



COPPE/UFRJ

RASTREAMENTO VISUAL E ESTABILIZAÇÃO DE PLATAFORMAS
INERCIAIS USANDO APENAS DUAS MEDIDAS DE SENSORES
GIROSCÓPICOS

Andrei Giordano Holanda Battistel

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Liu Hsu

Fernando Cesar Lizarralde

Rio de Janeiro

Março de 2011

RASTREAMENTO VISUAL E ESTABILIZAÇÃO DE PLATAFORMAS
INERCIAIS USANDO APENAS DUAS MEDIDAS DE SENSORES
GIROSCÓPICOS

Andrei Giordano Holanda Battistel

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Liu Hsu, Docteur d'Etat.

Prof. Ramon Romankevicius Costa, D. Sc.

Prof. Paulo Cesar Pellanda, Docteur ENSAE

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2011

Battistel, Andrei Giordano Holanda

Rastreamento visual e estabilização de plataformas inerciais usando apenas duas medidas de sensores giroscópicos/Andrei Giordano Holanda Battistel. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XVI, 130 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Liu Hsu

Fernando Cesar Lizarralde

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 127 – 130.

1. estabilização de plataformas. 2. controle de orientação. 3. rastreamento visual. I. Hsu, Liu *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Esta dissertação é o resultado de dois anos do meu trabalho na UFRJ, não só dificilmente teria chegado ao fim sem a ajuda de uma porção de pessoas, como provavelmente nem seria iniciado sem o apoio destas, tanto na esfera acadêmica quanto fora dela. Mais do que isso, algumas me foram valiosas em ambas.

Gostaria de agradecer aos professores e ao orientadores - no sentido mais geral da palavra - Liu Hsu e Fernando Lizarralde, que me possibilitaram desenvolver este trabalho e cuja experiência foi sempre contundente ao apontar os caminhos. Agradeço a ambos pela amizade, paciência, pelo tempo dedicado a este projeto, pelos ensinamentos extremamente importantes no meu aprendizado, tanto no sentido técnico como acadêmico de maneira geral, além é claro de toda a descontração das conversas informais e não-técnicas, mas não menos necessárias, geradas pela convivência no laboratório. Juntos, me possibilitaram uma experiência única, construtiva e agregadora, que me possibilitaram crescimento e aprendizado pessoal e profissional. Além disso, agradeço ao professor Liu por ter sido o principal incentivador da minha vinda para a UFRJ e ao professor Fernando por ter ajudado a me despertar o interesse pela robótica durante sua disciplina.

Agradeço ao professor Ramon, não só pelos ensinamentos proporcionados pelas suas disciplinas, como pela convivência no laboratório. Mesmo que não tenhamos trabalhado juntos diretamente, pude absorver pequena parte de seu conhecimento e experiência, além de contribuir para o clima de amizade e cooperação do grupo.

Ao professor Paulo Pellanda, não só por ter aceito participar da minha banca, como pela cuidadosa leitura deste trabalho e pelas valiosas e consistentes sugestões prestadas.

Agradeço também aos professores Basílio, que me deu acesso ao espaço físico do seu laboratório nos primeiros meses do curso, enquanto eu cursava as disciplinas, onde fiz amizades e dispus de um ambiente agradável de estudo e interação; e Amit, cujas disciplinas foram extremamente importantes no meu aprendizado e crescimento técnico, pelo zelo em despertar nos seus alunos o interesse pelos assuntos e o desejo de aprender sempre mais.

Aos funcionários Calvet, pela convivência no laboratório e disposição em ajudar; e Danielle, pela paciência e praticidade com que me ajudou a resolver diversos

problemas burocráticos.

A todos os colegas do grupo, começando pelo Rodrigo cujo trabalho refletiu-se neste projeto, e em especial ao Toni, Priscilla, Paula, Gustavo, Lucas, Gabriel e Aurélio, pela companhia diária e amizade dentro e fora da UFRJ, pela ajuda e pelo apoio constante. A convivência e companhia proporcionada - mesmo nos momentos mais difíceis e desesperadores! - foi essencial para o andamento deste trabalho.

A todos os colegas de disciplina, em especial ao Thiago Madureira, com os quais dividi a dificuldade e o desespero inicial das disciplinas, com quem muito aprendi e cujas amizades pude carregar para o resto do curso de Mestrado e espero levar para a vida.

Ao amigo Karim Helayel, com quem dividi nestes dois anos idéias, experiência, conhecimento, conversas e risadas (especialmente), além, é claro, de um apartamento. Agradeço pela amizade inigualável e indescritível, pela paciência e tranquilidade quase idiossincráticas, pela compreensão e total apoio. A José Helayel, igualmente, pela prece e apoio constantes desde a minha chegada no Rio.

Agradeço aos meus amigos do Rio Grande do Sul que me visitaram nesse período e aos que apesar da distância souberam se manter presentes, especialmente às amigas Larissa e Sílvia; e aos amigos do Rio de Janeiro, cuja presença foi decisiva na minha adaptação e no desejo de permanecer aqui, especialmente às amigas Catia e Miriam.

Por último e mais importante, gostaria de agradecer a minha família. A meu pai, Orimar e Amara, pra mim um exemplos de profissionais, acadêmicos e professores, e que além dos conselhos valiosos, sempre me incentivaram a seguir estudando, mesmo nos momentos mais desesperadores, e que sempre acreditaram em mim, especialmente quando duvidei de mim mesmo. Agradeço a meu pai pelo exemplo e espelho de pesquisador que ele representa, desde que dei meus primeiros passos (em todos os sentidos); e à minha mãe, pelo exemplo e espelho de educadora. Se consegui escrever esta dissertação, foi porque ela me alfabetizou na minha infância, enquanto trabalhava na dela.

Aos meus irmãos, Deirdre e Damien, pelo apoio incondicional e por me surpreenderem a cada dia. Ter irmãos mais novos tão incríveis e brilhantes me motiva a reforçar o exemplo dos meus pais e a ir cada vez mais longe para instigá-los, pois sei que é questão de tempo até que me superem!

Aos demais parentes, pelo apoio, carinho, compreensão e entusiasmo com que encararam minha vinda para a UFRJ.

Por fim, agradeço a Deus. Certamente não teria mantido a calma e a serenidade nem achado a força e persistência necessárias pra chegar até aqui sem ajuda divina!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

RASTREAMENTO VISUAL E ESTABILIZAÇÃO DE PLATAFORMAS
INERCIAIS USANDO APENAS DUAS MEDIDAS DE SENSORES
GIROSCÓPICOS

Andrei Giordano Holanda Battistel

Março/2011

Orientadores: Liu Hsu
Fernando Cesar Lizarralde

Programa: Engenharia Elétrica

Plataformas inercialmente estabilizadas são sistemas utilizados em diversas áreas de engenharia para estabilizar e apontar câmeras, sensores ou armamentos colocados sobre uma base móvel, e.g. um robô ou veículo. A estabilização consiste em manter a linha de visada de um objeto invariante em relação ao referencial inercial (Terra), na presença de movimentos da base. Para atingir este objetivo, utilizam-se sensores capazes de obter a orientação da base e mecanismos atuados para corrigir a atitude do objeto a ser estabilizado.

Neste trabalho, realiza-se a estabilização de plataformas inerciais utilizando apenas duas medidas de sensores giroscópicos. Nesta condição, alguns movimentos externos não podem ser medidos, de forma que a compensação é feita sob certas restrições na característica destes. Consideram-se diferentes alternativas de alocação dos sensores e uma análise de sensibilidade é apresentada para a presença de movimentos não idealizados. Trata-se ainda o problema de apontamento, em que se deseja apontar para um alvo fixo, compensando movimentos translacionais. Aborda-se também o seguimento de um alvo móvel utilizando visão computacional.

Os algoritmos são verificados por simulação, o que permite uma avaliação da precisão da estabilização. São também apresentados resultados experimentais obtidos em laboratório numa plataforma que realiza movimentos similares aos de um veículo. São utilizados em simulação dados reais obtidos por um veículo instrumentado em um percurso típico para que se possa avaliar a precisão da estabilização em condições reais de operação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

VISUAL TRACKING AND PLATFORM STABILIZATION USING TWO GYROSCOPIC MEASURES

Andrei Giordano Holanda Battistel

March/2011

Advisors: Liu Hsu

Fernando Cesar Lizarralde

Department: Electrical Engineering

Inertially stabilized platforms are used in different engineering areas to stabilize and point cameras, sensors or weapons carried by a moving base, e.g. robots or vehicles. In the present dissertation, stabilization consists in keeping the desired line-of-sight unchanged relative to the inertial reference frame (the Earth) in spite of base motion. To achieve this goal, sensors are used to obtain the base orientation, and motor actuated mechanical assemblies are employed to correct the attitude of the object of interest.

In this work, platform stabilization is performed using the measurements of only two gyroscopic sensors. In this case, some external movements can not be measured. Hence, compensation is achieved only under a certain restrictions on the host vehicle motions. Different alternatives to allocate these sensors are considered and a sensitivity analysis to unmodelled motion is presented. The pointing problem is also discussed and consists on pointing the device to a desired target. In this case, translational motions should also be compensated. The problem of tracking a moving target using computer vision is also discussed. To this end, image processing techniques to identify points of interest in an image acquired by a camera are described.

The algorithms are verified by simulation, in order to evaluate the stabilization precision. Experimental results obtained in a platform whose movements are similar to those of a vehicle are presented. Real data obtained by an instrumented vehicle moving along a typical path are used in simulation to evaluate stabilization precision in real operational conditions.

Sumário

Lista de Figuras	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Princípios de Operação	3
1.3 Revisão Bibliográfica	4
1.4 Organização da Dissertação	8
2 Estabilização de plataformas utilizando apenas dois sensores giroscópicos	10
2.1 Formulação Geral do Problema	13
2.2 Estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com sensores no eixo externo	18
2.3 Estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com sensores no eixo interno	20
2.4 Estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com sensores no eixo externo	21
2.5 Estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com sensores no eixo interno	23
2.6 Erro nas medidas estimadas na presença de movimentos não idealizados de <i>roll</i> ou <i>yaw</i>	23
2.7 Considerações Finais	26
3 Uso de acelerômetros, apontamento e rastreamento	27
3.1 Apontamento usando acelerômetros	28
3.2 Rastreamento de alvos móveis	29
3.3 Estimação da orientação utilizando acelerômetros	30
3.4 Considerações Finais	30
4 Resultados de Simulação	32
4.1 Controle P-PI	33
4.2 Modelo Matemático	35
4.2.1 Identificação dos Motores	36
4.2.2 Caracterização da plataforma, ruídos e vibração nos sensores	42
4.3 Estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com modelo ideal	44

4.3.1	Sensores posicionados no eixo interno, medindo parcialmente	
	ω_{BL}	45
4.3.2	Sensores posicionados no eixo interno, medindo parcialmente	
	ω_{aL}	47
4.4	Estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com modelo completo	50
4.5	Estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com modelo completo	56
4.6	Avaliação dos efeitos das não-idealidades do sistema considerados de forma isolada	60
4.6.1	Erro na condição inicial da matriz de orientação C_{bL}	60
4.6.2	Erros inseridos pelas derivadas aproximadas	61
4.6.3	Erros inseridos pelas vibrações nos sensores	63
4.6.4	Presença de variação de <i>yaw</i> na estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i>	63
4.6.5	Presença de variação de <i>roll</i> na estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i>	65
4.7	Considerações Finais	67
5	Aspectos Práticos e Resultados Experimentais	70
5.1	Resultados experimentais para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i>	71
5.1.1	Experimento de estabilização do movimento de caturro, com balanço estático	71
5.1.2	Experimento de estabilização do movimento de balanço, com caturro estático	72
5.1.3	Primeiro experimento de estabilização dos movimentos de ba- lanço e caturro	75
5.1.4	Segundo experimento de estabilização dos movimentos de ba- lanço e caturro	78
5.2	Ensaio das malhas de controle dos motores de azimute e elevação	80
5.3	Perfis de pista obtidos com veículo instrumentado	83
5.4	Simulação da estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> utilizando os dados adquire- dos na pista	90
5.5	Considerações Finais	91
6	Seguimento de objetos utilizando visão	96
6.1	Rastreio visual baseado em cor	98
6.2	Rastreio visual por detecção de similaridades	103
6.3	Pré-Tratamento da Imagem	104
6.4	Resultados de Experimentais	106
6.4.1	Imagem de objeto simples em laboratório	107
6.4.2	Rastreio do efetuador de um manipulador robótico	108
6.4.3	Imagens de avião em vôo	115
6.5	Considerações Finais	124

7 Conclusões	125
7.1 Trabalhos Futuros	126
Referências Bibliográficas	127

Lista de Figuras

2.1	Alocação de sensores no eixo externo, estabilização indireta	11
2.2	Alocação de sensores no eixo interno, estabilização direta	11
2.3	Representação de ângulos de Euler XYZ, ou <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>	13
2.4	Sistemas de coordenadas utilizados	14
2.5	Ângulos de compensação e direção da linha de visada	15
2.6	Diagrama Bloco da estratégia de estabilização inercial proposta	18
3.1	Esquema de estabilização, apontamento e rastreamento	28
3.2	Esquema da modificação da linha de visada desejada de acordo com o movimento do veículo	28
4.1	diagrama de blocos do controlador P-PI	34
4.2	Diagrama de blocos do teste realizado	36
4.3	Entrada e saída do Sistema na condição de teste	37
4.4	Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de primeira ordem com entrada e saída de velocidade	38
4.5	Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com entrada e saída de velocidade	39
4.6	Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com entrada e saída de velocidade	40
4.7	Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com entrada de velocidade e saída de posição	41
4.8	Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com integrador com entrada de velocidade e saída de posição	42
4.9	a) Medida do sensor giroscópico para velocidade de balanço b) espectro normalizado da velocidade de balanço	43
4.10	a) Medida do sensor giroscópico para velocidade de caturro b) espectro normalizado da velocidade de caturro	44
4.11	leituras dos sensores nos canais de <i>roll/pitch</i> e <i>pitch/yaw</i>	45
4.12	Característica de <i>roll</i> e <i>pitch</i> utilizada em simulação	46

4.13	Ângulos de correção para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	46
4.14	Erro em radianos para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	47
4.15	Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	48
4.16	Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno	48
4.17	Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno	49
4.18	Sistema de coordenadas representando a orientação da extremidade em diferentes instantes de tempo	49
4.19	Ângulos de correção para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	50
4.20	Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	51
4.21	Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo externo	51
4.22	Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo externo	52
4.23	Ângulos de correção para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	52
4.24	Perfis de <i>roll</i> e <i>pitch</i> obtidos com o modelo real	53
4.25	Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	54
4.26	Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{aL} com giroscópios no eixo externo	54
4.27	Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{aL} com giroscópios no eixo externo	55
4.28	Erro em radianos para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com giroscópios no eixo externo	55
4.29	Orientação da extremidade em diferentes instantes de tempo para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com modelo real	56
4.30	Ângulos de correção para estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com giroscópios no eixo interno	57
4.31	Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com giroscópios no eixo interno	57
4.32	Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno	58

4.33	Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno	58
4.34	Erro em radianos para estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com giroscópios no eixo interno	59
4.35	Erro em radianos para estabilização de <i>pitch</i> e <i>yaw</i> com giroscópios no eixo interno reduzindo o intervalo de integração para <i>5ms</i>	59
4.36	Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno	60
4.37	Erro em radianos para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> com erro na condição inicial de orientação	61
4.38	Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno	62
4.39	a) Comparação entre velocidade angular de azimute $\dot{\alpha}$ medida e estimada e b) erro entre valor real e estimativa	62
4.40	a) Comparação entre velocidade angular de azimute $\dot{\gamma}$ medida e estimada e b) erro entre valor real e estimativa	63
4.41	a) Comparação entre ângulo de elevação γ medido com flexibilidade e real e b) ampliação da figura anterior	64
4.42	a) Erro no ângulo de elevação γ medido com flexibilidade	64
4.43	Comparação entre a velocidade angular ω_e calculada com a velocidade angular real ω_{aL}^z para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> na presença de variação de <i>yaw</i>	65
4.44	Comparação entre as componentes da velocidade angular da plataforma em relação ao inercial ω_{bL} para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> na presença de variação de <i>yaw</i>	66
4.45	Erro em radianos para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> na presença de variação <i>yaw</i>	66
4.46	Comparação entre a velocidade angular ω_e calculada com a velocidade angular real ω_{BL}^x para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> na presença de variação de <i>yaw</i>	67
4.47	Comparação entre as componentes da velocidade angular da plataforma em relação ao inercial ω_{bL} para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> na presença de variação de <i>yaw</i>	68
4.48	Erro em radianos para estabilização de <i>roll</i> e <i>pitch</i> na presença de variação <i>yaw</i>	68
5.1	medidas dos sensores giroscópicos <i>x</i> (superior) e <i>y</i> (inferior) para experimento com movimento de caturro e balanço constante	72

5.2	ângulos de <i>roll</i> (superior) e <i>pitch</i> (inferior) para experimento com movimento de caturro e balanço constante	73
5.3	ângulos de <i>roll</i> aumentado 30x e <i>pitch</i> para experimento com movimento de caturro e balanço constante	73
5.4	ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para experimento com movimento de caturro e balanço constante	74
5.5	erro em radianos para experimento com movimento de caturro e balanço constante	74
5.6	medidas dos sensores giroscópicos <i>x</i> (superior) e <i>y</i> (inferior) para experimento com movimento de balanço e caturro constante	75
5.7	ângulos de <i>roll</i> (superior) e <i>pitch</i> (inferior) para experimento com movimento de balanço e caturro constante	76
5.8	ângulos de <i>roll</i> e <i>pitch</i> aumentado 20x para experimento com movimento de balanço e caturro constante	76
5.9	ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para experimento com movimento de balanço e caturro constante	77
5.10	erro em radianos para primeiro experimento com movimento de balanço e caturro constante	77
5.11	medidas dos sensores giroscópicos <i>x</i> (superior) e <i>y</i> (inferior) para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro	78
5.12	ângulos de <i>roll</i> (superior) e <i>pitch</i> (inferior) para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro	79
5.13	ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro	79
5.14	erro em radianos para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro	80
5.15	ângulos de <i>roll</i> (superior) e <i>pitch</i> (inferior) para o segundo experimento com movimento de balanço e caturro	81
5.16	ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para o segundo experimento com movimento de balanço e caturro	81
5.17	erro em radianos para o segundo experimento com movimento de balanço e caturro	82
5.18	erro em radianos para o controle de azimute	82
5.19	erro em radianos para o controle de elevação	83
5.20	rumo medido pela unidade inercial ao longo do percurso	85
5.21	velocidade rumo medido pela unidade inercial ao longo do percurso	85
5.22	balanço medido pela unidade inercial ao longo do percurso	86
5.23	velocidade balanço medido pela unidade inercial ao longo do percurso	87
5.24	caturro medido pela unidade inercial ao longo do percurso	87

5.25	velocidade de caturro medido pela unidade inercial ao longo do percurso	88
5.26	<i>roll</i> e <i>pitch</i> para a) obstáculo simétrico e b) obstáculo assimétrico	88
5.27	espectro de frequência para sinal de velocidade de <i>pitch</i> a) obstáculo simétrico e b) obstáculo assimétrico	89
5.28	espectro de frequência para velocidade de rumo	89
5.29	espectro de frequência para sinal de velocidade de <i>roll</i> a) obstáculo simétrico e b) obstáculo assimétrico	90
5.30	erro nos ângulos de azimute e elevação	91
5.31	ângulos de azimute e elevação	92
5.32	<i>pitch</i> calculado e rumo medido sobrepostos	92
5.33	erro em radianos na linha de visada	93
5.34	comparação entre medida estimada e velocidades angulares reais	93
5.35	comparação entre <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i> calculados e medidos pelo sensor inercial	94
6.1	Representação da imagem, área de busca e par de janelamento	99
6.2	diagrama de blocos ilustrando os passos do algoritmo	101
6.3	imagem adquirida	102
6.4	a) imagem obtida após a separação da cor vermelha b) imagem após o <i>blur</i>	102
6.5	resultado final, mostrando o objeto identificado e o alvo posicionado	103
6.6	Efeitos de filtragem, a) imagem original, b) imagem com filtragem gaussiana, c) filtragem com ênfase nas bordas horizontais (<i>prewitt</i>), e d) filtro para intensificação de contraste (<i>unsharp</i>)	106
6.7	imagem onde se selecionou a assinatura visual	108
6.8	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	108
6.9	superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.8 e a imagem da Fig. 6.7	109
6.10	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	109
6.11	superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.10 e a imagem da Fig. 6.7	110
6.12	imagem onde se selecionou a assinatura visual	111
6.13	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	112
6.14	superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.15 e a imagem da Fig. 6.12	112
6.15	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	113
6.16	superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.17 e a imagem da Fig. 6.12	113
6.17	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	114

6.18	superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.13 e a imagem da Fig. 6.12	114
6.19	imagem onde se selecionou a assinatura visual	116
6.20	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	117
6.21	Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.20	117
6.22	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	117
6.23	Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.22	118
6.24	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	118
6.25	Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.24	119
6.26	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	119
6.27	Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.26	120
6.28	quadro posterior, onde a assinatura foi identificada	120
6.29	Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.26	121
6.30	imagem após o processamento pelo algoritmo de rastreamento por cor indicando a posição do alvo	121
6.31	passos intermediários do processamento de rastreamento por cor, imagem intensidade correspondente à faixa de vermelho selecionada (superior) e imagem após o <i>blur</i> (inferior)	122
6.32	imagem após o processamento pelo algoritmo de rastreamento por cor indicando a posição do alvo	122
6.33	passos intermediários do processamento de rastreamento por cor, imagem intensidade correspondente à faixa de vermelho selecionada (superior) e imagem após o <i>blur</i> (inferior)	123

Capítulo 1

Introdução

O problema de estabilização de plataformas é recorrente em diversas aplicações científicas, comerciais e militares. São aplicações comuns os casos onde se deseja, por exemplo, apontar sensores, câmeras, raios laser ou armamentos em uma dada direção de forma que esta seja mantida constante apesar dos movimentos da plataforma onde o objeto se encontra; ou então seguir com este objeto um alvo em movimento. Pode-se dizer, portanto, que este problema consiste em controlar a orientação da *linha de visada*, o vetor determinado pela direção para qual o equipamento a ser estabilizado aponta.

Um exemplo capaz de ilustrar bem esta idéia pode ser observado na natureza: o próprio cérebro humano desempenha exatamente esta mesma tarefa ao estabilizar a visão, isolando-a da influência de movimentos da cabeça. Utilizando o sistema vestibular, o cérebro humano obtém informações sobre sua orientação espacial e através dos músculos do olho consegue compensar movimentos externos a fim de manter o olhar fixo sobre um determinado ponto ou acompanhando uma trajetória. Esta analogia é inclusive utilizada em algoritmos de controle adaptativo para estabilização de câmeras em automóveis [10]. Para fins de comparação, pode-se entender o sistema vestibular como um conjunto de sensores, enquanto os músculos oculares desempenham o papel de atuadores. O controle é desempenhado pelo cérebro, capaz de interpretar a informação obtida pelo vestibulo e traduzí-la em movimentos musculares apropriados capazes de estabilizar a visão.

A idéia de plataforma inercialmente estabilizada muito se assemelha a este exemplo: trata-se de estruturas tipicamente mecatrônicas dotadas de sensores capazes de medir deslocamentos e velocidades angulares em relação ao referencial da Terra (dito inercial); e de conjuntos mecânicos capazes de corrigir a orientação do objeto a ser estabilizado.

A comparação de uma plataforma estabilizada com o sistema composto pelo vestibulo, cérebro e olho humanos pode ser explorada a fim de discutir ainda mais detalhes em relação à utilização destes sistemas. Na estabilização da visão humana:

1) há um limite na precisão obtida uma vez que há uma limitação na frequência máxima a qual o conjunto é capaz de compensar, de forma que na presença de movimentos demasiadamente bruscos a estabilização é perdida; 2) é possível seguir objetos em movimento mesmo quando sujeito a movimentos externos, distúrbios ou manobras intencionais; e 3) obtém-se informações de imagem que, processadas, "realimentam" o cérebro auxiliando na tarefa de seguir o alvo em questão.

Estes aspectos são comumente abordados durante o projeto de um sistema de estabilização de plataformas. A precisão do sistema está relacionada, por exemplo, ao tipo de aplicação, objeto que se quer estabilizar, qualidade dos sensores utilizados, dinâmica do veículo e da mecânica que efetua a compensação. A utilização de plataformas estabilizadas sobre veículos necessita da compensação de distúrbios, movimentos do veículo causados por irregularidades no terreno e até mesmo das manobras intencionais. E muitas aplicações buscam utilizar-se de imagens obtidas por câmeras para seguir um determinado objeto, compensando também o movimento deste.

Nas próximas seções, estas questões serão tratadas com mais detalhes, buscando apresentar aplicações específicas, assim como discutir de forma mais detalhada a implementação de sistemas de estabilização, tipos de sensores e atuadores, além de requisitos comuns de projeto. Em seguida, uma revisão bibliográfica é apresentada bem como os objetivos buscados por este trabalho e a organização deste documento.

1.1 Motivação

Plataformas estabilizadas vêm sendo estudadas há cerca de um século e desde então têm encontrado utilização em diversos tipos de veículos, incluindo navios, automóveis, robôs e até mesmo satélites, conforme [14]. Este mesmo autor observa que o próprio telescópio espacial Hubble é uma plataforma giro-estabilizada, projetada para manter a orientação de suas lentes constante dentro de uma precisão de 10 milissegundos de arco. Esta precisão, altíssima, permite focalizar astros distantes e obter imagens possíveis de serem ampliadas sem que se perca consideravelmente sua resolução e nitidez. Para fins de comparação, um sistema com estas características seria capaz de fotografar uma moeda a uma distância de mais de 300km [5].

Aplicações mais comuns podem ser encontradas na estabilização de

- câmeras em robôs, como por exemplo robôs submarinos (ROV's [15]), veículos aéreos não-tripulados (VANT's) ou automóveis [10], seja para fins de obtenção de imagens ou para navegação independente;
- sensores ou antenas, em aplicações de telecomunicações [21], [30];

- armamentos colocados sobre veículos militares, como blindados, navios ou aeronaves [11], [12];
- lentes em câmeras portáteis [14].

Em algumas destas aplicações, o uso de malhas de processamento de imagem é igualmente útil, especialmente quando se trata do apontamento de câmeras ou armamentos. Nestes casos, possibilidade de obter a posição de um objeto a partir de uma câmera e então apontar para um alvo além realizar a estabilização é extremamente interessante.

1.2 Princípios de Operação

O princípio de operação destes sistemas baseia-se, de acordo com o anteriormente citado, na compensação dos movimentos externos do veículo onde a plataforma é montada, a partir de informações de sua orientação. Tais informações são usualmente obtidas a partir de conjuntos de sensores giroscópicos e/ou acelerômetros.

Um sensor giroscópico mede a velocidade angular ao redor de um eixo em relação a um referencial inercial, em geral a Terra. Assim, para obter uma informação completa de orientação é necessário ao menos três sensores, um alinhado a cada eixo no espaço, sendo estes idealmente ortogonais entre si. Integrando-se estas velocidades, obtém-se a posição angular do corpo em relação ao sistema de coordenadas inercial. É muito comum representar esta informação através de ângulos de Euler, uma vez que assim se pode determinar completamente a orientação do corpo com apenas três variáveis a menos de uma configuração para a qual ocorre uma singularidade. Quando se trata de veículos, costuma-se empregar os ângulos de Euler comumente chamados de *roll*, *pitch* e *yaw*, ou balanço, caturro e rumo. Neste caso, a orientação para a qual ocorre a singularidade não faz parte das condições de operação do veículo.

Os sistemas de medição inerciais costumam ainda empregar além de giroscópios, sensores acelerômetros e/ou magnetômetros a fim de obterem uma estimativa robusta da orientação. Com um conjunto de três acelerômetros ortogonais, pode-se determinar a posição angular do corpo em dois graus de liberdade e, através de integrações, o deslocamento do corpo no espaço. Analogamente, combinando medidas de sensores magnéticos, pode-se estimar a orientação do corpo através do campo magnético terrestre.

No entanto, todos estes sensores apresentam não-idealidades em suas medições, como por exemplo ruídos, não-linearidades, erros de escala, *offset*, entre outros. Os sensores giroscópicos, por exemplo, apresentam erros de deriva que crescem indefinidamente com o tempo quando se efetua a integração de suas medidas. Em

função destas imperfeições, a combinação de diversos conjuntos de medidas através de uma fusão de dados pode oferecer estimativas mais robustas da orientação [13].

Uma vez conhecida a orientação, esta pode ser compensada através de estruturas mecânicas chamadas gimbals, estruturas compostas de motores e rolamentos capazes de estabilizar dois ou mais eixos, sendo assim necessário ao menos dois gimbals ortogonais para isolar completamente os movimentos da plataforma.

Neste trabalho, é considerada a estabilização de um gimbal genérico sobre um veículo (terrestre ou marítimo) e o equipamento executa giros em torno de dois eixos ortogonais, como se pode ver na Fig. 2.5. Esta formulação será discutida nas seções subsequentes, uma vez que se trata de uma estratégia recorrente na estabilização de plataformas [23].

Além do problema de estabilização, é de interesse a utilização de uma malha de seguimento de alvos utilizando algoritmos de servo-visão. Nesse caso, deseja-se, através do processamento de imagens obtidas por uma câmera, localizar um objeto qualquer no espaço e utilizar esta informação para realimentar o posicionamento do gimbal.

Diversos artigos sobre o problema de rastreamento visual são encontrados na literatura [40],[8],[3], [6], [19], [37] embora pouco se encontre sobre aplicações diretas em plataformas estabilizadas. Ainda, muitos destes algoritmos funcionam bem para câmeras estáticas tendo um desempenho pobre na presença de movimentos translacionais e rotacionais da câmera. Ao fim deste trabalho, discute-se o emprego de uma técnica de rastreamento visual ao problema de rastreamento (*tracking*) utilizando servo-visão.

1.3 Revisão Bibliográfica

Embora não seja um problema exatamente recente na literatura, plataformas estabilizadas ainda são tema de interesse em diferentes áreas. Uma prova de que o assunto ainda é relevante é a publicação de uma edição da *IEEE Magazine* em 2008 dedicada exclusivamente ao tema. Embora se tratem de artigos mais gerais sobre o tema, os trabalhos de [36], [14] e [28] apontam o estado da arte na área, além de abordar as principais aplicações, restrições e desafios presentes no projeto destes sistemas, fornecendo assim um bom ponto de partida para este estudo.

Em um dos artigos mais antigos sobre o tema [31], o problema de estabilização é apresentado no contexto onde se deseja estabilizar um emissor de raios laser. Para tal, discute-se o uso do gimbal de dois eixos de de um gimbal utilizando espelhos. O uso de espelhos no controle de equipamentos ópticos é empregado por exemplo em periscópios para submarinos [22], usualmente com o objetivo de aquisição de imagens.

A estabilização de câmeras encontra utilidade também em sistemas automotivos, como por exemplo objetivando viabilizar sistemas de auxílio a direção [10]. Trata-se de um problema interessante, uma vez que os sensores a serem empregados não podem ter custo muito elevado e se encontram restrições como uso de lentes de pequena abertura que possam ser posicionadas, por exemplo, nos retrovisores do veículo. Ainda, necessita-se de um desempenho compatível como tempo necessário para o processamento das imagens obtidas, tudo isto a um baixo custo e com dimensões reduzidas. No trabalho citado, utiliza-se um atuador na câmera de três graus de liberdade, proporcionando mobilidade completa.

Em contraponto, muitos sistemas de estabilização utilizam gimbals de apenas dois graus de liberdade [14]. Embora a mobilidade não seja completa, a combinação de um ângulo de azimute e um de elevação permite orientar a linha de visada em uma direção.

Em [21], os autores observam o aparecimento de problemas no apontamento de antenas em satélites decorrente da utilização de gimbals de dois eixos apenas que não são observados quando se dispõe de três graus de liberdade. No entanto, tais empecilhos ocorrem quando a linha de visada se aproxima da posição de zênite, posicionamento pouco requerido ou até restrito pela maioria das antenas.

Outras alternativas podem ser encontradas na literatura, como em [30] onde os autores apresentam um novo mecanismo de cadeia aberta, sob o diferencial de proporcionar uma melhor rigidez estrutural e precisão em relação aos gimbals ortogonais. Segundo aquele trabalho, trata-se de uma abordagem adequada especialmente para o apontamento de antenas.

No entanto, o atuador mais popular na literatura é provavelmente o gimbal de dois eixos ortogonais. Diversos autores trataram da modelagem dinâmica desta estrutura, como pode ser encontrado em [9], [27], [33] e [23].

Uma questão frequentemente abordada dentro deste tema é a alocação dos sensores e sua implicação no algoritmo de controle. Em [23], o autor distingue a estabilização entre *direta* e *indireta* de acordo com o posicionamento dos sensores para os casos onde são alocados diretamente na linha de visada ou na base do gimbal, respectivamente. Cabe notar que a simples mudança na alocação dos giroscópios leva a implicações interessantes. Quanto montado na linha de visada, isto é, no eixo externo do gimbal, onde se busca a estabilização, o controle é capaz de captar perturbações externas às quais este eixo é submetido. No entanto, esta escolha implica em aumento do tamanho do gimbal e da carga total a ser manobrada pela mecânica. Tal ponto é chave, por exemplo, em aplicações aeronáuticas de alto desempenho, onde a turbulência e a força de arrasto sofrida por uma estrutura maior pode ser bastante severa. Em contrapartida, o posicionamento dos sensores na base da plataforma relaxa as exigências sobre o peso suportado pela estrutura, mas deixa o desempenho

do sistema sujeito a perturbações não medidas. Outra desvantagem desta escolha é a complexidade maior nos cálculos para se referenciar as perturbações medidas na base no sistema de coordenadas da extremidade.

De posse de um algoritmo capaz de interpretar as medidas dos sensores de orientação e calcular os ângulos de correção necessários para comandar os atuadores, diversas técnicas de controle podem ser utilizadas. Em [23], por exemplo, um controlador tipo PI é empregado e gera um bom resultado em termos de precisão e desempenho. De fato, controladores do tipo PI são bastante discutidos neste contexto, seja como base de comparação para outras técnicas ou pelo uso de variantes, como em [25], onde se emprega um controlador tipo atraso- PI^2 .

Técnicas de controle robusto também são encontradas na literatura, como em [24], onde se aplica a técnica de controle H_∞ e compara-se com o controlador atraso-PI. Como resultado, um controle com boa estabilidade, rejeição a ruído e resposta temporal é obtido, embora os resultados obtidos como atraso-PI, mais simples, atendam aos requisitos de projeto.

Alguns autores empregam técnicas de controle por modos deslizantes com estrutura variável, como [11], este no contexto de estabilização de armamentos em navios. Os autores utilizam este método como forma de obter resultados melhores em relação ao controle PID bem como melhorar a robustez do sistema e rejeição a perturbações. Os mesmos autores aplicam também a idéia de *backstepping* ao mesmo problema em [12]. Técnicas parecidas são encontradas em [39], onde se usa ação integral no controle por modos deslizantes.

Outras estratégias de controle encontradas podem ser citadas, como controle ótimo; encontrado em [33], onde se utiliza controle linear quadrático LQG/LTR, e novamente, a comparação de desempenho é feita utilizando o controlador atraso-PI; controle tipo *Fuzzy* adaptativo, visto em [20], onde a técnica é utilizada junto com um PID. Como citado anteriormente, outra estratégia interessante é a apresentada por [10], onde se utiliza um algoritmo adaptativo baseado em um modelo neurológico. Este algoritmo adaptativo busca reproduzir o funcionamento do cérebro humano, capaz de adaptar seu controle para compensar efeitos como envelhecimento.

Alguns autores tratam o problema de apontamento, isto é, compensação de movimentos translacionais buscando manter não mais a linha de visada, mas sim apontada para um determinado alvo, como [2]. Para o problema de rastreamento (ou *tracking*), isto é, para seguir um determinado alvo, é comum empregar algoritmos de visão computacional para determinar a posição do objeto a ser seguido. Embora muitas destas fontes citem a utilização de processamento de imagem para seguimento de alvos, nenhuma delas trata deste problema diretamente. Os autores em [17] observam esta questão e apresentam um algoritmo para seguimento de imagem em uma câmera colocada em um avião, no entanto não consideram nenhum algoritmo

de visão computacional, apenas a forma como esta informação é utilizada.

Quando se trata do problema de visão computacional, uma série de trabalhos pode ser encontrada na literatura, utilizando diversas técnicas e visando diferentes aplicações. São exemplos os trabalhos de [8], onde se encontra um algoritmo utilizado para extração de informações de um ambiente selecionadas por um operador que as circula com o dedo diante de uma câmera. O algoritmo não só é capaz de identificar o dedo do operador como sua trajetória e orientação, além de empregar redes neurais em sua calibração de modo que o algoritmo pode ser rapidamente reconfigurado para usuários com diferentes tons de cor de pele.

Trabalhos ainda mais recentes podem ser encontrados, reforçando a relevância do tema, como em [37], onde se aborda o problema de rastreamento de um alvo em condições de oclusão deste, incluindo dificuldades causadas por mudanças de iluminação. Outro trabalho interessante considera o seguimento de alvos móveis onde se busca detectar múltiplos pontos de interesse, [19].

Para a aplicação no problema aqui considerado, o interesse é por estratégias mais simples e de baixo custo computacional, de forma que técnicas mais sofisticadas não serão abordadas. São artigos interessantes e abrangentes sobre o tema os trabalhos de [6] e [40] visto que ambos apresentam as principais técnicas de registro de imagens e fornecem uma vasta bibliografia sobre o assunto.

As aplicações para estes algoritmos de processamento de imagens são diversas, como sensoriamento remoto, visão robótica e até mesmo na medicina. Além disso, dentro destas aplicações são necessárias diferentes técnicas, uma vez que existem diferentes necessidades do tratamento de imagens.

Para o sensoriamento remoto, por exemplo, se aplicam algoritmos para mesclar um conjunto de imagens menores em um único panorama, isto é, são coletadas imagens de diversos pontos distintos para gerar uma visualização completa de uma área maior. Ou então quando se deseja monitorar as modificações de uma determinada área com o tempo, como desmatamentos ou ocupação humana; neste caso as imagens são obtidas em diferentes instantes de tempo e então comparadas. Outra utilidade está na combinação de imagens obtidas de diferentes sensores, como câmeras e radares, ou ainda na comparação de imagens aéreas ou de satélite com mapas.

Os autores de [40] resumem estas aplicações em quatro grupos principais de acordo com a maneira com a qual as imagens são obtidas, basicamente como exemplificado pelo problema de sensoriamento. São elas: i) análise multivisão, quando são adquiridas imagens de diferentes pontos; ii) análise multitemporal, quando as imagens são obtidas em diferentes instantes de tempo; iii) análise multimodal, quando são geradas por sensores de características distintas; e iv) comparação entre imagens e modelos, quando as imagens obtidas devem ser comparadas a modelos,

para fins de localização ou comparação.

Estas aplicações se repetem quando se trata de visão computacional, como quando se deseja obter uma forma a partir de sistemas de visão estéreo, onde a análise é multivisão uma vez que são utilizadas mais de uma câmera a fim de proporcionar uma visão tridimensional; seguimento de objetos móveis, onde as amostras são comparadas no tempo (análise multitemporal); ou comparação com modelos, como no caso de sistemas de inspeção de qualidade automática.

Na medicina, mais uma vez estes conceitos podem ser usados, como no estudo da evolução de uma determinada doença a partir de tomografias obtidas em diferentes instantes de tempo (análise multitemporal), ou na combinação de informações geradas por fontes diferentes, como ressonância magnética e ultrassom (análise multimodal).

Como comentado há pouco, o objetivo aqui é seguir um determinado objeto com uma câmera posicionada por um sistema de gimbals, utilizando para isso informações da imagem, de modo que o algoritmo de interesse deve ser pouco custoso computacionalmente. Uma classe de algoritmos bastante interessante para esta aplicação é apresentada em [3], utilizando uma medida da correlação para detecção de similaridades. Basicamente, consiste em comparar janelas da imagem original com uma assinatura, buscando o par para o qual há a maior correlação.

Este método foi empregado em [4] para um ensaio de rastreamento visual de um veículo aéreo não tripulado em vôo, onde se desejava reconhecer determinados objetos pré-selecionados em frames sequenciais de uma filmagem. O algoritmo é aplicado com sucesso, levando a bons resultados. Como se tratam de aplicações similares, isto é, processamento de câmeras móveis, possivelmente de baixa resolução e visando alvos possivelmente pequenos, esta metodologia pode ser considerada para aplicação de seguimento de objetos em plataformas estabilizadas.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação é composta de sete capítulos. No próximo capítulo, apresenta-se os algoritmos para estabilização de plataformas quando um conjunto incompleto de medidas é disponível, apenas duas medidas de sensores giroscópicos. Neste caso, considera-se restrições no movimento externo do veículo e mostra-se que é possível obter a orientação dentro destas premissas.

O capítulo seguinte discute utilização de acelerômetros, quando disponíveis, para compensação dos movimentos translacionais bem como para estimativa da orientação. Ainda, discute o cálculo da compensação de rastreamento.

No capítulo quarto, um modelo de uma plataforma real é apresentado, incluindo imperfeições e não-idealidades observadas experimentalmente. A partir daí, os con-

troladores e os algoritmos são empregados em simulações numéricas para diferentes condições de movimentação externa. A partir daí, obtém-se uma idéia do desempenho e da precisão possíveis de serem alcançados na prática.

No capítulo quinto, são apresentados resultados experimentais e aspectos práticos de implementação, incluindo dificuldades observadas nos testes e no emprego do sistema. Estes resultados são discutidos e comparados com o esperado pela análise matemática e pela predição por simulação.

O capítulo subsequente, o sexto, discute o problema de seguimento de um alvo móvel em uma plataforma estabilizada, utilizando informações de acelerômetros. Em seguida, o problema de seguimento usando servo-visão é discutido e um algoritmo é apresentado. Os resultados da técnica adotada são discutidos em nível de simulação.

Por fim, o capítulo sétimo retoma os aspectos discutidos e faz as considerações finais sobre o trabalho.

Capítulo 2

Estabilização de plataformas utilizando apenas dois sensores giroscópicos

O problema de estabilizar inercialmente uma plataforma é relativamente simples do ponto de vista de cálculo uma vez que a orientação desta plataforma seja conhecida - neste caso, é necessário calcular apenas os ângulos de correção que comandarão a posição do gimbal. Quando utiliza-se uma unidade inercial com conjunto completo de medidas, o cálculo destes ângulos é, por conseguinte, de relativa simplicidade.

No entanto, conforme comentado anteriormente, tais sensores são de elevado custo, especialmente em aplicações onde se busca uma precisão considerável. Para isto, desenvolveu-se uma série de algoritmos capazes de estabilizar uma plataforma utilizando apenas duas medidas de sensores giroscópicos, partindo-se do pressuposto que a movimentação externa à qual o veículo está sujeito contém algumas restrições. Neste capítulo, apresentaremos esta idéia bem como a estratégia utilizada para calcular os ângulos de correção necessários para efetuar a estabilização. Cabe notar, porém, que este capítulo trata apenas do cálculo ou determinação destes ângulos, deixando a estabilização propriamente dita - isto é, o controle dos motores que comandam os gimbals - ainda a ser abordada.

A representação da orientação utilizada neste trabalho é a de Ângulos de Euler XYZ, comumente adotada em sistemas de navegação como *Roll-Pitch-Yaw*, cujos ângulos são representados por ψ , θ e ϕ , respectivamente. A representação espacial desta escolha é de acordo com a Fig. 2.3. Os ângulos de correção do gimbal são referidos como azimute e elevação e representados por α e γ , segundo pode ser visto na Fig. 2.5.

São estudadas duas possibilidades de alocação dos sensores, conforme estes se situem no eixo externo ou no eixo interno do gimbal, casos estes também referidos

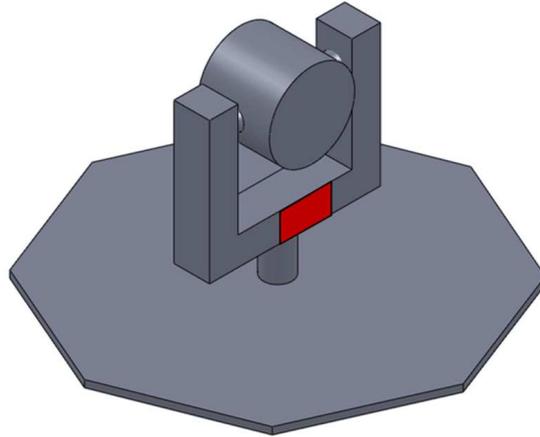


Figura 2.1: Alocação de sensores no eixo externo, estabilização indireta

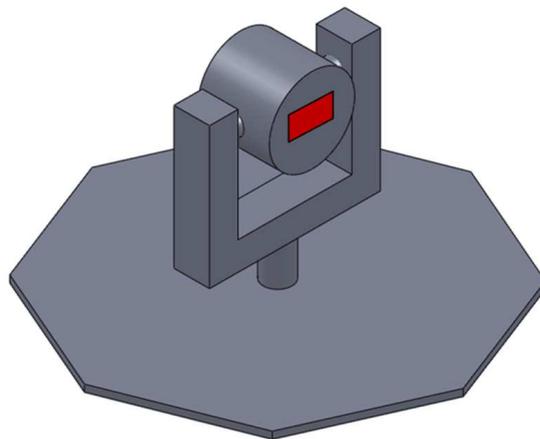


Figura 2.2: Alocação de sensores no eixo interno, estabilização direta

como estabilização *direta* e *indireta*. Como comentado, posicionar os sensores diretamente ou o mais próximo possível da direção a ser estabilizada permite uma melhor rejeição a perturbações, uma vez que todos os movimentos são medidos. Por outro lado, implica em um aumento no tamanho do gimbal e na carga a ser manipulada. Assim, em algumas aplicações, os sensores são preferencialmente colocados na base ou no eixo externo do gimbal, reduzindo o peso da estrutura ao custo de perdas no desempenho. Estas duas alternativas são ilustradas nas Figs. 2.2 e 2.1, onde se destaca a posição dos sensores.

Em termos de algoritmo, a distinção destes dois esquemas está nos cálculos necessários para representar as medidas nos sistemas de coordenadas. Conforme será exposto a seguir, a medida dos sensores é utilizada para calcular a orientação do corpo, e por isso precisa ser escrita no referencial da base da plataforma. Assim, é natural a necessidade de algoritmos distintos para cada situação.

Como apenas dois sensores giroscópicos são disponíveis, isto é, o movimento em

um dos graus de liberdade da plataforma não pode ser medido; algumas hipóteses adicionais devem ser levadas em consideração no desenvolvimento do controle. São elas:

Hipótese 1: Os movimentos translacionais do veículo não são compensados, apenas os rotacionais;

Hipótese 2: O *roll* e o *pitch* da plataforma devem ser conhecidos;

Hipótese 3: O veículo não deve apresentar velocidade angular em algum dos três eixos, isto é, deve ter *roll*, *pitch* ou *yaw* constante.

A primeira hipótese deve-se ao fato de os sensores medirem apenas velocidades angulares, de forma que com apenas esta informação não se pode obter o deslocamento linear do veículo e, portanto, não se pode compensá-lo. Para tal, faz-se necessário o emprego de acelerômetros - e ainda com certa dificuldade - uma vez que os sinais precisam ser integrados duas vezes, gerando erros de deriva.

Embora possa parecer que esta consideração por si só já insira erros no sistema, há um detalhe sutil que deve ser considerado: no problema de estabilização, ao invés de manter o sistema apontando para um alvo específico, busca-se mantê-lo apontando para uma direção fixa. Isto é, procura-se manter um vetor constante em respeito ao sistema inercial apesar dos movimentos do veículo. Desta forma, uma câmera posicionada na extremidade deste sistema não terá uma imagem estática devido ao movimento de arco da própria estrutura. Uma vez que o gimbal tem uma dimensão qualquer de altura, um movimento em sua base gera um movimento translacional em sua extremidade. Este movimento não é compensado, o vetor da linha de visada é mantido constante, mas não fixo a um ponto.

A segunda hipótese é melhor compreendida no contexto do algoritmo propriamente dito e será discutida. Basicamente, deve-se ao fato de haver uma integração relacionada à obtenção da posição angular a partir de uma informação de velocidade. Uma condição inicial diferente da real naturalmente insere erros no cálculo. Esta hipótese não é tão restritiva, já que tanto o *roll* como o *pitch* podem ser facilmente determinados (mesmo que de forma não muito precisa) por um conjunto de acelerômetros. Esta informação, mesmo que aproximada, é suficiente para um desempenho razoável do sistema, como será discutido posteriormente.

De fato, a hipótese mais importante das três estabelecidas é a terceira. Como são disponíveis medidas ao redor de dois eixos apenas, uma velocidade angular não pode ser medida e alguma consideração adicional deve ser feita sobre o movimento do veículo. Por exemplo, uma plataforma colocada sobre um veículo cujo rumo não varia pode ser estabilizada medindo-se apenas as velocidades nos eixos x e y . Intuitivamente, pode não ser tão óbvio que uma terceira medida possa ser descartada, uma

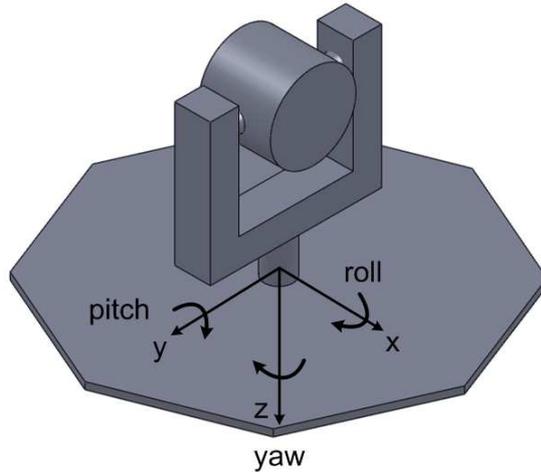


Figura 2.3: Representação de ângulos de Euler XYZ, ou *roll*, *pitch* e *yaw*

vez que um sensor colocado sobre o eixo z do veículo captaria alguma velocidade quando o sistema fosse submetido a algum *pitch* ou *roll*. No entanto, matematicamente é possível notar que a medida deste sensor hipotético é combinação linear das outras duas.

Consideramos aqui os casos onde o veículo não apresenta variações de *yaw*, ou rumo, e onde não apresenta variação de *roll*. Estas considerações são válidas quando se visa por exemplo a aplicação de uma plataforma sobre um navio de grande porte, cujo rumo varia pouco e muito lentamente. O caso de *roll* constante contempla uma viatura de grande porte, como por exemplo um blindado com esteiras, uma vez que se trata de uma estrutura rígida com pouco balanço.

Porém, é claro que esta hipótese não é perfeitamente satisfeita na prática, já que os movimentos do veículo apresentam algum acoplamento, e fatalmente serão observados ao menos pequenos movimentos de *yaw* ou *roll*. Os erros inseridos podem ser avaliados com dados reais de pista e serão discutidos nos capítulos subsequentes. Cabe notar também que esta é uma consequência dos requisitos de projeto: o custo evitado de um sensor adicional é reduzido sob pena de um pior desempenho, ou sob pena de um desempenho ruim em alguns cenários.

Os algoritmos para estabilização de plataformas em dois graus de liberdade são apresentados nas subseções 2.2 a 2.5. A seguir, a formulação geral do problema e as notações utilizadas são apresentados.

2.1 Formulação Geral do Problema

Primeiramente são definidos os seguintes sistemas de coordenadas de acordo com a Fig. 2.4.

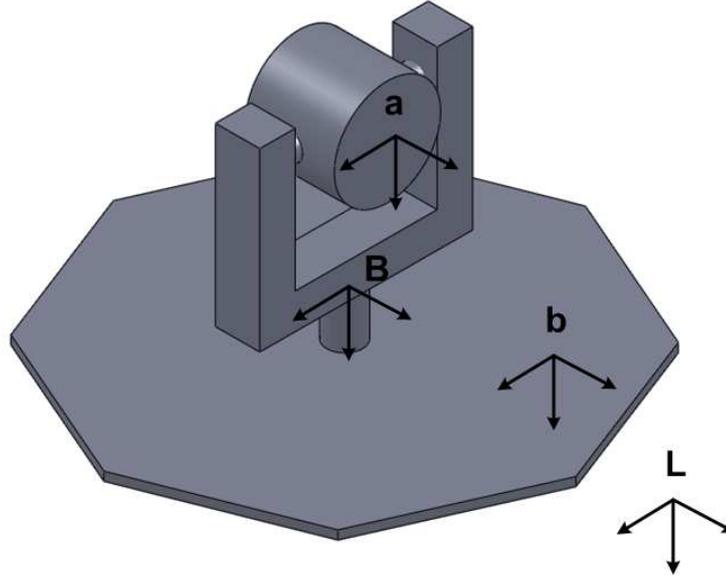


Figura 2.4: Sistemas de coordenadas utilizados

L: sistema de coordenadas inercial (ou *local level*)

b: sistemas de coordenadas do veículo

B: sistemas de coordenadas do eixo exterior do gimbal

a: sistemas de coordenadas do eixo interior ou extremidade, onde se localiza o binóculo/laser a ser apontado.

C_{ij} : $C_{ij} \in SO(3)$ é a orientação do sistema de coordenadas i com respeito ao sistema de coordenadas j

ω_{ij} : $\omega_{ij} \in \mathbb{R}^3$ é a velocidade angular do sistema de coordenadas i em relação ao sistema de coordenadas j representada no sistema de coordenadas i .

O problema pode ser colocado como o cálculo dos ângulos de conteira α e elevação γ , indicados na Fig. 2.5 a serem compensados por motores cujos eixos são posicionados nas direções x e z dos sistemas de coordenadas da Fig. 2.4. Assim, é possível manter a linha de visada da extremidade invariante em uma direção desejada, denotada aqui por $U_L^* \in \mathbb{R}^3$, em relação ao sistema de coordenadas inercial. A orientação do veículo em relação a este referencial inercial é dada pela seguinte matriz de orientação [32]:

$$C_{bL} = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi) \quad (2.1)$$

onde $C_{bL} \in SO(3)$; $R_i(k)$ é a rotação elementar ao redor do eixo i por um ângulo k [32]; ψ , θ e ϕ são os ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* do veículo, respectivamente. A

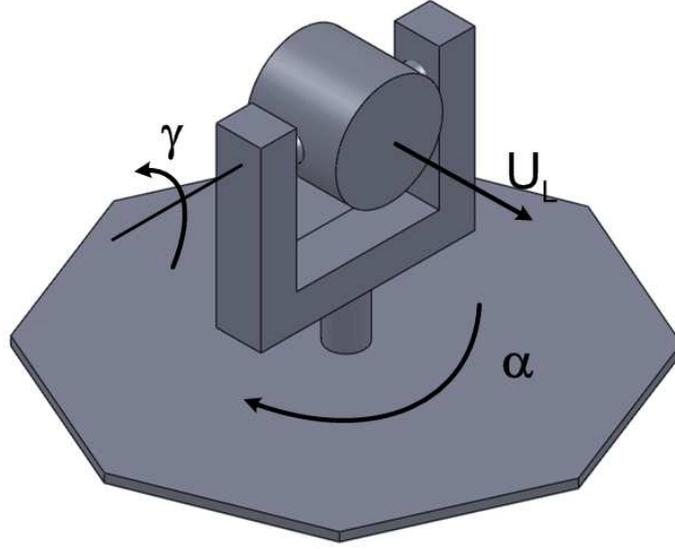


Figura 2.5: Ângulos de compensação e direção da linha de visada

linha de visada é dada em termos da orientação do veículo C_{aL} como,

$$C_{aL} = C_{bL}(\psi, \theta, \phi) R_z(\alpha) R_y(\gamma) \quad (2.2)$$

onde a linha de visada é a primeira coluna da matriz de orientação C_{aL} [38], i.e.,

$$U_L = C_{aL} e_x = C_{bL}(\psi, \theta, \phi) R_z(\alpha) R_y(\gamma) e_x \quad (2.3)$$

tendo $e_x^T = [1, 0, 0]$.

Considera-se que a linha de visada desejada U_L^* é especificada pelo operador no instante em que a estabilização da plataforma é ativada numa determinada orientação,

$$C_{aL}^* = C_{bL}(\psi^*, \theta^*, \phi^*) R_z(\alpha^*) R_y(\gamma^*) \quad (2.4)$$

onde ψ^* , θ^* , ϕ^* , α^* e γ^* são os valores dos ângulos no momento em que a estabilização é iniciada.

Desta forma, a linha de visada desejada é dada por:

$$U_L^* = C_{aL}^* e_x \quad (2.5)$$

O primeiro passo é determinar os ângulos de contêira α e elevação γ para os quais tem-se U_L alinhado com U_L^* , portanto, de (2.3) e (2.5), a seguinte igualdade tem que ser satisfeita,

$$C_{bL}(\psi, \theta, \phi) R_z(\alpha) R_y(\gamma) e_x = C_{aL}^* e_x \quad (2.6)$$

De (2.6), tem-se:

$$R_z(\alpha) R_y(\gamma) e_x = C_{bL}^T(\psi, \theta, \phi) U_L^* = U_b^* \quad (2.7)$$

onde U_b^* é o vetor que define a linha de visada no sistema de coordenadas do veículo (b).

Utilizando rotações elementares, pode-se obter a expressão para U_b^* sabendo que:

$$R_z(\alpha)R_y(\gamma) e_x = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ -\sin(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Por outro lado, considerando que

$$U_b^* = C_{bL}^T(\psi, \theta, \phi) U_L^* = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

tem-se que os ângulos de correção de conteira e elevação, α e γ , podem ser calculados como:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_2}{x_1}\right); \quad \gamma = \arcsin(-x_3) \quad (2.10)$$

No entanto, a matriz de orientação $C_{bL}(t)$ ainda não foi determinada, podendo ser calculada a partir da integração numérica da velocidade angular do veículo $\omega_{bL}(t)$ [16, 29]. Tem-se que, dada uma rotação angular infinitesimal $e^{\Delta t \hat{\omega}_{bL}(t)}$

$$C_{bL}(t + \Delta t) = C_{bL}(t) e^{\Delta t \hat{\omega}_{bL}(t)} \quad (2.11)$$

onde Δt é o intervalo de amostragem, e $\hat{\omega}_{bL} = \omega_{bL} \times$, sendo \times o produto vetorial. Lembrando que, dado um vetor $\omega^T = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]$, tem-se que:

$$\omega \times = \hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \hat{\omega} = -\hat{\omega}^T$$

A matriz $e^{\Delta t \omega_{bL}(t) \times}$ pode ser calculada utilizando a fórmula de Rodrigues [16]:

$$e^{\hat{\omega}_{bL} \Delta t} = I + \frac{\hat{\omega}_{bL}}{\|\omega_{bL}\|} \sin(\Delta\omega) + \frac{\hat{\omega}_{bL}^2}{\|\omega_{bL}\|^2} (1 - \cos(\Delta\omega)) \quad (2.12)$$

onde $\Delta\omega = \|\omega_{bL}\| \Delta t$.

Note que para poder calcular a orientação C_{bL} é necessário o conhecimento completo de ω_{bL} em cada instante de tempo t , como mostra a Eq. (2.11). De fato,

com um conjunto completo de medidas de giroscópios disponíveis, esta velocidade é diretamente obtida após uma mudança de coordenadas e o problema do cálculo de correção é resolvido de forma relativamente simples a partir da matriz de orientação C_{bL} . Sem perda de generalidade, considera-se que $C_{bL}(0) = I$ (I : matriz identidade).

Neste trabalho, considera-se a disponibilidade de dois sensores giroscópicos, sendo possível medir velocidades angulares em torno de dois eixos somente. A partir desta limitação, buscam-se formas de determinar as três componentes da velocidade do corpo, ω_{bL} de forma a ser possível escrever:

$$\omega_{bL} = A \omega_m + B \omega_e + D \dot{q} \quad (2.13)$$

$$\omega_e = K \omega_m + L \dot{q} \quad (2.14)$$

e conseqüentemente,

$$\omega_{bL} = (A + BK) \omega_m + (BL + D) \dot{q}$$

sendo $\omega_m \in \mathbb{R}^2$ as velocidades medidas, $\omega_e \in \mathbb{R}$ a velocidade não medida, portanto calculada, $q = [\alpha \ \gamma]^T$; e as matrizes $A \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$, $B \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $D \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$, $K \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ e $L \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$.

São utilizadas ainda duas hipóteses adicionais, sendo abordado a seguir dois casos distintos do controle de orientação da linha de visada: o de um veículo onde: (i) rumo é constante; e (ii) o *roll* é constante.

Para relacionar as variações de *roll*, *pitch* e *yaw* com a velocidades angular ω_{bL} do veículo em relação ao sistema inercial, utiliza-se o jacobiano da representação [16], conforme se segue:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sin(\psi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\psi)}{\cos(\theta)} \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 1 & \tan(\theta) \sin(\psi) & \tan(\theta) \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bL}^x \\ \omega_{bL}^y \\ \omega_{bL}^z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

No diagrama bloco da Fig. 2.6 é esquematizada a estratégia proposta de estabilização inercial. Nesta figura, os elementos do vetor de velocidades angulares medidas são denotados por ω_{m1} e ω_{m2} .

Os ângulos de correção α e γ calculados são então usados como sinais de referência no controle dos dois motores que efetuam essa correção. Este controle é realizado por meio de uma malha de controle. A referência dada é, portanto, uma posição angular.

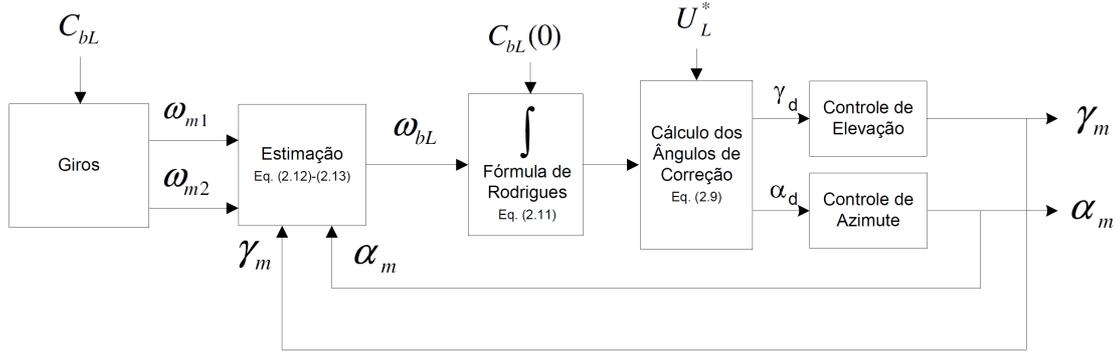


Figura 2.6: Diagrama Bloco da estratégia de estabilização inercial proposta

2.2 Estabilização de *roll* e *pitch* com sensores no eixo externo

A velocidade do veículo em relação ao sistema inercial pode ser obtida a partir das leituras dos giroscópios após uma mudança no sistema de coordenadas. De fato, é preciso corrigir a rotação de contera do próprio gimbal, uma vez que este movimento também se reflete na medição de ω_{BL} . Desta forma, podemos escrever:

$$\omega_{bL} = \omega_{bB} + C_{Bb}(\alpha) \omega_{BL} \quad (2.16)$$

onde que $\omega_{bB} = [0, 0, -\dot{\alpha}]$, e $C_{Bb} = R_z(\alpha)$. Assim, a Eq. (2.17) pode ser escrita como ¹:

$$\omega_{bL} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{BL}^x \\ \omega_{BL}^y \\ \omega_{BL}^z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Como dito anteriormente, a velocidade da luneta em relação ao sistema de coordenadas inercial, ω_{BL} não é completamente medida. Partindo deste pressuposto e da relação (2.15), temos quando $\dot{\phi} \equiv 0$:

$$\frac{\sin(\psi)}{\cos(\theta)} \omega_{bL}^y + \frac{\cos(\psi)}{\cos(\theta)} \omega_{bL}^z = 0$$

Desta forma, é possível escrever a componente z da velocidade angular do veículo

¹Aqui optou-se pela notação abreviada, onde s_α , c_α e tg_α representam $\sin(\alpha)$, $\cos(\alpha)$ e $\tan(\alpha)$, respectivamente.

em função da componente y .

$$\omega_{bL}^z = -\tan(\psi) \omega_{bL}^y \quad (2.18)$$

Convém notar que o *roll* pode ser calculado através da matriz de orientação C_{bL} , $\psi = \arctan(C_{bL}(3,2)/C_{bL}(3,3))$, sendo $C_{bL}(i,j)$ o elemento de C_{bL} na linha i e na coluna j . Ainda, cabe notar que apesar da presença de uma singularidade em (2.18) devido à função tangente; esta ocorre quando $\psi = \pi/2$, o que não representa uma restrição, uma vez que este quadro não faz parte das condições de operação do veículo. A partir das Eq. (2.17) e (2.18) pode-se perceber o fato de a componente ω_{bL}^y depender apenas das medidas de ω_{BL}^x e ω_{BL}^y .

Podemos obter a componente y da velocidade angular ω_{bL} em função das medidas de acordo com a Eq. (2.17):

$$\omega_{bL}^y = s_\alpha \omega_{BL}^x + c_\alpha \omega_{BL}^y \quad (2.19)$$

Conseqüentemente, podemos escrever a componente z em função das mesmas medidas, em decorrência da Eq. (2.18):

$$\omega_{bL}^z = -tg_\psi s_\alpha \omega_{BL}^x - tg_\psi c_\alpha \omega_{BL}^y \quad (2.20)$$

Este resultado pode ser colocado sob a forma da Eq. (2.13) com as seguintes matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha \\ s_\alpha & c_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} -tg_\psi s_\alpha \\ -tg_\psi c_\alpha \end{bmatrix}^T \quad (2.21)$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Assim, nota-se que através da Eq. (2.21) é possível determinar completamente a velocidade do veículo em relação ao referencial inercial a partir de duas medidas de sensores giroscópios posicionados ao longo dos eixos x e y quando o rumo é constante. Tal resultado é coerente uma vez que não há rotação do veículo ao redor do eixo z nesta condição.

2.3 Estabilização de *roll* e *pitch* com sensores no eixo interno

Quando as leituras são feitas na extremidade do gimbal, junto da câmara/laser, há mais uma rotação a ser considerada ao referenciar a velocidade medida no referencial do corpo devido ao ângulo de elevação utilizado na compensação. Assim, a velocidade do veículo deve ser reescrita como se segue. Note que agora a velocidade medida é ω_{aL} .

$$\omega_{bL} = \omega_{ba} + C_{ab}(\alpha, \gamma) \omega_{aL} \quad (2.23)$$

Tendo que $\omega_{ba} = [\dot{\gamma} \sin(\alpha), -\dot{\gamma} \cos(\alpha), -\dot{\alpha}]$, e

$$C_{ab}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\gamma) & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \sin(\gamma) \\ \sin(\alpha) \cos(\gamma) & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

A partir das Eq. (2.15), (2.18) e (2.23) é possível escrever:

$$\omega_{bL}^z = -tg_{\psi}(-\dot{\gamma}c_{\alpha} + s_{\alpha}c_{\gamma}\omega_{aL}^x + c_{\alpha}\omega_{aL}^y + s_{\alpha}s_{\gamma}\omega_{aL}^z)$$

Sabendo que ω_{bL}^z é função de ω_{aL}^z de acordo com (2.23-2.24), podemos obter uma expressão para a componente z da velocidade do veículo e em seguida escrever a medição ω_{aL}^z como:

$$\omega_{aL}^z = \frac{\dot{\alpha} - \dot{\gamma}tg_{\psi}c_{\alpha}}{\Delta_1} - \frac{s_{\gamma} - tg_{\psi}s_{\alpha}c_{\gamma}}{\Delta_1}\omega_{aL}^x + \frac{-tg_{\psi}c_{\alpha}}{\Delta_1}\omega_{aL}^y \quad (2.25)$$

onde $\Delta_1 = c_{\gamma} + tg_{\psi}s_{\alpha}s_{\gamma}$.

Assim, podemos colocar este resultado na forma (2.13) com as seguintes matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} c_{\alpha}c_{\gamma} & -s_{\alpha} \\ s_{\alpha}c_{\gamma} & c_{\alpha} \\ -s_{\alpha} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} c_{\alpha}s_{\gamma} \\ s_{\alpha}s_{\gamma} \\ c_{\gamma} \end{bmatrix}, \quad K = \frac{1}{\Delta_1} \begin{bmatrix} -tg_{\psi}s_{\alpha}c_{\alpha} + s_{\gamma} \\ -tg_{\psi}c_{\alpha} \end{bmatrix}^T \quad (2.26)$$

$$L = \frac{1}{\Delta_1} \begin{bmatrix} 1 & tg_{\psi}c_{\alpha} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & s_{\alpha} \\ 0 & c_{\alpha} \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Deste modo, a velocidade do veículo em relação ao referencial inercial pode ser totalmente determinada a partir de duas medições apenas. Pela Eq. (2.25) pode-se

notar que neste caso também há a presença de uma singularidade, desta vez quando $\gamma = \pi/2$. No entanto, esta condição corresponde à linha de visada apontando para cima, totalmente na vertical. Novamente, este caso não pertence às condições de operação do veículo. Note que como a componente ω_{bL}^z é calculada com base nas medições de ω_{BL}^x e ω_{BL}^y , os sensores giroscópicos devem ser colocados em uma posição coerente com esta consideração, medindo as velocidades angulares ao redor dos eixos x e y .

2.4 Estabilização de *pitch* e *yaw* com sensores no eixo externo

Neste caso, considera-se que o rumo pode variar enquanto o *roll* é mantido constante, sendo necessário estabilizar apenas as variações de *pitch* e *yaw*. Esta condição é compatível com o movimento de uma viatura ou uma embarcação rápida e de menor porte, como uma lancha. Utilizaremos mais uma vez a equação (2.15), rescrita aqui por conveniência:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sin(\psi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\psi)}{\cos(\theta)} \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 1 & \tan(\theta) \sin(\psi) & \tan(\theta) \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bL}^x \\ \omega_{bL}^y \\ \omega_{bL}^z \end{bmatrix}$$

A partir deste Jacobiano e da condição de *roll* constante podemos obter a seguinte relação:

$$\omega_{bL}^x = -\tan(\theta) (\sin(\psi) \omega_{bL}^y + \cos(\psi) \omega_{bL}^z) \quad (2.28)$$

Novamente serão consideradas as duas configurações de medição através dos giroscópios, tanto para leituras feitas na luneta quanto na extremidade do gimbal.

Para estabilização de *pitch* e *yaw*, são medidas as rotações ao redor dos eixos y e z . De acordo com a Eq. (2.13) temos:

$$\omega_m = \begin{bmatrix} \omega_{BL}^y \\ \omega_{BL}^z \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

e consequentemente:

$$\omega_e = \omega_{BL}^x \quad (2.30)$$

Assim como no caso de estabilização de *roll* e *pitch* para medição na luneta, podemos referenciar a velocidade medida no referencial do corpo através da Eq. (2.17), repetida aqui:

$$\omega_{bL} = \omega_{bB} + C_{Bb}(\alpha) \omega_{BL}$$

Podemos então relacionar as componentes y e z de ω_{bL} com as medidas ω_{BL}^y e ω_{BL}^z :

$$\omega_{bL}^y = s_\alpha \omega_{BL}^y + c_\alpha \omega_{BL}^x \quad (2.31)$$

$$\omega_{bL}^z = -\dot{\alpha} + \omega_{BL}^z \quad (2.32)$$

Substituindo as expressões de ω_{bL}^y e ω_{bL}^z na Eq. (2.28), obtemos:

$$\omega_{bL}^x = -tg_\theta (s_\psi (s_\alpha \omega_{BL}^x + c_\alpha \omega_{BL}^y) + c_\psi (-\dot{\alpha} + \omega_{BL}^x)) \quad (2.33)$$

Extraindo ω_{bL}^x também da Eq. (2.17) e substituindo em (2.33), chegamos a uma expressão a partir da qual é possível isolar ω_{BL}^x :

$$c_\alpha \omega_{BL}^x + s_\alpha \omega_{BL}^y = -tg_\theta (s_\psi (s_\alpha \omega_{BL}^x + c_\alpha \omega_{BL}^y) + c_\psi (-\dot{\alpha} + \omega_{BL}^x)) \quad (2.34)$$

Assim, isolando ω_{BL}^x é novamente possível determinar completamente as velocidades angulares ω_{bL} a partir das medidas de ω_{BL}^y e ω_{BL}^z .

$$\omega_{BL}^x = \frac{-tg_\theta c_\alpha + s_\alpha}{\Delta_2} \omega_{bL}^y - \frac{tg_\theta c_\psi}{\Delta_2} \omega_{bL}^z + \frac{tg_\theta c_\psi \dot{\alpha}}{\Delta_2} \quad (2.35)$$

onde $\Delta_2 = c_\alpha + tg_\theta s_\psi s_\alpha$.

Para escrever na forma matricial da Eq. (2.13) são necessárias as seguintes matrizes:

$$A = \frac{1}{\Delta_2} \begin{bmatrix} -s_\alpha & 0 \\ c_\alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} c_\alpha \\ s_\alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \quad K = \frac{1}{\Delta_2} \begin{bmatrix} -tg_\theta s_\psi c_\alpha + s_\alpha \\ -tg_\theta c_\psi \end{bmatrix}^T \quad (2.36)$$

$$L = \frac{1}{\Delta_2} [tg_\theta c_\psi \quad 0], \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.5 Estabilização de *pitch* e *yaw* com sensores no eixo interno

Para o caso em que as medições são feitas na extremidade do gimbal, a relação a ser utilizada é da Eq. (2.24), de forma idêntica ao caso da seção 2.2, repetida abaixo:

$$\omega_{bL} = \omega_{ba} + C_{ab}(\alpha, \gamma) \omega_{aL}$$

Repetindo o procedimento realizado para os itens anteriores, chegamos a uma expressão da forma (2.13) utilizando as seguintes matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} -s_\alpha & c_\alpha s_\gamma \\ c_\alpha & s_\alpha s_\gamma \\ 0 & c_\gamma \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\gamma \\ s_\alpha c_\gamma \\ -s_\alpha \end{bmatrix}, K = \frac{1}{\Delta_3} \begin{bmatrix} -tg_\theta s_\psi c_\alpha + s_\alpha \\ -tg_\theta s_\psi s_\alpha s_\gamma - c_\alpha s_\gamma - tg_\theta c_\psi c_\gamma \end{bmatrix}^T \quad (2.38)$$

$$L = \frac{1}{\Delta_3} \begin{bmatrix} tg_\theta c_\psi & (tg_\theta s_\psi c_\alpha + s_\alpha) \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & s_\alpha \\ 0 & -c_\alpha \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

onde $\Delta_3 = c_\alpha c_\gamma + tg_\theta s_\psi s_\alpha c_\gamma - tg_\theta s_\gamma c_\psi$.

Observe que assim como no caso da seção 2.5 há uma singularidade para $\gamma = \pi/2$. Novamente, este caso não representa uma restrição por não fazer parte das condições de operação do veículo. De forma análoga à situação anterior, a componente ω_{bL}^x é calculada com base nas medições de ω_{aL}^y e ω_{aL}^z , e desta vez os sensores giroscópicos devem ser colocados em uma posição diferente daquela de seção 2.2. Os giroscópios devem medir as velocidades em torno dos eixos y e z , naturalmente.

2.6 Erro nas medidas estimadas na presença de movimentos não idealizados de *roll* ou *yaw*

Uma das hipóteses sob as quais os algoritmos aqui apresentados são aplicáveis consiste em restringir o movimento externo da plataforma a dois graus de liberdade apenas, como já discutido. É interessante, porém, avaliar a magnitude do erro na presença de movimentos não idealizados, isto é, qual o erro na medida estimada na estabilização de *roll* e *pitch* quando há presença de variações de *yaw*; ou, similarmente, qual o impacto de uma variação de *roll* na estabilização de *pitch* e *yaw*.

Este erro pode ser avaliado voltando-se à Eq. 2.15 onde se supôs $\dot{\phi} \equiv 0$ ou $\dot{\psi} \equiv 0$ e considerar estas grandezas não nulas e desconhecidas. Para o caso da estabilização

de *roll* e *pitch* com sensores alocados no eixo externo, por exemplo, tem-se que a medida estimada ω_e é uma estimativa para ω_{BL}^z dada por:

$$\omega_e = -tg_\psi s_\alpha \omega_{BL}^x - tg_\psi c_\alpha \omega_{BL}^y + \dot{\alpha} \quad (2.40)$$

Utilizando a inversa do Jacobiano da representação, pode-se expressar ω_{bL} em função das velocidades de *roll*, *pitch* e *yaw*:

$$\begin{bmatrix} \omega_{bL}^x \\ \omega_{bL}^y \\ \omega_{bL}^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & 0 & 1 \\ \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) & 0 \\ \cos(\phi) \cos(\theta) & -\sin(\psi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

A partir desta expressão, se obtém a expressão para a velocidade ω_{BL}^z que se quer estimar:

$$\omega_{BL}^z = \cos(\psi) \cos(\theta) \dot{\phi} - \sin(\psi) \dot{\theta} + \dot{\alpha} \quad (2.42)$$

O erro na estimativa é portanto a diferença entre o estimado e o real e pode ser obtido em função ψ , θ , ϕ e derivadas.

$$\Delta\omega_{BL}^z = \omega_e - \omega_{BL}^z = -\frac{\cos(\theta)}{\cos(\psi)} \dot{\phi} \quad (2.43)$$

O erro no cálculo da velocidade angular da plataforma em relação ao sistema de referência inercial pode ser calculado comparando-se a velocidade ω_{bL} real com aquela calculada pelo algoritmo para um ω_e com erros. Após alguma manipulação algébrica, obtém-se:

$$\tilde{\omega}_{bL} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\cos(\theta)}{\cos(\psi)} \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Note que, neste caso, apenas uma componente da velocidade angular da plataforma em relação ao inercial é prejudicada pelos erros ocasionados pela movimentação de *yaw*, sendo justamente a velocidade ao redor do eixo z .

Repetindo-se o procedimento para estabilização de *roll* e *pitch* com sensores no eixo interno, o resultado para o erro de estimativa é:

$$\Delta\omega_{aL}^z = -\frac{\cos(\theta)}{\cos(\gamma) \cos(\psi) + \sin(\psi) \sin(\alpha) \sin(\gamma)} \dot{\phi} \quad (2.45)$$

E, então, para a velocidade calculada, tem-se:

$$\tilde{\omega}_{bL} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos(\alpha) \sin(\gamma) \cos(\theta)}{\cos(\gamma) \cos(\psi) + \sin(\psi) \sin(\alpha) \sin(\gamma)} \dot{\phi} \\ -\frac{\sin(\alpha) \sin(\gamma) \cos(\theta)}{\cos(\gamma) \cos(\psi) + \sin(\psi) \sin(\alpha) \sin(\gamma)} \dot{\phi} \\ -\frac{\cos(\theta) \cos(\gamma)}{\cos(\gamma) \cos(\psi) + \sin(\psi) \sin(\alpha) \sin(\gamma)} \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Note que neste caso todas as componentes da velocidade angular ω_{bL} são afetadas pelo erro de medida, em função do posicionamento do sensor que pode estar desalinhado da base em função dos ângulos de azimute e elevação. É interessante observar também que para α e γ nulos, este resultado recai no anterior.

Repetindo-se para a estabilização de *pitch* e *yaw* com sensores no eixo externo, o erro na medida estimada é:

$$\Delta\omega_{bL}^x = -\frac{\cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha)} \dot{\psi} \quad (2.47)$$

Naturalmente, agora o erro passa a ser função da variação de *roll*. Note também que quando se tem α nulo o erro é a própria variação de *roll*. Isto é compreensível, visto que neste caso o sensor se encontra idealmente alinhado com o eixo y , de modo que a medida a ser estimada é a velocidade ao redor do eixo x do referencial da plataforma, correspondendo portanto à velocidade de *roll*. O erro na velocidade angular calculada, é, por conseguinte:

$$\tilde{\omega}_{bL} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos(\alpha) \cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha)} \dot{\psi} \\ -\frac{\sin(\alpha) \cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha)} \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Neste caso, um erro de estimativa não afeta apenas o cálculo da componente ω_{bl}^z da velocidade da plataforma em relação ao inercial, o que é também esperado já que esta medida é diretamente determinada pelo sensor giroscópico. Quando se tem α e γ nulos, apenas a componente ω_{bl}^x é afetada, justamente pelo valor de $\dot{\psi}$.

Para o último caso, isto é, para a estabilização de *pitch* e *yaw* com sensores no eixo interno, o erro na medida estimada é:

$$\Delta\omega_{aL}^x = -\frac{\cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha) \cos(\gamma) - \sin(\theta) \sin(\gamma) \cos(\psi)} \dot{\psi} \quad (2.49)$$

Este erro tem as mesmas características do anterior, isto é, vale $\dot{\psi}$ quando não há azimute nem elevação. Para a velocidade angular, o resultado é parecido, exceto pelo

fato de que agora todas as componentes de ω_{bL} são afetadas pelo erro na medida.

$$\tilde{\omega}_{bL} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha) \cos(\gamma) - \sin(\theta) \sin(\gamma) \cos(\psi)} \dot{\psi} \\ -\frac{\sin(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha) \cos(\gamma) - \sin(\theta) \sin(\gamma) \cos(\psi)} \dot{\psi} \\ \frac{\sin(\gamma) \cos(\theta)}{\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\psi) \sin(\alpha) \cos(\gamma) - \sin(\theta) \sin(\gamma) \cos(\psi)} \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas os algoritmos utilizados no cálculo dos ângulos de correção necessários para estabilizar a linha de visada, objetivando a estabilização com duas medidas de sensores giroscópicos apenas.

É interessante notar que mesmo com a falta de medidas a estabilização pôde ser alcançada, supondo-se restrições no movimento externo do veículo. Para o caso onde esta restrição não é satisfeita, obteve-se o erro nas medidas estimadas e nas velocidades angulares calculadas, servindo como uma estimativa do desempenho perante condições não-ideais.

Uma extensão deste trabalho é utilizar este resultado para o cálculo do erro no cálculos dos ângulos de compensação ou até mesmo na linha de visada. No entanto, cabe notar que este resultado não é simples de ser obtido, uma vez que a velocidade calculada deve ser integrada, como indicam as Eq. 2.12 e 2.11, e esta é composta de funções relativamente complicadas. Além disso, tanto o cálculo dos ângulos de correção quanto da linha de visada é feito utilizando funções trigonométricas inversas, como mostram as Eq. 2.10, de modo que as etapas do cálculo encadeiam funções não-lineares cujos argumentos contêm outras funções não-lineares.

Outro agravante pode ser observado na Eq. 2.9, onde se observa que os ângulos de correção dependem da linha de visada desejada U_L^* , de modo que isto torna o cálculo analítico ainda mais complicado.

Uma questão que também vale a pena ser investigada é o caso das singularidades presentes na estabilização de *pitch* e *yaw*. No caso da estabilização de *roll* e *pitch*, viu-se que as singularidades ocorrem em configurações que não fazem parte da operação do veículo, o que pode não ocorrer para o caso de *pitch* e *yaw*.

Capítulo 3

Uso de acelerômetros, apontamento e rastreamento

No Capítulo 2 foram discutidas as técnicas utilizadas para cálculo dos ângulos de correção para a estabilização da plataforma. No entanto, estes foram apresentados em um contexto estático, onde a dinâmica da plataforma não é considerada. Ainda assim, compensam-se apenas as rotações do objeto estabilizado, de forma que não houve a preocupação em compensar translações ou seguir um determinado objeto.

Para a compensação dos movimentos translacionais são necessários sensores adicionais, como por exemplo acelerômetros, uma vez que os giroscópios captam apenas velocidades angulares. Neste caso, as acelerações devem ser integradas duas vezes a fim de obter o deslocamento linear.

No caso do *tracking* utilizando visão, a informação do erro em pixels é suposta conhecida e utilizada na correção da linha de visada necessária para seguir um determinado objeto. As técnicas para obtenção da posição do objeto utilizando processamento de imagens são discutidas no Capítulo 6, enquanto uma análise mais detalhada do problema de servovisão robótica pode ser encontrado no livro [35].

O diagrama de blocos representando o sistema completo, englobando os controles de *pointing*, *tracking* e estabilização pode ser visualizado na Fig. 3.1, a exemplo do encontrado em [24]. Neste mesmo trabalho, o autor observa que o desempenho dos sistemas de apontamento e rastreamento depende da performance da malha de estabilização, motivo pelo qual se dedica mais atenção a esta. Tal observação é consistente, uma vez que se bem estabilizada, a plataforma pode ser considerada estática, demandando uma menor atividade das outras malhas.

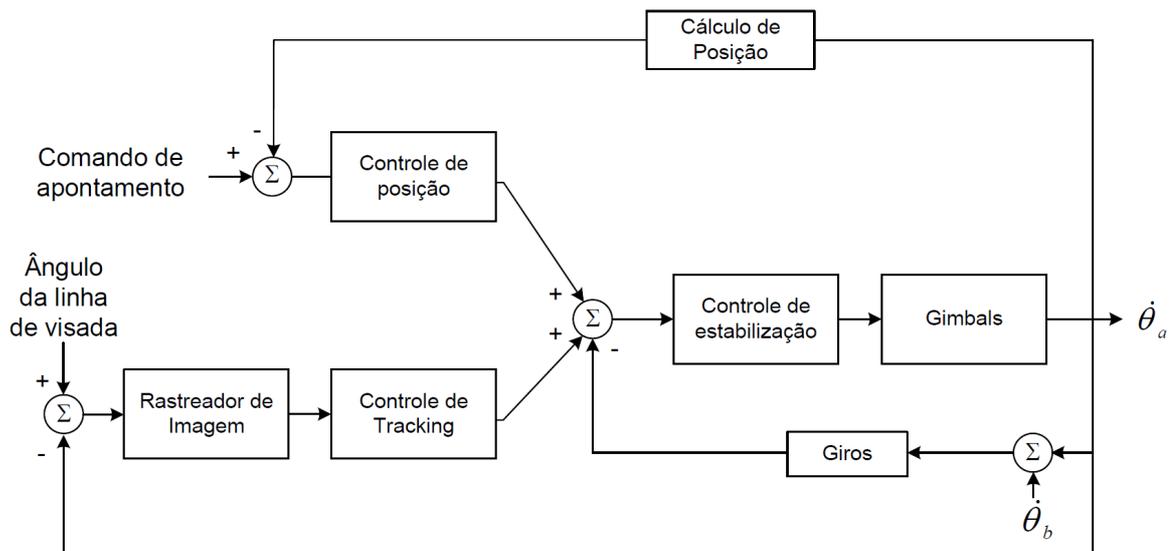


Figura 3.1: Esquema de estabilização, apontamento e rastreamento

3.1 Apontamento usando acelerômetros

Até então, os algoritmos apresentados preocupam-se apenas com a compensação dos movimentos rotacionais do veículo onde a plataforma será utilizada. Para que se possa compensar também a translação do navio, faz-se necessária a disponibilidade de medidas de acelerômetros, a fim de detectar a magnitude dos deslocamentos.

Este problema difere do anterior, uma vez que agora se busca fixar a linha de visada em um ponto onde se encontra o alvo. Uma forma de realizar esta compensação é alterar a linha de visada desejada de acordo com os movimentos do veículo. Para tal, a posição do alvo é considerada conhecida.

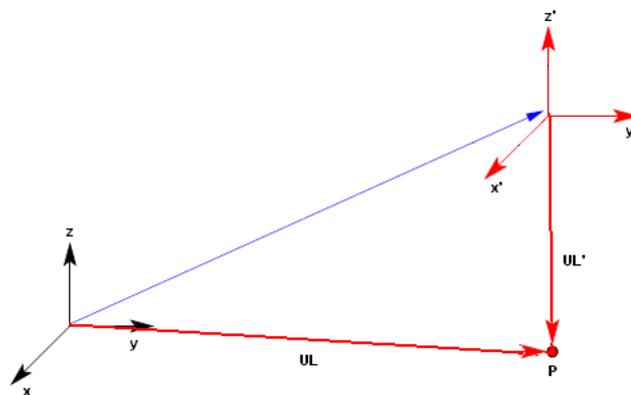


Figura 3.2: Esquema da modificação da linha de visada desejada de acordo com o movimento do veículo

Supondo um deslocamento $d = [x_d \ y_d \ z_d]$, a nova linha de visada pode ser calculada como:

$$U'_L = U_L^* + d \quad (3.1)$$

Este deslocamento pode ser obtido a partir dos dados dos acelerômetros, excluindo-se a parcela devida à aceleração da gravidade, que pode ser determinada conhecendo-se a orientação da plataforma. A aceleração a ser utilizada é denotada por $A = [A_x \ A_y \ A_z]$ e corresponde a:

$$\begin{aligned} A_x &= a_x - g \sin(\theta) \\ A_y &= a_y + g \cos(\theta) \sin(\psi) \\ A_z &= a_z + g \cos(\theta) \cos(\psi) \end{aligned} \quad (3.2)$$

As componentes A_x , A_y e A_z são integradas duas vezes, resultando no deslocamento a ser compensado.

3.2 Rastreamento de alvos móveis

O problema de seguir um objeto com uma câmera em uma plataforma estabilizada pode ser tratado como um problema de servo-visão robótica. Na maioria dos trabalhos existentes na literatura e previamente citados, este problema é tratado de forma breve sugerindo um controle desacoplado de cada um dos graus de liberdade da plataforma, conforme observa [17]. Nesse trabalho, os autores propõem um controle mais sofisticado sob o argumento de que para ângulos de elevação mais próximos de 90° o desempenho obtido com a estratégia comum é pobre; além de buscar aplicações utilizando algoritmos de visão computacionalmente mais pesados cujo tempo de processamento é razoavelmente superior ao da malha de estabilização apenas.

Aqui, trataremos o problema de *tracking* visual utilizando a idéia mais simples. Primeiramente, porque o sistema de interesse não deve utilizar ângulos de elevação muito altos, e, além disso, considera-se que as imagens são tratadas a cada intervalo de processamento do algoritmo de estabilização. No entanto, o estudo de algoritmos mais precisos de *tracking* é sem dúvida interessante para futuras investigações.

Basicamente, conhecendo-se o erro em pixels, é possível calcular a posição do objeto, supondo que este se encontra a uma distância conhecida. Assim, o vetor da linha de visada é corrigido pela soma destes erros nas coordenadas y e z , visto que

em x se encontra a profundidade entre câmera e alvo ¹.

$$U'_L = U_L^* + [0 \ e_y \ e_z] \quad (3.3)$$

onde e_y e e_z são as componentes y e z do erro entre a linha de visada e o alvo.

3.3 Estimação da orientação utilizando acelerômetros

Os acelerômetros também podem ser usados na estimação dos ângulos de *roll* e *pitch* da plataforma, uma vez que combinando suas medidas é possível determinar a vertical local. Quando são colocados três acelerômetros, alinhados com os eixos x, y e z , as leituras para uma condição de *roll* ψ e *pitch* θ serão:

$$a_x = g \sin(\theta) \quad (3.4)$$

$$a_y = -g \cos(\theta) \sin(\psi) \quad (3.5)$$

$$a_z = -g \cos(\theta) \cos(\psi) \quad (3.6)$$

onde g é o valor da aceleração escalar da gravidade suposto conhecido. Assim, o *roll* e o *pitch* podem ser calculados como se segue:

$$\psi = \text{atan2}(a_y, a_z) \quad (3.7)$$

E usando a relação $\cos(\theta) = \sqrt{1 - (a_x/g)^2}$:

$$\theta = \text{atan2}(a_x/g, \sqrt{1 - (a_x/g)^2}) \quad (3.8)$$

As medidas de *roll* e *pitch* assim obtidas podem ser utilizadas na estimação da orientação juntamente com aquelas obtidas pelos sensores giroscópicos. Para isto, deve-se recorrer a um método de fusão de dados, como por exemplo o Filtro de Kalman [1], [18].

3.4 Considerações Finais

Os tópicos apresentados neste capítulo vêm a acrescentar a análise realizada para estabilização de forma a completar o sistema, agregando agora as tarefas de apontamento e seguimento. Uma vez dispondo de uma boa estabilização, as tarefas de

¹a suposição onde se considera o plano de imagem ortogonal à linha de visada da câmera a uma dada distância focal e que permite usar apenas estas duas coordenadas para localizar o ponto é chamada *pinhole assumption*

apontamento e de seguimento de um alvo podem ser mais facilmente desempenhadas, de forma que se considera a câmara ou laser como praticamente estático. Aqui estes assuntos foram abordados a fim de fornecer uma visão global dos problemas de estabilização, apontamento e seguimento como um conjunto, sendo o foco principal a estabilização. Diversos trabalhos tratam estes temas com maior profundidade, como [2] e, mais recentemente, [34].

A utilização dos acelerômetros também é interessante, uma vez que se pode melhorar a estimativa da orientação, conforme comentado, além de possibilitar a compensação de deslocamentos translacionais. Dois pontos devem ser salientados, porém: a qualidade dos acelerômetros é importante no desempenho do apontamento, uma vez que as medidas devem ser integradas duas vezes. Assim, ruídos causando um valor médio no sinal levarão a erros ilimitados. Para a estimação da orientação, porém, os acelerômetros podem ser menos precisos, uma vez que utilizando a fusão de dados se pode dar um peso mais baixo para as medidas menos precisas.

Um exemplo desta utilidade é na correção de erros de deriva dos giros, cuja integração pode levar também a erros ilimitados. Uma aplicação deste problema utilizando Filtro de Kalman Estendido Híbrido para aeronáutica é encontrada em [7].

Capítulo 4

Resultados de Simulação

Tanto os algoritmos de cálculo da estabilização utilizando dois sensores para determinação da orientação do corpo abordados no capítulo 2 quanto os algoritmos de controle discutidos no capítulo 3 foram apresentados através de uma abordagem teórica, sem uma análise de seus respectivos desempenhos.

O objetivo da discussão do capítulo 2 foi apresentar os conceitos envolvidos e a idéia por trás do desenvolvimento dos algoritmos, bem como pormenorizar os cálculos que permitem determinar a orientação C_{bL} dispondo de um conjunto reduzido de sensores; além de abordar os problemas de singularidades envolvidos. No entanto, o algoritmo é tratado de forma estática.

No capítulo 3, a parte dinâmica da estabilização é abordada. Especificamente, tratou-se o controle dos motores que executam a compensação de azimute e elevação, estes calculados pelo algoritmo. Discutidas as técnicas a serem abordadas, os controles foram projetados a fim de permitir certas características de desempenho.

Assim, neste capítulo busca-se simular o comportamento do sistema como um todo, unindo algoritmo e controle em uma só malha. São utilizados modelos para os sensores giroscópicos, para os motores e para o movimento externo da plataforma de testes, considerando-se ainda os erros relacionados a questões como o cálculo numérico.

O movimento externo da plataforma utilizado em simulação é especificado a fim de coincidir com o que será utilizado experimentalmente, visando uma melhor comparação de resultados. Para obter uma noção do melhor comportamento que o sistema pode alcançar, as primeiras simulações utilizam um modelo ideal. Isto é, não são considerados ruídos nos sensores, imperfeições mecânicas, erros numéricos e todas as hipóteses estabelecidas no capítulo 2 são perfeitamente satisfeitas.

Como se trata de uma simulação, todas as variáveis envolvidas são disponíveis, e isto permite uma comparação entre os dados ditos *reais* e as *medições*. Nos referiremos como dados reais aos dados sintéticos, isto é, àqueles dados estabelecidos na simulação como variáveis reais. Por exemplo, podemos assumir uma diferença entre

a velocidade *real* do motor com uma velocidade *medida*, podendo haver discrepâncias entre ambas devido a erros de medição. Isto é bastante útil para avaliar a precisão dos cálculos da velocidade angular da plataforma em relação ao inercial, ou da orientação, por exemplo. Como os valores esperados (reais) são conhecidos, podem ser facilmente comparados com aqueles que seriam obtidos pelo algoritmo na implementação.

Nos experimentos, serão testados apenas a estabilização direta de *roll* e *pitch*, isto é, com os sensores posicionados no eixo interno; e a estabilização indireta de *pitch* e *yaw*, com os sensores posicionados no eixo externo. Naturalmente, os algoritmos empregados são os das seções 2.3 e 2.4. Por isso, a simulação com modelos reais só contemplará estes dois casos. A fim de realizar uma comparação entre algoritmos para o mesmo tipo de problema, apresenta-se a simulação no caso ideal para estabilização de *roll* e *pitch* para as duas condições de alocação de sensores. Estes resultados não são repetidos para o problema de estabilização de *pitch* e *yaw* porque os resultados são extremamente similares em termos de desempenho. Este caso será abordado apenas na simulação com modelo completo, para posicionamento dos sensores no eixo externo.

O modelo utilizado busca cobrir imperfeições causadas por ruídos nos sensores, erros numéricos, erros na condição inicial de orientação (Hipótese 2), presença de movimentos indesejados na plataforma de testes e vibração nos sensores. Além disso, consideram-se condições em que a Hipótese 3 (capítulo 2) não é satisfeita. Isto é, considera-se a presença de variações de *yaw* na *roll* e *pitch*, e de *roll* na estabilização de *pitch* e *yaw*. Com isto, pretende-se avaliar o impacto dessas não-idealidades no desempenho global do sistema.

São detalhados a seguir alguns dos procedimentos realizados para obtenção de um modelo mais preciso, como por exemplo os resultados da identificação realizada nas malhas dos motores e caracterização da plataforma de testes. Em seguida são apresentados os resultados de simulação para as condições ideais e considerando estas imperfeições. Por fim, avaliam-se separadamente a influência das principais não-idealidades no desempenho final da estabilização.

4.1 Controle P-PI

Para as simulações aqui apresentadas, o controle utilizado será do tipo Proporcional-Proporcional-Integral, ou P-PI. Este controle corresponde a uma malha interna de velocidade, do tipo PI, com uma malha externa de posição com controle proporcional, conforme mostra a Fig. 4.1.

Uma maneira de sintonizar este controlador é ajustar a sintonia do controle PI de velocidade para obter uma resposta rápida e em seguida ajustar o proporcional

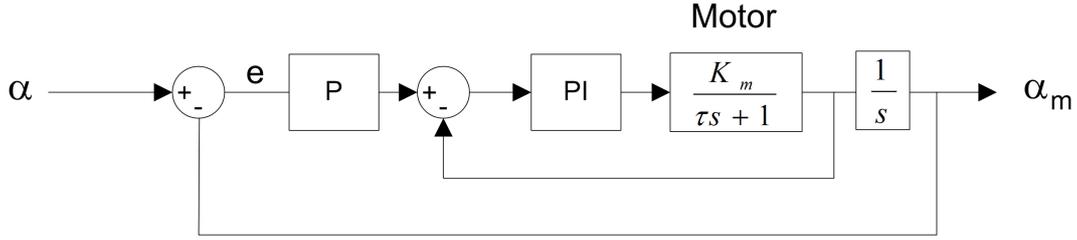


Figura 4.1: diagrama de blocos do controlador P-PI

de posição para reduzir o erro de seguimento. Esta estratégia é interessante uma vez que há uma restrição para o erro máximo na estabilização, erro este que depende diretamente do erro de controle.

Outra alternativa viável é utilizar o PI de velocidade para cancelar o pólo do motor. Dado um motor com ganho K_m e constante de tempo τ , tem-se a seguinte função de transferência de posição para velocidade:

$$G(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} \quad (4.1)$$

Sendo o PI da forma:

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (4.2)$$

Escolhendo-se $K_I = K_P/\tau$, chega-se à seguinte forma para associação em série:

$$G_{OL}(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} \left(K_P + \frac{K_P}{s} \right) = \frac{K_m K_P}{\tau s} \quad (4.3)$$

Que em malha fechada, resulta em um sistema de primeira ordem na malha de velocidade:

$$H(s) = \frac{K_m K_P}{\tau s + K_m K_P} \quad (4.4)$$

Esta alternativa leva a uma simplificação da dinâmica da planta, restando apenas a escolha do ganho proporcional da malha de posição. No entanto, o problema desta escolha é que normalmente a constante de tempo τ não é conhecida de forma exata, podendo levar a um cancelamento imperfeito.

Porém, a plataforma onde são realizados os experimentos possui uma opção de *auto-tunning*, onde os ganhos do controle PI são calculados com base em um pequeno experimento automático. Na seção , o modelo dos motores foi identificado já com a malha de controle PI de velocidade, e se observou que os melhores modelos obtidos são justamente de primeira ordem.

Este resultado leva a crer que a rotina de auto sintonia busca cancelar o pólo do

motor da forma apresentada. Além disso, esta é uma alternativa viável de sintonia para um sistema de primeira ordem, como é o caso do motor quando se considera entrada e saída como velocidades.

Na seção 4.2, onde é tratado o modelo do sistema, realiza-se a identificação dos modelos dos motores com base em experimentos realizados na própria planta, após o procedimento de auto sintonia do controlador PI de velocidade. Esta etapa é importante para estudo do sistema em nível de simulação, uma vez que permite reproduzir nesta um erro de controle muito próximo daquele observado no sistema real. Assim, se pode obter uma melhor estimativa do desempenho final do sistema.

4.2 Modelo Matemático

Para obter resultados mais próximos da realidade, uma série de fatores foram considerados na modelagem do sistema. Além de obter informações sobre a dinâmica deste, como constantes de tempo e ganhos dos motores empregados, algumas não-idealidades foram acrescentadas a fim de prover uma simulação com maior grau de realismo.

Observou-se na plataforma experimental a presença de vibrações na caixa onde os sensores são alocados, de forma que ao movimentar-se, o gimbal provocava um movimento vibratório nos sensores e induzia erros na medida. Algumas medidas corretivas foram tomadas no sentido de tornar a estrutura mais rígida e reduzir o impacto deste efeito, porém, ainda assim, a presença de tais vibrações foi acrescentada ao modelo.

Outra não-idealidade interessante foi detectada através da instrumentação da plataforma com sensores giroscópicos. Embora o movimento especificado pelo algoritmo seja composto de senóides puras, na prática são observadas frequências harmônicas de amplitude relevante tanto em *roll* como em *pitch*. As principais frequências foram identificadas e também adicionadas à simulação.

Quanto aos sensores, foi acrescido às medidas destes um ruído branco caracterizado de acordo com o observado em dados experimentais. Na maior parte das simulações, considera-se um ruído de valor médio nulo, uma vez que nos experimentos este desvio é corrigido para evitar erros de deriva durante as integrações.

Os modelos dos motores foram identificados com base em experimentos feito na própria planta. A seção 4.2.1 é dedicada ao detalhamento do procedimento adotado para obter estes modelos, bem como discutir sua validação.

É considerada ainda a possibilidade de desalinhamento entre a orientação tomada como inicial e a orientação inicial real, a fim de avaliar o impacto de uma má aproximação; e também os erros numéricos de integração no cálculo da orientação com base nas medidas dos sensores. Por fim, a simulação considera que, assim como

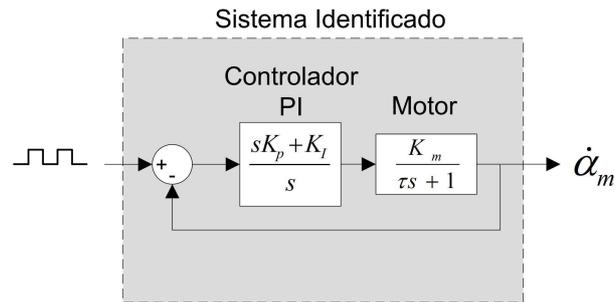


Figura 4.2: Diagrama de blocos do teste realizado

no sistema real, as velocidades dos motores não são disponíveis, sendo medidas apenas as posições. Para tal, utiliza-se uma derivada aproximada, que também pode introduzir erros.

4.2.1 Identificação dos Motores

Para simular o comportamento do gimbal, foram realizados testes na plataforma experimental a fim de identificar o modelo dos motores utilizados. O procedimento adotado consiste em aplicar uma forma de onda quadrada ao comando de velocidade e a partir da velocidade medida na saída aproximar o sistema compreendido pelo motor e o controlador PI da malha de velocidade, como pode ser visto na Fig. 4.4. Tal procedimento foi adotado uma vez que o driver dos motores empregados possui um recurso de auto-sintonia para a malha interna através de um pequeno ensaio. O uso desta facilidade é interessante uma vez que os modelos não precisam ser recalculados a cada modificação na carga mecânica do gimbal. Assim, quando é necessário alterar a estrutura ou modificar o objeto a ser posicionado, basta repetir o procedimento de sintonia.

Os comando de velocidade e a saída medida são vistos na Fig. 4.3, sendo estes os dados tratados e utilizados nas identificações.

Os dados obtidos foram processados utilizando o Toolbox Ident do MATLAB, aproximando-se o sistema por um modelo em função de transferência. Diversos resultados podem ser obtidos neste procedimento, uma vez que é possível estipular a ordem do modelo a ser aproximado, sendo por isso interessante a análise de diferentes alternativas. De posse de um modelo identificado, é possível verificar sua consistência e o quão bem ele descreve o sistema, utilizando para isso parte dos dados experimentais disponíveis.

Assim, adotou-se a seguinte metodologia, de acordo com o sugerido na documentação do próprio Toolbox [26]: Os dados obtidos experimentalmente são divididos em dois grupos, um utilizado para a identificação e outro para a validação e são retirados os valores médios. Em seguida, aproximam-se os dados pelas seguintes

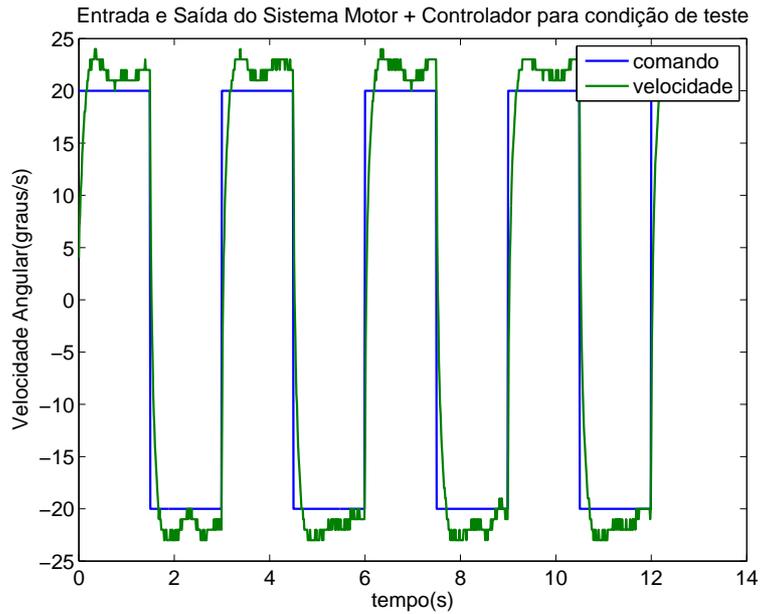


Figura 4.3: Entrada e saída do Sistema na condição de teste

funções de transferência:

- Primeira ordem, com comando de velocidade e saída de velocidade;
- Segunda ordem, com comando de velocidade e saída de velocidade;
- Segunda ordem com atraso, com comando de velocidade e saída de velocidade;
- Segunda ordem, com comando de velocidade e saída de posição;
- Segunda ordem com integrador, com comando de velocidade e saída de posição;

O objetivo de utilizar todas estas aproximações é verificar qual delas representa melhor o sistema e obter uma justificativa para adoção de um modelo em específico. São fatores a serem analisados o coeficiente de ajuste, ou "fit" calculado pelo toolbox conforme a Eq. 4.5, de acordo com [26], as margens de confiança, e a comparação entre a resposta simulada e a medida. Os resultados são mostrados a seguir.

$$fit = 100 \frac{1 - \|y_h - y\|}{\|y - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i\|} \quad (4.5)$$

onde y_h é a saída simulada do modelo obtido, y a saída medida, e n é o número de amostras, uma vez que as variáveis são tratadas em tempo discreto.

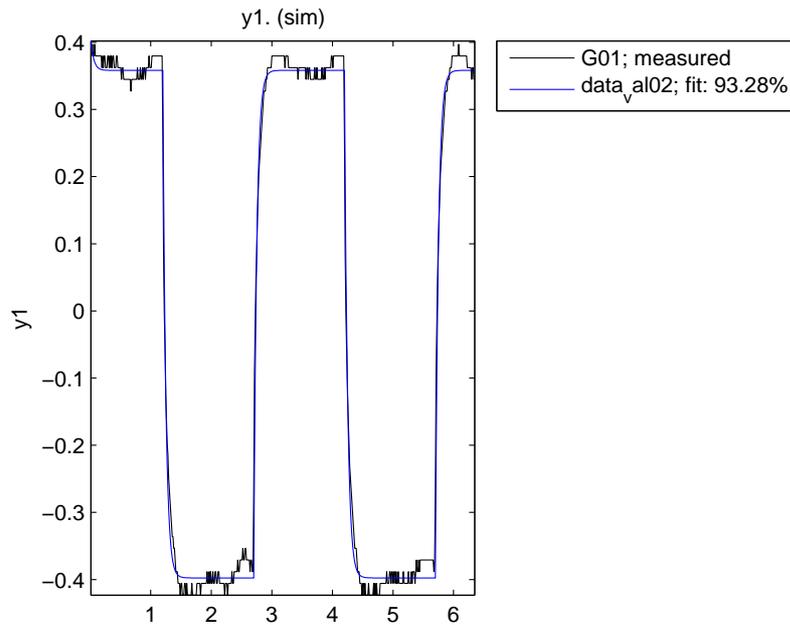


Figura 4.4: Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de primeira ordem com entrada e saída de velocidade

Modelo de primeira ordem, com comando de velocidade e saída de velocidade

Utilizando o modelo de primeira ordem para entrada e saída de velocidade, a função de transferência obtida é:

$$G(s) = \frac{1.0826}{1 + 0.0483s} \quad (4.6)$$

Este modelo apresentou um coeficiente de ajuste superior a 93%, valor considerado muito bom. De fato, observada a comparação entre as duas respostas, a medida e a simulada, se vê uma grande semelhança, mostrando que o comportamento principal do sistema está sendo representado pelo modelo, conforme a Fig. 4.4

Note que mesmo que o sistema compreendido pelo motor mais o controlador PI interno seja de ordem superior a um, um bom resultado foi obtido quando a aproximação de primeira ordem foi utilizada.

Modelo de segunda ordem, com comando de velocidade e saída de velocidade

Utilizando o modelo de segunda ordem para entrada e saída de velocidade, a função de transferência obtida é:

$$G(s) = \frac{1.093}{(1 + 0.066526s)(1 + 0.001s)} \quad (4.7)$$

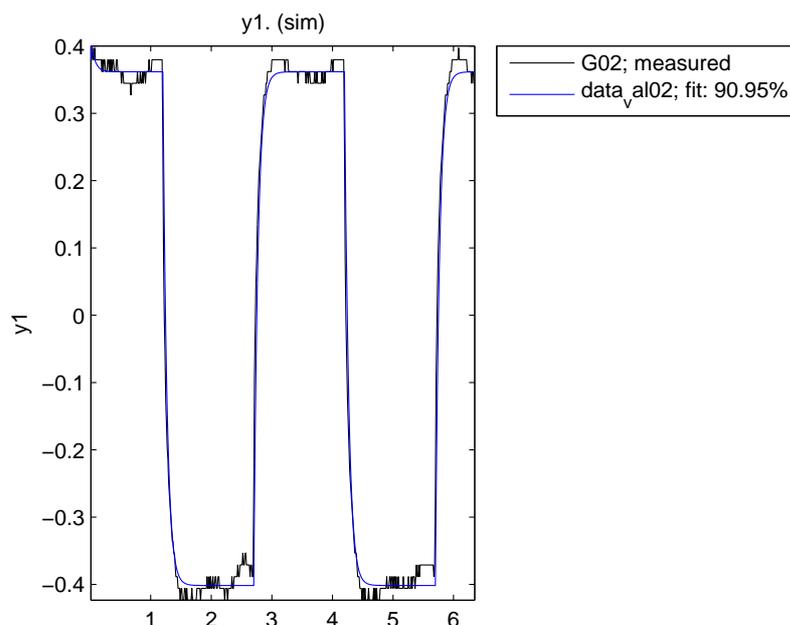


Figura 4.5: Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com entrada e saída de velocidade

A saída obtida pelo modelo identificado é mostrado na Fig. 4.5 juntamente com a saída medida obtida no experimento. Nota-se pela semelhança entre as curvas que o modelo é capaz de descrever bem o comportamento do sistema. No entanto, o coeficiente de ajuste para este modelo é de cerca de 90%, inferior ao anterior.

Note que neste caso, apesar de o modelo de segunda ordem ser teoricamente mais próximo do sistema real, o coeficiente de ajuste obtido foi menor do que o caso anterior. Comparando-se as funções de transferência, nota-se que em ambas os ganhos e o pólo dominante são bastante próximos. Neste caso, porém, forçando a aproximação de segunda ordem, um dos pólos obtidos localiza-se muito distante, sendo razoável deconsiderar sua influência na dinâmica do sistema.

Modelo de segunda ordem com atraso, com comando de velocidade e saída de velocidade

Utilizando o modelo de segunda ordem para entrada e saída de velocidade, a função de transferência obtida é:

$$G(s) = \frac{1.0945}{(1 + 0.066746s)(1 + 0.001s)} e^{0s}; \quad (4.8)$$

A Fig. 4.6 mostra as saídas simulada e medida, mostrando novamente uma boa representação do comportamento do sistema pelo modelo. O coeficiente de ajuste para este modelo novamente é de cerca de 90%.

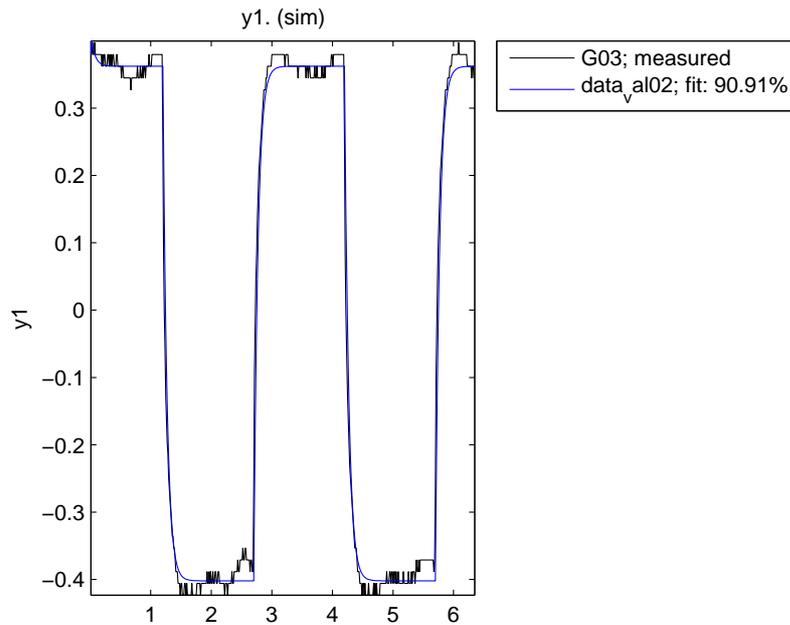


Figura 4.6: Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com entrada e saída de velocidade

Observe que mesmo forçando o algoritmo a realizar uma aproximação por um modelo com atraso, o atraso resultante foi nulo. Ainda, os valores obtidos para os pólos e para o ganho são muito próximos do modelo de segunda ordem, com diferenças na terceira ou quarta casa decimal. Este resultado é um indício de que o sistema apresenta um atraso desprezível, e de que o resultado anterior é consistente. Novamente, temos um pólo muito distante, pouco influente na dinâmica do sistema e também passível de ser desprezado.

Modelo de segunda ordem, com comando de velocidade e saída de posição

Utilizando o modelo de segunda ordem para entrada de velocidade e saída de posição, a função de transferência obtida é:

$$G(s) = \frac{0.91423}{(1 + 0.5446s)(1 + 0.5591s)}; \quad (4.9)$$

A Fig. 4.7 mostra as saídas simulada e medida, porém desta vez com significativas diferenças entre os dois sinais. Este descasamento se reflete no coeficiente de ajuste obtido, de 79.7%.

Quando se utiliza a saída de posição, o algoritmo de identificação não retorna um bom resultado em termos de ajuste. Note que além disso, os pólos obtidos são bastante diferentes de todos os casos anteriores, embora o ganho se mantenha da mesma ordem de grandeza.

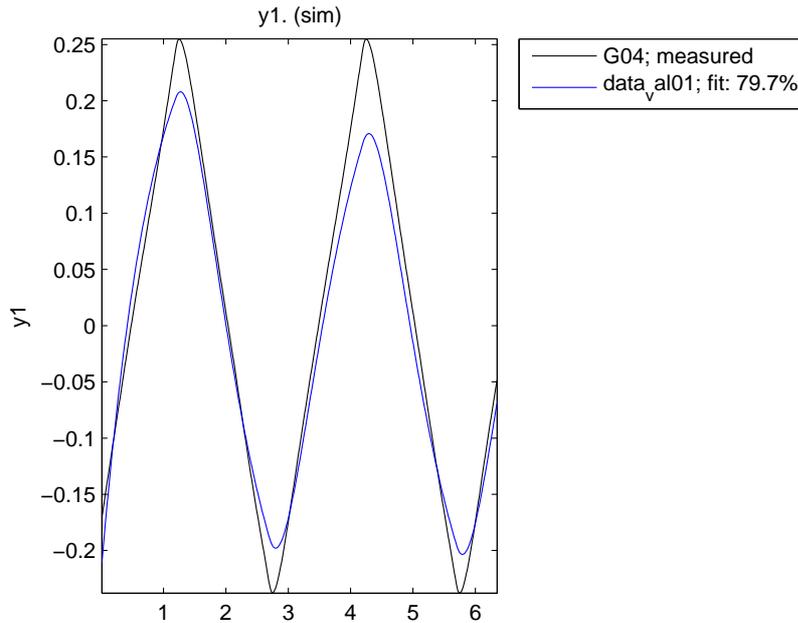


Figura 4.7: Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com entrada de velocidade e saída de posição

Modelo de segunda ordem com integrador, com comando de velocidade e saída de posição

Por fim, forçando a integração no modelo de segunda ordem para entrada de velocidade e saída de posição, a função de transferência obtida é:

$$G(s) = \frac{0.97131}{s(1 + 0.14373s)(1 + 0.001s)}; \quad (4.10)$$

A Fig. 4.7 mostra as saídas simulada e medida, novamente apresentando significativas diferenças entre os dois sinais, com um coeficiente de ajuste ainda inferior, de 77.26%.

Novamente os resultados são inferiores aos obtidos para a condição de entrada e saída de velocidade. No entanto, este último resultado é particularmente interessante uma vez que quando a identificação é feita utilizando três constante de tempo, novamente aparece o valor de 0.001. Como sabe-se que há de fato integração na malha, já que a entrada é velocidade e a saída é posição, este resultado indica que não é necessário mais do que um pólo para descrever a dinâmica do sistema.

Analisando estes resultados, é bastante razoável a escolha da aproximação do sistema por uma função de transferência de primeira ordem. Além de ser o modelo cujo coeficiente de ajuste foi o mais elevado, o resultado de segunda ordem apresenta um pólo em uma frequência muito elevada, passível de ser desprezada. Esta consideração é corroborada pelo resultado do modelo de segunda ordem com atraso,

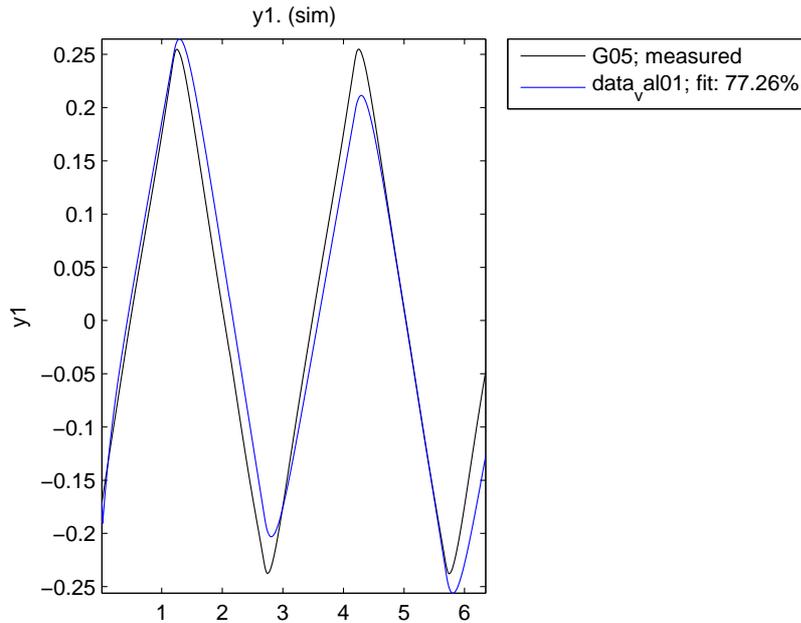


Figura 4.8: Resposta medida e resposta simulada do modelo obtido para modelo de segunda ordem com integrador com entrada de velocidade e saída de posição

levando a um atraso nulo e um pólo distante na mesma frequência, mantendo semelhantes o ganho e a outra constante de tempo. Os modelos com saída de posição resultaram em um baixo coeficiente de ajuste, servindo, no entanto, para confirmar a característica dominante de primeira ordem observada nas aproximações anteriores.

Note que estes resultados vão ao encontro do comentado na seção 4.1, quando se discutiu a sintonia visando o cancelamento do pólo, uma vez que o modelo identificado é de primeira ordem.

4.2.2 Caracterização da plataforma, ruídos e vibração nos sensores

Durante o procedimento de obtenção de resultados experimentais, foi possível detectar por inspeção visual uma discrepância entre o movimento esperado da plataforma e o movimento real devido a imperfeições como desbalanceamento e folgas mecânicas. Pode-se observar também que esta característica interferia no desempenho do sistema, uma vez que ocorriam movimentos bruscos próximos aos limites de amplitude de *roll* e *pitch*. Para utilizar esta informação na simulação, foram aquiridos dados de sensores giroscópicos posicionados na plataforma. Em seguida, através de uma transformada de Fourier (FFT), identificou-se as principais frequências harmônicas presentes no sinal. Esta característica foi reproduzida em simulação como será discutido na subseção 4.2.2.

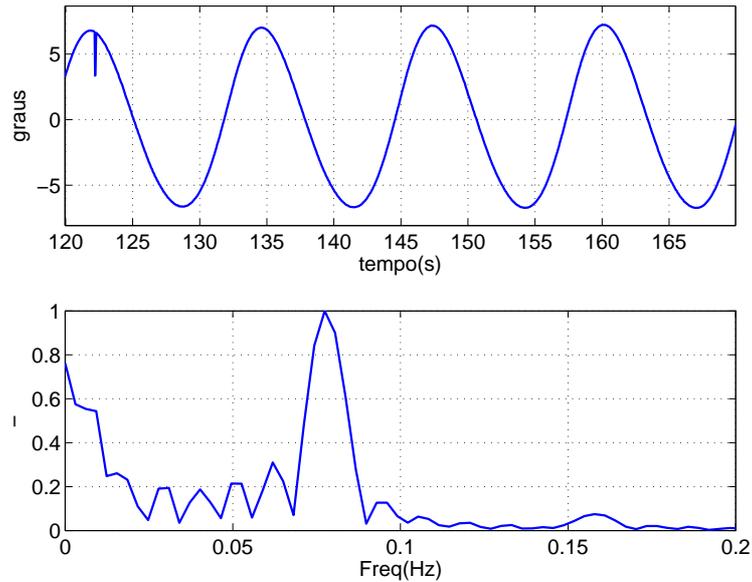


Figura 4.9: a) Medida do sensor giroscópico para velocidade de balanço b) espectro normalizado da velocidade de balanço

A modelagem dos ruídos observados nos sensores empregados teve o objetivo de tornar o modelo mais real, embora estes sejam de amplitude relativamente baixa. Para acrescentá-los à simulação, avaliou-se os dados em um período onde a plataforma se encontrava em repouso, situação onde as medidas seriam idealmente nulas.

Caracterização da plataforma

A fim de obter o resultado aqui apresentado, instrumentou-se a plataforma com sensores giroscópicos idênticos àqueles usados para estabilização. Estes foram posicionados na base do conjunto e ajustados para que ficassem alinhados com os eixos do sistema de coordenadas da base. Uma vez adquiridos os dados, uma análise de Fourier apontou as principais frequências presentes no espectro, tendo sido estas as utilizadas na simulação.

Na Fig. 4.9 a) pode-se observar a característica temporal de *roll*, ou balanço, da plataforma. Do espectro, representado na Fig. 4.9 b), pode-se retirar as principais harmônicas, no caso de $0.095Hz$ e $0.157Hz$, com 18% e 13% da energia do sinal, respectivamente. Para o *pitch*, ou caturro, exibido na Fig. 4.10, estas frequências são $0.102Hz$ e $0.147Hz$, com 21% e 17% da energia do sinal, respectivamente.

Note que as frequências fundamentais estão localizadas em $0.078Hz$, o que é consistente com o movimento observado.

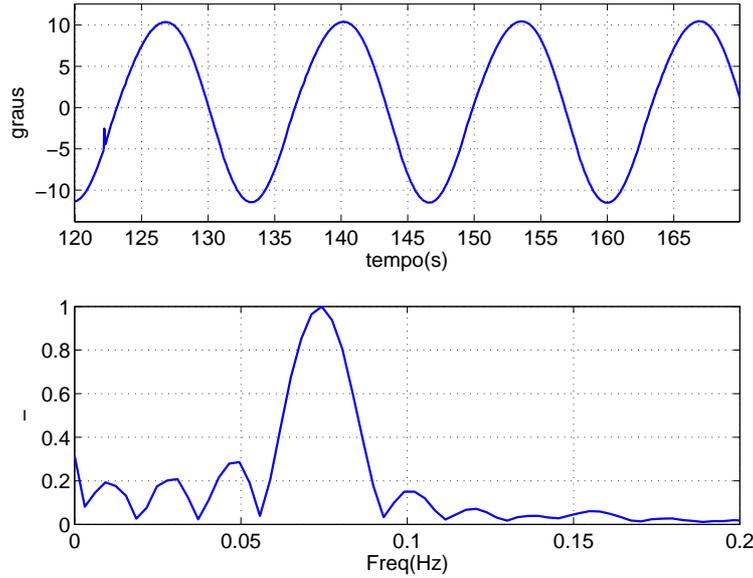


Figura 4.10: a) Medida do sensor giroscópico para velocidade de caturro b) espectro normalizado da velocidade de caturro

Ruído nos sensores

A fim de quantificar o nível de ruído, observou-se nos dados aquisitados a medição dos sensores, tanto no canal de *roll/pitch* quanto de *pitch/yaw*. Os ruídos observados são bem similares, conforme se pode observar na Fig. 4.11.

Cabe frisar que neste modelo se busca apenas representar a amplitude máxima do ruído, uma vez que se percebeu que a média destas amostras é praticamente nula, da ordem de $10^{-4}rad$. Assim, optou-se por utilizar em simulação um ruído branco de amplitude máxima de aproximadamente $0.2^\circ/s$, mantendo uma relação sinal-ruído próxima da observada a prática.

4.3 Estabilização de *roll* e *pitch* com modelo ideal

As condições de simulação escolhidas para obtenção dos resultados presentes nesta seção foram escolhidas de forma a representar os experimentos a serem realizados. O *roll* e *pitch* empregados obedecem as seguintes equações, em graus:

$$\psi = 10.5 \sin(0.468t) \quad (4.11)$$

$$\theta = 6.7 \sin(0.490t) \quad (4.12)$$

Para as simulações de estabilização de *pitch* e *yaw*, este são dados por:

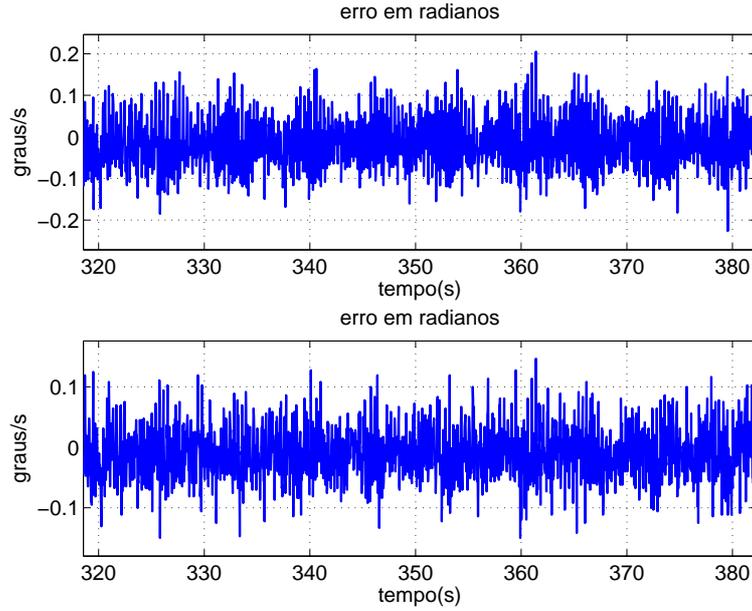


Figura 4.11: leituras dos sensores nos canais de *roll/pitch* e *pitch/yaw*

$$\phi = 15.2 \sin(0.468t) \quad (4.13)$$

$$\theta = 6.7 \sin(0.468t) \quad (4.14)$$

A direção para a qual se quer apontar, em ambos os casos, é dada por:

$$U_L^* = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (4.15)$$

Os resultados aqui apresentados fornecem uma idéia do melhor desempenho possível de ser alcançado pelo sistema nessas condições. Naturalmente, o desempenho esperado quando consideradas todas as não-idealidades deve ser deteriorado; porém, conhecendo o comportamento da planta em condições ideais é possível ter uma noção mais clara das causas desta degradação de performance.

4.3.1 Sensores posicionados no eixo interno, medindo parcialmente ω_{BL}

O erro de posição obtido quando a medição é colocada no eixo externo é bastante pequeno, porém sensível à sintonia empregada no controle de posição e velocidade dos motores atuadores; estes têm suas posições angulares apresentadas na Fig. 4.13. O erro na estabilização é melhor visualizado em radianos na Fig. 4.14, calculando-se o ângulo entre a orientação desejada e a obtida. Note que é um resultado bastante satisfatório, inferior a $1mrad$.

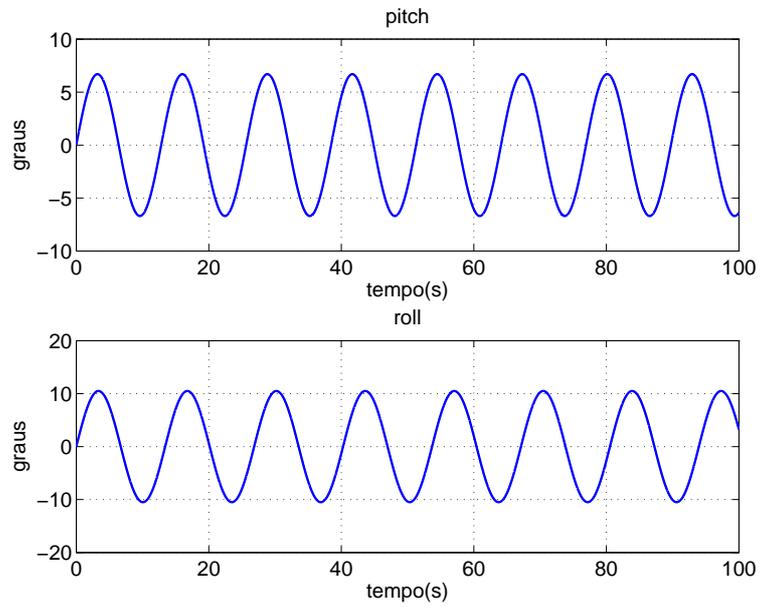


Figura 4.12: Característica de *roll* e *pitch* utilizada em simulação

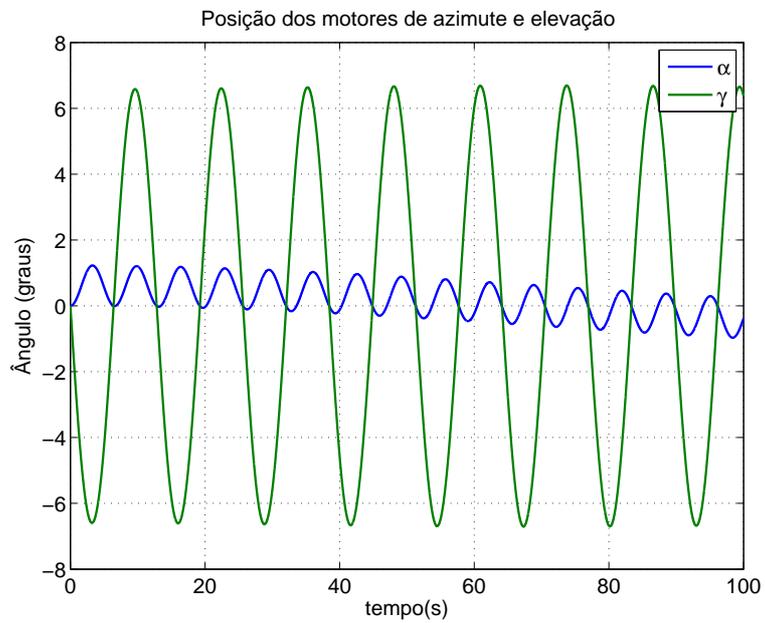


Figura 4.13: Ângulos de correção para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

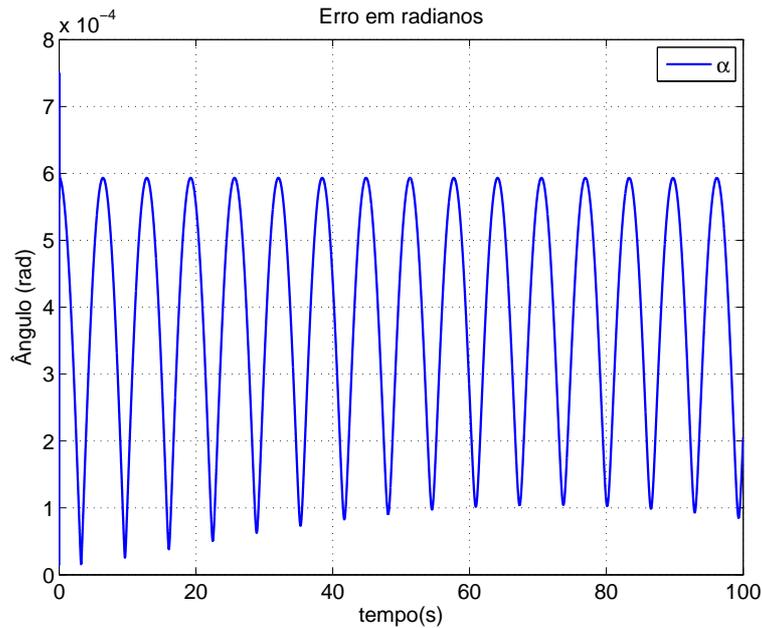


Figura 4.14: Erro em radianos para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

Note que um erro de aproximadamente $6 \times 10^{-4} \text{rad}$ significa um erro inferior a 60cm a cada 1km no alvo, precisão bastante razoável. Apesar das oscilações observadas nas variáveis de erro, pode-se notar que tal oscilação não é percebida na posição angular dos motores. Na Fig. 4.16 pode-se visualizar as velocidades angulares reais no referencial do sensor sobrepostas àquelas medidas e à calculada, denotada por ω_e . Note que são praticamente idênticas, de fato, o erro é desprezível e exibido na Fig. 4.17.

Uma forma mais direta de observar o desempenho é plotar a orientação da extremidade da plataforma em diferentes instantes de tempo conforme conta na Fig. 4.18. Note que o eixo x permanece praticamente invariante como esperado, uma vez que se trata da direção para a qual se quer apontar.

4.3.2 Sensores posicionados no eixo interno, medindo parcialmente ω_{aL}

Embora o algoritmo seja diferente, pouco se altera em termos de desempenho quando se modifica a posição dos sensores, uma vez que as condições são consideradas ideais. Na Fig. 4.19 pode-se observar que os ângulos obtidos são os mesmos da Fig. 4.13, naturalmente. Uma vez que o movimento externo é o mesmo, os ângulos de correção devem ser idênticos. Por conseguinte, o erro em radianos também é o mesmo e por isso é omitido aqui.

As componentes de velocidade angular da plataforma em relação ao inercial ω_{bL}

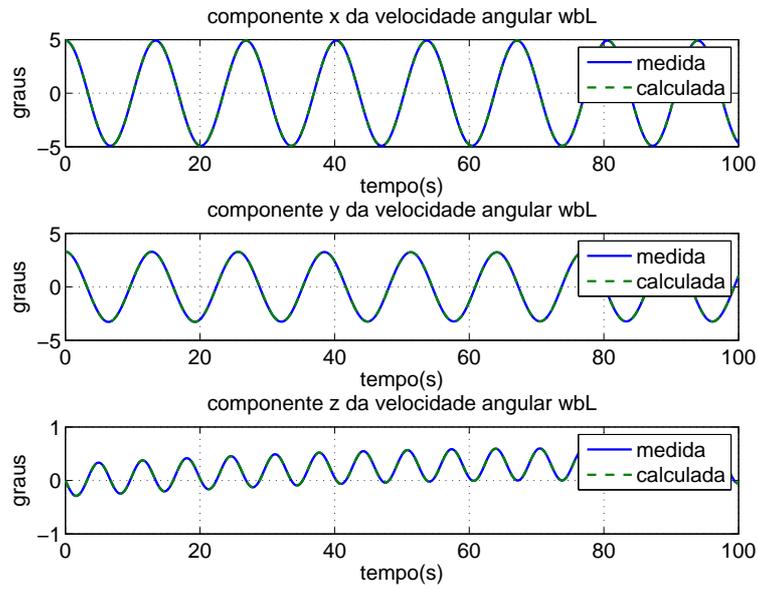


Figura 4.15: Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

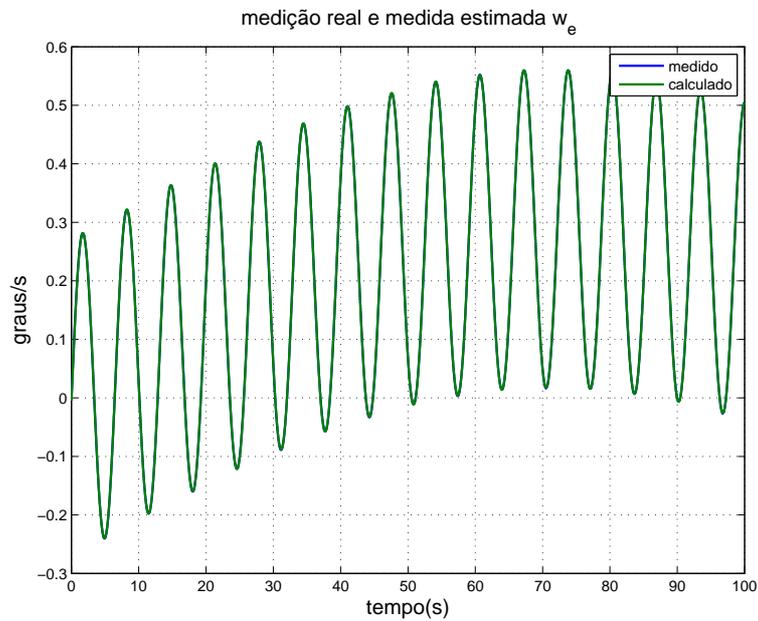


Figura 4.16: Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno

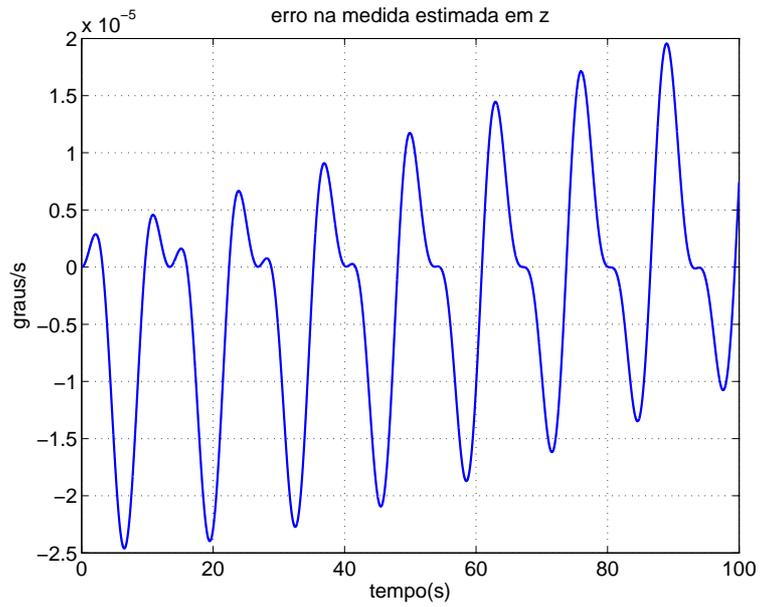


Figura 4.17: Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno

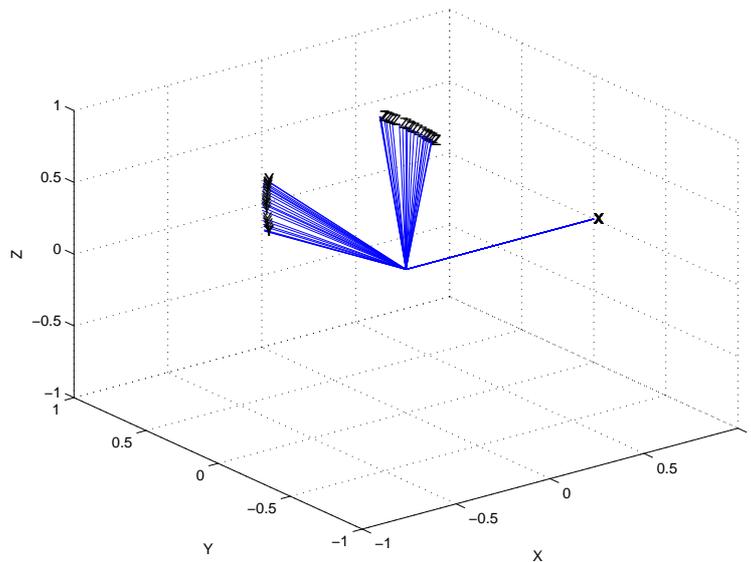


Figura 4.18: Sistema de coordenadas representando a orientação da extremidade em diferentes instantes de tempo

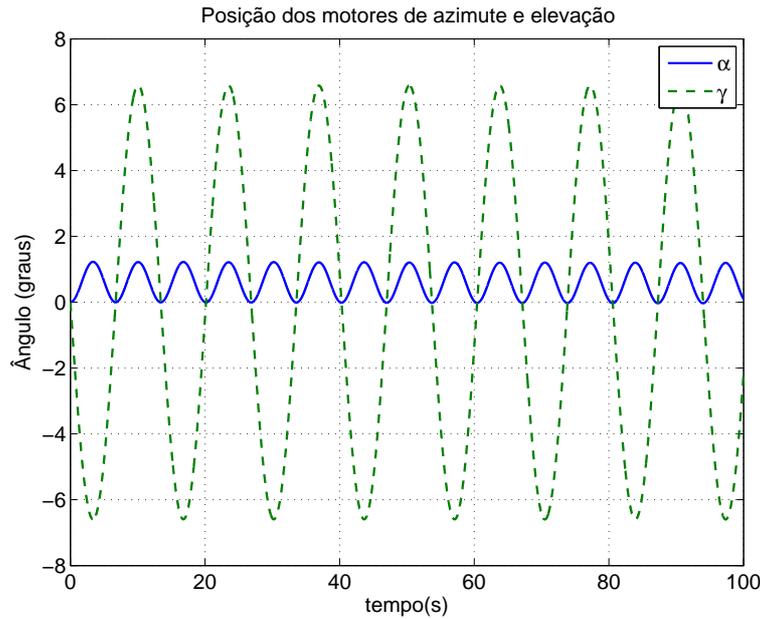


Figura 4.19: Ângulos de correção para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

calculadas também apresentam boa precisão, conforme a Fig. 4.20. Da mesma forma, o erro entre a velocidade angular ω_{BL}^z real e a medida é da mesma ordem de grandeza, de acordo com a Fig. 4.21. Porém, olhando-se para a Fig. 4.22 pode-se perceber que a velocidade estimada é diferente do caso anterior, fato também esperado em função da diferença na alocação dos sensores.

A figura com a orientação da extremidade também pode ser omitida, pois apresenta um resultado idêntico ao da Fig. 4.18.

4.4 Estabilização de *roll* e *pitch* com modelo completo

Quando se consideram as imperfeições citadas anteriormente na construção do modelo de simulação, espera-se uma deterioração do desempenho alcançado em condições ideais. Porém, a pergunta que se busca responder é o quanto estas não-idealidades interferem no resultado final e que medidas podem ser tomadas a fim de reduzir este impacto.

Observando o perfil dos ângulos de azimute e elevação obtidos para correção do movimento externo na Fig. 4.23, já se pode notar a diferença entre os ângulos obtidos nos casos anteriores. Isto se deve às frequências harmônicas presentes no movimento da plataforma, gerando perfis de *roll* e *pitch* também bastante diferentes e levemente distorcidos, conforme a Fig. 4.24.

Note que as componentes da velocidade angular da plataforma em relação ao

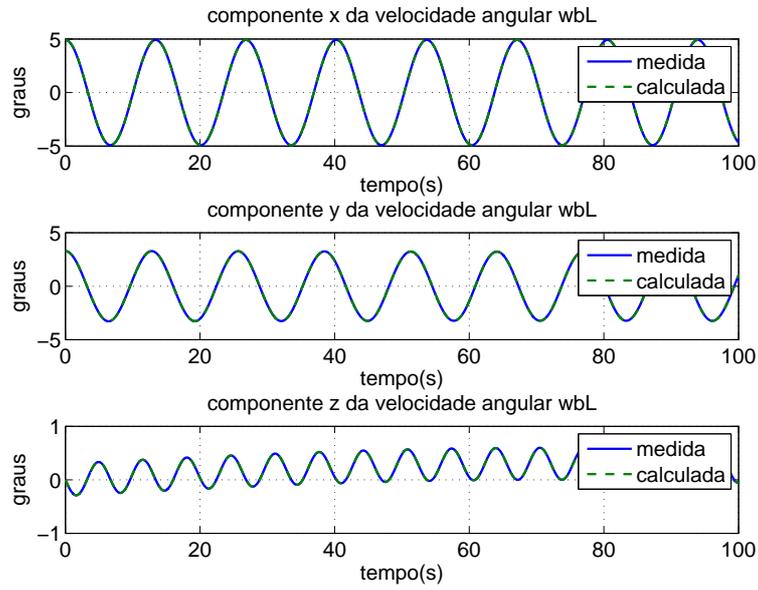


Figura 4.20: Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

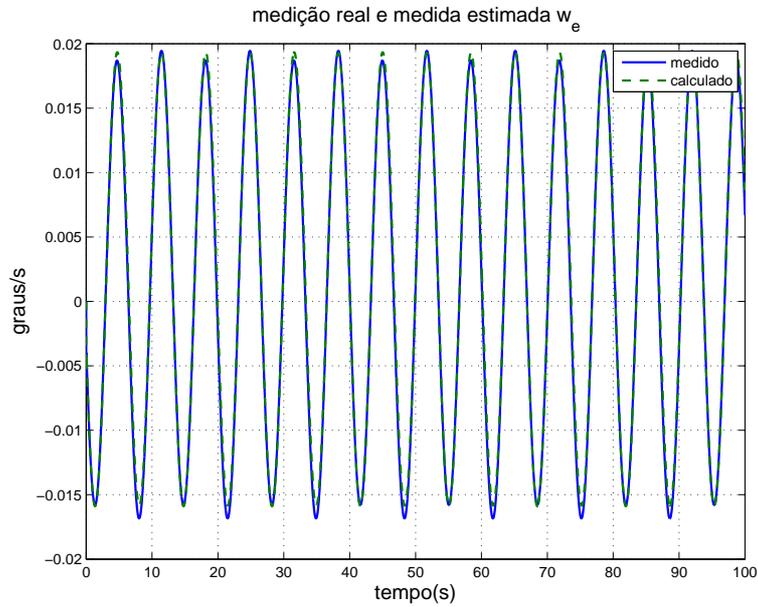


Figura 4.21: Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo externo

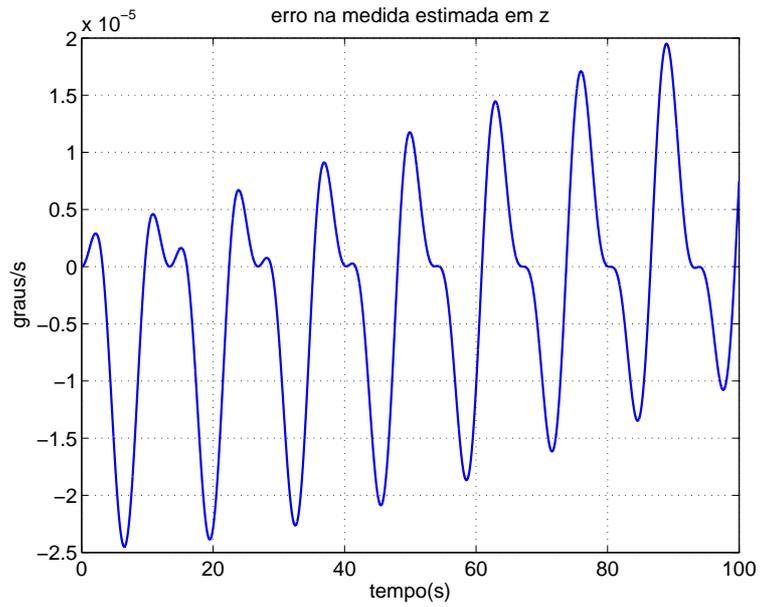


Figura 4.22: Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo externo

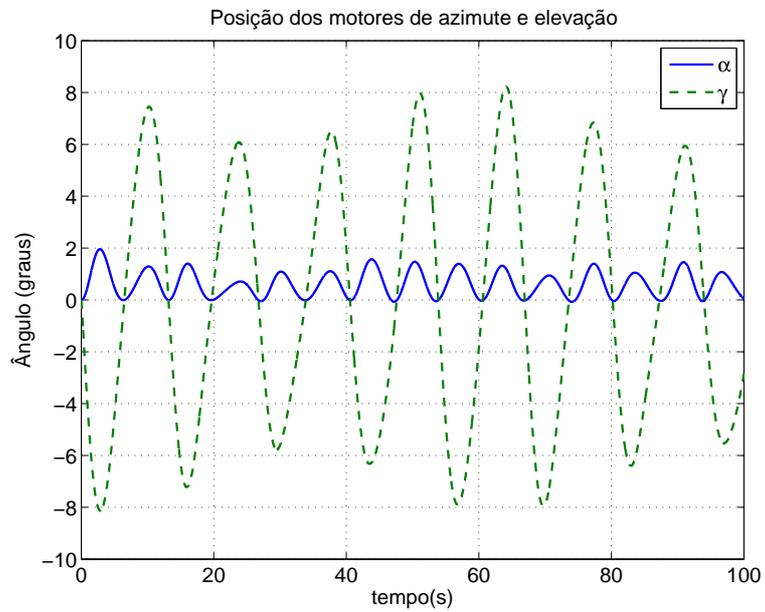


Figura 4.23: Ângulos de correção para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

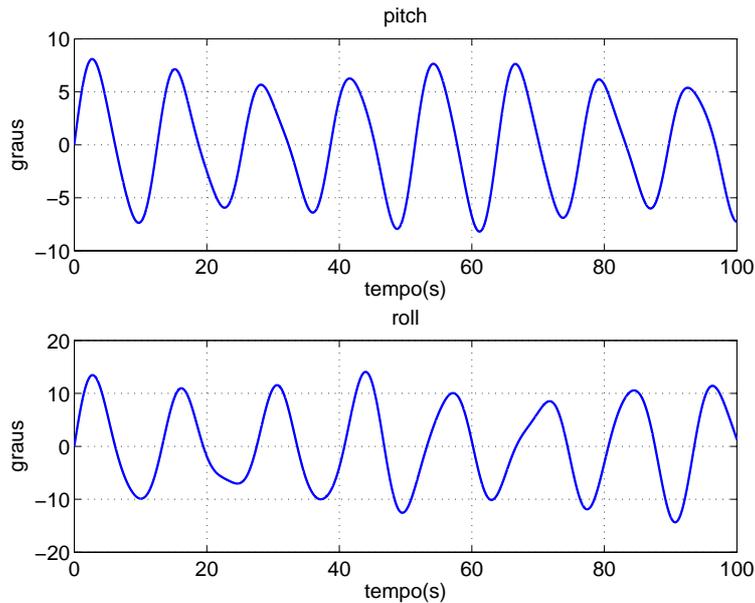


Figura 4.24: Perfis de *roll* e *pitch* obtidos com o modelo real

referencial inercial ω_{bL} correspondem bem aos valores reais, como mostra a Fig. 4.25. A componente de velocidade angular na direção não medida pode ser comparada com a medida estimada na Fig. 4.26, enquanto a Fig. 4.27 mostra que o erro entre duas grandezas é pequeno, inclusive inferior à ordem de grandeza do ruído.

O erro em radianos é, de fato, superior ao observado anteriormente, embora ainda seja bastante pequeno como se pode ver na Fig. 4.28. O desempenho em termos da orientação é observado na Fig. 4.29.

Como se pode ver, o impacto das imperfeições no modelo é bastante visível nos resultados. As considerações sobre o movimento da plataforma resultam em formas de onda mais distorcidas, porém se pode notar que o algoritmo reproduz bem a velocidade angular da plataforma em relação ao inercial mesmo sem um conjunto completo de medidas. Na linha de visada, o erro é significativamente maior em proporção ao caso ideal, quase dobrando. Todavia, em níveis absolutos ainda é bastante baixo. Estes resultados dão uma boa noção do desempenho passível de ser alcançado, muito embora esperem-se resultados inferiores nos experimentos, devido tanto a efeitos não contabilizados, como outros tipos de distúrbio. Em condições reais de operação, as condições de movimento externo devem também ser mais severas, resultando em um pior desempenho. Tais pontos serão abordados no capítulo 5.

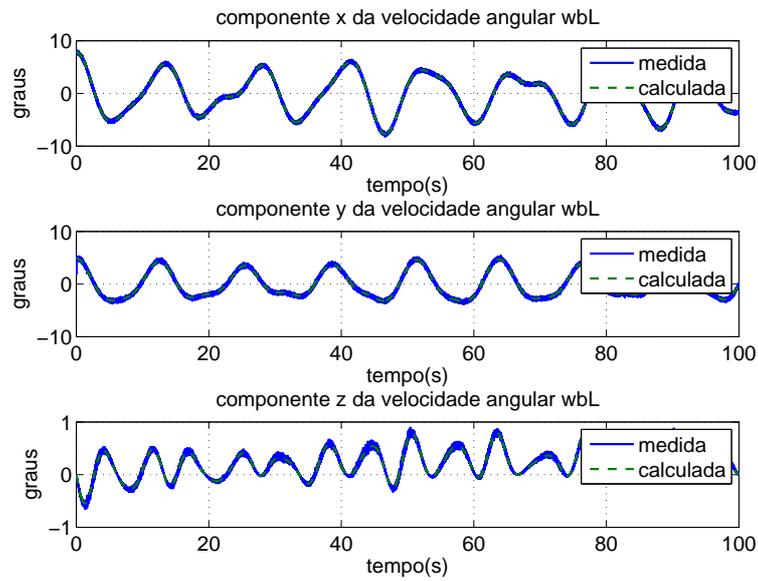


Figura 4.25: Velocidades angulares obtidas e calculadas ω_{bL} para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

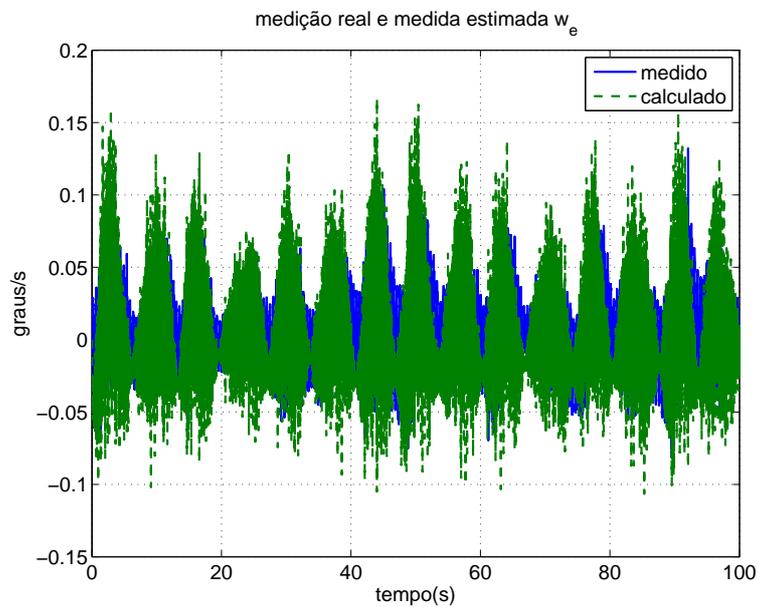


Figura 4.26: Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{aL} com giroscópios no eixo externo

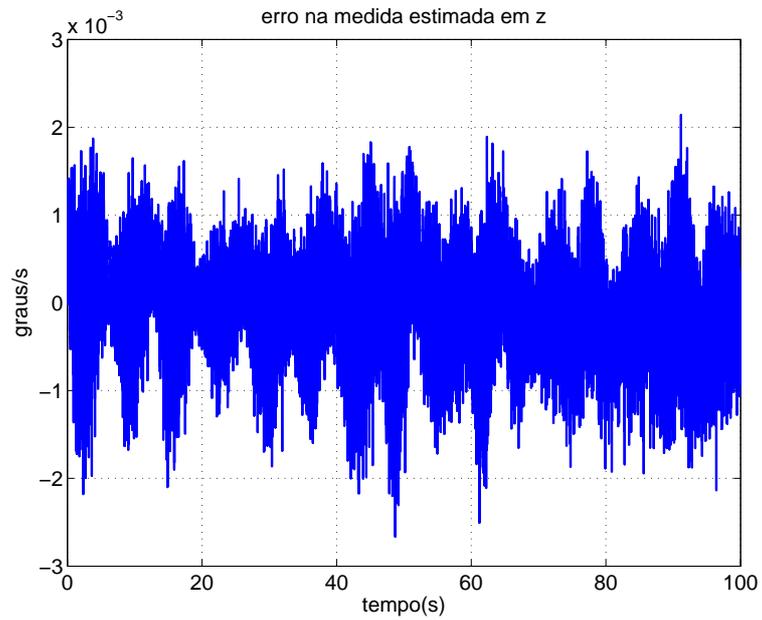


Figura 4.27: Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{aL} com giroscópios no eixo externo

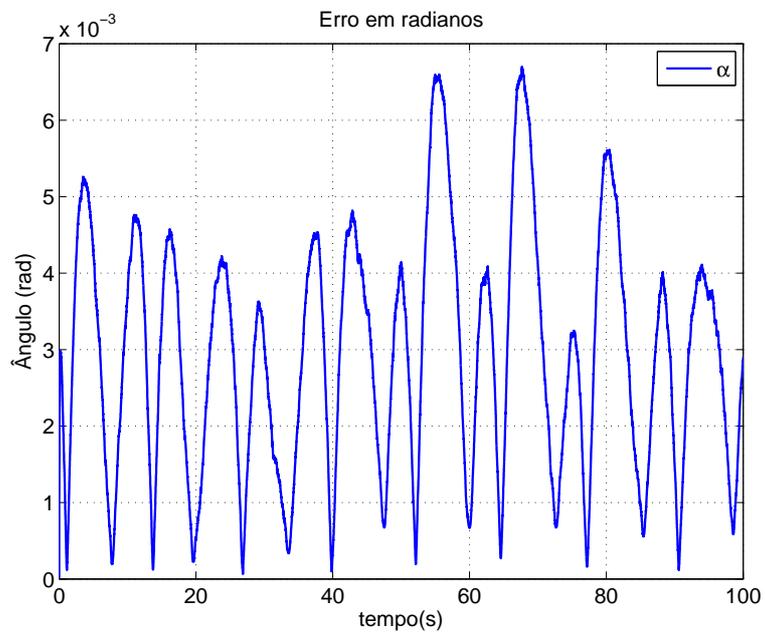


Figura 4.28: Erro em radianos para estabilização de *roll* e *pitch* com giroscópios no eixo externo

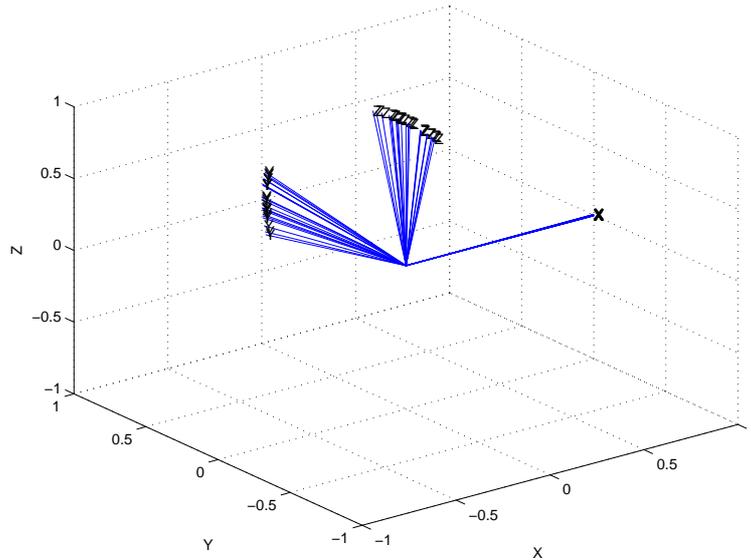


Figura 4.29: Orientação da extremidade em diferentes instantes de tempo para estabilização de *roll* e *pitch* com modelo real

4.5 Estabilização de *pitch* e *yaw* com modelo completo

De maneira geral, o desempenho esperado na estabilização de *pitch* e *yaw* é similar ao obtido na estabilização de *roll* e *pitch*. Os ângulos de azimute e elevação são naturalmente diferentes, visto que o movimento externo neste cenário é diferente, de acordo com a Fig. 4.30.

A principal diferença no desempenho para esta situação em relação à anterior está justamente no erro na linha de visada, indicado pelo erro angular da Fig. 4.34. Note que este é bastante superior, ultrapassando os $12mrad$.

Em contrapartida, pelas Figs. 4.31–4.33 é possível perceber o fato de tanto a medida estimada quanto a velocidade angular calculada da plataforma ω_{bL} , utilizada no cálculo da orientação C_{bL} , corresponderem com precisão razoável aos valores reais. Tal fato indica a consistência do cálculo realizado e sugere como possível causa principal deste erro acentuado os erros de integração numérica.

Reduzindo-se o passo de simulação de $T = 5ms$ para $T = 1ms$, este resultado já melhora bastante, conforme a Fig. 4.35. Este resultado comprova o impacto dos erros de integração e indica a necessidade de um processamento rápido para possibilitar um resultado mais preciso. A orientação da extremidade pode ser vista na Fig. 4.36, mostrando que mesmo na presença destes erros a linha de visada é pouco alterada.

Novamente, os resultados obtidos são razoáveis em termos de precisão e mostram consistência no algoritmo. Tanto nesta seção quando na seção 4.4 foi possível detectar o aparecimento de erros deteriorando o desempenho obtido no caso ideal. A

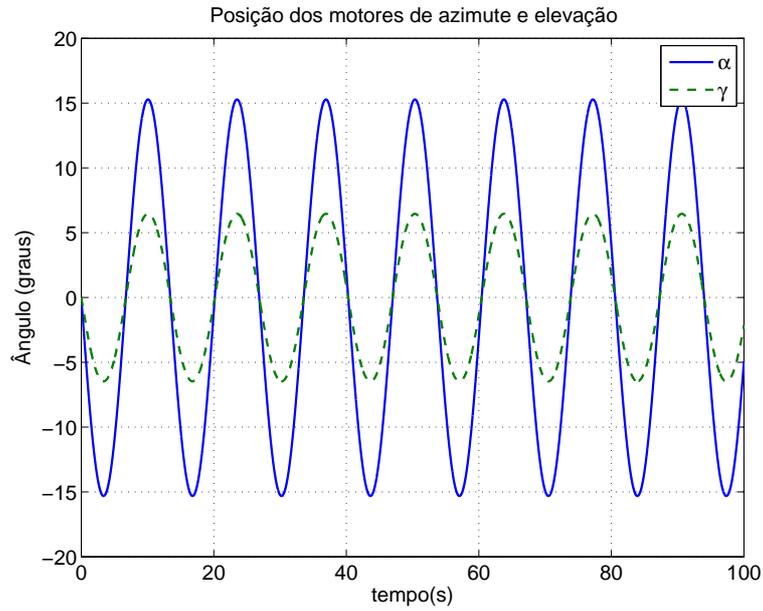


Figura 4.30: Ângulos de correção para estabilização de *pitch* e *yaw* com giroscópios no eixo interno

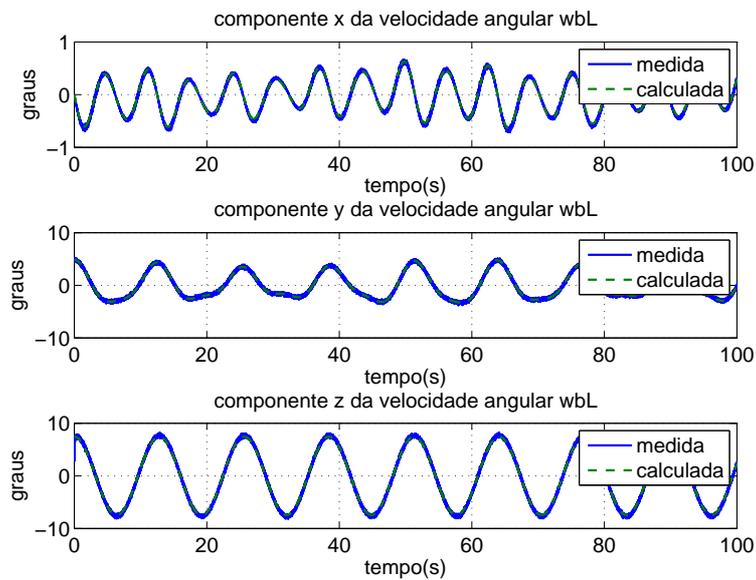


Figura 4.31: Velocidades angulares obtidas e calculadas w_{bL} para estabilização de *pitch* e *yaw* com giroscópios no eixo interno

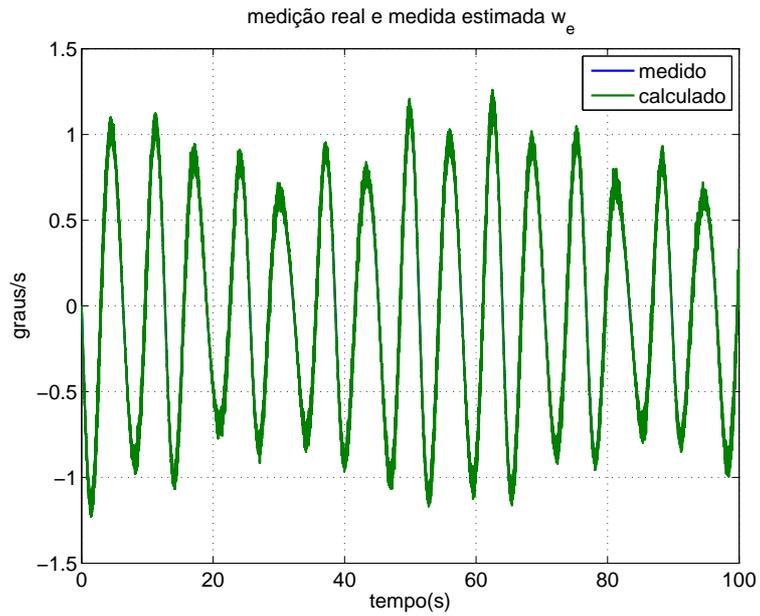


Figura 4.32: Comparação entre o conjunto de velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno

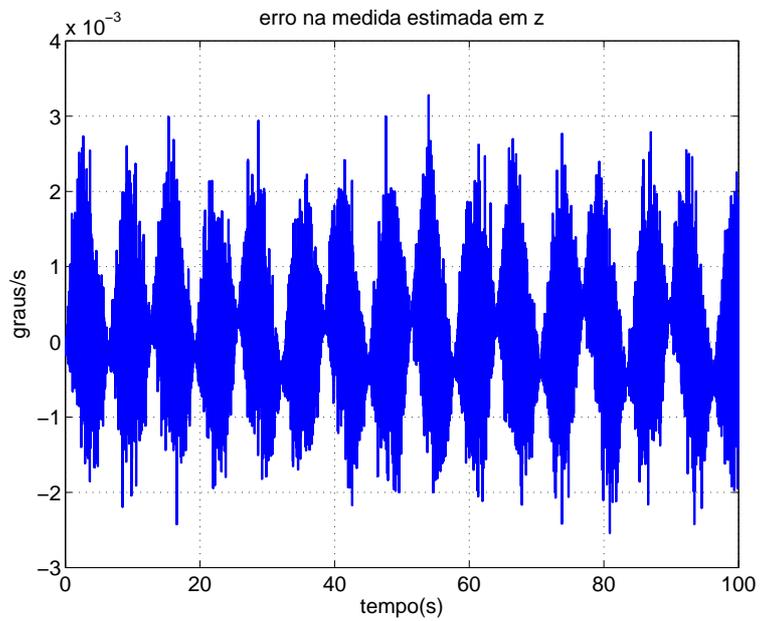


Figura 4.33: Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno

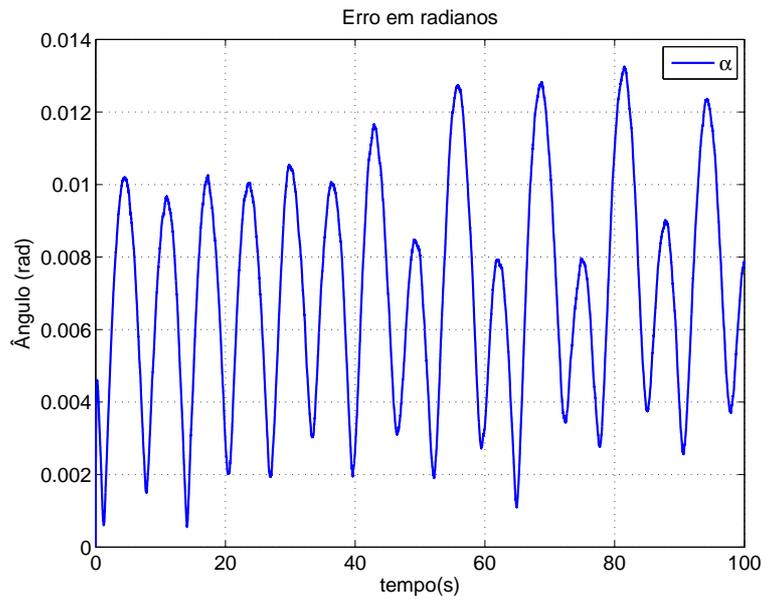


Figura 4.34: Erro em radianos para estabilização de *pitch* e *yaw* com giroscópios no eixo interno

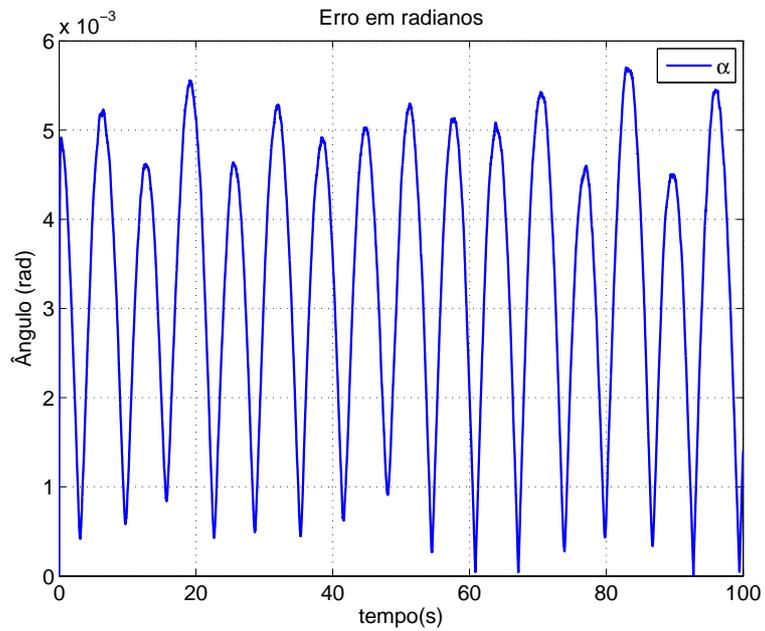


Figura 4.35: Erro em radianos para estabilização de *pitch* e *yaw* com giroscópios no eixo interno reduzindo o intervalo de integração para $5ms$

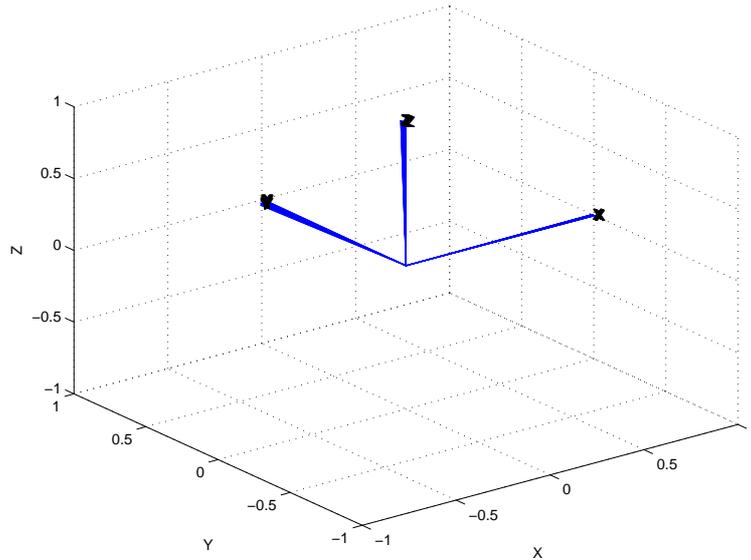


Figura 4.36: Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno

fim de quantificar ainda melhor estes efeitos, mais uma análise pode ser feita obtendo resultados considerando as não-idealidades separadamente. Esta discussão é apresentada brevemente na seção a seguir.

4.6 Avaliação dos efeitos das não-idealidades do sistema considerados de forma isolada

Nesta seção, buscamos apresentar rapidamente alguns resultados que quantifiquem o efeito de algumas das não-idealidades presentes no sistema e consideradas na simulação. O objetivo é indicar quais as causas mais significantes no sentido de piorar o desempenho.

Como dito anteriormente, a condição inicial $C_{bL}(0)$ deve ser conhecida, de forma que se houverem erros nesta informação eles serão propagados para o resto do sistema. Simulando-se a estabilização de *roll* e *pitch* com a mesma característica de movimento externo da seção 4.4, porém introduzindo um erro de cinco graus na orientação em ambos graus de liberdade, observa-se uma redução razoável na precisão.

4.6.1 Erro na condição inicial da matriz de orientação C_{bL}

Na Fig. 4.37 pode-se perceber um erro máximo da ordem de 11mrad , enquanto anteriormente este valor não ultrapassava 7mrad . Note, no entanto, que é uma diferença pequena e que cinco graus em cada grau de liberdade é um desbalanceamento relativamente grande em proporção à excursão total do movimento. Note também que

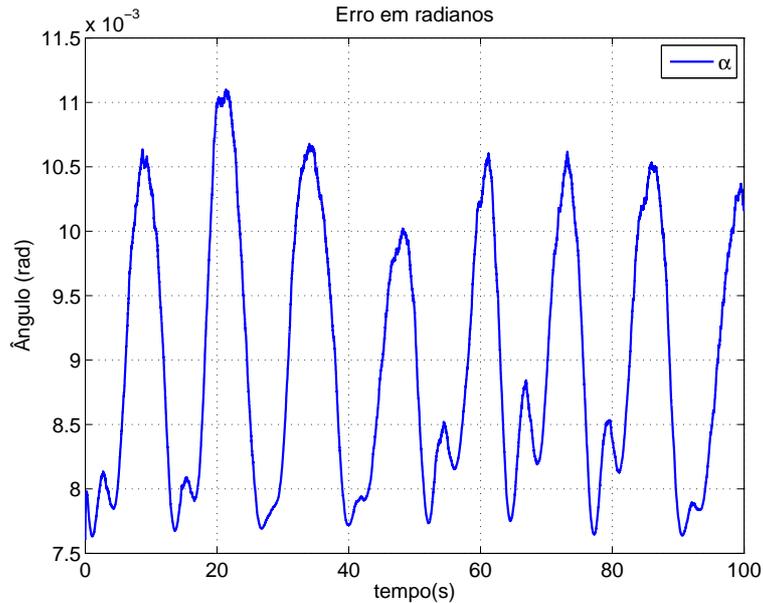


Figura 4.37: Erro em radianos para estabilização de *roll* e *pitch* com erro na condição inicial de orientação

este erro não prejudica o cálculo de ω_{bL} como se pode ver na Fig. 4.38.

Uma solução para este problema é a adoção de acelerômetros. Mesmo um conjunto de baixo custo é capaz de reduzir bastante este erro, uma vez que não é necessária uma precisão muito alta. Como se pode ver, o desbalanceamento simulado, apesar de relativamente significativo, não implicou em uma perda de desempenho muito acentuada.

4.6.2 Erros inseridos pelas derivadas aproximadas

Conforme comentado, as velocidades angulares dos motores de azimute e elevação não são medidas, sendo apenas a posição disponível através de um encoder. Assim, emprega-se um filtro com a seguinte forma:

$$G_{diff}(s) = \frac{s}{\tau s + 1} \quad (4.16)$$

Onde τ é uma constante selecionada a fim de proporcionar uma boa resposta, usualmente escolhida para proporcionar um pólo próximo da origem. Aqui utiliza-se $\tau = 0.03$. Note que tanto na velocidade de azimute quanto de elevação os erros são pequenos e da ordem de grandeza dos ruídos, podendo ser desprezados. Cabe salientar ainda que as velocidades envolvidas são baixas e de frequências relativamente baixas, o que contribui para a obtenção de um bom resultado nesta estimação.

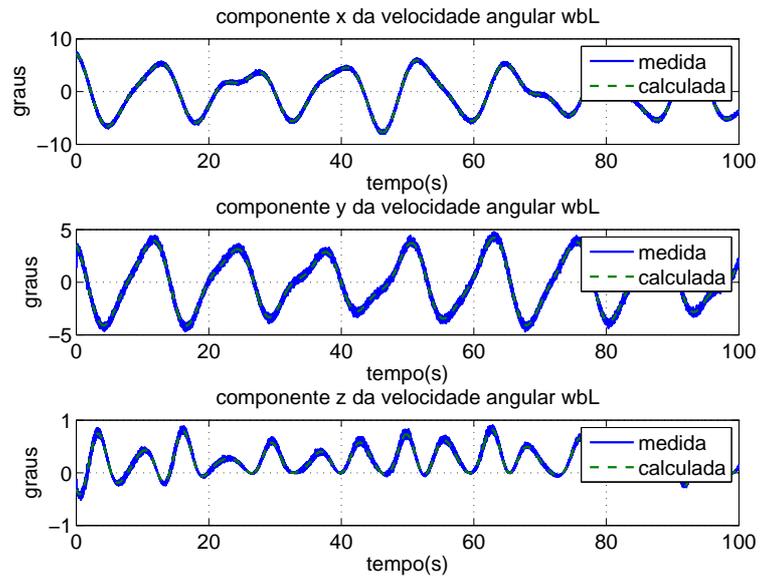


Figura 4.38: Erro entre as velocidades angulares no referencial do sensor e as medidas ω_{BL} com giroscópios no eixo interno

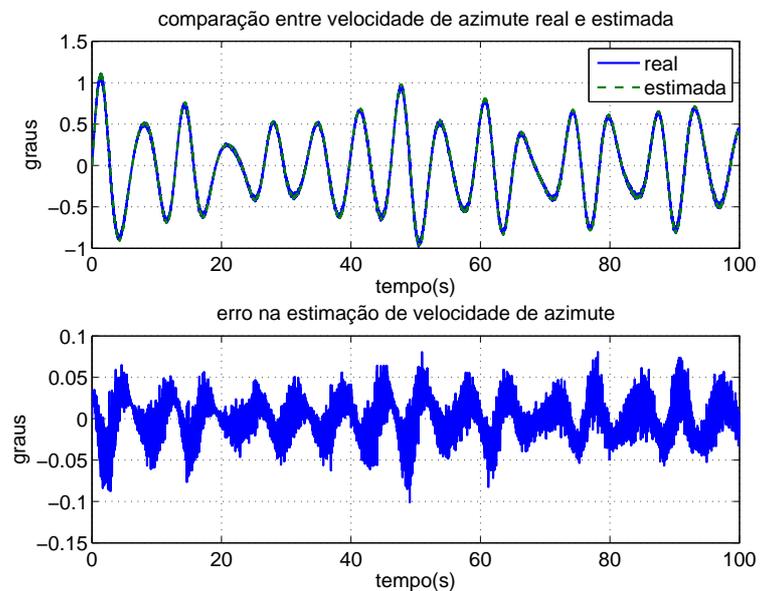


Figura 4.39: a) Comparação entre velocidade angular de azimute $\dot{\alpha}$ medida e estimada e b) erro entre valor real e estimativa

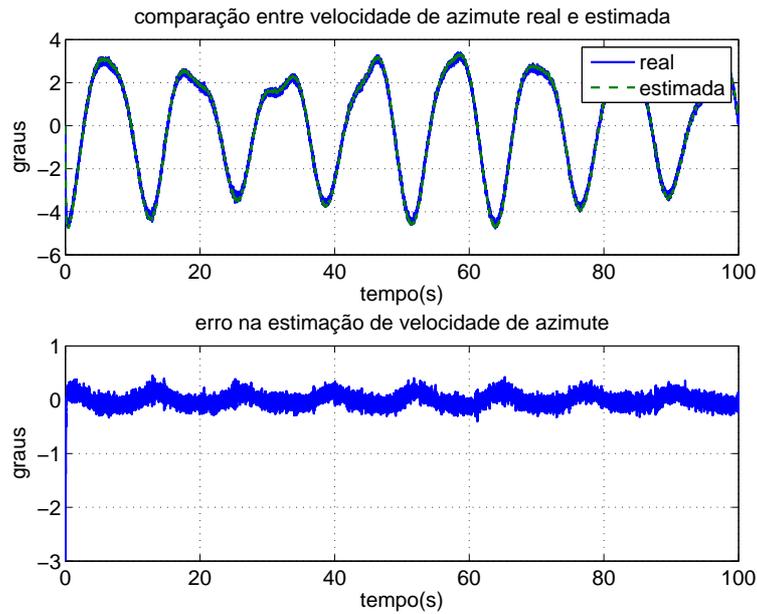


Figura 4.40: a) Comparação entre velocidade angular de azimute $\dot{\gamma}$ medida e estimada e b) erro entre valor real e estimativa

4.6.3 Erros inseridos pelas vibrações nos sensores

O modo como a flexibilidade é introduzida no modelo, de forma a funcionar como uma vibração no suporte dos sensores se reflete na forma como o ângulo de elevação é medido. Supõe-se que a estrutura é flexível em apenas um grau de liberdade, de forma que este movimento influencia significativamente em apenas uma medida.

Na Fig. 4.41, pode-se comparar o ângulo medido e o ângulo real. Note que a diferença é tênue, sendo melhor visualizada em ampliação. O erro absoluto é exibido na Fig. 4.42 e é de fato bastante pequeno, sequer chegando a 0.4 graus.

4.6.4 Presença de variação de *yaw* na estabilização de *roll* e *pitch*

Quando busca-se estabilizar *roll* e *pitch* com apenas dois sensores e o movimento do veículo contém variações de *yaw*, espera-se uma perda na precisão da estabilização. A fim de quantificar a sensibilidade do sistema em relação ao movimento de rumo, acresceu-se à simulação a seguinte variação neste grau de liberdade:

$$\phi = 15.2 \sin(0.0628t) \quad (4.17)$$

Enquanto os outros movimentos permanecem inalterados, de acordo com a Eq. 4.11. Note que foi escolhida uma característica de *yaw* de amplitude razoável e frequência bastante baixa, a fim de representar um movimento lento. Como se espera, a velocidade angular calculada ω_e não coincide com a velocidade angular real

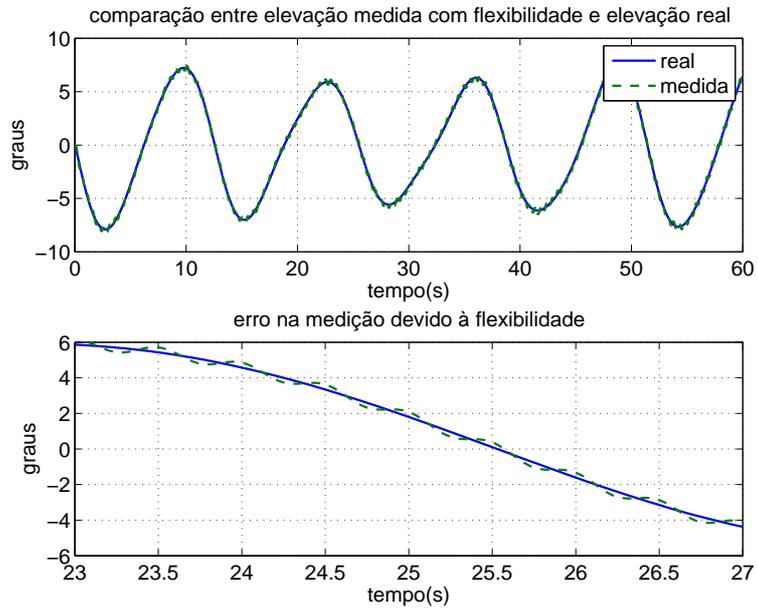


Figura 4.41: a) Comparação entre ângulo de elevação γ medido com flexibilidade e real e b) ampliação da figura anterior

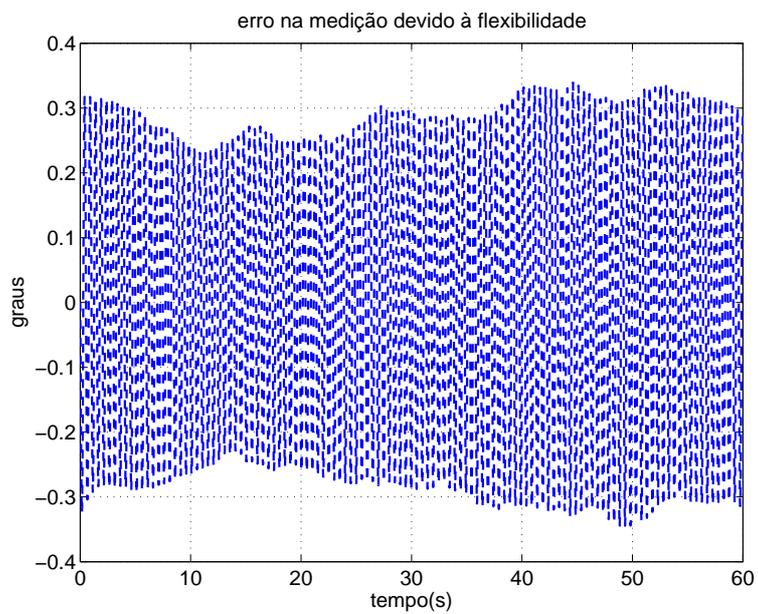


Figura 4.42: a) Erro no ângulo de elevação γ medido com flexibilidade

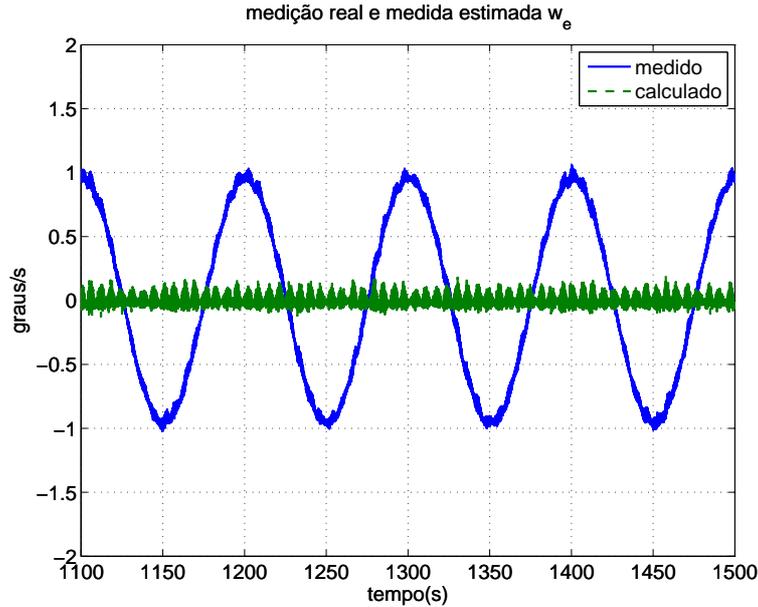


Figura 4.43: Comparação entre a velocidade angular ω_e calculada com a velocidade angular real ω_{aL}^z para estabilização de *roll* e *pitch* na presença de variação de *yaw*

ω_{aL}^z que seria medida por um sensor posicionado neste eixo. A Fig. 4.43 explicita este fato, enquanto a Fig. 4.44 mostra os erros no cálculo da velocidade da plataforma ω_{bL} decorrentes deste erro na medida. Consequentemente, a orientação não será calculada corretamente e a estabilização fica comprometida.

Na Fig. 4.45 se observa o erro em radianos para esta condição. Note que embora se trate de um erro considerável, este é da ordem de grandeza da amplitude de rumo adicionada.

4.6.5 Presença de variação de *roll* na estabilização de *pitch* e *yaw*

Analogamente, para estabilizar *pitch* e *yaw* com apenas dois sensores quando o veículo apresenta variações de *roll*, espera-se novamente uma degradação na precisão da estabilização. Repetindo o procedimento anterior, estipulando uma característica de *roll* como se segue:

$$\psi = 5 \sin(0.314t) \quad (4.18)$$

Note que neste caso optamos por uma variação mais rápida de menor amplitude, a fim de se aproximar mais da característica de *roll* de uma viatura num terreno levemente acidentado, por exemplo. Os resultados obtidos são similares, na Fig. 4.46, observa-se o erro entre a velocidade calculada ω_e e a velocidade real ao redor do eixo x . Como no caso anterior, a velocidade angular ω_{bL} é calculada com erros, o que se

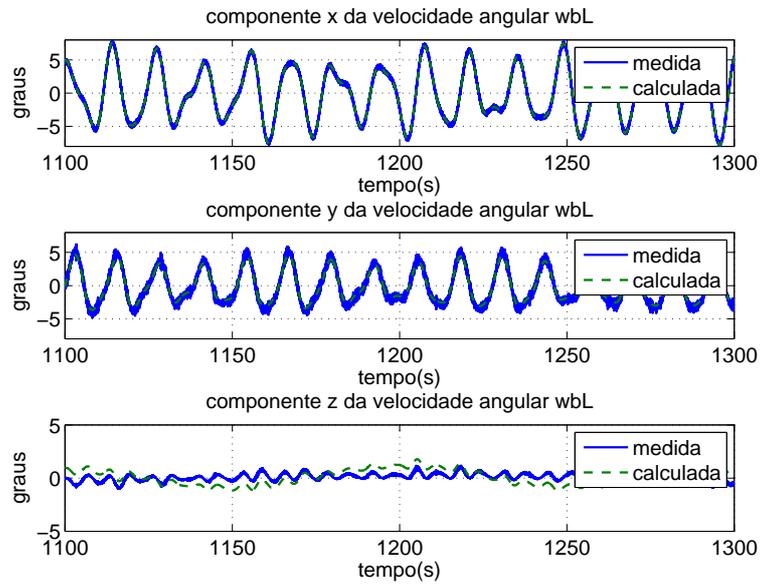


Figura 4.44: Comparação entre as componentes da velocidade angular da plataforma em relação ao inercial ω_{bL} para estabilização de *roll* e *pitch* na presença de variação de *yaw*

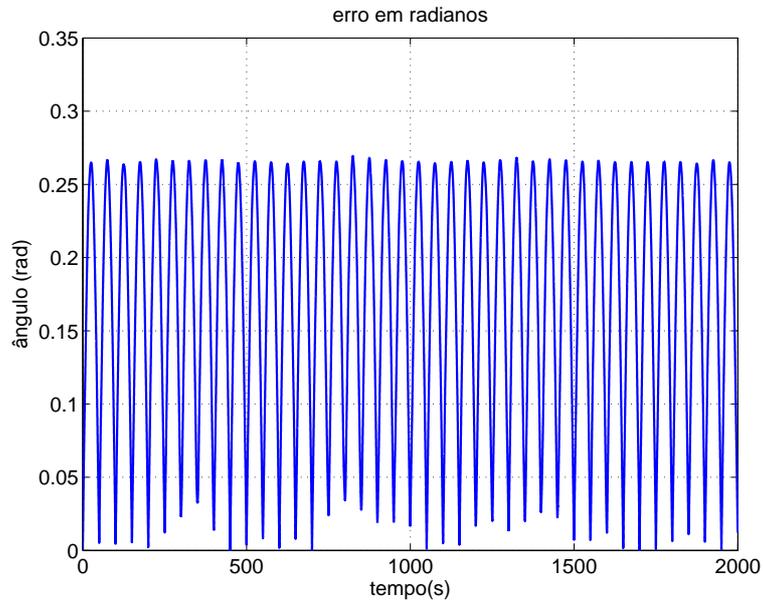


Figura 4.45: Erro em radianos para estabilização de *roll* e *pitch* na presença de variação *yaw*

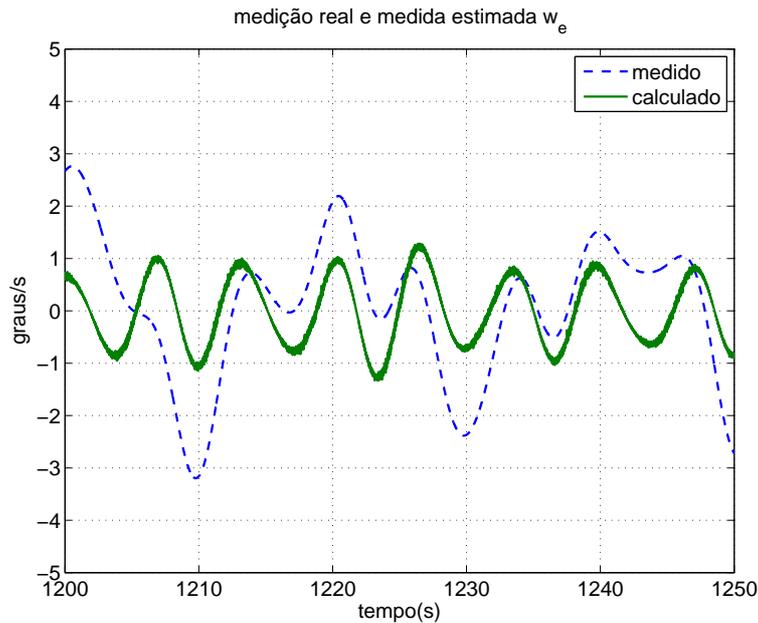


Figura 4.46: Comparação entre a velocidade angular ω_e calculada com a velocidade angular real ω_{BL}^x para estabilização de *roll* e *pitch* na presença de variação de *yaw*

observa na Fig. 4.47.

Analogamente, se observam erros na estabilização, vistos na Fig. 4.48, neste caso mais tênues do que o observado na estabilização de *roll* e *pitch*. Tal diferença pode ser entendida de forma intuitiva quando se considera que um movimento composto de *roll* apenas não introduz erros na estabilização de *pitch* e *yaw*. Isto porque a direção para a qual se quer apontar está alinhada justamente com o eixo x , admitindo portanto rotações ao redor deste eixo uma vez que estas não alteram a direção da linha de visada.

4.7 Considerações Finais

Ao final deste capítulo já é possível antever alguns dos problemas que serão encontrados na implementação prática de uma plataforma estabilizada. Buscou-se, com esta análise baseada em simulação, apontar algumas dos principais elementos que comprometem ou deterioram o desempenho da estabilização para que estes possam ser sanados ou suavizados na prática.

De fato, quando se trata de um sistema real, espera-se que outros fatores interfiram no desempenho. Alguns destes aspectos observados são tratados no capítulo 5, como forma de justificar discrepâncias entre o comportamento esperado e o realmente observado.

Todavia, os resultados obtidos até aqui mostram uma possibilidade de estabilizar razoavelmente bem uma plataforma com apenas dois sensores giroscópicos, mesmo

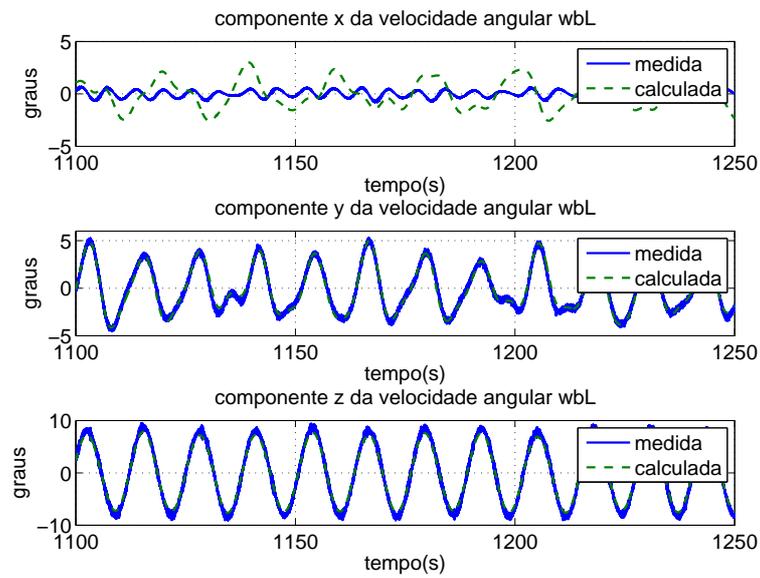


Figura 4.47: Comparação entre as componentes da velocidade angular da plataforma em relação ao inercial ω_{bL} para estabilização de *roll* e *pitch* na presença de variação de *yaw*

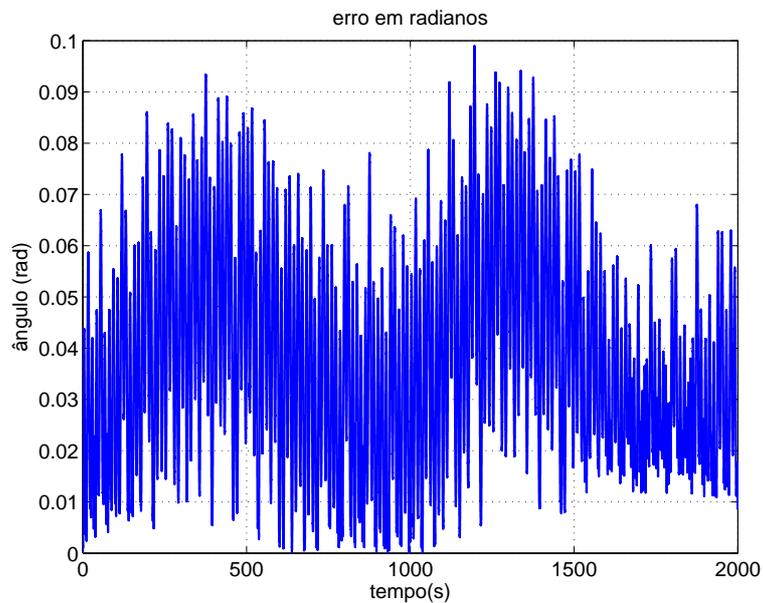


Figura 4.48: Erro em radianos para estabilização de *roll* e *pitch* na presença de variação *yaw*

que as restrições sobre os movimentos externos não sejam completamente satisfeitas. Como comentado, a condição de *yaw* ou *roll* constante não será perfeitamente respeitada na prática, porém, observou-se por simulação que ainda nestas condições o comportamento do sistema não é intensamente deteriorado.

Erros causados por integração numérica, estimação de velocidades e erro nas condições iniciais, embora presentes, também se mostraram pouco comprometedores quando comparados às situações onde estes não são considerados. O mesmo observou-se na simulação da vibração na caixa onde os sensores são posicionados.

Embora estes resultados sejam aparentemente satisfatórios e até animadores, um ponto chave deve ser frisado: a importância destes fatores está diretamente relacionada à precisão requerida para o sistema. Sistemas de estabilização de armas, por exemplo, necessitam de precisões altíssimas, da ordem de miliradianos, uma vez que visam apontar para alvos distantes. Quando se trata de câmeras em robôs ou automóveis, esta especificação não é necessariamente tão agressiva.

Deste modo, outros questionamentos devem ser levantado: até que ponto o custo evitado na utilização de um terceiro sensor compensa a perda de desempenho devido a outros fatores; qual a precisão máxima possível dada todas estas restrições e se esta corresponde aos requisitos de projeto; e, caso contrário, quais medidas devem ser tomadas a fim de ajustar os resultados aos requisitos.

Estes pontos serão novamente discutidos a seguir, quando se repete algumas das análises anteriores utilizando dados de experimentos.

Capítulo 5

Aspectos Práticos e Resultados Experimentais

Os algoritmos anteriormente apresentados e simulados para estabilização da plataforma inerciais com duas medidas de sensores giroscópicos foram implementados em um sistema composto de uma plataforma e um conjunto de gimbals. A plataforma em questão realiza movimentos em dois graus de liberdade, comumente referidos como caturro (*pitch*) e balanço (*roll*). Para os testes onde há variação de rumo, esta é manual e feita por um sistema de alavancas. Sobre a plataforma, é montada a estrutura mecânica que realiza a compensação, composta de dois motores idênticos em azimute e elevação, e de um sensor giroscópico de dois eixos do tipo DTG (*Dry tunned giroscope*, giroscópio sintonizado a seco).

Nestes testes, foi possível comparar o desempenho real do sistema com aquele esperado, bem como observar a presença de outras não-idealidades. Assim, a seção 5.1 relata os resultados obtidos para estabilização de *roll* e *pitch* utilizando este equipamento.

A eletrônica que adquire os dados no laboratório possui limitações na quantidade de pacotes enviados, de forma que só é possível adquirir seis variáveis a cada experimento. Desta forma, certos aspectos não podem ser analisados simultaneamente e por isso são utilizados dados de outros experimentos a fim de discutir pontos específicos. Na seção 5.2 são analisadas separadamente as malhas de controle dos motores, a fim de quantificar o erro de seguimento e compará-lo com o desempenho total do sistema.

Outro experimento realizado útil para a análise do problema consistiu em instrumentar um veículo e obter perfis da pista na qual serão realizados os testes de campo. Com isso, obtiveram-se informações como valores máximos de *roll*, *pitch* e *yaw*, além de velocidades e frequências máximas destas grandezas, aos quais a plataforma estabilizada será exposta. Na seção 5.3 os resultados dessa aquisição são discutidos e na seção 5.4 os dados são utilizados como entrada em uma simulação

a fim de avaliar o desempenho do algoritmo em condições reais, uma vez que não foram realizados testes em campo.

5.1 Resultados experimentais para estabilização de *roll* e *pitch*

Os testes aqui apresentados para estabilização de *roll* e *pitch* representam quatro condições distintas de operação. Na primeira, não há movimento de *roll*, apenas *pitch*. No segundo experimento, esta condição se inverte e há apenas *pitch* no movimento da plataforma. No terceiro e quarto testes, são adotadas combinações de *roll* e *pitch*, ora para estabilização na horizontal, ora para a linha de visada deslocada de um ângulo de azimute.

Os resultados são basicamente os ângulos de compensação que permitem calcular um erro aproximado de estabilização, também exibido. Feitos estes testes, podem-se verificar alguns dos aspectos já discutidos na simulação e comparar o resultado obtido em laboratório com aqueles esperados.

5.1.1 Experimento de estabilização do movimento de caturro, com balanço estático

O primeiro teste manteve a plataforma sem movimento de balanço, variando apenas o caturro, com uma amplitude de 6.5° e um período aproximado de $12.93s$, o máximo permitido pela plataforma. Note que em isto corresponde a uma frequência de $0.0773Hz$, próximo ao utilizado em simulação.

São lidas as medidas dos dois giros, Fig. 5.1, onde se pode ver que as velocidades envolvidas são relativamente baixas. Na Fig. 5.2 são exibidos *roll* e *pitch* da plataforma e se pode observar uma medição no canal de balanço, idealmente nulo.

Note que à primeira vista é difícil precisar se esta não-idealidade está ligada ao movimento da plataforma ou a uma má colimação dos sensores, isto é, a um mau alinhamento do sistema de coordenadas da extremidade com o da base. Sobrepondo as duas curvas nos mesmos eixos e inserindo um fator de escala como na Fig. 5.3, porém, pode-se ver um forte acoplamento entre as duas grandezas, sugerindo tratar-se de um erro na medida devido ao posicionamento do sensor.

Os ângulos de azimute e elevação são exibidos na Fig. 5.4, onde se pode ver um movimento desprezível de azimute, enquanto a amplitude de elevação é similar àquela observada na medição de caturro. Como idealmente não há um movimento de balanço, o idealmente esperado é uma compensação direta de *pitch* pelo ângulo de elevação.

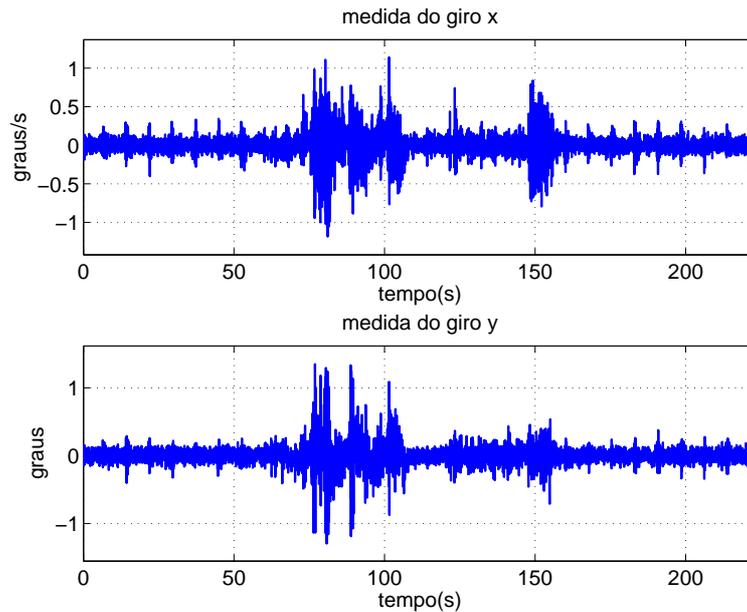


Figura 5.1: medidas dos sensores giroscópicos x (superior) e y (inferior) para experimento com movimento de caturro e balanço constante

Somando-se os ângulos de *pitch* e elevação pode-se avaliar a principal parcela do erro no experimento, uma vez que tais ângulos deveriam ser idealmente iguais. Note que o erro observado é da ordem de 0.2° , similar ao perfil obtido para o *roll* da plataforma. Este é mais um indício de que há erros no cálculo da orientação devido ao posicionamento dos sensores, erro este que interfere no desempenho final da estabilização de forma bastante visível, por ainda sem representar um impacto tão significativo.

O erro em radianos pode se calculado da mesma forma como mostrado no Cap 4. No entanto, deve-se notar que aqui este erro corresponde apenas ao erro no controle, não representando possíveis erros na orientação ocasionados pela colimação dos sensores, por exemplo. Este resultado mostra o quão bem o controle compensa a orientação calculada. De fato, pode-se ver que a precisão é bastante razoável, ficando abaixo dos 5mrad , conforme a Fig. 5.5.

5.1.2 Experimento de estabilização do movimento de balanço, com caturro estático

O experimento seguinte inverteu a condição do anterior, mantendo a plataforma sem movimento de caturro e com um movimento de balanço de amplitude 10.5° e período 12.66s , isto é, uma frequência de 0.079Hz . Note que este movimento novamente corresponde ao utilizado em simulação no capítulo 4.

Este caso é particularmente interessante uma vez que, nestas condições, não se espera observar movimento nenhum de azimute ou elevação. Como há apenas

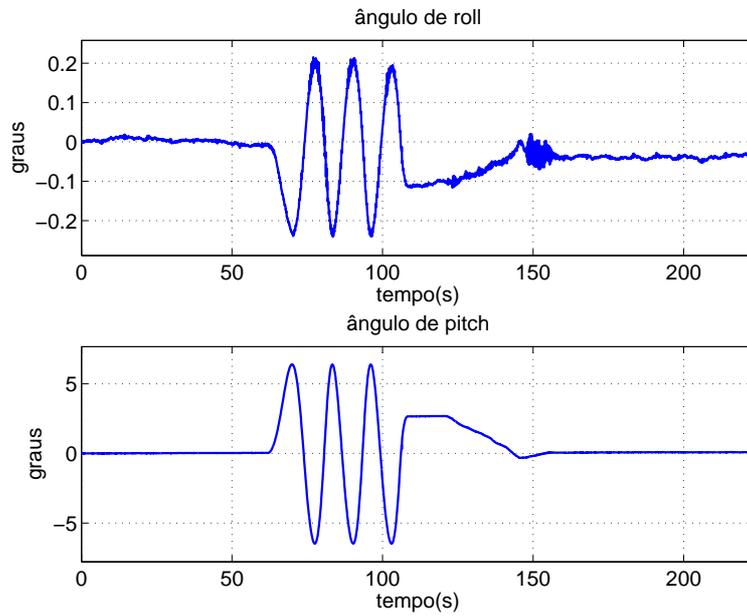


Figura 5.2: ângulos de *roll* (superior) e *pitch* (inferior) para experimento com movimento de caturro e balanço constante

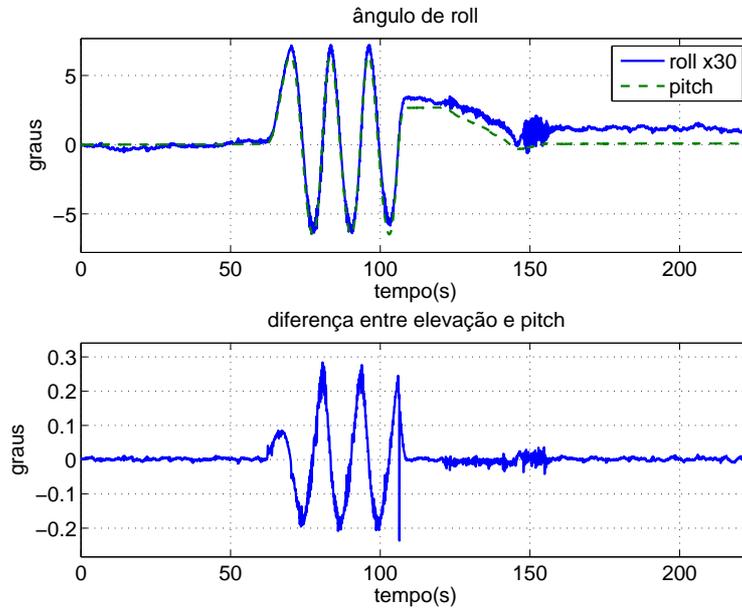


Figura 5.3: ângulos de *roll* aumentado 30x e *pitch* para experimento com movimento de caturro e balanço constante

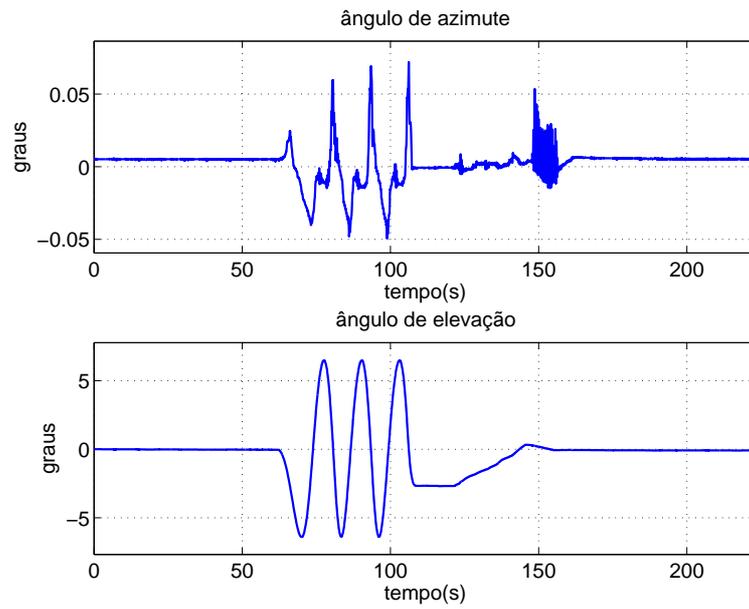


Figura 5.4: ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para experimento com movimento de caturro e balanço constante

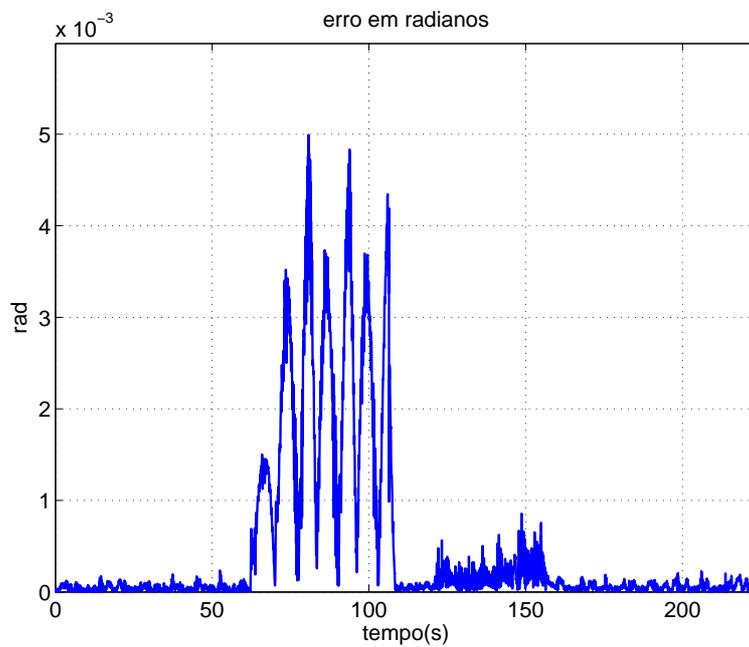


Figura 5.5: erro em radianos para experimento com movimento de caturro e balanço constante

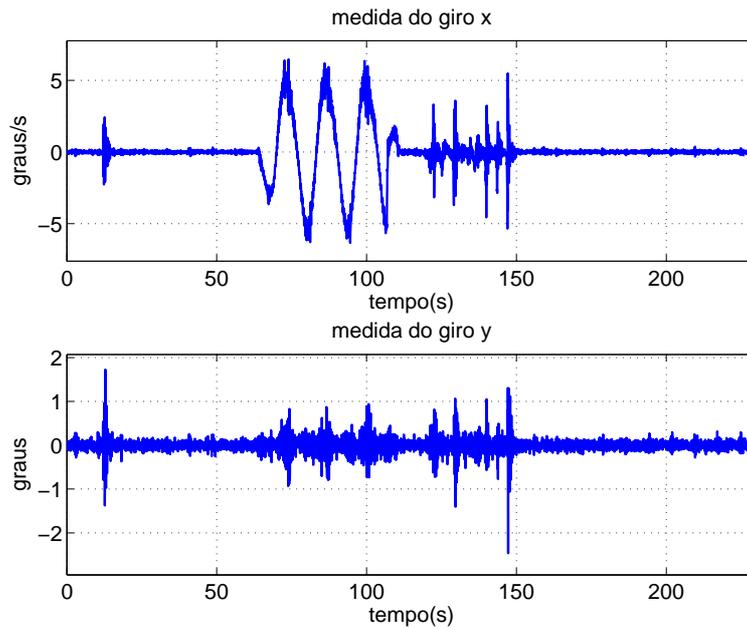


Figura 5.6: medidas dos sensores giroscópicos x (superior) e y (inferior) para experimento com movimento de balanço e caturro constante

movimento de *roll*, o movimento externo se resume a rotações ao redor da direção para a qual a linha de visada aponta, não sendo necessária compensação.

Na Fig. 5.6, são vistas as medidas dos sensores giroscópicos e o movimento de balanço é bastante nítido na medida do giro x . Repetindo a análise anterior, pode-se observar que um pequeno *pitch* é medido conforme visto na Fig. 5.7. Sobrepondo as curvas, observa-se na Fig. 5.8 um acoplamento bastante similar ao caso anterior entre as medidas de *pitch* e *roll*.

Este erro na medida de *roll* reflete-se no desempenho, uma vez que o controle tenta compensá-lo no ângulo de elevação. Na Fig. 5.9 observa-se um movimento de baixa amplitude em elevação, correspondendo a esta compensação. Nesta mesma imagem se pode observar o erro obtido, mostrando que o controle tem um bom desempenho, embora siga uma referência corrompida. O erro em radianos pode ser visto na Fig. 5.10.

5.1.3 Primeiro experimento de estabilização dos movimentos de balanço e caturro

Após os experimentos com movimentos isolados de caturro e balanço, o natural é justamente obter resultados para combinações destes movimentos. Para isto, são utilizados movimentos idênticos aos registrados anteriormente, mas de forma simultânea, isto é, tem-se um *roll* de 10.5° e período $12.66s$, junto a um movimento de *pitch* de amplitude de 6.5° e um período aproximado de $12.93s$. Estes perfis são

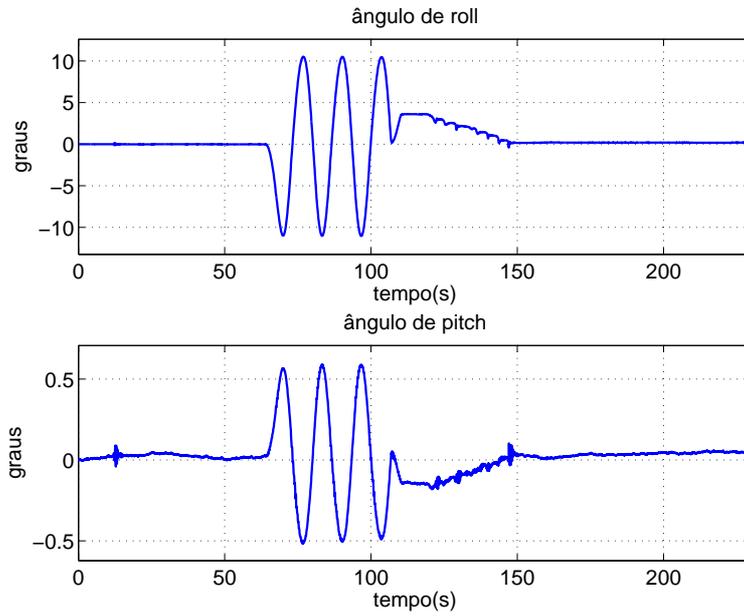


Figura 5.7: ângulos de *roll* (superior) e *pitch* (inferior) para experimento com movimento de balanço e caturro constante

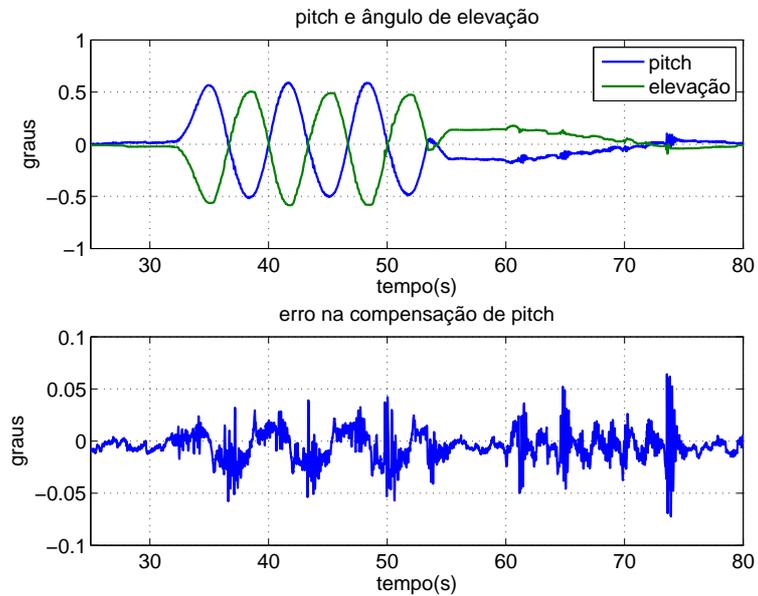


Figura 5.8: ângulos de *roll* e *pitch* aumentado 20x para experimento com movimento de balanço e caturro constante

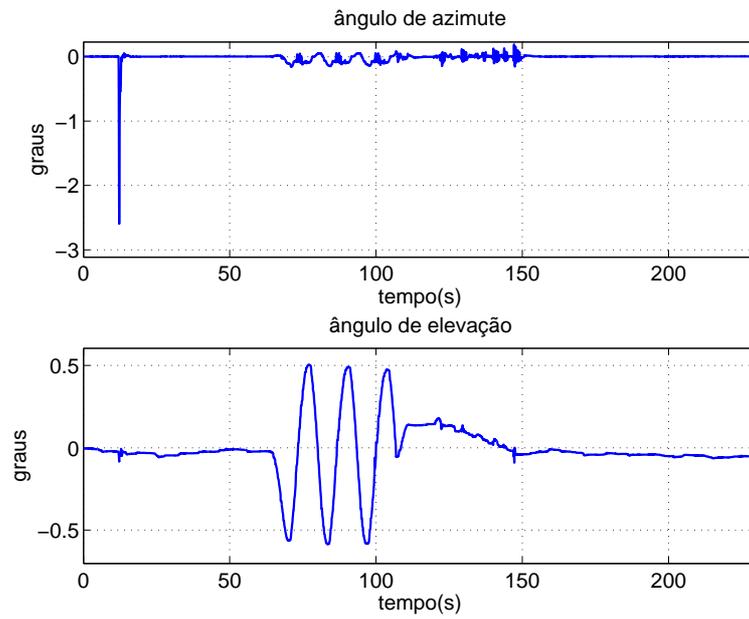


Figura 5.9: ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para experimento com movimento de balanço e caturro constante

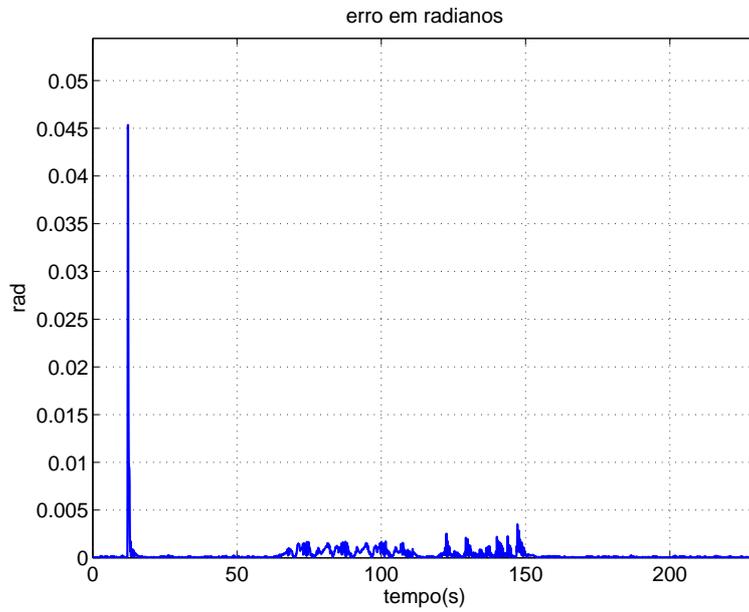


Figura 5.10: erro em radianos para primeiro experimento com movimento de balanço e caturro constante

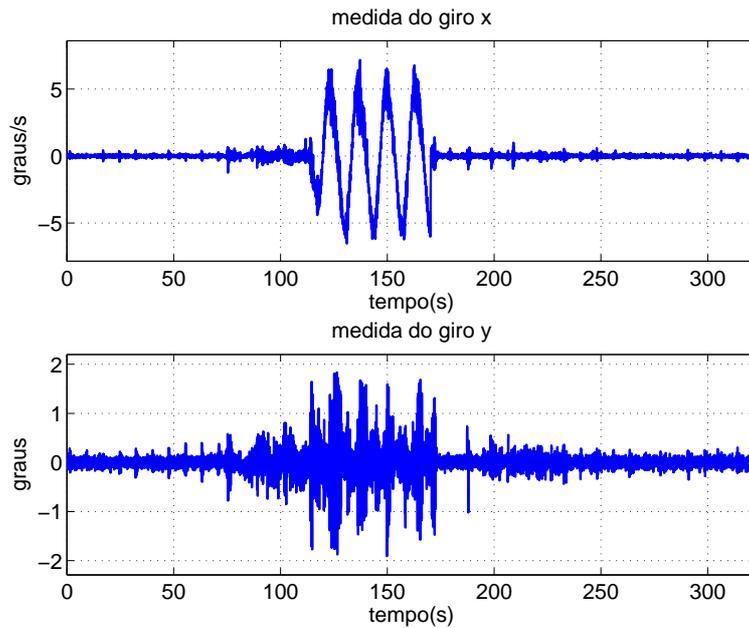


Figura 5.11: medidas dos sensores giroscópicos x (superior) e y (inferior) para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro

encontrados na Fig. 5.12.

Note que neste caso, como há combinação dos movimentos, o erro na estabilização já não depende somente da relação entre elevação e caturro, sendo calculado através da medida de orientação em relação à linha de visada desejada. Este erro pode ser visto na Fig. 5.14, e pode-se ver que a menos da presença de alguns picos de maior amplitude, este erro é inferior a $6mrad$.

Estes picos podem ser explicados pela presença de variações bruscas nos ângulos de elevação e azimute, vistas na Fig. 5.12. Note que são variações de alguns graus apenas, mas que representam um impacto significativo em proporção ao erro normalmente observado.

5.1.4 Segundo experimento de estabilização dos movimentos de balanço e caturro

O experimento seguinte é bastante similar ao anterior, com alguma diferença nos perfis de *roll* e *pitch*, vistos na Fig. 5.16. Além disso, o sistema é inicializado com um rumo diferente de zero, note que o ângulo de azimute inicial é próximo a 12° , indicando que a linha de visada não aponta na direção do eixo x .

Calculando-se o erro entre a linha de visada obtida e a desejada, obtém-se o perfil da Fig. 5.17, bastante razoável, uma vez que o erro máximo é próximo a $6mrad$. Os ângulos de compensação são vistos na Fig. 5.16.

Este teste mostra que um rumo não nulo não introduz erros no sistema, uma

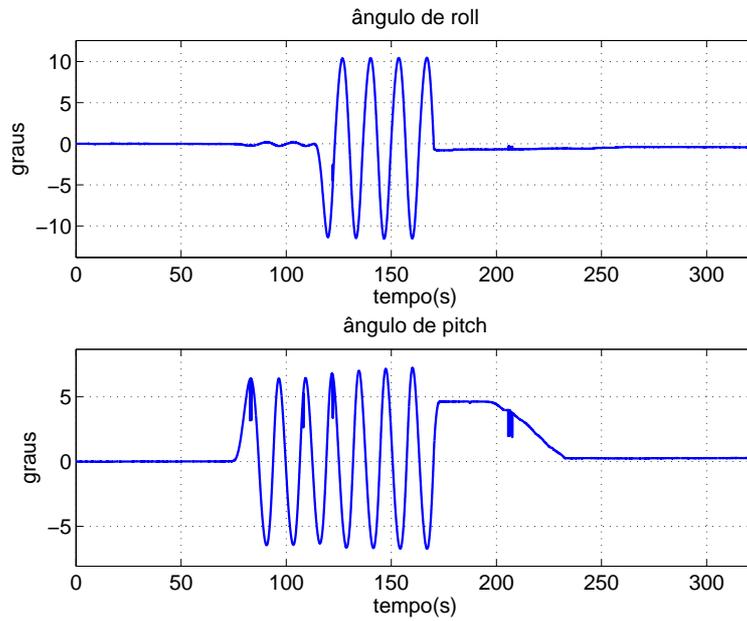


Figura 5.12: ângulos de *roll* (superior) e *pitch* (inferior) para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro

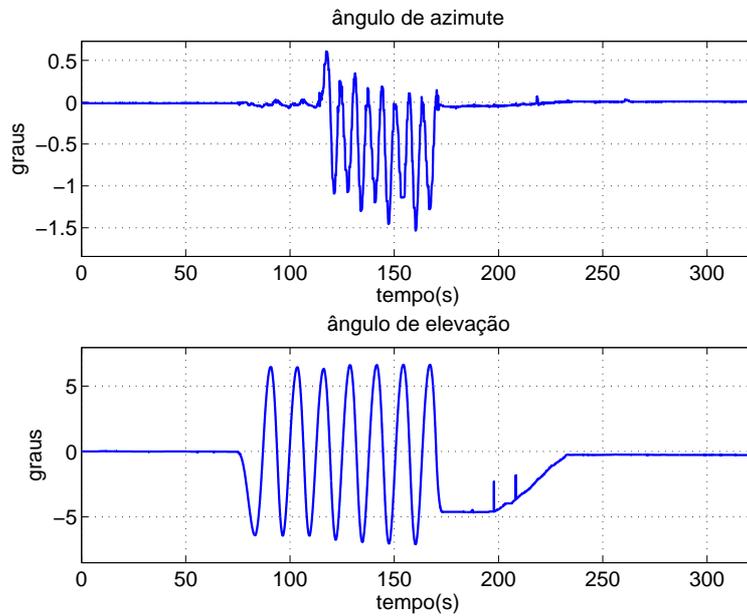


Figura 5.13: ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro

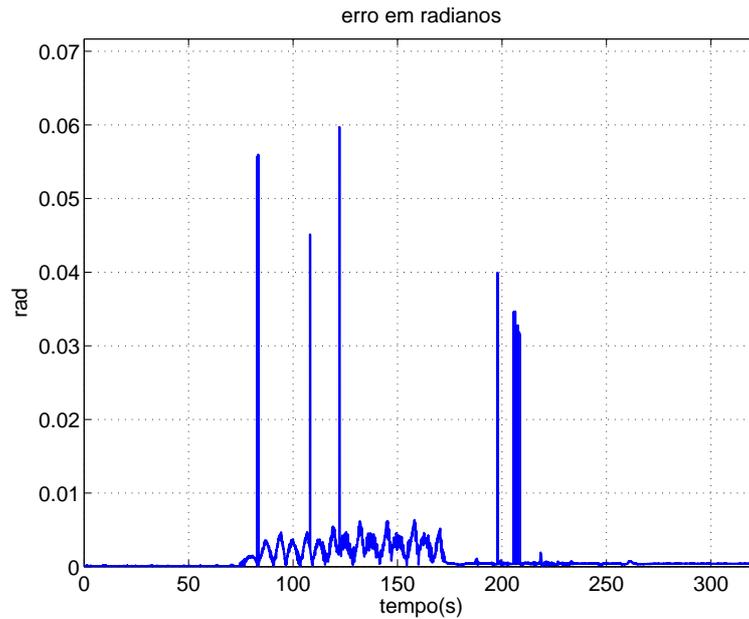


Figura 5.14: erro em radianos para o primeiro experimento com movimento de balanço e caturro

vez que este seja invariante. De fato, a estabilização se dá tomando outra direção como linha de visada, embora o movimento a ser estabilizado ainda seja apenas de balanço e caturro.

5.2 Ensaios das malhas de controle dos motores de azimute e elevação

A fim de avaliar o desempenho das malhas de controle, adquiriu-se os sinais de referência das malhas de azimute e elevação, isto é, os ângulos desejados. Espera-se um erro não-nulo, dadas as características de seguimento dos controladores utilizados. No entanto, busca-se quantificar a magnitude deste erro e avaliar a possibilidade de melhoras na malha de controle.

Para os ganhos utilizados, os erros são bastante reduzidos. Na Fig. 5.18, observa-se o erro em azimute, de amplitude próxima a $2mrad$; já em elevação, este valor sobe para $5mrad$, conforme a Fig. 5.19. Esta diferença é compreensível quando se observa que o movimento de elevação é de amplitude razoavelmente maior que o de azimute, de forma que, proporcionalmente, o erro é da mesma ordem de grandeza.

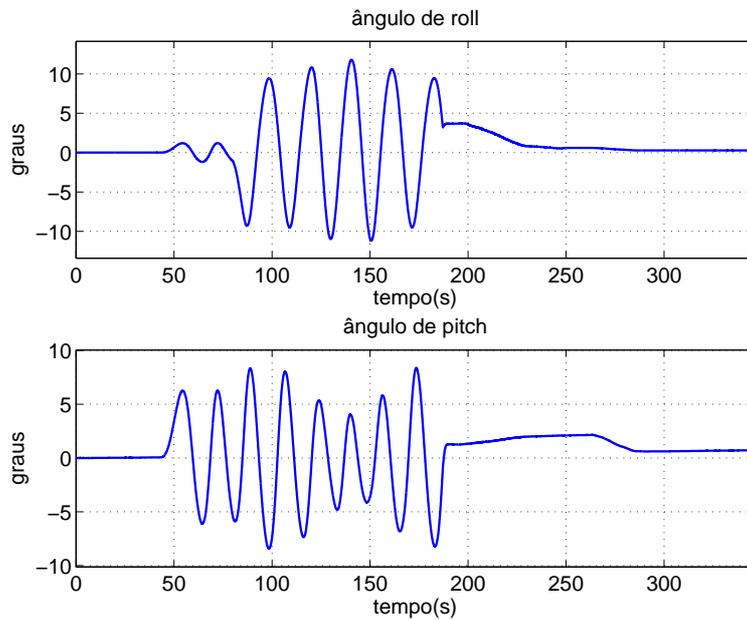


Figura 5.15: ângulos de *roll* (superior) e *pitch* (inferior) para o segundo experimento com movimento de balanço e caturro

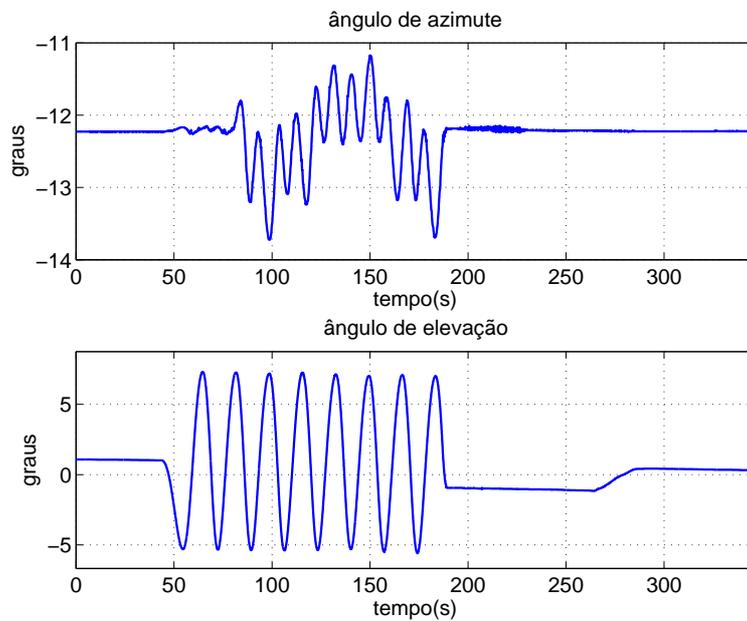


Figura 5.16: ângulos de azimute (superior) e elevação (inferior) para o segundo experimento com movimento de balanço e caturro

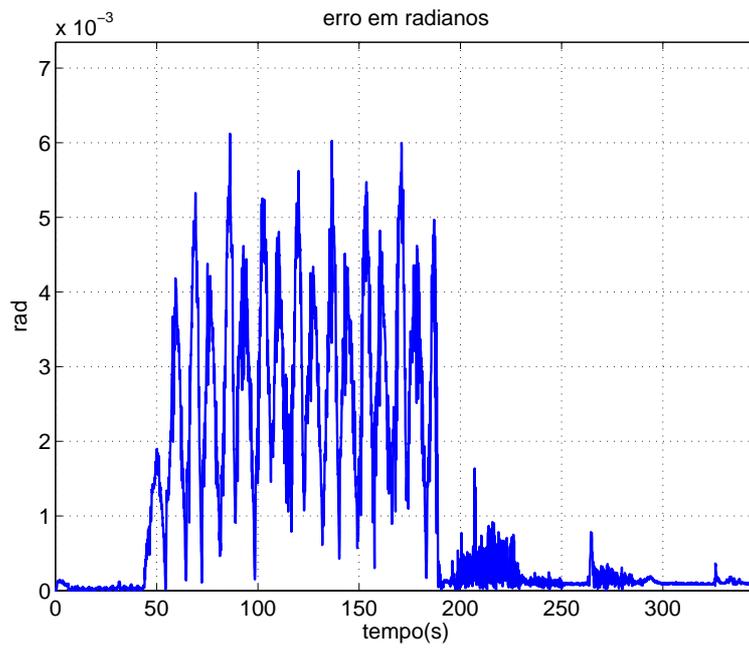


Figura 5.17: erro em radianos para o segundo experimento com movimento de balanço e caturro

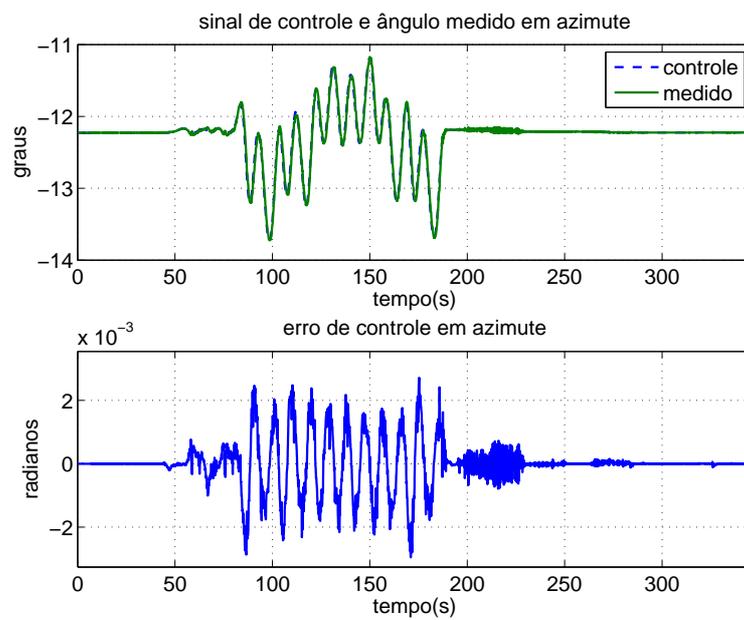


Figura 5.18: erro em radianos para o controle de azimute

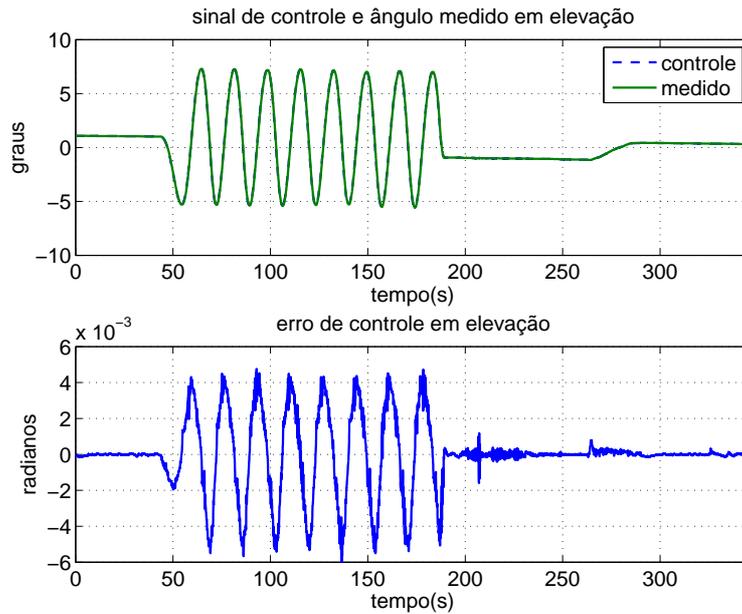


Figura 5.19: erro em radianos para o controle de elevação

5.3 Perfis de pista obtidos com veículo instrumentado

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema de estabilização uma condição real de operação, foram feitos experimentos a fim de obter dados que representassem um perfil real de pista. Assume-se neste caso a necessidade de estabilizar uma plataforma sobre um veículo movendo-se em uma superfície com obstáculos, causando perturbações na linha de visada, e percorrendo um percurso, ou seja, efetuando manobras intencionais.

Para obtenção destes resultados, um veículo foi instrumentado com diversos sensores e foram adquiridos diversos conjuntos de dados referentes ao passeio deste veículo em uma pista contendo obstáculos. Foram utilizados os seguintes sensores:

- Dois conjuntos de sensores giroscópicos, um medindo dois eixos e outro medindo o terceiro eixo separadamente;
- Dois conjuntos de acelerômetro de três eixos;
- Uma unidade inercial, com giroscópicos, acelerômetros e magnetômetros.

Os sensores giroscópicos de dois eixos utilizados neste experimento são idênticos àqueles utilizados no sistema implementado, sendo esta a importância de sua presença aqui. No entanto, para uma análise mais cuidadosa e para uma melhor previsão do desempenho por simulação, é interessante ter medidas ao redor dos três

eixos. Um terceiro sensor é empregado com esta finalidade, embora seu posicionamento e a ortogonalidade entre os sensores não seja extremamente precisa.

Como o algoritmo baseia-se nas medidas de sensores giroscópicos, os acelerômetros terão pouca utilidade nesta análise em particular, podendo posteriormente ser utilizados na obtenção do deslocamento linear do veículo a fim de permitir *pointing* além da estabilização.

Uma vez que uma unidade inercial é disponível, dela serão retirados os dados utilizados a serem predominantemente utilizados. A justificativa para isto é que as medidas encontram-se em sincronismo e que a calibração de ortogonalidade entre os eixos é mais cuidadosa. Isto porque pela falta de um sistema de acionamento para aquisição de todos os sensores simultaneamente estes tinham de ser iniciados de forma separada, gerando disparidades das medidas em relação ao tempo.

Além disso, em uma unidade inercial são disponíveis medidas diretas de orientação, como *roll-pitch-yaw* do veículo, que teriam de ser obtidas através de integrações se utilizadas as medidas dos giroscópios. A vantagem aqui é que estes ângulos são obtidos através de uma fusão dos dados de giroscópios, acelerômetros e magnetômetros, tratando-se assim de uma estimativa robusta da orientação.

Por outro lado, as medidas do sensor giroscópico de dois eixos pode ser usada para fins de comparação, sendo possível avaliar a precisão nos cálculos do algoritmo e compará-las com o observado experimentalmente.

Um ponto interessante que é também resultado desta análise é a obtenção de um padrão nas medidas, como por exemplo quais as velocidades máximas observadas em *pitch* e *roll* numa condição real de operação. Estes valores devem ser levados em conta na calibração do sistema e na estimativa do máximo desempenho possível de ser alcançado dentro destas condições.

Antes de qualquer análise matemática, é possível inferir diversas informações sobre o perfil de *roll-pitch-yaw* medido pela unidade inercial no domínio do tempo. Observando a Fig. 5.20 pode-se notar que a trajetória percorrida é fechada, composta de quatro curvas de aproximadamente 90° todas no sentido anti-horário. Note que o movimento inicia-se com um rumo de -180° , o que indica, no sistema de coordenadas inercial, que o veículo inicia orientado para o sul. São observados saltos entre -180° e 180° , o que é natural já que fisicamente retratam duas condições próximas de orientação.

A curva da Fig. 5.21 mostra a medida do sensor giroscópico que capta a velocidade angular ao redor do eixo z . De fato, as velocidades envolvidas são relativamente baixas, visto que o valor máximo é próximo a $20^\circ/s$, o que ratifica a escolha utilizada em simulação no capítulo 4.

Note que o *roll* medido é pequeno, inferior a 3° , de acordo com a Fig. 5.22. No entanto, a velocidade correspondente a este grau de liberdade não é tão pequena,

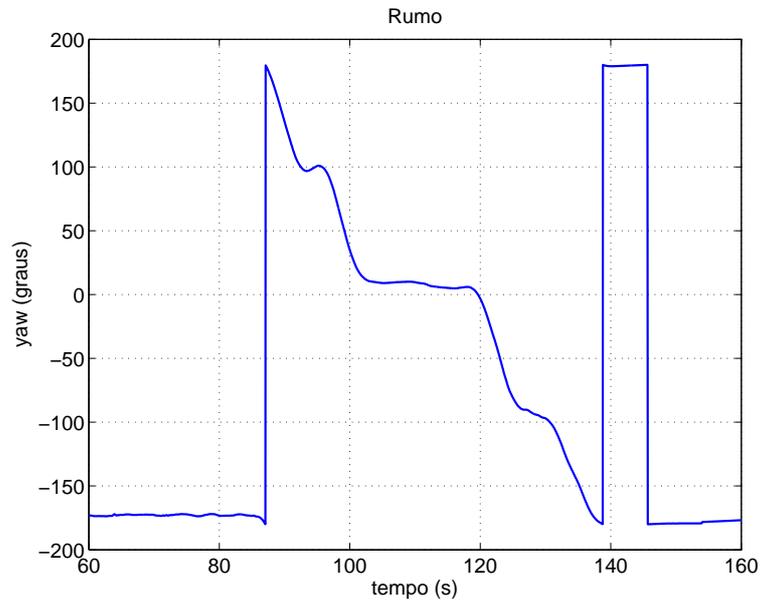


Figura 5.20: rumo medido pela unidade inercial ao longo do percurso

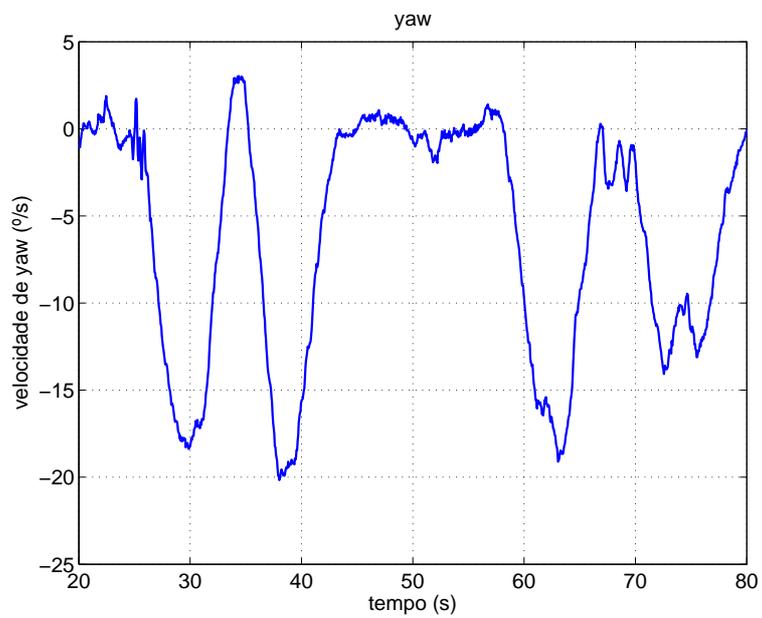


Figura 5.21: velocidade rumo medido pela unidade inercial ao longo do percurso

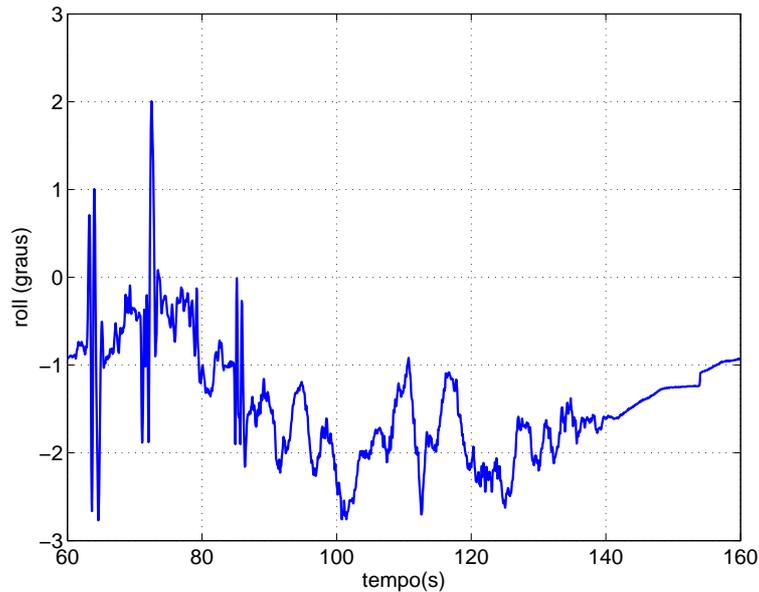


Figura 5.22: balanço medido pela unidade inercial ao longo do percurso

como mostra a Fig. 5.23, chegando à casa dos $15^\circ/s$, caracterizando um movimento de pequena amplitude mas de variação relativamente rápida.

No canal de *pitch*, a amplitude máxima observada é de aproximadamente 6° , vista na Fig. 5.24. As velocidades envolvidas são de magnitude mais elevada, chegando a $40^\circ/s$.

Conforme dito anteriormente, a pista possui um trecho com obstáculos, estes de dois diferentes tipos. Parte destes são simétricos, isto é, as rodas dianteiras/traseiras do veículo passam em obstáculos idênticos e simultaneamente; enquanto há também obstáculos assimétricos, de forma que apenas um par de rodas passa sobre estes. Tal fato é visível nos perfis de *roll* e *pitch* das medidas, conforme a Fig. 5.26.

Note que na primeira situação o *pitch* da plataforma possui uma variação bastante acentuada enquanto o *roll* é muito próximo de zero. No segundo caso, há variações tanto em *pitch* quanto em *roll*, indicando que o veículo passou por um obstáculo em apenas um dos lados.

Os espectros dos sinais de *pitch* para os dois tipos de obstáculos podem ser visualizados na Fig. 5.29 e concentram-se em frequências até $3Hz$. Para os sinais de *roll*, há componentes em frequências mais altas durante o primeiro obstáculo, porém de amplitude baixa. No obstáculo assimétrico, há frequências bem destacadas próximas a 1 e $2Hz$. O sinal de velocidade de rumo é o que apresenta as frequências mais baixas, o que era também esperado uma vez que o veículo muda de direção lentamente durante o percurso.

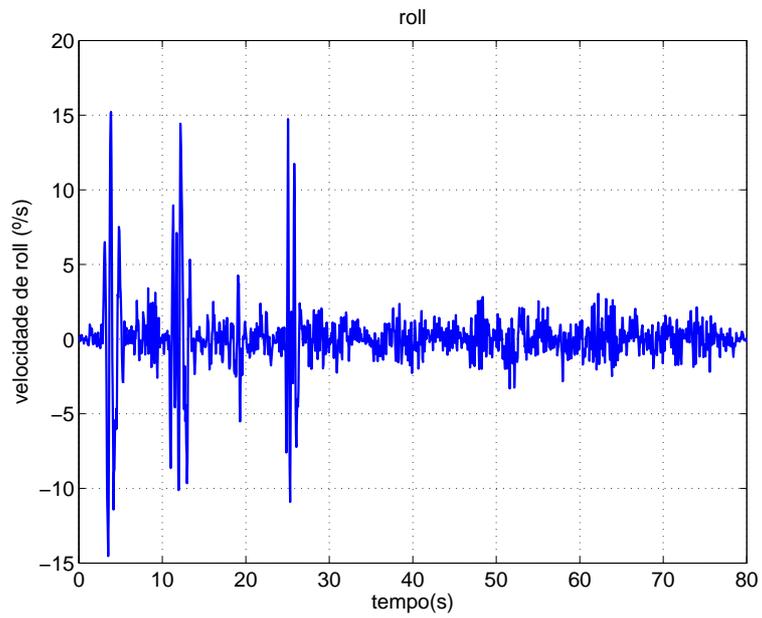


Figura 5.23: velocidade balanço medido pela unidade inercial ao longo do percurso

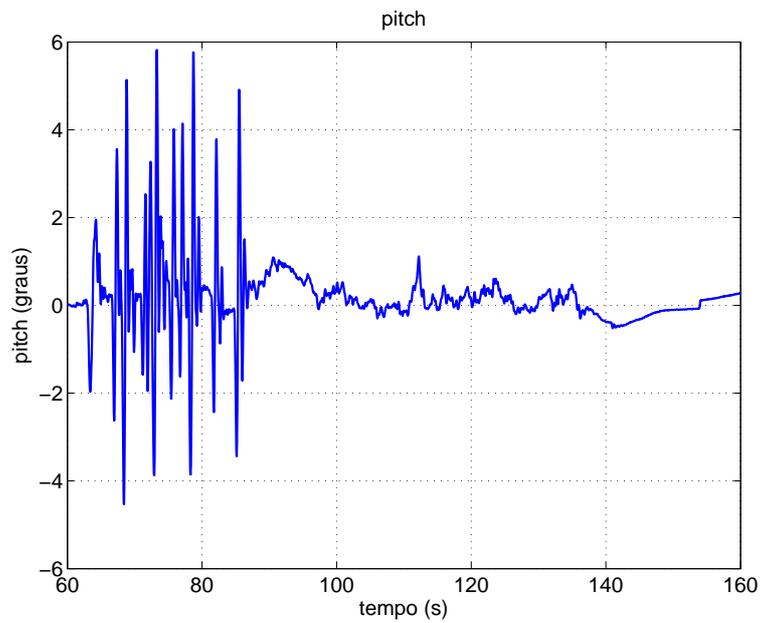


Figura 5.24: caturro medido pela unidade inercial ao longo do percurso

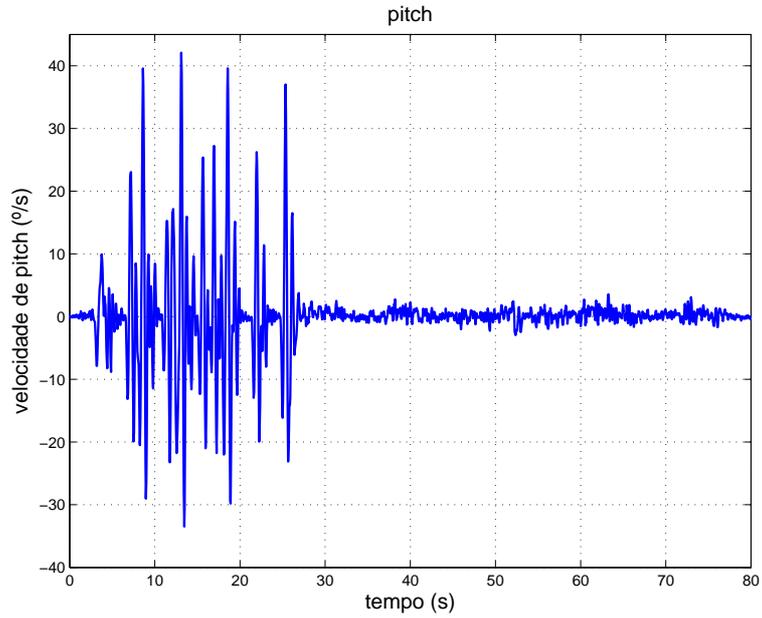


Figura 5.25: velocidade de caturro medido pela unidade inercial ao longo do percurso

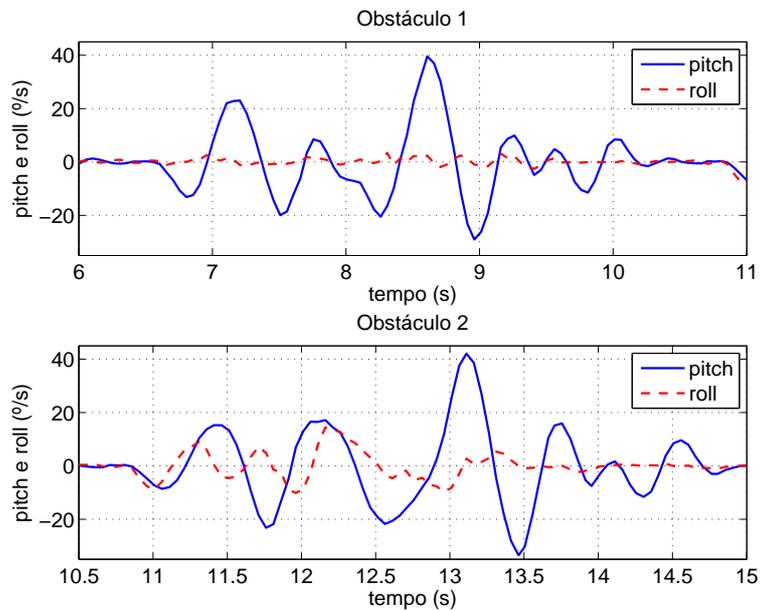


Figura 5.26: *roll* e *pitch* para a) obstáculo simétrico e b) obstáculo assimétrico

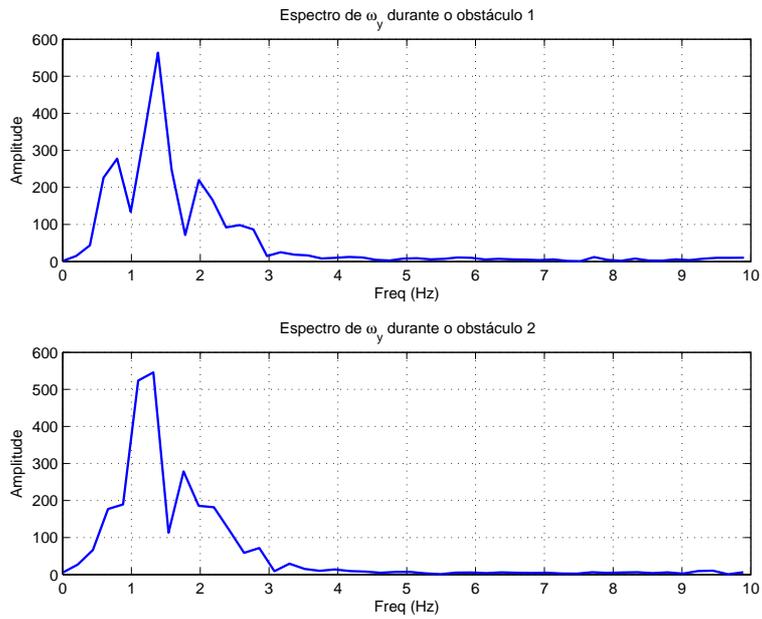


Figura 5.27: espectro de frequência para sinal de velocidade de *pitch* a) obstáculo simétrico e b) obstáculo assimétrico

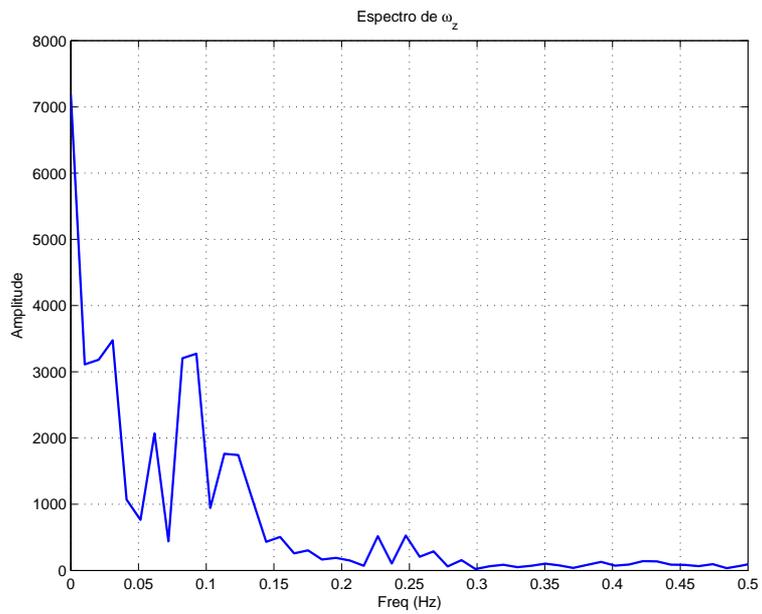


Figura 5.28: espectro de frequência para velocidade de rumo

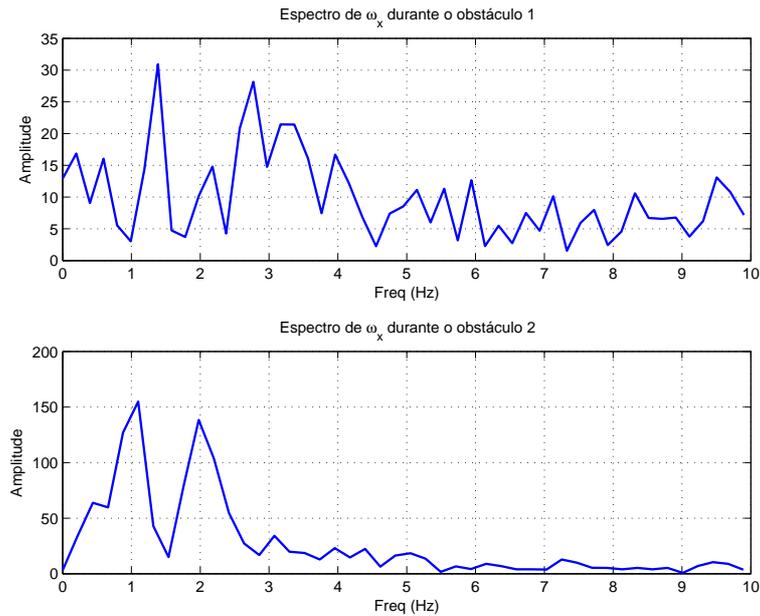


Figura 5.29: espectro de frequência para sinal de velocidade de *roll* a) obstáculo simétrico e b) obstáculo assimétrico

5.4 Simulação da estabilização de *roll* e *pitch* utilizando os dados adquiridos na pista

Os dados adquiridos do perfil da pista foram utilizados como entrada na simulação para observar o comportamento esperado do sistema em uma condição real de operação. De posse destes dados, é possível analisar quantitativamente a precisão obtida na estabilização bem como aspectos decorrentes de problemas como ruídos e desalinhamentos. O rumo do veículo é considerado invariante, a fim de simular o sistema nas condições para os quais os algoritmos foram projetados. Cabe salientar que o rumo obtido no experimento não é nulo, mas é anulado na simulação a fim de evitar o aparecimento de erros devidos a movimentos não contabilizados pelo algoritmo que podem mascarar outros pontos da análise.

A Fig. 5.30 mostra que os erros de controle, isto é, o erro entre os ângulos de azimute e elevação obtidos e desejados são relativamente pequenos, especialmente em azimute. No trecho da pista com obstáculos, o erro máximo em elevação é da ordem de 0.4° , levemente acentuado em virtude das velocidades relativamente altas de *pitch*.

Todavia, um resultado interessante aparece na Fig. 5.31, onde o ângulo de elevação parece desviar da horizontal mesmo nos trechos onde o *pitch* do veículo é pequeno. De fato, este trecho corresponde a uma porção da pista sem obstáculos, de forma que tanto no canal de *pitch* quanto *roll* as variações são esperadas pequenas.

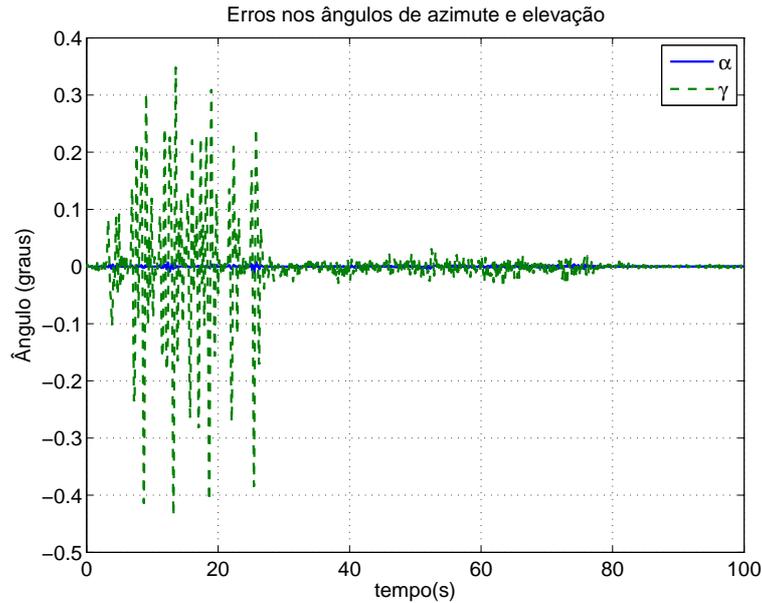


Figura 5.30: erro nos ângulos de azimute e elevação

À primeira vista, poderia-se supor que tal fato decorre, por exemplo, de erros de deriva dos sensores, uma vez que a velocidade angular medida é integrada. No entanto, observando a Fig. 5.32 pode-se notar um acoplamento entre o rumo real do veículo e o *pitch* medido. Note que, inicialmente, o *pitch* oscila em torno do zero em seguida começa a desviar, em quatro estágios bem definidos combinando com as quatro curvas do veículo, visíveis no canal de rumo.

Este resultado sugere um acoplamento entre as medidas causado por um desalinhamento entre os sistemas de referência do sensor e do veículo. Isto é, por algum mal posicionamento, as rotações ao redor do eixo z do sistema de coordenadas do sensor também são captadas pelo eixo y , de forma que ao calcular a orientação, uma variação de rumo é entendida como variação de *pitch*.

Como consequência, tem-se que o erro na estabilização cresce da mesma maneira, como se pode ver na Fig. 5.35, observam-se erros na orientação calculada, para os canais de *roll*, *pitch* e *yaw* e ainda discrepâncias entre que a velocidade angular estimada, denotada por ω_e , e a velocidade real.

5.5 Considerações Finais

Ao fim deste capítulo, algumas considerações importantes já podem ser feitas em relação ao desempenho do sistema e à modelagem realizada. Foram apresentados experimentos de estabilização de *roll* e *pitch* para situações distintas, levando a um resultado razoavelmente bom, uma vez que o sistema se mostrou capaz de estabilizar uma linha de visada a um erro relativamente baixo.

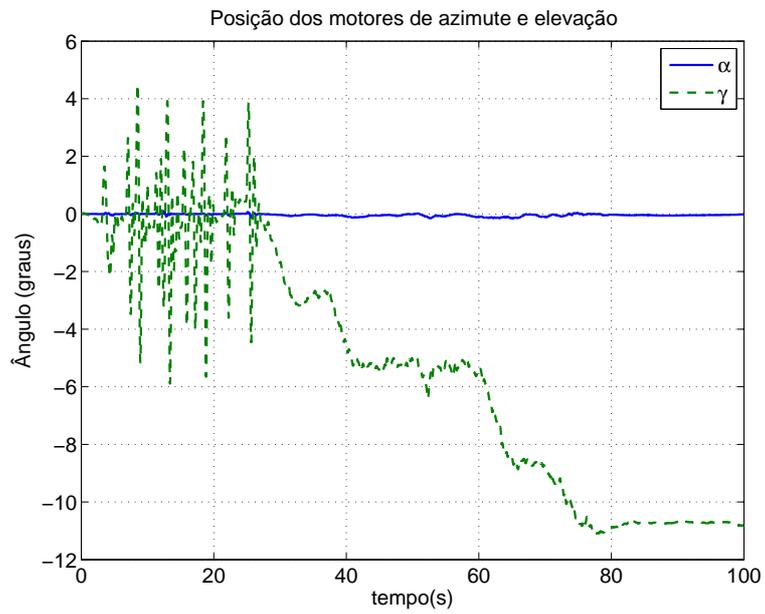


Figura 5.31: ângulos de azimute e elevação

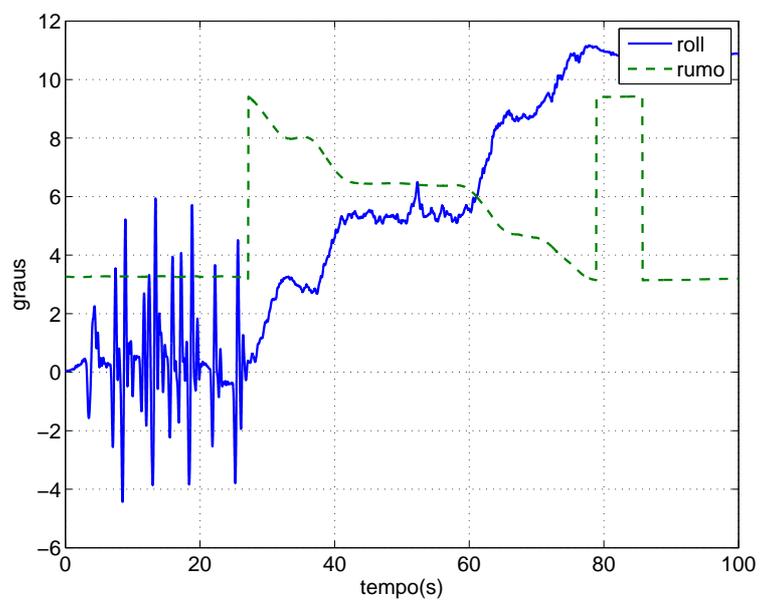


Figura 5.32: *pitch* calculado e rumo medido sobrepostos

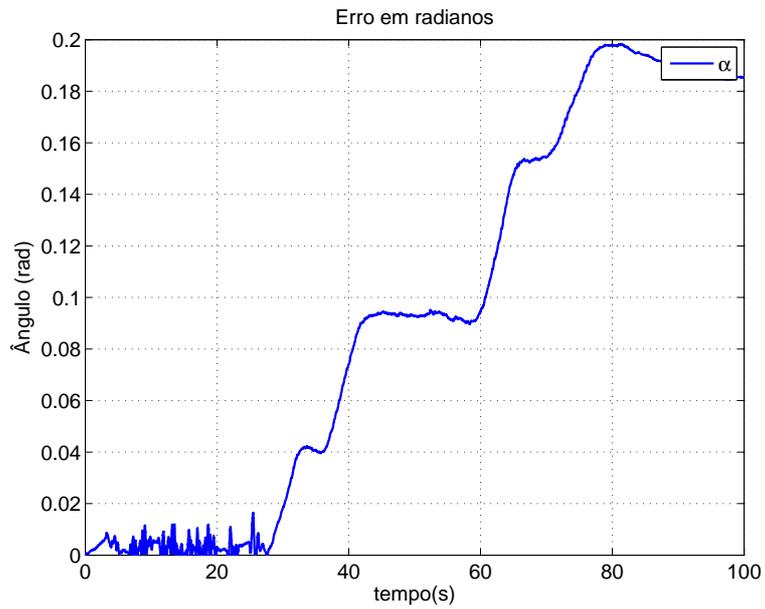


Figura 5.33: erro em radianos na linha de visada

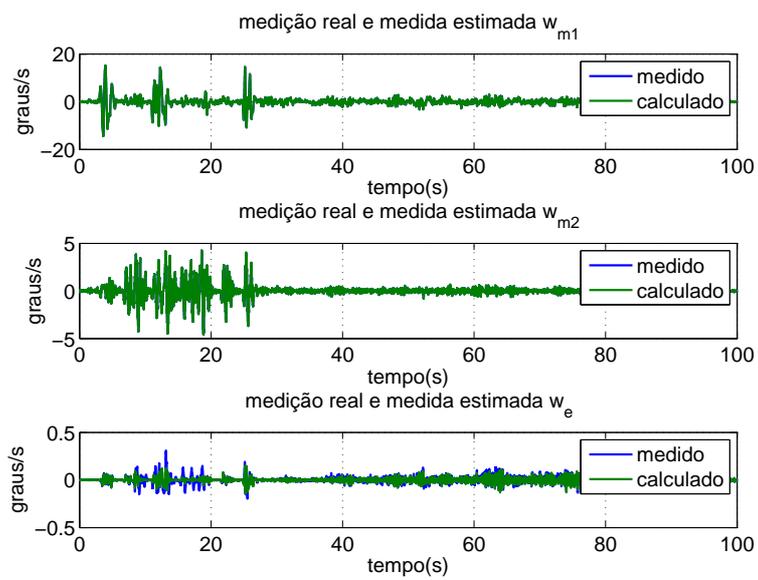


Figura 5.34: comparação entre medida estimada e velocidades angulares reais

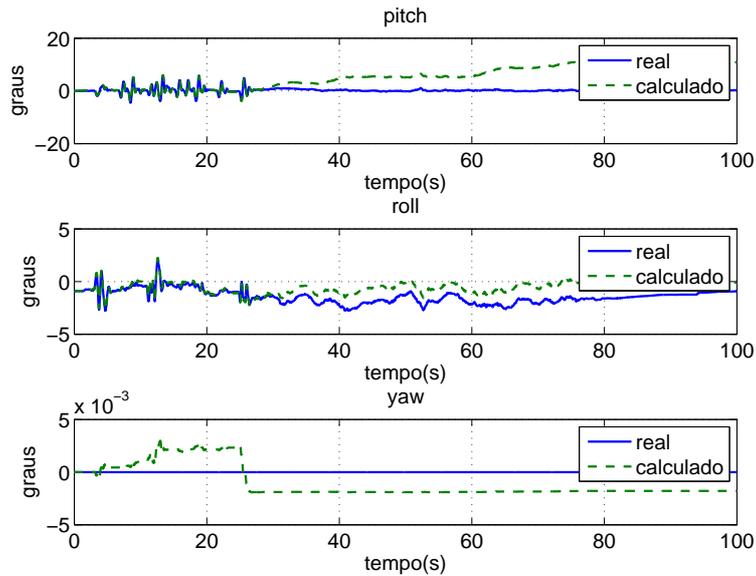


Figura 5.35: comparação entre *roll*, *pitch* e *yaw* calculados e medidos pelo sensor inercial

Cabe salientar aqui que esta medida do erro depende da aplicação desejada. Para câmeras em ROV's ou robôs, onde os objetos a serem filmados ou fotografados estão relativamente próximos, por exemplo, o erro tolerado pode ser até maior do que o aqui obtido. Para apontamento de armas ou sensores de longa distância, no entanto, uma precisão da ordem de miliradianos já está próximo ao limite aceitável. Note que um erro de $5mrad$, ordem do erro obtido, representa um erro de $5m$ para um alvo a $1km$, mas apenas $5cm$ para um anteparo a $10m$.

Um resultado também importante destes experimentos está no erro no cálculo da orientação inserido pelo desalinhamento entre o sistema de coordenadas do sensor e da plataforma/veículo, conforme visto na seção 5.1 e 5.3. Como os sensores são giroscópicos e medem velocidade angular, uma integração é necessária para o cálculo da posição, de forma que é necessário o conhecimento da condição inicial. Além disso, se os sensores não estiverem alinhados com o sistema de coordenadas da base, haverá um acoplamento entre as medidas.

Tal fato se mostrou bastante presente no experimento onde se utilizou os dados do perfil da pista em simulação. Nesta condição, o *pitch* da plataforma cresce nos trechos sem obstáculos, apresentando um forte acoplamento com o rumo do veículo. Note que neste caso, os erros de integração devido à condição inicial são minimizados, uma vez que esta é conhecida e utilizada na inicialização da simulação. Além disso, seriam eventualmente esperadas variações no *pitch* do veículo próximas às curvas devido a uma frenagem anterior a estas. No entanto, pode-se descartar este fato como causa principal dos desvios observados uma vez que neste caso o *pitch* deveria oscilar devido à suspensão do veículo e retornar à posição normal, isto é,

praticamente na horizontal. Como se pôde observar, não é o que acontece, de forma que os erros são sempre no sentido de se afastar da horizontal, sem retornar a ela.

Além disso, o problema do desalinhamento é um alvo para trabalhos futuros neste sistema. O erro entre a medida esperada e a obtida é uma função conhecida $f(\theta, \psi, \phi)$ (uma matriz de rotação), porém com θ, ψ e ϕ desconhecidos, sendo estes a medida de desalinhamento entre os sistemas de coordenadas. Possíveis soluções para contornar este problema podem ser obtidas através da teoria de controle robusto para perturbações não-lineares ou de desacoplamento adaptativo. Uma solução alternativa, porém, seria tratar a colimação dos sensores como problema de calibração e medir o desacoplamento, compensando-o no algoritmo.

Uma alternativa também a ser cogitada é a utilização de sensores adicionais, como por exemplo um conjunto de acelerômetros de mais baixo custo. Utilizando uma fusão de dados, seria possível obter uma medida adicional de *roll* e *pitch*, a partir das quais se poderia obter uma medida do desalinhamento.

Capítulo 6

Seguimento de objetos utilizando visão

Atualmente, um dos principais problemas da área de processamento de imagens é o chamado rastreo visual [4]. O processo consiste em encontrar similaridades entre diferentes imagens, obtidas em diferentes instantes de tempo, possivelmente de diferentes pontos. O que se busca aqui é obter um algoritmo capaz de reconhecer um objeto previamente escolhido - chamado assinatura visual - em uma imagem adquirida em outro instante de tempo. Para a aplicação em questão, consideram-se imagens sequenciais, de forma que o problema a ser resolvido é o de registro translacional. Assim, considera-se que não há diferenças significativas de rotação e aproximação ou afastamento entre os conjuntos de imagens.

Como a aplicação desejada é uma câmera em uma plataforma estabilizada, considera-se que as imagens são obtidas de forma sequencial e em intervalos de tempo igualmente espaçados e suficientemente curtos para que a movimentação do alvo na tela possa ser tratada como lenta. Assim, o algoritmo busca registrar um objeto em imagens com um razoável grau de semelhança.

Há uma série de algoritmos disponíveis na literatura para o registro de imagens, de forma que diversas referências foram coletadas e organizadas nos artigos de Brown [6], e Zitová e Flusser [40]. No entanto, como observado em [4], a maior parte destes métodos apresenta bons resultados para câmeras estacionárias e de boa resolução.

Embora a câmera seja estabilizada, conforme a discussão anterior, alguns fatores dificultam o rastreo visual, como a baixa resolução das imagens geralmente adquiridas, as restrições de carga computacional presentes no sistema, o tamanho dos objetos de interesse, que podem ser pequenos, e a presença de movimentos do alvo, além de rotações e aproximações ou afastamentos entre o objeto e a câmera.

Com o objetivo de tratar este problema, este trabalho estuda a aplicação de dois algoritmos de rastreo visual no problema de seguimento de alvos em uma plataforma estabilizada; sendo um deles baseado em cor e outro de detecção de sequencial de

similaridades, baseado em correlação. O objetivo destes algoritmos é apenas obter a posição do alvo em coordenadas da câmera, a partir daí esta informação deve ser interpretada pelo controle de *tracking* que deve comandar os motores de azimute e elevação.

O primeiro algoritmo apresentado tem uma idéia bastante simples e baseia-se na cor do objeto. Embora seja pouco útil na prática pela fraca robustez, como será discutido na subseção 6.1, este algoritmo pode ser verificado em testes de laboratório pela baixa demanda computacional. Em seguida, apresenta-se na subseção 6.2 um algoritmo baseado em detecção de similaridades utilizando correlação proposto em [3] e aplicado em [4] para rastreamento visual em um ensaio de vôo.

É útil neste ponto introduzir a notação a ser utilizada, esta adotada a exemplo de [3]. A imagem na qual se busca a assinatura visual é denotada por S e tem dimensão $L_i \times L_j$, onde i e j são o número de pixels da assinatura. No caso de imagens coloridas considera-se o espaço de cor RGB, de forma que S_{RGB} é tridimensional, visto que cada cor primária é representada por uma matriz. Quando denotadas separadamente, serão utilizados os subíndices S_R , S_G e S_B . Em ambos os casos são utilizadas imagens quantizadas em 8 bits, uma vez que esta é uma escolha comumente usada. Desta forma, é possível escrever:

$$\begin{aligned} 0 \leq S_{cinza}(i, j) \leq 255 \\ 1 \leq i \leq L_i \\ 1 \leq j \leq L_j \end{aligned} \tag{6.1}$$

e, para imagens coloridas:

$$\begin{aligned} 0 \leq S_{RGB}(i, j, k) \leq 255 \\ 1 \leq i \leq L_i \\ 1 \leq j \leq L_j \\ 1 \leq k \leq 3 \end{aligned} \tag{6.2}$$

A janela contendo a assinatura selecionada será denotada por W cuja dimensão é $M_i \times M_j$, onde i e j novamente são os valores em pixels desta janela, e é definida analogamente:

$$\begin{aligned}
0 \leq W_{cinza}(l, m) &\leq 255 \\
1 \leq l &\leq M_i \\
1 \leq m &\leq M_j \\
L_i &< M_i \\
L_j &< M_j
\end{aligned}
\tag{6.3}$$

O caso onde W é uma matriz tridimensional é análogo ao anterior e portanto não precisa ser repetido. É útil ainda definir a matriz contendo um subconjunto de S , denotada como S_M :

$$\begin{aligned}
S_M^{i,j}(l, m) &\equiv S(i + l - 1, j + m - 1) \\
1 \leq l &\leq M_i \\
1 \leq m &\leq M_j \\
1 \leq k &\leq 3 \\
1 \leq i &\leq L_i - M_i + 1 \\
1 \leq j &\leq L_j - M_j + 1
\end{aligned}
\tag{6.4}$$

Como as dimensões M_i e M_j serão mantidas inalteradas, cada subimagem S_M pode ser identificada unicamente pelo par (i, j) da matriz S onde se localiza seu canto superior direito. Estas definições são ilustradas na Fig. 6.1

O par compreendido pela janela de assinatura W e o conjunto candidato a conter esta assinatura na área de busca, S_M , será chamado de par de janelamento.

6.1 Rastreo visual baseado em cor

Uma maneira relativamente simples de identificar objetos em imagens é utilizando matrizes de cor. Esta estratégia pode ser usada, por exemplo, no controle por servo-visão de manipuladores robóticos e consiste em separar um objeto da imagem original usando a cor como critério. É claro, porém, que esta técnica só funciona pra rastreo de objetos específicos e é pouco robusta a fatores como iluminação e interferência de outros objetos do ambiente, sendo portanto pouco útil em aplicações de campo, por exemplo.

Ainda assim, esta ideia pode ser usada para testes em laboratório ou outros am-

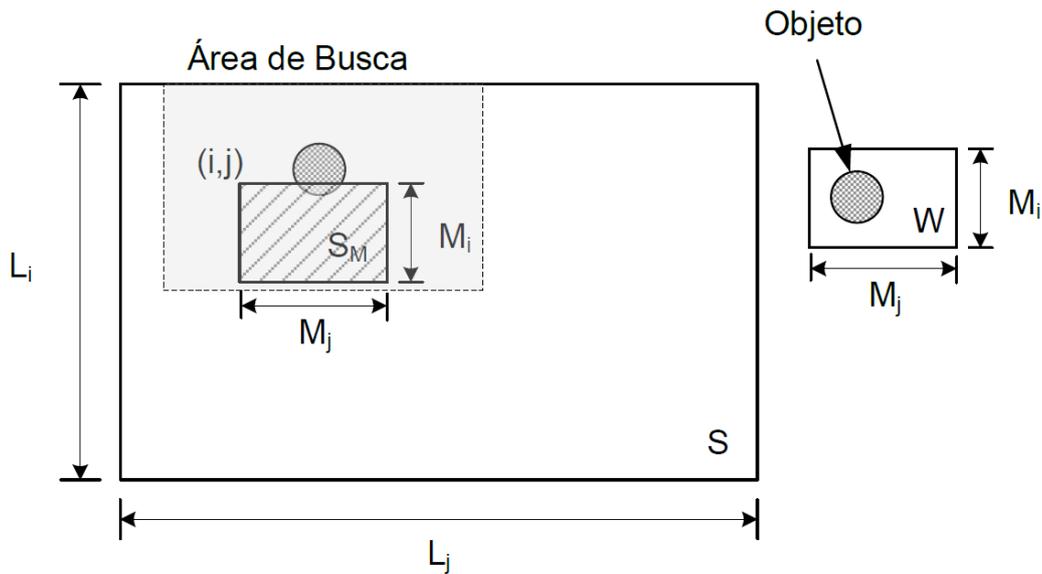


Figura 6.1: Representação da imagem, área de busca e par de janelamento

bientes cujas condições sejam favoráveis. Mesmo porque, neste contexto, busca-se discutir a forma como a imagem é utilizada na plataforma estabilizada para desempenhar o rastreamento de um determinado objeto. Este método foi escolhido para os testes mais simples por ser de fácil implementação e pouco custoso computacionalmente.

A representação de imagem no espaço de cores RGB pode ser entendida como um sistema de coordenadas onde cada eixo representa uma cor primária - vermelho, azul e verde - e as demais cores são obtidas por combinações de valores de intensidade destas. Assim, representa-se um pixel através de uma coordenada tripla onde $(1, 1, 1)$ corresponde à cor branca, intensidade máxima de todas as cores simultaneamente; e $(0, 0, 0)$ corresponde ao preto, ausência de cor. Um pixel de cor vermelho puro, por exemplo, receberia o valor $(1, 0, 0)$. Neste trabalho, utiliza-se uma quantização de 8 bits na imagem, o que significa a escala de cores é representada por números inteiros de 0 a 255 ao invés de números entre 0 e 1.

Note que, desta forma, uma imagem de tamanho 320×240 , por exemplo, necessita de uma matriz de dimensão $320 \times 240 \times 3$ para ser representada, uma vez que cada pixel necessita de três valores. Em um vídeo, este número aumenta visto que mais uma dimensão é acrescentada para cada instante de amostragem. De fato, esta é uma das desvantagens dos métodos de rastreamento visual que utilizam matrizes de cor, o esforço computacional para processar matrizes grandes e a quantidade de memória necessária para armazená-las.

Conforme observa [8], o espaço de cores RGB é bastante adequado para representar uma cor específica ao invés de uma faixa de cores, uma vez que se trata de

uma representação linear. Como neste caso busca-se seguir objetos com, no máximo, diferenças de tons da mesma cor, a representação é adequada.

O algoritmo utilizado para destacar na imagem um objeto com base na sua cor emprega os seguintes passos básicos, lista a seguir e ilustrados na Fig. 6.2

- Seleção da matriz correspondente ao objeto de interesse e conversão em imagem binária;
- Aplicação de *blur*;
- Aplicação de *threshold*;
- Cálculo do ponto central do objeto.

Note que excluir as matrizes relativas às cores verde e azul e utilizar apenas àquela referente ao vermelho não é suficiente para separar porções da imagem nesta cor, uma vez que a cor branca também possui uma componente de valor máximo no tom de vermelho, verde e azul. Assim, o algoritmo deve buscar por valores altos na matriz de vermelho e excluir os pixels que também possuem valores altos nas matrizes de verde e azul.

A escolha desses limiares é parte de um processo de calibração, sendo resultado de diversos testes. Mesmo que pareça ruim do ponto de vista prático, muitos métodos baseados em reconhecimento de padrões de cor também necessitam de procedimentos de calibração, como por exemplo em [8], onde se utilizam redes neurais para reconhecimento de cor da pele.

Para o experimento realizado, utilizou-se os seguintes limiares: $R > 135$ e $G = B < 100$ numa escala de 255 conforme citada anteriormente. Note que 135 é um valor relativamente baixo, pouco acima da metade do valor máximo. Porém, um limiar muito alto no tom de vermelho piora o desempenho do algoritmo em ambientes de muita iluminação. A imagem utilizada como teste é vista na Fig. 6.3, e o objeto que se quer identificar, naturalmente, é a esfera vermelha. A assinatura portanto é uma porção da imagem com as seguintes características:

$$\begin{aligned} S_R(l, m) &\geq 135 \\ S_G(l, m) &\leq 100 \\ S_B(l, m) &\leq 100 \end{aligned} \tag{6.5}$$

Uma vez separada a porção de interesse na matriz de vermelho, esta é convertida a uma imagem binária e as outras matrizes são descartadas. Naturalmente,

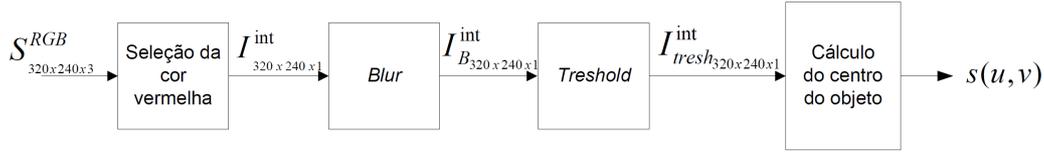


Figura 6.2: diagrama de blocos ilustrando os passos do algoritmo

o resultado é uma única matriz contendo apenas valores 0 ou 1, cuja imagem correspondente tem a aparência de um borrão, como se pode ver na Fig. 6.4. Note que devido à iluminação, alguns pixels do objeto são interpretados como branco e descartados, resultando em uma imagem com falhas ou regiões brancas dentro do contorno da esfera. Para facilitar a detecção do objeto, aplica-se um *blur* seguido de um *threshold*.

O algoritmo utilizado aqui para o desfoque da imagem é o mais simples possível: cada pixel é substituído pela média dos pixels vizinhos. A quantidade de pixels na vizinhança a serem tomados para esta operação também é uma escolha. Dadas as características da imagem, utilizar muitos pontos nesta operação resultará em um predomínio de pontos claros. Aqui, utilizou-se 16 pixels, correspondendo a um quadrado de quatro pixels em cada lado. O resultado é visto na Fig. 6.4 e é, naturalmente, uma imagem em escala de cinza. A equação para cada pixel após o *blur* é, portanto:

$$S_{blur}(i, j) = \frac{1}{16} \sum_i^{i+4} \sum_j^{j+4} S_{int}(i, j) \quad (6.6)$$

Por fim, é aplicado um *threshold* à imagem desfocada. Com isso o contorno do objeto é um pouco distorcido, mas eliminam-se pixels pretos isolados e regiões vazias, de forma que:

$$S_{resh}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{se } S_{blur}(i, j) > T \\ x & \text{se } S_{blur}(i, j) < T \end{cases} \quad (6.7)$$

Em seguida, são obtidos os índices correspondentes aos pixels extremos do objeto e o alvo é posicionado na média destes. O resultado é visto na Fig. 6.5, onde se pode ver que o objeto foi identificado com sucesso e o alvo foi devidamente posicionado.

As coordenadas do alvo são conhecidas, sendo esta a informação necessária para realimentação dos gimbals, uma vez que a partir desta se pode conhecer o erro nas coordenadas da tela.

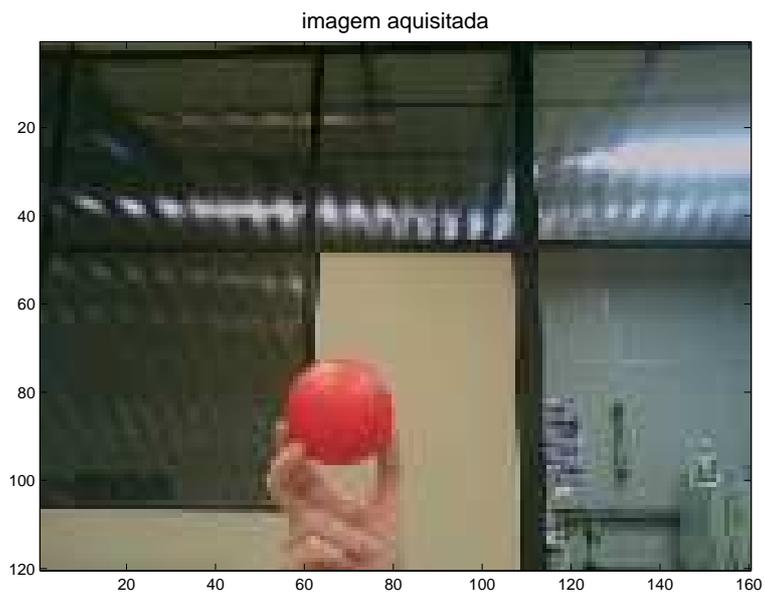


Figura 6.3: imagem adquirida

imagem em intensidade correspondente à cor vermelha

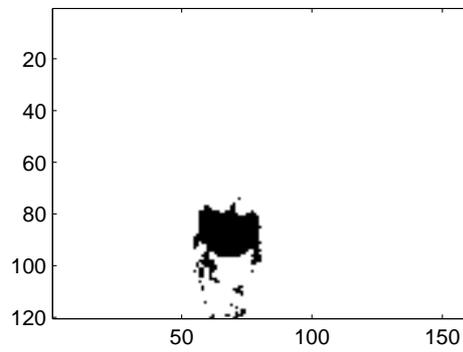


imagem em intensidade após o blur

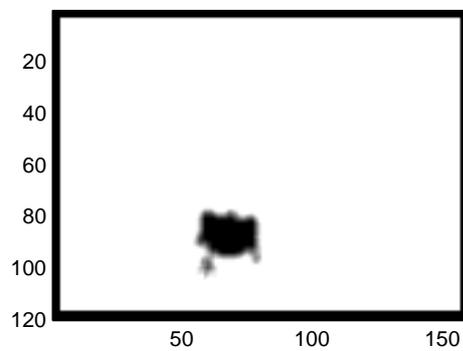


Figura 6.4: a) imagem obtida após a separação da cor vermelha b) imagem após o *blur*

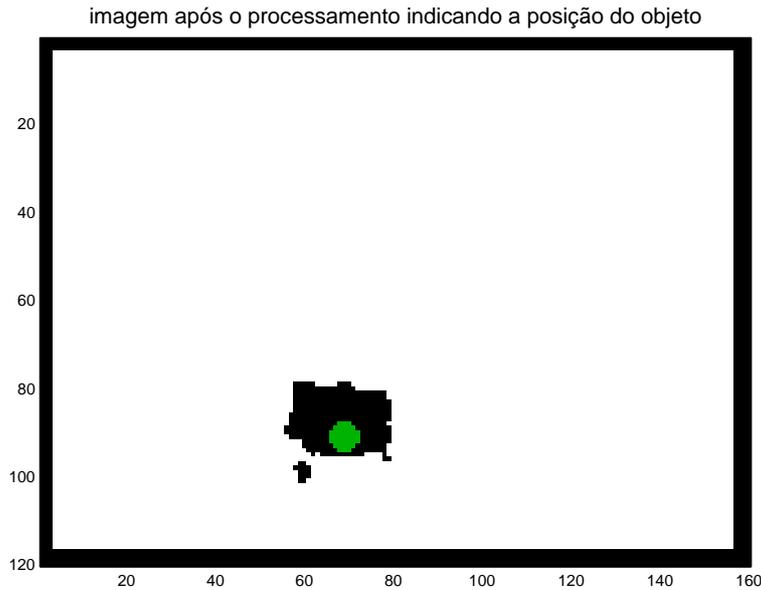


Figura 6.5: resultado final, mostrando o objeto identificado e o alvo posicionado

6.2 Rastreo visual por detecção de similaridades

Uma metodologia bastante empregada no registro de imagens e rastreo visual é a de detecção de similaridades. Conforme levantado em [40], este é atualmente o método mais empregado, dada sua facilidade de implementação. Existem diversas variantes desta técnica, de forma que algumas empregam correlação, como é o caso do escolhido para este trabalho.

A técnica aqui implementada segue o desenvolvimento apresentado por [3] e consiste em uma classe de algoritmos de detecção sequencial de similaridades por correlação (SSDA, *sequential similarity detection algorithm*). Esta idéia é aplicada em [4] para a realização de um ensaio de rastreo visual para imagens adquiridas por um veículo aéreo não-tripulado (VANT) em vôo, levando a bons resultados. Com base nos resultados deste trabalho, optou-se por aplicar estes algoritmos no problema da plataforma estabilizada, uma vez que as imagens adquiridas pelo VANT foram obtidas com uma câmera de baixa resolução, visando objetos em solo que não raro ocupavam um porção reduzida da imagem.

A detecção de similaridades se dá pela comparação de pares de janelamento, denotados anteriormente por W (assinatura) e S_M (conjunto candidato). A esta comparação se atribui uma medida da similaridade entre os dois conjuntos e é selecionado o par (i^*, j^*) para o qual o erro na comparação é o menor. Porém, ao invés de utilizar a correlação clássica como medida de comparação entre as duas imagens, define-se a seguinte erro, na forma normalizada [3]:

$$e(i, j, l_x, m_y) = \left| S_M^{i,j}(l_x, m_y) - \hat{S}(i, j) - W(l_x, m_y) - \hat{W}(i, j) \right| \quad (6.8)$$

onde

$$\hat{W} \equiv \frac{1}{M_i \cdot M_j} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{m=1}^{M_j} W(l, m) \quad (6.9)$$

e

$$\hat{S} \equiv \frac{1}{M_i \cdot M_j} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{m=1}^{M_j} S_m^{i,j}(l, m) \quad (6.10)$$

De forma que no caso ideal, onde $W = S_M^{i*,j*}$, este erro é nulo, o que não ocorre na correlação clássica. Na implementação do SSDA, um limiar T é estipulado, de forma que se conta o erro cumulativo da comparação do par de janelamento e armazenam-se as iterações necessárias para que este somatório ultrapasse o valor de T . As subimagens $S_M^{i,j}$ para os quais o número de iterações necessárias é baixo são candidatos fracos, e portanto logo descartados. Em contraponto, os conjuntos para os quais o número de iterações é alto indica uma alta correlação e possivelmente contém o objeto a ser rastreado.

Assim, gera-se uma superfície $I(i, j)$, onde cada ponto de referência recebe como cota o valor r do número de iterações necessário para ultrapassar o limiar de erro T , isto é:

$$I(i, j) = \left\{ r \mid \min_{1 \leq r \leq M_i \times M_j} \left\{ \sum_{n=1}^r e(i, j, l_x, m_y) \geq T \right\} \right\} \quad (6.11)$$

Uma maneira de economizar tempo e custo computacional é utilizar um limiar variável, isto é, um limiar de erro que aumente conforme o número de iterações aumenta. Desta forma, os candidatos fracos são eliminados ainda mais rápido. No entanto, a escolha da função que deve governar a variação de limiar pode não ser simples de ser projetada. Como ainda não há uma grande preocupação com a velocidade de processamento do algoritmo, os testes aqui apresentados.

Ainda, supõe-se que as imagens possuem um relativo grau de semelhança entre si, o que é razoável quando se pretende utilizar por exemplo imagens sequencias obtidas de uma câmera. Desta forma, restringe-se a busca a 1/4 da área total da imagem e esta área é escolhida com base na posição anterior do objeto.

6.3 Pré-Tratamento da Imagem

Durante os testes com o algoritmo de detecção de similiaridades, observou-se uma grande importância do pré-tratamento da imagem para aplicação do algoritmo. Para um bom funcionamento, é necessária a seleção de uma assinatura visual que possua textura suficiente para ser identificada em quadros posteriores. Ainda assim, a

presença de ruídos na imagem pode inviabilizar a utilização do algoritmo.

Em [4], os autores sugerem uma filtragem passa-baixas prévia da imagem utilizando um filtro Gaussiano, cujo *kernel* é dado na Eq. 6.12.

$$h_g(n_1, n_2) = e^{-\frac{(n_1^2+n_2^2)}{2\sigma^2}}$$

$$h(n_1, n_2) = \frac{h_g(n_1, n_2)}{\sum_{n_1} \sum_{n_2} h_g} \quad (6.12)$$

No entanto, para as imagens utilizadas, observou-se que a filtragem passa-baixas interferia de forma indesejável nas bordas dos objetos, que representam transições de alta frequência [6]. Assim, foram realizados diversos testes para o pré-tratamento, de forma que foram obtidos melhores resultados utilizando filtros que salientam bordas horizontais ou verticais.

Filtros empregando os *kernels* da Eq. 6.13=6.14, por exemplo, ressaltam as bordas horizontais, de forma que para ressaltar as bordas verticais, basta substituir H por H^T .

$$H_{prewitt} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$H_{sobel} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Outro filtro útil neste tratamento é o chamado *unsharp*, que ao contrário do que o nome pode indicar, intensifica o contraste utilizando o negativo de um filtro Laplaciano. O resultado visual é o de bordas mais destacadas e há para este filtro, um parâmetro α de ajuste variando entre 0.0 e 1.0. O *kernel* é dado na Eq. 6.15.

$$H_{unsharp} = \frac{1}{\alpha + 1} \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha - 1 & -\alpha \\ -\alpha - 1 & \alpha + 5 & -\alpha - 1 \\ -\alpha & -\alpha - 1 & -\alpha \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Uma ilustração breve do efeito destes filtros aplicados a uma imagem qualquer é mostrada na Fig. 6.6, onde se observa o resultado da aplicação de um filtro gaussiano,

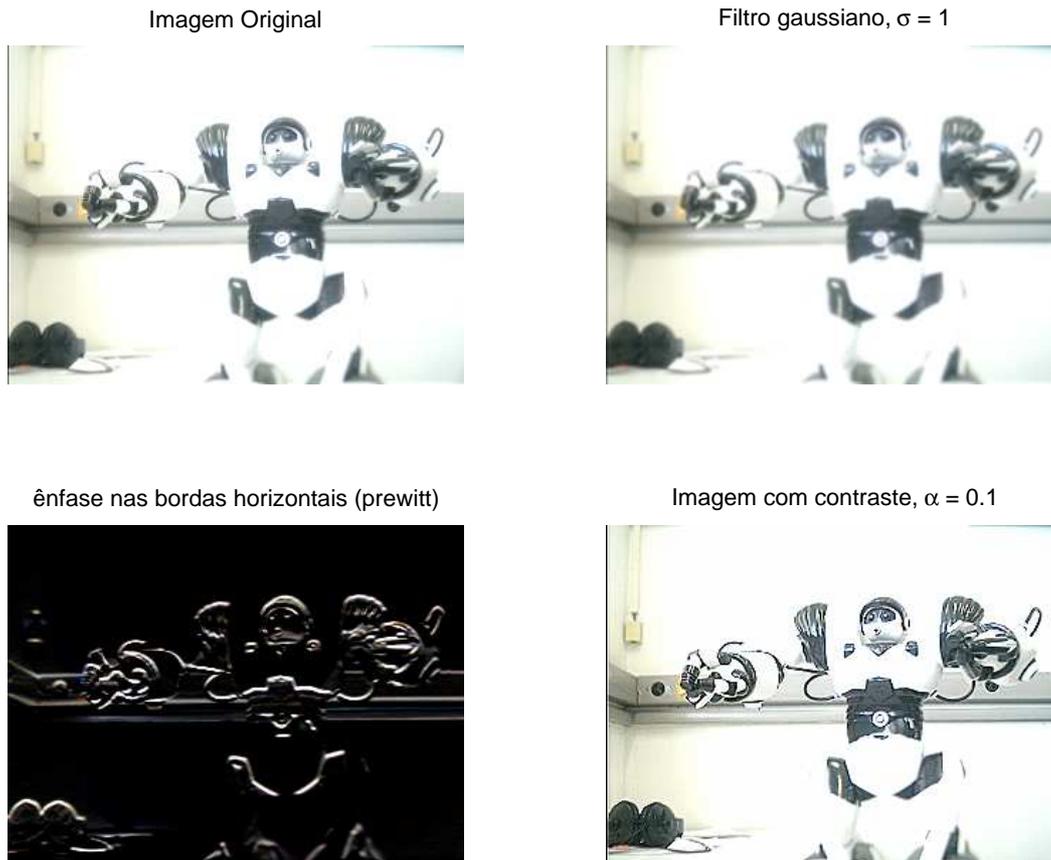


Figura 6.6: Efeitos de filtragem, a) imagem original, b) imagem com filtragem gaussiana, c) filtragem com ênfase nas bordas horizontais (*prewitt*), e d) filtro para intensificação de contraste (*unsharp*)

um *prewitt* e um de intensificação de contraste. Note que o filtro gaussiano tende a suavizar as bordas, o que pode dificultar a detecção do objeto. Para ser utilizado, deve ser calibrado de forma a não interferir demasiadamente nas transições de alta frequência [4]. Para a ênfase nas bordas horizontais, o resultado é interessante, embora os experimentos realizados indiquem que este deve ser utilizado com cautela, podendo todavia ser útil de acordo com a geometria do objeto e a condição sob a qual se quer realizar o rastreamento. Já a opção de intensificação de contraste salienta também as bordas sem interferir demasiadamente na imagem, sendo portanto uma alternativa interessante para o pré-tratamento.

6.4 Resultados de Experimentais

Os algoritmos anteriormente apresentados foram testados em laboratório para imagens adquiridas em diferentes condições e com diferentes níveis de complexidade, similares a situações possíveis de operação. Os resultados mais interessantes são resumidos nesta seção, de forma a buscar cobrir ao menos grande parte dos

aspectos relacionados aos algoritmos de imagem, especialmente àqueles de detecção de similaridades.

Foram usados três conjuntos de imagem. No primeiro, se busca localizar um pequeno objeto em um espaço com poucos outros elementos, uma vez que nestas condições o algoritmo deve apresentar um desempenho ao menos razoável. A outra sequência utiliza um braço robótico, onde se busca reconhecer seu efetuador. Estas imagens foram escolhidas a fim de mostrar que a técnica é passível de ser utilizada em problemas de servo-visão robótica. Por fim, utiliza-se outro conjunto de imagens de um pequeno avião em vôo, por ser esta uma aplicação real para a qual o algoritmo e todo o sistema de *pointing* pode ser empregado.

Ainda, optou-se por comparar imagens adquiridas em momentos diferentes e não imediatamente sequenciais. O objetivo é comparar imagens com graus menores de semelhança, reforçando-se isto ao fato de que um bom desempenho em termos de reconhecimento de similaridades nestas condições tende a significar também um bom desempenho quando o algoritmo é aplicado a cada intervalo de amostragem.

6.4.1 Imagem de objeto simples em laboratório

Neste conjunto de imagens, a assinatura escolhida é uma pequena trena de medição sobre uma mesa de laboratório. Por mais que possa parecer uma escolha pouco usual, esta configuração foi escolhida por permitir que o objeto se sobressaia na imagem, de forma que a assinatura contém textura suficiente para ser reconhecida.

A Fig. 6.7 mostra o quadro onde foi selecionada a assinatura, de forma que a janela é quadrada de dimensão 50×50 pixels. Após diversos testes, optou-se pela filtragem de ênfase nas bordas horizontais, uma vez que esta retornou melhores resultados do que os filtros gaussiano e de intensificação de contraste.

O algoritmo aplicado neste caso foi o de limiar de erro variável (MITSA) [3], optando-se pela seguinte função de *threshold*:

$$T = \begin{cases} T_0 + r \cdot t & \text{se } r > 0 \text{ e } r \leq r_{max} \\ T_{max} & \text{se } r > r_{max} \end{cases} \quad (6.16)$$

Onde os valores escolhidos, após alguns ajustes, foram $T_0 = 1$, $T_{max} = 4$ e $t = 2$. No primeiro quadro utilizado para comparação, há um movimento translacional entre a câmera e o objeto, como se pode observar na Fig. 6.8. Note que o algoritmo selecionou a porção da imagem contendo o alvo desejado com boa precisão, de forma que todo ele se encontra dentro da janela especificada. A superfície de correlação entre as duas imagens, vista na Fig. 6.9, mostra um pico acentuado para um ponto de referência (i, j) específico, sendo este o ponto de similaridade.

O segundo quadro utilizado para comparação apresenta uma condição mais difí-

primeiro quadro onde foi selecionada a assinatura

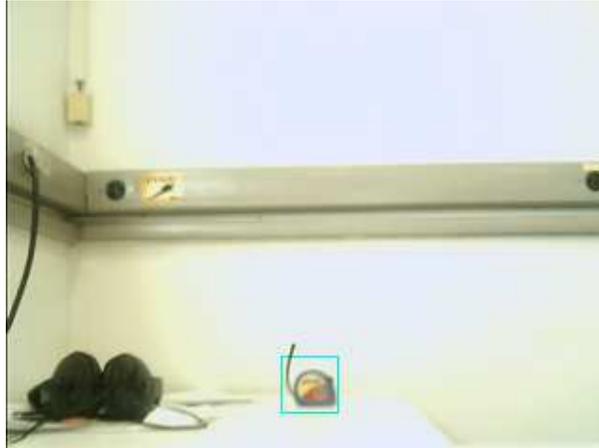


Figura 6.7: imagem onde se selecionou a assinatura visual

quadro posterior mostrando o rastreo da assinatura

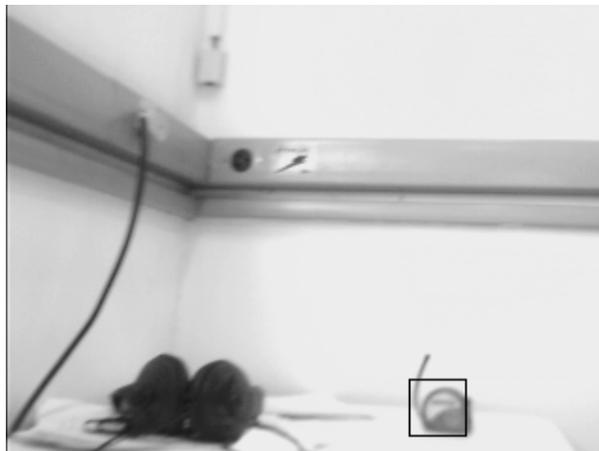


Figura 6.8: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

cil de realizar a detecção como se pode ver na Fig. 6.10. Além de uma aproximação entre câmera e objeto, há um movimento de rotação e a imagem possui um leve desfoque devido ao movimento da câmera. Ainda assim, o rastreo é bem sucedido. Na Fig. 6.11, pode-se ver novamente um pico de correlação, embora a superfície possua outros pontos com cotas mais altas, indicando uma necessidade maior de iterações para determinar o ponto de similaridade. Isto é, nestas condições o algoritmo apresenta uma convergência mais lenta.

6.4.2 Rastreo do efetuador de um manipulador robótico

O segundo conjunto de imagens representa uma condição de rastreo mais difícil do que a do caso anterior. Busca-se detectar nas imagens o efetuador de um manipulador robótico, conforme se vê na Fig. 6.12. Neste caso, espera-se uma dificuldade maior uma vez que há uma densidade maior de objetos na imagem, não permitindo

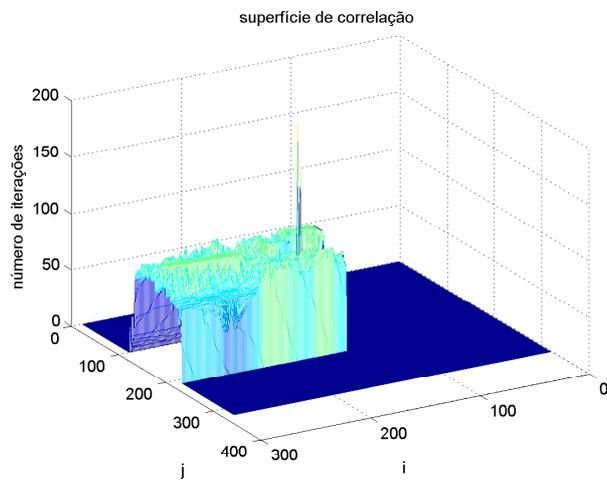


Figura 6.9: superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.8 e a imagem da Fig. 6.7

quadro posterior mostrando o rastreo da assinatura

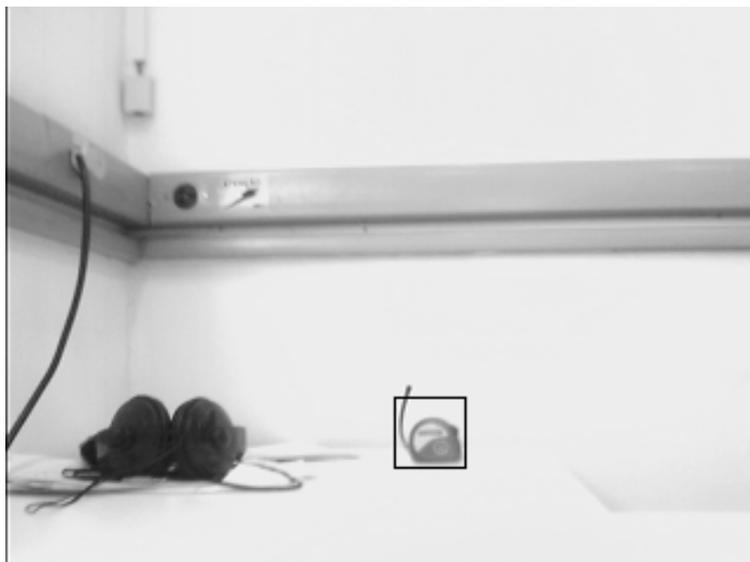


Figura 6.10: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

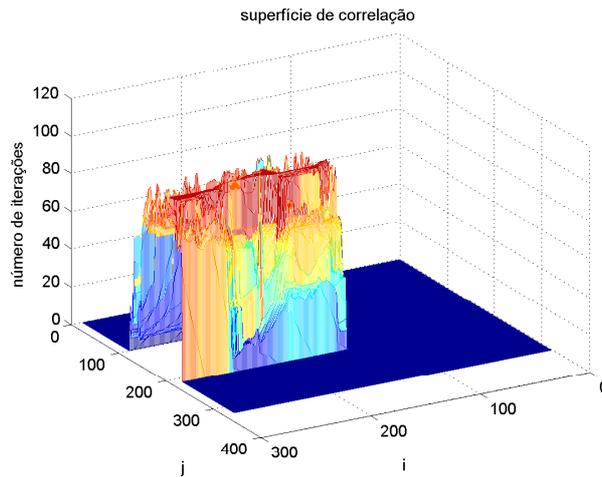


Figura 6.11: superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.10 e a imagem da Fig. 6.7

que a assinatura escolhida se destaque tanto.

Em contraponto ao exemplo anterior, optou-se por utilizar o algoritmo de detecção sequencial de similaridades com limiar fixo (SSDA). Este valor foi escolhido em $T = 1275$, ajustado após diversos testes.

Novamente, realizaram-se testes no algoritmo com diferentes formas de pré-tratamento, de forma que aquela que levou a melhores resultados foi a filtragem de intensificação de contrastes (*unsharp*). Na Fig. 6.13 nota-se que a detecção de similaridades encontrou o objeto de interesse, embora com uma certa imprecisão no enquadramento. A este resultado, deve-se levar em consideração o fato de que a diferença entre as imagens não é puramente translacional, havendo uma aproximação entre a câmera e o objeto. Na Fig. 6.14 novamente se observa um pico de correlação indicando a posição do ponto de similaridade.

O segundo quadro escolhido, visto na Fig. 6.15, apresenta uma pequena translação em relação ao original. Obtém-se a localização do objeto porém novamente com uma pequena imprecisão no enquadramento. Cabe ressaltar, mais uma vez, que as imagens não são comparadas de forma sequencial, de forma que estes erros seriam menores neste caso. A superfície de correlação é mostrada na Fig. 6.16 e se pode observar outros pontos de referência onde o número necessário de iterações foi alto. Tal fato possivelmente se deve à proximidade do efetuador à base do robô, de cor escura, que tende a interferir no algoritmo.

O último quadro desta sequência é visto na Fig. 6.17 e foi capturado apenas dois intervalos de amostragem após o quadro original, de forma que há pouca diferença entre ambos. No entanto, neste caso o objeto está parcialmente oculto pela mão do operador que aparece com um esbatimento provocado pela movimentação do mesmo. Note que ainda assim o algoritmo conseguiu detectar o ponto de similaridade.

primeiro quadro onde foi seleccionada a assinatura



Figura 6.12: imagem onde se seleccionou a assinatura visual

dade, resultado corroborado pela superfície de correlação vista na Fig. 6.18

quadro posterior mostrando o rastreo da assinatura

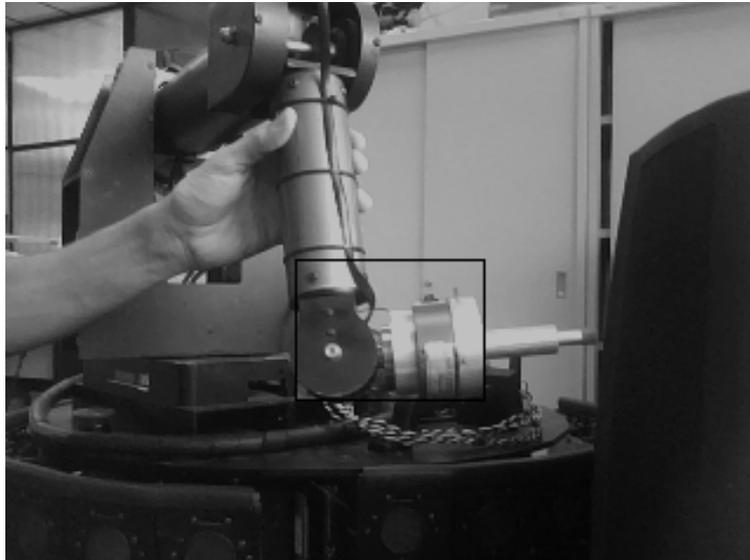


Figura 6.13: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

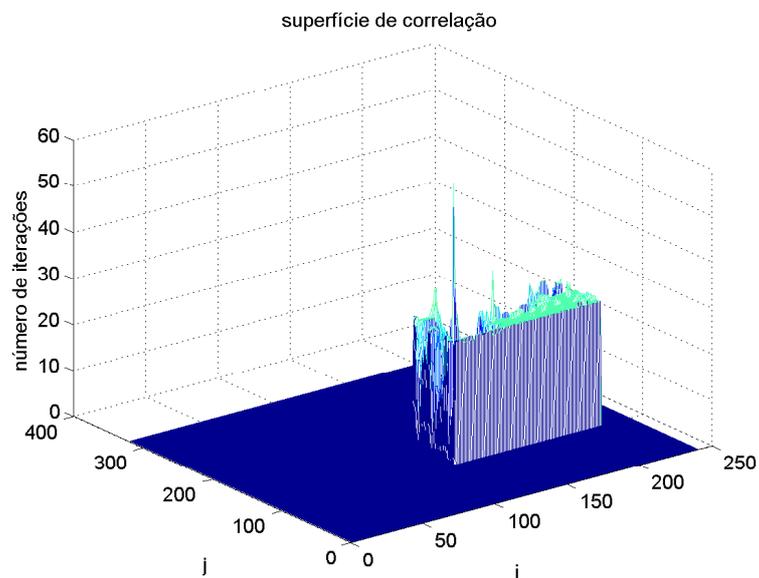


Figura 6.14: superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.15 e a imagem da Fig. 6.12

quadro posterior mostrando o rastreio da assinatura

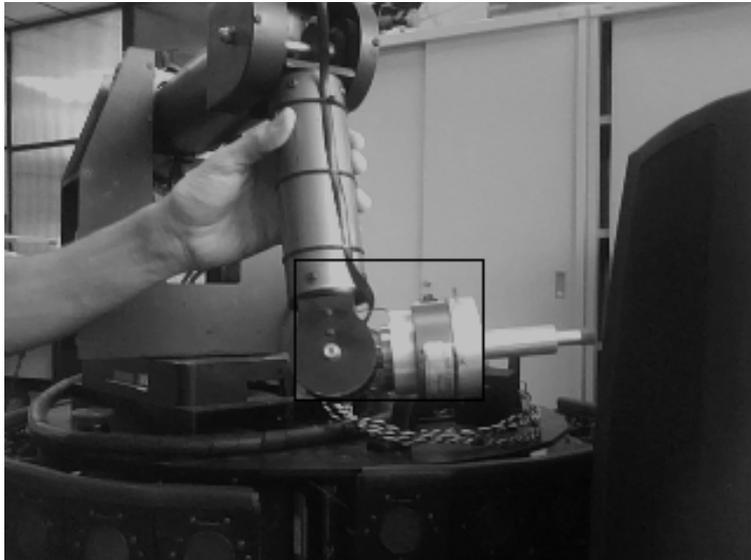


Figura 6.15: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

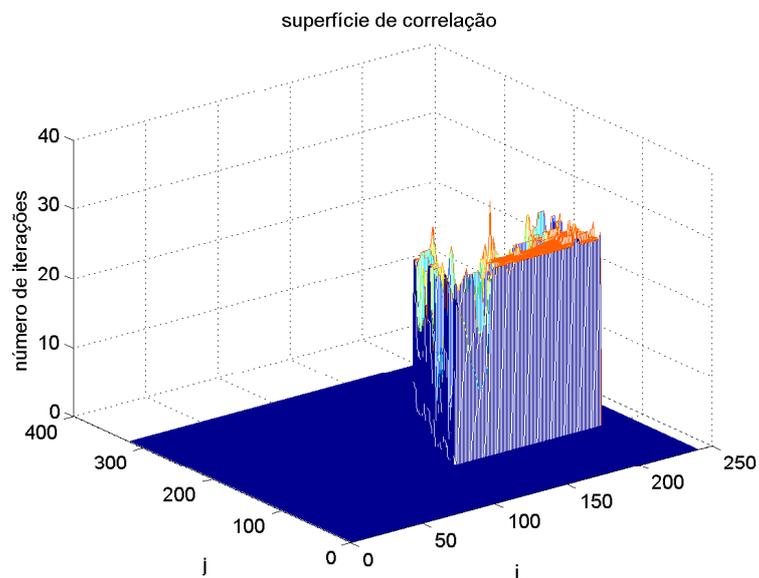


Figura 6.16: superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.17 e a imagem da Fig. 6.12

quadro posterior mostrando o rastreo da assinatura

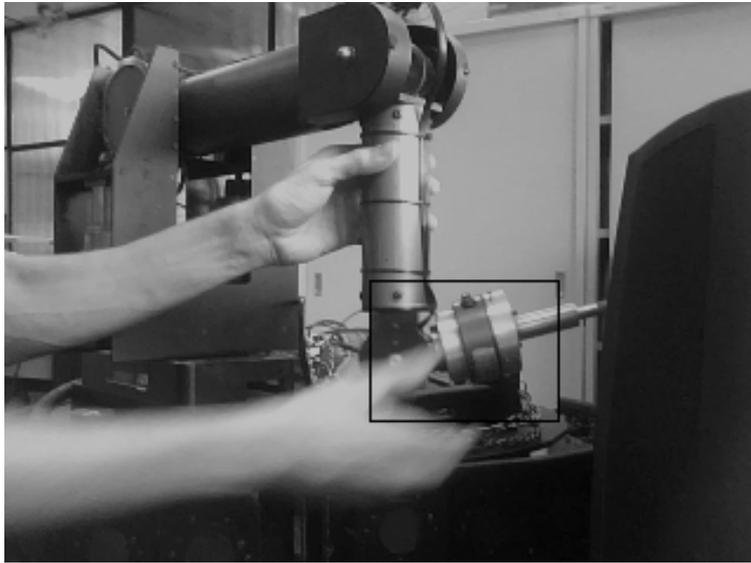


Figura 6.17: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

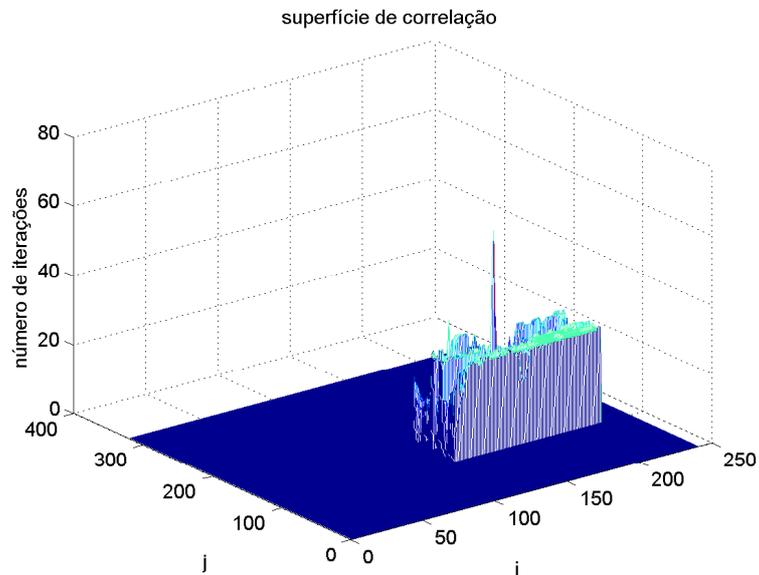


Figura 6.18: superfície de correlação entre o quadro da Fig. 6.13 e a imagem da Fig. 6.12

6.4.3 Imagens de avião em vôo

Finalmente, é apresentado um conjunto de imagens representa aquele mais próximo da aplicação prática visada neste trabalho de maneira geral: o seguimento de um avião em vôo. Espera-se que, neste caso, as condições de operação do algoritmo sejam facilitadas por se tratar de um objeto de bastante destaque na imagem, como sugere a Fig. 6.19.

Aplicou-se aqui novamente o algoritmo MITSA, com $T_{max} = 3200$, $t = 210$ e $T_0 = 200$, ajustados por testes em simulação. A filtragem prévia utilizada que levou aos melhores resultados foi a que empregou a filtragem gaussiana. Ainda, optou-se por aplicar o algoritmo de seguimento de cor apresentado na seção 6.1, a fim de avaliar seu desempenho em uma condição similar àquelas reais de operação.

O primeiro quadro utilizado na comparação já apresenta diferenças razoáveis em relação ao original: há um forte movimento de rotação do avião e um afastamento razoável. Note que a assinatura é rastreada, vide Fig. 6.20, porém o objeto fica pequeno em relação à janela de seleção. A superfície de correlação pode ser vista na Fig. 6.21.

Na segunda e terceira imagens selecionadas, vistas nas Figs. 6.22 e 6.24, respectivamente, nota-se novamente fortes movimentos de rotação e aproximação/afastamento. Ainda assim, o objeto é rastreado, notando-se uma pequena imprecisão no enquadramento do terceiro quadro. As superfícies de correlação são similares, conforme as Figs. 6.23 e 6.25, de forma que ao invés de um pico extremamente saliente se observa uma região para a qual a correlação entre os pares de janelamento é considerada alta.

O quarto quadro desta sequência mostra o avião já em procedimento de pouso, momento no qual ele se aproxima bastante da câmera. Naturalmente a janela de rastreamento tem um tamanho consideravelmente menor do que o objeto, mas ainda assim ele é registrado como mostram as Fig. 6.26, onde se vê o resultado do rastreio, e na Fig. 6.26 onde é exibida a superfície de correlação.

A último resultado desta sequência é excepcionalmente mostrado em cores, ao contrário dos anteriores todos em nível de cinza, pelo simples motivo de que se busca utilizar este quadro específico como comparação no algoritmo de seguimento por cor, a ser discutido. A imagem é tratada em escala de cinza, como em todos os casos anteriores, e apenas mostrada em cores a fim de salientar como a iluminação pode interferir na cor aparente do objeto. As Figs. 6.28 e 6.29 mostra quem o rastreio foi bem sucedido, similarmente aos casos anteriores.

Porém, note que o algoritmo baseado em cor deverá apresentar dificuldades de identificar o objeto de interesse nesta imagem. Quando aplicado ao quadro original, da Fig. 6.19, o resultado do processamento é tal qual se pode ver na Fig. 6.30, isto

primeiro quadro onde foi selecionada a assinatura



Figura 6.19: imagem onde se selecionou a assinatura visual

é, o objeto é identificado com sucesso e o alvo posicionado, embora a forma do avião seja distorcida e não seja enxergada com precisão. As etapas do processamento, vistas na Fig. 6.31 mostram que apenas uma parte do objeto é identificada.

Para os frames onde as imagens são obtidas a uma menor distância, o algoritmo também encontra o avião com sucesso baseado na cor, o resultado é visto na Fig. 6.32 e confirmado pela observação dos passos intermediários Fig. 6.33.

Porém, quando se aplica o algoritmo em questão para o quadro da Fig. 6.28, o avião não é rastreado. Isto é compreensível e justificado pelo fato de a iluminação interferir na aquisição da cor de forma prejudicial o suficiente para que o tom de vermelho do objeto não seja entendido como de interesse.

Este problema poderia ser corrigido alterando-se as características de seleção dos elementos das matrizes RGB, discutidos na seção 6.1, no entanto isto levaria o algoritmo a enxergar outros pontos fora de interesse para condições de iluminação mais intensa. Tal observação constata o esperado e comentado no início deste capítulo, embora o algoritmo apresentado seja de fácil implementação e útil para testes em laboratório, não apresenta robustez suficiente para aplicações mais complexas.

quadro posterior mostrando o rastreo da assinatura



Figura 6.20: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

superfície de correlação

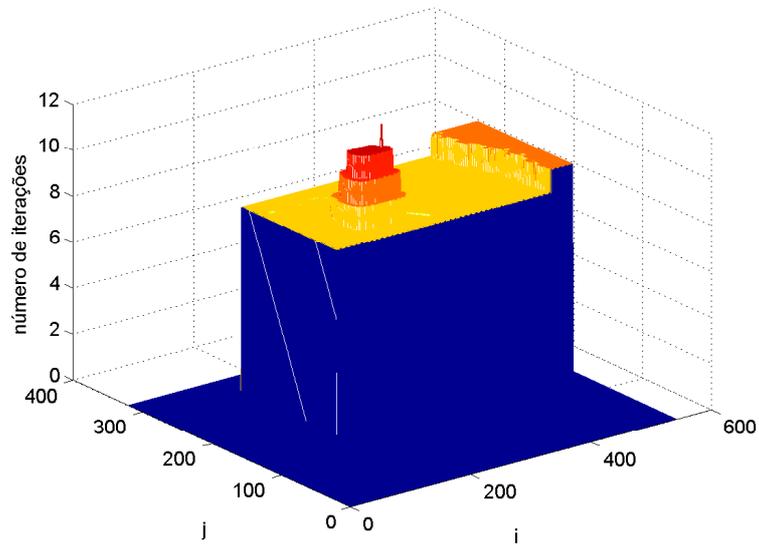


Figura 6.21: Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.20

quadro posterior mostrando o rastreo da assinatura



Figura 6.22: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

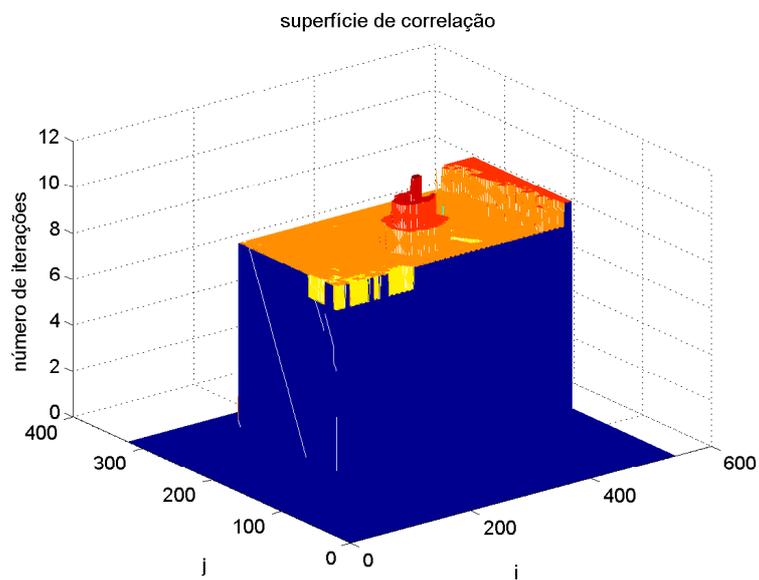


Figura 6.23: Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.22

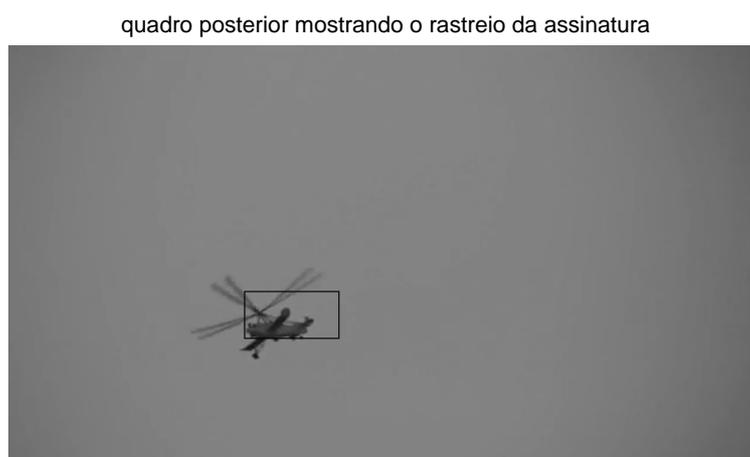


Figura 6.24: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

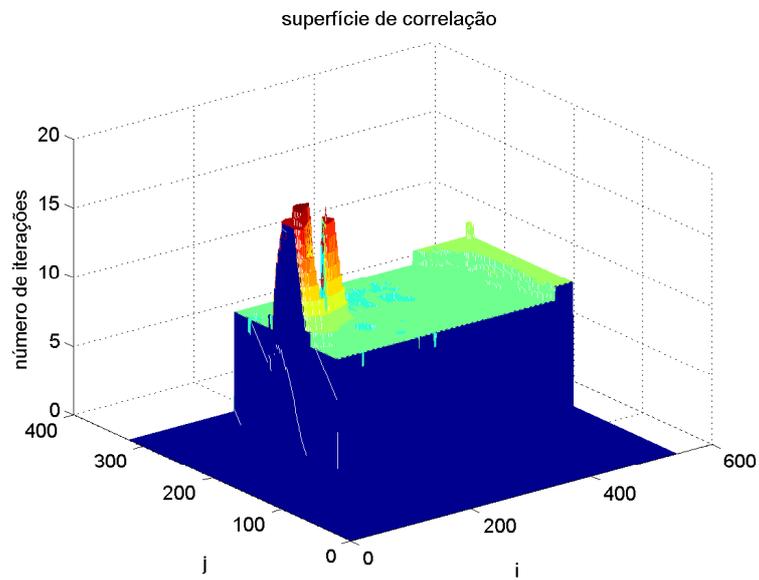


Figura 6.25: Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.24



Figura 6.26: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

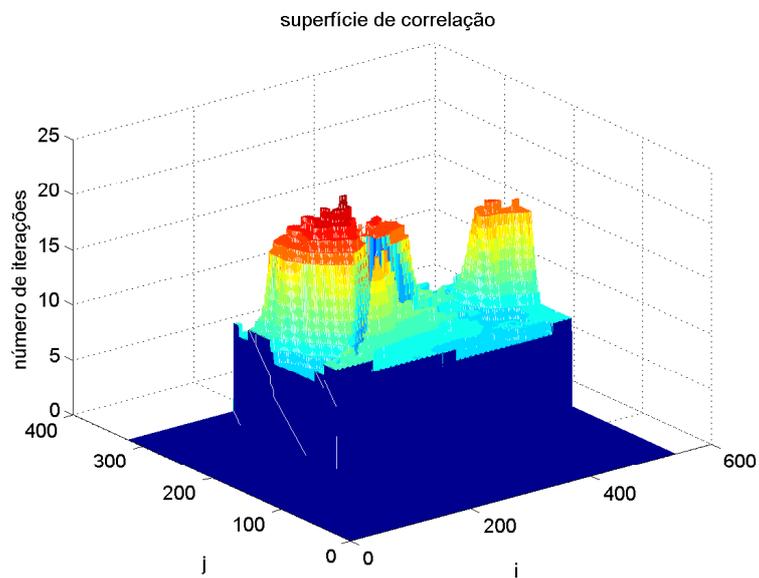


Figura 6.27: Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.26



Figura 6.28: quadro posterior, onde a assinatura foi identificada

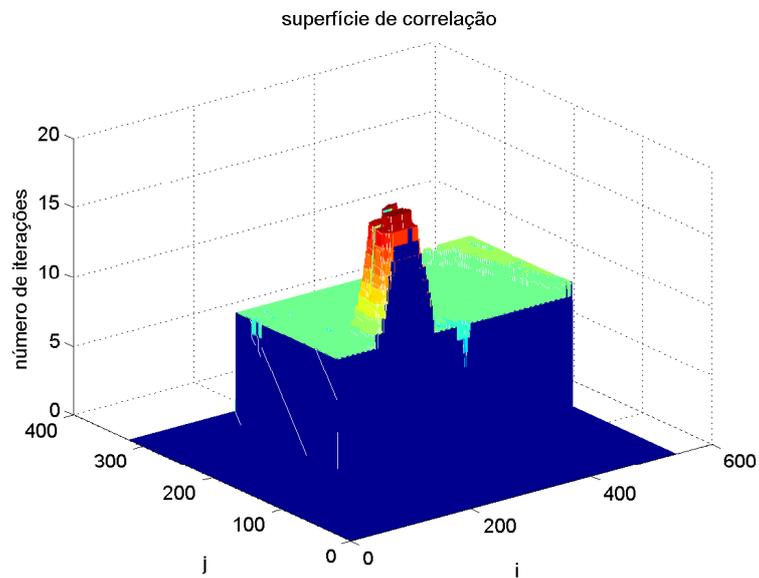


Figura 6.29: Superfície de correlação entre os quadros das Fig. 6.19 e Fig. 6.26

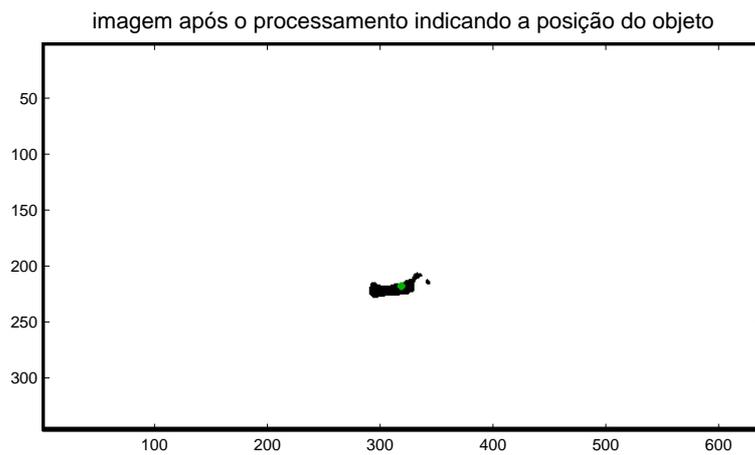


Figura 6.30: imagem após o processamento pelo algoritmo de rastreamento por cor indicando a posição do alvo

imagem em intensidade correspondente à cor vermelha

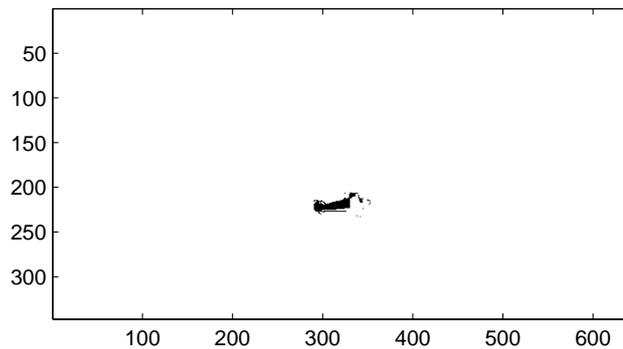


imagem em intensidade após o blur

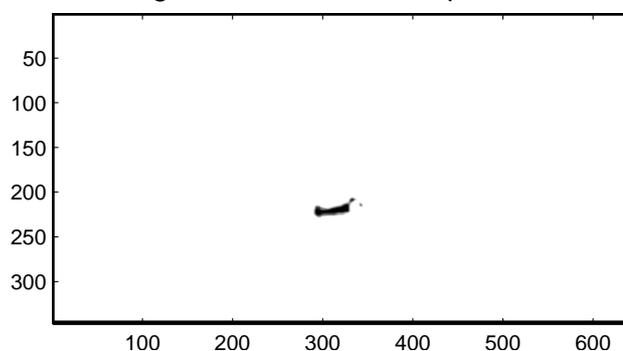


Figura 6.31: passos intermediários do processamento de rastreamento por cor, imagem intensidade correspondente à faixa de vermelho selecionada (superior) e imagem após o *blur* (inferior)

imagem após o processamento indicando a posição do objeto

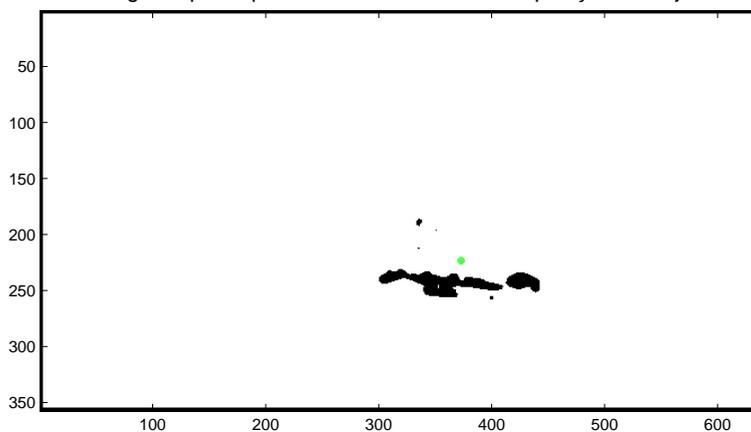


Figura 6.32: imagem após o processamento pelo algoritmo de rastreamento por cor indicando a posição do alvo

imagem em intensidade correspondente à cor vermelha

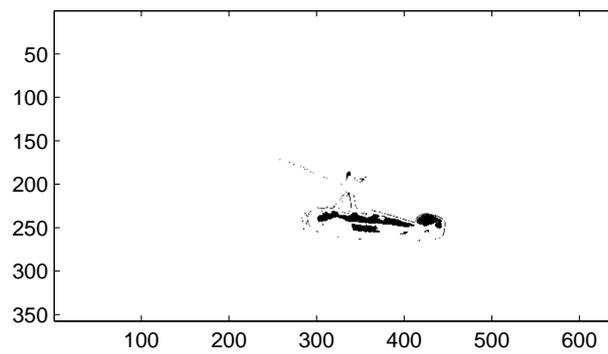


imagem em intensidade após o blur

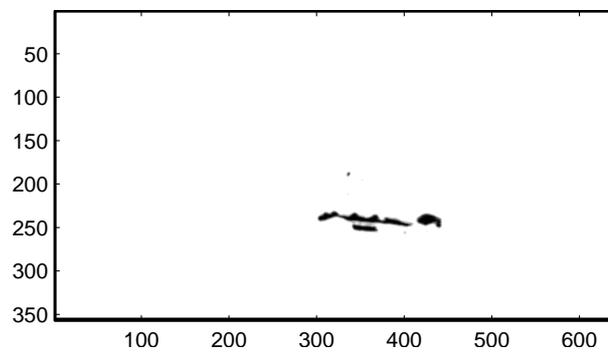


Figura 6.33: passos intermediários do processamento de rastreamento por cor, imagem intensidade correspondente à faixa de vermelho selecionada (superior) e imagem após o *blur* (inferior)

6.5 Considerações Finais

Este capítulo considerou duas maneiras de utilizar imagem no *tracking* de objetos em uma plataforma estabilizada, sendo um deles projetado para seguir objetos de uma determinada cor, e o outro baseado em detecção de similaridades por correlação.

O algoritmo baseado em cor é interessante para testes em laboratório, como comentado, pela facilidade de implementação, servindo basicamente para testar os conceitos. Para aplicações em campo, o método de detecção de similaridades mostrou ser capaz de bons resultados.

Uma possibilidade interessante para trabalhos futuros é a implementação deste algoritmo em um sistema embarcado visando a aplicação em tempo real para testes na plataforma estabilizada. Para isso, é necessário programar em uma linguagem mais eficiente, como por exemplo em C. Embora esta implementação fuja do escopo do atual trabalho, acredita-se que com uma programação adequada o algoritmo possa levar a bons resultados no seguimento de objetos, como mostraram os resultados de experimentos com diferentes imagens.

Além disso, outros aspectos podem ser abordados, como por exemplo a adaptação da janela de rastreo de forma que esta se ajuste ao tamanho do objeto conforme haja aproximação ou afastamento. Existem técnicas na literatura possíveis de serem utilizadas na extensão deste trabalho.

De maneira geral, observou-se a aplicabilidade dos algoritmos de rastreo visual no problema de seguimento de objetos em plataformas estabilizadas, obtendo-se um algoritmo passível de ser aplicado em campo com uma boa relação entre custo computacional, complexidade e precisão.

Capítulo 7

Conclusões

Este trabalho abordou o tema de estabilização de plataformas inerciais, apontamento e rastreamento de objetos utilizando algoritmos de visão computacional.

O problema de estabilização é tratado em um contexto onde são disponíveis apenas duas medidas de sensores giroscópicos, sendo este um conjunto reduzido de medidas uma vez que é comum obter a orientação de plataformas estabilizadas através da combinação de medidas de giroscópios, acelerômetros e magnetômetros.

Mediante a consideração de restrições na movimentação do veículo onde a plataforma é colocada, mostrou-se ser possível obter a estabilização mesmo com duas medidas. Para isto, supôs-se os cenários onde têm se *yaw* ou *roll* constantes, para duas condições distintas de alocação dos sensores, caracterizando estabilização direta e indireta. Dentro deste quadro, foram desenvolvidos diferentes algoritmos através dos quais se pôde obter a orientação da plataforma calculando-se a velocidade angular desta com apenas duas medidas. De posse da orientação, pôde-se calcular os ângulos de correção. Além do algoritmo, obtiveram-se expressões para calcular os erros nessas velocidades calculadas no caso onde as hipótese de *yaw* ou *roll* constantes não são satisfeitas.

Foram apresentados também algoritmos para realizar o apontamento, supondo conhecida a posição do alvo, e seguimento de um objeto, supondo que sua posição é determinada por um algoritmo de visão computacional através do processamento de imagens adquiridas de uma câmera.

Tais algoritmos foram avaliados em nível de simulação, obtendo bons resultados em termos de precisão. Estes resultados foram confirmados por meio de experimentos em laboratório, mostrando também um bom desempenho do sistema e do algoritmo, além de uma boa correspondência entre simulação e experimento.

Por fim, apresentaram-se dois diferentes algoritmos de rastreamento visual utilizando processamento de imagens a fim de aplicá-los no seguimento de objetos em uma plataforma estabilizada. Novos resultados experimentais foram obtidos a fim de testar o desempenho do rastreo utilizando diversas imagens adquiridas em la-

boratório. Observou-se que o algoritmo é capaz de rastrear um objeto previamente selecionado em frames seguintes de uma sequência de imagens, sendo portanto útil no seguimento de objetos com uma câmera em uma plataforma estabilizada.

7.1 Trabalhos Futuros

Algumas questões surgiram no decorrer deste trabalho, sendo apontadas durante a discussão como motivo de futuros trabalhos. Estes itens são resumidos aqui.

Os algoritmos de estabilização de *pitch* e *yaw* apresentados no Capítulo 2 apresentam singularidades para algumas combinações de movimento externo e posição dos ângulos de azimute e elevação. Estas podem ocorrer em condições de operação do veículo, de modo que o cálculo da orientação da plataforma seja comprometido. Alterações no algoritmo podem ser investigadas com uma possível solução para este problema, como por exemplo utilizando mudanças de configuração. Embora esta problema tenha uma solução direta, pelo acréscimo de outros sensores, esta solução deve ser evitada pelo custo adicional.

Nos resultados experimentais, observou-se o acoplamento entre as medidas de *roll*, *pitch* e *yaw*, causadas pelo desalinhamento entre o sistema de coordenadas dos sensores giroscópicos e o sistema de coordenadas do veículo. Assim, parte da rotação ao redor de um eixo do veículo é sentida em ambos os eixos do sensor, gerando erros no cálculo de orientação. Este problema é igualmente de interesse, sendo possíveis alternativas de solução tratá-lo como problema calibração ou de controle de um sistema com incertezas não-lineares.

Trabalhos futuros para resultados experimentais também incluem testes em campo, com a plataforma estabilizada montada sobre um veículo, já que esta é a condição na qual se deseja operar o sistema.

Na parte de rastreamento visual, pode-se explorar a integração do algoritmo de visão computacional com a plataforma estabilizada também em nível experimental. Para isso, o algoritmo deve ser programado em uma linguagem mais eficiente, uma vez que o desempenho computacional passa a ser importante. Além disso, diferentes algoritmos de visão podem ser aplicados ao problema de rastreamento em plataformas estabilizadas, assim como estratégias de controle mais sofisticadas, visto que o controle desacoplado aqui utilizado pode resultar em um bom desempenho em outras aplicações.

Referências Bibliográficas

- [1] AHMADI, M., KHAYATIAN, A., KARIMAGHAEI, P., 2007, “Orientation estimation by error-state extended Kalman filter in quaternion vector space”, *SICE Annual*, v. 15.
- [2] ALGRAIN, M. C., 1993, “Accelerometer based line-of-sight stabilization approach for pointing and tracking systems”, *International Conference on Control Applications*.
- [3] BARNEA, I. B., SILVERMAN, H. F., 1992, “A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration”, *IEEE Transactions on Computers*, , n. 2, pp. 179–186.
- [4] BÜCKER, T., WALDMANN, J., 2010, “Ensaio em vôo de rastreamento visual por correlação com janela adaptativa”, *CBA Congresso Brasileiro de Automática*.
- [5] BEALS, G., CRUM, R., DOUGHERTY, H., et al., 1988, “Hubble space telescope precision pointing control system”, *AIAA J. Guid.*, v. 11, n. 2, pp. 119–123.
- [6] BROWN, L. G., 1992, “A Survey of Image Registration Techniques”, *ACM Surveys*, v. 24, n. 4, pp. 325–376.
- [7] CAMPOS, R., WALDMANN, J., 2010, “Determinação da vertical local com giroscópios e acelerômetros solidários e filtro de Kalman estendido híbrido”, *CBA Congresso Brasileiro de Automática*.
- [8] DOMINGUEZ, S. M., KEATON, T., SAYED, A. H., 2006, “A Robust Finger Tracking Method for Multimodal Wearable Computer Interfacing”, *IEEE Transactions on Multimedia*, v. 8, n. 5, pp. 956–972.
- [9] EKSTRAND, B., 2001, “Equation of motion for a two-axes gimbal system”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 37.
- [10] GUENTHNER, W., GLASAUER, S., WAGNER, P., et al., 2007, “Biomimetic Control for Adaptive Camera Stabilization in Driver-Assistance Systems”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 21, pp. 930–934.

- [11] GUO, L.-D., TAN, Z.-F., 2010, “*Application of a Sliding Mode Variable Structure Controller for Stabilized Platform of Shipborne Weapons”, *IEEE Control System Magazine*, v. 30, n. 1, pp. 12–14.
- [12] GUO, L.-D., TAN, Z.-F., YANG, L.-X., et al., 2010, “*Application of NN Backstepping Adaptive Controller for Stabilized Platform of Shipborne Weapons”, *IEEE Control System Magazine*, v. 30, n. 1, pp. 12–14.
- [13] HAMEL, T., MAHONY, R., 2006, “Attitude estimation on $SO(3)$ based on direct inertial measurements”, *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 2170–2175.
- [14] HILKERT, J., 2008, “Inertially Stabilized Platform Technology: Concepts and Principles”, *IEEE Control System Magazine*, v. 28, n. 1, pp. 26–46.
- [15] HSU, L., COSTA, R., LIZARRALDE, F., et al., 2000, “Passive Arm Based Dynamic Positioning System for Remotely Operated Underwater Vehicles”, *IEEE Robotics&Automation Magazine*.
- [16] HUGHES, P., 1986, *Spacecraft Attitude Dynamics*. John Wiley.
- [17] HURAK, Z., REZAC, M., 2009, “Combined line-of-sight inertial stabilization and visual tracking: application to airborne camera platform”, *48th IEEE Conference on Decision and Control*, v. 48.
- [18] HUYGHE, B., DOUTRELOIGNE, J., 2009, “3D Orientation tracking based on unscented Kalman filtering of accelerometer and magnetometer data”, *IEEE Sensors Application Symposium*.
- [19] ITO, M., SHIBATA, M., 2010, “Visual tracking of hand-eye robot for moving target object with multiple feature points”, *International Workshop on Advanced Motion Control*, v. 11.
- [20] JI, W., QI LI, B. X., ZHAO, D., et al., 2010, “Adaptive fuzzy PID composite control with hysteresis-band switching for line of sight stabilization servo system”, *Aerospace Science and Technology*.
- [21] KARABINIS, P. D., EGRI, R. G., BENNET, C. L., 1988, “Antenna pointing and scanning control for a two axis gimbal system in the presence of platform motion”, *IEEE*.
- [22] KAZEMY, A., HOSSEINI, S. A., FARROKHI, M., 2007, “Target-Based Line-Of-Sight Stabilization in Periscopes”, *Proceedings of Mediterranean Conference on Control and Automation*, v. 15.

- [23] KENNEDY, P. J., KENNEDY, R. L., 2003, “Direct Versus Indirect Line of Sight (LOS) Stabilization”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 11, n. 1, pp. 3–15.
- [24] KIM, S., KIM, S., KWAK, Y., 2010, “Robust control for a two-axis gimbale sensor system with multivariable feedback systems”, *IET Control Theory and Applications*, v. 4, n. 4, pp. 539–551.
- [25] KWON, Y. S., HWANG, H. Y., CHOI, Y. S., 2007, “Stabilization loop design on direct drive gimbale platform with low stiffness and heavy inertia”, *International Conference on Control, Automation and Systems*.
- [26] LJUNG, L., 1988, *System Identification Toolbox for use with Matlab*.
- [27] MAO, X., LIU, Y., 2009, “Optical axis stabilization of a two-axis platform”, *IEEE Global Congress on Intelligent Systems*.
- [28] MASTEN, M., 2008, “Inertially Stabilized Platforms for Optical Imaging Systems”, *IEEE Control System Magazine*, v. 28, n. 1, pp. 47–64.
- [29] MURRAY, R., LI, Z., SASTRY, S., 1994, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press.
- [30] PERTILE, M., DEBEI, S., ZACCARIOTTO, M., 2009, “Accuracy analysis of a pointing mechanism for communication applications”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 58, n. 10, pp. 3499–3509.
- [31] RUE, A. K., 1969, “Stabilization of Precision Electrooptical Pointing and Tracking Systems”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 5, n. 5, pp. 805–819.
- [32] SCIAVICCO, L., SICILIANO, B., VILLANI, L., et al., 2009, *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Verlag.
- [33] SEONG, K.-J., KANG, H.-G., YO, B.-Y., et al., 2006, “The stabilization loop design for a two-axis gimbal system using LQG/LTR controller”, *ICE-ICASE International Joint Conference*.
- [34] SHAN-ZHONG LIU, L.-H. S., 2010, “Research on stabilization and tracking control of electro-optical tracking and sighting platform based on fuzzy control”, *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.
- [35] SPONG, M. W., HUTCHINSON, S., VIDYASAGAR, M., 2006, *Robot Modeling and Control*. John Wiley.

- [36] WANG, H., WILLIAMS, T., 2008, “Strategic Inertial Navigation Systems”, *IEEE Control System Magazine*, v. 28, n. 1, pp. 65–85.
- [37] WANG, Q.-C., GONG, Y.-H., YANG, C.-H., et al., 2010, “Robust object tracking under appearance change conditions”, *International Journal of Automation and Computing*.
- [38] WEN, J. T., KREUTZ-DELGADO, K., 1991, “The attitude control problem”, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, v. 36, n. 10, pp. 1148–1162.
- [39] YANG, Z., LEI, W., 2010, “Novel Integral Sliding Mode Variable Structure Control of High Precision LOS Stabilized Platform With Nonlinear Interference”, *International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*.
- [40] ZITOVÁ, B., FLUSSER, J., 2003, “Image Registration Methods: a Survey”, *Image and Vision Computing*, v. 21.