

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

**INFERÊNCIA DOS ÂNGULOS CRÍTICOS DE VOO POR
ASSOCIAÇÃO DO FLUXO ÓPTICO COM A GEOMETRIA DA
CENA**

MILTON MACENA RAMOS DE LIMA

MANAUS
MARÇO DE 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

MILTON MACENA RAMOS DE LIMA

**INFERÊNCIA DOS ÂNGULOS CRÍTICOS DE VOO POR
ASSOCIAÇÃO DO FLUXO ÓPTICO COM A GEOMETRIA DA
CENA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Informática (PPGI) da Universidade
Federal do Amazonas (UFAM), como
parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de Mestre em
Informática.

Orientador: prof. José Luiz de Souza Pio, DSc.

MANAUS
MARÇO DE 2013

MILTON MACENA RAMOS DE LIMA

**INFERÊNCIA DOS ÂNGULOS CRÍTICOS DE VOO POR
ASSOCIAÇÃO DO FLUXO ÓPTICO COM A GEOMETRIA DA
CENA**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Raimundo da Silva Barreto, DSc. (Presidente)
ICOMP/UFAM

Prof. José Luiz de Souza Pio, DSc.
ICOMP/UFAM

Prof. José Reginaldo Hughes Carvalho, DSc.
ICOMP/UFAM

MANAUS
MARÇO DE 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor José Luiz de Souza Pio por apresentar a Visão Computacional a mim e me motivar à colaboração acadêmica e pesquisa futura. Agradeço por me orientar na pesquisa que resultou neste trabalho, me permitindo elaborá-lo de uma forma que eu pudesse desenvolver o senso crítico para a pesquisa, ao estudar a área da navegação robótica aérea como um todo até me concentrar em encontrar uma solução factível para o problema aqui descrito.

Agradeço aos professores da UFMG, prof. Guilherme Pereira, prof. Leonardo Torres e prof. Paulo Iscold por cederem as imagens de voo e os registros dos sensores inerciais que usamos em nossos experimentos.

Agradeço, também, ao prof. Reginaldo Carvalho, à prof^a Eulanda dos Santos, ambos da UFAM, e ao prof. David Mennotti, da UFMG, pelos conselhos dados durante a realização deste trabalho e pelo balizamento dado a ele durante a sua fase de qualificação.

Também, novamente à prof^a Eulanda dos Santos, prof. José Luiz Pio, prof. José Pinheiro, prof. Ruiteir Caldas, prof. Eduardo Nakamura e prof^a Rosiane Freitas, pelas aulas ministradas durante o Curso de Mestrado, que, com certeza, terão resultados duradouros.

Obrigado à Elienai Nogueira pelo trabalho que presta para o sucesso do PPGI, não só com relação ao controle acadêmico do programa, mas, também, pelo apoio diário que dá a todos nós, alunos.

Obrigado ao prof. Raimundo Barreto pelas iniciativas do nosso grupo sobre VANTs, inclusive, sobre a obtenção do nosso curso de pilotagem de aeromodelos e disseminação da prática do aeromodelismo no grupo.

Agradeço aos colegas de curso pela nossa união durante as disciplinas, em especial, Jaderlane Brito, Polianny Almeida, Felipe Pinagé e Elda Nunes.

Agradeço aos meus superiores hierárquicos, em especial ao Lelson Lopes, por concordarem e apoiarem o meu pedido de inscrição no Mestrado.

Obrigado ao amigo de trabalho, prof. Jônatas Costa, pelas úteis reflexões sobre geometria.

Agradeço aos meus pais por toda a inspiração, educação, formação e suporte que sempre me deram para alcançar meus objetivos. Também à minha irmã, sobrinhos, avô, avó, tios e primos por também serem meus modelos e me acompanharem sempre.

E ao Pai, obviamente, por me inspirar, me dar forças e me permitir conhecer uma ínfima parte da sua maravilhosa engenharia.

Resumo

Os três Parâmetros de Atitude ou Parâmetros Críticos de Voo – Ataque, Guinada e Rolagem – são os ângulos que descrevem os movimentos rotacionais de um veículo aéreo no espaço tridimensional. A partir da estimativa destes ângulos, pode-se realizar a estabilização de voo, cuja necessidade varia para cada tipo de veículo aéreo em proporção inversa à estabilidade proporcionada pelas suas características mecânicas. Além disto, a associação dos ângulos críticos de voo com outros parâmetros, como altitude e velocidade, possibilita a descrição de todos os movimentos do veículo, e conseqüentemente, a execução de uma rota de voo pré-determinada. Os ângulos críticos de voo podem ser inferidos por sensores eletromecânicos inerciais, pelo Sistema de Posicionamento Global ou por percepção visual. Diversos autores citam que os sensores eletromecânicos falham e o Sistema de Posicionamento Global fica indisponível por algum intervalo de tempo sob diversas condições ambientais, ocasionando a perda da orientação e, nos casos de veículos não-tripulados, acidentes e perdas de veículos, dada a falta do apoio de um piloto nestas situações. Neste trabalho são integradas duas técnicas de estimativa destes parâmetros, baseadas em Visão Robótica: a primeira é baseada na posição e inclinação do Horizonte com relação ao veículo aéreo; a segunda é baseada na estimativa do Fluxo Óptico da cena frontal ao veículo aéreo. O uso do Fluxo Óptico possibilita a estimativa do Parâmetro de Guinada, que não é realizada na abordagem baseada no Horizonte. Também possibilita a estimativa dos Parâmetros Críticos de Voo quando o Horizonte não está presente. As duas técnicas são associadas a parâmetros da câmera e integradas para dar mais robustez à estimativa dos ângulos de voo. Experimentos realizados usando-se imagens reais de voos de veículos aéreos de asa fixa provaram a eficiência do método em ambiente aberto e não-estruturado.

Palavras Chave: Visão robótica; VANT; veículo aéreo não-tripulado; posicionamento tridimensional; fluxo óptico; ângulos de voo.

Abstract

The three Attitude Parameters or Critical Flight Parameters - Attack, Yaw and Roll - are the angles that describe the rotational movements of an aerial vehicle in three-dimensional space. From the estimate of these angles, we can accomplish the stabilization of flight. The need for it varies for each type of aerial vehicle in inverse proportion to the stability provided by their mechanical characteristics. Moreover, the association of critical angles with other flight parameters, such as altitude and velocity, enables the description of all vehicle movements, and consequently, the execution of a flight path predetermined. Critical Flight Parameters can be inferred by electromechanical inertial sensors, Global Positioning System or by visual perception. Several authors mention that the electromechanical sensors fail and Global Positioning System are unavailable for some period of time under various environmental conditions, leading to loss of orientation and, in the case of unmanned vehicles, several accidents, given the lack of support from a pilot on these situations. In this work two techniques are integrated to estimate these parameters, based on Robotic Vision: the first one is based on the position and inclination of the Horizon about the aerial vehicle; and the second one is based on the estimation of optical flow of the scene viewed by the aerial vehicle. The use of optical flow provides the estimation of Yaw Parameter, which is not got at Horizon approach. It also enables the estimation of Critical Flight Parameters when the Horizon is not present. Both techniques are associated with camera parameters and integrated to provide more robustness to the flight angles estimation. Experiments conducted using real images of fixed-wing aircraft flight proved the method efficacy in open and unstructured environment.

Key words: Robotic Vision; UAV; unmanned aerial vehicle; tridimensional positioning; optical flow; flight angles.

Sumário

Capítulo 1	
Introdução	8
1.1 Motivação	9
1.2 Justificativa.....	10
1.3 Objetivos.....	11
1.4 Organização do Texto	12
Capítulo 2	
Fundamentação Teórica	13
2.1 Sistema de Coordenadas de Voo.....	13
2.2 Estimativa do Fluxo Óptico.....	15
Capítulo 3	
Trabalhos Relacionados	19
3.1 Estimativa dos Ângulos de Voo por Meio da Linha do Horizonte	19
3.2 Estimativa dos Ângulos de Voo por meio do Fluxo Óptico	21
3.3 Estimativa do Fluxo Óptico.....	23
Capítulo 4	
Metodologia	26
4.1 Segmentação e Equalização da Imagem	27
4.2 Extração de Linhas	29
4.3 Reconhecimento da Linha do Horizonte	30
4.4 Estimativa do Ângulo de Ataque por Meio do Horizonte	31
4.5 Estimativa do Ângulo de Rolagem.....	35
4.6 Estimativa dos Ângulos Por Meio do Fluxo Óptico.....	36
4.6.1 Estimativa do Ângulo de Rolagem.....	36
4.6.2 Estimativa do Ângulo de Ataque	39
4.6.3 Estimativa do Ângulo de Guinada.....	40
4.7 Integração da Linha do Horizonte com o Fluxo Óptico.....	43
Capítulo 5	
Experimentos e Resultados	44
5.1 Voo de Média Altitude Realizado por Veículo Aéreo Monomotor.....	44
5.2 Simulação de Voo em Baixa Altitude	53
Capítulo 6	
Conclusão e Trabalhos Futuros	58
Referências Bibliográficas	60

Capítulo 1

Introdução

O problema tratado neste trabalho consiste na obtenção visual dos ângulos que descrevem o movimento de um veículo aéreo no espaço tridimensional, por meio de sensoriamento visual, tal como um piloto de aeronaves faz quando a aeronave que dirige não possui instrumentos que forneçam informações de voo.

Este é um problema que se insere na área da Visão Robótica, a qual propõe o uso de imagens como mais uma fonte de informações sensoriais, e, desta forma, vem aumentar a tolerância a falhas dos equipamentos que fazem o controle de voo dos veículos aéreos. O aprimoramento do controle de voo, por sua vez, proporciona economia e garantia de confiabilidade para os usuários de veículos aéreos, sendo estas vantagens muito mais evidentes no caso dos veículos aéreos não-tripulados, operados a partir de uma estação-base em terra, e mais ainda, nos veículos aéreos autônomos.

Os ângulos de voo representam a rotação dos três eixos do veículo ou robô aéreo sobre um referencial no espaço tridimensional. Os veículos aéreos possuem seis graus de liberdade porque as forças aplicadas aos mesmos podem ocasionar seis movimentos que podem, e quase sempre são, sobrepostos entre si. Três movimentos translacionais e três movimentos rotacionais, que são as rotações efetuadas sobre os seus três eixos de rotação. Eles são dotados de um sistema mecânico no qual determinadas peças, chamadas leme, profundor e ailerons, quando movimentadas por comandos dados pelo piloto, fazem com que o vento exerça pressão sobre o Centro de Massa do veículo, causando o movimento do veículo em igual intensidade à do vento e em sentido contrário à força exercida sobre ele. Estes movimentos também podem ser ocasionados somente pela força do vento, de forma independente da atuação das peças do avião, conhecida como força de arrasto. A Figura 1 mostra os eixos de movimentação do veículo ou robô aéreo sobre os quais são realizadas as suas rotações.

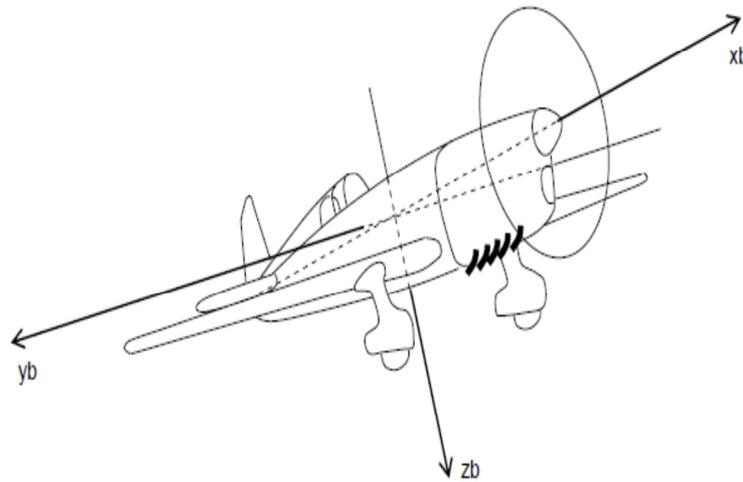


Figura 1. Eixos de Rotação do Veículo ou Robô Aéreo, sobre os quais ocorrem as rotações descritas pelos Parâmetros Críticos de Voo (PREMERLANI, 2010).

1.1 Motivação

Este trabalho vem dar uma contribuição para a percepção dos robôs aéreos sobre o ambiente no qual navegam, unindo as informações provenientes da Visão Robótica com as de sensores inerciais, GPS e outras. Esta maior percepção do ambiente aumenta a tolerância a falhas dos equipamentos, e, desta forma, permite que estes sejam usados com maior controle e eficiência. Também reduz a incidência de problemas de perdas destes equipamentos em uso, por acidentes ocasionados por falhas no sensoriamento em voo. Com o aumento da robustez dos sistemas de controle inercial dos robôs aéreos, estes poderão ser usados de forma cada vez mais autônoma, sem a necessidade de controle humano, mesmo que à distância, e o seu uso poderá ser regulamentado com segurança para que a sociedade possa usar os robôs aéreos em larga escala.

A segunda contribuição dada neste trabalho é a de aumentar a robustez do sensoriamento inercial usando somente informações visuais, sem o auxílio de outros sensores, o que possibilita detectar oportunidade de melhorias nas técnicas de Visão Computacional. Para isto, este trabalho faz a associação da informação do Fluxo Óptico com as informações da geometria da câmera. A integração da técnica que usa o Fluxo Óptico com a técnica que usa a posição e orientação do Horizonte é mais uma medida de aumento da confiabilidade na estimativa dos ângulos de voo com base na Visão Computacional.

1.2 Justificativa

O uso da Visão Robótica para auxiliar o sensoriamento dos veículos aéreos é justificado pela quantidade de problemas de desempenho conhecidos dos sensores inerciais eletromecânicos e GPS. Estudos relatados por Williams (2008) mostram que grande parte dos acidentes ocorridos com os robôs aéreos ocorre por falha nos seus sensores de atitude – ângulos de voo. Esta análise, feita sobre as operações de quatro robôs aéreos - *Navy/Marine Pioneer, Army Shadow, Hunter, Air Force Predator* -, mostrou que uma grande porcentagem de acidentes ocorreu com estes robôs por falhas de sensores, embora as falhas humanas - dos operadores de voo - sejam muito frequentes devido à dificuldade de operar robôs cada vez mais ágeis. As falhas dos sensores também influenciaram as falhas humanas em muitos casos. A Figura 2 mostra a porcentagem de falhas ocasionadas por sensores em relação ao total de acidentes, na barra clara, e a porcentagem de falhas ocasionadas por falha humana em relação ao total de acidentes, na barra escura.

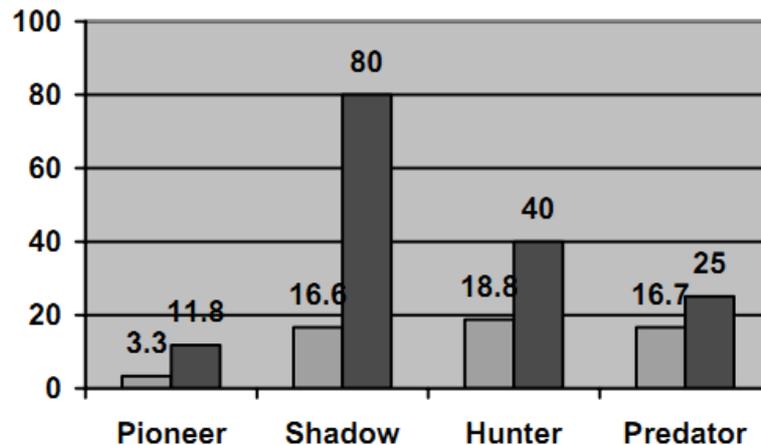


Figura 2. Acidentes ocorridos por falha nos sensores em quatro modelos de robôs aéreos. Barra clara: porcentagem de falhas ocasionadas por sensores em relação ao total de acidentes. Barra escura: porcentagem de falhas ocasionadas por falha humana em relação ao total de acidentes (WILLIAMS, 2008).

O uso da metodologia empregada neste trabalho, que faz uso da integração da técnica do Fluxo Óptico e da posição e inclinação do Horizonte, vem fornecer maior robustez na estimativa dos ângulos de voo. O tratamento de regiões de *subpixels* feita pelo Fluxo Óptico, que permite que as estimativas sejam feitas com precisão de frações de pixels, dá maior acuidade à estimativa realizada pelo Horizonte, que nem sempre é uma linha bem definida na

imagem, o que gera uma imprecisão nos resultados. O uso do Fluxo Óptico também agrega maior robustez à estimativa, visto que o Horizonte nem sempre pode estar presente na imagem capturada, seja pela sobreposição de nuvens ou mesmo massas de ar um pouco mais densas que o normal, seja por outras condições climáticas adversas, como chuva e neve, por exemplo.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é realizar a estimativa dos Parâmetros Críticos de Voo por meio da integração de duas técnicas contempladas pela área da Visão Computacional: a posição e inclinação do Horizonte e o Fluxo Óptico da imagem. Estes modelos de solução são aplicados às imagens que são capturadas por uma câmera acoplada ao robô ou veículo aéreo e associados com a geometria da cena do voo. Esta câmera é acoplada a uma determinada distância do centro de massa deste veículo e posicionada de forma a capturar imagens do campo de visão frontal ao mesmo. Por conta da sua posição, pode-se assumir que o seu centro óptico está a uma distância pequena e conhecida do centro de rotação do veículo aéreo, portanto, os movimentos que a câmera faz podem ser descritas por rotações semelhantes às dos mesmos movimentos que são feitos pela aeronave no mesmo instante.

A complexidade do problema abordado encontra-se, primeiramente, em definir a geometria existente entre o veículo aéreo e o ambiente aberto e não-estruturado, e em seguida, estimar o seu movimento tendo este ambiente como referencial. Para isto, deve-se tratar a riqueza de informações fornecidas pelas imagens de voo e procurar padrões de movimento, posições de elementos de cena, relações destas posições com a câmera e entre a câmera e o veículo aéreo, de forma que todos estes elementos possam ser usados para a estimativa de movimentos do veículo aéreo. Dizer que o ambiente não é estruturado é equivalente a dizer que o mesmo não possui as características ideais de reflectância de luz, como no modelo Lambertiano, com uma fonte de luz constante e superfície que reflete a luz igualmente em todas as direções.

Os objetivos específicos do trabalho são: i) obter os valores dos ângulos de voo obtidos por meio da integração das informações da posição e inclinação do Horizonte, do Fluxo Óptico da imagem e da geometria da cena, em uma sequência de imagens de voo de alta e média altitude; ii) computar e avaliar o erro sistemático e o nível de confiança dos ângulos de voo obtidos em comparação com os valores obtidos por uma Unidade de Medição Inercial; iii)

comparar e avaliar a diferença entre este erro sistemático e nível de confiabilidade com os obtidos a partir da técnica de Reconhecimento do Horizonte em relação aos valores obtidos por uma Unidade de Medição Inercial.

1.4 Organização do Texto

O texto deste trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, é apresentada a Fundamentação Teórica, onde são explicados os conceitos relacionados à técnica do Fluxo Óptico, que é a técnica mais complexa envolvida na hipótese de solução deste trabalho; no Capítulo 3, são apresentados os Trabalhos Relacionados, que tratam da estimativa dos ângulos de voo por meio do Horizonte e por meio do Fluxo Óptico, além de técnicas criadas a partir do conceito do Fluxo Óptico. No Capítulo 4, é apresentada a Metodologia, onde são relatados os métodos usados na construção da solução proposta. O Capítulo 5 apresenta os experimentos realizados e os resultados dos mesmos. O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros. Ao final do trabalho, são apresentadas as suas referências bibliográficas.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo descreve os conceitos utilizados na solução proposta por este trabalho. Ele possui três seções: na primeira seção, é descrita a geometria existente entre o veículo aéreo e o espaço tridimensional; na segunda seção, é descrito o sistema de coordenadas de voo utilizado no trabalho; e, na terceira seção, é descrita a técnica do Fluxo Óptico, usada pelo trabalho para estimar o deslocamento da cena em uma sequência de imagens.

2.1 Sistema de Coordenadas de Voo

Na medição do movimento do veículo aéreo devemos considerar, além do movimento do veículo sobre os seus eixos de orientação, os elementos do espaço tomados como referência para a observação deste movimento. Para a Dinâmica de Voo, três referenciais são importantes e podem ser usados isoladamente ou em conjunto: a superfície terrestre; o deslocamento das massas de ar que sustentam o voo; e o conjunto de forças inerciais que atuam sobre o veículo ou robô aéreo. Para cada um destes referenciais é convencionado um Sistema de Coordenadas de Voo, onde são definidos os pontos iniciais ou de equilíbrio e as situações onde o movimento deve ser considerado positivo e negativo.

Para um sistema de navegação aérea completo, o movimento em todos esses Sistemas de Coordenadas deve ser informado. O sistema que usamos neste trabalho é orientado com relação à Terra. Então, inferimos os ângulos associando os três eixos do veículo ou robô aéreo com relação aos referenciais de Norte e Horizonte, que são os referenciais deste Sistema de Coordenadas. Eles também são referenciais para o piloto nos voos realizados sem instrumentos, voos estes conhecidos como VFR – *Visual Flight Rules*.

A existência do voo em condição de VFR mostra que os três ângulos que descrevem a orientação do veículo aéreo com relação ao Norte e ao Horizonte são indispensáveis à sua sustentação e estabilização em voo. Por este motivo, estes ângulos são chamados Parâmetros Críticos de Voo. A Figura 3 mostra a relação dos eixos do robô aéreo com o referencial da Terra e como é composto este Sistema de Coordenadas.

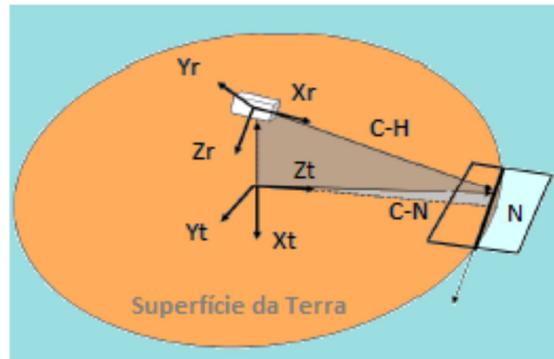


Figura 3. Sistema de Coordenadas do Robô Aéreo em Relação à Terra. Eixos do robô (terminados com a letra r) e eixos da Terra (terminados com a letra t); Linha entre o Centro de Massa do robô e o Horizonte ($C-H$); e Linha entre o vértice original e a posição do Norte ($C-N$) no plano frontal.

Como mostrado na Figura 3, o Ângulo de Ataque descreve a rotação que o robô aéreo realiza sobre o seu eixo transversal, representado por Y_r . Visto sob outra perspectiva, ele é o ângulo que existe entre o eixo longitudinal, representado por X_r , e a linha que liga o Centro de Massa à Linha do Horizonte ($C-H$), como mostra a Figura 6. Ele é positivo se o Eixo Longitudinal (X_r) está acima do Horizonte.

O Ângulo de Guinada descreve a rotação que o robô aéreo realiza sobre o seu eixo Z . Visto sob outra perspectiva, ele é o ângulo que existe entre o eixo longitudinal (X_r) e a Linha entre o vértice original e a posição do Norte ($C-N$) no plano frontal. Ele é positivo se o Eixo Longitudinal (X_r) está à direita do Norte.

O Ângulo de Rolagem descreve a rotação que o robô aéreo realiza sobre o seu eixo longitudinal (X_r). Visto sob outra perspectiva, ele é o ângulo de inclinação do Eixo Transversal (Y_r) em relação à Linha do Horizonte. Ele é positivo se a extremidade direita do eixo Y_r está abaixo do horizonte e a extremidade esquerda está acima do mesmo.

A estimativa destes três ângulos de voo somente tem sentido quando feita com referência ao Norte e ao Horizonte, sendo o Ângulo de Guinada relativo ao Norte e os Ângulos de Ataque e Rolagem relativos ao Horizonte. Logo, a posição do Norte e do Horizonte com relação ao veículo aéreo deve ser conhecida no início da execução da estimativa dos ângulos, mesmo que, a partir deste momento, ela seja atualizada por outras formas de detecção de movimento, não baseadas no Horizonte, como também fazemos no

presente trabalho.

2.2 Estimativa do Fluxo Óptico

De acordo com Horn e Schunck (1981), o fluxo óptico de uma sequência de imagens é o movimento aparente do padrão de intensidade luminosa. Faria (2008) diz que o fluxo óptico é a representação do movimento aparente do mundo projetado no plano de imagem ou a distribuição da velocidade aparente do movimento dos padrões de intensidade em uma imagem. O Fluxo Óptico descreve o deslocamento ocorrido entre dois quadros consecutivos de uma sequência de vídeo. Este deslocamento é estimado por meio de padrões espaciais e temporais da imagem.

Seja $I(x,y,t)$ a intensidade de um *pixel* da imagem no tempo t , e tomando-se a primeira restrição do fluxo óptico, de que o intervalo de tempo dt entre duas imagens é muito curto e a intensidade da imagem não se altera no intervalo de tempo dado entre esta imagem e a próxima em uma sequência de imagens, temos a relação dada pela Equação 1,

$$I(x,y,t) = I(x+dx, y+dy, t+dt). \quad (1)$$

Expandindo a Equação 1 pela série de Taylor e simplificando-a, chega-se à Equação 2 (FARIA, 2008),

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{dI}{dt} = 0, \quad (2)$$

Onde $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$ são os dois componentes do vetor de velocidade da imagem \vec{v} e $\frac{\partial I}{\partial x}$ e $\frac{\partial I}{\partial y}$ formam o gradiente da função imagem nas direções x e y .

Rittner (2004) cita que os modelos computacionais existentes para o cálculo do Fluxo Óptico podem ser agrupados em três classes: métodos diferenciais baseados em intensidade, métodos de filtragem baseados em frequência e métodos baseados em correspondência. Em todas estas técnicas são reconhecidas três etapas de processamento: pré-filtragem ou suavização com filtros passa-baixa ou passa-faixa, de modo a extrair o sinal que realmente interessa para a estimativa; extração de derivadas espaço-temporais ou outras medidas similares fundamentais sobre o movimento; e integração destas medidas para produzir o

deslocamento bidimensional dos *pixels*.

A definição dos gradientes de espaço e tempo e a definição da velocidade dos *pixels* pelo Método das Diferenças, que é o método de solução da equação do fluxo óptico utilizado neste trabalho, pode ser ilustrada por uma adaptação de Rittner (2004): supõe-se que há uma imagem I com um gradiente espacial de 2 unidades por *pixel* na direção x , em uma região de 3×5 *pixels*. Este gradiente significa que a cada unidade do eixo x , é somado 2 ao valor do *pixel*, como mostra a Figura 4.

23	25	27	29	31
23	25	27	29	31
23	25	27	29	31

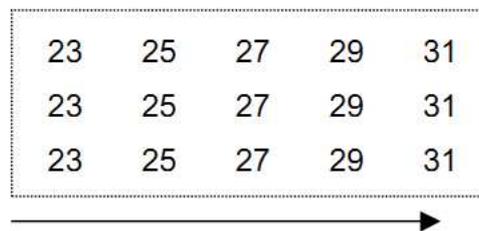


Figura 4. Região ou janela da imagem onde é calculado o fluxo óptico (RITTNER, 2004).

Supomos que a mesma região, no próximo quadro ($I+1$), seja conforme mostra a Figura 5.

17	19	21	23	25
17	19	21	23	25
17	19	21	23	25

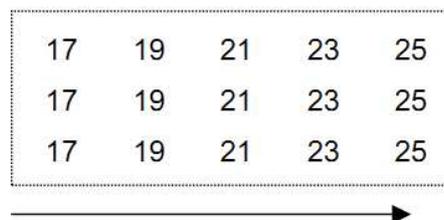


Figura 5. Região na próxima imagem (RITTNER, 2004).

Observa-se que foi subtraído 6 do valor de cada *pixel*. Este é o valor do gradiente temporal da imagem. Observa-se, também, pelas novas posições dos valores, que a região se moveu em 3 *pixels* entre uma imagem em outra. Este é o deslocamento ou a velocidade desta região entre a imagem I e a imagem $I+1$.

O valor do gradiente temporal pode ser deduzido ao se multiplicar a velocidade pelo gradiente espacial (3×2), confirmando a eficácia do cálculo dos gradientes de espaço e tempo e da velocidade dos *pixels*.

O Fluxo Óptico estimado para cada pixel ou região da imagem possui uma magnitude e uma direção e é representado por um vetor, composto pelo deslocamento da imagem nos sentidos vertical (\vec{u}) e horizontal (\vec{v}). O valor do componente vertical do movimento (\vec{u}) é positivo se representar deslocamento com direção para cima. O sinal do vetor horizontal (\vec{v}) é positivo se representar deslocamento com direção para a direita. Os vetores são ilustrados na Figura 6.

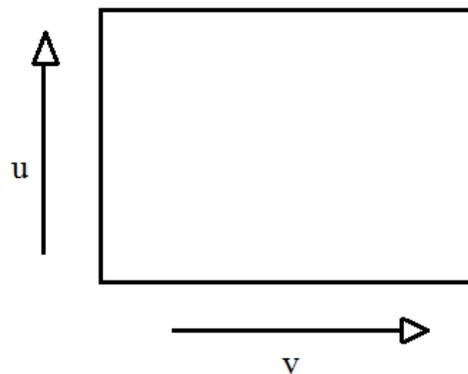


Figura 6. Vetores que representam o Fluxo Óptico. Vetor vertical (\vec{u}) e vetor horizontal (\vec{v}) (RITTNER, 2004).

O conjunto de vetores de deslocamento da imagem chama-se mapa de fluxo óptico. A Figura 7 mostra a representação, em gráfico de setas, do mapa de fluxo de uma sequência de imagens. O gráfico mostra que a cena foi deslocada para a direita, portanto o observador está se deslocando para a esquerda.

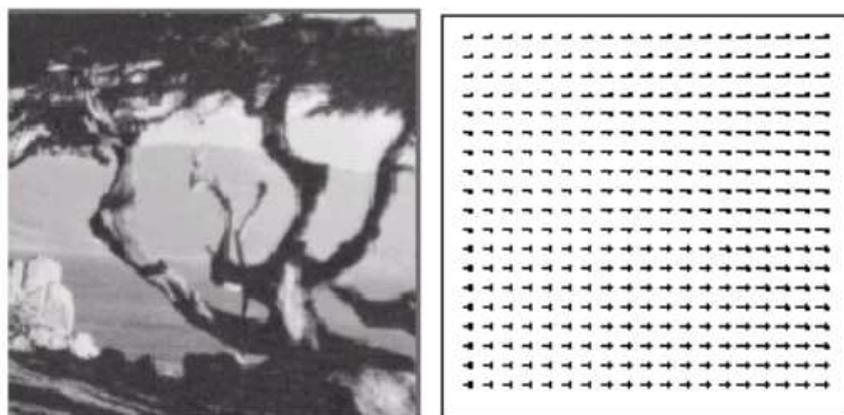


Figura 7. Mapa de Fluxo Óptico global de imagens de uma árvore feitas por uma câmera em movimento (RITTNER, 2004).

A Figura 8 mostra a representação em gráfico de setas da estimativa do Fluxo Óptico Local de uma região da imagem, demarcada pelo retângulo preto. Cada seta indica o Fluxo Óptico de um ponto da região. Observamos que nem sempre as direções e velocidades dos pontos condizem com as da região ou da imagem completa, mesmo que toda a imagem esteja se movendo na mesma direção, por conta das próprias limitações da técnica, além das variações de brilho e pelo conhecido Problema da Abertura.

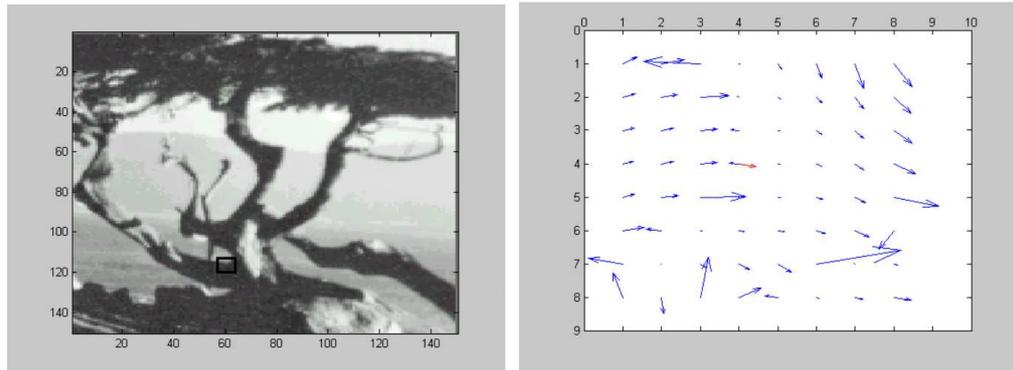


Figura 8. Mapa de Fluxo Óptico local de uma parte de imagens de uma árvore feitas por uma câmera em movimento – parte demarcada pelo retângulo preto (RITTNER, 2004).

Os métodos diferenciais de cálculo do Fluxo Ótico, que calculam o deslocamento da imagem por meio das derivadas espaço-temporais da imagem, como é feito no presente trabalho, são classificados em globais e locais. Os métodos globais, que usam um método de suavização como pré-processamento, servem para medir o deslocamento da cena em relação ao observador ou à câmera. E os métodos locais, que usam os deslocamentos simples de certa janela de vizinhança de *pixels*, servem para medir o deslocamento de pontos ou regiões específicas na imagem (RITTNER, 2004).

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo explica os trabalhos relacionados encontrados na literatura. Estes trabalhos são apresentados em três seções, de acordo com os seus objetivos. A primeira seção apresenta trabalhos que realizam a estimativa dos ângulos de voo por meio da posição e inclinação do Horizonte. A segunda seção apresenta trabalhos que realizam a estimativa dos ângulos de voo por meio do Fluxo Ótico da cena. E a terceira e última seção apresenta trabalhos sobre técnicas recentes que realizam a evolução do conceito do Fluxo Ótico da imagem.

3.1 Estimativa dos Ângulos de Voo por Meio da Linha do Horizonte

Ettinger e Nechyba (2001) estimam os Parâmetros de Ataque e Rolagem, por meio do Horizonte, para realizar a estabilização de Micro Veículos Aéreos - MAVs. O seu algoritmo de detecção do Horizonte busca a linha que divide a imagem em duas regiões de pixels com menor variância entre eles. Isto garante que os pixels de céu se parecem mais com pixels de céu e os de solo, idem. O algoritmo atribui às linhas um valor que significa o nível de homogeneidade das regiões de céu e solo que elas separam ou o grau de variância exibido por cada uma destas distribuições. Este valor é o J_l . Este valor é dado pela Equação 3,

$$J_l = \frac{1}{|\sum c| + |\sum s|}. \quad (3)$$

Como mostra a Equação 3, J_l é calculado a partir do valor inverso à soma dos determinantes das matrizes de covariância dos pixels de céu e solo. A linha que gera o maior valor de J_l sobre a imagem é eleita como a linha do Horizonte.

O algoritmo infere o ângulo de rolagem a partir da inclinação do Horizonte, e infere o ângulo de ataque a partir da porcentagem de área da imagem que se encontra acima e abaixo do Horizonte. Na verdade, este não é o ângulo real, mas um pseudo-ângulo deduzido pela porcentagem de deslocamento translacional do Horizonte, que foi suficiente para o trabalho.

Cornall *et al.* (2006) apresenta um método de baixa complexidade computacional para a inferência dos Parâmetros de Ataque e Rolagem para estabilização de voo. Ele encontra o Horizonte fazendo o destaque dos pixels de azul sobre os outros dois canais de cores RGB e a binarização da imagem a partir de um limiar (*threshold*) encontrado a partir da análise do seu histograma. Em seguida, aplica uma máscara circular na imagem e busca os centros dos blocos de *pixels* claros e escuros, e, por fim, considera que o Horizonte é uma linha

perpendicular à linha que liga os dois centros. Também neste trabalho, um pseudo-ângulo de ataque é deduzido pelo deslocamento translacional da Linha do Horizonte.

Dusha (2008) apresenta um método para inferência dos Parâmetros de Ataque e Rolagem. Ele é estimado a partir das matrizes de rotação e translação do movimento da câmera em relação à superfície e faz uso da largura focal da câmera. O Parâmetro de Guinada não é estimado. Seu método detecta linhas de horizonte candidatas através do uso de pré-processamento morfológico das imagens e uso da Transformada de Hough. A eleição entre as candidatas é feita comparando-se o Fluxo Óptico das mesmas, mostradas na Figura 9. Ele cita que a Linha do Horizonte é a área da imagem onde o Fluxo Óptico é mais constante, pois todos os seus *pixels* possuem a mesma distância da câmera, o que não acontece com os pixels das outras linhas.



Figura 9. Fluxo óptico do Horizonte. Setas indicando movimento para cima (DUSHA, 2008).

Dusha (2008) cita que os pontos do Horizonte são os pontos com maior probabilidade de ter a mesma velocidade que a imagem como um todo, já que as velocidades dos outros pontos da imagem variam de acordo com a distância que estes pontos têm em relação à câmera no espaço tridimensional, propriedade conhecida em Computação Gráfica como Efeito Parallax. Por causa do efeito Parallax, os pontos mais próximos da câmera tendem a ter velocidade maior que os pontos mais distantes. Além disto, os pontos do Horizonte são os que têm maior constância na reflexão da luz proveniente do Sol, de quadro para quadro.

A técnica do Filtro de Kalman Extendido é usada como garantia para descartar linhas que, estatisticamente, em relação aos quadros anteriores, não poderiam ser a Linha do

Horizonte.

A abordagem de Dusha possui como limitações: i) não estimar a Guinada, como fazemos no presente trabalho; ii) eleger a Linha do Horizonte por meio do Fluxo Ótico da mesma. Esta estratégia, da forma simples como é descrita em seu trabalho, não é robusta, uma vez que a Linha do Horizonte é uma região muito pequena da imagem, além de ser uma zona de oclusão entre duas regiões - céu e solo. No presente trabalho, nós usamos o Fluxo Ótico de diversos pontos confiáveis (*features*) da imagem, sendo este nível de confiabilidade verificado pelo método de extração de *features* usado.

Pereira *et al.* (2008) apresenta um método para inferência dos Parâmetros de Ataque e Rolagem por meio do Horizonte, que se difere dos trabalhos relacionados anteriores porque faz a associação das informações do Horizonte com os parâmetros intrínsecos da câmera. Resultados experimentais obtidos com uma aeronave de asa fixa comparam o método com sensores inerciais eletromecânicos. Este trabalho também tem a limitação de não estimar a Guinada, como fazemos no presente trabalho.

Oreifej (2011) estima os Ângulos de Ataque e Rolagem como Pereira *et al.*, mas estas estimativas são usadas para definir a posição tridimensional do robô aéreo, denominado *Egomotion*, e não apenas para realizar a estabilização do voo, como fazem os trabalhos relacionados. Ele reduz a complexidade de encontrar a correta orientação da câmera no espaço, resolvendo um grupo de equações para encontrar as velocidades translacional e rotacional da cena. Este trabalho também tem a limitação de não estimar a Guinada, como fazemos no presente trabalho.

A associação da informação de movimento da imagem com a informação de profundidade, como a Largura Focal, tal como é feito em Dusha (2008), Pereira (2008) e Oreifej (2011) implica em avanço do estado da arte da estimativa de atitude usando o Horizonte. Como é argumentado por Oreifej (2011), a medida do Ângulo de Ataque feita com base na porcentagem da imagem que está acima do Horizonte, como foi feito nos trabalhos anteriores, tem uma relação direta com o verdadeiro Ângulo de Ataque, mas para a estimativa do movimento completo do robô aéreo, chamada *Egomotion*, é necessário o ângulo real e exato, que foi o que o motivou a usar os parâmetros intrínsecos da câmera na estimativa do Ângulo de Ataque.

3.2 Estimativa dos Ângulos de Voo por meio do Fluxo Óptico

Volker *et al.* (2012) estima as velocidades lineares nos quadros em torno dos eixos x , y e z do espaço tridimensional usando uma técnica própria de rastreamento de características fortes da cena (*features*). Para isto, ele faz a segmentação da imagem, eleição das *features*, e rastreamento das mesmas. O deslocamento das *features* em dois quadros consecutivos é considerado como o movimento da própria cena através dos quadros. A sua técnica é similar à de Rastreamento de *Features* de Kanade, Lucas e Tomasi, KLT, que nós usamos no presente trabalho. A vantagem do trabalho de Volker *et al.* sobre o KLT é que ele tem maior controle sobre a densidade do mapa de *features*, ou a quantidade de *features* consideradas em uma imagem. Este trabalho mostra a eficiência do uso do Fluxo Óptico em um vídeo de 120s, mas os movimentos do veículo aéreo demonstrados são executados em uma faixa de, no máximo, dois graus de diferença. O presente trabalho agrega confiabilidade ao trabalho de Volker *et al* ao associar informações da cena, informações do Horizonte, mais especificamente, às informações do Fluxo Óptico.

Brooks, Baumela e Chojnacki (1997) realizam a estimativa do movimento de uma câmera não-calibrada que pode ter a sua largura focal desconhecida ou variável. Eles o fazem por meio do fluxo óptico da cena e com o objetivo de definir o movimento completo da câmera no espaço tridimensional – *Egomotion*. O trabalho mostra uma quantidade de ruídos em seus resultados que pode ser visto como uma necessidade de melhoria em seu método de obtenção do Fluxo Óptico e até como uma demonstração de inviabilidade do uso do Fluxo Óptico em certas aplicações dadas à detecção de movimentos. O presente trabalho vem confirmar a possibilidade do uso do Fluxo Óptico da cena em estimativa do *Egomotion*.

O trabalho de Herisse *et al.* (2008) e o trabalho de Roberts, Walker e O’Shea (2005) estimam os ângulos de vôo por meio da associação do Fluxo Óptico com os dados provenientes de uma Unidade de Medição Inercial (IMU) e do Sistema de Posicionamento Global ou Sistema de Satélite de Navegação Global (GPS/GNSS). Roberts, Walker e O’Shea mostram um erro constante de 0,5 graus para o ângulo de rolagem, com picos de até 1,2 graus de erro, e um erro constante de até 1 grau para o ângulo de ataque. Este trabalho tem a limitação de não provar o real desempenho da estimativa dos ângulos por meio da técnica de visão usada, o Fluxo Óptico. De forma diferente, no presente trabalho, nós usamos na solução métodos exclusivos de Visão Computacional, sem o suporte de informações de outros sensores, como IMU e GPS. Desta forma, nós podemos estudar, comprovar e melhorar o desempenho de cada técnica de Visão Computacional usada na solução. Os dados provenientes da técnica exclusiva de visão poderão ser usados como suporte para tolerar possíveis falhas dos outros sensores ou até podem ser associados com os dados destes

sensores, como fizeram estes trabalhos relacionados, porém sem afetar a pesquisa que deve estar focada em técnicas de Visão Computacional.

Lima e Pio (2012) estimam os parâmetros críticos de voo por meio da posição e orientação do Horizonte e por meio do Fluxo Óptico da região da Linha do Horizonte. Este trabalho mostra que o uso do Fluxo Óptico tem resultado similar ao da posição estática do Horizonte para a estimativa dos ângulos, ratificando o uso do Fluxo Óptico em imagens de voo, já tratado por Brooks, Baumela e Chojnacki (1997), Herisse *et al.* (2008), e Volker *et al.* (2012).

3.3 Estimativa do Fluxo Ótico

Lucas e Kanade (1981) criaram um método diferencial de cálculo do Fluxo Ótico que foi eleito, nos trabalhos de Barron, Fleet *et al.* e Galvin, McCane *et al.* (*apud* RITNER, 2004, pg. 3), como o melhor método de Fluxo Ótico existente dentre uma amostra dos métodos mais conhecidos. Alguns autores citam o método de Lucas e Kanade como o melhor para calcular o Fluxo Ótico Global e o método de Horn e Schunck como o melhor para o cálculo do Fluxo Ótico Local. Isto porque o algoritmo de Lucas e Kanade calcula o deslocamento de forma mais esparsa, enquanto Horn e Schunck tem maior facilidade para diferenciar as velocidades de pontos mais próximos. A Figura 10 mostra o cálculo do Fluxo Ótico realizado por meio do método de Lucas e Kanade, aplicado em imagens de voo capturadas por Ettinger e Nechyba (2001). Cada seta indica o Fluxo Ótico de um bloco de pixels da imagem. Pelo movimento descrito pela imagem, pode-se ver que o veículo aéreo está realizando um movimento de rotação em torno de seu eixo longitudinal, ou Rolagem.

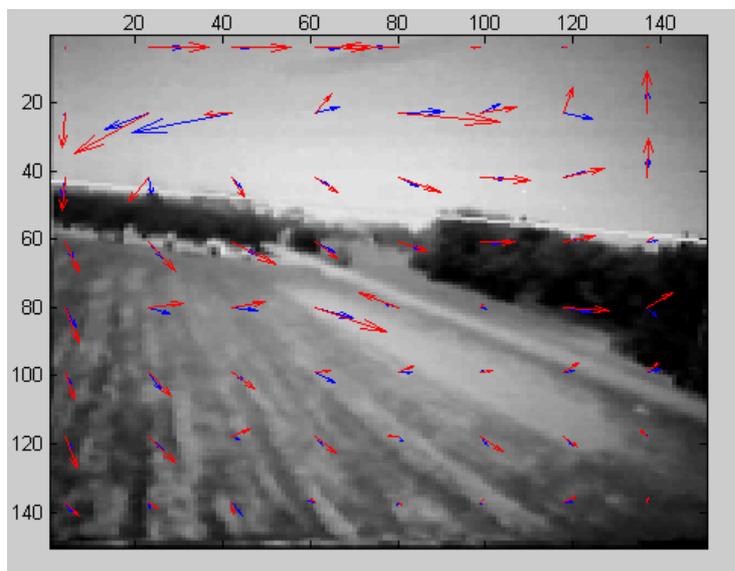


Figura 10. Aplicação do Fluxo Óptico em imagens de voo. Experimento do presente trabalho usando uma imagem de Ettinger e Nechyba (2001).

Kanade, Lucas e Tomasi criaram uma técnica para o cálculo do fluxo óptico de forma mais robusta, apropriada para imagens onde há maior risco de não serem atendidas as restrições necessárias para este cálculo. Esta técnica é chamada Rastreamento de *Features* de Kanade, Lucas e Tomasi – KLT (*Kanade, Lucas And Tomasi Feature Tracker*). Esta técnica estima o movimento de pontos distintos (*features*) na imagem, combinando um método de rastreamento destes pontos com o método do Fluxo Óptico. Ela tem tamanha acurácia que incorpora as regiões de *subpixels* ao rastreamento e as rastreia com altas taxas de precisão, especialmente em áreas de oclusão, que são locais onde há maior probabilidade de ocorrer uma pequena distância entre *pixels* com diferentes fluxos de velocidades (ROCHA, 2012).

A técnica KLT foi criada por Kanade e Tomasi, com a associação do trabalho sobre o Fluxo Óptico de Lucas e Kanade e o trabalho de Rastreamento de *Features* de Tomasi, e, posteriormente, foi melhorada por Shi e Tomasi. Ela identifica pontos da imagem que possuem boas características para rastrear em uma sequência de imagens de tamanho estabelecido arbitrariamente. Esta identificação é revisada a cada imagem, dado que alguns pontos podem ser descartados após transformações ocorridas na imagem. Após esta identificação, o algoritmo KLT executa o Fluxo Óptico de forma piramidal até que os deslocamentos das *features* sejam considerados corretos.

O algoritmo piramidal de Fluxo Óptico consiste em criar uma pirâmide gaussiana da imagem onde, no topo da pirâmide, temos a imagem reduzida à sua menor resolução possível e na base temos a imagem em sua resolução original. O Fluxo Óptico é calculado para os *pixels* da imagem ao topo da pirâmide e os resultados deste nível servem como referencial para os cálculos do nível seguinte. Este processo é repetido até a base (LEÃO, 2012). Em cada nível de resolução, verifica-se, quando se somam os vetores de Fluxo Óptico encontrados aos *pixels* da imagem anterior, se o resultado é a imagem corrente (*Template Matching*). Este processo pode ser repetido por N vezes, a fim de que as distorções sejam reduzidas e até anuladas. O aumento na resolução da imagem e o novo ciclo de iterações de Fluxo Óptico se repetem por um número arbitrário R de vezes. A Figura 11 ilustra este processo. Nela, I se refere à imagem corrente original e J se refere à imagem construída com a soma do Fluxo Óptico entre a imagem anterior e a corrente com os valores dos pixels da imagem anterior.

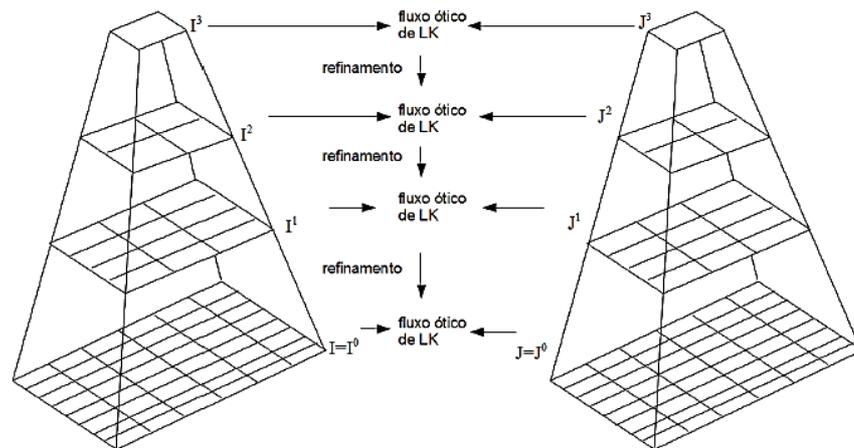


Figura 11. Ilustração do método do Fluxo Óptico piramidal (ROCHA, 2012).

O algoritmo KLT verifica o resultado do Fluxo Óptico, em cada iteração, não por meio de *Template Matching*, como no modelo piramidal fundamental, mas por meio do rastreamento das *features* da imagem anterior na imagem resultante dos deslocamentos estimados dos *pixels*. Este rastreamento é feito em todos os níveis de resolução da imagem. O resultado é um Fluxo Óptico estimado em valores decimais, mostrando sua grande precisão.

Capítulo 4

Metodologia

A metodologia desenvolvida neste trabalho é decomposta em três etapas de processamento que são executadas sobre cada imagem da sequência. A Figura 12 mostra o diagrama de atividades destas três etapas e as suas conexões.

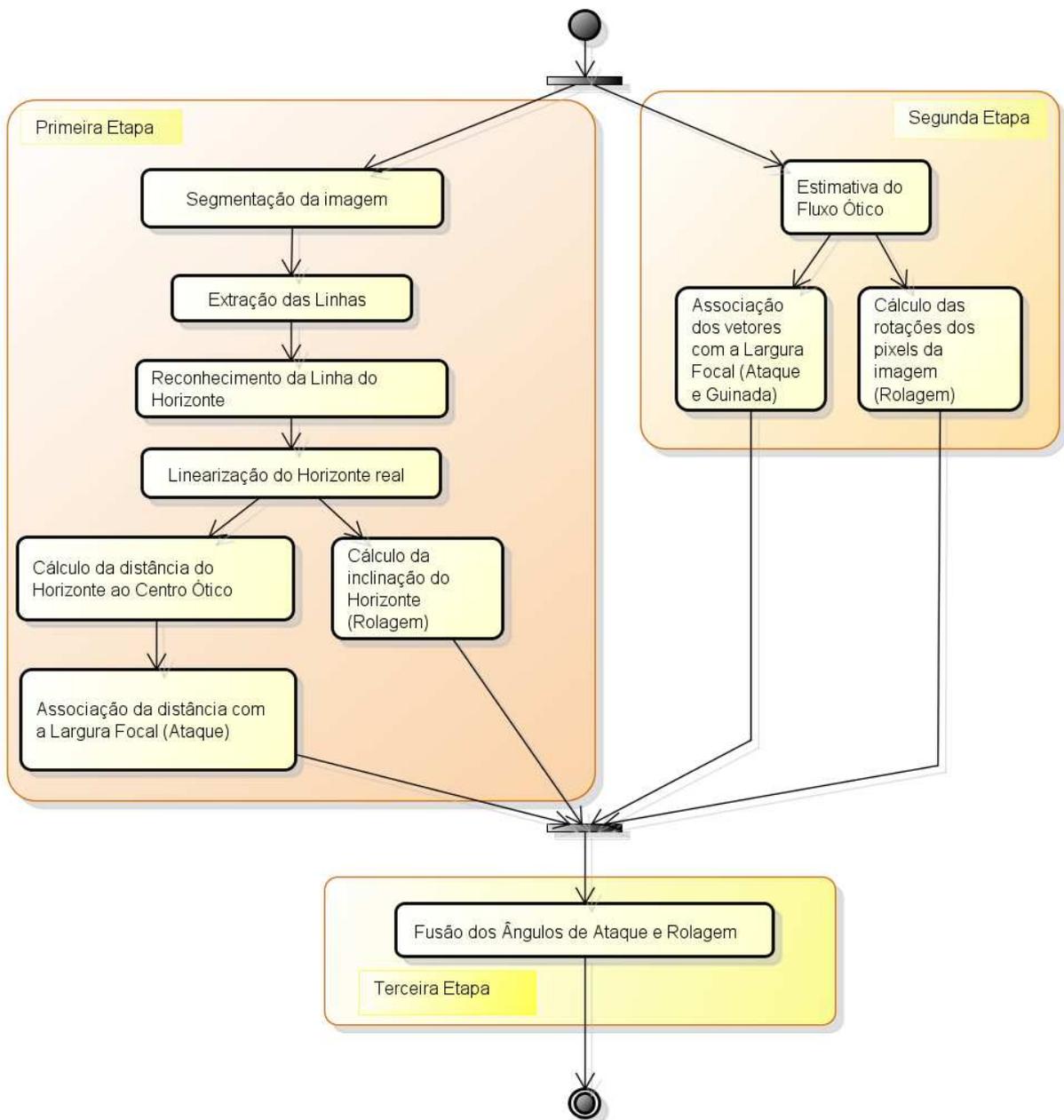


Figura 12. Diagrama das atividades que constituem a metodologia deste trabalho.

A primeira etapa do método deste trabalho consiste no reconhecimento do Horizonte na imagem e cálculo dos ângulos de voo a partir da sua altura e inclinação. Tendo reconhecido o Horizonte, é realizado o cálculo da distância do Horizonte ao Centro Ótico da câmera e a sua associação com a Largura Focal, que resulta no Ângulo de Ataque. Também é realizado o cálculo da inclinação do Horizonte em relação ao plano horizontal da câmera, que é equivalente ao Ângulo de Rolagem.

A segunda etapa se inicia com a estimativa do Fluxo Ótico da imagem. Os vetores vertical e horizontal do Fluxo Ótico, obtidos entre a imagem anterior e a corrente, são associados com a Largura Focal da câmera, resultando nos Ângulos de Ataque e Guinada. O Ângulo de Rolagem é estimado a partir do cálculo das rotações que todos os pontos realizam, entre a imagem anterior e a corrente, em relação ao Centro de Rotação do veículo aéreo.

A terceira e última etapa consiste em aplicar um filtro de média ponderada entre os ângulos de voo obtidos nas duas etapas anteriores. Este filtro é aplicado somente entre os valores dos ângulos de Ataque e Rolagem, pois o Ângulo de Guinada só é estimado pela etapa do Fluxo Ótico.

4.1 Segmentação e Equalização da Imagem

A Linha do Horizonte deve ser reconhecida na imagem para que os ângulos sejam estimados de acordo com a sua altura e inclinação. Para realizar o reconhecimento do Horizonte, a primeira tarefa a ser realizada sobre a imagem é a sua segmentação. O critério usado para a segmentação é a intensidade de azul dos pixels $P(i)$ que compõem a imagem, representados em três canais do modelo RGB. Na imagem resultante deste processo, cada pixel recebe o valor de uma razão entre o valor do canal azul sobre o valor de brilho do pixel de origem. Isto é expresso na Equação 4,

$$P(i) = \left(\frac{3*B^2}{R + G + B} \right), \quad (4)$$

Onde R representa o valor do canal de informação da quantidade de vermelho (*red*), G representa o valor do canal de informação da quantidade de verde (*green*), e B representa o valor do canal de informação da quantidade de azul (*blue*) dos *pixels* da imagem. O resultado da segmentação é exibido na Figura 13.

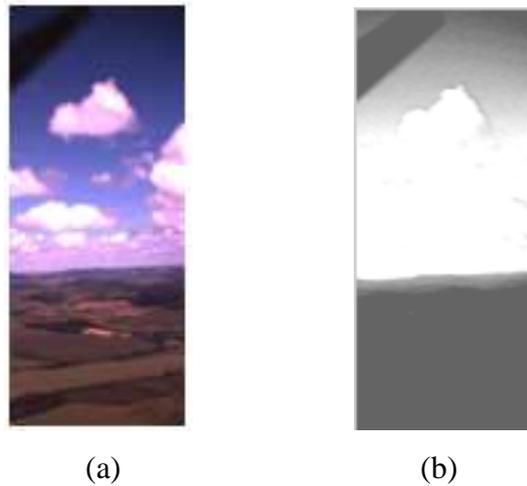


Figura 13. Imagem antes (a) e depois (b) da segmentação.

Após a segmentação da imagem, realiza-se o processamento morfológico da mesma, a fim de suavizá-la e de se retirar uma grande quantidade de linhas presentes na imagem. Este processamento é feito na forma de convolução sobre os *pixels* da imagem com a máscara ou elemento estruturante da morfologia apresentada na Equação 5,

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} . \quad (5)$$

O processamento da imagem segue com a sua equalização. Neste passo, as intensidades de cinza da imagem segmentada são mapeadas para uma nova e menor faixa de valores, enquadrando cada valor da imagem original em sua faixa correspondente de saída. Os valores fora desta faixa são saturados para que sejam incluídos na mesma. Esta operação aumenta o contraste da imagem.

4.2 Extração de Linhas

Sobre a imagem segmentada e equalizada, é feita a extração de bordas ou de linhas, por meio do algoritmo detector de bordas de Canny, que produz uma imagem com as linhas encontradas na imagem original. Este resultado é exibido na Figura 12. As linhas encontradas serão candidatas à Linha do Horizonte.

O resultado da segmentação, equalização da imagem e detecção de suas bordas é exibido na Figura 14.



Figura 14. Linha, extraída da imagem, candidata a Horizonte.

A imagem com as linhas detectadas no passo anterior servem de entrada para o algoritmo de rotulação de componentes, que analisa a imagem com base na conectividade de seus *pixels*. A conectividade dos *pixels* equivale à continuidade que eles têm de uma característica usada como critério de familiaridade. Como a imagem de entrada está em preto-e-branco, a cor dos *pixels* pode ser usado como critério de conectividade e pode-se assumir que os elementos a serem rotulados, as linhas, são grupos de *pixels* brancos que são vizinhos em uma área de 8x8 pixels. Todos os pixels de cada um dos grupos encontrados recebem um mesmo número de identificação - o número que identifica o seu grupo. A Figura 15 mostra a imagem após a extração e rotulação de bordas.



Figura 15. Imagem após a extração e rotulação das suas linhas.

O resultado apresentado na Figura 15 exibe apenas uma linha candidata. Neste caso, esta será a Linha do Horizonte. Mas há casos onde várias linhas são encontradas, demandando a etapa de Identificação da Linha do Horizonte. A Figura 16 mostra um exemplo de cenário onde foram geradas várias linhas candidatas na imagem e o resultado da rotulação destas linhas. Em (b), os pixels foram coloridos de forma a distinguirmos os seus grupos ou as linhas da imagem.

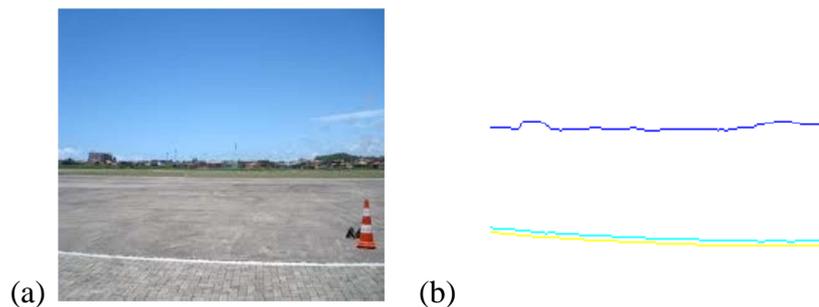


Figura 16. Um exemplo de imagem que gera a extração e rotulação de várias linhas. (a) imagem original; (b) imagem após a extração e rotulação das suas linhas.

4.3 Reconhecimento da Linha do Horizonte

Caso haja mais de uma linha candidata l_i reconhecida na imagem I , as linhas encontradas l_i são submetidas à etapa de eleição da Linha do Horizonte. Nesta etapa, são criadas imagens auxiliares I_{aux} , cada uma contendo uma das linhas encontradas, mantendo as coordenadas cartesianas destas linhas como eram na imagem I . As imagens I_{aux} são modelos de linhas candidatas. A votação da linha acontece da seguinte forma: o algoritmo identifica, na imagem original I , a linha l_i contida no modelo. Em seguida, informa o nível de homogeneidade de cores das duas regiões que a linha cria na imagem. A linha que faça estas regiões serem mais homogêneas é escolhida como a Linha do Horizonte. Este processo sempre ocorrerá quando o Horizonte for encontrado na imagem, pois a sua linha sempre cria uma bissecção, seja qual for a sua posição na imagem.

Considera-se que os pixels acima e abaixo da citada linha são pixels do céu e da superfície, respectivamente. O critério C de eleição da Linha do Horizonte é dado pela Equação 6,

$$C = \frac{1}{|\sum c| + |\sum s|}, \quad (6)$$

Onde $|\sum c|$ e $|\sum s|$ são as determinantes das matrizes de covariância das distribuições dos *pixels* das regiões de céu e de solo, respectivamente. Quanto maior este critério, menor é a variância interna das regiões de céu e de solo, portanto, a linha que proporciona maior valor para este critério provê a estas regiões a maior homogeneidade possível dentre todas as linhas candidatas, é considerada a Linha do Horizonte. A Figura 17 mostra a Linha do Horizonte reconhecida na imagem de voo e a localização do Centro Óptico na imagem, em vermelho. Ambos serão usados para as estimativas dos ângulos de Ataque e Rolagem.

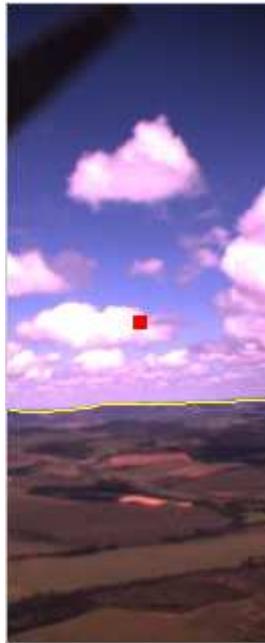


Figura 17. Horizonte reconhecido na imagem de voo. O ponto vermelho indica a localização do Centro Óptico na imagem.

4.4 Estimativa do Ângulo de Ataque por Meio do Horizonte

O Ângulo de Ataque é estimado a partir da geometria interna da câmera e não da geometria do espaço no qual a câmera se encontra. Isto é possível porque a imagem é uma projeção perspectiva da cena capturada e os mesmos ângulos que ocorrem no movimento da câmera com relação a um referencial no mundo possuem ângulos equivalentes que ocorrem no lado interno da câmera.

S-egundo a Ótica Geométrica, algumas propriedades que existem entre o plano focal e

o mundo são reproduzidas entre o plano focal e o plano de imagem. Uma destas propriedades diz que a razão entre a altura de qualquer elemento no mundo, H_m , e a distância deste elemento para o plano focal, Z , é igual à razão entre a altura do mesmo elemento projetado no plano de imagem, H_i , e a distância do Plano de Imagem para o Plano Focal, f , como mostra a equação 7,

$$\frac{H_m}{Z} = \frac{H_i}{f}. \quad (7)$$

Na Figura 18, ilustramos esta mesma propriedade substituindo a altura de um elemento da cena pela distância de um ponto m qualquer na cena para o Centro Óptico c .

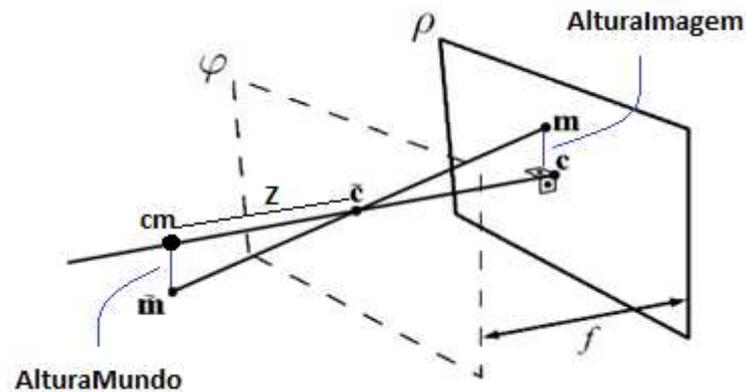


Figura 18. Transformação de projeção perspectiva de um ponto da cena para a imagem. Um ponto qualquer na imagem \hat{m} , o centro focal \hat{c} , centro do plano focal, o centro óptico – centro do plano de imagem, e a largura focal f – distância entre o plano focal e o plano de imagem.

Por esta relação, o mesmo ângulo que incide sobre o centro focal \hat{c} com relação ao triângulo que tem como vértices \hat{c} , cm e \hat{m} , incide sobre \hat{c} com relação ao triângulo que tem como vértices \hat{c} , c e m . Então, por Trigonometria, podem-se inferir os ângulos de movimento do ponto m na imagem para saber os ângulos de \hat{m} na cena. O ângulo de deslocamento vertical do ponto m com relação ao centro focal \hat{c} é obtido da seguinte forma:

$$\Theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{dv}{f} \right), \quad (8)$$

Sendo que dv é a distância vertical do ponto para o centro óptico,

$$dv = Y_m - Y_c. \quad (9)$$

Adaptando a Equação 8 para calcular o ângulo que o Horizonte faz verticalmente em

relação à câmera, ou Ângulo de Ataque, este pode ser inferido da seguinte forma:

$$\Theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{dvH}{f} \right), \quad (10)$$

Sendo que dvH é a distância vertical da Linha do Horizonte para o Centro Óptico. A Figura 19 mostra esta geometria.

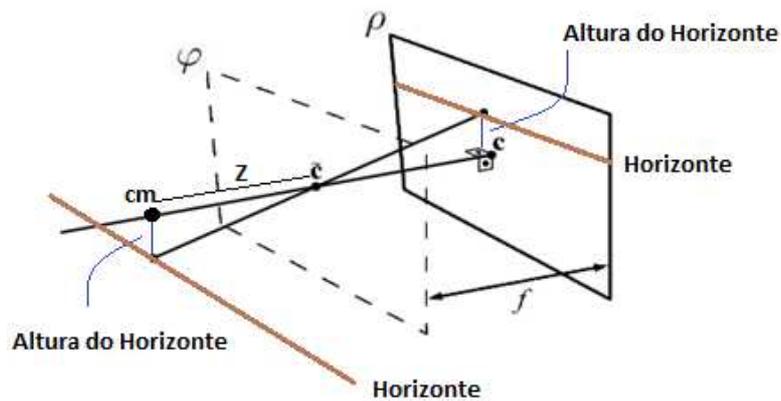


Figura 19. Transformação de Projeção Perspectiva da Linha do Horizonte da cena para a imagem. O Horizonte, o centro focal (\hat{c}), centro do plano focal, o centro óptico – centro do plano de imagem, a largura focal – distância entre o plano focal e o plano de imagem.

Para calcularmos a distância do Horizonte ao Centro Óptico, dvH , usamos um método conhecido de cálculo da distância de uma reta a um ponto. Ele é expresso pela Equação 11.

$$dvH = \frac{[(x_2 - x_1) \times (y_0 - y_1)] - [(x_1 - x_0) \times (y_2 - y_1)]}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}, \quad (11)$$

Sendo $P_1(x_1, y_1)$ o ponto à extremidade esquerda do Horizonte; $P_2(x_2, y_2)$, o ponto à extremidade direita do Horizonte; e $C(x_0, y_0)$, o Centro Óptico da imagem. A distância tem sinal positivo se o Horizonte está acima do Centro Óptico, e negativo no caso contrário. Este sinal é refletido na estimativa do ângulo de Ataque.

O Horizonte pode não ser uma linha perfeitamente reta na imagem, o que pode ocasionar uma distorção no cálculo da distância da Linha do Horizonte ao Centro Óptico, pois os pontos extremos do Horizonte podem estar mais altos ou baixos que o restante dos pontos da Linha do Horizonte. Logo, para que se garanta a eficiência no cálculo da distância do Horizonte ao Centro Óptico, o Horizonte deve ser aproximado por uma reta definida por $y =$

$ax + b$, onde a é o coeficiente angular da reta e b o seu coeficiente linear, ou o valor da ordenada y da reta para o qual a abscissa x é nula.

O Método dos Mínimos Quadrados é usado para aproximar ao máximo o Horizonte real a uma reta. Este método consiste em um estimador estatístico que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos provenientes da regressão linear de um conjunto de dados, de forma a melhorar o grau de ajuste do modelo para que os dados sejam distribuídos em uma reta. O conjunto de dados utilizados neste trabalho são as coordenadas cartesianas dos pontos do Horizonte. Este método pode ser usado porque estas coordenadas são parâmetros que atendem ao requisito de pertencerem a um modelo linear. A Figura 20 ilustra a regressão simples que ocorre sobre os pontos do Horizonte e a reta resultante do método.

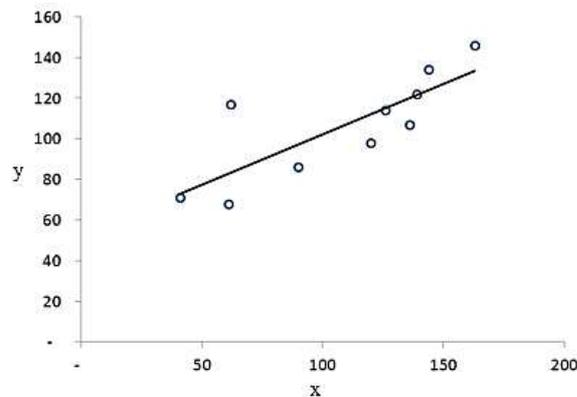


Figura 20. Regressão linear descrita pelos pontos do Horizonte real e a reta resultante da minimização da soma dos quadrados dos resíduos de cada ponto.

A estimativa dos mínimos quadrados dos pontos do Horizonte tem o objetivo de encontrar o valor expresso pela Equação 12,

$$y_i = a + bx_i + e_i, \quad (12)$$

Onde a é o parâmetro constante do modelo, porque não depende de x , i indica cada um dos pontos do Horizonte e e é o resíduo existente entre a posição deste ponto no modelo e a sua posição corrigida, ou a diferença entre a posição real do ponto e a sua posição estimada no Horizonte linearizado. Este método minimiza a soma dos quadrados destes resíduos. A Equação 13 mostra a estimativa de b , que, quando associado a a , retorna a menor diferença entre a previsão correta de y e o y real:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n i (x_i - \bar{x})}. \quad (13)$$

Tendo feito o reconhecimento da Linha do Horizonte, a sua linearização e o cálculo da sua distância para o Centro Óptico da imagem, o Ângulo de Ataque pode ser calculado, conforme a Equação 10.

4.5 Estimativa do Ângulo de Rolagem

O Ângulo de Rolagem, que é o ângulo que descreve o movimento de rotação do robô aéreo sobre o seu eixo longitudinal, é inferido calculando-se a inclinação da linha do Horizonte com relação ao eixo horizontal do robô aéreo, como pode ser visto na Figura 21. O presente trabalho assume que o eixo transversal do robô aéreo é paralelo ao eixo horizontal da câmera. Portanto, a inclinação do robô com relação ao Horizonte pode ser calculada pela inclinação da imagem com relação ao Horizonte, conforme mostra a Equação 14,

$$\Omega = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right), \quad (14)$$

Sendo

$$\Delta Y = y_0 - y_1 \text{ e } \Delta X = x_0 - x_1, \quad (15)$$

E sendo $P_0(x_0, y_0)$ o ponto que inicia a linha do Horizonte na imagem, e $P_1(x_1, y_1)$ o ponto que finaliza a linha do Horizonte na imagem, seja qual for a posição do Horizonte na imagem. Estes elementos são mostrados na Figura 21.

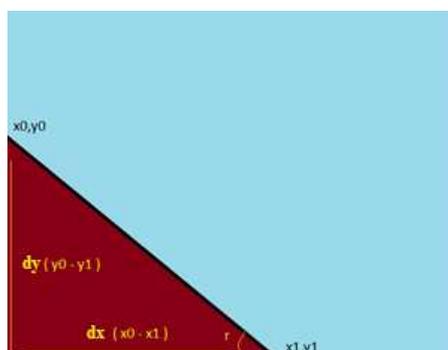


Figura 21. Elementos da estimativa do Ângulo de Rolagem. $P_0(x_0, y_0)$ é o ponto extremo esquerdo do Horizonte e $P_1(x_1, y_1)$ é o ponto extremo direito do mesmo.

4.6 Estimativa dos Ângulos Por Meio do Fluxo Óptico

Esta etapa do método consiste na estimativa dos ângulos de voo do veículo aéreo por meio do Fluxo Óptico da imagem. Este trabalho provê a informação de Fluxo Óptico pelo Método das Diferenças, de forma piramidal, e considera apenas o movimento de *features* da imagem. Da mesma forma que no primeiro método deste trabalho, para realizar-se a estimativa dos ângulos de Ataque e Guinada, o Fluxo Óptico é associado com a Largura Focal da cena, diferentemente da estimativa do Ângulo de Rolagem, que pode ser obtido somente com as informações de Fluxo Ótico.

4.6.1 Estimativa do Ângulo de Rolagem

A estimativa do Ângulo de Rolagem é realizada por meio da medição da transformação geométrica de rotação que os pontos realizam com relação ao Centro de Rotação do veículo aéreo.

Este ângulo é determinado pelo produto escalar calculado entre os vetores que descrevem as distâncias dos pontos ao Centro de Rotação, na imagem corrente e na que a antecede. A Figura 23 mostra o deslocamento de um ponto entre duas imagens e os vetores sobre os quais se aplica o produto escalar.

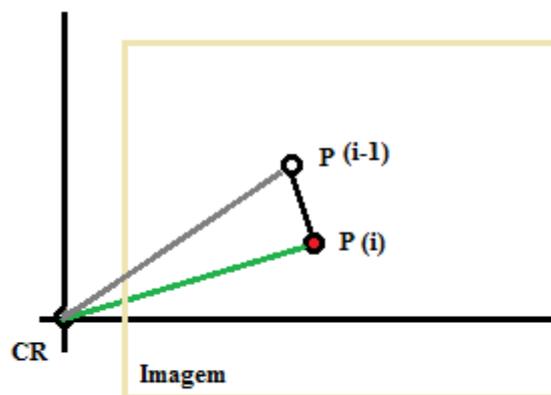


Figura 23. Vetores sobre os quais se aplica o produto escalar para a estimativa do Ângulo de Rolagem.

Como nós temos apenas as coordenadas cartesianas do ponto escolhido na imagem corrente, as suas coordenadas na imagem anterior são obtidas pela diferença entre as coordenadas da imagem corrente e o deslocamento estimado pelo Fluxo Óptico do ponto entre a imagem anterior e a corrente.

A distância do ponto no quadro corrente, $P(i)$, ao Centro de Rotação é obtida

subtraindo-se as coordenadas x e y do ponto pelas coordenadas x e y do centro de rotação. O mesmo é feito para obter-se a distância do ponto no quadro anterior ao corrente $P(i-1)$ ao Centro de Rotação.

A Equação 16 descreve o produto escalar e a resultante estimativa do Ângulo de Rolagem,

$$\Omega = \frac{(x_{i-1} * x_i) + (y_{i-1} * y_i)}{\sqrt{x_{i-1} + y_{i-1}} * \sqrt{x_i + y_i}}. \quad (16)$$

O Ângulo de Rolagem deve ser igual para todos os pontos da imagem. Mas, para dar maior robustez a esta estimativa, visto que o Fluxo Ótico pode agregar um erro sistemático à medição, define-se o Ângulo de Rolagem como a mediana do conjunto de rotações dos pontos da imagem.

O sinal das rotações dos pontos e, conseqüentemente, do Ângulo de Rolagem, é determinado de acordo com o quadrante trigonométrico em que o ponto se encontra na imagem atual e que se encontrava na anterior. Os quadrantes são demarcados em relação ao Centro de Rotação, como mostra a Figura 24.

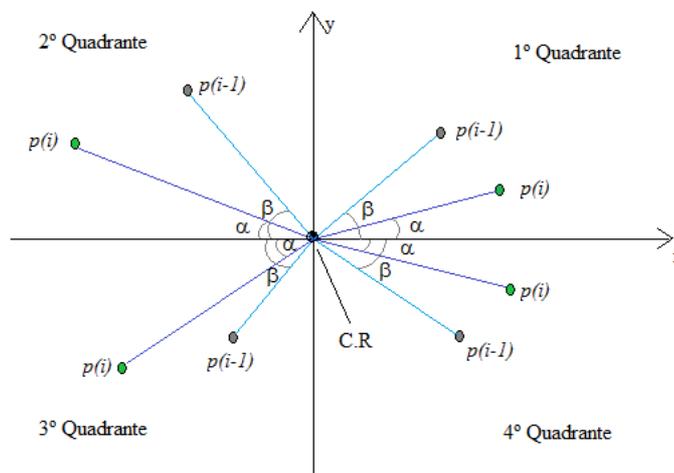


Figura 24. Quadrantes trigonométricos nos quais pode estar localizado o ponto escolhido para a medição do Ângulo de Rolagem. Centro de Rotação (C.R).

A Figura 24 mostra as possibilidades de deslocamento de um ponto $P(x,y)$ dentro dos quadrantes trigonométricos. O sinal do Ângulo de Rolagem é definido considerando-se a diferença entre α e β , que são os ângulos que o ponto faz com relação ao Centro de Rotação e ao eixo horizontal, na imagem atual (i) e na imagem anterior ($i-1$), respectivamente. Também é considerado o quadrante em que o ponto se encontra. Nos quadrantes 1 e 3, o sinal do

ângulo é positivo se α for menor que β , e negativo, caso contrário. Nos quadrantes 2 e 4, o sinal do ângulo é positivo se α for maior que β , e negativo, caso contrário.

O quadrante do ponto no quadro atual, $P(i)$, pode ser diferente do quadrante do ponto no quadro anterior, $P(i-1)$. Neste caso, o sinal do ângulo é positivo se o número do quadrante anterior é maior que o número do quadrante atual, e negativo, caso contrário. Exceto quando o quadrante atual for o 4º e o anterior for o 1º, quando o ângulo é positivo.

Há mais uma restrição a ser aplicada sobre o padrão de movimento para que este seja reconhecido como um movimento de rotação. Com base na Figura 24, não é possível inferir se houve um movimento de rotação do ponto ou apenas um movimento de translação. Não há como inferi-lo se não o fizermos levando em consideração o movimento de, pelo menos, dois pontos na imagem, como mostra a Figura 25.

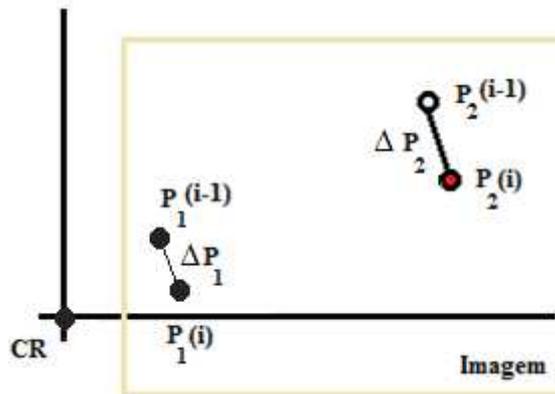


Figura 25. Pontos necessários para inferir o movimento de rotação no quadro, P_1 e P_2 . ΔP_n é o deslocamento de P_n entre o frame anterior ($i-1$) e o corrente (i).

Como ilustra a Figura 25, no movimento de rotação da imagem, as magnitudes dos vetores de movimento dos *pixels*, ΔP_n , são proporcionais à distância dos mesmos com relação ao Centro de Rotação. Já no movimento de translação, as magnitudes destes vetores de movimento são todas iguais. Portanto, consideramos que houve uma rotação no quadro se os deslocamentos dos pontos entre a imagem anterior e a corrente forem diferentes, e a diferença seja superior a um valor tolerável de erro que pode advir do Fluxo Óptico. Os deslocamentos são representados pelos dois vetores do Fluxo Óptico, vertical (\vec{u}) e horizontal (\vec{v}).

4.6.2 Estimativa do Ângulo de Ataque

O Ângulo de Ataque é estimado a partir de um triângulo do qual conhecemos dois lados, que são: a Largura Focal (f); e a distância que um ponto, escolhido arbitrariamente, se movimentou entre a imagem anterior e a atual, no sentido vertical, dado pelo vetor vertical do Fluxo Óptico (\vec{u}), como mostra a Figura 26. Tendo estes dois lados do triângulo, Largura Focal e vetor vertical do Fluxo Óptico, calculamos o Parâmetro de Ataque por simples Trigonometria.

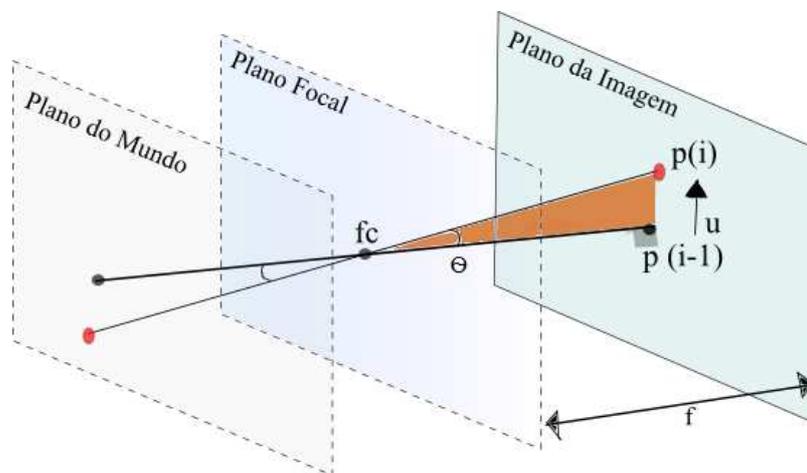


Figura 26. Inferência do Parâmetro de Ataque usando o Fluxo Óptico. A posição do ponto escolhido para a estimativa no quadro atual, $P(i)$, e no quadro anterior, $P(i-1)$, o centro focal (\hat{c}), a largura focal (f) e o ângulo de Ataque (Θ).

O ponto a ser considerado deve estar o mais próximo possível do Centro de Rotação para que não sofra interferência do movimento de rotação da imagem, caso haja algum. Isto porque, se houver um movimento de rotação e um de translação ao mesmo tempo, quanto maior a distância do ponto escolhido para o Centro de Rotação, mais o seu Fluxo Óptico irá descrever um movimento que não representa a translação, mas compõe um movimento de rotação da imagem. O ponto de translação escolhido é usado tanto para o ângulo de Ataque quanto para o de Guinada. A região de interesse em que ele se encontra é a mais próxima possível do Centro de rotação e ele é escolhido pela combinação de dois critérios: a maior proximidade ao Centro de Rotação e o Fluxo Óptico mais próximo da mediana da região. A Figura 27 mostra um quadro com o ponto escolhido em destaque, em cinza, dentro do círculo amarelo. A região de interesse usada na escolha do ponto está demarcada pelo quadrado de

cor laranja.



Figura 27. Ponto cinza escolhido para o cálculo dos ângulos de Ataque e Guinada, destacado pelo círculo amarelo. O quadrado em cor laranja mostra a área de interesse tomada para a escolha do ponto.

Como o Ângulo de Ataque é dado em relação ao Horizonte, a distância entre o Horizonte e o Centro Óptico deve ser conhecida no primeiro quadro. Por isto, nós calculamos o Ângulo de Ataque do primeiro quadro por meio do Método do Horizonte e atualizamos a estimativa do ângulo nos quadros seguintes com o Método do Fluxo Óptico.

A estimativa do Ângulo de Ataque de um quadro por meio do Método do Fluxo Óptico é mostrada na Equação 17,

$$\Theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\vec{u}}{f} \right). \quad (17)$$

Sendo que \vec{u} é o vetor vertical do Fluxo Óptico do Horizonte, medido entre o quadro anterior e o quadro atual, e f é a Largura Focal da câmera.

4.6.3 Estimativa do Ângulo de Guinada

O Ângulo de Guinada é estimado a partir da associação do vetor horizontal do Fluxo Óptico com a Largura Focal da câmera. O movimento horizontal é medido sobre o ponto mais próximo do Centro de Rotação do veículo aéreo e que tem o Fluxo Óptico mais confiável, e é o mesmo ponto escolhido para a estimativa do Ângulo de Ataque.

Como o Ângulo de Guinada é o deslocamento horizontal em relação ao Norte, é necessário conhecer o ângulo inicial da câmera em relação ao Norte, obtido por uma bússola,

e este é tomado como o ângulo do primeiro quadro. A estimativa do ângulo nos quadros seguintes é incrementada por meio do Método do Fluxo Óptico. A Figura 28 mostra os elementos usados na medição do Ângulo de Guinada, dispostos na forma de um triângulo. Tendo conhecidos a Largura Focal (f) e o vetor horizontal do Fluxo Óptico (\vec{v}), calculamos o Parâmetro de Guinada por simples Trigonometria.

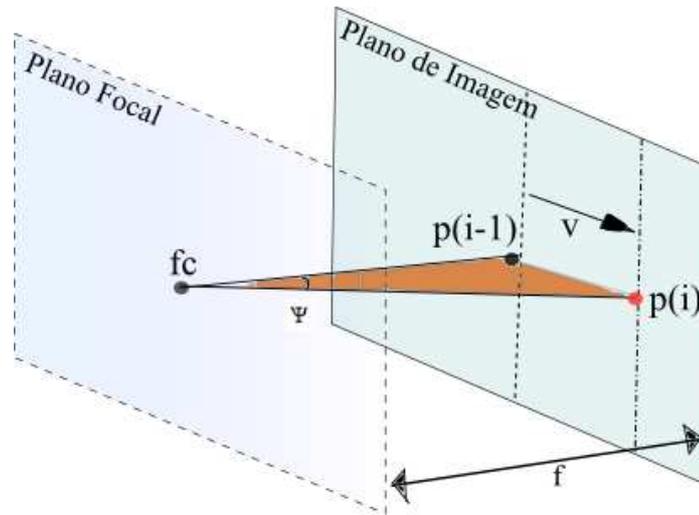


Figura 28. Triângulo usado na estimativa do Parâmetro de Guinada. A posição do ponto escolhido para a estimativa no quadro atual, $P(i)$, e no quadro anterior, $P(i-1)$, o centro focal (\hat{c}), a largura focal (f) e o Ângulo de Guinada (Ψ).

A estimativa do Ângulo de Guinada de um quadro por meio do Método do Fluxo Óptico é mostrada na Equação 18,

$$\Psi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\vec{v}}{f}\right), \quad (18)$$

Sendo que \vec{v} é o componente horizontal do Fluxo Óptico do ponto, medido entre o quadro anterior e o quadro atual, e f é a Largura Focal da câmera.

As estimativas dos ângulos de Ataque e Guinada por meio do Fluxo Óptico devem ser feitas após o ponto ser rotacionado em sentido inverso ao Ângulo de Rolagem medido no momento da estimativa. Isto porque um Fluxo Óptico que indica que a cena está descendo com relação ao veículo aéreo não indica, necessariamente, que este último está subindo, como mostra a Figura 29. A Rolagem corrente é que indica o sentido do movimento de translação.

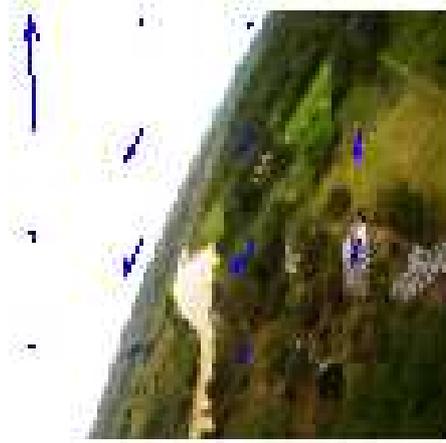


Figura 29. Movimento de Guinada ocorrido após uma rotação de, aproximadamente, 90 graus em sentido horário.

Na Figura 29, o veículo aéreo está inclinado, aproximadamente, 90° com relação à superfície terrestre, após um movimento de Rolagem. Portanto, o movimento que está ocorrendo é vertical para o observador, a câmera, mas é para o sentido da direita com relação à Terra, configurando um movimento de Guinada, e não de Ataque.

Por isto, o movimento de translação a partir do Fluxo Óptico é calculado em conjunto com o movimento de rotação, como uma transformação de coordenadas homogêneas de movimento, como mostra a Equação 19,

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = T * R * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Sendo x e y as coordenadas do ponto $P(I-I)$, sendo I a imagem corrente, R a matriz de rotação e T a matriz de translação do movimento. Este trabalho considera o ponto P como o escolhido para as estimativas das translações verticais e horizontais das imagens.

Primeiramente, obtemos, por meio do Fluxo Óptico, a posição do ponto P' , conforme mostra a Equação 20,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{v} \\ \vec{u} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (20)$$

Sendo \vec{u} e \vec{v} os vetores vertical e horizontal, respectivamente, do Fluxo Óptico ocorrido entre a imagem anterior e a corrente.

Em seguida, aplicamos o Ângulo de Rolagem corrente do veículo aéreo sobre P' , como mostram as Equações 21 e 22, extraídas da representação matricial da Equação 20:

$$x'' = [x' \ x \ \cos(\Omega)] - [y' \ x \ -\text{sen}(\Omega)]; \quad (21)$$

$$e \ y'' = [x' \ x \ \text{sen}(\Omega)] + [y' \ x \ \cos(\Omega)]. \quad (22)$$

Onde Ω é o Ângulo de Roll estimado no quadro atual e x'' e y'' são coordenadas efetivas do ponto $P(I)$.

Portanto, os vetores a serem usados nas estimativas dos ângulos de Ataque e Guinada não são \vec{u} e \vec{v} , mas: $\vec{u}' = y'' - y$; e $\vec{v}' = x'' - x$, que contemplam o movimento completo.

4.7 Integração da Linha do Horizonte com o Fluxo Ótico

A integração dos dois métodos de estimativa é feita na forma de um filtro ponderado onde cada método recebe um valor de peso sobre o resultado de acordo com a eficácia de seus resultados no cenário de voo em que estes métodos estão sendo aplicados.

Os valores dos pesos são atribuídos para cada método de acordo com as características do voo, visto que elas podem exigir mais robustez do Horizonte ou do Fluxo Ótico. O filtro ponderado é usado para a estimativa do Ângulo de Ataque e de Rolagem, visto que o de Guinada só é estimado por meio do Fluxo Ótico. O Ângulo de Ataque é definido como mostra a Equação 23,

$$\Theta = \frac{(\alpha \times v_h) + (\beta \times v_f)}{\alpha + \beta}, \quad (23)$$

Sendo v_h o Ângulo de Ataque estimado pelo Método da Posição e Inclinação do Horizonte e α o peso deste método, v_f o Ângulo de Ataque estimado pelo Método do Fluxo Ótico e β o peso deste método. E o Ângulo de Rolagem é definido conforme mostra a Equação 24,

$$\Omega = \frac{(\alpha \times r_h) + (\beta \times r_f)}{\alpha + \beta}, \quad (24)$$

Sendo r_h o Ângulo de Rolagem estimado pelo Método da Posição e Inclinação do Horizonte e α o peso deste método, r_f o Ângulo de Rolagem estimado pelo Método do Fluxo Ótico e β o peso deste método.

Capítulo 5

Experimentos e Resultados

Este capítulo apresenta e analisa os experimentos realizados e os seus resultados. Ele é dividido em duas seções, correspondentes às duas sequências de imagens utilizadas para a experimentação. A primeira sequência mostra um voo em altitude típica de veículos aéreos de asa fixa e hélice, e foi capturada por uma câmera fixada em um veículo deste tipo. A segunda sequência mostra uma simulação de voo feita com o uso de uma câmera fixada em um tripé que se encontra em uma altura do solo equivalente a voos de baixa altitude. A eficiência da solução abordada neste trabalho e os fatores físicos que influenciam no nível da eficácia desta solução são discutidos ao longo do texto.

5.1 Voo de Média Altitude Realizado por Veículo Aéreo Monomotor

O objetivo desta etapa de experimentação é comprovar o funcionamento do método baseado no Horizonte e do que é baseado no Fluxo Óptico, separadamente, comparando os resultados obtidos a partir destes métodos e da integração dos mesmos com os resultados do sensor inercial de um veículo aéreo.

Nesta seção, foram realizados experimentos com imagens de voo capturadas por uma câmera fixada à fuselagem de um avião de hélice e asa fixa, equipado com uma Unidade de Sensoriamento de Movimento Inercial da marca Moog Crossbow. Esta câmera possui sensor de 7,76mm, resolução de vídeo de 1280 x 720 *pixels*, com velocidade máxima de gravação de vídeo de 30 quadros por segundo. Os experimentos foram realizados em um cenário de vegetação rasteira com pequena quantidade de marcos naturais e artificiais e clima com nuvens brancas e sem chuvas, como mostra a Figura 20.



Figura 20. Cenário sobre o qual foi realizada a primeira etapa de experimentação.

As imagens do experimento foram capturadas a uma taxa de 15 quadros por segundo e o processamento das imagens foi realizado em uma CPU de 2GHz de frequência. A amostra usada nesta etapa de experimentação é composta de uma sequência de 200 imagens, o que equivale a 13,3s de vídeo.

A câmera foi calibrada pelo Método de Bouguet para que fossem obtidos os seus parâmetros intrínsecos, Largura Focal e Centro Óptico, a serem usados nas estimativas dos ângulos de voo.

O ângulo de guinada inicial, ou a posição inicial do veículo em relação ao Norte, é considerado como equivalente ao ângulo de guinada inicial obtido pelo sensor inercial.

Foi necessário realizar um pré-processamento na imagem com o objetivo de retirar da mesma a área pertencente ao veículo e à sua hélice. A câmera está acoplada com os pés fixados na fuselagem do lado direito do veículo, em uma área próxima ao seu Centro de Massa, em uma posição inclinada em 90°. Por isto, as imagens foram rotacionadas em 90 graus anti-horários e recortadas para se retirar a área onde se encontra o veículo.

Para a obtenção do Ângulo de Rolagem por meio do Fluxo Óptico, é necessário conhecer-se previamente a distância do Centro de Rotação do movimento para o Centro Ótico da imagem e podemos usá-la em todas as imagens da sequência. A Figura 22 mostra os vetores de deslocamento que representam um movimento de rotação realizado pelo veículo aéreo. Pode-se perceber que o Centro de Rotação, ao redor do qual os pontos giram, se encontra em um ponto próximo à borda esquerda da imagem, mas não está projetado na imagem.

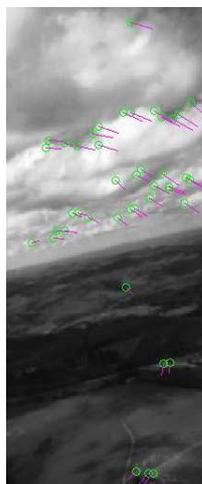


Figura 22. Fluxo Óptico referente a um movimento de rotação do veículo aéreo.

Como o veículo aéreo utilizado possui hélice frontal e esta aparece em cerca de 3/5 das imagens capturadas, conforme mostra a Figura 31, foi necessário realizar um processamento extra nestas imagens a fim de que a presença da hélice não distorça os resultados tanto do reconhecimento do Horizonte quanto da estimativa do Fluxo Óptico.

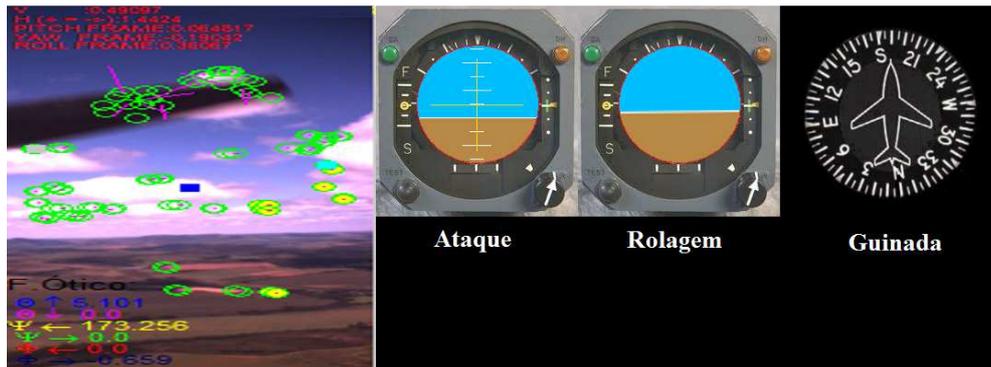


Figura 31. Presença da hélice em imagem capturada para a estimativa dos ângulos de voo.

Para a garantia do correto reconhecimento do Horizonte, os *pixels* que compõem a hélice foram alterados na imagem. Visto que estes *pixels* são os únicos que possuem intensidade de brilho menor que 50 na sequência de imagens utilizada, os *pixels* com esta característica receberam os valores dos *pixels* da vizinhança da hélice, na forma de convolução.

A estimativa do Fluxo Óptico também foi preparada para que reduzisse grandemente a distorção pela presença da hélice na imagem, visto que a mesma afeta tanto o fluxo das imagens em que elas aparecem quanto das imagens imediatamente antecedente e subsequente. Neste preparo, os pontos da imagem foram agrupados em regiões arbitrárias. As regiões que têm os movimentos de seus *pixels* afetados pela presença da hélice na imagem são descartadas da região de interesse na imagem.

O indicador para o descarte da região é a covariância dos Fluxos Óticos dos seus *pixels*, ou a distribuição dos desvios de seus *pixels* com relação às médias das regiões a que pertencem. As regiões que possuem a menor covariância são descartadas. Dentro da região de interesse escolhida, um ponto confiável foi escolhido para ser usado na estimativa do Ângulo de Rolagem, sendo este ponto o que tem o Fluxo Óptico com menor desvio em relação à mediana da região de interesse. A Figura 32 mostra a região de interesse escolhida em uma imagem, em amarelo, e o ponto escolhido dentro desta região, em azul. Os *pixels* de uma

região que sofreu influência do movimento da hélice estão demarcados pelo círculo vermelho.

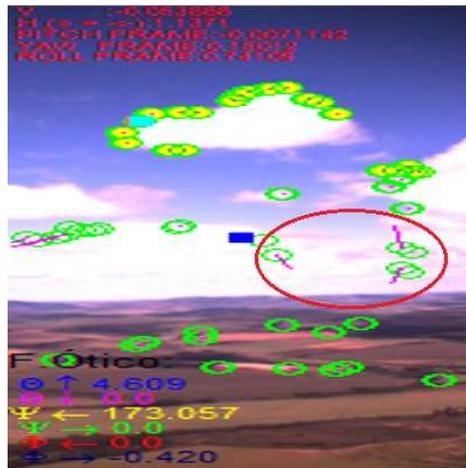
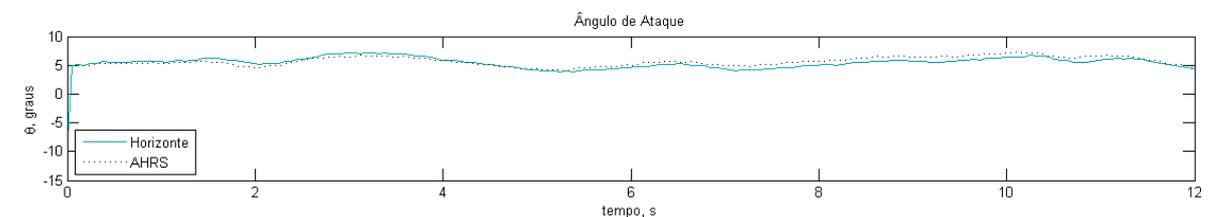
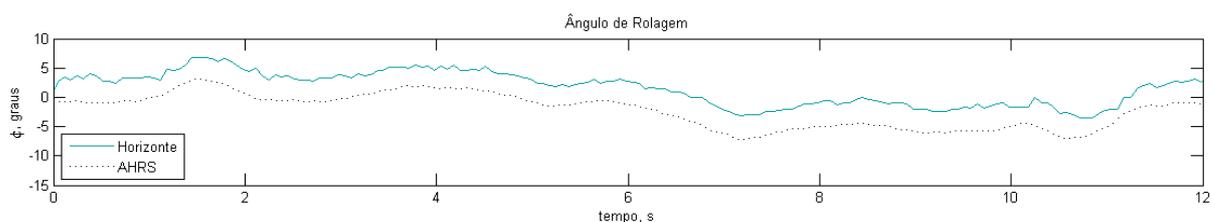


Figura 32. Os pontos da região de interesse para a escolha do ponto a ser considerado na estimativa do Ângulo de Rolagem, em amarelo. Dentro desta região, a posição atual deste ponto, em azul, e a posição anterior, em cor laranja. O círculo vermelho demarca uma área afetada pela hélice.

Na primeira tomada de experimentos, comparamos o resultado obtido por meio da etapa do Horizonte com a medição realizada pelo sensor inercial do veículo aéreo, como é mostrado na Figura 33. A linha azul-clara representa os valores obtidos por meio do Horizonte e a linha escura pontilhada representa os valores obtidos pelo sensor inercial. A abreviatura AHRS que consta na legenda significa Sistema de Referência em Atitude de Navegação Aérea (em inglês, *Attitude Heading Reference System*) e é equivalente ao sensor inercial do veículo.



(a)



(b)

Figura 33. Comparação do resultado obtido com o uso do Horizonte e a medição do sensor inercial. Ângulo de Ataque (a) e Ângulo de Rolagem (b).

A Figura 33 mostra que a diferença entre os valores do Ângulo de Ataque obtidos por meio do Horizonte possuem uma diferença de menos de um grau para os valores obtidos pelo sensor inercial. Esta diferença aparece por causa da imprecisão sobre a posição exata da Linha do Horizonte na imagem, dada a resolução da imagem e as condições do ambiente em que os experimentos foram realizados. Já os valores do Ângulo de Rolagem possuem uma diferença maior, que chega até 5 graus. O motivo para esta constante diferença no Ângulo de Rolagem é que o Centro de Rotação da câmera está a uma determinada distância do Centro de Rotação do veículo aéreo.

A Figura 34 mostra os resultados da comparação dos valores dos ângulos obtidos pelo Fluxo Óptico da Cena com os valores obtidos pelo sensor inercial. A linha verde representa os valores obtidos por meio do Fluxo Óptico e a linha escura pontilhada representa os valores obtidos pelo sensor inercial.

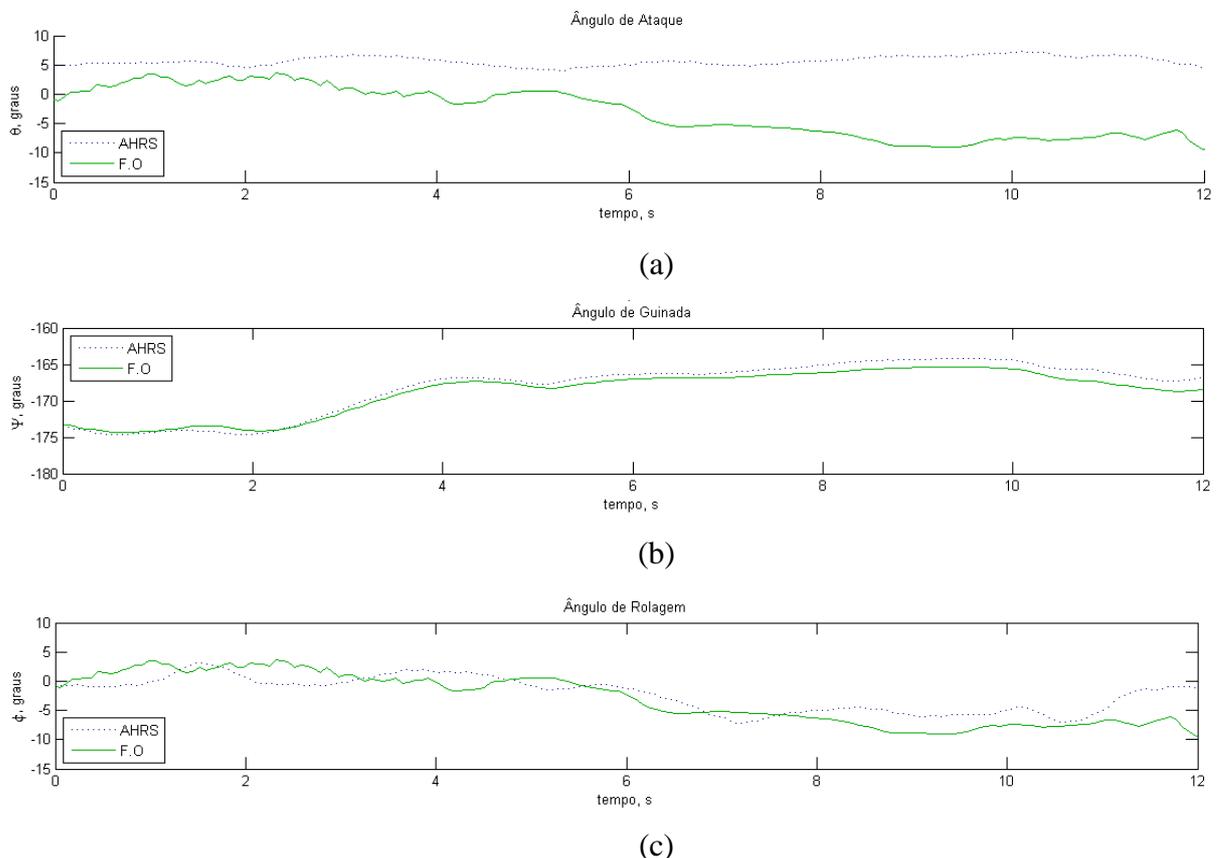
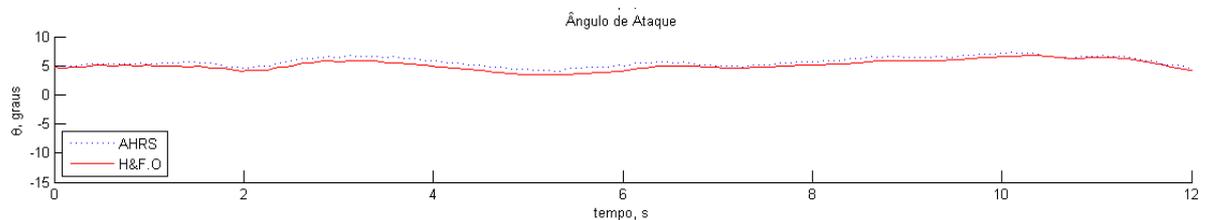


Figura 34. Comparação do resultado obtido com o uso do Fluxo Óptico e a medição do

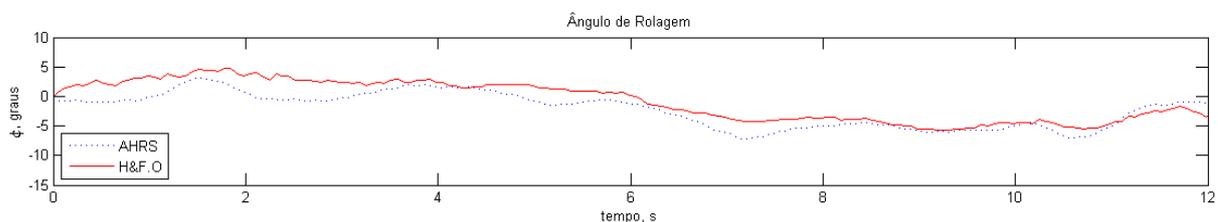
sensor inercial. Ângulo de Ataque (a), Ângulo de Guinada (b) e Ângulo de Rolagem (c).

O resultado exibido na Figura 34 mostra uma diferença de até 10 graus entre a medição do ângulo de ataque realizada pelo Fluxo Óptico e a realizada pelo sensor inercial. A diferença, para o ângulo de guinada, é de, no máximo, 3 graus, e para o ângulo de rolagem, de 9 graus. Como estas diferenças são muito maiores que as obtidas nestas comparações quando realizadas no segundo experimento, descrito na Seção 5.2, assumimos a hipótese de que este erro é atribuído ao movimento da hélice do veículo, que aparece em 3/5 das imagens e interfere no Fluxo Óptico de 4/5 destas. Esta interferência é reduzida na medição do Ângulo de Rolagem por conta da redução da Região de Interesse na Imagem, realizada por meio de filtros estatísticos, como descrito no Capítulo 3 – Metodologia.

A Figura 35 mostra os resultados da comparação dos valores dos ângulos obtidos pela técnica apresentada neste trabalho, que consiste na fusão dos dados obtidos do Horizonte com os obtidos pelo Fluxo Óptico da Cena, com os valores obtidos pelo sensor inercial. A linha vermelha representa os valores obtidos por meio do Método da Fusão e a linha escura pontilhada representa os valores obtidos pelo sensor inercial. O erro entre as medições do ângulo de ataque é menor que 1 e do ângulo de rolagem é inferior a 5 graus.



(a)



(b)

Figura 35. Comparação do resultado obtido com a fusão entre o Horizonte e o Fluxo Óptico e a medição do sensor inercial. Ângulo de Ataque (a) e Ângulo de Rolagem (b).

A Figura 36 mostra o resultado comparativo do método elaborado neste trabalho com os dados fornecidos pelas etapas de Fluxo Óptico e Horizonte, separadamente, e com os dados

fornecidos pelo sensor inercial do veículo aéreo. O primeiro quadro mostra as estimativas do Ângulo de Rolagem; o segundo, as do Ângulo de Ataque; e o terceiro, as do Ângulo de Guinada. A estimativa do Ângulo de Guinada só é realizada pelo Método do Fluxo Óptico. A linha azul clara corresponde aos resultados do método de estimativa por meio do Horizonte. A linha azul escura pontilhada corresponde à medição realizada pelo sensor inercial. A verde corresponde aos valores obtidos por meio do Fluxo Óptico da imagem. A linha vermelha corresponde aos resultados do método provido por este trabalho, que é uma integração do método do Horizonte com o método do Fluxo Óptico.

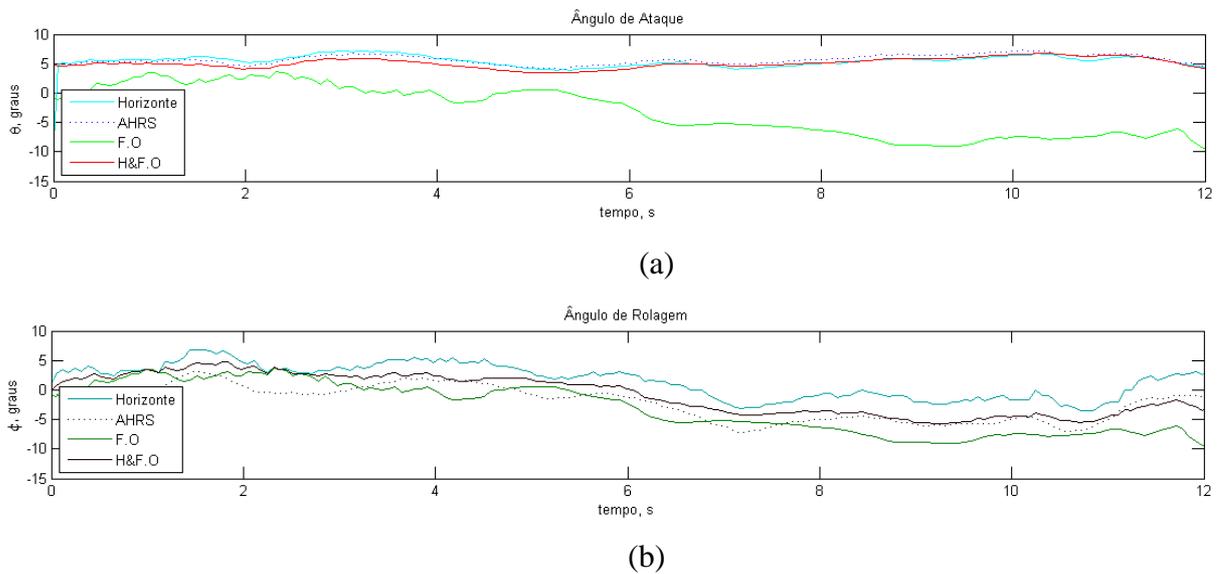
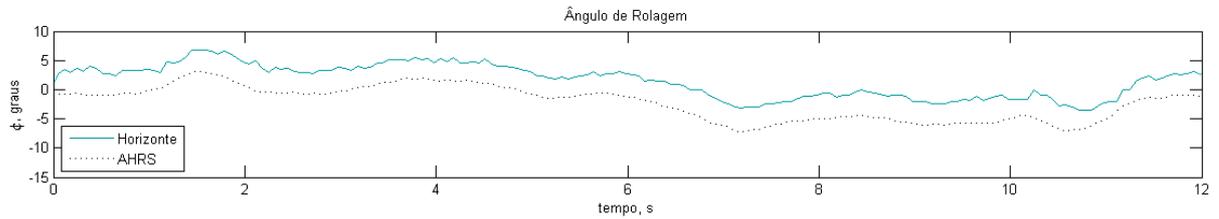


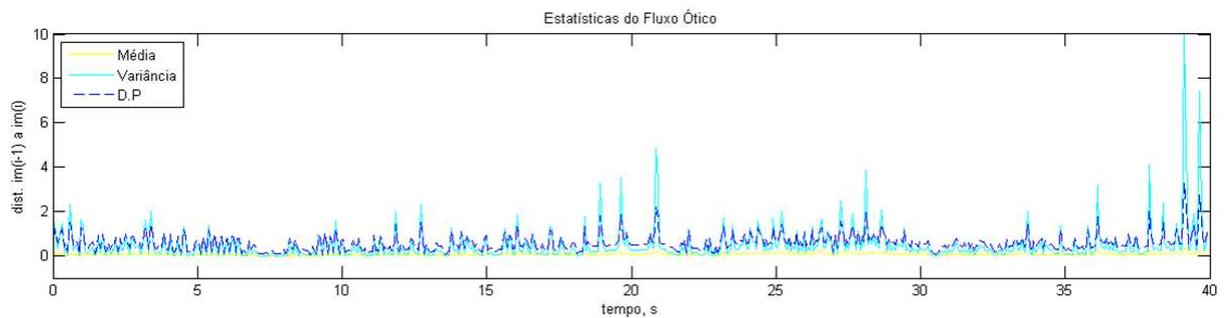
Figura 36. Resultados dos experimentos em uma sequência de 200 imagens de voo ou 13,3 segundos de voo.

O próximo experimento compara o Ângulo de Rolagem estimado em cada quadro com as medidas de dispersão do Fluxo Óptico destes quadros. Este experimento tem como objetivo verificar se a hipótese de que os fluxos dos *pixels* da imagem são iguais quando não há movimento de rotação é verdadeira durante os nossos experimentos. Isto implicaria em um Fluxo Óptico sem distorções. A Figura 37 mostra, novamente, os resultados do Ângulo de Rolagem obtidos por meio do Horizonte e pelo sensor inercial (a). Também demonstra as medidas de dispersão das estimativas de Fluxo Óptico em toda a sequência de imagens, sendo (b) relativo a todos os pontos da imagem e (c) relativo aos pontos da Região de Interesse da Imagem, que não tem influência da hélice, conforme abordado no Capítulo 3 - Metodologia. Em (b) e (c), a linha amarela corresponde à média dos deslocamentos dos pontos entre a imagem anterior e a corrente, em todos os quadros; a linha azul clara e contínua corresponde à

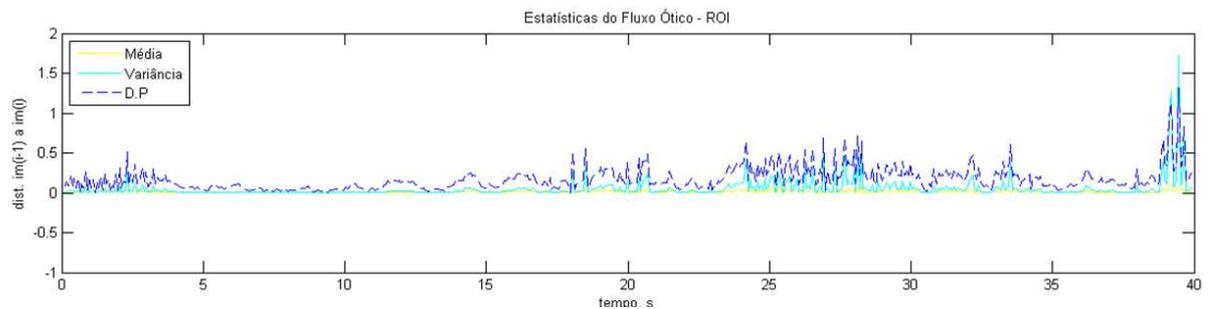
variância destes deslocamentos; e a linha azul-escuro pontilhada corresponde ao desvio-padrão dos deslocamentos.



(a)



(b)



(c)

Figura 37. Comparativo entre os movimentos de rotação e as medidas de dispersão dos deslocamentos dos *pixels* da imagem, para demonstrar a presença de erro no Fluxo Óptico.

Por causa deste erro ou distorção na estimativa do Fluxo Óptico, é necessário se considerar estas medidas de dispersão, como a mediana, escolhida neste trabalho, para se escolher os pontos de rotação e translação citados no modelo de solução descrito no Capítulo 4.6 - Estimativa por meio do Fluxo Óptico.

A Tabela 1 mostra o valor da Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM – do método abordado neste trabalho e do método que usa somente informações do Horizonte. Este erro é estimado através dos quadros da amostra utilizada. O erro é dado comparando-se os valores obtidos por cada método com os valores obtidos a partir da Unidade de Medição Inercial.

A grandeza da REQM é inversamente proporcional ao índice de precisão dos métodos sobre a amostra de imagens do experimento. Ela é uma grandeza significativa para a medida de dispersão das medidas realizadas, devido a sua conexão direta com a função de Gauss - função de probabilidade normal.

Método	Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)	
	Ângulo de Ataque	Ângulo de Rolagem
Horizonte	1,846	0,533
Fusão de Horizonte com Fluxo Ótico	0,935	1,610

Tabela 1. Avaliação da REQM como indicador das precisões do Método do Horizonte (PEREIRA ET. AL. 2002) e do Método da Fusão do Horizonte com o Fluxo Ótico.

A Tabela 1 mostra que o método da fusão das informações do Horizonte com o Fluxo Ótico obteve melhor resultado que o Método do Horizonte na estimativa do Ângulo de Ataque, em uma diferença de 197%, mas foi pior na estimativa do Ângulo de Rolagem, em uma diferença de 302%. As duas técnicas mostraram, com estes valores, um nível de dispersão menor que 2 graus na amostra.

5.2 Simulação de Voo em Baixa Altitude

O objetivo desta etapa de experimentação é confirmar o correto funcionamento da técnica baseada no Fluxo Óptico da cena. Neste experimento, como não usamos um sensor inercial, adotamos o método baseado no Horizonte como referencial de correção (*groundtruth*) da estimativa dos ângulos de voo. Esta decisão é justificada por duas evidências: a primeira é que o método do Horizonte se mostrou eficiente no experimento descrito na seção 4.1 e em outros experimentos preliminares; a segunda evidência consiste na correção da extração do Horizonte na sequência de imagens a ser usada nesta seção. Esta correção foi observada de forma visual, destacando-se o Horizonte reconhecido na sequência de imagens, como mostra o quadro da sequência exibido na Figura 38.



Figura 38. Quadro da sequência de imagens, mostrando o cenário sobre o qual foi realizada a segunda etapa de experimentação. O Horizonte está destacado em cor amarela.

Nesta etapa, foram realizados experimentos com imagens capturadas por uma câmera fixada a um tripé (Figura 39), que, por sua vez, foi fixado no solo em uma altura relativa ao nível do Horizonte tal que pode ser simulado um voo de baixa altitude. Esta câmera possui sensor de 7,76mm, resolução de vídeo de 1280 x 720 *pixels*, com velocidade máxima de gravação de vídeo de 30 quadros por segundo. O cenário do experimento, como mostra a Figura 38, é de floresta tropical com a presença de uma faixa de rio à frente. A luminosidade do ambiente é menor que a do primeiro experimento e o céu possui tanto nuvens brancas quanto escuras.

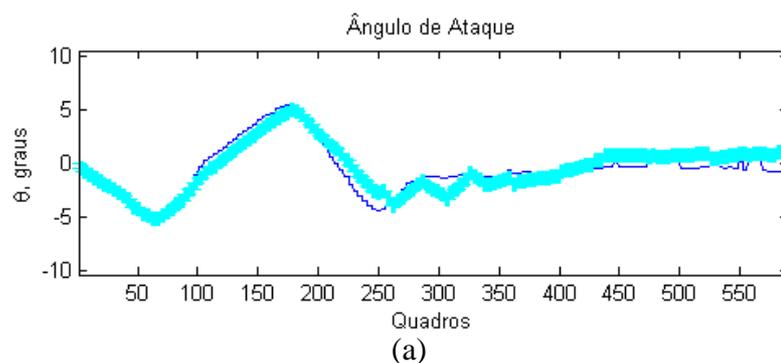


Figura 39. Aparato experimental – câmera e tripé.

As imagens do experimento foram capturadas a uma taxa de 15 quadros por segundo e o processamento das imagens foi realizado em uma CPU de 2GHz de frequência. A amostra usada nesta etapa de experimentação é composta de uma sequência de 590 imagens, o que equivale a 39,3s de vídeo.

A câmera foi calibrada pelo Método de Bouguet para que fossem obtidos os seus parâmetros intrínsecos, Largura Focal e Centro Óptico, a serem usados nas estimativas dos ângulos de voo.

A Figura 40 mostra uma comparação entre os valores obtidos por meio do Horizonte com os obtidos por meio do Fluxo Óptico. A linha azul clara, mais espessa, representa os valores obtidos por meio do Fluxo Óptico e a linha escura pontilhada representa os valores obtidos por meio do Horizonte. A diferença entre ambos é sempre menor que 1 grau no ângulo de ataque e 5 graus no ângulo de rolagem. Esta diferença é atribuída ao erro associado ao Fluxo Óptico, visto que aplicamos um filtro estatístico sobre o Fluxo Óptico baseado na mediana das suas estimativas, e, sem ele, os resultados preliminares tinham diferenças maiores.



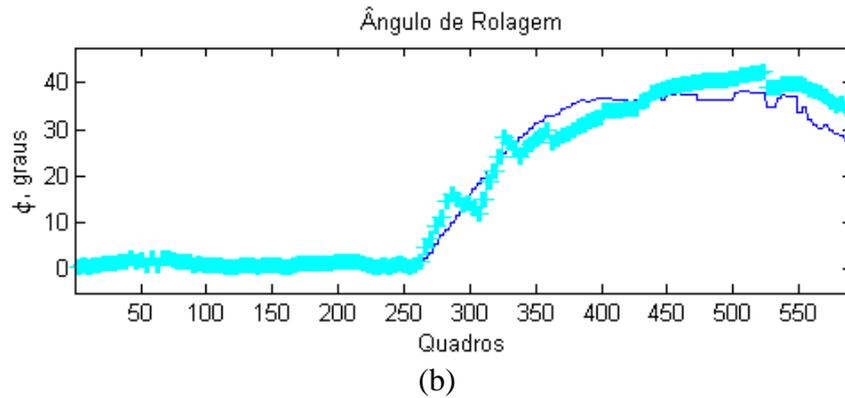


Figura 40. Comparação do método do Horizonte com o método do Fluxo Óptico.

A Figura 41 mostra uma comparação entre os valores obtidos por meio do Horizonte com os obtidos por meio da fusão do Horizonte com o Fluxo Óptico. A linha vermelha representa os valores obtidos por meio da fusão e a linha escura pontilhada representa os valores obtidos por meio do Horizonte. O erro entre as medições é sempre menor que 1 grau.

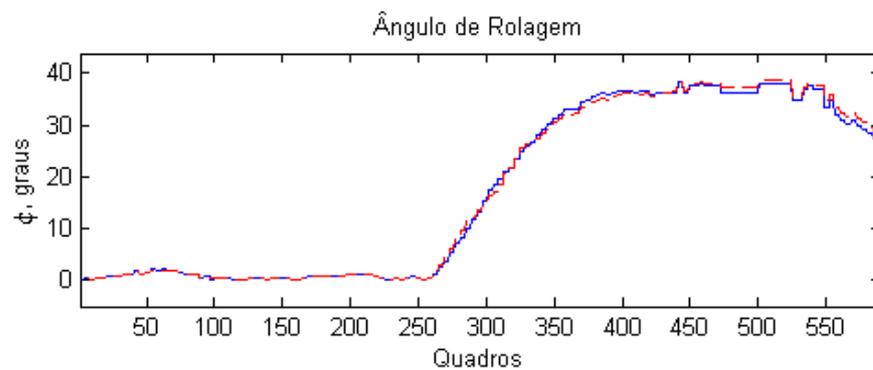
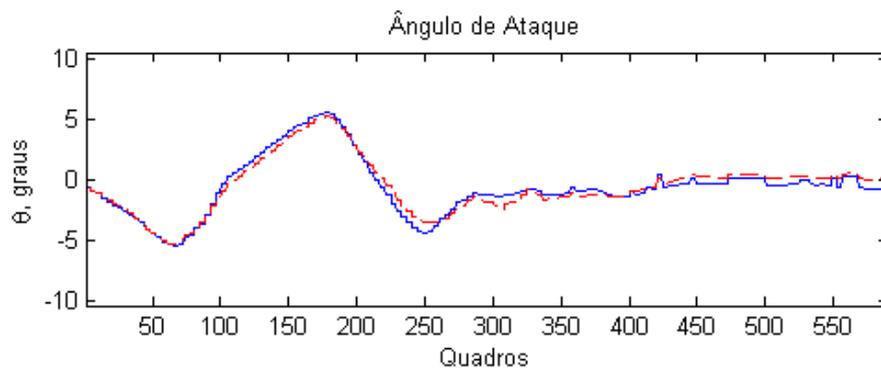


Figura 41. Comparação do método do Horizonte com o método da fusão entre Horizonte e Fluxo Óptico.

A Figura 42 mostra a comparação entre os valores obtidos por meio do Horizonte, por meio do Fluxo Óptico e por meio da fusão do Método do Horizonte com o Método do Fluxo Óptico. A linha azul clara, mais espessa, representa os valores obtidos por meio do Fluxo Óptico, a linha escura pontilhada representa os valores obtidos por meio do Horizonte e a linha vermelha representa os valores obtidos com a fusão das duas técnicas.

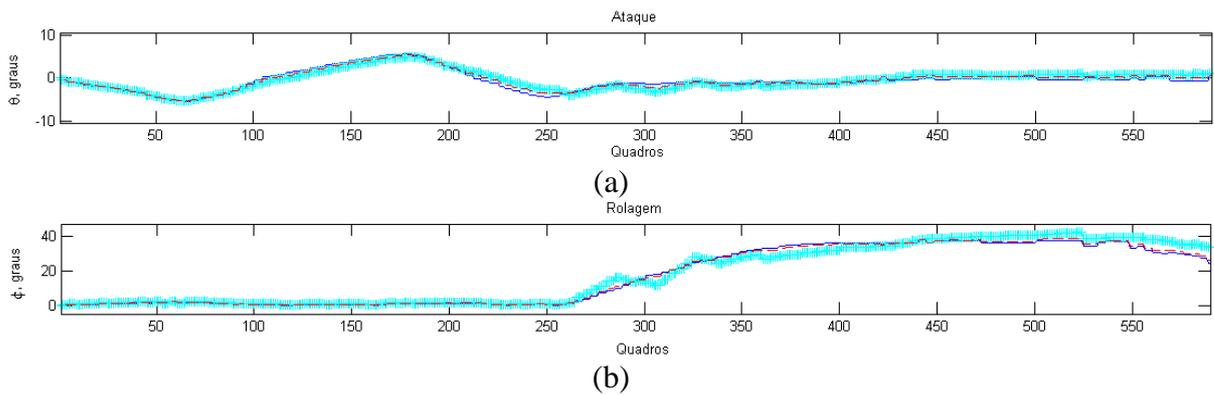


Figura 42. Comparação entre os valores obtidos por meio do Horizonte, por meio do Fluxo Óptico e por meio da fusão do Método do Horizonte com o Método do Fluxo Óptico.

O próximo experimento compara o Ângulo de Rolagem estimado em cada quadro com as medidas de dispersão do Fluxo Óptico destes quadros. Este experimento tem como objetivo verificar se a hipótese de que os fluxos dos *pixels* da imagem são iguais quando não há movimento de rotação é verdadeira durante os nossos experimentos. Isto implicaria em um Fluxo Óptico livre de erros. A Figura 43 mostra, novamente, os resultados do Ângulo de Rolagem obtidos por meio do Horizonte e pelo Fluxo Óptico (a). Também demonstra as medidas de dispersão das estimativas de Fluxo Óptico (b). Em (b), a linha amarela corresponde à média dos deslocamentos dos pontos entre a imagem anterior e a corrente, em todos os quadros; a linha azul clara e contínua corresponde à variância destes deslocamentos; e a linha azul-escuro pontilhada corresponde ao desvio-padrão dos deslocamentos.

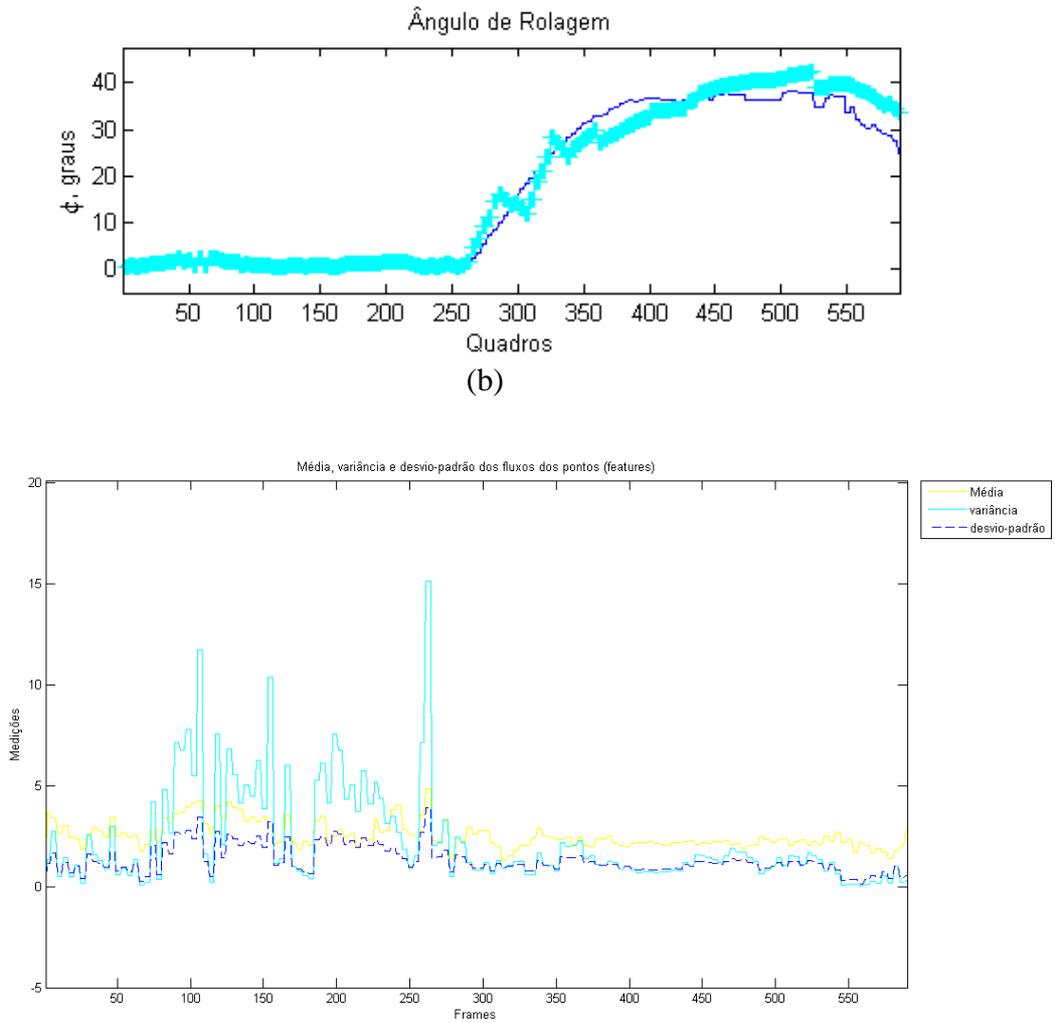


Figura 43. Comparativo entre os movimentos de rotação e as medidas de dispersão dos pixels da imagem, para demonstrar a presença de erro no Fluxo Óptico.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho estima os três Parâmetros Críticos de Voo de veículos aéreos integrando as informações de posicionamento do Horizonte com as informações do Fluxo Ótico e da geometria da cena. Ele emprega a solução construída em sequências de imagens capturadas por uma câmera acoplada a um veículo aéreo monomotor e imagens capturadas por uma câmera fixada em um tripé, simulando um voo de baixa altitude.

Este trabalho avalia o erro sistemático e o nível de confiança dos ângulos de voo obtidos em comparação com os valores obtidos por uma Unidade de Medição Inercial. Também avalia a diferença entre este erro sistemático e nível de confiabilidade com os obtidos a partir da técnica de Reconhecimento do Horizonte comparada com valores obtidos por uma Unidade de Medição Inercial.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e similares aos obtidos pelos sensores inerciais do veículo aéreo, no cenário em que os experimentos foram realizados. Eles mostraram a eficiência do método adotado, e que este método tem maior robustez que os métodos baseados somente no Horizonte ou somente no Fluxo Ótico, pois une a maior robustez do primeiro com a maior acurácia do segundo. O Horizonte se mostra mais robusto porque as restrições necessárias à estimativa do Fluxo Ótico não são completamente satisfeitas durante o voo. Estas restrições são a intensidade constante de brilho, superfície Lambertiana, áreas com suficiente variação de textura e suficiente quantidade de áreas de oclusão, além de quantidade de deslocamento entre as imagens abaixo de um limite útil para a medida dos gradientes de deslocamento da imagem.

Este trabalho contribui, ainda, com um modelo de solução diferente dos modelos apresentados pelos trabalhos relacionados, principalmente, ao realizar a associação do Fluxo Ótico com a geometria da cena de voo para se estimar os movimentos homogêneos da câmera.

O trabalho tem como limitação não considerar as diversas situações de clima, ambiente e operacionais possíveis, que podem dificultar tanto a estimativa da posição do Horizonte quanto a estimativa do Fluxo Ótico. Também, é assumida a restrição do conhecimento prévio da posição do veículo aéreo com relação ao Norte. Ainda, não existe mitigação dos diversos riscos operacionais nem foram criados mecanismos de recuperação de diversos tipos de falhas que podem ocorrer durante o voo. E, por fim, há restrições na

estimativa do movimento por não fazê-la de forma homogênea, tratando rotações sobre mais de um eixo do veículo ao mesmo tempo, nem se considera a possível transformação de escala sobre a imagem.

Trabalhos futuros podem usar uma bússola eletrônica para garantir a posição do veículo com relação ao Norte. Ainda, podem utilizar filtros estatísticos, como o Filtro de Kalman, para mitigar o risco de falhas e reduzir, até anular, o erro sistemático existente na medição dos ângulos no decorrer do voo. Também podem tratar o movimento em suas coordenadas homogêneas de escala, translação e rotação.

Espera-se que, com este trabalho, os robôs aéreos, de características cada vez mais singulares, menores e de projetos eletromecânicos cada vez mais difíceis de serem implementados e controlados durante o voo, tenham mais uma opção de sensoriamento inercial, proporcionada pela Visão Robótica, como forma de redução do risco de acidentes e ampliação da autonomia, traduzida em horas de voo, destes robôs aéreos.

Referências Bibliográficas

- BAGON, Shai. *et al. What is a Good Image Segment? An Unified Approach to Segment Extraction.*
- BROOKS, Michael. J. BAUMELA, Luis. CHOJNACKI, Wojciech. *Egomotion from optical flow with an uncalibrated camera.* Department of Computer Science, University of Adelaide. Adelaide. Australia. 1997.
- CABALLERO, F. Merino. FERRUZ, J. OLLERO, A. *Vision-Based Odometry and SLAM for Medium and High Altitude Flying UAVs.* 2008.
- COELHO, Maria Cândida. TAVARES, João Manuel. *Toolbox de Calibração de Câmeras para Matlab.* 2003.
- CORNALL, T.D. EGAN, G.K. PRICE, A. *Aircraft attitude estimation from horizon video.* Electron. Lett. 42(13), 744745. 2006.
- CORNALL, Terry. *A Low Computation Method to Determine Horizon Angle from Video.* 2004.
- DUSHA, Damien. *et al. Fixed-Wing Attitude Estimation Using Computer Vision Based Horizon Detection.* 2008.
- ETTINGER, Scott M. *Design and Implementation of Autonomous Vision-Guided Micro Air Vehicles.* Tese de Doutorado. Universidade da Flórida. Estados Unidos. 2001.
- ETTINGER, Scott M. *et al. Towards Flight Autonomy: Vision-Based Horizon Detection for Micro Air Vehicles.* Universidade da Flórida. Estados Unidos. 2002.
- FARIA, Alexandre Wagner Chagas. Fluxo Óptico. 1992.
- HEARN, D., Baker, M. P. *Computer Graphics, C Version (2nd edition).* Prentice Hall. Nova Jersey. EUA. 1997.
- HERISSE, Bruno Et. Al. *Hovering flight and vertical landing control of a VTOL Unmanned Aerial Vehicle using Optical Flow.* Interactive Robotics Laboratory, Fontenay aux Roses, França. Sophia Antipolis Cedex. França. Departamento de Engenharia. Universidade Nacional Australiana. Canberra, Austrália. Interactive Robotics Laboratory, Fontenay aux Roses, França. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008.
- HORN, B.K.P. SCHUNCK, B.G. *Determining optical flow.* Artificial Intelligence, vol 17, pp 185–203. 1981.
- JENIE, Said D., BUDIYONO, Agus. *Automatic Flight Control System. Classical Approach and Modern Control Perspective.* Departamento de Aeronáutica e Astronáutica, Instituto de

Tecnologia de Bandung. Indonésia. 2006.

LEÃO, Leonardo Panta *et al.* 2012. **Detecção De Expressões Faciais: Uma Abordagem Baseada em Análise do Fluxo Óptico**. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE. Brasil.

LIMA, Milton Macena Ramos. PIO, José Luiz de Souza. **Inferência dos Parâmetros de Voo Associando o Movimento do Horizonte com Informações da Câmera**. Programa de Pós-Graduação em Informática. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, AM. Brasil. SIBGRAPI. 2012.

LONGHITANO, George Alfredo. **VANTs para Sensoriamento Remoto: Aplicabilidade na Avaliação e Monitoramento de Impactos Ambientais Causados por Acidentes com Cargas Perigosas**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. Brasil. 2010.

MICUSIK, Branislav. HANBURY, Allan. *Steerable semi-automatic segmentation of textured images*. Instituto de Automação, Universidade de Tecnologia de Vienna. Vienna, Áustria. SCIA 2005.

MINETTO, Rodrigo. **Detecção Robusta de Movimento de Câmera em Vídeos por Análise de Fluxo Óptico Ponderado**. Universidade Federal de Campinas. Dissertação de Mestrado. Campinas, SP. Brasil. 2007.

OREIFEJ, Omar. *Horizon Constraint for Unambiguous UAV Navigation in Planar Scenes*. University of Central Florida. Orlando, Flórida. EUA. 2011.

PEREIRA, Guilherme A. S. *et al.* **Estimação da Atitude de Aeronaves utilizando Visão Computacional**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Brasil. 2008.

PINHO, Raquel Ramos. *et al.* **Introdução à Análise de Movimento usando Visão Computacional**. 2004.

PREMERLANI, William. *Computing Euler Angles from Direction Cosines*. 2010. Disponível em: <http://gentlenav.googlecode.com/files/EulerAngles.pdf>. Visitado em Março, 2012.

REZENDE, Pedro J. De. Stolfi, Jorge. **Fundamentos de Geometria Computacional**. Departamento de Ciência da Computação. Unicamp. Campinas, SP. Brasil. 2008.

RITTNER, Letícia. **Identificação e Transformação de Valores Aberrantes como Medida de Confiabilidade do Método das Diferenças para Estimar o Fluxo Óptico em Sequências de Imagens**. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia Elétrica. UNICAMP, SP. Brasil. 2004.

ROBERTS, Peter J. Walker, Rodney A. O'Shea, Peter J. *Tightly Coupled GNSS and Vision Navigation for UAV Applications*. Queensland University of Technology. Brisbane, Austrália.

In Proceedigns Australian International Aerospace Congress. 2005.

ROCHA, Thiago da. **Uma Proposta para Classificação de Ações Humanas Baseadas em Características de Movimentos e Redes Neurais Artificiais.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Faculdade de Brasília. Brasil. 2012.

Site da IMU Moog Crossbow. Disponível em <http://www.xbow.com/>. Consultado em Fevereiro de 2013.

SPITZER, Cary R. *The avionics handbook.* Disponível em: <http://www.davi.ws/index.php?link=avionics&link2=>. Visitado em Julho de 2012.

TODOROVICH, Sinisa. NECHYBA, Michael C. *Sky/Ground Modeling for Autonomous MAV Flight.* 2003.

TRUCCO, Emanuele. VERRI, Alessandro. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision.* Prentice Hall. EUA. 1998.

VOLKER, Grabe. Bühlhoff , HEINRICH H. Giordano. ROBUFFO, Paolo. *Robust Optical-Flow Based Self-Motion Estimation for a Quadrotor UAV.* Instituto Max Planck para Cibernética Biológica. Alemanha. IROS 2012.

WILLIAMS, Kevin W. *Documentation of Sensory Information in the Operation of Unmanned Aircraft Systems.* Instituto Médico Aeroespacial. Oklahoma City, Washington DC. EUA. 2008.