atrás do centro inercial

$${}^r \mathbf{t}_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$${}^r \mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} {}^r \mathbf{R}_m & {}^r \mathbf{t}_m \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A relação entre a cinemática dos pontos \mathbf{P}_r e \mathbf{P}_m é dada pela equação (4.7), a qual impõe velocidades em \mathbf{P}_r de maneira que \mathbf{P}_m tenha a velocidade necessária para que a câmera seja alocado na pose desejada.

Dessa forma, a relação entre as velocidades do veículo, dadas pelo vetor $\mathbf{v}_r = [\nu_{r_x}; \nu_{r_y}; \nu_{r_z}; \omega_{r_x}; \omega_{r_y}; \omega_{r_z}]^\top$ e as velocidades da câmera, dadas pelo vetor $\mathbf{v}_m = [\nu_{m_x}; \nu_{m_y}; \nu_{m_z}; \omega_{m_x}; \omega_{m_y}; \omega_{m_z}]^\top$, respectivamente, é dada pela equação (4.7). O termo $[{}^r \mathbf{t}_m]_\times$ mostrada na equação (4.9) representa a matriz antissimétrica do vetor ${}^r \mathbf{t}_m$, vide equação (4.5).

$$\mathbf{v}_r = {}^r \mathbf{W}_m \mathbf{v}_m \quad (4.7)$$

$${}^r \mathbf{W}_m = \begin{bmatrix} {}^r \mathbf{R}_m & [{}^r \mathbf{t}_m]_\times {}^r \mathbf{R}_m \\ \mathbf{0} & {}^r \mathbf{R}_m \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$[{}^r\mathbf{t}_m]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -d & 0 \\ d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

A equação (4.10) é o resultado da multiplicação entre $[{}^r\mathbf{t}_m]_{\times}$, vide equação (4.9), e ${}^r\mathbf{R}_m$, visto nas equações (4.4) e (4.5).

$$[{}^r\mathbf{t}_m]_{\times} {}^r\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} 0 & -d & 0 \\ d \cos \beta_p & 0 & d \sin \beta_p \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

A equação (4.11) é o resultado das substituições das matrizes ${}^r\mathbf{R}_m$, equação (4.4), e $[{}^r\mathbf{t}_m]_{\times} {}^r\mathbf{R}_m$, equação (4.10), na equação (4.8).

$${}^r\mathbf{W}_m = \begin{bmatrix} \cos \beta_p & 0 & \sin \beta_p & 0 & -d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \cos \beta_p & 0 & d \sin \beta_p \\ -\sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta_p & 0 & \sin \beta_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

A equação (4.12) determina a velocidade de \mathbf{P}_r necessária para que a velocidade em \mathbf{P}_m seja a desejada.

$$\begin{bmatrix} \nu_{r_x} \\ \nu_{r_y} \\ \nu_{r_z} \\ \omega_{r_x} \\ \omega_{r_y} \\ \omega_{r_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_p & 0 & \sin \beta_p & 0 & -d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \cos \beta_p & 0 & d \sin \beta_p \\ -\sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta_p & 0 & \sin \beta_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{m_x} \\ \nu_{m_y} \\ \nu_{m_z} \\ \omega_{m_x} \\ \omega_{m_y} \\ \omega_{m_z} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Lembrando que $\boldsymbol{\nu}_r = [\nu_{r_x}; \nu_{r_y}; \nu_{r_z}]^{\top}$ e $\boldsymbol{\omega}_r = [\omega_{r_x}; \omega_{r_y}; \omega_{r_z}]^{\top}$ correspondem as velocidades translacionais e rotacionais do veículo; e que $\boldsymbol{\nu}_m = [\nu_{m_x}; \nu_{m_y}; \nu_{m_z}]^{\top}$ e $\boldsymbol{\omega}_m = [\omega_{m_x}; \omega_{m_y}; \omega_{m_z}]^{\top}$ correspondem as velocidades translacionais e rotacionais obtidas via imagem. Lembre-se que as velocidades $\boldsymbol{\nu}_r$ e $\boldsymbol{\omega}_r$ estão descritas conforme o sistema de coordenadas da câmera e não do veículo.

As duas velocidades ν_{r_z} e ν_{r_x} são responsáveis por ditar a velocidade longitudinal e rotacional do veículo por meio de ajustes trigonométricos. A velocidade ω_{r_y} está vinculada a velocidade do

pan. Ressalvadas as velocidades supracitadas, as demais velocidades — ν_{r_y} , ω_{r_x} , ω_{r_z} — possuem contribuição nula sobre o veículo diferencial, por isso serão eliminadas e este resultado será visto a seguir.

$$\begin{bmatrix} \nu_{r_x} \\ \nu_{r_z} \\ \omega_{r_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_p & 0 & \sin \beta_p & 0 & -d & 0 \\ -\sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{m_x} \\ \nu_{m_y} \\ \nu_{m_z} \\ \omega_{m_x} \\ \omega_{m_y} \\ \omega_{m_z} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Nota-se na equação (4.13) a existência de três colunas nulas. Elas correspondem as velocidades ν_{m_y} , ω_{m_x} e ω_{m_z} . Demonstrando que estas velocidades não produzem qualquer efeito no controle do veículo, por isso elas serão desvincilhadas da equação. Isto, acarretará simplificação a matriz de transformação de velocidades a ser descrita abaixo.

$$\begin{bmatrix} \nu_{r_x} \\ \nu_{r_z} \\ \omega_{r_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_p & \sin \beta_p & -d \\ -\sin \beta_p & \cos \beta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{m_x} \\ \nu_{m_z} \\ \omega_{m_y} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Ajustes serão realizados na equação (4.14) de modo a obter as velocidades de controle da plataforma robótica. Logo, a equação que resulta no termo ν_{r_x} será dividida por $-d$ e posteriormente será subtraída pela equação ω_{r_y} , vide equação (4.15).

$$\begin{bmatrix} -\frac{\nu_{r_x}}{d} - \omega_{r_y} \\ \nu_{r_z} \\ \omega_{r_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos \beta_p}{d} & -\frac{\sin \beta_p}{d} & 0 \\ -\sin \beta_p & \cos \beta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{m_x} \\ \nu_{m_z} \\ \omega_{m_y} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

A velocidade de rotação $\omega_{m_y} = \dot{\beta}_b + \dot{\beta}_p$ é composta pelos movimentos rotacionais do veículo e do *pan*, dos quais $\dot{\beta}_b = \frac{\nu_{r_x}}{d} + \omega_{r_y}$, e $\dot{\beta}_p = \omega_{r_y} - \dot{\beta}_b$. As considerações e substituições dos modelos supracitados e a posteriori combinados a equação (4.15) resultará na equação abaixo.

$$\begin{bmatrix} -\dot{\beta}_b \\ \nu_{r_z} \\ \dot{\beta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos \beta_p}{d} & -\frac{\sin \beta_p}{d} & 0 \\ -\sin \beta_p & \cos \beta_p & 0 \\ -\frac{\cos \beta_p}{d} & -\frac{\sin \beta_p}{d} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{m_x} \\ \nu_{m_z} \\ \omega_{m_y} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

A equação (4.17) é o modelo proposto da transformação de velocidades visto em (4.16) cujas velocidades referentes ao veículo foram acertados para o sistema de coordenadas do robô. Além

disso, a configuração do sistema de coordenadas da câmera define sentido positivo para a rotação em \vec{y} no sentido horário, enquanto o veículo está configurado para rotação positiva em \vec{z} no sentido anti-horário. Logo, as velocidades pertinentes ao robô podem ser descritas da seguinte maneira:

$$-\dot{\beta}_b = \dot{\theta}_b = \omega_b, \dot{\beta}_p = \omega_p, \nu_{r_z} = v_x.$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \dot{\theta}_b \\ \dot{\beta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \beta_p & \cos \beta_p & 0 \\ -\frac{\cos \beta_p}{d} & -\frac{\sin \beta_p}{d} & 0 \\ -\frac{\cos \beta_p}{d} & -\frac{\sin \beta_p}{d} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{m_x} \\ \nu_{m_z} \\ \omega_{m_y} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Da equação (4.17) observa-se que a distância d é constante, pouco influenciando acerca dos resultados finais, embora para valores de d pequenos ocasionará em fatores multiplicativos altos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.

Ayrton Senna

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos pela aplicação das técnicas de servovisão, discutidas no capítulo 3, para controlar a plataforma robótica¹ constituída pelos itens: robô diferencial Pioneer 3DX; *pan-tilt* PTU-46-1.7 e câmera HD Pro *webcam* C920. Estes testes tiveram como objetivo validação as técnicas de controle por visão para os problemas de posicionamento e de perseguição para objetos estáticos e móveis.

Os experimentos de posicionamento e rastreamento utilizaram um *template* com as dimensões $\mathcal{T} = 200 \times 200$ pixels para correlacionar a imagem de referência e a imagem corrente. O ponto de controle foi definido como sendo $\mathbf{p}_c^* = [300; 280; 1]^T$. A matriz de calibração da câmera, \mathbf{K} , utilizada possui os seguintes parâmetros.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 320 \\ 0 & 400 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Este capítulo é constituído de três partes: primeira parte, seção 5.1, abordará o ambiente de testes para o problema de posicionamento do veículo com relação a um alvo planar imóvel; posteriormente, a seção 5.2 acerará dos resultados obtidos para alvos estáticos; por último, a seção 5.3 abordará os resultados da aplicação do controle da plataforma robótica para um alvo planar móvel.

¹A plataforma robótica pertence ao laboratório da Divisão de Robótica e Visão Computacional (DRVC) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) de Campinas/SP. O trabalho foi realizado a partir da parceria entre UNICAMP e CTI-Renato Archer.

5.1 Ambiente experimental para o posicionamento

A construção do ambiente de provas para o posicionamento do veículo se deu da seguinte maneira: primeiramente foram definidas a pose de referência da câmera em relação ao objeto, bem como algumas poses iniciais; em seguida, foram afixadas, ao chão, as demarcações da pose de referência e das poses iniciais, para a repetibilidade dos experimentos, ou seja, para garantir as mesmas condições de operação.

Observe na figura 5.1(a) que as demarcações de 1 a 5, presentes ao solo, formam uma semi-circunferência e são delimitações definidas como poses iniciais. Na parte interna, entretanto, está a região única e exclusiva ao qual o Pioneer é colocado para registrar a imagem de referência, apresentado na figura 5.1(b).

Após a construção do ambiente de provas, foram definidas as três etapas para a realização dos experimentos, a saber: na primeira etapa, obtém-se a pose de referência, conforme mostrada na figura 5.1(b); posteriormente, o veículo é posicionado em qualquer uma das poses iniciais estabelecidas anteriormente, por exemplo, a pose inicial 5 vista na figura 5.1(a); por fim, são ativados os motores do robô diferencial para que o objetivo de controle seja atingido, ou seja, para que o robô realize os movimentos adequados de forma que a imagem corrente seja igual a imagem de referência.

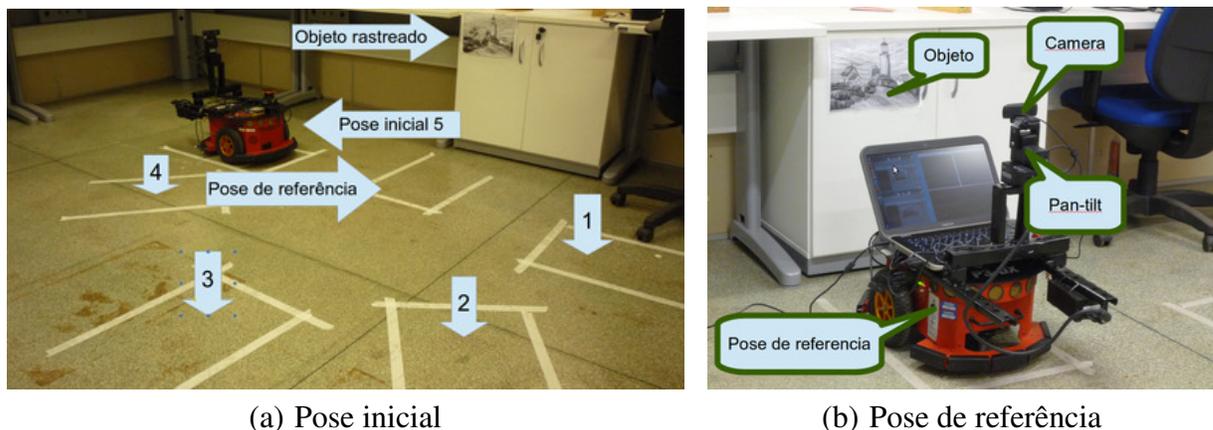


Figura 5.1: Cenário experimental

Para a realização do objetivo de controle, foram utilizados dois tipos de ganho: ganho de controle proporcional constante — chamado de caso 1 —; ganho de controle proporcional variável — chamado de caso 2. O ganho constante é definido como um matriz diagonal $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3)$, λ_1 , λ_2 e λ_3 maiores que zero, e o ganho variável é definido por $\Lambda = \gamma e^{-\beta \|\epsilon\|} \mathbf{I}$.

O ganho variável, diferentemente do ganho constante, permite versatilidade ao robô em relação ao seu deslocamento. De maneira simples, a norma do erro rege as intensidades de ganho da matriz Λ por meio do fator exponencial, ou seja, apresentará deslocamentos reduzidos para norma do erro muito grandes; porém, quando a norma do erro possuir valores pequenos apresentará deslocamentos próximos ao máximo. Logo, enquanto os erros de controle forem altos ($\|\varepsilon\| \rightarrow \infty \Rightarrow \Lambda \rightarrow \mathbf{0}$), e no outro extremo — nos momentos em que os erros de controle forem pequenos —, haverá deslocamentos com os ganhos próximos ao máximo ($\|\varepsilon\| \rightarrow 0 \Rightarrow \Lambda \rightarrow \gamma\mathbf{I}$).

5.2 Experimentos de posicionamento

Nesta seção, serão apresentados de maneira comparativa os resultados obtidos entre os casos 1 e 2 de cada técnica, ou seja, a subseção 5.2.1 será reservada para os testes da técnica *DVS* e a subseção 5.2.2 estará destinada para os ensaios da técnica *DDVS*. Os gráficos esboçados, para cada uma das subseções, foram equalização de modo a trazer o conforto da visualização, permitindo também comparação e análise de forma adequada. Por fim, os experimentos realizados acercam apenas a posição inicial 5, referente a figura 5.1(a).

5.2.1 Servovisão direta

Foram realizados dois tipos de ensaios com a técnica de servovisão direta; um deles chamado de o caso 1², no qual os ganhos são constantes; e no outro, o caso 2³ com ganhos variáveis. Ambos os modelos foram introduzidos na seção 5.1 e, agora, serão transcritos nas matrizes (5.2) e (5.3) com os respectivos valores utilizados nos experimentos.⁴

$$\Lambda_{cte} = \begin{bmatrix} 0,30 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,15 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,15 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\Lambda_{var} = \begin{bmatrix} 0,40 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,40 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,40 \end{bmatrix} e^{-0,60\|\varepsilon\|} \quad (5.3)$$

²Este experimento pode ser encontrado no link: <https://goo.gl/yzSR2v>

³Este experimento pode ser encontrado no link: <https://goo.gl/UPQ3nc>

⁴Nota-se a existência dos subscritos “cte” e “var” que são qualificadoras de Λ e correspondem nestes modos aos casos 1 e 2.

As coletas dos dados provenientes dos experimentos estão apresentadas na figura 5.2, a qual contempla informações sobre os erros, os sinais de controle e as normas dos erros.

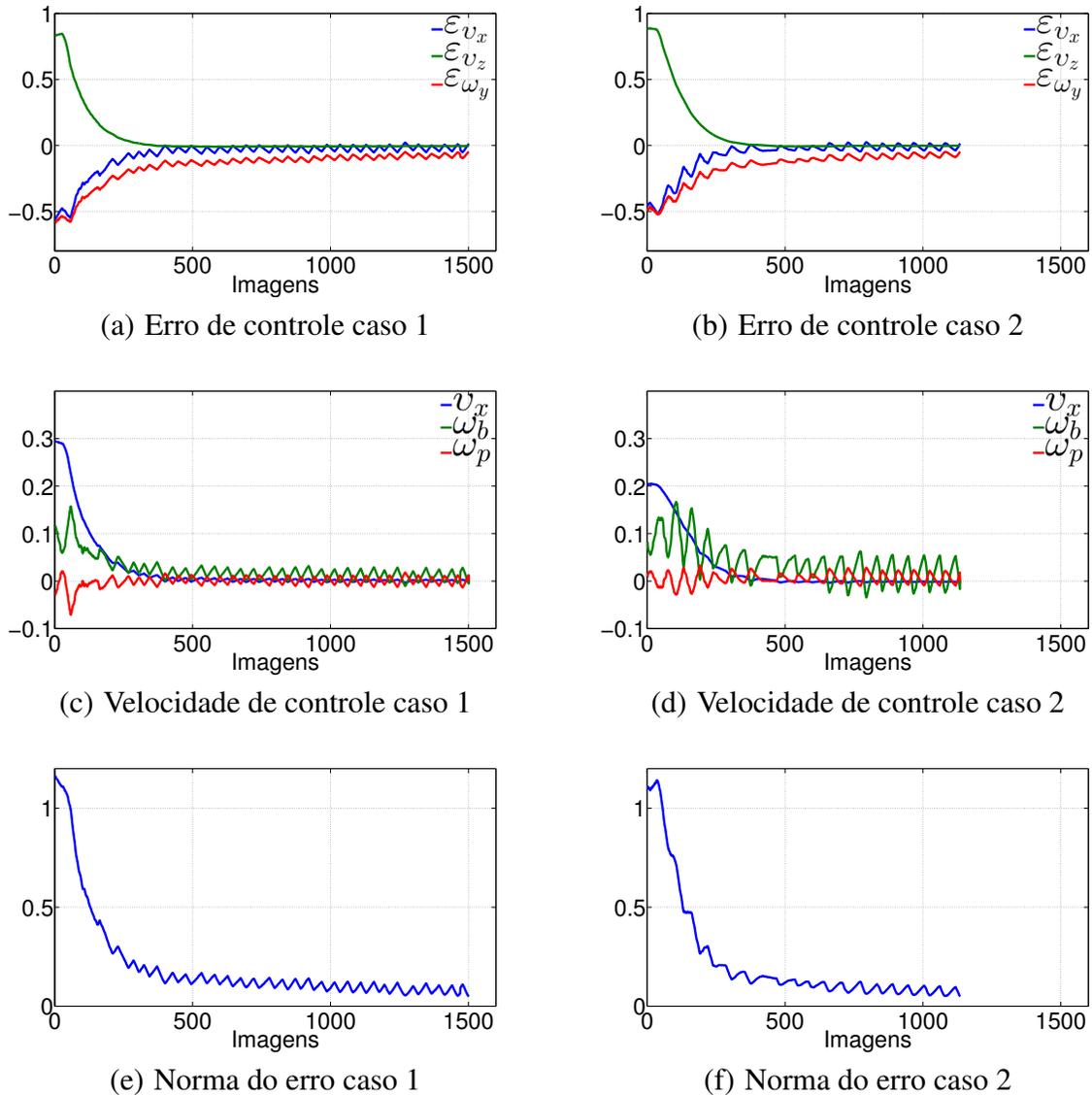


Figura 5.2: Técnica DVS: comparação entre os casos 1 e 2

Os erros de controle são delineados nas figuras 5.2(a) e 5.2(b). Ao analisar os gráficos nota-se o decaimento exponencial do termo ε_{v_z} — profundidade da câmera — para ambos os casos de forma equivalente; observa-se que $\varepsilon_{v_z} \approx 0$ a partir da 300ª imagem, ou seja, a profundidade da câmera está muito próxima do valor desejado. No entanto, os outros termos ε_{v_x} e ε_{ω_y} são levemente distorcidos pela presença de uma oscilação de pequena amplitude em cada um dos termos. Afinal, eles possuem decaimentos exponenciais sutilmente distorcidos por oscilações de pequenas ampli-

tudes. As perturbações presentes nos erros ε_{v_x} e ε_{ω_y} estão vinculadas ao tipo do *pan-tilt* utilizado nos ensaios, pois o modelo utilizado é construído com motores de passo e este mecanismo requer controle acurado por *software*. Contudo, a implementação deste *software* pode estar comprometido pois o conjunto (*software* + *pan*) não operaram corretamente para velocidades $\omega_y \leq \|0,03\|$ rad/s.

As figuras 5.2(c) e 5.2(d) apresentam as velocidades impostas aos atuadores, sinais de controle, ao longo do tempo. Embora, os decaimentos exponenciais em v_x para ambos os casos tenham comportamentos semelhantes, o uso de ganhos diferentes propiciaram alterações nas amplitudes dos respectivos casos. Salienta-se, ainda, que as componentes explícitas nos gráficos seguem a orientação ilustrada na figura 4.4. As velocidades impostas em ω_b e ω_p são oscilações ocasionadas a princípio pela imprecisão gerada ao controlar o *pan*.

O comportamento da plataforma apresentou desempenhos distintos na missão imposta e testada pelos dois tipos de ganho. A inferência é construída na observação dos sinais de controle enviados ao veículo. Isto é, Λ_{cte} atua sempre na mesma proporção nas velocidades impostas, ou seja, quanto mais próximo da pose desejada menores serão estes sinais; conseqüentemente, os sinais atingirão o limiar de funcionamento dos motores; nesta faixa os atuadores podem não produzir torques necessários para gerar movimento, ocasionando lentidão no deslocamento da plataforma ao chegar próximo do objetivo desejado. Por outro lado, Λ_{var} possui ganhos mais altos quando a plataforma está próxima da pose desejada, dando maior mobilidade a plataforma e no cumprimento da missão. Por esta razão, o caso 2 apresentou menor tempo na tarefa de posicionamento.

A evolução das normas dos erros de controle são apresentados nas figuras 5.2(e) e 5.2(f), permitindo visualizar melhor a condição de parada do ensaio, que no caso deste experimento corresponde à situação em que $\|\varepsilon\| \leq 0,05$. Quando esse valor do erro é atingido assume-se que o veículo está na posição desejada e que a tarefa de posicionamento foi realizada com sucesso.

Nas figuras 5.3 e 5.4 são mostradas as imagens de referência, a imagem no instante inicial e o desfecho do ensaio, assim como, as poses de referência, inicial e final do veículo para os casos 1 e 2, respectivamente. Além disso, é possível observar que a pose final do Pioneer não é levada em consideração para a estabilização da pose da câmera.

5.2.2 Servovisão direta desacoplada

De forma semelhante ao apresentado na seção anterior, foram realizados dois tipos de ensaios com a técnica de servovisão direta desacoplada, assim como, na seção 5.2.1; o caso 1 corresponde ao ganho constante ⁵; o caso 2 ao ganho variável ⁶. As matrizes (5.4) e (5.5) correspondem, respec-

⁵Este experimento pode ser encontrado no link: <https://goo.gl/cmDHOa>

⁶Este experimento pode ser encontrado no link: <https://goo.gl/ASWG5u>

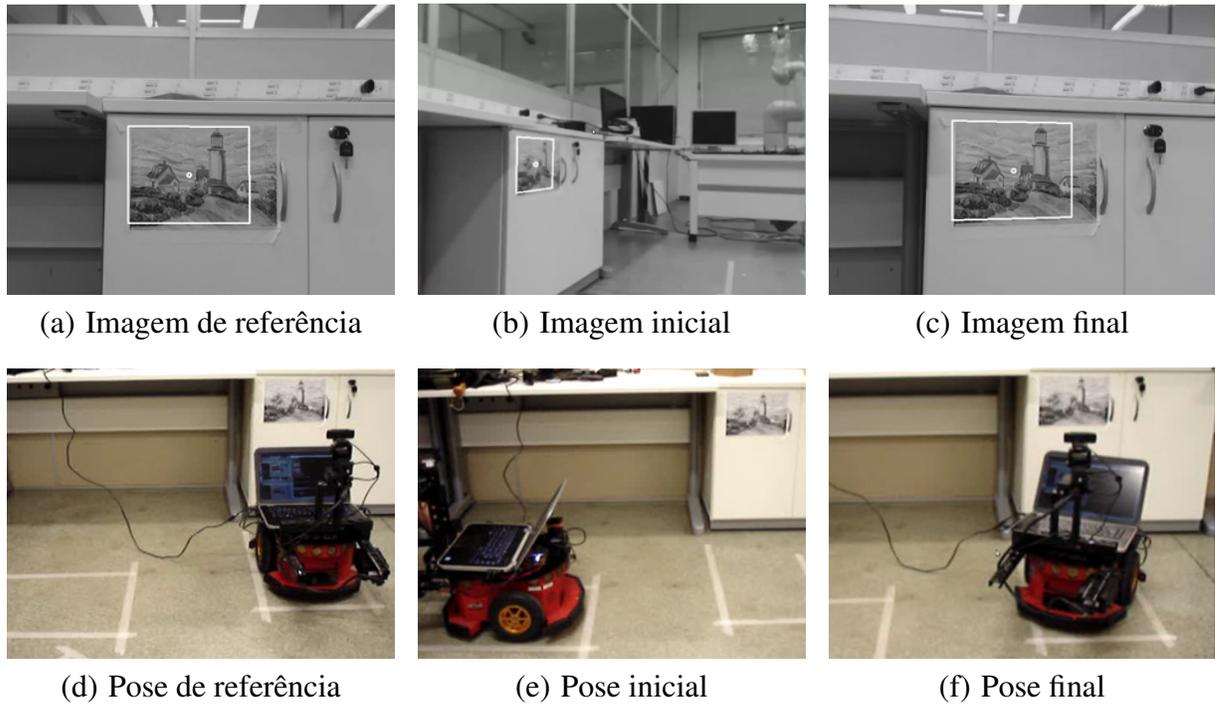


Figura 5.3: Técnica DVS: caso 1 - ganhos constantes

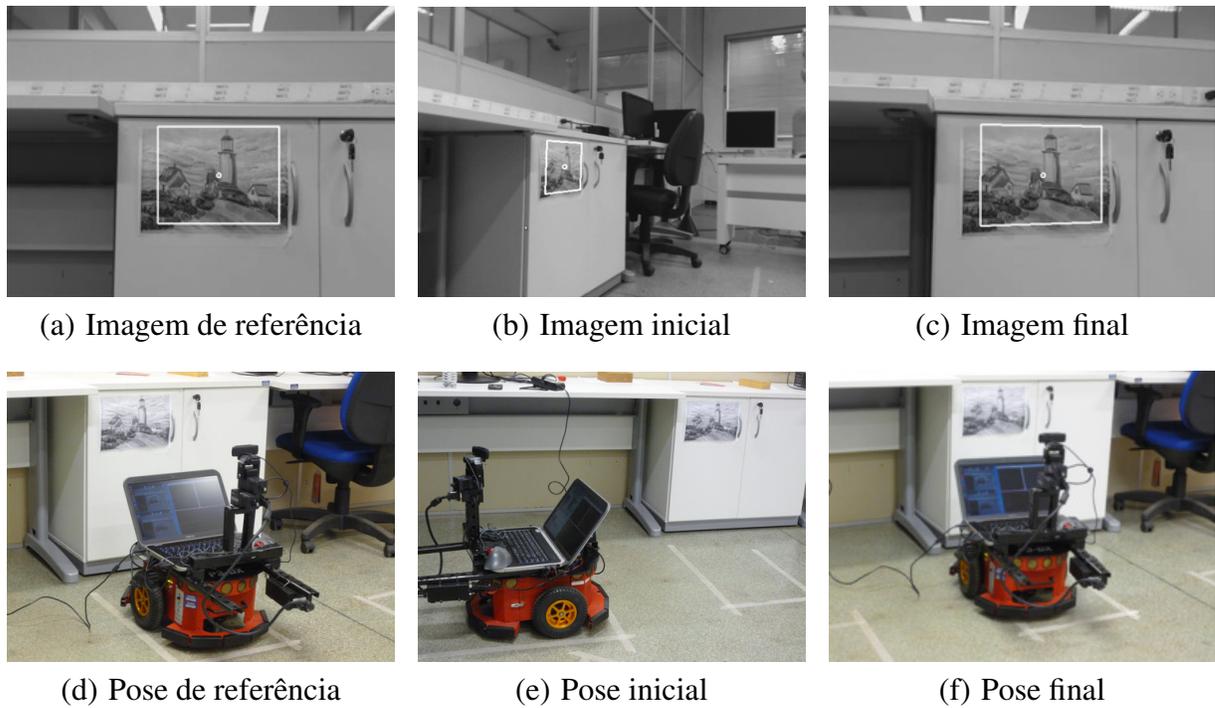


Figura 5.4: Técnica DVS: caso 2 - ganhos variáveis

tivamente, aos ganhos utilizados para o caso 1 e 2.

$$\mathbf{\Lambda}_{cte} = \begin{bmatrix} 0,30 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,15 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,15 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

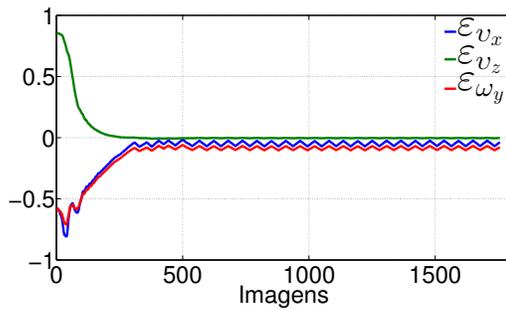
$$\mathbf{\Lambda}_{var} = \begin{bmatrix} 0,40 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,40 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,40 \end{bmatrix} e^{-0,60\|\varepsilon\|} \quad (5.5)$$

As coletas dos dados provenientes dos experimentos estão apresentadas na figura 5.5, a qual contempla informações sobre os erros, erros desacoplados, suas respectivas normas e as velocidades de controle.

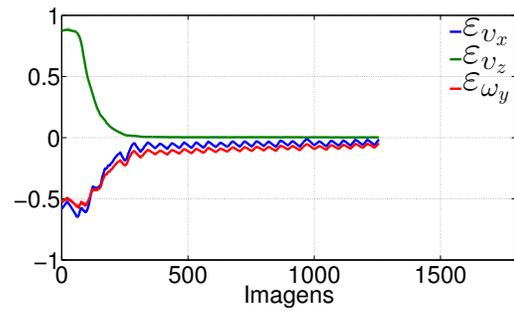
Os erros de controle são esboçados nas figuras 5.5(a) e 5.5(b). Ao analisar os gráficos nota-se o decaimento exponencial do termo ε_{v_z} — profundidade da câmera — para ambos os casos de forma equivalente; observa-se que $\varepsilon_{v_z} \approx 0$ a partir da 250ª imagem. Isto mostra que a profundidade da câmera está muito próxima da medida desejada. Os outros termos, ε_{v_x} e ε_{ω_y} , também apresentam decaimentos exponenciais até a 250ª imagem aproximadamente; entretanto, posterior a isso, os decaimentos passam a ser ondulatórios de baixas amplitudes e aproximam-se lentamente da nulidade. As perturbações presentes nos erros ε_{v_x} e ε_{ω_y} estão vinculadas ao *pan-tilt* utilizado nos ensaios, pois o mesmo apresentou problemas quando operado a velocidades $\omega_y \leq \|0,03\|$ rad/s.

O desacoplamento entre os erros de controle translacionais e rotacionais, em ambos os casos, pode ser claramente observado comparando as figuras 5.5(a) e 5.5(b) com as figuras 5.5(c) e 5.5(d). Ao observar os resultados apresentados, infere-se que o desacoplamento age como amplificador nos sinais, aqui analisados; de maneira contraditória, para sinais de baixas amplitudes a técnica atenua os sinais deixando-os menores ainda. Logo, as oscilações próximas ao eixo das abcissas serão minoradas, como pode ser observado nos gráficos e comparados com os erros de controle dos casos 1 e 2, respectivamente. Como o objetivo de controle é baseada em $\bar{\varepsilon}$, os sinais de controle; conseqüentemente, apresentarão amplitudes diferentes em relação ao caso tratado na subseção 5.2.1.

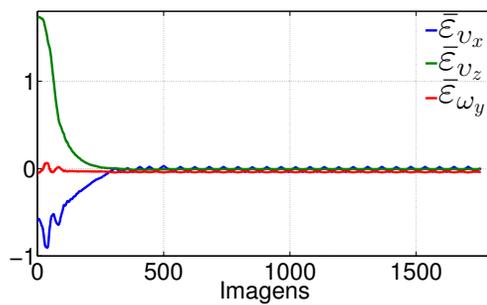
As figuras 5.5(e) e 5.5(f) apresentam as velocidades impostas aos atuadores ao longo da tarefa de posicionamento, em ambas as configurações de controle. Os decaimentos exponenciais em v_x para ambos os casos apresentam comportamentos semelhantes, e o uso de ganhos diferentes propiciaram alterações nas amplitudes dos respectivos sinais. As velocidades impostas em ω_b e ω_p apresentam oscilações disformes e abruptas ocasionadas a princípio pelas imprecisões do *pan*; além disso, apresentam decaimentos rápidos até abeira-se da pose desejada. Após estas considerações,



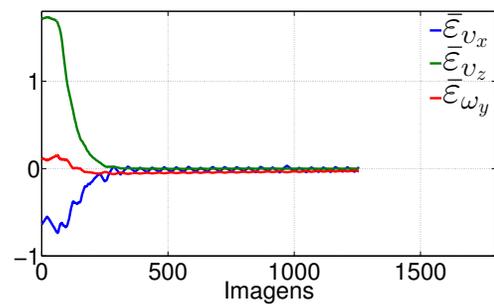
(a) Erro de controle caso 1



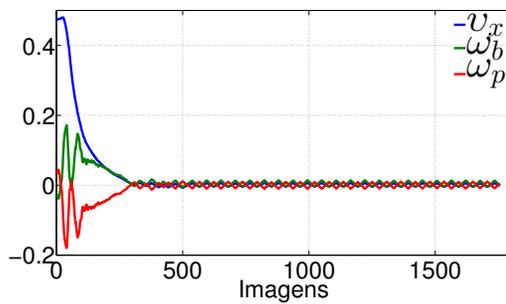
(b) Erro de controle caso 2



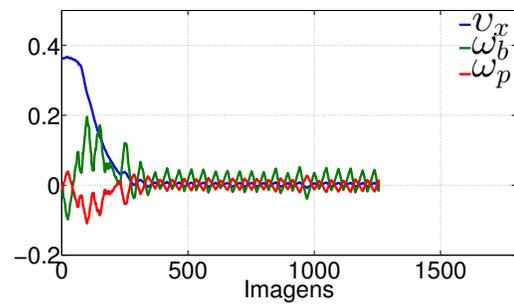
(c) Erro desacoplado de controle caso 1



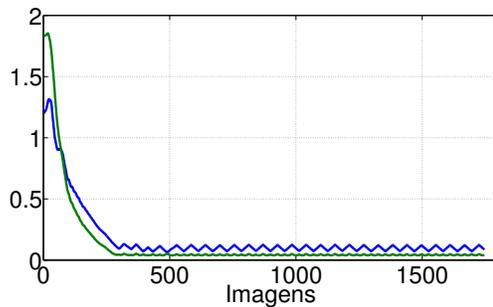
(d) Erro desacoplado de controle caso 2



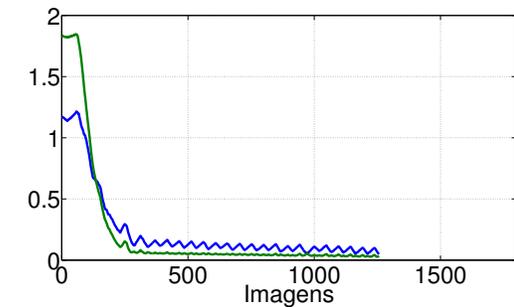
(e) Velocidade de controle caso 1



(f) Velocidade de controle caso 2



(g) Norma do erro caso 1



(h) Norma do erro caso 2

Figura 5.5: Técnica DDVS: comparação entre os casos 1 e 2

para o caso 1, os sinais de controle tornam-se fracos demais, ocasionando assim, ora lentidão do veículo, ora ausência de torques necessários para movê-lo em direção a pose desejada; por outro lado, para o caso 2, os sinais de controle possuem amplitudes necessárias para dar mobilidade ao robô na tarefa de alocar a câmera na pose pretendida. Salienta-se, ainda, que as componentes explicitas nos gráficos seguem a orientação definida para o robô apresentado na figura 4.4.

Como na situação anterior (acoplado), a plataforma apresentou comportamento distinto nos dois casos (ganhos constante ou variável), como se pode constatar nos sinais de controle enviados ao veículo. Assim, a matriz de ganho Λ_{cte} atua sempre favorecendo a mesma taxa de variação das velocidades, enquanto que a matriz de ganhos variáveis Λ_{var} impõe ganhos pertinentes de modo a impor velocidade o suficiente à plataforma, mesmo quando ela estiver próxima da pose desejada, onde os erros são muito pequenos. Por esta razão, o caso 2 apresentou tempos menores para a execução da tarefa de posicionamento proposta. Nota-se claramente que após se atingir uma região de erro pequeno, o caso 1 ainda exige cerca de 1500 imagens até a estabilização final da plataforma, enquanto que o caso 2 exige um número bem menor, cerca de 1000 imagens.

A evolução das normas dos erros de controle são apresentados nas figuras 5.5(g) e 5.5(h). A norma do erro, em azul, é utilizada para determinar a condição de parada, sendo esta dada por $\|\epsilon\| \leq 0,05$. A norma do erro desacoplado, mostrada em verde, denota os efeitos de amplificação de sinais fortes e atenuação dos sinais fracos; sendo esta característica introduzida pela técnica. Verifica-se, ainda, que esta norma atinge uma condição de "pequenos erros" mais rapidamente do que o outro caso, embora essa condição não indica necessariamente que a pose almejada tenha sido alcançada.

Nas figuras 5.6 e 5.7 são mostradas as imagens de referência, inicial e final capturadas pela câmera embarcada no robô, bem como as poses correspondentes do robô no ambiente de ensaio, para ambos os casos 1 e 2, respectivamente.

5.2.3 Discussão

Os resultados experimentais apresentados por Silveira e Malis (2012a) e Silveira *et al.* (2013a) quando realizadas no braço robótico apresentam decaimentos exponenciais para todas as seis componentes da velocidade. Além disso, a técnica *DDVS* para tais experimentos demonstraram melhores resultados em relação a técnica *DVS*. Todavia, os resultados aqui obtidos ao utilizar uma plataforma experimental móvel apresentaram decaimentos exponenciais com distorções, embora essa alteração não tenha modificado de maneira expressiva os decaimentos exponenciais. E mais, a técnica *DVS* apresentou melhores resultados quando comparada com a técnica *DDVS*.

A princípio, as deformidades nos decaimentos exponenciais dos erros e consequentemente

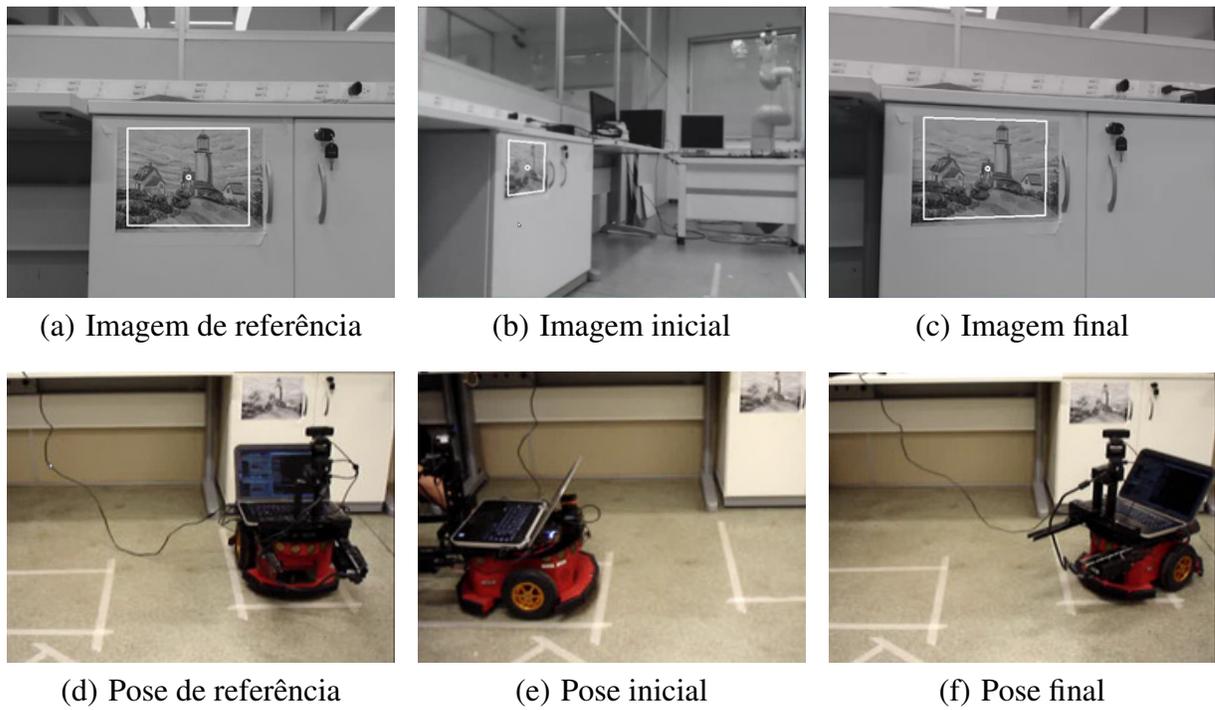


Figura 5.6: Técnica DDVS: caso 1

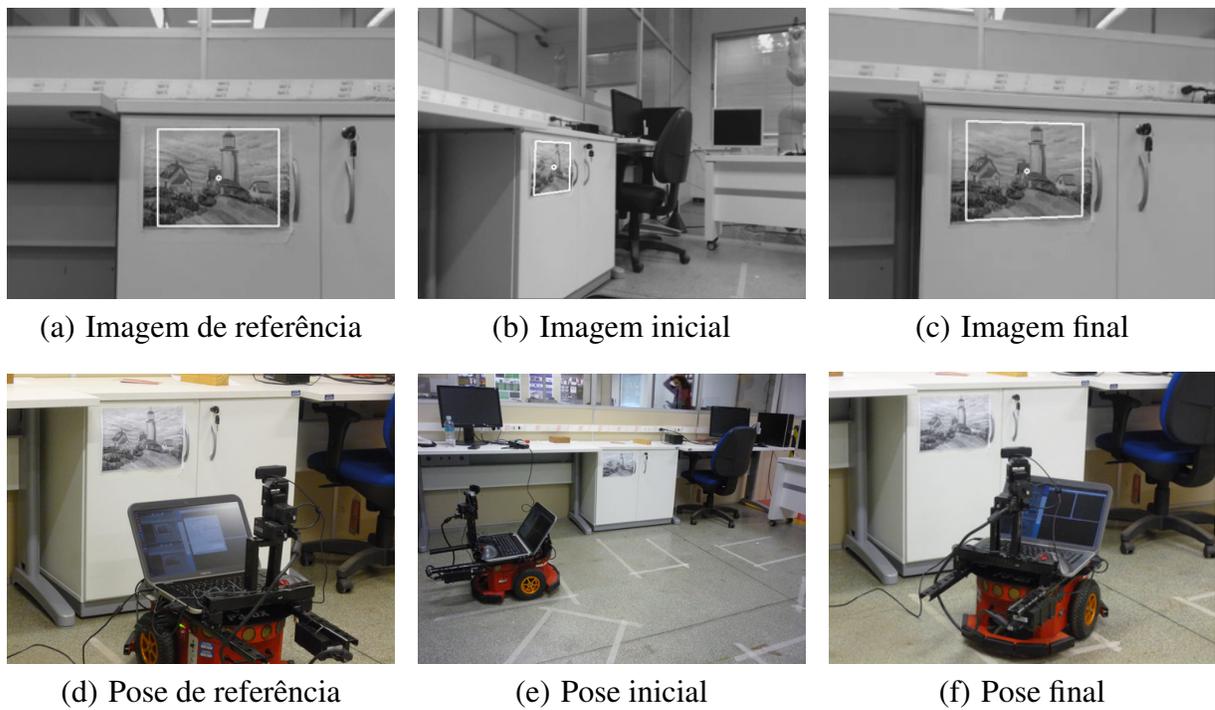


Figura 5.7: Técnica DDVS: caso 2

nos sinais de controle são atribuídos aos comportamentos inesperados do *pan* durante todos ensaios; o mecanismo apresentou oscilações por todos os instantes, embora o mesmo tenha ficado em torno do ponto de controle seja utilizando a técnica *DVS*, seja empregando a técnica *DDVS*; como de ser esperado, este distúrbio foi incorporado aos erros e propagados na velocidade. Todavia, não é possível afirmar que o acoplamento mecânico da plataforma tenha algum envolvimento com os resultados obtidos, embora seja possível que este efeito tenha alguma influência no desfecho de cada um dos testes.

Averiguou-se ainda que quando impostas velocidades em $\|\omega_p\| \leq 0,03$ rad/s o mecanismo não respondeu de maneira adequada e concomitantemente girou em velocidades bem acima do determinado. Logo, é possível inferir que estes sinais de baixas amplitudes tenham impactado os movimentos do *pan* cujo resultado se apresentou como distúrbio. Infelizmente, não foi possível mensurar a velocidade de rotação do *pan* nestas condições inesperadas, pois o mecanismo não possui *encoder* que permitisse medir estes valores.

Por outro lado, embora o servomotor utilizado nos experimentos não tenha sido o mais adequado e tenha, ainda, introduzido perturbações ao sistema, o mesmo demonstrou ser satisfatório, mas não eficaz, para as tarefas impostas quando realizado em baixas velocidades; como pode ser verificado nos resultados expressos pelas nas figuras 5.2(a)–5.2(f). Além disso, contribuiu para demonstrar que a técnica num todo é robusta à algumas perturbações e é capaz de reagir bem a esses efeitos repentinos. Por fim, pelo resultado satisfatório acabou-se refutando quaisquer hipóteses de intervenção no *pan-tilt* diferente das pré-estabelecidas pelas leis de controle.

Dentre as tarefas de posicionamento, o uso de ganhos variáveis ou caso 2, Λ_{var} , apresentaram melhores resultados em comparação ao uso de ganhos constantes ou caso 1, Λ_{cte} . A justificativa do baixo desempenho quando utilizou-se Λ_{cte} está na forma de controle utilizada na intervenção dos atuadores do Pioneer; assume-se que a forma de controlá-lo esteja na variação da corrente a ser fornecida ao motor. Isto é, o sinal de controle possui relação direta a corrente fornecida ao motor; logo, baixos sinais de controle implicaram em baixas intensidades de corrente; conseqüentemente, a corrente fornecida ao motor pode não ser o suficiente para gerar fluxo magnético capaz de forçar o rotor a girar, quer dizer, o motor está operando numa região de limiar entre gerar torque capaz de rotacionar o rotor e não gerar torque.

Diferentemente, quando utiliza-se ganhos variáveis o desempenho da plataforma é melhor; pois, para a região próxima a pose desejada, os sinais de controle apresentam valores acima da região de limiar de funcionamento dos motores. Logo, os sinais de corrente são satisfatórios para gerar torque e produzir movimento da plataforma.

Na literatura, a técnica *DDVS* fora considerada como promissora em relação a *DVS*, pois ela desacopla os erros translacionais dos rotacionais; conseqüentemente, apresentaram maior rapidez

na execução da tarefa. No entanto, nestes experimentos demonstraram-se uma situação adversa, pois o *DVS* realizou a tarefa com mais rapidez, sendo a diferença de pelo menos 100 imagens. Essa diferença nos resultados é justificada pelos tipos de atuadores utilizados por um braço robótico e por esta plataforma móvel. Isto é, percebe-se que um braço robótico opera com precisão para atingir a pose desejada, são sistemas construídos para serem extremamente precisos. Por outro lado, os atuadores do robô móvel não possuem a mesma precisão. Além disso, os atuadores de um manipulador devem ser controlados por sistemas mais eficientes evitando assim a dependência excessiva da corrente para girar os motores; situação que não ocorrera neste trabalho. Por fim, pressupõe que o método de servovisão direta seja mais robusto para operar em veículos com precisão grosseira e quando os mesmos controlem os motores por variação de corrente.

Pelas figuras 5.3, 5.4, 5.6 e 5.7, nota-se que a pose da plataforma experimental não fora levada em consideração. Pois, a preocupação até este momento é apenas em posicionar a câmera no local desejado. Além disso, assume-se que o objeto está estático.

5.3 Experimentos de rastreamento

Esta seção introduz o assunto de rastreamento a alvos móveis. Parte reservada a apresentação de resultados de dois temas: o primeiro abordando o rastreamento de objetos pela técnica de servovisão direta e o segundo acercando o caso desacoplado. Diferentemente dos casos anteriores, apresentados na seção 5.2, o uso de integradores, a principio, seria necessário; pois, o mesmo tem como objetivo eliminar o erro de estado estacionário.

Todavia, neste trabalho não serão inseridos qualquer método que cumpra a função de integradores para eliminar o erro de estado estacionário; será atentado apenas a verificação do potencial das técnicas para perseguir objetos móveis, ou seja, o erro de estado estacionário não será tachado como inconveniente nos atuais procedimentos. Além disso, apesar da eliminação dele seja interessante, o desenvolvimento de integradores neste tipo de rastreamento ainda requer, pesquisas e desenvolvimentos acurados.

Esta seção versará apenas os resultados obtidos nos testes de perseguição do alvo. O alvo percorrerá uma área livre; não sendo definido, portanto, a trajetória para o mesmo. Logo, a plataforma seguirá o alvo sem levar em consideração o percurso do veículo na realização das missões. Outrossim, na presente seção não serão realizadas quaisquer tipo de equiparação ou comparação sejam dos resultados, sejam das técnicas, pois nestes ensaios não foram garantidas as repetibilidades dos experimentos.

5.3.1 Servovisão direta

O experimento de perseguição de alvo planar móvel ao utilizar a técnica de servovisão direta fora realizado com ganho variável. O ganho está definido na equação (5.6) e os gráficos estão nas figuras 5.8(a), 5.8(b) e 5.8(c). Foram realizadas as seguintes trajetórias do objeto em relação a plataforma: movimentação longitudinal do objeto de maneira a distanciá-lo do conjunto robótico; rotação do objeto em torno da plataforma experimental em sentido anti-horário e, posteriormente, em sentido horário; por fim, aproximou o objeto do veículo. Cenas do experimento podem ser vistas na sequência de figuras 5.11, o video deste experimento encontra-se no seguinte endereço: <https://goo.gl/e1cHKN>.

$$\Lambda_{var} = \begin{bmatrix} 0,40 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,40 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,40 \end{bmatrix} e^{-0,60\|\epsilon\|} \quad (5.6)$$

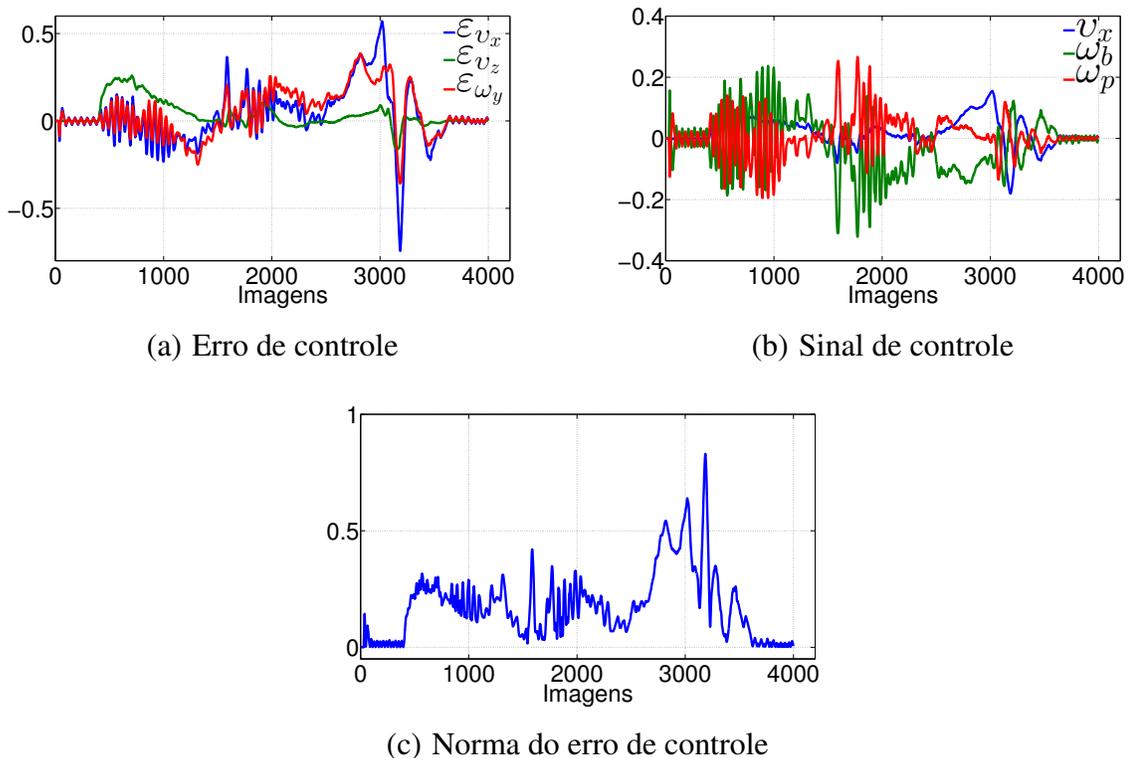


Figura 5.8: Técnica DVS: Perseguição com ganho variável



Figura 5.9: Registros da Perseguição usando a técnica DVS

Nota-se na figura 5.8(a) que o ensaio inicia com ε_{ν_x} e ε_{ω_y} oscilando. Este efeito é gerado pelo *pan* e seu comportamento desajustado. Além disso, infere-se que ε_{ν_x} e ε_{ω_y} apresentam valores negativos enquanto ε_{ν_z} cresce positivamente, esse é o resultado de afastar o objeto da plataforma e posteriormente girá-la no sentido anti-horário. Posteriormente, a profundidade da câmera ε_{ν_z} é reduzido a próximo de zero e apenas rotaciona-se o objeto pelo sentido horário; logo, ε_{ν_x} e ε_{ω_y} apresentam valores positivos.

A figura 5.8(b) apresenta os sinais de controle enviados a plataforma no objetivo de posicionar a câmera na pose pre-determinada. Nota-se que os sinais de ω_b e ω_p oscilam bastante, ou seja, o ganho Λ_{var} valorou ε tornando os sinais ruidosos. Diferente, dos experimentos de posicionamento, neste não foram utilizados condição de parada, $\|\varepsilon\|$, para finalizar o rastreamento do objeto, embora o gráfico tenha sido delineado na figura 5.8(c).

5.3.2 Servovisão direta desacoplada

Este espaço foi dedicado ao experimento de perseguição de alvos por meio da técnica de servovisão direta desacoplada com ganhos constantes cujos valores estão discriminados na matriz (5.7). Os resultados deste ensaio estão delineados nas figuras 5.10(a)–5.10(d). A plataforma experimental nesta tarefa fora testada nas trajetórias: longitudinal e curvilíneas. Cenas do experimento podem ser vistas na sequência de figuras 5.9, o video deste experimento encontra-se no seguinte endereço: <https://goo.gl/YPpmRU>.

$$\Lambda_{cte} = \begin{bmatrix} 0,30 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,15 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,15 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Pelas figuras 5.10(a) e 5.10(b) é notório o distúrbio promovido pelo *pan*, embora os ganhos constantes contribuam para a minoração destas perturbações no início do experimento, pois a pose corrente está muito próxima da pose desejada. Por outro lado, para as demais circunstâncias as componentes do erro de controle ε_{ν_x} e ε_{ω_y} passaram a oscilar em amplitudes maiores. Por fim, os erros nas componentes $\bar{\varepsilon}_{\nu_x}$ e $\bar{\varepsilon}_{\omega_y}$ apresentam poucas variações, justificado pela ausência de esforços dessas componentes de maneira exagerada em comparação ao ensaio apresentado na subseção 5.3.1, figura 5.8(a).

As velocidades apresentadas na figura 5.10(c) revelam que os atuadores trabalharam constantemente para alocar a câmera de maneira adequada; nota-se, no entanto, a mudança de sentido das velocidades ω_b e ω_p , situação causada pelo distúrbio proveniente do *pan* cujo aumento relativo do erro entre as poses desejada e corrente amplificou o distúrbio. Posteriormente, verifica-se o

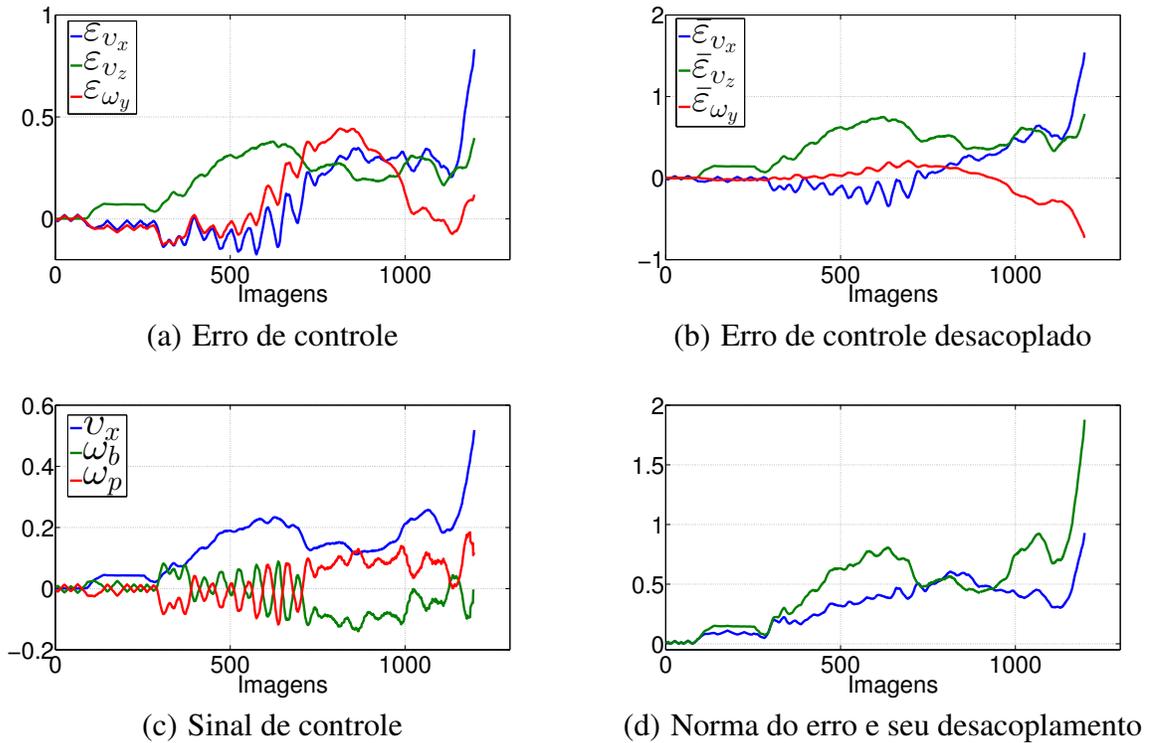


Figura 5.10: Técnica DDVS: Perseguição com ganho variável

aumento da amplitude das velocidades e o cessamento do rastreamento.

O rastreamento foi cessado de maneira inesperada, pois os sinais de controle ajustados para a condição holonômica da plataforma não foram eficientes em reduzir os erros laterais do veículo em relação ao alvo. Infere-se, no entanto, que as causas para esse infortúnio surgiram da restrição holonômica da plataforma, pois os ajustes realizados não incluíram movimentos rotacionais exagerados. Logo, o ponto holonômico possui esta característica apenas para manobras suaves de rotação do Pioneer. Por isso, mesmo tendo uma profundidade pertinente entre a câmera e o objeto, este valor pouco sofreu alterações nas últimas 150 imagens, como pode ser visto na figura 5.10(a); representada pelo termo ε_{v_z} . Entretanto, a distância lateral ε_{v_x} cresceu rapidamente; demonstrando que a plataforma não era controlada de maneira adequada pela lei de controle e que o ponto dito holonômico é não holonômico nesta situação peculiar. Além disso, o erro lateral ε_{v_x} possui relação direta com a velocidade longitudinal v_x fazendo o veículo deslocar-se mais rapidamente, quando o correto seria rotacionar.

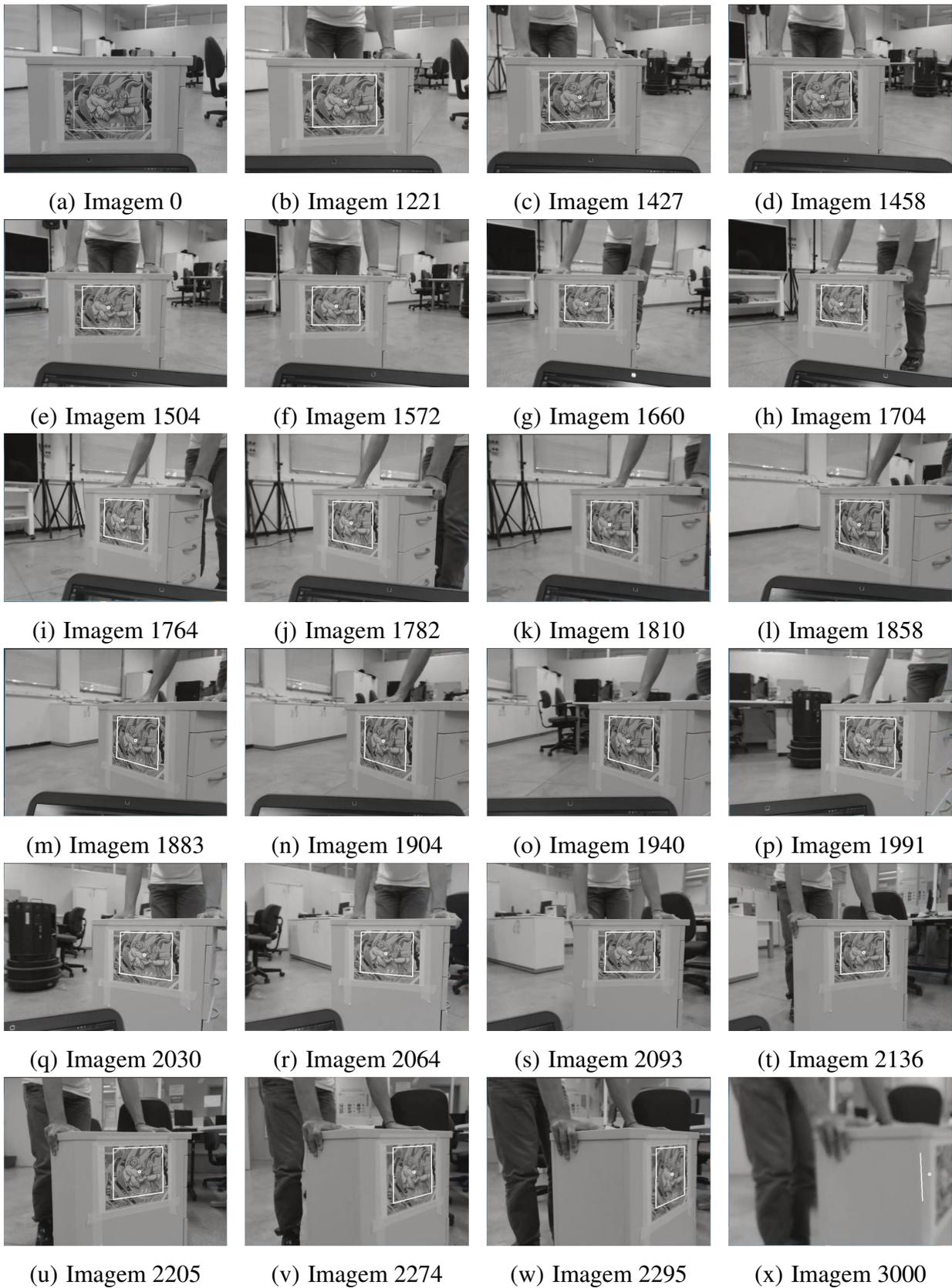


Figura 5.11: Registros do rastreamento DDVS referente a figura 5.10.

Por fim, a condição holonômica do ponto é válida apenas para pequenos movimentos e pequenas tarefas. Sobre tudo, existe ainda a necessidade de considerar a pose do veículo em relação a trajetória. Isto é, momentaneamente este ponto é holonômico, contudo, existe pelo menos uma circunstância que afeta a garantia de estabilidade provada em (MORIN E SAMSON, 2008) e definida como $(-\pi/2; \pi/2)$. Afinal, a perda do controle se faz presente quando os sinais de controle não são eficazes para corrigir trajetórias durante um percurso qualquer.

É necessário ressaltar, no entanto, que não foram utilizados integradores pois sua implementação demanda tempo e pesquisa acerca do problema. Logo, é possível considerar que sua inserção promova alguma melhoria nos resultados aqui obtidos, embora o planejamento de trajetórias muito provavelmente adeque melhor o controle à mobilidade da plataforma para as situações em que a restrição holonômica tenha forte influência.

5.3.3 Discussão

A literatura científica acerca de servovisão de robôs não holonômicos para rastreamento de alvos móveis é bastante escassa. Um exemplo de solução para este problema é proposta em Benhiman *et al.* (2005b). Porém, seu contexto é bastante diferente, pois é utilizado um carro robótico e a abordagem de servovisão é métrica.

Nos resultados apresentados acerca das técnicas *DVS* e *DDVS* foram utilizados um objeto planar e rígido. Além disso, utilizou-se uma estrutura cuja dinâmica ao longo do experimento pode ter desempenhado uma dinâmica distinta da plataforma, embora a proposta de Morin e Samson (2008) restrinja a aplicação de rastreamento para veículos cujas dinâmicas sejam similares. Todavia, assumiu-se que a inserção de um grau de liberdade a mais obtida ao afixar o atuador na plataforma tornaria o método mais robusto as restrições definidas pelos seus proponentes.

Como pode ser observado, na subseção 5.3.1 o veículo foi capaz de rastrear o alvo quando este girou em torno da plataforma. Logo, a tarefa foi desempenhada com sucesso e demonstrou a robustez em manobras mesmo sem integradores e para dinâmicas diferentes, embora a dinâmica desempenhada pelo robô explorou a rotação da plataforma por meio do Pioneer e do *pan*. Isto é, utilizou-se uma dinâmica diferente entre o objeto alvo e o carro seguidor, inferindo que a dinâmica possa ser diferente em relação ao carro seguidor obedecendo no entanto os movimentos holonômicos característicos do carro seguidor e respeitando a garantia de estabilidade que está entre $(-\pi/2; \pi/2)$.

Além disso, a restrição holonômica não foi explorada, sendo assim, esta restrição influenciou pouco o ensaio dado ao tipo de tarefa que foi imposta a plataforma. Todavia, movimento de aproximação do alvo em relação ao veículo ocasionou alterações expressivas nos erros laterais; podendo

inferir que a instabilidade para movimentos longitudinais negativos realmente afetam o sistema; podendo, ainda, levar a instabilidade e até mesmo a perda de controle.

Por outro lado, na subseção 5.3.2 apresentou os resultados de rastreamento do alvo explorando os movimentos de traslação e rotação da plataforma. Os resultados mostraram que a ausência de integradores no experimento não influenciou de maneira expressiva o rastreamento. Lembrando, contudo, que o erro entre o alvo e o carro seguidor variaram por esta razão.

Outra situação peculiar está na ausência de planejamento de trajetória pelo veículo, ou seja, o veículo escolheu o menor caminho para rastrear o alvo, diferentemente, do que aconteceu em (BENHIMANE *et al.*, 2005b), pois para esta referência fora implementado um planejamento de trajetórias. Ademais, a proposta impõe movimentos suaves a plataforma para estabilizar a pose corrente em relação a pose de referência por meio das imagens. Contudo, a correção dos erros foi insatisfatória para as circunstâncias em que o ponto que antes era holonômico perdera esta qualidade. A causa é atribuída a orientação do veículo em relação ao objeto. Logo, nota-se que a pose do veículo torna-se fundamental para que a lei de controle cumulada com o ajuste tenham resultados eficientes na tarefa de rastreamento. Por fim, acredita-se que o planejamento de trajetórias traga resultados positivos, pois esta técnica poderá ajustar a orientação do veículo quando o mesmo possuir valores altos de divergência em relação ao alvo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Não importa o que você seja, quem você seja, ou que deseje na vida, a ousadia em ser diferente reflete na sua personalidade, no seu caráter, naquilo que você é. E é assim que as pessoas lembrarão de você um dia.

Ayrton Senna

Este trabalho averiguou as aplicações das técnicas de servovisão direta e seu desacoplamento para o controle de veículo diferencial; este tipo de veículo possui restrição holonômica na transversal do corpo rígido, ou seja, no eixo \bar{y} ; assunto explicitado no capítulo 4.

A aplicação das técnicas *DVS* e *DDVS* para um veículo diferencial ocorreu por meio de ajustes embasados na proposta de Morin e Samson (2008). Esta alternativa apresentou efeitos holonômicos em regiões fora do eixo de tração do veículo, embora seja uma técnica com restrições advindas da garantia de estabilidade de controle para o intervalo de $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$. Além disso, os movimentos longitudinais negativos trazem instabilidade ao ponto.

Para a tarefa exclusiva de posicionamento, ambas as técnicas apresentaram resultados favoráveis, embora a técnica *DVS* ao ser combinada com ganho variável propiciou melhor resultado. Pois, ela possui melhor desempenho com atuadores controlados por corrente contínua e notou-se que este tipo de mecanismo não precisa ser muito preciso. Logo, o controle por servovisão direta para este tipo de motor conferirá melhores resultados em relação ao *DDVS*.

As tarefas de rastreamento de objetos móveis demonstraram resultados interessantes, pois a partir destes foram possíveis construir conceitos mais sólidos sobre a proposição de Morin e Samson (2008). Isto é, ao empregar a técnica *DVS* foi possível compreender que o ponto definido como holonômico — pseudo-holonômico — rastreou o objeto de maneira satisfatória, mesmo para as trajetórias distintas do veículo e do alvo. Pois, o ponto projetado para ser holonômico desempenhou

essa função por todo o período de testes.

Por outro lado, as restrições holonômicas da plataforma foram exploradas ao empregar a tarefa de perseguição utilizando a técnica *DDVS*. Os resultados demonstram que o ponto pseudo-holonômico é satisfatório apenas para movimentos rotacionais suaves, pois esta técnica atua mais intensamente nas velocidades longitudinais do que em velocidades rotacionais do veículo, ou seja, os movimentos rotacionais mais intensos são promovidos pela rotação do *pan*. Logo, orientações do veículo em relação a câmera podem se tornar um problema quando este valor é muito alto. Afinal, as técnicas e ajustes propostos não serão eficientes para atuar no controle da plataforma de maneira eficiente. O resultado será a perda do rastreamento,

A ausência de preocupação acerca da pose do veículo em relação ao objeto tornou-se um fator grave quando o assunto a ser tratado é perseguição de objetos móveis. Esta foi a razão para a plataforma deixar de rastrear o objeto em um dos ensaios apresentados neste trabalho. Dentre os trabalhos futuros devem ser explorados o planejamento de trajetória para situações cujo ponto pseudo-holonômico tenha desempenho insatisfatório, pois isto torna ineficaz a lei de controle. Além disso, o desenvolvimento de integradores capazes de eliminar o erro de estado estacionário podem ser promissores na obtenção de resultados mais acurados.

CAPÍTULO 7

TRABALHOS PUBLICADOS

- Silveira, Geraldo; Miranda, Leonardo Rodrigues; de Paiva, Ely Carneiro.
Servovisão Direta: teoria e experimentos
IV Brazilian Conference on Intelligent Systems - Bracis 2015
XII Encontro Nacional de Inteligencia Artificial e Computacional
X Symposium in information and Human Language Technology

REFERÊNCIAS

BACHTA, W.; RENAUD, P.; MALIS, E.; HASHIMOTO, K. e GANGLOFF, J. Visual servoing for beating heart surgery. In G. Chesi e K. Hashimoto, editores, **Visual Servoing via Advanced Numerical Methods**, v. 401 de *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pp. 91–114. Springer London, 2010. ISBN 978-1-84996-088-5.

URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84996-089-2_6

BEARDSLEY, P.A.; REID, I.D.; ZISSERMAN, A. e MURRAY, D.W. Active visual navigation using non-metric structure. In **Proc. IEEE International Conference on Computer Vision**, pp. 58–64. 1995.

BENHIMANE, S. e MALIS, E. Homography-based 2D visual servoing. In **Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation**. USA, 2006.

BENHIMANE, S.; MALIS, E.; RIVES, P. e AZINHEIRA, J.R. Vision-based control for car platooning using homography decomposition. In **Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on**, pp. 2161–2166. April 2005a.

BENHIMANE, S.; MALIS, E.; RIVES, P. e AZINHEIRA, J.R. Vision-based control for car platooning using homography decomposition. In **Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Spain, 2005b.

BOLTON, W. **MECATRÔNICA: Uma abordagem multidisciplinar**. Bookman - ARTMED, 2010. ISBN 9788577806577.

CAMPION, G. e CHUNG, W. **Springer Handbook of Robotics**, capítulo Wheeled Robots, pp. 391–410. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-30301-5.

URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_18

CHAUMETTE, F. e HUTCHINSON, S. Visual servo control. i. basic approaches. **Robotics Automation Magazine, IEEE**, v. 13, n. 4, 82–90, Dec 2006a.

CHAUMETTE, F. e HUTCHINSON, S. Visual servo control part I: Basic approaches. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, pp. 82–90, 2006b.

DA LÍNGUA PORTUGUESA, M.M.D. Michaelis dicionário online. <http://michaelis.uol.com.br>, 3 2009. Acessado: 22 de setembro de 2015.

FAUGERAS, O.; LUONG, Q.T. e PAPADOPOULOU, T. **The geometry of multiple images**. The MIT Press, 2001.

HARTLEY, R.I. e ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second ed., 2004.

IRANI, M. e ANANDAN, P. All about direct methods. In **Proc. of the Workshop on Vision Algorithms: Theory and practice**. 1999.

MALIS, E.; CHAUMETTE, F. e BOUDET, S. 2 1/2d visual servoing. **Robotics and Automation, IEEE Transactions on**, v. 15, n. 2, 238–250, Apr 1999.

MALIS, E.; HAMEL, T.; MAHONY, R. e MORIN, P. Estimation of homography dynamics on the special linear group. In G. Chesi e K. Hashimoto, editores, **Visual Servoing via Advanced Numerical Methods**, v. 401 de *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pp. 133–150. Springer London, 2010. ISBN 978-1-84996-088-5.

URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84996-089-2_8

MAYA-MENDEZ, M.; MORIN, P. e SAMSON, C. Control of a nonholonomic mobile robot via

sensor-based target tracking and pose estimation. In **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp. 5612–5618. 2006.

MORIN, P. e SAMSON, C. Motion control of wheeled mobile robots. In **Springer Handbook of Robotics**, pp. 799–826. Springer, 2008.

MURPHY, R.R. **Introduction to AI Robotics**. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1st ed., 2000. ISBN 0262133830.

SIEGWART, R. e NOURBAKHSI, I.R. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. Bradford Company, Scituate, MA, USA, 2004. ISBN 026219502X.

SILVEIRA, G. On intensity-based nonmetric visual servoing. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 30, n. 4, 1019–1026, 2014a.

SILVEIRA, G. **Robótica Móvel**, capítulo SLAM visual, pp. 208–225. LTC, 2014b.

SILVEIRA, G. e MALIS, E. Direct visual servoing with respect to rigid objects. Research Report 6265, INRIA, 2007.

SILVEIRA, G. e MALIS, E. Unified direct visual tracking of rigid and deformable surfaces under generic illumination changes in grayscale and color images. **International Journal of Computer Vision**, v. 89, 84–105, 2010.

SILVEIRA, G. e MALIS, E. Direct visual servoing: Vision-based estimation and control using only nonmetric information. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 28, n. 4, 974–980, 2012a.

SILVEIRA, G. e MALIS, E. Direct Visual Servoing: Vision-based estimation and control using only nonmetric information. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 28, n. 4, 974–980, 2012b.

SILVEIRA, G.; MALIS, E. e RIVES, P. The efficient E-3D visual servoing. **Int. Journal of**

Optomechatronics, v. 2, n. 3, 166–184, 2008.

SILVEIRA, G.; MIRANDA, L. e DE PAIVA, E. Servovisão direta: teoria e experimentos. pp. 186–192, novembro 2015.

SILVEIRA, G.; MIRISOLA, L. e MORIN, P. Decoupled direct visual servoing. In **IEEE/RSJ IROS**, pp. 71–76. Japan, 2013a.

SILVEIRA, G.; MIRISOLA, L. e MORIN, P. Servovisão direta desacoplada. In **Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Fortaleza, Brazil, 2013b.

SILVEIRA, G.F. *et al.* A fast vision-based road following strategy applied to the control of aerial robots. In **Proc. of the IEEE XIV Brazilian Symp. on Computer Graphics and Image Processing**, pp. 226–231. Brazil, Outubro 2001a.

SILVEIRA, G.F. *et al.* Visual servo control of nonholonomic mobile robots. In **Proc. of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, v. 15, pp. 333–341. Uberlândia/MG, Brasil, Novembro 2001b.

SOLTAKHANOV, S.; YUSHKOV, M. e ZEGZHDA, S. Nonholonomic systems. In **Mechanics of non-holonomic systems**, Foundations of Engineering Mechanics, pp. 25–76. Springer Berlin Heidelberg, 2009a. ISBN 978-3-540-85846-1.

URL: [http : //dx.doi.org/10.1007/978 - 3 - 540 - 85847 - 8₂](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85847-8_2)

SOLTAKHANOV, S.K.; YUSHKOV, M.P. e ZEGZHDA, S.A. **Mechanics of non-holonomic systems: A New Class of control systems**, capítulo Holonomic Systems, pp. 1–24. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009b. ISBN 978-3-540-85847-8.

URL: [http : //dx.doi.org/10.1007/978 - 3 - 540 - 85847 - 8₁](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85847-8_1)

SZELISKI, R. Image alignment and stitching. In N. Paragios; Y. Chen e O. Faugeras, editores, **Handbook of Mathematical Models in Computer Vision**, pp. 273–292. Springer, 2005.

TSAI, R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. **Robotics and Automation, IEEE Journal of**, v. 3, n. 4, 323–344, 1987.

TSAKIRIS, D.; RIVES, P. e SAMSON, C. Extending visual servoing techniques to nonholonomic mobile robots. In D.J. Kriegman; G.D. Hager e A.S. Morse, editores, **The Confluence of Vision and Control**, v. 237 de *Lectures Notes in Control and Information Sciences*, pp. 66–78. Springer-Verlag, 1998.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on**, v. 22, n. 11, 1330–1334, Nov 2000.

APÊNDICE A

APÊNDICE

Este espaço foi reservado a apresentação de resultados realizados nas cinco poses iniciais para as técnicas *DVS* e *DDVS*. O distúrbio proferido pelo *pan* para alguns tipos de sinais de controle contribuiu para a decisão de impor velocidades máximas. Isto é, para um dado sinal de controle será limitado para valores iguais ou a cima de $\|0,2\|$, ou seja, qualquer sinal de controle trabalhará na faixa compreendida entre $-0,2$ a $0,2$ seja para velocidades translacionais ou, ainda, para velocidades rotacionais.

A figura A.1 foi reinserida aqui para facilitar a compreensão do assunto, pois apresenta as poses iniciais e a pose de referência. A matriz de ganhos constantes (A.1) apresenta os valores utilizados nos testes para as técnicas de servovisão direta e seu desacoplamento.

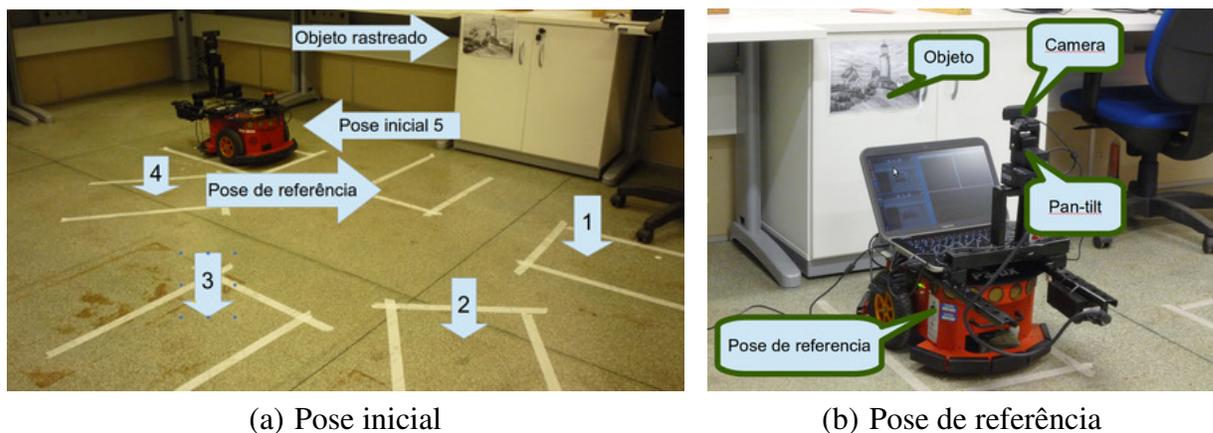


Figura A.1: Cenário experimental

$$\mathbf{\Lambda}_{cte} = \begin{bmatrix} 0,30 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,30 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,30 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

A.1 Servovisão direta

Os resultados foram colocado aos pares combinando a pose 1 com a pose 5 e a pose 2 com a 4. A pose 3, acabou sendo apresentada sem combinação.

Na figura A.2 é possível perceber a saturação por parte da velocidade longitudinal, ν_x , em azul, disposta tanto na figura A.2(c), como na figura A.2(d). Esta restrição de velocidade acontece até por volta da 150° imagem. As velocidades ω_b e ω_p apresentam oscilações parte ocasionado pelo vício do *pan*. Foram imputadas ainda restrições as velocidades ω_b e ω_p até por volta da 250° imagem. Nota-se ainda que os erros ε_{ν_x} e ε_{ω_y} aparecem com sinais opostos quando comparadas as figuras A.2(a) e A.2(b).

Na figura A.3 é possível perceber a saturação por parte das velocidades longitudinais, ν_x , em azul, dispostas nas figuras A.3(c) e A.3(d). Esta restrição de velocidade acontece até por volta da 150° imagem, assim como no caso anterior. As velocidades ω_b e ω_p apresentam oscilações cuja causa é parcialmente atribuída ao vício do *pan*. Nota-se ainda que os erros ε_{ν_x} e ε_{ω_y} aparecem com amplitudes opostas ao comparar as duas figuras A.2(a) e A.2(b). A pose 2 apresenta distancia levemente superior a pose 4 em relação a profundidade ε_{ν_z} .

Na figura A.4 nota-se a saturação dos três sinais de controle. Dentre todos os resultados apresentados nesta seção, estes sinais de controle são os mais curiosos, pois a plataforma deveria deslocar-se apenas em linha reta. De maneira espantosa os erros ε_{ν_x} e ε_{ω_y} apresentam amplitudes elevadas por consequência da absorção dos vícios do *pan*, vide figuras A.3(c) e A.3(d). As restrição impostas as velocidades acontecem até por volta da 200° imagem na componente ν_x , para as demais componentes as restrições estendem-se até a 300° imagem. As velocidades ω_b e ω_p apresentam oscilações parte ocasionada pelo vício do *pan*, vide figura A.4(a).

A.2 Servovisão direta desacoplada

Os resultados obtidos nos ensaios ao utilizar a plataforma móvel experimental controlada pela técnica *DDVS* foram colocado aos pares combinando a pose 1 com a pose 5 e a pose 2 com a 4. A pose 3, acabou sendo apresentada sem combinação.

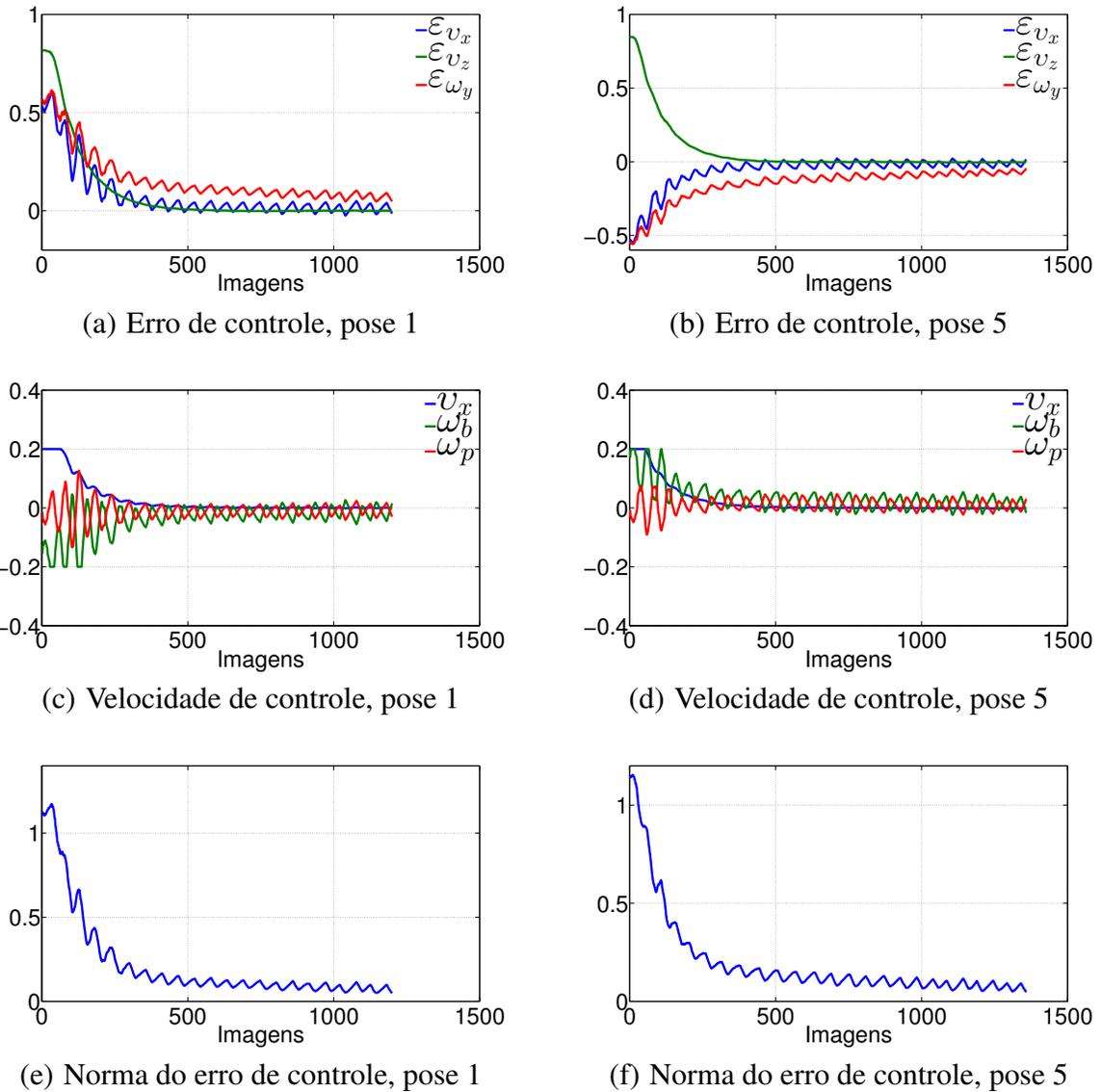


Figura A.2: Técnica DVS: experimento de posicionamento para as poses 1 e 5

Nas figuras A.5(c) e A.5(d) é possível notar as variações abruptas entre picos e vales promovidos pelo descontrole do *pan* em certas velocidades. Como discutido anteriormente, os erros desacoplados, vide A.5(c) e A.5(d), possuem seus valores minorados quando estes possuem baixas amplitudes e majorados quando possuem altas amplitudes. Nas figuras A.5(e) e A.5(f) as restrições de todas as velocidades acontecem aproximadamente até a 250^o imagem e 300^o imagem, respectivamente.

Nas figuras A.6(c) e A.6(d) é possível notar as variações abruptas entre picos e vales pro-

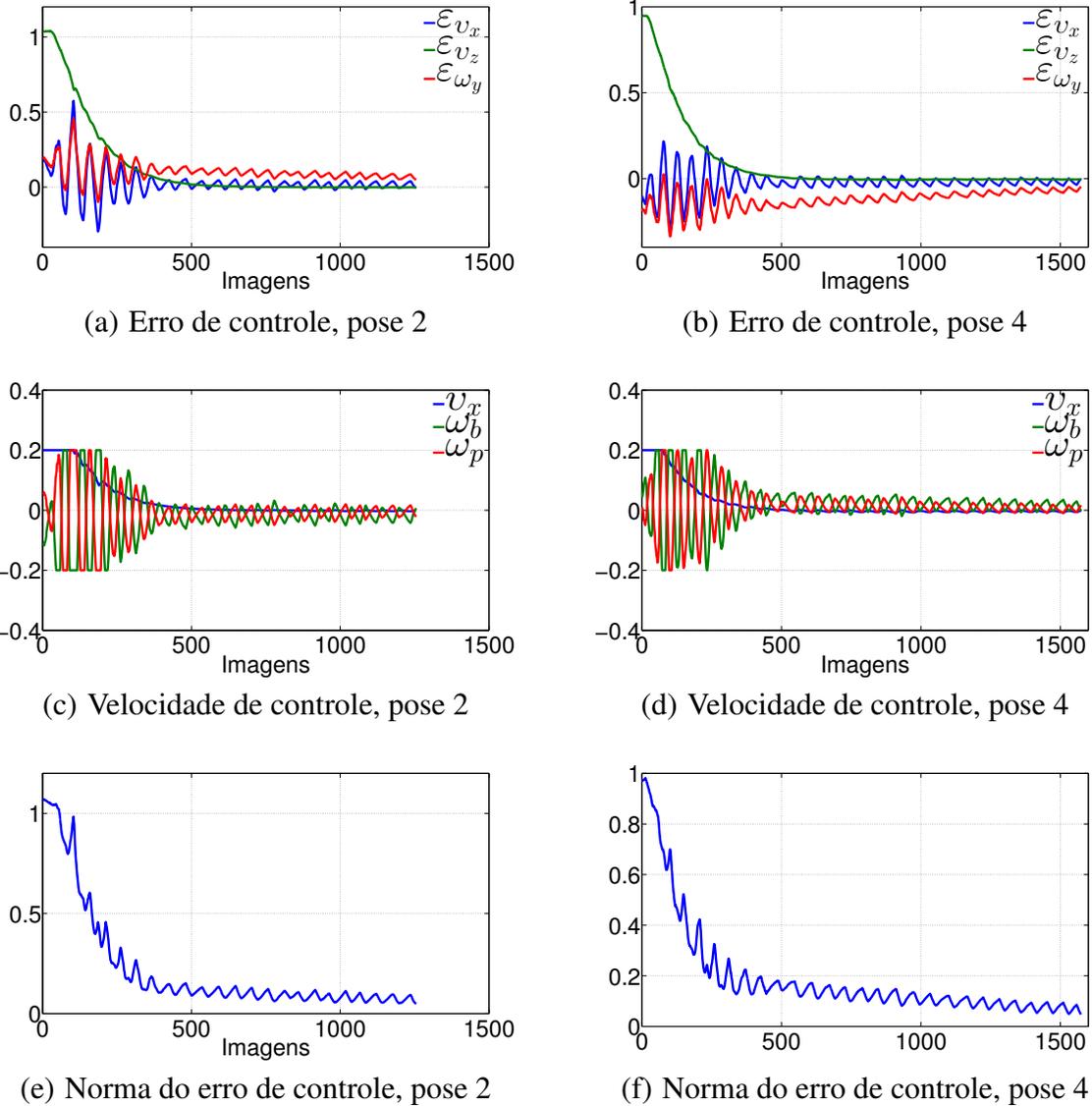
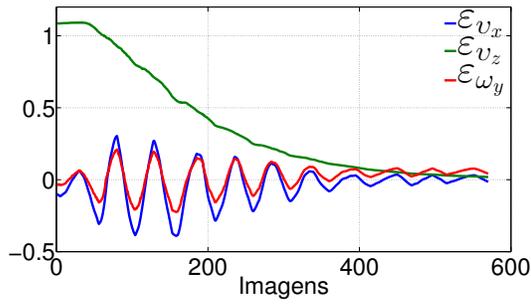


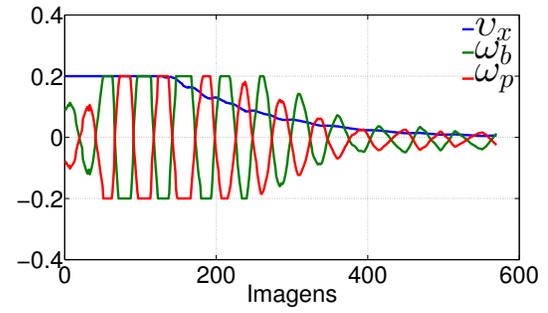
Figura A.3: Técnica DVS: experimento de posicionamento para as poses 2 e 4

movidos pelo descontrole do *pan* em certas velocidades. Como discutido anteriormente, os erros desacoplados, vide A.6(c) e A.6(d), possuem seus valores minorados quando estes possuem baixas amplitudes e majorados quando possuem altas amplitudes. Nas figuras A.6(e) e A.6(f) as restrições de todas as velocidades acontecem aproximadamente até a 250° imagem e 300° imagem, respectivamente.

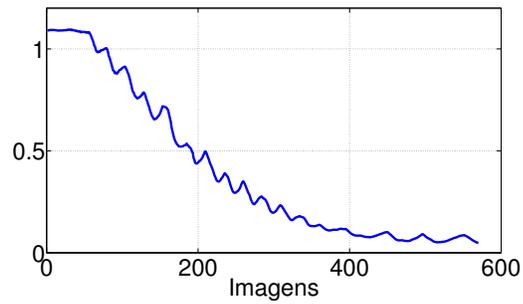
Na figura A.7(b) é possível notar as variações abruptas entre picos e vales promovidos pelo descontrole do *pan* em certas velocidades. Os erros desacoplados, vide A.7(b) possuem seus val-



(a) Erro de controle, pose 3



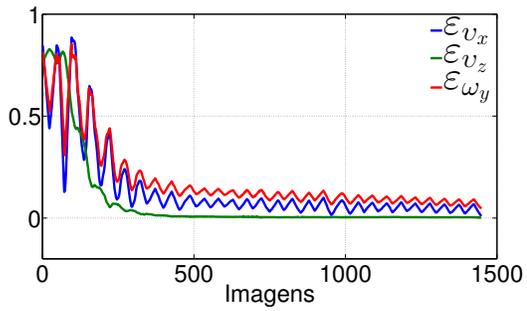
(b) Velocidade de controle, pose 3



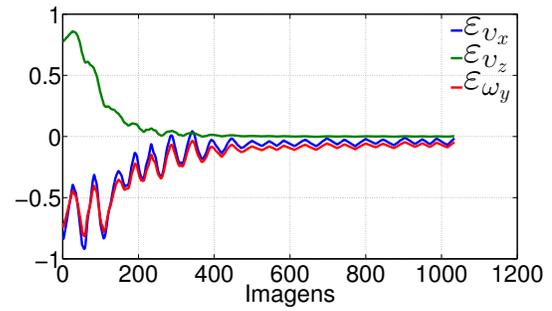
(c) Norma do erro de controle, pose 3

Figura A.4: Técnica DVS: experimento de posicionamento para a pose 3

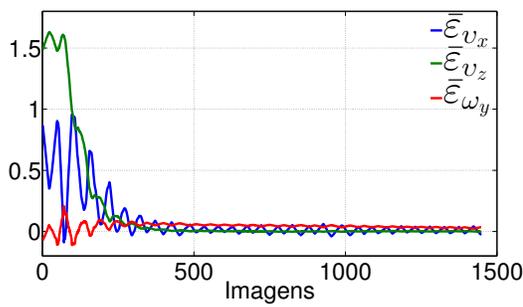
ores minorados quando estes possuem baixas amplitudes e majorados quando possuem altas amplitudes. Nas figuras A.7(c) as restrições de todas as velocidades acontecem por todo o tempo do experimento.



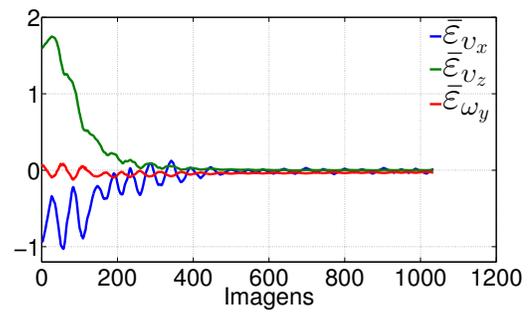
(a) Erro de controle, pose 1



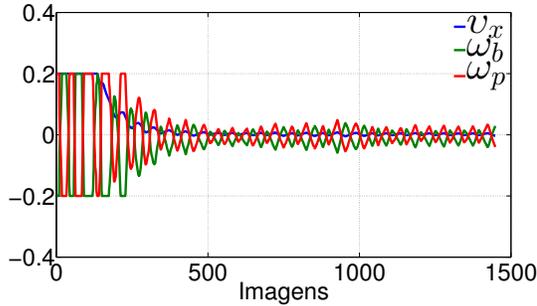
(b) Erro de controle, pose 5



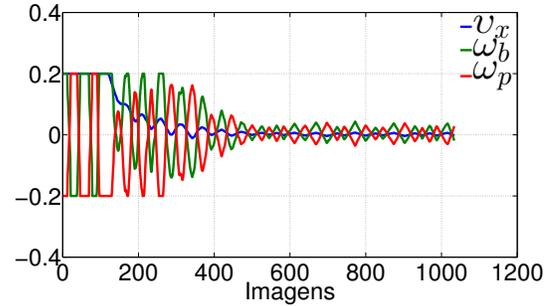
(c) Erro desacoplado de controle, pose 1



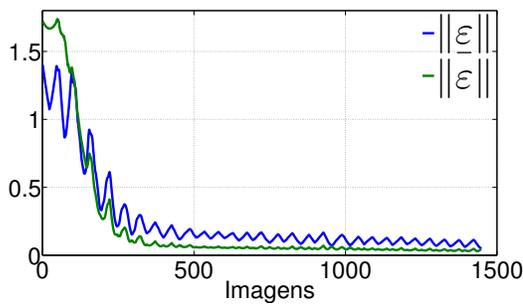
(d) Erro desacoplado de controle, pose 5



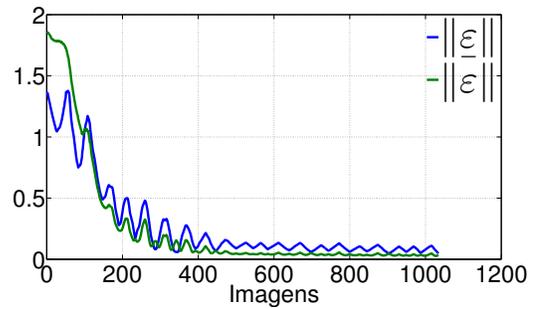
(e) Velocidade de controle, pose 1



(f) Velocidade de controle, pose 5

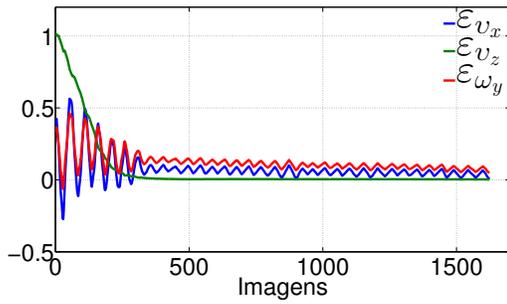


(g) Norma do erro de controle, pose 1

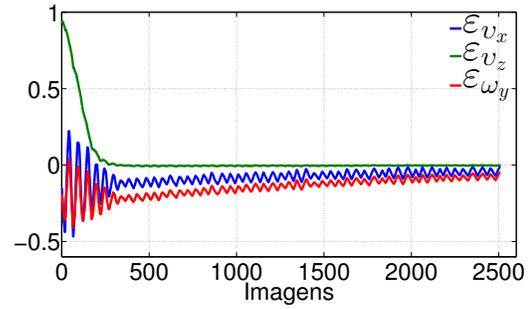


(h) Norma do erro de controle, pose 5

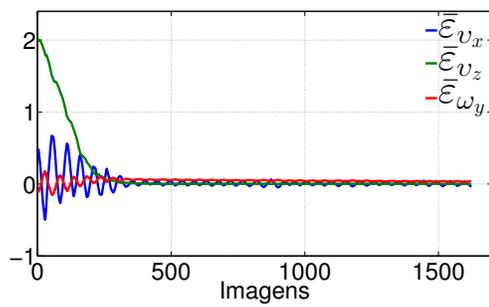
Figura A.5: Técnica DDVS: experimento de posicionamento para as pose 1 e 5



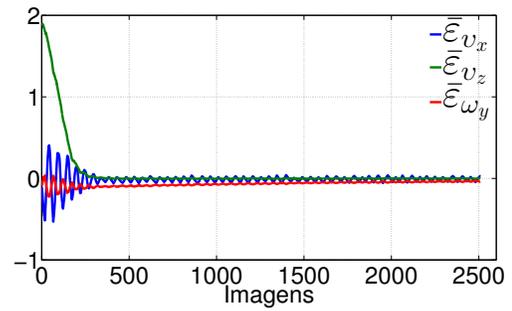
(a) Erro de controle, pose 2



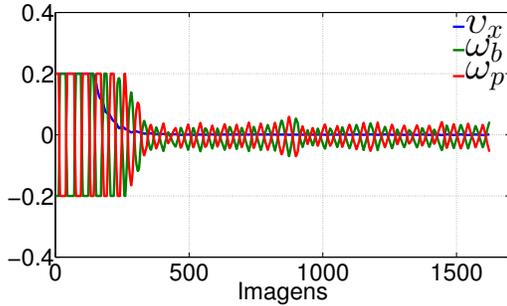
(b) Erro de controle, pose 4



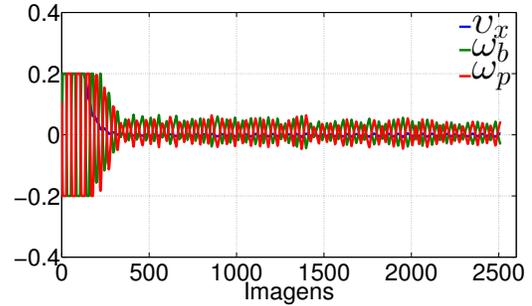
(c) Erro desacoplado de controle, pose 2



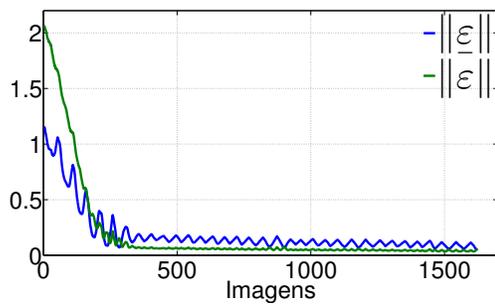
(d) Erro desacoplado de controle, pose 4



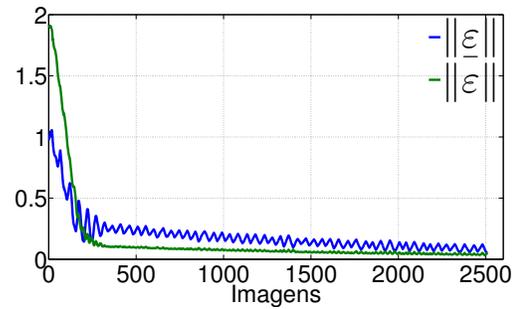
(e) Velocidade de controle, pose 2



(f) Velocidade de controle, pose 4

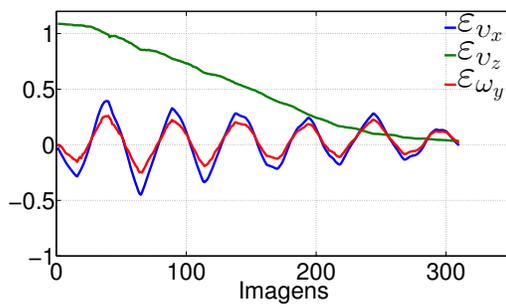


(g) Norma do erro de controle, pose 2

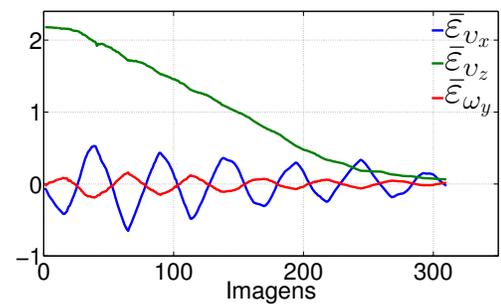


(h) Norma do erro de controle, pose 4

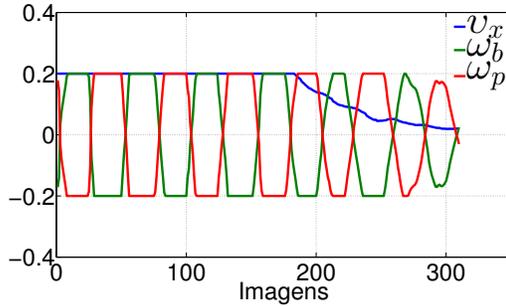
Figura A.6: Técnica DDVS: experimento de posicionamento para as poses 2 e 4



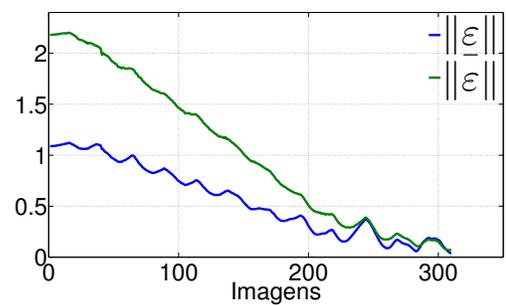
(a) Erro de controle, pose 3



(b) Erro desacoplado de controle, pose 3



(c) Velocidade de controle, pose 3



(d) Norma do erro de controle, pose 3

Figura A.7: Técnica DDVS: experimento de posicionamento para a pose 3