



## CONTROLE DE ORIENTAÇÃO DE UMA CÂMERA PAN-TILT POR SERVOVISÃO BASEADA EM IMAGEM COM REALIMENTAÇÃO DE SAÍDA

Daniela de Araujo Azevedo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Rosa Lopes Zachy  
Coorientador: Antonio Candea Leite

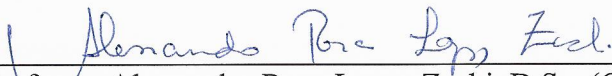
Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2017

# CONTROLE DE ORIENTAÇÃO DE UMA CÂMERA PAN-TILT POR SERVOVISÃO BASEADA EM IMAGEM COM REALIMENTAÇÃO DE SAÍDA

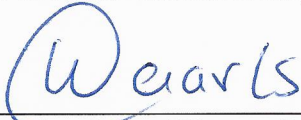
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Daniela de Araujo Azevedo

Banca Examinadora:

  
Presidente: Professor Alessandro Rosa Lopes Zachy, D.Sc. (CEFET/RJ) (orientador)

  
Professor Antonio Candea Leite, D.Sc. (PUC-RIO) (Coorientador)

  
Professor Wouter Caarls, PhD. (PUC-RIO)

  
Professor Diego Barreto Haddad, D.Sc. (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A994 Azevedo, Daniela de Araujo  
Controle de orientação de uma câmera pan-tilt por servovisão baseada em imagem com realimentação de saída / Daniela de Araujo Azevedo.—2017.  
60f. : il. (algumas color.) , grafs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.  
Bibliografia : f. 56-60  
Orientador : Alessandro Rosa Lopes Zachi  
Coorientador : Antonio Candea Leite

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas de servovisão. 3. Servomecanismos. 4. Lyapunov, Funções de. I. Zachi, Alessandro Rosa Lopes (Orient.). II. Leite, Antonio Candea (Coorient.). III. Título.

CDD 629.8323

## RESUMO

Câmeras *pan-tilt* são sensores visuais muito úteis pois podem emular os movimentos oculares dos seres humanos (e.g., perseguição suave e optocinéticos) e podem ser usados para vigilância automática e rastreamento de objetos móveis. Neste trabalho, desenvolve-se um algoritmo baseado em realimentação visual para solucionar o problema de controle de orientação de uma câmera *pan-tilt*. O esquema apresentado é desenvolvido para um sistema composto por uma única câmera de base fixa com controle baseado em informações da imagem. Neste contexto, a câmera não possui movimento de translação, mas somente de rotação. Assim, a ideia chave consiste em orientar a câmera de forma automática, segundo os ângulos horizontal (*pan*) e vertical (*tilt*) com respeito a base, a fim de que a imagem na tela permaneça focalizada sobre um ponto fixo desejado, por exemplo, o centro da imagem. A partir de uma malha de controle de zoom pode-se controlar a dimensão da imagem para que o objeto de interesse sempre tenha uma resolução adequada. A abordagem do trabalho concentra a atenção no projeto das leis de controle para os motores responsáveis pelos movimentos de *pan* e *tilt*. Estas leis são projetadas em função apenas das variáveis de imagem, determinadas por uma propriedade algébrica do modelo câmera-motor. Esta propriedade resulta no desenvolvimento matemático para a obtenção de um controlador por realimentação de saída cuja análise de estabilidade da malha fechada pode ser realizada utilizando o formalismo clássico da Teoria de Estabilidade de Lyapunov. Do ponto de vista teórico, a eficiência do algoritmo de controle é garantida pela demonstração de propriedades de estabilidade local, convergência exponencial dos erros de posição na imagem e orientação da câmera. Além disso, demonstra-se que a equação de controle proposta (i) não depende do conhecimento exato dos parâmetros intrínsecos da câmera e (ii) não requer as informações dos ângulos de *pan* e *tilt*. Estas características podem facilitar a implementação da estratégia de controle proposta. Do ponto de vista prático, acredita-se que o esquema proposto possa apresentar uma vantagem atrativa para a montagem experimental porque o algoritmo não necessita de sensores adicionais além da câmera. O desempenho do algoritmo em malha fechada é verificado através de simulações numéricas em MATLAB® e análises gráficas.

Palavras-chave: servovisão; câmera *pan-tilt*; controle de orientação; realimentação de saída.

## ABSTRACT

Pan-tilt cameras are very useful visual sensors because they can simulate the eye movements of humans (eg, soft and optokinetic tracking) and can be used for automatic monitoring and tracking moving objects. In this work, we develop a visual feedback based algorithm for solving the orientation control problem of a pan-tilt camera. The scheme presented is developed for a system composed of a single camera with fixed base using control based on image feedback. In this context, the camera does not have translational motion. Thus, the key idea is to guide the camera automatically, according to the pan and tilt angles so that the image on the screen remains focused on a desired fixed point. The approach focuses attention on the design of control laws for the camera pan and tilt motors. The control laws are functions of the image variables, determined by an algebraic property of the camera-motor model. This property results in a mathematical development for obtaining an output feedback controller whose stability analysis can be performed using classical Lyapunov formalism. From a theoretical point of view, the efficiency of the control algorithm is ensured by the demonstration of local stability properties and exponential convergence of position and orientation errors in the image plane. Moreover, it shows that the proposed control equation does not require information from pan and tilt angles and does not depend on accurate knowledge of the intrinsic camera parameters, features that can facilitate the implementation of such strategy. From a practical point of view, it is believed that the proposed scheme can present an attractive advantage for the experimental setup because the algorithm does not require additional sensors besides the camera. The efficiency of the closed loop algorithm is verified by numerical simulations in MATLAB® and graphical analysis.

Keywords: visual Servoing; pan-tilt camera; orientation control; output feedback.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>6</b>
1.1	Apresentação	6
1.2	Estado da Arte e Motivação	10
1.3	Objetivo	15
1.4	Formulação do Problema de Servovisão	15
1.5	Metodologia	16
1.6	Contribuições Pretendidas	17
1.7	Organização da Dissertação	18
<b>2</b>	<b>Descrição do Modelo</b>	<b>19</b>
2.1	Modelagem	19
2.1.1	Fundamentos e Definições	19
2.1.1.1	Transformação de Coordenadas	19
2.1.1.2	Velocidade de um Corpo Rígido	20
2.1.2	Modelo de Projeção da Câmera	23
2.1.3	Matriz Jacobiana e Sistema de Servovisão	24
2.1.4	Cinemática diferencial	26
2.1.5	Mudança de variável	27
<b>3</b>	<b>Projeto de Controle</b>	<b>28</b>
3.1	Modelo Cinemático do Sistema Câmera-motores	28
3.2	Projeto de Controle Cinemático	30
3.2.1	Análise de Estabilidade	32
3.3	Projeto de Controle com Dinâmica Completa	36
3.3.1	Proposta de Lei de Controle	37
3.3.2	Análise de Estabilidade	38

3.4	Análise de Robustez na Presença de Incertezas Paramétricas	42
<b>4</b>	<b>Resultados da Simulação</b>	<b>45</b>
4.1	Apresentação	45
4.2	Resultados e Discussões	46
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>53</b>
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	54
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>55</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Servovisão aplicada à medicina	11
Figura 2: Utilização na indústria	12
Figura 3: VANT utilizando servovisão	12
Figura 4: Dispositivo de pan-tilt	14
Figura 5: Veículo autônomo submarino	15
Figura 6: Veículo submarino e marcador 3D	16
Figura 7: Robô móvel não-holonômico utilizando câmera em unidade de pan-tilt	18
Figura 8: Trajetória estimada utilizando odometria visual	19
Figura 9: Diagrama ilustrativo do problema de servovisão	20
Figura 10: Diagrama em blocos para a o esquema de servovisão baseado em imagem	21
Figura 11: Corpo Rígido	23
Figura 12a: Componente 1 e 2 da velocidade no eixo x	25
Figura 12b: Componente 3 da velocidade no eixo x	25
Figura 13: Modelo de projeção da câmera	27
Figura 14: Diagrama em blocos da estratégia de controle cinemático	38
Figura 15. Diagrama em Blocos das estratégias de controle propostas	42
Figura 16: Simulação. Excursões no plano da câmera	51
Figura 17: Simulação. Sinais de controle	51
Figura 18: Simulação. Excursões no plano da câmera na presença de ruídos	52
Figura 19: Simulação. Sinais de controle na presença de ruídos	52
Figura 20: Simulação. Excursões do alvo no plano da imagem	53
Figura 21: Simulação. Sinais de controle	53
Figura 22: Simulação. Trajetória no plano da imagem	54



Figura 23: Simulação. Excursões do alvo no plano da imagem na presença de ruído de medição	54
Figura 24: Simulação. Sinais de controle na presença de ruído	55
Figura 25: Simulação. Trajetória no plano da imagem na presença de ruído	55

## 1- Introdução

### 1.1 – Apresentação

Nas últimas décadas, a visão computacional tornou-se uma importante ferramenta de sensoriamento remoto ou local para aplicações em robótica. A quantidade de trabalhos de pesquisa científica nesta área cresceu, em grande parte, pelo avanço das tecnologias de construção de câmeras e pelo surgimento de diversos programas de processamento de imagens. Dentre as tarefas mais importantes executadas em um sistema de visão computacional destacam-se os procedimentos de extração, caracterização e interpretação de informações a partir de imagens bidimensionais ou tridimensionais de um objeto ou de uma cena de interesse. Recentemente, esta ferramenta tecnológica tem sido utilizada em inúmeras aplicações do mundo real, tais como navegação autônoma de robôs (LI et al., 2013), em controle de processos industriais (SONG et al., 2015), em medicina cirúrgica (ANDREFF et al., 2013, AGUSTINOS et al., 2014) e de reabilitação (LEBEC et al., 2013), em vigilância e sistemas de segurança (AKYILDIZ et al., 2007, LICANDRO; SCHEMBRA, 2007, KE et al., 2013), em sistemas de monitoramento e controle de tráfego rodoviário (RATHINAM et al., 2008; VEGA-MALDONADO et al., 2015), e na área militar (MEHTA et. al., 2015, JENTSCH, 2016). A maioria das aplicações de visão computacional que foram mencionadas consideram o problema de rastreamento de objetos ou alvos móveis com respeito a uma ou múltiplas características da imagem extraídas de uma sequência de imagens. Por exemplo, em aplicações de monitoramento de atividades humanas em sistemas modernos de vigilância (AKYILDIZ et al., 2007, LICANDRO; SCHEMBRA, 2007; KE et al., 2013) o objetivo é promover o rastreamento automático de indivíduos e multidões, a fim de auxiliar a equipe de segurança na observação e interpretação comportamental, resultando no reconhecimento facial de intrusos e/ou criminosos e na identificação de atividades suspeitas. Outra aplicação interessante está relacionada ao uso de câmeras pan-tilt embarcadas em veículos e/ou plataformas giro-estabilizadas para manter e controlar a linha de visão (line of sight) de um objeto em relação a outro objeto ou espaço inercial (DEBRUIN, 2008, LI et al., 2013). Por outro lado, em sistemas de imageamento eletro-óptico, o objetivo pode ser apenas posicionar a câmera ou o sensor visual em direções e orientações pré-definidas ou regiões de vigilância, ao invés de considerar o rastreamento de um alvo específico (MASTEN, 2008).

Seguindo esta tendência, muitas pesquisas têm considerado a servovisão robótica apenas

do ponto de vista teórico, mas também é possível encontrar diversas aplicações utilizando essa abordagem como, por exemplo, na área de telemedicina ou em telecirurgias robóticas (KRUPA, et al. 2003, VITRANI; MOREL; ORTMAIER, 2005, AGUSTINOS et al., 2014, CHATELAIN, 2015) no auxílio de procedimentos cirúrgicos, como pode ser visto na Figura 1, que é um suporte de endoscópio robótico com controle baseado em imagem que pode ser utilizado durante uma cirurgia laparoscópica.



Figura 1: Servovisão aplicada à medicina

Fonte: AGUSTINOS et al., 2014.

Podemos citar também a aplicação na indústria (ZHOU; LIN; CHEN 2006, BORSU; PAYEUR, 2012, PEDERSEN et. al., 2016). ZHOU, LIN e CHEN (2006) abordam o posicionamento do ferramental para soldagem utilizando servovisão no rastreamento da linha de junção. Em (BORSU; PAYEUR, 2012) trata-se de estratégia de levantamento de posição e de movimento necessária para dirigir manipuladores robóticos envolvidos no controle de qualidade na indústria automotiva, principalmente em casos onde os painéis são fracamente texturizados e

se deslocam em ambientes complexos. Na Figura 2, um manipulador robótico industrial desempenha algumas funções em processo de fabricação, como execução de tarefa de montagem e alimentação de partes.

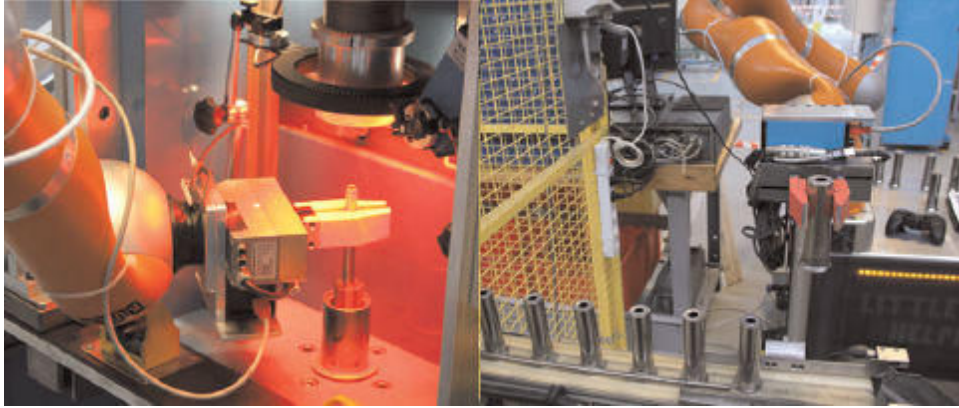


Figura 2: Utilização na indústria

Fonte: PEDERSEN et. al., 2016.

Outra área onde pode se empregar a servovisão é a de controle de veículos aéreos não-tripulados (VANT) (LAURA, 2012, WANG et. al, 2015) (Figura 3). Em (LAURA, 2012) é feito o desenvolvimento de um protótipo de um helicóptero quadrirrotor para aplicações de monitoramento de instalações petrolíferas onde o controle de posicionamento do mecanismo utiliza-se da técnica de controle por servovisão.

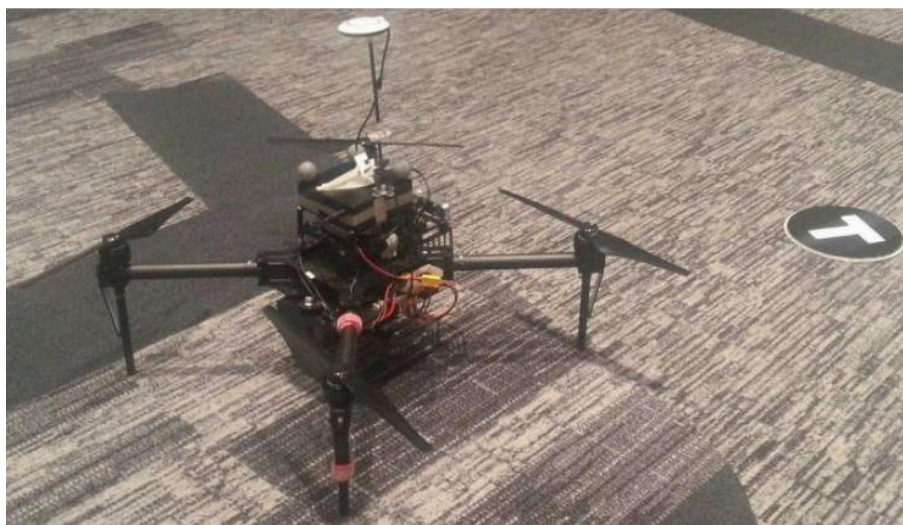


Figura 3: VANT utilizando servovisão.

Fonte: WANG et. al, 2015.

A abordagem de servovisão baseia-se em técnicas de processamento de imagens, visão computacional e teoria de controle (CHAUMETTE; HUTCHINSON, 2006). Neste trabalho o enfoque consiste em utilizar a servovisão para o controle da orientação de uma câmera *pan-tilt* com respeito a uma característica da imagem invariante no tempo (regulação).

Em aplicações de reconhecimento da atividade humana em sistemas modernos de vigilância (AKYILDIZ et al., 2007, LICANDRO; SCHEMBRA, 2007, KE et al., 2013) o objetivo é promover o rastreamento automático de indivíduos e multidões, a fim de auxiliar a equipe de segurança na observação e interpretação comportamental, resultando no reconhecimento facial de intrusos e/ou criminosos e na identificação de atividades suspeitas.

Existem extensas aplicações de sistemas de rastreamento visual de alvos, tanto no âmbito militar como no civil. Normalmente estes sistemas utilizam câmeras e podem ser aplicados na robótica, em vigilância aérea, na indústria, em inspeção, monitoramento, segurança, etc. Um exemplo de aplicação específica no meio militar é a do emprego destes tipos de sistemas em bombas inteligentes, mira de armamento e mísseis (GRUZMAN, 2012). Contudo, como o ângulo de visão das câmeras é restrito, é necessário executar o movimento das mesmas para que o alvo permaneça dentro do seu campo visual. Nesta circunstância, faz-se necessário a utilização de dispositivos baseados em atuadores eletromecânicos para assegurar o movimento adequado da câmera. Um mecanismo usual para este propósito é o dispositivo de movimento *pan-tilt*. Há uma ampla gama de dispositivos *pan / tilt* que são usados em várias aplicações. Em geral, um dispositivo de *pan-tilt* é composto por sistema de transmissão (motores, sistema de engrenagem, rolamentos e a mecânica de entrega de movimento do núcleo), eletrônica de controle, dispositivo de *feedback* (potenciômetros, *resolvers* e decodificadores digitais – *encoders*), estrutura do núcleo e invólucro, além de toda a estrutura referente à transmissão de dados. Em (CHEN; ZHAO; TAN, 2014) foi utilizado um dispositivo *pan-tilt* (Figura 4) de dois graus de liberdade que é composto por quatro partes, que incluem dois motores DC MAXON, codificadores, retardadores e controladores de motor.

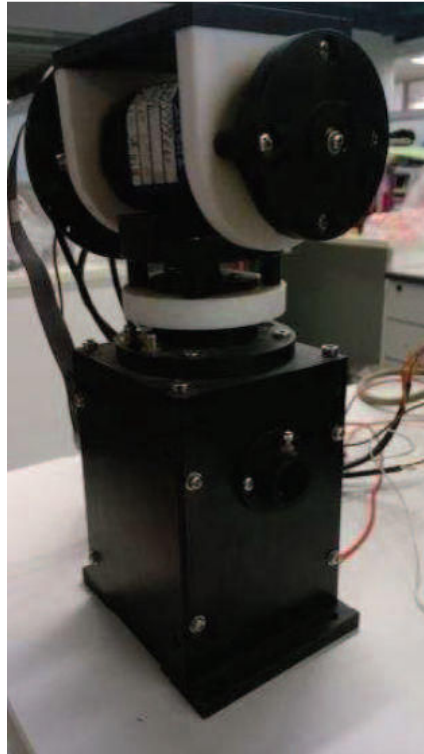


Figura 4: Dispositivo de *pan-tilt*.

Fonte: CHEN; ZHAO; TAN, 2014.

## 1.2 – Estado da Arte e Motivação

Podemos encontrar em alguns trabalhos a utilização desse tipo de estratégia como um ponto de partida essencial para a análise e desenvolvimento de alguns sistemas, além de compor parte de soluções mais simples para alguns tipos de problemas. Em (KRUPINSKI et. al., 2015) que traz um resultado experimental (Figura 5) de teorias de controle com foco na realização de duas tarefas por parte de veículos autônomos submarinos (AUVs): (i) seguir tubulação ou cabeamento submarino e (ii) inspeção estrutural - estabilização e servoação relativo à estrutura. No primeiro caso que há translação o veículo tem a tarefa de seguir as tubulações, mas no momento da inspeção o controle pode ser considerado como sendo de regulação sem translação, onde poderia ser aplicada a solução do trabalho proposto, pois o foco é na estabilização visual de um ponto fixo. Neste caso, para cada tarefa é aplicado um algoritmo de controle distinto.

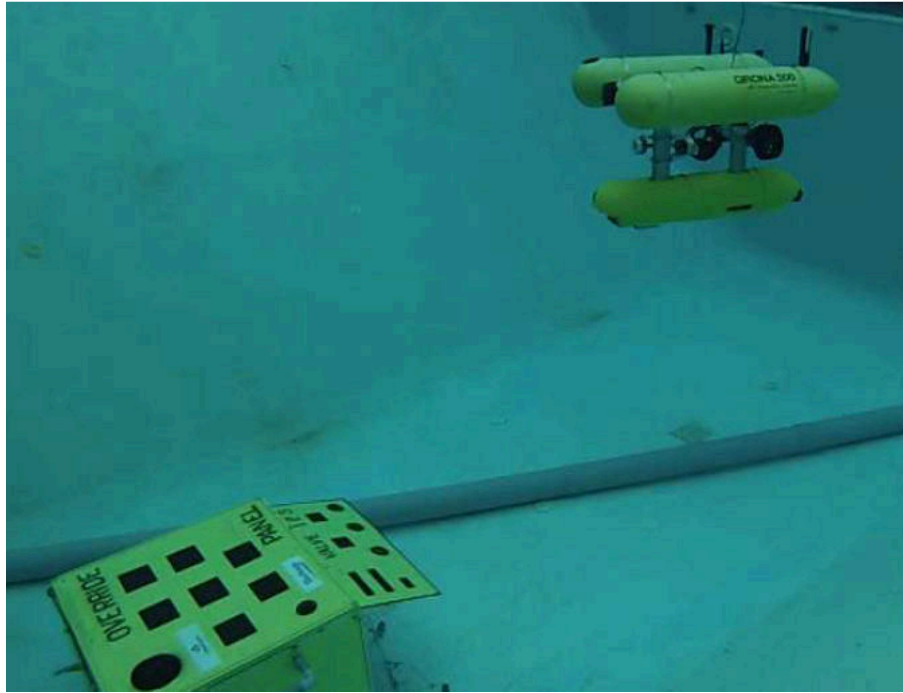


Figura 5: Veículo autônomo submarino.

Fonte: KRUPINSKI et. al, 2015.

Em (MYINT et. al., 2016) é demonstrado um esquema de estimativa de posição para "perseguição" de um alvo em tempo real usando Algoritmo Genético (GA). O ROV reconhece o alvo, estima a posição do veículo (pose) em relação ao alvo e controla o veículo para ser regulado para a pose/posição desejada. Neste caso utilizam-se duas câmeras para estimação do modelo 3D do objeto-alvo. No sistema proposto, a estimativa da posição relativa e orientação entre o ROV e o objeto-alvo é feita a partir de um método de correspondência baseado em modelagem 3D que recorre a um algoritmo genético. Neste trabalho, o desempenho da regulação relativa da posição foi examinado, o que significa que o robô tem que ser mantido constante na posição/pose em relação ao alvo desejada mesmo havendo perturbações e marcadores 3D parcialmente ocultos (Figura 6). Então foi mostrado experimentalmente que o sistema de regulação pode ser implementado usando o sistema proposto e com robustez.



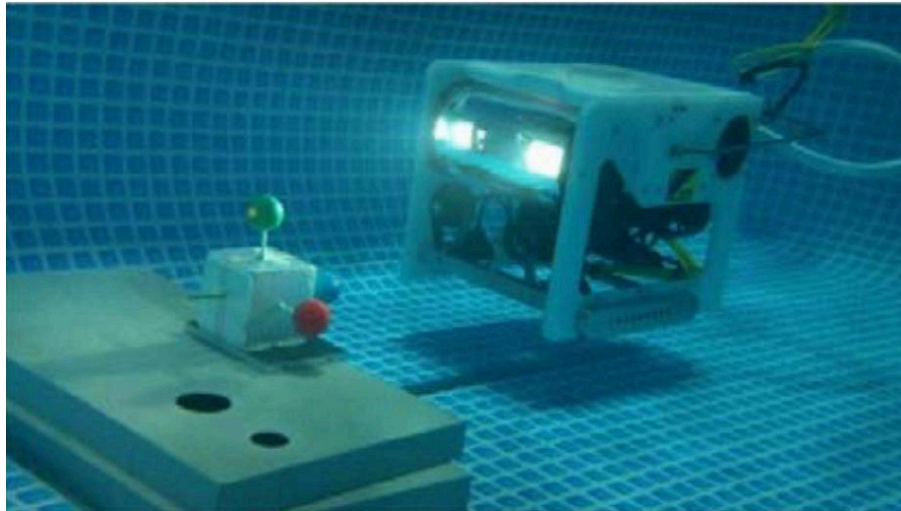


Figura 6: Veículo submarino e marcador 3D.

Fonte: MYINT et. al., 2016.

No caso de (WANG et. al., 2015) foi feita a regulação de pouso de quadrrorotor baseado em servovisão (Figura 3), onde é proposto um controle por regulação que segue o paradigma de servovisão baseada na posição (Position Based Visual Servoing - PBVS). A maioria dos controladores PBVS são implementados supondo que a posição do quadrrorotor em relação ao marcador foi recuperada com precisão empregando o observador/estimador de posição e o controlador projetados independentemente uns dos outros, mas assim a estabilidade da regulação não poderá ser rigorosamente garantida devido ao princípio da superposição falhar para os sistemas não lineares em geral. Portanto, um novo controlador PBVS é proposto neste trabalho para a regulação do quadrrorotor sem medição de posição como realimentação. Este controlador adota um estimador de posição em tempo real através da realimentação visual gerada pela câmera e pela velocidade/orientação do quadrrorotor. Este estimador de posição adaptativa atualiza a posição estimada com base num erro de imagem nominal que pode ser linearmente parametrizado pelo erro de estimativa e orientação/velocidade linear do quadrrorotor em relação à estrutura do marcador. Neste trabalho, demonstra-se através da teoria de Lyapunov que com o controlador proposto e o estimador de posição adaptativo, os ângulos do quadrrorotor convergem para os valores desejados e, do mesmo modo, a posição 3D estimada do quadrrorotor converge tanto para o valor desejado como para o valor real.

O artigo de (WANG et. al., 2016) propõe a aplicação de um novo controlador cinemático a um manipulador para a captura de objetos estacionários (ou regulação) por servovisão. Dois novos estimadores adaptativos são incorporados ao controlador, para estimar a posição do



efetuador de extremidade do manipulador e a do objeto estacionário em tempo real utilizando a realimentação visual da câmera estéreo e a posição angular/velocidade das juntas. Finalmente é provado pela teoria de Lyapunov que o controlador proposto com os estimadores de posição embutidos, conduz à captação de objetos estacionários (regulação assintótica) e à convergência das posições estimadas para as posições reais.

XIE e LYNCH (2016) apresentam uma lei de controle por servovisão baseada em imagem (IBVS) para um quadricóptero, veículo aéreo não tripulado (VANT), equipado com uma única câmera com orientação descendente. O projeto do controlador é baseado em um modelo dinâmico do VANT e o objetivo do controle consiste em regular a posição relativa entre o veículo e um alvo plano horizontal que está localizado no solo.

A abordagem proposta usa uma câmera virtual que tem movimentos de *roll* e *pitch* zero. Os recursos de imagem do IBVS são definidos no plano da imagem da câmera virtual. Uma vez que o erro de imagem está estabilizado na câmera virtual, o alvo visual pode deixar o campo de visão (do inglês, *Field of View* - FOV) da câmera real. Para manter o alvo no FOV, o método proposto limita os ângulos de *roll* e *pitch* a valores predefinidos suficientemente pequenos.

Uma particularidade do controlador proposto neste artigo é a sua estrutura de malha interna-externa. Aqui, uma malha IBVS externa regula o erro de imagem e fornece uma referência para a malha interna. Esta estrutura é frequentemente utilizada na prática, uma vez que simplifica o projeto do controlador, além de ser uma estrutura natural para saturar os valores de *roll* e *pitch*.

Com base no modelo cinemático de um robô móvel não-holonômico em coordenadas polares, ZHANG (2015) propõe uma estratégia de servovisão adaptativa para regular o robô móvel para a sua posição desejada. Neste trabalho considera-se a profundidade desconhecida como incerteza do modelo, portanto o vetor de erro do sistema pode ser escolhido como sinais mensuráveis que são reconstruídos por uma técnica de estimativa de movimento. Então, um controlador adaptativo é projetado juntamente com um mecanismo de atualização de parâmetros para compensar a informação de profundidade desconhecida em tempo real. Finalmente, pelas técnicas de Lyapunov e pelo princípio de invariância de LaSalle, é realizada uma rigorosa análise de estabilidade. E como resultado do projeto da lei de controle aplicado, o comportamento de manobra demonstrou-se natural e o caminho resultante curto.

Semelhantemente ao trabalho citado anteriormente, WANG (2014) apresenta uma proposta para regulação de robôs móveis não-holonômicos. Este trabalho considera o problema da

regulação de robôs móveis não-holonômicos com dinâmica baseada em servovisão não calibrada. Primeiro, a velocidade virtual desejada é projetada para estabilizar o modelo cinemático exponencialmente. E então o método de torque calculado é introduzido para o modelo dinâmico associado com perturbações incertas para projetar o controlador de torque de forma que a velocidade real siga a desejada em tempo finito. A estabilidade do método proposto foi comprovada e os resultados da simulação confirmam a eficácia dos métodos propostos.

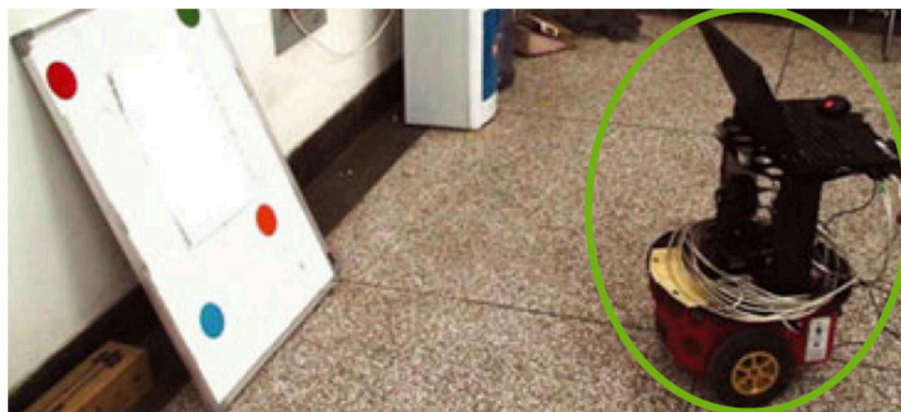


Figura 7: Robô móvel não-holonômico utilizando câmera em unidade de *pan-tilt*.

Fonte: ZHANG et. al., 2015.

No artigo de (RUPPELT; TROMMER, 2016) foi apresentado um método robusto de navegação baseado em imagens utilizando uma câmera estereoscópica para navegar em áreas exteriores e em ambientes interiores escuros. A tarefa do sistema de navegação baseado em imagem estéreo apresentado é estimar a posição e as características relativas entre imagens consecutivas. O processo pelo qual consegue-se obter a posição e orientação de uma câmera, baseado somente em imagens e consequentemente, em características (projeções de marcos visuais da cena) nelas contidas é chamado odometria visual. Uma das tarefas ao se utilizar odometria visual neste trabalho é o processo de acumular as mudanças incrementais de posição e características, pose após pose. O sistema de navegação baseado em vídeo utilizado neste trabalho foi desenvolvido para auxiliar os sistemas de navegação internos e externos comuns ou para funcionar como uma aplicação autônoma. O sistema de contagem de imagens baseado em imagens foi otimizado avaliando várias combinações de processamento de imagem para obter uma odometria visual precisa, robusta e eficiente para uma estimativa de movimento precisa. O desempenho do sistema foi demonstrado pela avaliação do sistema em cenários desafiadores de navegação. A abordagem de navegação apresentada é capaz de auxiliar sistemas de navegação inercial. Neste caso, a tarefa do sistema de navegação é fundir todos os dados do sensor em um

filtro central e não separadamente em cada módulo auxiliar. Devido a este fato, um filtro de Kalman não está integrado no módulo de odometria visual. Os resultados são processados sem a utilização de um modelo de movimento para os pontos de recurso de imagem 3D dentro de um filtro de Kalman e todas as trajetórias estimadas são apenas baseadas em imagem para mostrar o desempenho não filtrado e claro do sistema de navegação desenvolvido. Este trabalho também forneceu uma visão abrangente da plataforma experimental, dos algoritmos de processamento de imagem e dos recursos da aplicação de navegação baseada em imagens.

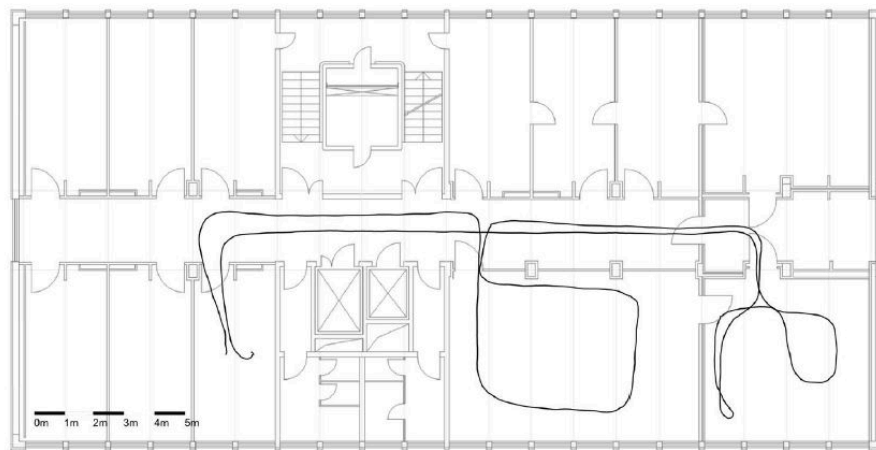


Figura 8: Trajetória estimada utilizando odometria visual.

Fonte: RUPPELT; TROMMER, 2016.

### 1.3 – Objetivo

O presente estudo visa desenvolver uma lei de controle para um sistema de servovisão que pode ser aplicado para controlar a orientação automática de câmeras do tipo *pan* e *tilt*. A ideia principal é propor uma estratégia para focalizar a projeção do alvo de interesse em um ponto fixo pré-definido na imagem sem utilizar os ângulos dos motores e sem depender do conhecimento dos parâmetros intrínsecos do sistema câmera-motores.

### 1.4 – Formulação do Problema de Servovisão

Neste trabalho, o problema de servovisão é formulado como um problema de controle de orientação de uma câmera *pan-tilt* de base fixa onde a tarefa de interesse consiste em rastrear um objeto (ou alvo) estático no espaço de trabalho utilizando apenas as informações contidas na

imagem capturada. A ideia central consiste em orientar a câmera de forma automática, isto é, pelo projeto das leis de controle dos ângulos de *pan* e *tilt* da base, a fim de que a imagem do objeto projetada na tela permaneça focalizada sobre um ponto fixo desejado. A Figura 9 mostra um diagrama esquemático do problema de servovisão.

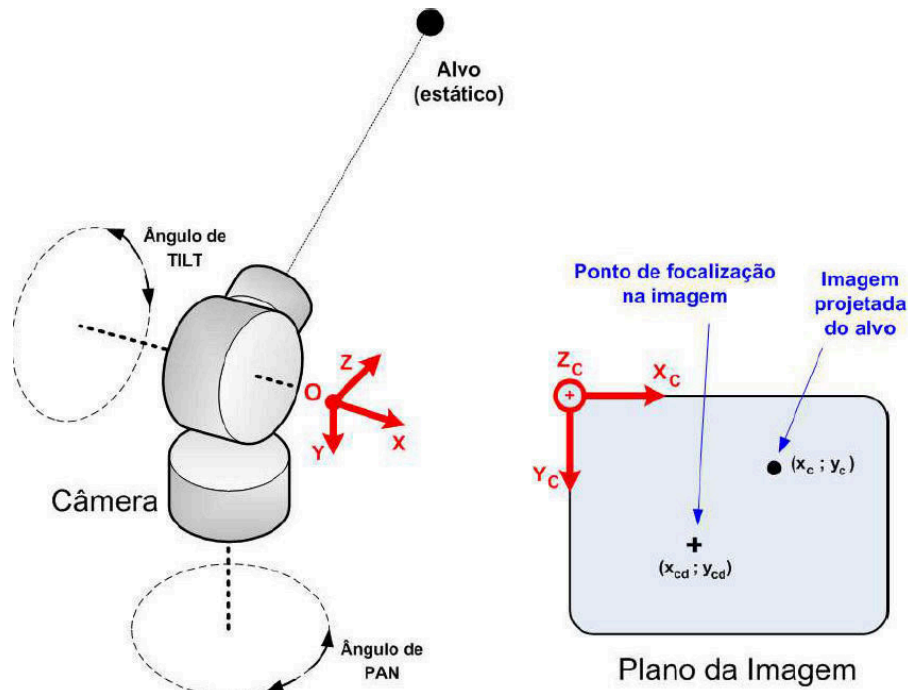


Figura 9: Diagrama ilustrativo do problema de servovisão.

A estratégia de controle adotada para posicionamento do objeto baseia-se em uma metodologia de servovisão baseada em imagem (do inglês, *Image-Based Visual Servoing* - IBVS). Isso implica dizer que a lei de controle para os motores de *pan* e *tilt* será projetada apenas em função apenas das variáveis de imagem, determinada por uma propriedade algébrica do modelo câmera-motor. Esta propriedade resulta em um desenvolvimento matemático do controlador e em uma análise de estabilidade do sistema em malha fechada mais simples.

## 1.5 – Metodologia

Na teoria de controle os problemas podem ser classificados como problemas de regulação ou rastreamento. O primeiro ocorre quando se deseja controlar um sistema de sorte que seu valor de saída se iguale ou se aproxime de um valor de referência (*set point*) previamente estabelecido. A segunda situação requer que o sistema siga uma trajetória, ou seja, a referência do sistema é

variante no tempo e o intuito do mesmo é segui-la. No presente trabalho, a visão é utilizada para medir um erro entre a posição atual da câmera e a posição desejada. Como o enfoque será em focalizar um ponto fixo, então pode-se classificar como um problema de regulação.

Para solucionar o problema de controle formulado anteriormente, propõe-se uma lei de controle que explora as características estruturais da equação dinâmica do sistema. Em um primeiro momento será analisada somente a parte cinemática do sistema e em contraste com os resultados recentemente publicados na literatura (MIRANDA et al., 2014), o algoritmo proposto para esta primeira etapa utiliza versões filtradas de sinais de saída da planta para compor a lei de controle. O diagrama em blocos do sistema proposto segue na Figura 10.

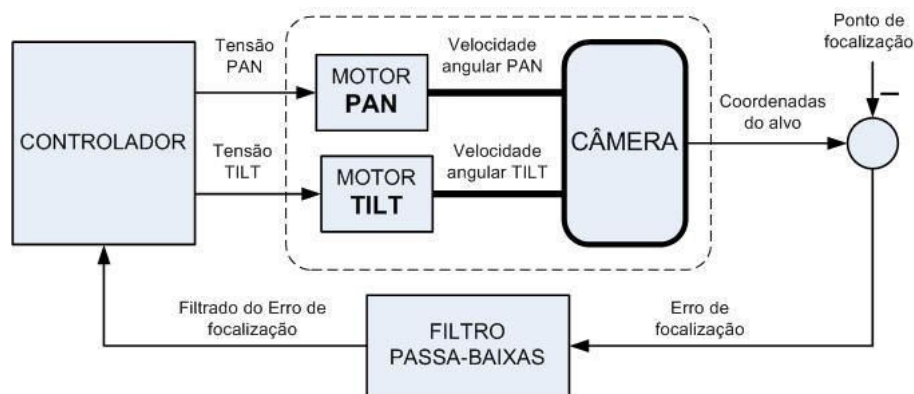


Figura 10: Diagrama em blocos para o esquema de servovisão baseado em imagem.

Posteriormente será analisada a dinâmica completa do sistema onde, ao invés de ser utilizado o modelo cinemático simplificado do motor, será inserida a dinâmica completa do mesmo, o modelo de primeira ordem do motor DC.

## 1.6 – Contribuições Pretendidas

O presente trabalho concentra-se no estudo do controle por servovisão de uma câmera de dois graus de liberdade para a focalização de alvos fixos ou objetos que se movem lentamente no ambiente de operação, isto é, quando o deslocamento do alvo é muito menor que a profundidade entre a câmera e o plano de movimento do objeto. Para isso será proposta uma estratégia de controle que não exige o conhecimento exato dos parâmetros do sistema e também não requer medidas adicionais às extraídas da imagem. Como parte da contribuição teórica será apresentada uma análise de estabilidade para o sistema com dinâmica completa.

## **1.7 – Organização da Dissertação**

A dissertação está organizada de acordo com os seguintes capítulos.

O Capítulo 2 descreve a modelagem do sistema proposto e a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da mesma. Especificamente, aborda conceitos como transformação de coordenadas, velocidade de corpos rígidos, modelo de projeção de câmera, matriz Jacobiana e sistema de servovisão. No Capítulo 3 serão apresentadas duas propostas de projeto de controle, primeiro o projeto de controle cinemático considerando características específicas de alguns tipos de motores DC e depois a proposta de controle com a dinâmica completa do motor para os outros casos de motores DC. Além disso, serão demonstradas as análises de estabilidade do sistema referente a cada proposta. No Capítulo 4, os resultados das simulações numéricas realizadas são apresentados e discutidos. Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões da dissertação e as perspectivas de trabalhos futuros.

## 2- Descrição do Modelo

### 2.1 – Modelagem

#### 2.1.1 – Fundamentos e Definições

##### 2.1.1.1 – Transformação de Coordenadas

Para fundamentar o estudo sobre manipuladores robóticos, é fundamental conhecer as técnicas de descrição necessárias à obtenção das expressões matemáticas relacionadas à velocidade de corpos rígidos, sendo a teoria de transformação de coordenadas essencial para o estudo de tal dinâmica. A modelagem de um manipulador pode ser realizada considerando-o como um sistema de corpos rígidos, onde a localização de cada corpo é plenamente descrita pela sua orientação e posição.

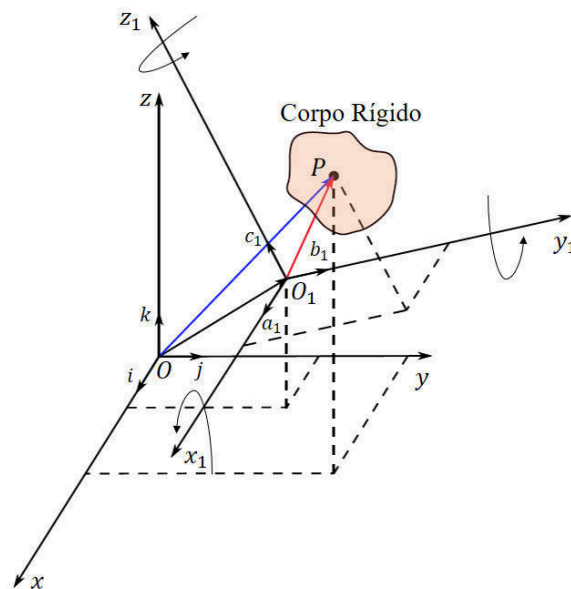


Figura 11: Corpo Rígido.

Considera-se que o sistema de coordenadas fixo no espaço seja  $O-xyz$ , cujos versores de seus eixos são  $i$ ,  $j$  e  $k$ . Onde  $O_1$  é um ponto arbitrário fixo no corpo rígido, cuja posição pode ser representada por  $t_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ , vetor coluna de dimensão  $3 \times 1$  que denota a localização de  $O_1$  em relação ao sistema de coordenadas fixo.

A orientação do corpo é representada pela direção dos eixos  $x_1, y_1, z_1$  de acordo com o sistema de coordenadas  $O_1 - x_1y_1z_1$ . As componentes de cada versor,  $a_1, b_1, c_1$ , são os cossenos diretores de cada eixo projetado no sistema de coordenadas fixo, portanto define-se a matriz  $R$ , como sendo  $R = [a_1, b_1, c_1]$ .

A matriz ortonormal  $R$  é denominada matriz de rotação e descreve totalmente a orientação do corpo rígido em relação a base de coordenadas fixa  $O - xyz$ . Nota-se que os vetores  $a_1, b_1, c_1$  são vetores coluna de dimensão  $3 \times 1$ , portanto a matriz  $R$  é de terceira ordem.

Seja  $P$  um ponto arbitrário no corpo rígido da Figura 11, sua posição pode ser descrita em relação a ambos os sistemas de coordenada em análise, ou seja,  $P = [x, y, z]^T$  e  $P_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$  para  $O - xyz$  e  $O_1 - x_1y_1z_1$  respectivamente.

A relação entre os vetores  $P$  e  $P_1$  define a transformação entre os sistemas de coordenadas, sendo possível extraí-la da Figura 11, através de uma relação vetorial. Após as devidas manipulações matemáticas, obtém-se a expressão seguinte:

$$P = t_0 + RP_1. \quad (2.1)$$

A equação (2.1) representa a transformação da base de coordenadas no corpo rígido para o sistema fixo, sendo notável que a referida expressão denota uma transformação de translação e rotação.

### 2.1.1.2 – Velocidade de um Corpo Rígido

Pressupõe-se um corpo rígido movendo-se livremente no espaço tridimensional do sistema de coordenadas fixo, com 6 (seis) graus de liberdade. O movimento é descrito pelo vetor de velocidades de translação  $V(t) = [V_x(t), V_y(t), V_z(t)]^T$  e pelo vetor de velocidades angulares  $W(t) = [w_x(t), w_y(t), w_z(t)]^T$ . Seja  $P = [x, y, z]^T$  um ponto do manipulador na base de coordenadas fixa, deseja-se obter a velocidade em cada um dos seus eixos. Para tal, cumpre observar as Figuras 12a e 12b.



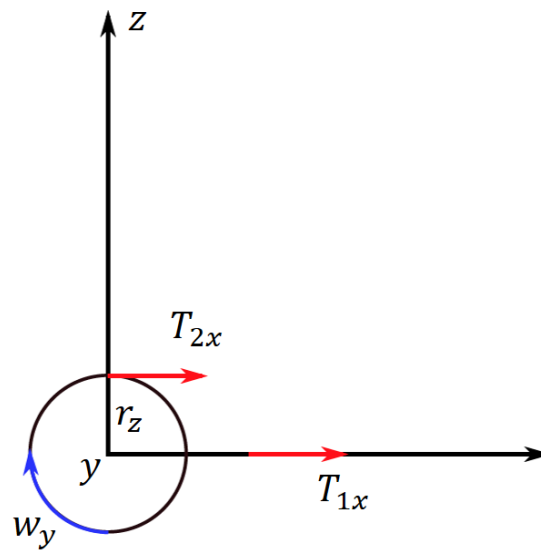


Figura 12a: Componente 1 e 2 da velocidade no eixo  $x$ .

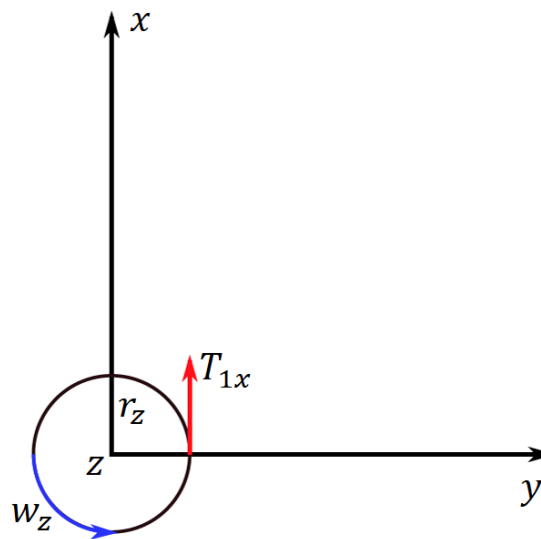


Figura 12b: Componente 3 da velocidade no eixo  $x$ .

De acordo com as Figuras acima podemos observar que existem 3 (três) termos que resultam na velocidade  $V_x(t)$ , sendo estes  $T_{1x}$ ,  $T_{2x}$  e  $T_{3x}$ . Portanto a componente no eixo  $x$  da derivada de posição em relação ao tempo do ponto  $P$  com respeito a base de coordenadas fixa é dada pela expressão abaixo:

$$\dot{x} = T_{1x} + T_{2x} + T_{3x} \quad (2.2)$$

O segundo e o terceiro termo da expressão (2.2), são provenientes das rotações nos eixos  $y$  e  $z$ , resultantes da relação linear que associa a velocidade de translação  $V$  com a velocidade angular  $w$  de acordo com o raio  $r$ , então temos:

$$V = wr \quad (2.3)$$

A aplicação da equação (2.3) na expressão (2.2), observando-se as grandezas presentes nas Figuras 12a e 12b e considerando  $T_{1x}$ , para efeito prático como simplesmente  $T_x$ , resulta em:

$$\dot{x} = zw_y - yw_z + T_x \quad (2.4)$$

Finalmente, expandindo-se a mesma metodologia aplicada à velocidade no eixo  $x$  aos demais eixos, executando as adaptações necessárias, obtém-se as componentes de velocidade do ponto P para os demais eixos do sistema de coordenadas fixo, como segue em (2.5) e (2.6).

$$\dot{y} = xw_z - zw_x + T_y \quad (2.5)$$

$$\dot{z} = yw_x - xw_y + T_z \quad (2.6)$$

Cabe ressaltar que os movimentos rotacionais num determinado eixo não resultam em movimento de translação no eixo em questão, contribuindo somente para a translação nos demais eixos. O sistema de equações formado pelas equações (2.4), (2.5) e (2.6), mostrado em (HUTCHINSON et al. 1996), pode ser reescrito na forma matricial como segue abaixo:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -w_z & w_y \\ w_z & 0 & -w_x \\ -w_y & w_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

O sistema matricial (2.7) pode ser representado na seguinte forma compacta vetorial:

$$\dot{P} = W \times P + T \quad (2.8)$$

O resultado obtido na equação (2.8) em conjunto com a formulação matemática (2.1) será aplicado para a dedução da matriz jacobiana de uma imagem no tópico 2.1.3.

### 2.1.2 – Modelo de Projeção da Câmera

Considere  $O_B$  como sendo o sistema de coordenadas cartesianas  $X, Y, Z$  (em metros) com origem fixada na base da câmera. Considere  $O_C$  como sendo o sistema de coordenadas da imagem  $X_c, Y_c, Z_c$  (em pixels) com origem fixada no vértice inferior esquerdo da tela, conforme ilustrado no diagrama da Figura 13. Nesta figura,  $S_A, S_D \in \mathbb{R}^3$  denotam os vetores da posição cartesiana (em metros) do alvo e da posição desejada, respectivamente, ambos com respeito à  $O_B$ .  $\xi_A, \xi_D \in \mathbb{R}^2$  representam as coordenadas bidimensionais da imagem (em pixels) da projeção do alvo e do ponto de focalização desejado, respectivamente, definidos no plano da imagem. Para descrever a relação entre os sistemas de coordenadas  $O_B$  e  $O_C$  são definidas as matrizes de translação  $T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  e de orientação  $R \in SO(3)$ . Onde  $SO(3)$  é o grupo especial ortogonal de ordem 3 e que satisfaz as seguintes propriedades:  $SO(3) = \{R \in \mathbb{R}^{3 \times 3} : RR^T = I, \det R = +1\}$  (MURRAY, et. al., 1994).

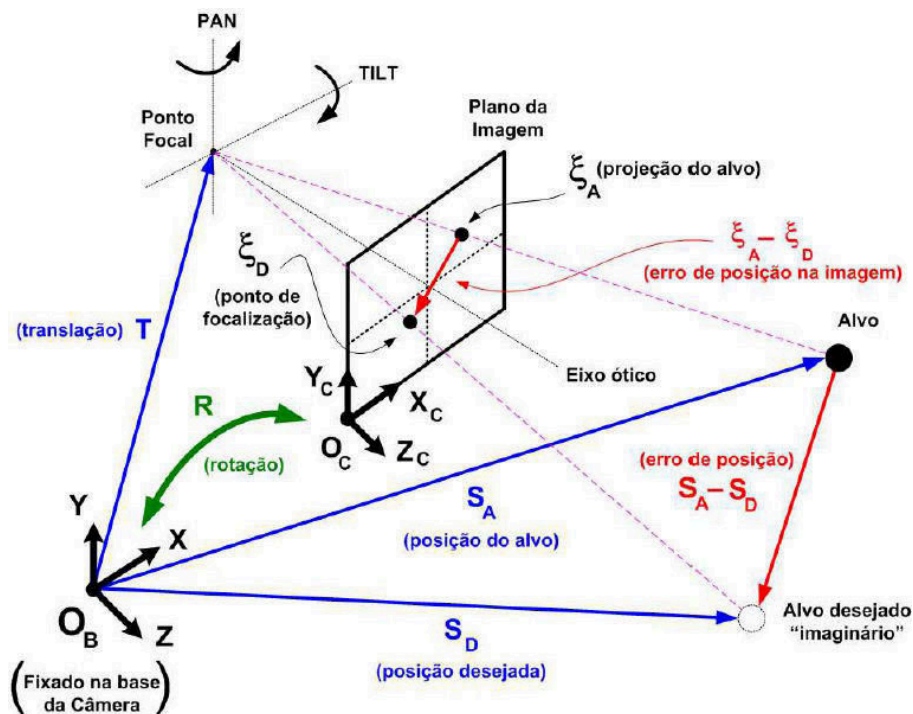


Figura 13: Modelo de projeção da câmera.

O método de projeção perspectiva utiliza a técnica geométrica da semelhança de triângulos resultando na equação (2.9), onde o sistema de coordenadas da câmera é descrito pelas variáveis cartesianas  $x_c$  e  $y_c$  e  $f$  é a distância focal da câmera.

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \frac{f}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

### 2.1.3 – Matriz Jacobiana e Sistema de Servovisão

É importante entender que alterações nas variáveis e parâmetros da imagem representam mudanças de posição do manipulador. Quando se trata de relacionar as velocidades entre estes dois sistemas dinâmicos, o melhor a fazer é calcular a matriz jacobiana da transformação.

A matriz jacobiana é formada pelas derivadas parciais de primeira ordem de uma função vetorial. Em (2.10) tem-se o jacobiano  $J$  onde  $k$  denota o número de equações e  $m$  o número de variáveis diretamente relacionadas à função:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(n)}{\partial n_1} & \dots & \frac{\partial F_1(n)}{\partial n_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_k(n)}{\partial n_1} & \dots & \frac{\partial F_k(n)}{\partial n_m} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Com base nos fundamentos teóricos apresentados anteriormente, a matriz jacobiana da imagem será desenvolvida, tornando possível a interligação matemática entre a dinâmica de um corpo rígido no espaço tridimensional e a cena capturada pela câmera. Para tal, inicialmente, considera-se que o manipulador está se movendo com velocidade angular e de translação  $W(t)$  e  $V(t)$  respectivamente, ambas no sistema de coordenadas da câmera. Sendo  $P$  um ponto fixo no manipulador, então de acordo com a transformação de coordenadas e a dinâmica do corpo rígido descrita através da equação vetorial (2.8), tem-se:

$${}^c\dot{P} = W \times P + T \quad (2.11)$$

Onde  ${}^cP = [x, y, z]^T$  e representa o ponto  $P$  a ser transformado do sistema de coordenadas fixo para o da câmera. Após substituições entre as Eqs. (2.4), (2.5), (2.6) e (2.9), considerando os parâmetros da imagem, temos:

$$\dot{x} = zw_y - \frac{y_c z}{f} w_z + T_x \quad (2.12)$$

$$\dot{y} = \frac{x_c z}{f} w_z - zw_x + T_y \quad (2.13)$$

$$\dot{z} = \frac{z}{f} (y_c w_x - x_c w_y) + T_z \quad (2.14)$$

Após considerar somente o eixo horizontal do sistema de coordenadas da imagem, tem-se no eixo  $x_c$  a seguinte relação após derivação:

$$\dot{x}_c = f \frac{z\dot{x} - x\dot{z}}{z^2} \quad (2.15)$$

Substituindo-se as derivadas de  $x$  e  $z$  presentes em (2.15), por suas respectivas expressões (2.12) e (2.14), desenvolvendo as equações temos:

$$\dot{x}_c = \frac{f}{z} T_x - \frac{x_c}{z} T_z - \frac{x_c y_c}{z} w_x + \frac{f^2 + x_c^2}{f} w_y - y_c w_z \quad (2.16)$$

Fazendo o mesmo para o cálculo da velocidade no eixo  $y_c$ , temos:

$$\dot{y}_c = \frac{f}{z} T_y - \frac{y_c}{z} T_z + \frac{-f^2 - y_c^2}{f} w_x + \frac{x_c y_c}{f} w_y - x_c w_z \quad (2.17)$$

Finalmente, podemos combinar os resultados obtidos em (2.16) e (2.17), no sistema de equações matricial (2.18) (HUTCHINSON et al. 1996).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{x_c}{z} & -\frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{x_c^2 - f^2}{\alpha f} & -y_c \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{y_c}{z} & \frac{-y_c^2 - (\alpha f)^2}{f} & \frac{x_c y_c}{f} & x_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Percebe-se que existe uma matriz de transformação de coordenadas entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema de coordenadas fixo. Esta matriz de transformação de coordenadas pode ser denominada de Jacobiano da imagem.

#### 2.1.4 – Cinemática diferencial

Neste trabalho, adota-se o modelo matemático proposto em (HUTCHINSON et al., 1996; FLANDIN et al., 2000; KELLY et al., 2000) generalizado para uma câmera móvel. Este modelo é utilizado para descrever a cinemática diferencial entre as grandezas de imagem  $\xi_A = [x_c; y_c]^T$  e as grandezas cartesianas do alvo  $S_A = [x; y; z]^T$  ilustradas na Figura 13:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha f}{z} & 0 & -\frac{x_c}{z} & -\frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{x_c^2 - (\alpha f)^2}{\alpha f} & -y_c \\ 0 & \frac{\alpha f}{z} & -\frac{y_c}{z} & \frac{-y_c^2 - (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} & x_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

sendo  $f$  a distância focal da câmera, em *metros*,  $z$  a profundidade relativa entre o objeto e a câmera, em metros, medida na direção de seu eixo ótico,  $\alpha$  é o fator de escalamento da câmera, em *pixel/m*,  $[V_x; V_y; V_z]^T$  o vetor das velocidades de translação da câmera nos eixos  $X, Y, Z$  do sistema  $O_B$ , em *m/s* e  $[\omega_x; \omega_y; \omega_z]^T$  o vetor de velocidades de rotação da câmera em torno dos eixos  $X, Y, Z$  deste mesmo sistema  $O_B$ , em *rad/s*.

Como a origem do sistema de coordenadas de referência  $O_B$  foi fixado no centro de rotação da câmera, coincidindo com os eixos de rotação *pan* (eixo  $X$ ), *tilt* (eixo  $Y$ ) e o eixo ótico da câmera (eixo  $Z$ ), conforme mostra a Figura 13, é fácil observar que para  $[V_x; V_y; V_z]^T = [0; 0; 0]$ ,  $\forall t$ . Nesta configuração, os ângulos de Euler  $[\theta; \phi]$  da representação de orientação  $ZYX$  (SCIAVICCO, SICILIANO, 2012) coincidem com os ângulos de rotação  $[\theta_{pan}; \theta_{tilt}]$  dos atuadores, respectivamente, enquanto que o ângulo  $\psi$  permanece constante ( $\omega_z = 0, \forall t$ ). Assim, o modelo

cinemático de servovisão pan-tilt considerado neste trabalho será uma versão reduzida do modelo da Eq. (2.19), ou seja:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{x_c^2 - (\alpha f)^2}{\alpha f} \\ \frac{-y_c^2 - (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

no qual se define  $[\omega_x; \omega_y] = [\dot{\theta}_{pan}; \dot{\theta}_{tilt}]$  como sendo o vetor dos sinais de controle.

### 2.1.5 – Mudança de variável

Antes de seguir com modelagem do sistema, considere a seguinte mudança de variável aplicada no vetor de controle:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Esta mudança de variável foi adotada apenas para revelar uma propriedade estrutural do sistema da Eq. (2.20) que é muito útil em projetos de controle. Substituindo o novo vetor de controle da Eq. (2.21) dentro da Eq.(2.20), surge:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

cuja matriz de transformação é uniformemente simétrica e positiva definida (SLOTINE; LI, 1991, Pág.80). Ou seja, sabendo que os autovalores desta matriz são  $\lambda_1 = \alpha f$  e  $\lambda_2 = [(\alpha f)^2 + x_c^2 + y_c^2]/\alpha f$  e que os todos os elementos desta matriz assumem valores positivos é notável que se trata de uma matriz definida positiva. Vale ressaltar que estas características da matriz de transformação serão muito relevantes para o projeto de controle.

### 3- Projeto de Controle

Os detalhes sobre o projeto do controlador para o sistema de visão *pan-tilt* são apresentados neste capítulo. Inicialmente, discute-se o desenvolvimento de um controlador puramente cinemático. Em seguida, apresenta-se uma proposta de controle baseada em realimentação de saída levando em consideração o sistema de servovisão com dinâmica completa. A principal contribuição do trabalho de pesquisa é apresentada neste capítulo e consiste em demonstrar que a equação de controle proposta não depende do conhecimento exato dos parâmetros intrínsecos do sistema câmera-motores e sua lei de formação não requer as medidas dos ângulos de *pan* e *tilt*.

#### 3.1 – Modelo Cinemático do Sistema Câmera-motores

Apenas por conveniência, são reproduzidas a seguir as equações do modelo cinemático da câmera (3.1):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{Tilt} \\ \omega_{Pan} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

Para computar o modelo dinâmico completo do sistema de servovisão, é necessário inserir no modelo cinemático da Eq. (3.1) as equações que descrevem os movimentos dos atuadores. Assume-se neste trabalho que os atuadores de *pan* e *tilt* são dois motores de corrente contínua (DC) controlados pela tensão da armadura. Neste caso, a equação dinâmica para este atuador é bastante



conhecida na literatura, podendo ser encontrada em vários livros texto (DORF; BISHOP, 2013), a saber:

$$\tau_m \dot{\omega}_m = -\omega_m + K_m V_m \quad (3.4)$$

na qual o índice  $m$ , que serve para representar tanto o motor de *pan* quanto o motor de *tilt*, foi adotado apenas para denotar uma generalização. Na Eq. (3.4),  $\omega_m \in \Re$  representa a velocidade de rotação do motor em  $rad/s$ ,  $\tau_m > 0 \in \Re$  representa a constante de tempo mecânica,  $K_m > 0 \in \Re$  denota uma constante do motor e  $V_m \in \Re$  representa a tensão aplicada na armadura em *Volts* ( $V$ ). Observe que a variável de controle  $V_m(t)$  está associada à derivada temporal  $\dot{\omega}_m$ . Isto significa que as dinâmicas dos atuadores, representadas genericamente pela Eq. (3.4), não podem ser inseridas diretamente (isto é, por substituição direta) no modelo cinemático da Eq. (3.1). Note-se ainda que, isto seria possível se a Eq. (3.1) fosse derivada mais uma vez em relação ao tempo. Entretanto, devido a existência de não-linearidades no modelo cinemático, isto acarretaria em um aumento na complexidade do problema que exigiria a utilização de ferramentas matemáticas mais sofisticadas no projeto da lei de controle e na análise de estabilidade. Em vez disso, sugere-se uma outra abordagem: analisando a solução completa da Eq. (3.2) sujeita a uma excitação do tipo degrau  $V_m(t) = v \text{ Volts}, \forall t$ , tem-se que:

$$W_m(s) = \frac{\frac{K_m v}{\tau_m}}{s \left( s + \frac{1}{\tau_m} \right)} = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{\left( s + \frac{1}{\tau_m} \right)} \rightarrow \omega_m(t) = A_1 + A_2 e^{-\left(\frac{1}{\tau_m}\right)t}, \quad t \geq 0 \quad (3.5)$$

sendo  $A_1, A_2$  os coeficientes (resíduos) da expansão em frações parciais. Na Eq. (3.5), verifica-se nitidamente que a resposta é composta por uma parcela do tipo degrau e uma parcela do tipo exponencial decrescente. Contudo, já existem motores DC comerciais com constante de tempo mecânica  $\tau_m$  da ordem de  $10^{-3}$  segundos (como por exemplo os *DC-Micromotors Series 2342...CR* da FAULHABER). Nestes motores, a parcela exponencial decai suficientemente rápido e daí a resposta completa pode ser aproximada apenas pela parcela do tipo degrau:

$$\omega_m(t) = A_1 + A_2 e^{-\left(\frac{1}{\tau_m}\right)t} \rightarrow \omega_m(t) \approx A_1, \quad t \geq 0 \quad (3.6)$$

Calculando o resíduo  $A_1$ , tem-se que:

$$\omega_m(t) \approx K_m v = K_m V_m(t), \quad t \geq 0 \quad (3.7)$$

Observe agora que o modelo simplificado da Eq. (3.7) pode ser inserida diretamente no modelo cinemático da Eq.(3.1), para obter o modelo dinâmico completo do sistema de servovisão *pan-tilt*. Assim, definindo as constantes  $K_m$  para cada motor:

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 V_1 \\ K_2 V_2 \end{bmatrix}, \quad K_1, K_2 > 0 \quad (3.8)$$

tem-se como resultado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \underbrace{\begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}}_{\bar{K}} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

**Observação 3.1:** A relação entre as variáveis de controle  $V_1$  e  $V_2$  com as tensões elétricas dos motores de Pan e Tilt podem ser calculadas utilizando as Eqs. (3.2), (3.3) e (3.8). Por uma questão de simplicidade de apresentação,  $V_1$  e  $V_2$  serão mantidas como variáveis de entrada no projeto de controle que será apresentado a seguir.

### 3.2 – Projeto de Controle Cinemático

Inicialmente, considere as seguintes hipóteses fundamentais:

- (H1) Assume-se o conhecimento de uma constante  $K_M > 0$  e que seja maior que as constantes dos motores, isto é,  $K_M > K_1$  e  $K_M > K_2$ ;
- (H2) As dimensões do quadro da imagem, em *pixels*, são conhecidas e denotadas por  $d_x$  e  $d_y$ .

Uma vez que o desempenho do controlador servovisual será avaliado através do erro de regulação no espaço da imagem, temos o vetor de erro na imagem definido por:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} x_c - x_{cd} \\ y_c - y_{cd} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

sendo  $[x_{cd}; y_{cd}]^T$ , em pixels, as coordenadas do ponto fixo desejado na imagem e  $d > 0$  uma constante de projeto cujo valor será escolhido posteriormente. Derivando a Eq. (3.10) uma vez em relação ao tempo, surge a dinâmica do erro em malha aberta, ou seja:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

A lei de controle para o sistema será escolhida em função dos erros filtrados da imagem conforme demonstrado na Eq. (3.12). A ideia de implementar uma lei de controle como a da Eq. (3.12) é tentar verificar se o controlador  $[V_1 \ V_2]^T$  tem propriedades boas na presença de ruídos, tendo em vista que trabalhos anteriores como em (MIRANDA, et. al., 2014 e AZEVEDO, et. al., 2016). Entretanto observamos também que as equações dos filtros são semelhantes às equações dos motores, o que facilitou análises que serão feitas nas próximas seções.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{K_M} \begin{bmatrix} e_{xf} \\ e_{yf} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

sendo  $e_{xf}, e_{yf}$  as versões filtradas dos erros  $e_x, e_y$ , obtidas pela implementação de filtros do tipo:

$$\dot{e}_{fx} = -a_1 e_{fx} - b_1 e_x, \quad a_1, b_1 > 0, \quad (3.13)$$

$$\dot{e}_{fy} = -a_1 e_{fy} - b_1 e_y, \quad (3.14)$$

Substituindo a expressão da lei de controle da Eq. (3.12) dentro da Eq. (3.11), a dinâmica da malha fechada resulta em:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{K_1}{K_M} & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{K_M} \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} e_{xf} \\ e_{yf} \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Deste sistema em malha fechada da Eq. (3.15), fazem parte tanto os erros de imagem  $e_x, e_y$  quanto suas versões filtradas  $e_{xf}, e_{yf}$ . Assim, para auxiliar a análise de estabilidade, define-se o seguinte vetor de erro aumentado:

$$\eta = [e_{xf}; e_{yf}; e_x; e_y]^T. \quad (3.16)$$

Logo, rescrevendo a dinâmica da malha fechada (3.15) em termos do vetor de erro aumentado (3.16), tem-se que:

$$\dot{\eta} = \underbrace{\begin{bmatrix} -a_1 I_2 & -b_1 I_2 \\ \frac{1}{d} H(x_c, y_c) K & O_2 \end{bmatrix}}_A \eta \quad (3.17)$$

na qual  $I_2$  representa a matriz identidade de ordem 2 e  $O_2$  representa a matriz nula de ordem 2. A Figura 14 ilustra a estratégia de controle cinemático proposta.

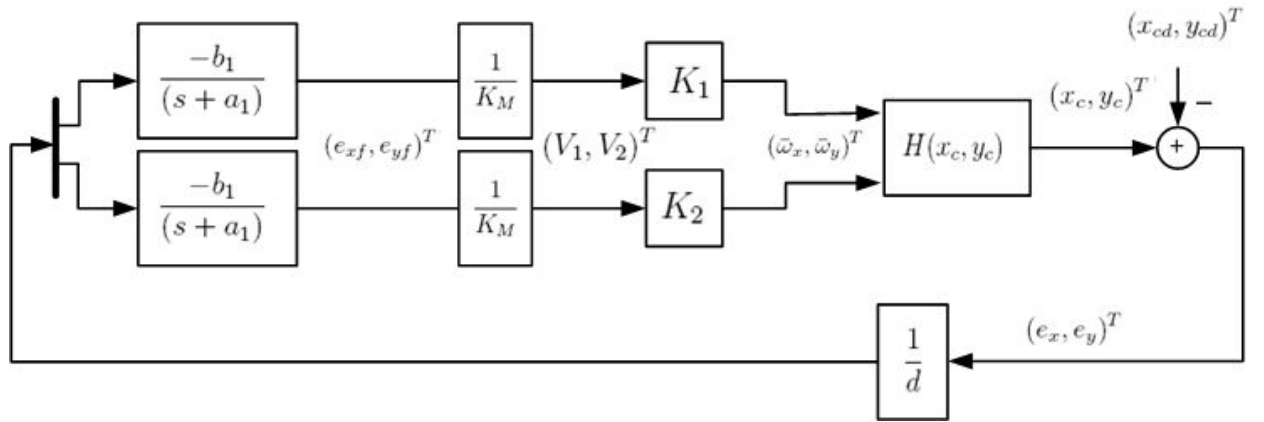


Figura 14: Diagrama em blocos da estratégia de controle cinemático.

### 3.2.1 – Análise de Estabilidade

A fim de simplificar a notação, daqui por diante a matriz  $H(x_c, y_c)$  será denotada por  $H$ . Considere-se a seguinte função de Lyapunov candidata (SLOTINE; LI, 1991):

$$\Omega(\eta) = \frac{\eta^T P \eta}{2}, \quad P = \begin{bmatrix} a_1 K & b_1 K \\ b_1 K & b_1 K \end{bmatrix} > 0, \quad (3.18)$$

sendo  $K = K^T > 0 \in \Re^{2 \times 2}$  a matriz definida na Eq. (3.15),

$$\dot{\Omega}(\eta) = \eta^T P \dot{\eta} = \eta^T P A \eta = \eta^T \frac{(A^T P + P A)}{2} \eta, \quad (3.19)$$

Resolvendo o produto  $PA$  tem-se que

$$PA = \begin{bmatrix} a_1 K & b_1 K \\ b_1 K & b_1 K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_1 I_2 & -b_1 I_2 \\ \frac{1}{d} HK & O_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1^2 K + \frac{b_1}{d} KHK & -a_1 b_1 K \\ -a_1 b_1 K + \frac{b_1}{d} KHK & -b_1^2 K \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

cuja parte simétrica vale:

$$\frac{1}{2}(PA + A^T P) = - \underbrace{\begin{bmatrix} a_1^2 K - \frac{b_1}{d} KHK & a_1 b_1 K - \frac{b_1}{2d} KHK \\ a_1 b_1 K - \frac{b_1}{2d} KHK & b_1^2 K \end{bmatrix}}_Q \quad (3.21)$$

Observe que, sendo  $K$  uma matriz diagonal não singular e  $H$  uma matriz simétrica e positiva definida, o produto  $KHK$  será garantidamente uma matriz simétrica e positiva definida. Para demonstrar a propriedade de simetria, basta notar que:

$$(KHK)^T = K^T H^T K^T = KHK. \quad (3.22)$$

Para demonstrar a propriedade de positividade, considere dois vetores  $p, q$  não-nulos quaisquer dados pela seguinte relação

$$p, q \in \Re^2, \quad p = Kq, \quad (3.23)$$

Como  $H$  é uma matriz simétrica e positiva definida, qualquer forma quadrática associada a  $H$  será positiva definida, ou seja,

$$p^T H p > 0 \quad (3.24)$$

Substituindo a definição em (3.23), dentro da Eq. (3.24), tem-se que:

$$p^T H p > 0 \rightarrow q^T K^T H K q = q^T (K H K) q > 0. \quad (3.25)$$

Para demonstrar que a matriz simétrica  $Q$ , na Eq. (3.21), é uniformemente positiva definida, basta verificar se as condições do *Complemento de Schur* (STRANG, 1993) aplicadas nesta matriz são satisfeitas, ou seja:

$$b_1^2 K > 0, \quad (3.26)$$

$$a_1^2 K - \frac{b_1}{d} K H K > \left( a_1 b_1 K - \frac{b_1}{2d} K H K \right)^T (b_1^2 K)^{-1} \left( a_1 b_1 K - \frac{b_1}{2d} K H K \right) \quad (3.27)$$

Observe que a condição da desigualdade (3.26) é satisfeita tendo em vista que  $b_1 > 0$  e  $K$  é positiva definida. Desenvolvendo um pouco mais a expressão da desigualdade (3.27), tem-se que:

$$\left( a_1^2 I_2 - \frac{b_1}{d} K H \right) K > \left( a_1 b_1 I_2 - \frac{b_1}{2d} K H \right)^T K (b_1^2 K)^{-1} \left( a_1 b_1 I_2 - \frac{b_1}{2d} K H \right) K$$

$$b_1^2 \left( a_1^2 I_2 - \frac{b_1}{d} K H \right) > \left( a_1 b_1 I_2 - \frac{b_1}{2d} K H \right)^T \left( a_1 b_1 I_2 - \frac{b_1}{2d} K H \right)$$

$$a_1^2 b_1^2 I_2 - b_1^3 K \frac{1}{d} H > (a_1 b_1)^2 I_2 - a_1 b_1^2 \frac{K H}{d} + b_1^2 \frac{(K H) K H}{4}$$

$$a_1 b_1^2 \frac{K H}{d} - b_1^3 \frac{K H}{d} > b_1^2 \frac{(K H) K H}{4d^2}$$

$$4b_1^2(a_1 - b_1) \left[ \frac{K H}{d} \right] > b_1^2 \frac{(K H)}{d} \left[ \frac{(K H)}{d} \right]$$

$$4(a_1 - b_1)I_2 > \frac{(KH)}{d} \quad (3.28)$$

Baseado na Eq. (3.12) e na Hipótese (H1), é possível afirmar que os elementos da matriz  $K$  definida na Eq. (3.15) são menores que a unidade. Além disso, baseado na Hipótese (H2), se a constante  $d$  for escolhida como sendo  $d = d_x^2 + d_y^2$ , então também é possível afirmar que os elementos da matriz  $H(x_c, y_c)$ , definida na Eq. (3.15), são todos uniformemente menores que a unidade. Assim, para que a condição da Eq. (3.28) seja válida, basta escolher as constantes  $a_1$  e  $b_1$  dos filtros para satisfazerem a equação  $4(a_1 - b_1) \geq 1$ , ou de forma equivalente,

$$a_1 \geq b_1 + \frac{1}{4} \quad (3.29)$$

Adotando as escolhas das constantes  $d$ ,  $a_1$  e  $b_1$  conforme as condições mencionadas e baseado nas hipóteses propostas é possível afirmar que a forma quadrática na Eq. (3.21) é negativa definida:

$$\dot{\Omega}(\eta) = \eta^T Q \dot{\eta} < 0 \quad (3.30)$$

baseado na teoria de estabilidade de Lyapunov (SLOTINE; LI, 1991), conclui-se que o vetor de erro aumentado  $\eta$  definido na Eq. (3.16) é uniformemente limitado em amplitude  $\forall t$  e, além disso, converge para zero assintoticamente.

**Observação 3.2** *Para calcular as tensões que serão realmente aplicadas nos motores do sistema, basta utilizar as Eqs. (3.2), (3.3), (3.8) e (3.12). Procedendo desta forma, as leis de controle reais serão dadas por:*

$$V_{pan} = -V_1, \quad V_{tilt} = V_2 \quad (3.31)$$

O Teorema 6.1 resume as principais características da estratégia de controle cinemático proposto até aqui neste trabalho.

**Teorema 3.1** *Considere o sistema de servovisão pan-tilt descrito pela equação (3.11), com leis de controle definidas pelas Eqs. (3.12), (3.13) e (3.14). Se as escolhas dos parâmetros,  $K_M$ ,  $d_x$ ,  $d_y$*

satisfazem as Hipóteses (H1) e (H2) e a Eq. (3.29) é satisfeita, então o sistema de controle em malha fechada apresenta as seguintes propriedades:

- (1) Todos os sinais do sistema são uniformemente limitados em amplitude  $\forall t$ ;
- (2)  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \rightarrow 0$ .

### 3.3 – Projeto de Controle com Dinâmica Completa

Para considerar a dinâmica completa do sistema no projeto da lei de controle, basta utilizar o modelo de primeira ordem do motor DC, isto é:

$$\tau_m \dot{\omega}_m = -\omega_m + K_m V_m \quad (3.32)$$

no lugar do modelo cinemático simplificado

$$\omega_m(t) \approx K_m v = K_m V_m(t), \quad t \geq 0 \quad (3.33)$$

assumido na Seção 3.2. Note-se, contudo que a estrutura da dinâmica entrada/saída da Eq. (3.32), no domínio da frequência, é similar à estrutura de primeira ordem dos filtros de sinal adotados na abordagem de controle da Seção 3.2. Na Figura 15, seguem os diagramas em blocos para efeito de comparação.



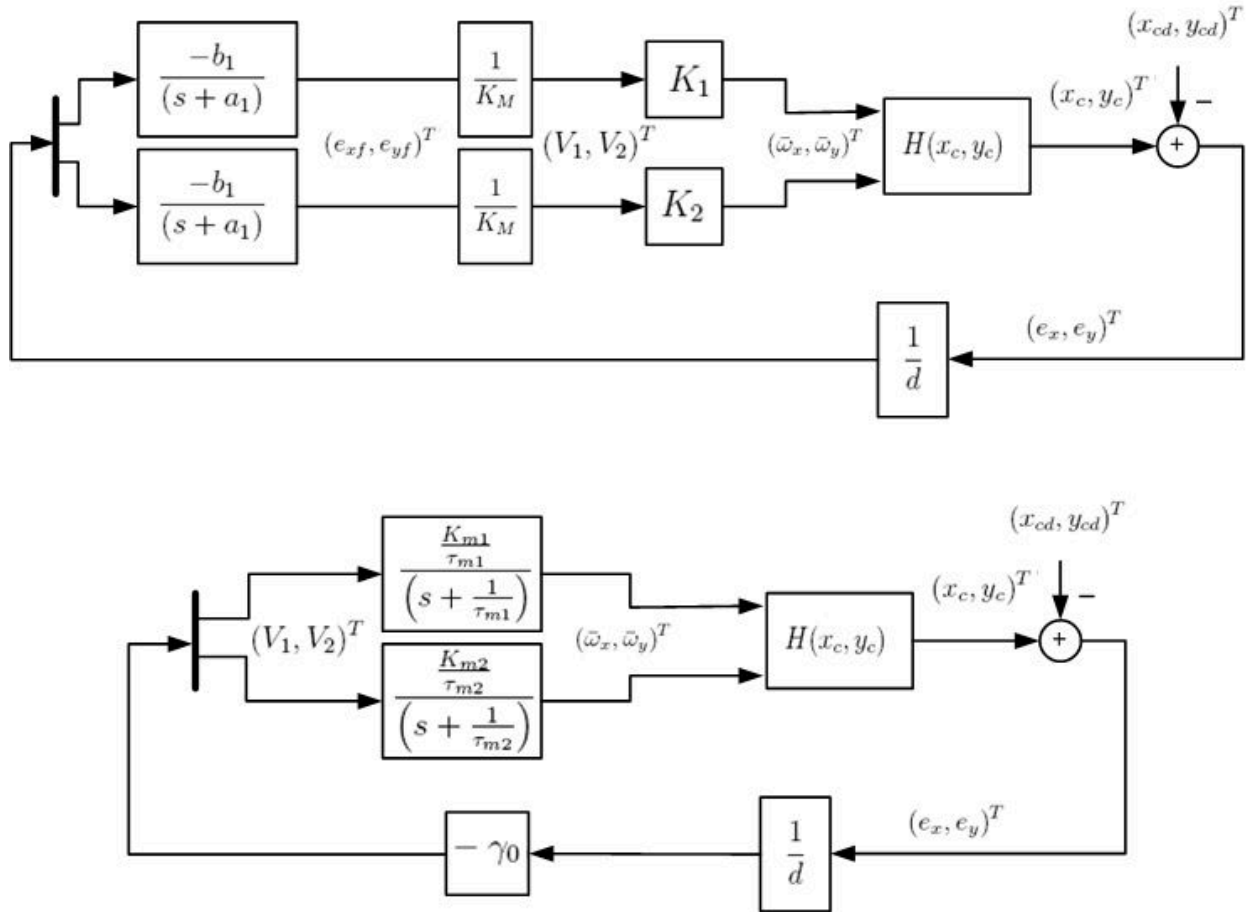


Figura 15. Diagrama em Blocos das estratégias de controle propostas.

Observe na Figura 15 que a versão filtrada  $e_{xf}$ , por exemplo, é a resposta do filtro à entrada erro de imagem  $e_x$ . No caso da equação do motor DC, a dinâmica é semelhante: a velocidade de rotação  $\bar{\omega}_x$  de saída, por exemplo, é a resposta do sistema eletromecânico à entrada de tensão  $V_1$ . Como já foi citado anteriormente, para efeito de projeto e análise, a dinâmica de primeira ordem do motor da Eq. (3.32) pode ser considerada como a de um filtro de sinal tal qual a adotada na Eq. (3.13). Ou seja, as dinâmicas dos dois casos são semelhantes. Diante destes fatos, vários passos do desenvolvimento matemático apresentado na Seção 3.2 poderão ser aproveitados nesta Seção.

### 3.3.1. Proposta da lei de controle

A dinâmica de malha aberta do sistema, com base nas Eqs. (3.1) e (3.10), neste caso, será dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \begin{bmatrix} \bar{\omega}_x \\ \bar{\omega}_y \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

A lei de controle para o sistema será escolhida em função dos erros da imagem conforme demonstrado na Eq. (3.35).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = -\gamma_0 \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\gamma_0 > 0$$

### 3.3.2. Análise de estabilidade

Assumindo que as variáveis  $\bar{\omega}_x$  e  $\bar{\omega}_y$  são as versões filtradas dos sinais de entrada  $V_1$  e  $V_2$ , respectivamente, tem-se em malha fechada que:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = -\left(\frac{\gamma_0}{d}\right) \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \begin{bmatrix} e_{xf} \\ e_{yf} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Rescrevendo a dinâmica da malha fechada (3.36) em termos do vetor de erro aumentado

$$\eta = [e_{xf}; e_{yf}; e_x; e_y]^T. \quad (3.37)$$

tem-se que:

$$\dot{\eta} = \underbrace{\begin{bmatrix} -A_m & -\gamma_0 K_m \\ \frac{1}{d} H & O_2 \end{bmatrix}}_{\Lambda} \eta \quad (3.38)$$

na qual  $O_2$  representa a matriz nula de ordem 2, e as matrizes  $A_m$  e  $K_m$  são dadas por:

$$A_m = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{m1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_{m2}} \end{bmatrix}, \quad K_m = \begin{bmatrix} \frac{K_{m1}}{\tau_{m1}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{m2}}{\tau_{m2}} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Considere-se a seguinte função de Lyapunov candidata, assumindo inicialmente que  $A_m > \gamma_0 K_m$  :

$$\Omega(\eta) = \frac{\eta^T P_0 \eta}{2}, \quad P_0 = \begin{bmatrix} A_m & \gamma_0 K_m \\ \gamma_0 K_m & \gamma_0 K_m \end{bmatrix} > 0, \quad (3.40)$$

Derivando (3.40) em relação ao tempo, segue que:

$$\dot{\Omega}(\eta) = \eta^T P_0 \dot{\eta} = \eta^T P_0 \Lambda \eta = \eta^T \frac{(\Lambda^T P_0 + P_0 \Lambda)}{2} \eta, \quad (3.41)$$

Resolvendo o produto  $P_0 \Lambda$ , tem -se que

$$P_0 \Lambda = \begin{bmatrix} A_m & \gamma_0 K_m \\ \gamma_0 K_m & \gamma_0 K_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -A_m & -\gamma_0 K_m \\ \frac{1}{d} H & O_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_m^2 + \frac{\gamma_0}{d} K_m H & -\gamma_0 A_m K_m \\ -\gamma_0 K_m A_m + \frac{\gamma_0}{d} K_m H & -\gamma_0^2 K_m^2 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

cuja parte simétrica vale:

$$\frac{1}{2} (\Lambda^T P_0 + P_0 \Lambda) = - \underbrace{\begin{bmatrix} A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H & \gamma_0 K_m A_m - \frac{\gamma_0}{2d} K_m H \\ \gamma_0 K_m A_m - \frac{\gamma_0}{2d} K_m H & \gamma_0^2 K_m^2 \end{bmatrix}}_{Q_0} \quad (3.43)$$

Para demonstrar que a matriz simétrica  $Q_0$ , na Eq. (3.43), é uniformemente positiva definida, basta verificar se as condições do *Complemento de Schur* (Strang, 1993) aplicadas nesta matriz são satisfeitas, ou seja:

$$\gamma_0^2 K_m^2 > 0, \quad (3.44)$$

$$A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H > \left( \gamma_0 K_m A_m - \frac{\gamma_0}{2d} K_m H \right)^T (\gamma_0^2 K_m^2)^{-1} \left( \gamma_0 K_m A_m - \frac{\gamma_0}{2d} K_m H \right) \quad (3.45)$$

Observe que a condição da desigualdade (3.44) é satisfeita tendo em vista que  $b_1 > 0$  e  $K$  é positiva definida. Desenvolvendo um pouco mais a expressão da desigualdade (3.27), tem-se que:

$$\left( A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H \right) > \gamma_0^2 \left( K_m A_m - \frac{1}{2d} K_m H \right)^T (\gamma_0^2 K_m^2)^{-1} \left( K_m A_m - \frac{1}{2d} K_m H \right)$$

$$\left( A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H \right) > \left( K_m A_m - \frac{1}{2d} K_m H \right)^T (K_m^{-1})(K_m^{-1}) \left( K_m A_m - \frac{1}{2d} K_m H \right)$$

$$\left( A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H \right) > \left( K_m A_m K_m^{-1} - \frac{1}{2d} K_m H K_m^{-1} \right)^T \left( K_m^{-1} K_m A_m - \frac{1}{2d} K_m^{-1} K_m H \right)$$

$$\left( A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H \right) > \left( A_m - \frac{1}{2d} H \right)^T \left( A_m - \frac{1}{2d} H \right)$$

$$\left( A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H \right) > \left( A_m - \frac{1}{2d} H \right)^2$$

$$A_m^2 - \frac{\gamma_0}{d} K_m H > A_m^2 - \left( \frac{1}{d} \right) A_m H + \frac{1}{4d^2} H^2$$

$$-\frac{\gamma_0}{d} K_m H > \left( -A_m + \frac{1}{4d} H \right) \left( \frac{1}{d} H \right)$$

$$-\gamma_0 K_m > -A_m + \frac{1}{4d} H$$

$$\gamma_0 K_m < A_m - \frac{1}{4d} H$$

$$A_m > \gamma_0 K_m + \frac{1}{4d} H \quad (3.46)$$

Como foi discutido na Seção 3.2, os elementos da matriz  $H/d$  são todos menores do que a unidade. Assim, se os valores dos elementos de  $A_m$  forem tais que

$$A_m \geq \gamma_0 K_m + I_2 \quad (3.47)$$

então a condição (3.46) também será satisfeita. Como  $A_m$ ,  $K_m$  são matrizes diagonais, a condição (3.47), pode ser redefinida em termos de seus elementos, ou seja:

$$\frac{1}{\tau_{m1}} \geq \gamma_0 \left( \frac{K_{m1}}{\tau_{m1}} \right) + 1 \quad (3.48)$$

$$\frac{1}{\tau_{m2}} \geq \gamma_0 \left( \frac{K_{m2}}{\tau_{m2}} \right) + 1 \quad (3.49)$$

Observe que as condições (3.48) e (3.49) são condições são idênticas à condição (3.29) da Seção 3.2 quando se comparam os parâmetros dos diagramas em bloco da Figura 15. Por serem semelhantes é notório que a solução para o problema será equivalente.

Adotando as escolhas das constantes  $\gamma_0$ ,  $d$  e do motor conforme as condições mencionadas e baseado nas hipóteses propostas é possível afirmar que a forma quadrática na Eq. (3.43) é negativa definida:

$$\dot{\Omega}(\eta) = \eta^T Q \dot{\eta} < 0 \quad (3.50)$$

baseado na teoria de estabilidade de Lyapunov (SLOTINE; LI, 1991), conclui-se que o vetor de erro aumentado  $\eta$  definido na Eq. (3.37) é uniformemente limitado em amplitude  $\forall t$  e, além disso, converge para zero assintoticamente.

**Observação 3.2:** É importante ressaltar que na proposta de controle cinemático da Seção anterior os parâmetros  $a_1$  e  $b_1$  dos filtros podem ser escolhidos arbitrariamente para satisfazer as condições de estabilidade analisadas. Na proposta atual, entretanto, isto não é possível porque

os parâmetros  $\tau_{m1}$ ,  $\tau_{m2}$ ,  $K_{m1}$  e  $K_{m2}$  são valores intrínsecos dos motores. Contudo, note-se que, dependendo dos tipos de motores DC, a constante de projeto  $\gamma_0 > 0$  pode ser escolhida arbitrariamente a fim de satisfazer as condições de estabilidade em (3.48) e (3.49).

**Teorema 3.2** *Considere o sistema de servovisão pan-tilt descrito pela equação (3.34), com leis de controle definidas pela Eq. (3.35). Considere uma classe de motores DC para a qual a condição*

$$\frac{1}{\tau_m} \geq \gamma_0 \left( \frac{K_m}{\tau_m} \right) + 1$$

*é válida para  $\gamma_0 > 0$ . Se as escolhas dos parâmetros  $d_x$ ,  $d_y$  satisfazem a Hipótese (H2), então o sistema em malha fechada (3.38) apresenta as seguintes propriedades:*

- (1) *Todos os sinais do sistema são uniformemente limitados em amplitude  $\forall t$ ;*
- (2)  *$\lim_{t \rightarrow \infty} [e_x(t); e_y(t)] \rightarrow [0; 0]$ .*

### 3.4 – Análise de Robustez na Presença de Incertezas Paramétricas

Em casos como em (FLANDIN, et. al. 2000; DOMBRE, KHALIL 2007; LIZARRALDE, et. al. 2013; GUELPA, et. al. 2016) para que seja possível analisar a robustez de um sistema é necessário que se faça a inversão da planta do sistema. Isto porque as matrizes das plantas às quais os controles estão sendo aplicados são matrizes quaisquer, que podem inclusive ser inicialmente instáveis. Estas matrizes em conjunto com o controlador produzirá um sistema estável, ou seja, o sistema se tornará estável ao se multiplicar por outra matriz. Existem uma série de matrizes que à tornam estável, mas existe um caso em particular que é melhor, a inversa. No caso exposto neste trabalho a matriz da planta já é estável, então basta fazer a análise inserindo incertezas nos parâmetros do sistema.

Analisando a estrutura da equação dinâmica da malha fechada da Eq. (3.36), reproduzida por conveniência na Eq. (3.50), nota-se que as únicas fontes de incerteza paramétrica na câmera são as constantes  $\alpha$  (fator de escalamento da câmera mm/pixel) e  $f$  (distância focal da câmera).

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = - \left( \frac{\gamma_0}{d} \right) \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} & \frac{x_c y_c}{\alpha f} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha f} & \frac{y_c^2 + (\alpha f)^2}{\alpha f} \end{bmatrix}}_{H(x_c, y_c)} \begin{bmatrix} e_{xf} \\ e_{yf} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

A análise a seguir pretende demonstrar como ficaria o controle no caso de variação de parâmetros da matriz. Aplicando perturbações em  $\alpha$  e  $f$ , temos:

$$\bar{f} = f \pm \Delta f \rightarrow |\Delta f| < |f| \quad (3.51)$$

$$\bar{\alpha} = \alpha \pm \Delta \alpha \rightarrow |\Delta \alpha| < |\alpha| \quad (3.52)$$

Inserindo estas variações na matriz do sistema, obtém-se:

$$H + \Delta H = \begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha \pm \Delta \alpha)^2 (f \pm \Delta f)^2}{(\alpha \pm \Delta \alpha)(f \pm \Delta f)} & \frac{x_c y_c}{(\alpha \pm \Delta \alpha)(f \pm \Delta f)} \\ \frac{x_c y_c}{(\alpha \pm \Delta \alpha)(f \pm \Delta f)} & \frac{y_c^2 + (\alpha \pm \Delta \alpha)^2 (f \pm \Delta f)^2}{(\alpha \pm \Delta \alpha)(f \pm \Delta f)} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Para melhor análise foi considerado  $\alpha_0 = \alpha \pm \Delta \alpha$  e  $f_0 = f \pm \Delta f$ .

$$H_0 = H + \Delta H = \begin{bmatrix} \frac{x_c^2 + (\alpha_0 f_0)^2}{\alpha_0 f_0} & \frac{x_c y_c}{\alpha_0 f_0} \\ \frac{x_c y_c}{\alpha_0 f_0} & \frac{y_c^2 + (\alpha_0 f_0)^2}{\alpha_0 f_0} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$\det H_0 = \frac{(\alpha_0 f)^4 + x_c^2 (\alpha_0 f)^2 + y_c^2 (\alpha_0 f)^2 + x_c^2 y_c^2}{(\alpha_0 f)^2} - \frac{x_c^2 y_c^2}{(\alpha_0 f)^2} \quad (3.57)$$

$$\det H_0 = (\alpha_0 f)^2 + x_c^2 + y_c^2 \quad (3.58)$$

$$\det H_0 > 0 \quad (3.59)$$

Portanto, é possível observar que apesar das perturbações inseridas as propriedades da matriz se mantém, ou seja, por se tratarem de quantidades positivas, elas não modificam as propriedades de simetria e positividade da matriz  $H(x_c, y_c)$  quando assumem outros valores. Isto quer dizer que as propriedades estruturais da matriz  $H(x_c, y_c)$  são invariantes e não dependem do tipo de câmera utilizada. A outra fonte de incerteza paramétrica está nos valores dos parâmetros  $\tau_{m1}$ ,  $K_{m1}$ ,  $\tau_{m2}$  e  $K_{m2}$  dos motores nas expressões da Eq. (3.39) reproduzida por conveniência na Eq. (3.51). Novamente, como se tratam de quantidades positivas não ocorrem mudanças

estruturais nas matrizes  $A_m$  e  $K_m$ . Isto significa que mesmo no caso que  $\tau_{m1}$ ,  $K_{m1}$ ,  $\tau_{m2}$  e  $K_{m2}$  assumam outros valores, as demonstrações apresentadas continuam válidas e as propriedades da malha fechada do Teorema 3.2 ficam inalteradas.

$$A_m = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{m1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_{m2}} \end{bmatrix}, \quad K_m = \begin{bmatrix} \frac{K_{m1}}{\tau_{m1}} & 0 \\ 0 & \frac{K_{m2}}{\tau_{m2}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Portanto é possível notar que o sistema desenvolvido é robusto na presença de incertezas paramétricas, além de estável.



## 4- Resultados da simulação

### 4.1 – Apresentação

Para verificar as propriedades de estabilidade e convergência do sistema em malha fechada, neste capítulo são apresentados alguns resultados de simulação utilizando as leis de controle propostas. Nas simulações foram implementadas todas as equações mencionadas no Teorema 3.2.

Nas simulações foram adotados os parâmetros do motor DC de 12 Volts modelo PITTMAN GM9236 disponíveis em (<http://www.pittman-motors.com/Brush-DC-Motors/9236-Brush-DC-Motor.aspx>):

$$\frac{1}{\tau_{m1}} = \frac{1}{\tau_{m2}} = 84,4450 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{K_{m1}}{\tau_{m1}} = \frac{K_{m2}}{\tau_{m2}} = 14,3097$$

Estes valores foram calculados com base nas expressões que relacionam as constantes elétricas e mecânicas do motor, disponíveis na maior parte dos livros textos de Sistemas e Controle (DORF; BISHOP, 2013):

$$\frac{1}{\tau_{m1}} = \frac{R_a B + K_b K_\tau}{R_a J}$$

$$\frac{K_{m1}}{\tau_{m1}} = \frac{K_\tau}{R_a J}$$

sendo  $R_a$  a resistência da armadura [Ohms],  $B$  a constante de atrito viscoso [N.m.s],  $K_b$  a constante da força contra-eletromotriz [V/(rads/s)],  $K_\tau$  a constante de torque [Nm/A] e  $J$  a inércia do rotor [Kg.m<sup>2</sup>]. Os parâmetros adotados para a câmera foram:  $\alpha = 1100[\text{pixel}/\text{mm}]$ ;  $f = 4 [\text{mm}]$ ;  $d_x = 320 [\text{pixels}]$ ;  $d_y = 480 [\text{pixels}]$ ;  $d = 332800$ .

Foram realizadas 2 (dois) tipos de simulação numérica . Primeiro, foi simulada a resposta ao degrau, ou seja, a convergência do sistema para apenas um único ponto na imagem. Para verificar a robustez do controlador foram introduzidos dois tipos de incertezas paramétricas separadamente: (1ª.) uma variação de 50% no valor da constante  $\alpha$  da câmera; (2ª.) uma variação de 50% no valor da constante  $K_{m1}/\tau_{m1}$  do motor. As simulações foram realizadas com e sem ruído.

No segundo tipo de simulação numérica, foram verificadas as convergências para quatro pontos na tela. Nesta fase, optou-se por manter fixos os parâmetros do sistema. As simulações também foram realizadas com e sem ruído.

As simulações foram realizadas no MatLab® utilizando Simulink. O diagrama esquemático de como foi montada a simulação do projeto completo pode ser visto na Fig.16, onde é possível ver com maior detalhe a forma que feita a simulação com todas as suas equações e parâmetros.

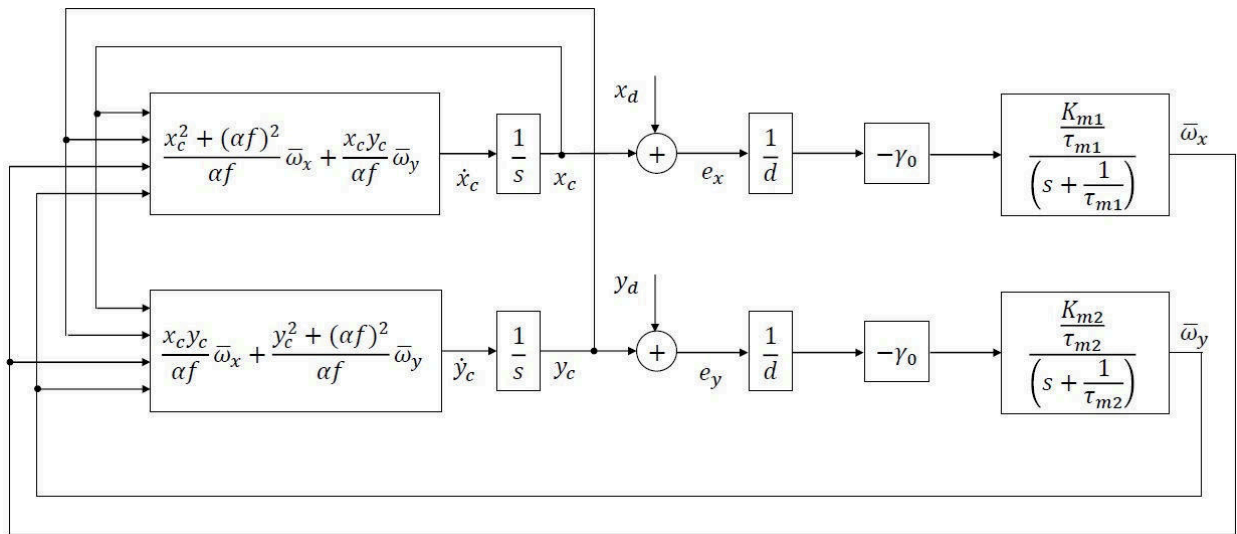


Figura 16: Diagrama esquemático da simulação.

## 4.2 – Resultados e discussões

Nas Figuras 17 e 18 seguem os resultados obtidos na primeira bateria de simulações. Durante as simulações foram acrescentadas incertezas paramétricas da ordem de 50% tanto no parâmetro  $\alpha$  da câmera quanto no valor da constante  $K_{m1}/\tau_{m1}$  do motor. Na Figura 17, observa-se poucas diferenças entre as curvas obtidas nas excursões do alvo no plano da imagem. Como foi

previsto pela teoria, as variações paramétricas não influenciaram na estabilidade em malha fechada e nem na convergência para o valor de referência. Na Figura 18, observa-se ainda que as amplitudes de tensão geradas pelo controlador estão dentro dos limites admissíveis para os motores ( $\pm 12$  Volts).

Para verificar o desempenho do controlador na presença de ruído de medição, foram inseridos sinais randômicos (ruído branco) de amplitude  $\pm 5$  pixels no eixo x e  $\pm 7$  pixels no eixo y. Os resultados obtidos seguem ilustrados nas Figuras 19 e 20. Nos gráficos apresentados na Figura 19, observa-se nitidamente que o ruído introduzido afeta a convergência para o ponto de referência. Contudo, o sistema permanece estável e robusto com relação às incertezas adotadas. Na Figura 20, percebe também que as amplitudes dos sinais de controle gerados continuam excursionando abaixo dos limites máximos de tensão dos motores.

Na segunda bateria de simulações, foram escolhidos quatro pontos de referência na imagem: (1)  $[310; 70]$  pixels ; (2)  $[310; 170]$  pixels , (3)  $[210; 170]$  pixels e (4)  $[210; 70]$  pixels. Os gráficos dos resultados de simulação seguem nas Figuras 21 – 26. Nas Figuras 21, 22 e 23, são ilustradas as curvas das trajetórias na imagem sem levar em consideração o ruído de medição. Observe que as curvas de  $x_c(t)$  e  $y_c(t)$  convergem para os set-points pré-definidos. Vale lembrar que o alvo de interesse é estático e é a câmera que rotaciona para focalizá-lo nos pontos de referência da imagem. Embora as equações de movimento da câmera tenham sido codificadas no software de simulação, fica difícil observar aqui o movimento real de orientação da câmera. Observe que os pontos de focalização do alvo são os vértices do quadrilátero, que são atingidos de forma assintótica. As trajetórias observadas ao longo das arestas do quadrilátero de referência não são pontos de interesse e correspondem tão somente ao transitório de regulação.

Nas Figuras 24, 25 e 26, seguem os resultados obtidos após a introdução de sinais randômicos (ruído branco) de amplitude  $\pm 5$  pixels no eixo x e  $\pm 7$  pixels no eixo y, para simular ruído. A convergência para os vértices do quadrilátero de referência na imagem ficou prejudicada, mas a propriedade de estabilidade foi mantida.

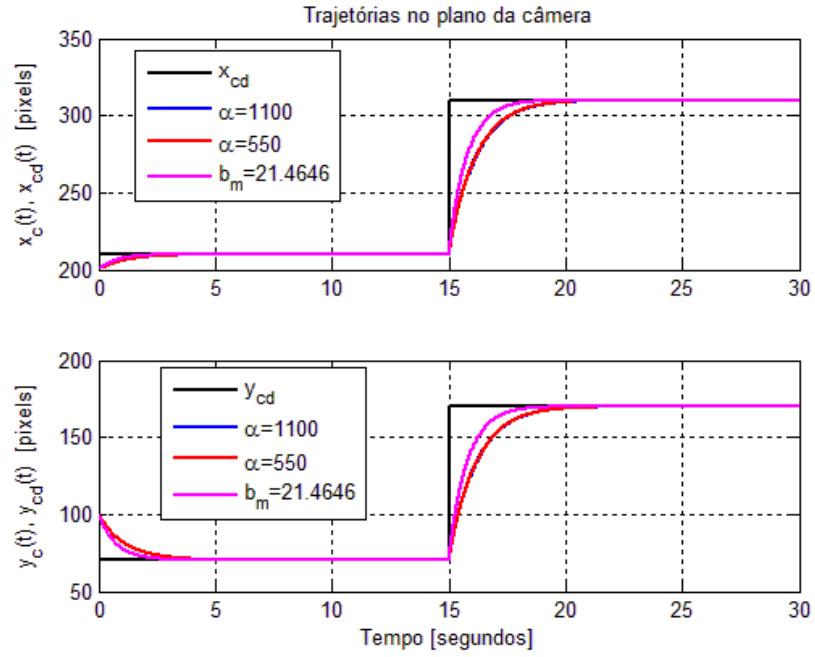


Figura 17: Simulação. Excursões no plano da câmera.

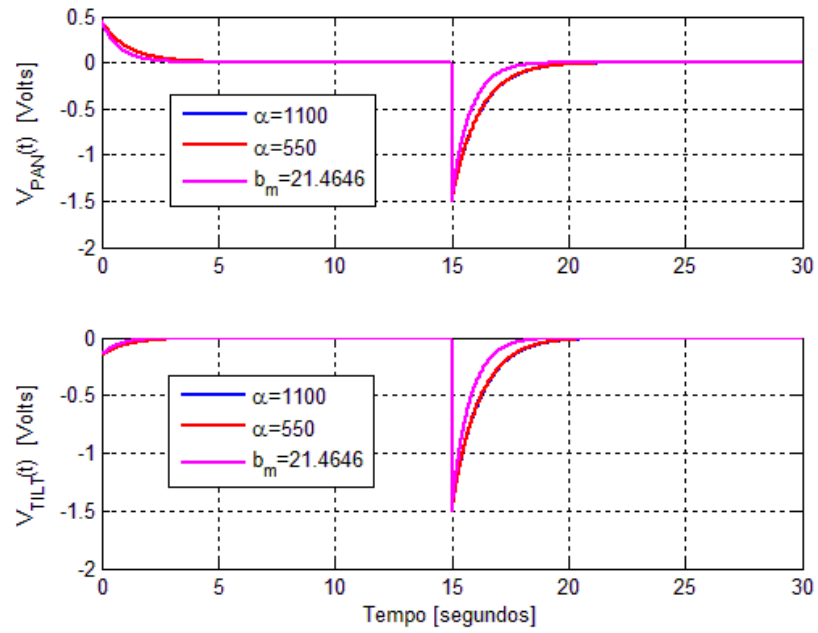


Figura 18: Simulação. Sinais de controle.

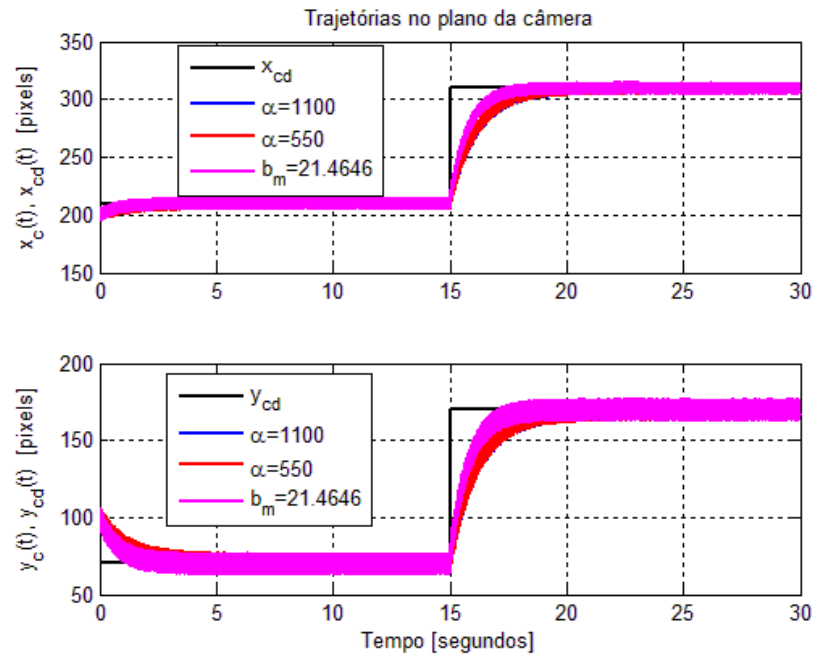


Figura 19: Simulação. Excursões no plano da câmera na presença de ruído.

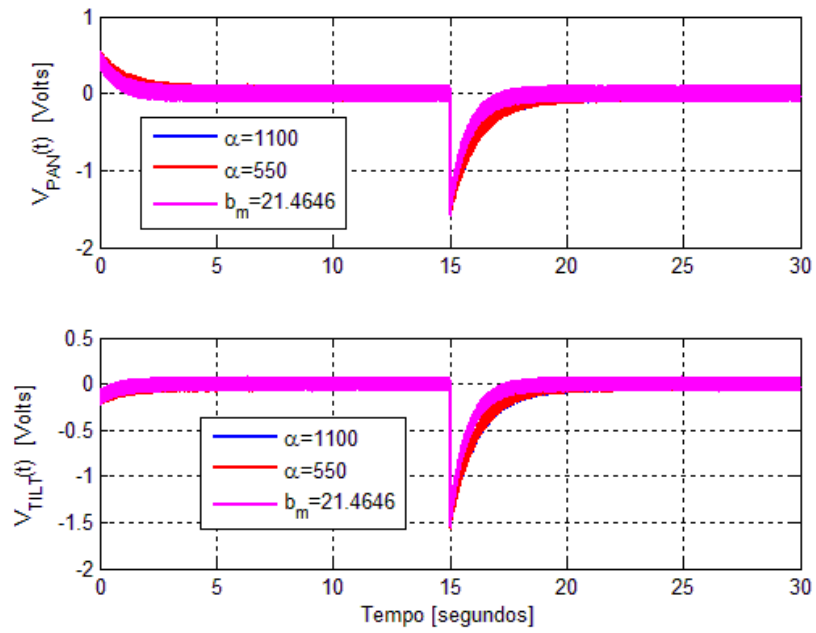


Figura 20: Simulação. Sinais de controle na presença de ruído.

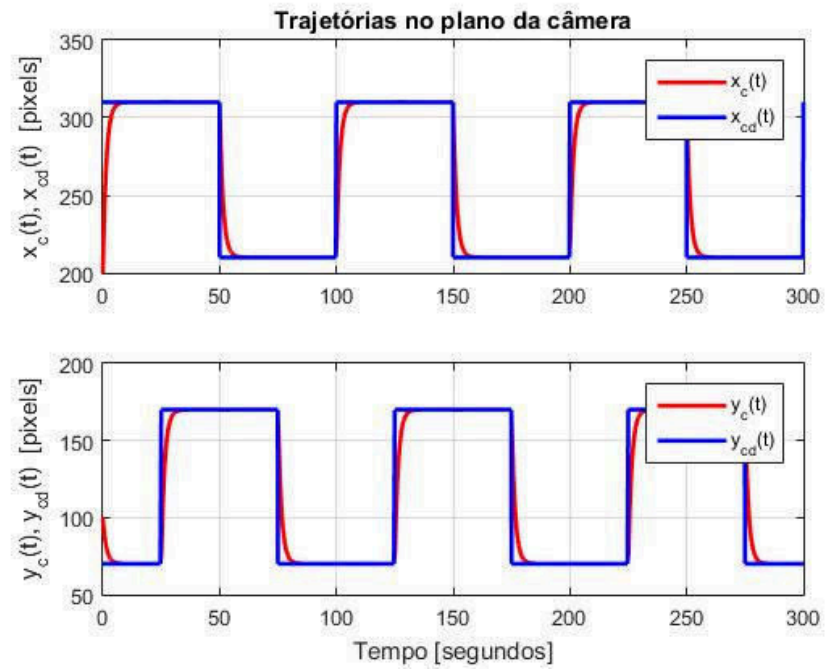


Figura 21: Simulação. Excursões do alvo no plano da imagem.

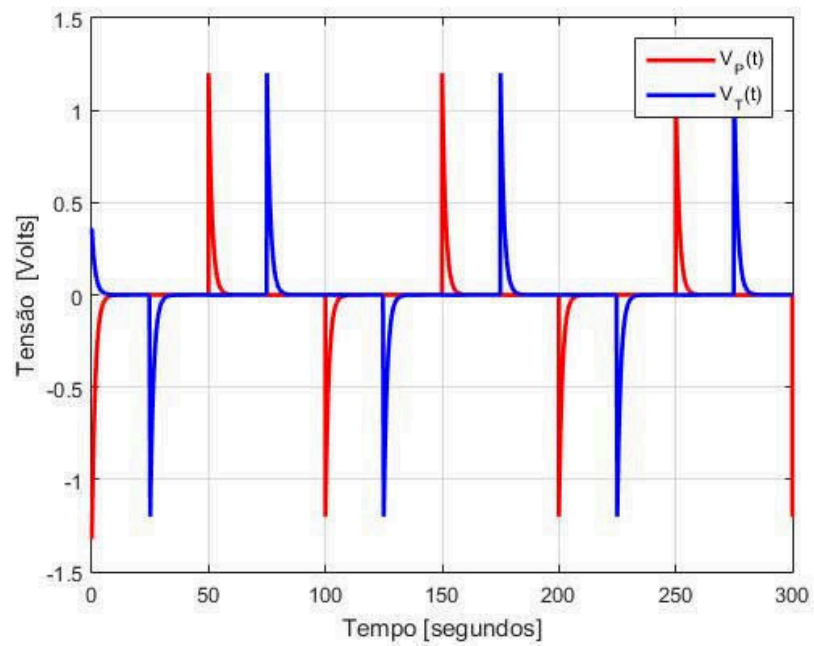


Figura 22: Simulação. Sinais de controle.

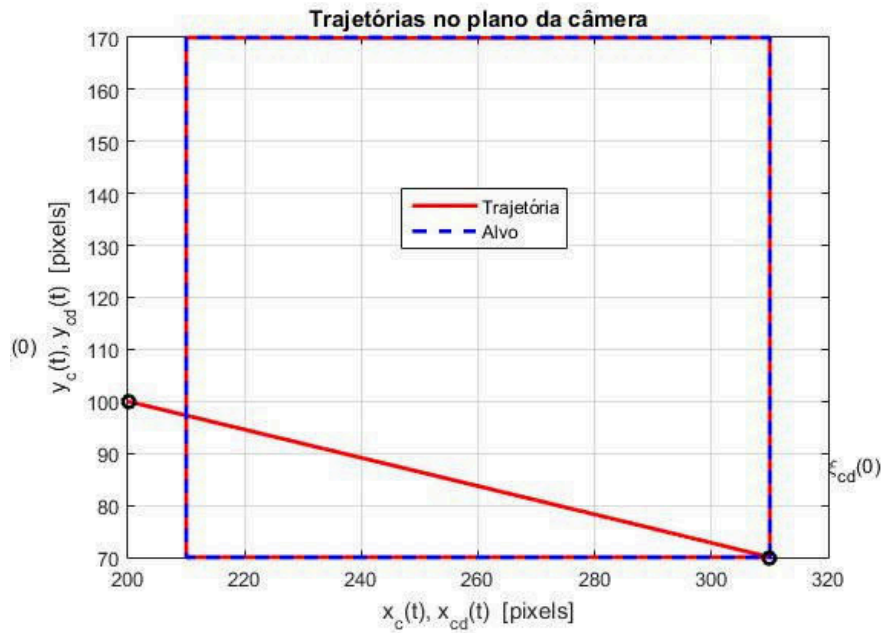


Figura 23: Simulação. Trajetória no plano da imagem.

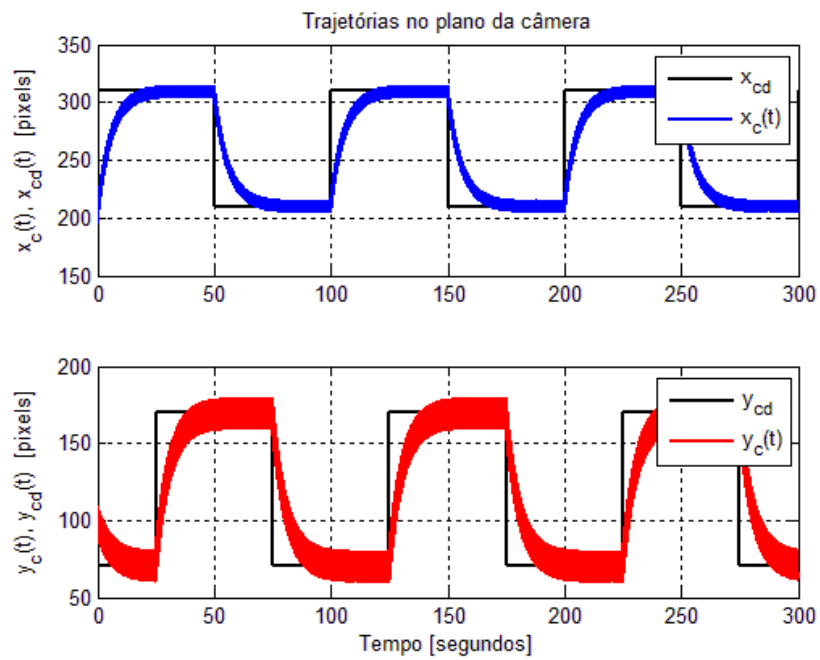


Figura 24: Simulação. Excursões do alvo no plano da imagem na presença de ruído de medição.

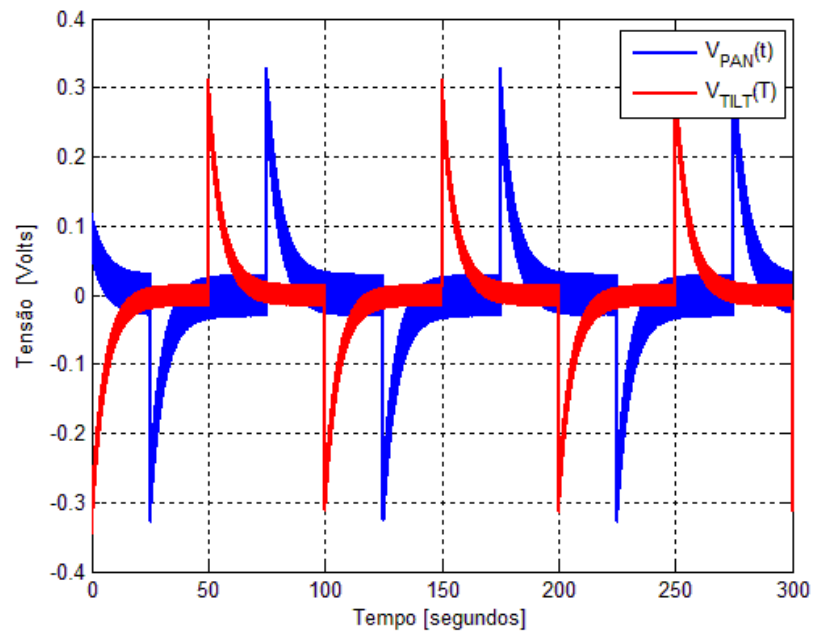


Figura 25: Simulação. Sinais de controle na presença de ruído.

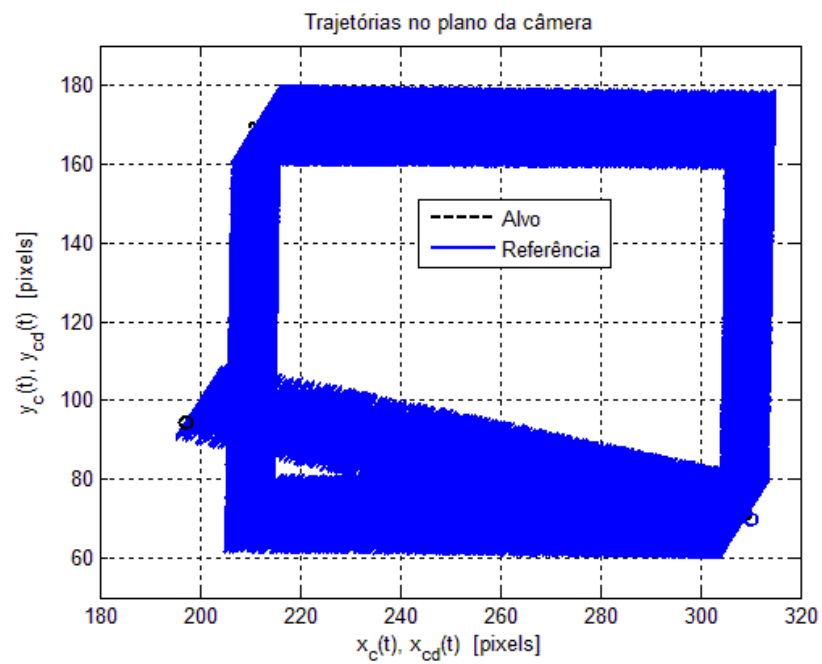


Figura 26: Simulação. Trajetória no plano da imagem na presença de ruído.



## 5- Conclusão

Este trabalho apresentou um algoritmo baseado em realimentação visual para o controle de orientação de uma câmera *pan-tilt*. O esquema discutido foi desenvolvido para um sistema composto por uma única câmera de base fixa com controle baseado nas informações da imagem. A ideia central do trabalho foi de orientar a câmera de forma automática, propondo leis de controle para os ângulos de *pan* e *tilt* da base, a fim de que a imagem na tela permanecesse focalizada sobre alguns pontos fixos desejados.

Inicialmente, foi realizada uma abordagem na qual foi adotado um modelo dinâmico simplificado para os motores DC dos eixos *pan* e *tilt*. Com esta simplificação foi possível incorporar as equações da dinâmica dos motores diretamente no modelo de servovisão, para obter o modelo do sistema câmera-motores puramente cinemático. A principal característica do modelo mencionado está no fato de a matriz de transformação do sistema de visão possuir as propriedades de simetria e positividade uniformes, que são características que facilitam o projeto das leis de controle. Para o projeto de controle, foram adotadas leis matemáticas baseadas nas versões filtradas dos erros de posição na imagem, isto é, nos eixos  $x$  e  $y$  do sistema de coordenadas da tela. As demonstrações matemáticas apresentadas e discutidas nesta abordagem de controle cinemático, confirmaram as propriedades de estabilidade e convergência em malha fechada do controlador proposto.

Em uma segunda abordagem, as dinâmicas completas dos movimentos dos motores de *pan* e *tilt* foram consideradas no projeto das leis de controle. Contudo, ao refazer a análise, percebeu-se que a estrutura do sistema em malha aberta era bastante similar à estrutura em malha fechada da abordagem inicial. O fato é que as equações escolhidas para os filtros de sinal da abordagem inicial são similares às equações dinâmicas dos motores. Desta forma, grande parte da metodologia de síntese e de análise dos controladores propostos anteriormente pôde ser aproveitada nesta segunda abordagem.

Alguns resultados de simulação foram apresentados para verificar as características discutidas na análise teórica. Em um primeiro conjunto de simulações, foi estipulado o objetivo de se atingir um único ponto fixo na tela. As simulações foram realizadas fixando os parâmetros do controlador e inserindo incertezas em alguns poucos parâmetros do sistema. Foram adotadas incertezas da ordem de 50% ora no fator de escala pixel/mm do modelo da câmera, ora no ganho de entrada dos motores. Verificou-se que estas variações paramétricas não influenciaram as características de estabilidade e convergência da malha fechada. Este mesmo conjunto de

simulações foi feito inserindo-se uma determinada quantidade de ruído de medição. Também foi verificado que as propriedades de estabilidade não foram alteradas, entretanto, houve uma degradação na convergência.

Em um segundo conjunto de simulações, foram estipulados quatro pontos fixos a serem regulados na imagem. Nestas simulações, os parâmetros dos controladores foram fixados em valores constantes e novamente foram introduzidas incertezas da ordem de 50% em alguns parâmetros da planta. As características de estabilidade e convergência previstas pela análise teórica foram confirmadas. Em seguida, as simulações foram repetidas, introduzindo-se ruídos de medição no sistema de visão. Novamente, verificou-se que a característica de estabilidade foi confirmada em detrimento da convergência para os pontos desejados.

Analisando os resultados obtidos nas duas abordagens, foi possível observar três características importantes:

- (1) Os parâmetros do sistema câmera-motores não são exigidos nas estruturas de controle propostas.
- (2) As leis matemáticas que definem os controladores propostos não dependem da medição dos ângulos dos motores de *pan* e *tilt*.
- (3) As variações de parâmetros da planta não influenciam as propriedades de estabilidade e convergência em malha fechada.

## 5.1 – Sugestões de Trabalhos Futuros

Visando dar continuidade ao projeto de pesquisa iniciado neste trabalho, são propostas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Considerar outros modelos de câmera específicos para cada aplicação, por exemplo, reconhecimento de padrões, militar, etc;
- Realização de ensaios experimentais para verificação das características de malha fechada analisadas;
- Analisar a possibilidade de reduzir a degradação da convergência na presença de ruídos;
- Explorar o problema de rastreamento de alvos móveis.

### Referências Bibliográficas

AGUSTINOS, A.; WOLF, R.; LONG, J. A.; CINQUIN, P.; VOROS, S. Visual servoing of a robotic endoscope holder based on surgical instrument tracking. In: **5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics**. IEEE, 2014. p. 13-18.

AKYILDIZ, I. F.; MELODIA, T.; CHOWDHURY, K. R. A survey on wireless multimedia sensor networks. **Computer networks**, v. 51, n. 4, p. 921-960, 2007.

ANDREFF, N.; DEMBÉLÉ, S.; TAMADAZTE, B.; HUSSNAIN, Z. E. Epipolar geometry for vision-guided laser surgery. In: **10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO'2013**. 2013. p. 1-6.

AZEVEDO, D. A.; LIMA, P. P. P.; LEITE, A. C.; ZACHI, A. R. L. Controle De Orientação De Uma Câmera Pan-Tilt Por Servovisão Baseada Em Imagem Com Realimentação De Saída In: **IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. ABCM, 2016.

BORSU, V.; PAYEUR, P. Dual supervisory architecture for drift correction and accurate visual servoing in industrial manufacturing. In: **Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International**. IEEE, 2012. p. 177-182.

CHATELAIN, P.; KRUPA, A.; NAVAB, N. 3D ultrasound-guided robotic steering of a flexible needle via visual servoing. In: **2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**. IEEE, 2015. p. 2250-2255.

CHAUMETTE, F.; HUTCHINSON, S. Visual servo control. I. Basic approaches. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 13, n. 4, p. 82-90, 2006.

CHEN, H.; ZHAO, X.; TAN, M. A novel pan-tilt camera control approach for visual tracking. In: **Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on**. IEEE, 2014. p. 2860-2865.

DEBRUIN, J. Control systems for mobile satcom antennas. **IEEE Control Systems**, v. 28, n. 1, p. 86-101, 2008.

DOMBRE, E.; KHALIL, W. (Ed.). **Robot manipulators: modeling, performance analysis and control**, ISTE, pp.279-336, 2007.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**, 12<sup>a</sup>. Edição, Editora LTC, 2013.

FLANDIN, G.; CHAUMETTE, F.; MARCHAND, E. Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing. In: **Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on. IEEE**, 2000. p. 2741-2746.

GUELPA, V.; LAURENT, G. J.; TAMADAZTE, B.; SANDOZ, P.; LE FORT-PIAT, N.; CLÉVY, C. Single frequency-based visual servoing for microrobotics applications. In: **Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE**, 2016. p. 4274-4279.

GRUZMAN, M.; TAGAWA, D. B.; WEBER, H. I.; SAMPAIO, R. Arquitetura de controle otimizada para rastreamento visual de alvos. In: **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática**. 2012. p. 890-897.

HUTCHINSON, S.; HAGER, G. D.; CORKE, P. I. A tutorial on visual servo control. **IEEE transactions on robotics and automation**, v. 12, n. 5, p. 651-670, 1996.

JENTSCH, F. **Human-robot interactions in future military operations**. CRC Press, 2016.

KE, S. R.; THUC, H. L. U.; LEE, Y. J.; HWANG, J. N.; YOO, J. H.; CHOI, K. H. A review on video-based human activity recognition. **Computers**, v. 2, n. 2, p. 88-131, 2013.

KELLY, Rafael et al. Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems. **IEEE/ASME transactions on mechatronics**, v. 5, n. 1, p. 39-48, 2000.

KRUPA, A.; GANGLOFF, J.; DOIGNON, C.; MATHELIN, M.; MOREL, G.; LEROY, J.; SOLER, L.; MARESCAUX, J. Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing. **IEEE transactions on robotics and automation**, v. 19, n. 5, p. 842-853, 2003.

KRUPINSKI, S.; DESOUCHE, R.; PALOMERAS, N.; ALLIBERT, G.; HUA, M. Pool testing of AUV visual servoing for autonomous inspection. In: **4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles**, Girona, Spain, 2015.

LAURA, T. L. **Sistema de Supervisão Aérea para Detecção de Anomalias em Instalações de Petróleo e Gás**. 2012. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.

LEBEC, O.; GHEZALA, M. W. B.; LEYNART, V.; LAFFONT, I.; FATTAL, C.; DEVILLIERS, L.; CHASTAGNOL, C.; MARTIN, J.C.; MEZOUAR, Y.; KORRAPATTI, H.; DUPOURQUÉ, V.; LEROUX, C. High level functions for the intuitive use of an assistive robot. In: **Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013 IEEE International Conference on**. IEEE, 2013. p. 1-6.

LI, L.; WANG, B.; LI, B.; XIAO, P.; WANG, W.; LI, Y. The application of image based visual servo control system for smart guard. In: **2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)**. IEEE, 2013. p. 1342-1345.

LICANDRO, F.; SCHEMBRA, G. Wireless mesh networks to support video surveillance: architecture, protocol, and implementation issues. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2007, n. 1, p. 1-13, 2007.

LIZARRALDE, F.; LEITE, A. C.; HSU, L.; COSTA, R. R. Adaptive visual servoing scheme free of image velocity measurement for uncertain robot manipulators. *Automatica*, v. 49, n. 5, p. 1304-1309, 2013.

MASTEN, M. K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems. **IEEE Control Systems**, v. 28, n. 1, p. 47-64, 2008.

MEHTA, S. S.; TON, C.; KAN, Z.; CURTIS, J. W. Vision-based navigation and guidance of a sensorless missile. **Journal of the Franklin Institute**, v. 352, n. 12, p. 5569-5598, 2015.

MIRANDA, A. T.; MANHÃES, A. G.; ZACHI, A. R. L. Projeto de controle de um rastreador solar baseado em servovisão. In: **ABCM Symposium Series in Mechatronics**. Vol. 6, pp. 1192–1198, 2014.

MURRAY, R. M.; LI, Z.; SASTRY, S. S.; Sastry, S. S. **A mathematical introduction to robotic manipulation**. CRC press, 1994. Pag. 24.

MYINT, M.; YONEMORI, K.; YANOU, A. LWIN, K. N.; MINAMI, M.; ISHIYAMA, S. Visual servoing for underwater vehicle using dual-eyes evolutionary real-time pose tracking. **Journal of Robotics and Mechatronics**, v. 28, n. 4, p. 543-558, 2016.

ORTEGA, J. J. Gunfire performance of stabilized electro-optical sights. In: **AeroSense'99**. International Society for Optics and Photonics, 1999. p. 74-83.

PEDERSEN, M. R.; NALPANTIDIS, L.; ANDERSEN, R. S.; SCHOU, C.; BØGH, S.; KRÜGER, V.; MADSEN, O. Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 37, p. 282-291, 2016.

RATHINAM, S.; KIM, Z. W.; SENGUPTA, R. Vision-based monitoring of locally linear structures using an unmanned aerial vehicle 1. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 14, n. 1, p. 52-63, 2008.

RUPPELT, J.; TROMMER, G. F. Stereo-camera visual odometry for outdoor areas and in dark indoor environments. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, v. 31, n. 11, p. 4-12, 2016.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modelling and control of robot manipulators**. Springer Science & Business Media, 2012.

SLOTINE, J. J. E.; LI, W. **Applied nonlinear control**. Englewood Cliffs, NJ: prentice-Hall, 1991.

SONG, H.-C.; KIM, M.-C.; SONG, J.-B. USB assembly strategy based on visual servoing and impedance control. In: **Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2015 12th International Conference on**. IEEE, 2015. p. 114-117.

STRANG, G. **Introduction to linear algebra**. Wellesley, MA: Wellesley-Cambridge Press, 1993.

VEGA-MALDONADO, S.; WARIO, F.; ARÁMBURO-LIZÁRRAGA, J.; PEREZ-CISNEROS, M.; CEDANO-OLVERA, M. Visual registration and tracking for traffic monitoring. In: **Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International**. IEEE, 2015. p. 1-6.

VITRANI, M.-A.; MOREL, G.; ORTMAIER, T. Automatic guidance of a surgical instrument with ultrasound based visual servoing. In: **Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. IEEE, 2005. p. 508-513.

WANG, G.; WANG, C.; DU, Q. Robust regulation of mobile robots with dynamic based on uncalibrated visual servoing. In: **Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on**. IEEE, 2014. p. 267-272.

WANG, K.; LIN, P. Kinematic visual servoing based regulation of quadrotors on a predefined marker. In: **2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)**. IEEE, 2015. p. 1297-1302.

WANG, K.; DAI, F.; LI, J.; ZENG, S. Visually servoed pickup of stationary objects with a kinematically controlled manipulator. In: **Automation Science and Engineering (CASE), 2016 IEEE International Conference on**. IEEE, 2016. p. 251-256.

XIE, H.; LYNCH, A. Dynamic image-based visual servoing for unmanned aerial vehicles with bounded inputs. In: **Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2016 IEEE Canadian Conference on**. IEEE, 2016. p. 1-5.

ZHANG, X.; FANG, Y.; SUN, N. Visual servoing of mobile robots for posture stabilization: from theory to experiments. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, v. 25, n. 1, p. 1-15, 2015.

ZHOU, L.; LIN, T.; CHEN, S.-B. Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 47, n. 3, p. 239-255, 2006.