

Sistema de Percepção Visual para Veículos Autónomos Aéreos

Carlos Eduardo Valente Almeida



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas Autónomos

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Dezembro de 2009

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da ficha de disciplina de Tese/Dissertação, do 2ºano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Sistemas Autónomos.

Candidato: Carlos Eduardo Valente Almeida, Nº1990909,
c.almeida@lsa.issep.ipp.pt

Orientação Científica: José Miguel Soares Almeida (ISEP).

Co-Orientação Científica : Alfredo Manuel Oliveira Martins



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Àrea de Especialização em Sistemas Autónomos
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Resumo

Esta dissertação aborda o problema de detecção e desvio de obstáculos "SAA- *Sense And Avoid*" em movimento para veículos aéreos. Em particular apresenta contribuições tendo em vista a obtenção de soluções para permitir a utilização de aeronaves não tripuladas em espaço aéreo não segregado e para aplicações civis.

Estas contribuições caracterizam-se por: uma análise do problema de SAA em "UAV's - *Unmanned Aerial Vehicles*" civis; a definição do conceito e metodologia para o projecto deste tipo de sistemas; uma proposta de "benchmarking" para o sistema SAA caracterizando um conjunto de "datasets" adequados para a validação de métodos de detecção; respectiva validação experimental do processo e obtenção de "datasets"; a análise do estado da arte para a detecção de "Dim point features"; o projecto de uma arquitectura para uma solução de SAA incorporando a integração de compensação de "ego motion" e respectiva validação para um "dataset" recolhido.

Tendo em vista a análise comparativa de diferentes métodos bem como a validação de soluções foi proposta a recolha de um conjunto de "datasets" de informação sensorial e de navegação. Para os mesmos foram definidos um conjunto de experiências e cenários experimentais.

Foi projectado e implementado um setup experimental para a recolha dos "datasets" e realizadas experiências de recolha recorrendo a aeronaves tripuladas. O setup desenvolvido incorpora um sistema inercial de alta precisão, duas câmaras digitais sincronizadas (possibilitando análise de informação stereo) e um receptor GPS. As aeronaves alvo transportam um receptor GPS com logger incorporado permitindo a correlação espacial dos resultados de detecção.

Com este sistema foram recolhidos dados referentes a cenários de apro-

ximação com diferentes trajectórias e condições ambientais bem como incorporando movimento do dispositivo detector.

O método proposto foi validado para os datasets recolhidos tendo-se verificado, numa análise preliminar, a detecção do obstáculo (avião ultraleve) em todas as frames para uma distância inferior a 3 km com taxas de sucesso na ordem dos 95% para distâncias entre os 3 e os 4 km.

Os resultados apresentados permitem validar a arquitectura proposta para a solução do problema de SAA em veículos aéreos autónomos e abrem perspectivas muito promissoras para desenvolvimento futuro com forte impacto técnico-científico bem como sócio-económico. A incorporação de informação de “*ego motion*” permite fornecer um forte incremento em termos de desempenho.

Palavras Chave: (Sistemas Autónomos, Veículos Autónomos Aéreos, Percepção, “Sense & Avoid“, Visão)

Abstract

This thesis addresses the problem of perception for detection and avoidance (“SAA - Sense And Avoid”) of obstacles during the movement of unmanned aircraft. It presents specific contributions to the search of solutions that allow the use of unmanned aerial vehicle (UAV - Unmanned Aerial Vehicle) in a non-segregated air space for non-military purposes. These contributions are characterized by: the analysis of the SAA problem in civilian UAV’s ; the definition of the concept and corresponding methodology for the project of such systems; a benchmarking proposal for the SAA system based upon a group of adequate datasets for the validation of detection methods; experimental validation of the process itself along with the collection of datasets; the analysis of the state of the art in “Dim point features” detection; the design of an architecture for an SAA solution that incorporates the integration of ego motion compensation as well as the corresponding validation for a collected dataset. Since it is intended to compare different methods as well as validating their respective solutions, the gathering of sensorial and navigation information datasets has been proposed. A set of experiences and experimental scenarios have been established. To obtain the datasets, an experimental setup was designed and implemented along with data gathering actions using a conventional airplane. The developed setup includes a highly accurate inertial navigation system, two synchronized digital cameras (allowing the analysis of stereo information) and a GPS reception device. The target airplanes carry GPS devices with data logger that will provide the necessary spatial correlation of the detection results. With this system it was possible to collect data from approximation scenarios with different trajectories and environmental conditions along with movement of the detection device. The presented method was validated for the collected datasets and

a preliminary analysis showed that the obstacle detection (glider aircraft) in every frame was achieved for a distance lesser than 3 Km, with success rates of 95% for distances ranging from 3 to 4 Km. The presented results confirm the proposed architecture for the solution of the SAA problem in UAV's and opens a new set of promising perspectives in future developments with an important contribution in scientific and technological as well as social and economical contexts. The inclusion of ego motion information resulted in increased performance of the method.

key words: (Autonomous Systems, Unmanned Aerial Vehicles, Perception, "Sense & Avoid", Vision)

Acrónimos

SAA Sense and Avoid.

VAA Veículo Autônomo Aéreo.

UAV Unmanned Aerial Vehicle.

GPS Global Positioning System.

IMU Inercial Measure Unit.

INS Inercial Navigation System.

FALCOS Flight Autonomous Light Cooperative Observation System.

LSA Laboratório de Sistemas autônomos.

GRIFO General-purpose autonomous Robotic aIrship for Forest
Observation.

TCAS Traffic Collision Avoidance System.

ADS-B Automatic Dependent Surveillance Broadcast.

Agradecimentos

Nesta fase da minha vida a apresentação desta tese tem um significado especial para mim, pois é o fruto de trabalho realizado anteriormente no Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) e a dedicação à robótica móvel. Por esse motivo gostaria de agradecer o apoio a algumas pessoas. Começo naturalmente por agradecer ao Eng. José M. Almeida e ao Eng. Alfredo Martins nas orientações que prestaram ao longo deste trabalho. Um especial agradecimento a todos os elementos do LSA que de uma forma ou de outra me ajudaram na conclusão deste trabalho. Agradeço ao Laboratório de Sistemas Autónomos do ISEP o apoio fornecido à realização deste trabalho, destacando o apoio do Professor Doutor Eduardo Silva.

Por último gostaria de deixar aqui um agradecimento especial para o Professor Doutor Fernando Ferreira que com a sua experiência de piloto, tornou possível a recolha de dados para este trabalho.

Conteúdo

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Âmbito de Dissertação | 1 |
| 1.2 | Enquadramento / Motivação | 3 |
| 1.3 | Objectivos | 5 |
| 1.4 | Organização da Tese | 6 |
| 2 | User Case GRIFO | 9 |
| 2.1 | Arquitectura do Sistema GRIFO | 11 |
| 3 | Veículos Autónomos Aéreos | 15 |
| 3.1 | Abordagem ao projecto | 15 |
| 3.2 | Conceito integrado de VAA | 21 |
| 3.3 | VAA FALCOS | 25 |
| 4 | Estado da arte | 31 |
| 5 | Formulação do problema / Análise | 35 |
| 6 | Métodos de Detecção | 39 |
| 6.1 | Algoritmo CMO | 39 |
| 6.2 | Programação Dinâmica | 42 |
| 7 | Projecto | 45 |
| 7.1 | Arquitectura do sistema | 45 |
| 7.2 | Bloco Ego-Motion | 51 |
| 8 | Projecto de Setup Experimental | 55 |
| 8.1 | Setup Experimental | 55 |
| 8.2 | Projecto Experiências | 57 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8.3 | "Data-Set" | 58 |
| 8.4 | Experiências Realizadas | 60 |
| 9 | Resultados | 65 |
| 10 | Conclusões | 77 |
| | Appendices | 87 |
| .1 | Equações de movimento | 87 |
| .2 | Posição e Orientação do Avião | 92 |
| .2.1 | Posição do avião | 94 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Cooperação de Múltiplos Robots | 5 |
| 2.1 | Conceito de operação múltiplos veículos autónomos aéreos . . | 10 |
| 2.2 | arquitectura do Sistema GRIFO | 12 |
| 3.1 | Componentes aeronave autónoma | 23 |
| 3.2 | Arquitectura do VAA FALCOS | 26 |
| 3.3 | Sistemas de processamento de bordo dos protótipos AAV FALCOS | 27 |
| 3.4 | Sistemas GPS | 27 |
| 3.5 | Sistema INS embebido | 28 |
| 3.6 | Câmaras num protótipo FALCOS | 28 |
| 3.7 | Alguns protótipos AAV FALCOS | 29 |
| 3.8 | Testes de voo | 29 |
| 5.1 | Background Sense and Avoid | 36 |
| 5.2 | Exemplos de sensores para sense & avoid | 36 |
| 5.3 | Cenário Real | 37 |
| 5.4 | Realce da perturbação no horizonte | 38 |
| 7.1 | Arquitectura do sistema | 45 |
| 7.2 | Imagem original a cores e em escala de cinzentos | 46 |
| 7.3 | Resultado do algoritmo CMO | 48 |
| 7.4 | Zoom do resultado CMO "mesh" na zona do target | 49 |

| | | |
|------|---|----|
| 7.5 | Histograma do número de ocorrências de cada intensidade dos máximos locais do resultado do CMO. Cima - Todos os máximos locais, Baixo - Os máximos locais a cima do limiar de aceitação | 49 |
| 7.6 | Resultado do CMO com sobreposição das features | 50 |
| 7.7 | Imagem original com sobreposição das features | 50 |
| 7.8 | Sistema de referenciais do veículo | 51 |
| 7.9 | Sistemas referenciais da camara e da imagem | 52 |
| 8.1 | Imar iNAV-FMS e Camaras JAI CB-080GE | 55 |
| 8.2 | Arquitectura de setup | 57 |
| 8.3 | Representação das experiências estáticas | 58 |
| 8.4 | Representação das experiências dinâmicas | 58 |
| 8.5 | Avião Cessna e Piper Cub | 60 |
| 8.6 | Setup Terra | 61 |
| 8.7 | Imagem da pista tirada do avião | 62 |
| 8.8 | trajectória efectuada pelo avião | 63 |
| 8.9 | Distância do avião no tempo | 63 |
| 8.10 | Trajectória 1 do avião e distância do avião versus frames adquiridas | 64 |
| 8.11 | Trajectória 2 do avião e distância do avião versus frames adquiridas | 64 |
| 8.12 | Trajectória 3 do avião e distância do avião versus frames adquiridas | 64 |
| 8.13 | Trajectória 5 do avião e distância do avião versus frames adquiridas | 64 |
| 9.1 | Imagem original com possíveis "features" e detalhe em torno do "target" para uma distância de 3757.4m. | 66 |
| 9.2 | Imagem original com possíveis "features" e detalhe em torno do "target" para uma distância de 3356.9m. | 67 |
| 9.3 | Imagem original com possíveis "features" e detalhe em torno do "target" para uma distância de 2936.2m. | 68 |

| | | |
|------|--|----|
| 9.4 | Imagem original com possíveis “ <i>features</i> ” e detalhe em torno do “ <i>target</i> ” para uma distância de 2512.2m. | 69 |
| 9.5 | Imagem original com possíveis “ <i>features</i> ” e detalhe em torno do “ <i>target</i> ” para uma distância de 2085.8m. | 70 |
| 9.6 | Imagem original com possíveis “ <i>features</i> ” e detalhe em torno do “ <i>target</i> ” para uma distância de 1657.5m. | 71 |
| 9.7 | Imagem original com possíveis “ <i>features</i> ” e detalhe em torno do “ <i>target</i> ” para uma distância de 1227.9m. | 72 |
| 9.8 | Imagem original com possíveis “ <i>features</i> ” e detalhe em torno do “ <i>target</i> ” para uma distância de 802.9m. | 73 |
| 9.9 | Máximo local do “ <i>target</i> ”. | 75 |
| 9.10 | Volume associado ao “ <i>target</i> ”. | 75 |
| 9.11 | Número de pontos de interesse em cada “ <i>frame</i> ”. | 76 |
| 9.12 | Número de pontos de interesse com “ <i>zoom</i> ”. | 76 |
| 1 | Sistema de coordenadas do avião | 88 |
| 2 | Movimento da aeronave em relação à terra | 89 |
| 3 | Orientação da aeronave | 93 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 9.1 | Tabela de estatística de resultados de detecção | 76 |
|-----|---|----|

Capítulo 1

Introdução

Conteúdo

| | | |
|-----|-------------------------------------|---|
| 1.1 | Âmbito de Dissertação | 1 |
| 1.2 | Enquadramento / Motivação | 3 |
| 1.3 | Objectivos | 5 |
| 1.4 | Organização da Tese | 6 |

1.1 Âmbito de Dissertação

Apesar da grande disseminação e do contínuo aumento de propostas de soluções que passam pela utilização de Veículos Autónomos Aéreos (UAV do inglês Unmanned Aerial Vehicle) nas mais diversas áreas de aplicação, a sua utilização está ainda restrita aos espaços aéreos segregados, por normativos definidos pelas entidades que regulam o Espaço Aéreo Civil.

Reconhecidas que são as vantagens da utilização destes veículos, nos últimos anos, diversos países têm-se posicionando e criado esforços para integrar os UAV's no espaço aéreo controlado, visando a utilização destes para fins civis. Embora tarde a finalização do quadro regulamentar que permita a utilização destas aeronaves para aplicações civis é consensual que as principais razões para que seja negado o acesso ao espaço aéreo civil são, por um lado, a incapacidade que estas aeronaves apresentam de detectar e evitar obstáculos (normalmente referido como sense & avoid, S&A ou SAA), e por outro a dificuldade de serem detectadas pelas aeronaves tripuladas, que com elas vão partilhar o espaço aéreo.

As diversas entidades (de diferentes países) que regulam o acesso ao espaço aéreo são de comum acordo que, no mínimo, devam ser mantidos os actuais níveis de segurança (“Safety”) praticados pela aviação civil mundial. Neste cenário, a operação entre aeronaves comerciais, com cada vez mais passageiros e aeronaves não tripuladas, traz sérias preocupações em relação à capacidade que o sistema actual de vigilância e de controlo de tráfego aéreo têm para lidar com situações de perigo decorrentes da aproximação entre estas duas categorias de aeronaves. Acresce que muitas das aplicações que hoje em dia se afiguram como potencialmente viáveis, recorrem à utilização de múltiplas aeronaves, colocando-se também em equação a regulação do tráfego de UAV’s

As entidades reguladores colocam como requisitos para que os UAVs possam voar em espaço aéreo não segregado, a capacidade de voar segundo regras visuais de voo (VFR do Inglês Visual Flight Rules). Como consta da ordem 7610.4 da Federação Americana de Aviação, as aeronaves não tripuladas devem ser capazes de mostrar um nível de performance igual ou superior à conseguida por um piloto Humano sem recurso à comunicação cooperativa com outras aeronaves e conhecimento prévio dos planos de voo das aeronaves em trânsito potencialmente conflituoso.

O desenvolvimento de sistemas S&A é um dos mais emergentes tópicos de I&D na área dos UAV’s e encontra-se dividido em duas abordagens distintas. Uma das abordagens baseia-se no denominado TCAS (Cooperative Traffic Avoidance Systems), utilizado nas aeronaves pilotadas por humanos, e uma outra baseada em sistemas não cooperativos: activos, tais como o radar, o sonar ou o lidar; ou, passivos como os “electro-optical” “infrared” (EO/IR). Sendo que esta última solução é mais apropriada aos UAV’s, pelos requisitos de dimensão e energia .

Contudo, as mais importantes abordagens ao S&A baseados em visão ainda endereçam cenários muito limitados, como a percepção de colisões no ar, colisões em terra, sem resolver o problema da miniaturização necessária para o seu uso em UAV’s.

Nesta dissertação, vamos abordar o desenvolvimento de um sistema de visual de percepção para o S&A que lide simultâneamente com as diferentes

situações de perigo endereçadas pelas VFR (colisões no ar, trajectória de voo que evite estruturas e elevações de terreno, obstáculos na trajectória de Voo, e nuvens) que possa ser aplicado em UAVs de pequena dimensão.

Para análise do sistema e da sua utilização vamos estudar o uso de aeronaves não tripuladas em diferentes cenários, com particular destaque para a monitorização florestal e o patrulhamento marítimo. A caracterização e o estudo destes cenários são fundamentais para a formulação do problema. Daremos simultaneamente destaque ao projecto de desenvolvimento do sistema FALCOS.

O papel do SAA na percepção do meio envolvente abrange o “volume” mais próximo da aeronave, e está contido no “volume” de influência de TCAS. Contudo para UAVS de pequena dimensão não é viável a utilização de sistemas activos para a detecção de obstáculos, pelo que assume papel fundamental a utilização de sistemas de processamento de imagem. O estado da arte ainda não apresenta uma solução embarcada do S&A, mas no entanto já começam a surgir as primeiras abordagens para a detecção de obstáculos em tempo real para UAVs. Uma das abordagens mais conhecidas é o filtro morfológico denominado CMO (do inglês close-minus-open) que permite a extracção de pontos característicos de uma imagem nas escalas de cinza. Dada a sua simplicidade esta linha de trabalho está a servir de ponto de partida para algumas das abordagens mais promissoras para a implementação nos UAV’S de sistemas de S&A. Também nós desenvolvemos um “set-up” experimental que nos permitiu recolher um conjunto de dados e avaliar a implementação de uma versão do algoritmo CMO. Os resultados obtidos são bastante promissores, e desde já garantem a possibilidade de desenvolvimento de uma versão embarcada.

1.2 Enquadramento / Motivação

Desde o ano 2001 que o Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) do ISEP/IPP (Instituto Superior de Engenharia do Porto - Instituto Politécnico do Porto) tem vindo a desenvolver vários veículos autónomos e sub-sistemas com estes relacionados, endereçando os mais variados ambientes de operação [1],[2],[3],[4],[5],[6].

A necessidade de observar e proteger sistemas naturais ou artificiais de grande dimensão e complexidade, incentivou a procura de soluções implementáveis para o problema da monitorização. As soluções baseadas unicamente em agentes humanos, frequentemente não são as mais viáveis nem fiáveis, devido à característica da própria tarefa: rotineira, constante (por vezes 24 horas por dia) e por vezes inacessíveis ou hostis aos humanos. A complexidade de algumas aplicações requer a cooperação entre vários veículos, mesmo que a cooperação não seja necessária, múltiplos veículos podem ser usados para aumentar a robustez das aplicações.

A monitorização ambiental é uma das motivações do Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA-ISEP) para o desenvolvimento de veículos autónomos. Essa motivação originou a criação do projecto "*Flight Autonomous Light Cooperative Observation System*" (FALCOS), sendo um dos seus objectivos, desenvolver um conjunto de aeronaves não tripuladas, de baixo custo para monitorização de florestas e vigilância marítima. O projecto é desenvolvido num ideal de monitorização e vigilância autónoma, composto por veículos aéreos, terrestres e marítimos.

O desenvolvimento das aplicações orientadoras destes cenários (desde a monitorização ambiental á vigilância marítima entre outros) promovem diferentes desafios para os sistemas de percepção e, em particular para o sistema de visão e processamento de imagem, cujos requisitos são difíceis de cumprir simultaneamente.

A necessidade de satisfazer simultaneamente o baixo consumo energético e o desempenho computacional elevado, colocam a solução deste problema não só no desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagem mais eficazes, mas também nas soluções de arquitectura para o sistema.

Existe também um esforço para desenvolver sistemas sensoriais inovadores e/ou dedicados que permitam um aumento das capacidades de percepção dos veículos desenvolvidos como é por exemplo no caso das aeronaves não tripuladas, com o desenvolvimento de sistemas S&A para poderem partilhar o espaço aéreo com outros aviões.

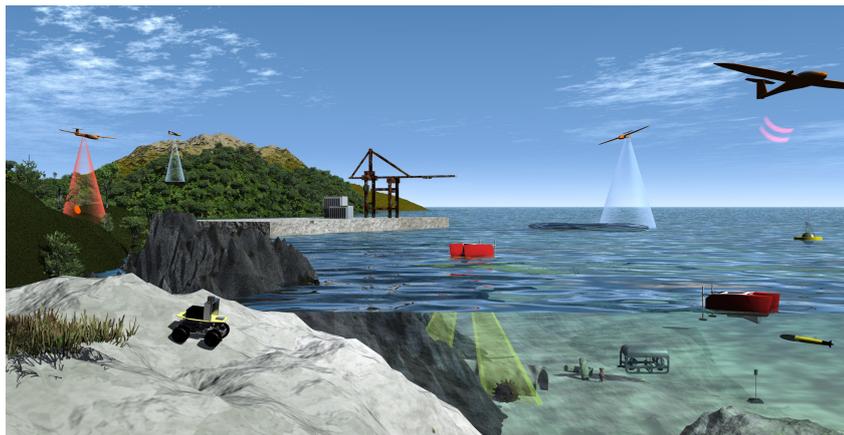


Figura 1.1: Cooperação de Múltiplos Robots

1.3 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação é contribuir para o desenvolvimento de uma solução que permita o uso de UAV's em espaço aéreo não segregado. Os nossos contributos vão desde o modo de uso dos UAVs até ao desenvolvimento de uma solução com múltiplas aeronaves não tripuladas. Em particular vamos focar a nossa contribuição no desenvolvimento do SAA.

Assim os objectivos para esta dissertação passam pelos seguintes pontos.

1. Analisar o SAA para UAV civis, dada a sua actual limitação de uso devido a necessidade de operar em espaços não segregados. As consequentes implicações que resultam no desenvolvimento de UAV's bem como a necessidade de operar recorrendo a VFR e as questões de segurança, como o limite de peso e dimensões.
2. Definição de cenários/casos típicos representativos do problema real.
3. Implementação e Validação experimental de algoritmos do estado da arte para a detecção de "Dim point features"¹.
4. Avaliação dos métodos em diferentes cenários.
5. Contribuição nos métodos do estado da arte para a detecção de "Dim point features", com a integração da compensação do "ego-motion"².
6. Validação experimental do método proposto.

¹Pontos característicos de perturbação

²Compensação de movimento da camara na imagem

7. Proposta de arquitectura para sistema de SAA em UAV.
8. Validação experimental de protótipo da arquitectura.

1.4 Organização da Tese

Esta dissertação está dividida em três partes: enquadramento, estado da arte e formulação do problema, e contribuições.

Na primeira parte, são apresentadas as motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho, sendo composta pelos seguintes capítulos:

- No capítulo 2, é feita uma apresentação do sistema GRIFO. A apresentação deste sistema inovador de detecção precoce de incêndios pretende mostrar a problemática de voo de múltiplos aviões em espaços não segregados.
- No capítulo 3, é feita uma apresentação de veículos autónomos aéreos, a sua aplicação, cenários de operação e apresentados alguns veículos desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Autónomos.

Na segunda parte, são apresentados (com base na primeira parte) algumas técnicas e métodos utilizados anteriormente por outros autores. É ainda feita uma análise ao problema de Sense & Avoid e uma descrição aprofundada do método de percepção utilizado neste trabalho. A segunda parte é composta pelos seguintes capítulos:

- No capítulo 4 é elaborado um estudo sobre o "estado da arte" onde são apresentados alguns métodos de detecção estudados e que mereceram a nossa atenção no decorrer deste trabalho.
- No capítulo 5 é apresentada uma descrição e análise do problema, onde são referidos os requisitos para a execução deste trabalho.
- No capítulo 6 são apresentados em detalhe dois métodos de detecção referenciados no estado da arte e sobre o qual irá incidir a contribuição desta tese.

Na terceira parte, é apresentada uma arquitectura do sistema e a descrição do projecto para a realização das experiências, experiências essas que

serviram para a aquisição de "datasets" para a validação do sistema implementado. Esta parte da dissertação é composta pelos seguintes capítulos:

- No capítulo 7 é apresentada uma arquitectura do sistema implementado, sendo feita uma descrição de cada um dos blocos que a compõem, dando maior detalhe no bloco "Ego-Motion" onde são apresentadas as equações para a compensação na imagem.
- No capítulo 8 é feita uma descrição do setup experimental, do projecto das experiências, da composição do "dataset" recolhido e por último a descrição das experiências realizadas em missões de voo.
- No capítulo 9 são apresentados alguns resultados do sistema implementado e testado através da ferramenta "Matlab".

Capítulo 2

User Case GRIFO

Os incêndios florestais em Portugal atingiram nos últimos anos proporções e severidade desmesurada. O número de incêndios e a área ardida têm crescido exponencialmente e a sua evolução crescente é apenas interrompida nos anos em que as condições meteorológicas são menos favoráveis à deflagração dos incêndios e à propagação do fogo, apesar dos avultados investimentos em meios de combate. As acções de vigilância, combate e prevenção na diminuição da área ardida têm um efeito controverso pois implica o aumento da massa combustível. Consequentemente o potencial perigo de incêndio para os anos seguintes aumenta. No contexto actual a hipótese de debelar todos os incêndios nascentes obrigaria a multiplicar consideravelmente os meios já hoje empregues.

A prevenção de fogos florestais tem como um dos seus pilares a detecção precoce de ignições. O sistema de detecção e vigilância GRIFO é constituído por múltiplos veículos autónomos aéreos (UAV's) que efectuem a vigilância de forma autónoma detectando possíveis focos de incêndio e fornecendo informação geo-referenciada desses alarmes. Na figura 2.1 podemos observar uma perspectiva operacional do sistema.

Um dos factores relevantes no sistema de vigilância é a sua capacidade de cobertura temporal e espacial. A utilização de UAV's permite a obtenção de informação visual (multi-espectral, e em particular na gama de infra-vermelhos) na vertical reduzindo os efeitos de oclusão que facilmente se verificam por sistemas complementares de vigilância fixa. Comparativamente com outros sistemas de sensoriamento remoto similares como o



Figura 2.1: Conceito de operação múltiplos veículos autónomos aéreos

satélite, permite um maior detalhe. As aeronaves voam perto do solo e a resolução permite detecção de focos de incêndio com cerca de 1m² face dezenas de metros) cumulativa com um tempo de passagem reduzido (uma vez que depende apenas do número de aviões, atingindo-se passagens de 10 minutos ou menos). Note-se que com a tecnologia actual é possível mantendo a mesma altitude de operação, aumentando a resolução dos sensores com pouco aumento de custo obter incrementos na resolução da detecção. A utilização de UAV's permite também a adaptação dinâmica a diferentes condições, podendo facilmente aumentar a taxa de passagem em certas zonas consideradas de maior risco ou adaptação da própria missão (em termos temporais ou espaciais) face a condicionantes externas tais como vento, informações em tempo real de zonas de interesse, etc. O uso de aeronaves não tripuladas permite também a sua operação de noite (continuamente 24h sobre 24h).

Um aspecto crucial do projecto GRIFO consiste em que as aeronaves detectam automaticamente os focos de incêndio. Esta detecção é efectuada por processamento de imagem recolhida a bordo (quer visível quer “near-infrared”). O sistema não necessita de manter uma ligação vídeo entre cada aeronave e um posto de controlo em terra. Uma vez detectada uma possível

ignição é emitido um alarme que pode ser ou não confirmado por um utilizador em terra (podendo apenas nesse caso ser enviada uma imagem da situação a analisar). Adicionalmente uma vez que o veículo encontra-se sempre localizado (quer por GPS a bordo quer por outros sensores de navegação) o foco de incêndio é automaticamente geo-referenciado. Esta informação precisa pode, se for caso disso ser comunicada às entidades responsáveis pelo combate permitindo uma actuação muito mais eficaz. Note-se que a utilização de aeronaves não tripuladas apenas como meio de recolha de imagem que é analisada em terra, obriga ao estabelecimento de um canal de video por aeronave, tornando tecnicamente inviável a utilização de um número elevado de aeronaves (para garantir uma cobertura espacial detalhada e varrimento temporal reduzido), quer pelas limitações em comunicações quer pela análise em terra da informação recolhida. No caso desta ser efectuada por um ou mais operadores surge o problema da atenção versus elementos identificáveis, limitando a detecção de focos muito pequenos e no caso de sistemas computacionais os custos são muito elevados pela elevada carga de processamento requerida. A solução proposta assenta na utilização de pequenas aeronaves (aproximadamente 3m de envergadura), de baixo custo, a operarem a baixa altitude (cerca de 300m) com sensores de imagem e processamento dos mesmos a bordo. A sua reduzida dimensão implica também reduzidas infra-estruturas de suporte em terra. O processamento a bordo permite a autonomia de decisão, permitindo a execução de missões complexas, como a pesquisa automática de fontes de calor, ou o rastreio de intrusões (útil em certas áreas de exploração florestal). Outro ponto relevante no sistema proposto consiste na infra-estrutura de suporte em terra que assume uma intervenção humana reduzida. As aeronaves não só voam autónomamente como também aterram e descolam autónomamente. Uma vez em terra, a infra-estrutura de suporte possui sistemas de estacionamento que permitem a carga automática de baterias.

2.1 **Arquitectura do Sistema GRIFO**

Existem um conjunto de nós fixos de comunicação ligados em rede e que permitem a comunicação com as aeronaves através de redes “wireless” Esta rede

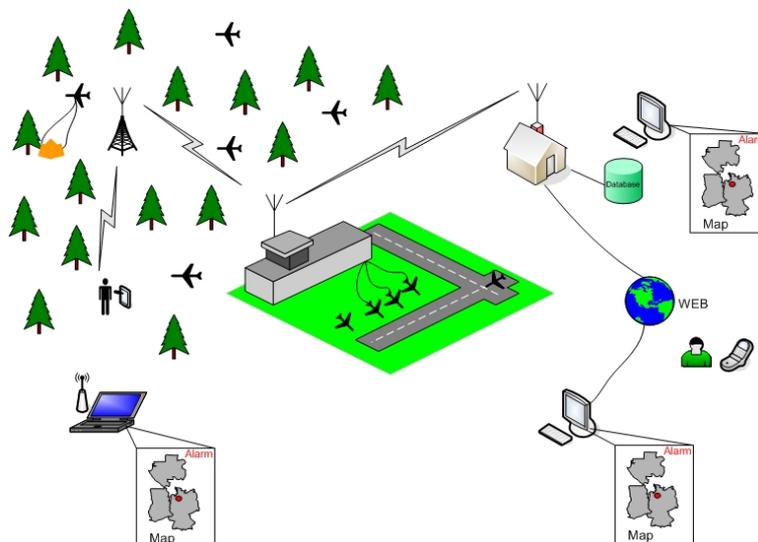


Figura 2.2: arquitectura do Sistema GRIFO

de comunicações permite não só estabelecer as comunicações com a frota de UAV's em voo, mas também comunicar com consolas de operação portáteis (para controlo directo de uma ou mais aeronaves), dispositivos remotos de informação como por exemplo PDA (estes podem fornecer a agentes no terreno informação valiosa como a localização de focos de incêndio ou outra informação recolhida pelas aeronaves). Existe também uma estação remota de controlo e monitorização do sistema localizada na sede da Associação de Produtores Florestais do Concelho de Alvaiázere. A estação de controlo possui também diversas aplicações de análise e gestão de base de dados, e fornece a ligação do sistema à internet. O controlo do sistema pode ser efectuado nestas estação ou via internet por interface web (devidamente certificado). Note-se que este sistema computacional não necessita de grandes recursos, bastando simples PC com as aplicações adequadas. Na figura 2.2 podemos observar um diagrama da arquitectura do sistema GRIFO.

Como complemento ao sistema GRIFO, é preciso contemplar o uso de aeronaves tripuladas para vigilância e combate a incêndios. Para a utilização conjunta de aeronaves não tripuladas e de aeronaves tripuladas no mesmo espaço aéreo, levantam-se alguns problemas de segurança, sobre os quais iremos centrar o estudo desta dissertação.

O desenvolvimento deste sistema integrado de múltiplos UAV's, foi uma das fortes motivações para o problema de sense & avoid. Para aplicação deste

sistema no território Português, seria necessário que os UAV's partilhassem o espaço aéreo com outros aviões, pois a área florestal portuguesa encontra-se distribuída por todo o território nacional. O uso de múltiplos UAV's em cooperação, bem como a partilha de espaço aéreo levanta algumas questões de segurança na utilização deste tipo de equipamentos. De forma a que se mantenham as condições de segurança para a colocação em funcionamento de UAV's em espaços não segregados, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema de detecção de colisões com outros aviões ou mesmo com estruturas fixas em terra.

Capítulo 3

Veículos Autónomos Aéreos

Conteúdo

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1 | Abordagem ao projecto | 15 |
| 3.2 | Conceito integrado de VAA | 21 |
| 3.3 | VAA FALCOS | 25 |

3.1 Abordagem ao projecto

Os requisitos impostos por um vasto número de aplicações civis dos veículos aéreos não tripulados, e em particular a sua actuação num contexto de forte interacção com a presença humana originam uma abordagem fundamentalmente diferente à tradicionalmente adoptada neste tipo de veículos.

Esta difere da abordagem dominada pelas aplicações militares na qual se pretende retirar o piloto a uma aeronave convencional ou permitir o controlo remoto de uma ou mais aeronaves. O ênfase é colocado na transição de operacionalidade de sistemas existentes ou desenvolvidos segundo o processo de concepção aeronáutica tradicional para sistemas com operação remota ou semi-autónomos.

Na operacionalidade das aeronaves não tripuladas militares a autonomia de decisão da aeronave consitui uma pequena peça de um todo, sendo de interesse só na medida em que permite que a aeronave possua capacidades extra. O ênfase continua centrado na aeronave em si (airframe, propulsão, capacidades de voo, número, tipo e qualidade de sensores instalados) com uma relação de custos de operação (e concepção) analisada sempre na pers-

pectiva de comparação com sistemas tripulados existentes (e considerando de uma forma geral o custo de operação em meios humanos e infra-estruturas como comparativamente reduzido). Por outro lado o cenário militar requer um conjunto de características diferentes tais como capacidade de carga, velocidade e manobrabilidade, autonomia de voo por aeronave, ou integração na cadeia de comando militar. Em geral estas características não são um requisito no seu conjunto para muitas das aplicações civis (embora em algumas aplicações como missões de busca e salvamento se possam tornar relevantes).

Os baixos requisitos de intervenção humana quer directamente na operação do sistema quer em reduzida infra-estrutura de suporte (muitas vezes requerendo alta operacionalidade sem infra-estruturação específica do meio), aliados à necessidade de adaptabilidade à operação no meio envolvente e reduzido impacto no ambiente (perturbação na actividade humana ou natural) diferem substancialmente dos que presidem o projecto de aeronaves tradicionais ou de aeronaves não tripuladas militares.

A oportunidade emergente de novas aplicações dos sistemas robóticos aéreos contempla ubiquidade, facilidade de operação por um vasto leque de utilizadores e transparência na aplicação centrando-se no objectivo da aplicação/utilizador e não no sistema em si (por exemplo focando-se na disponibilização da imagem aérea pretendida ou informação obtida desta e não no processo de operação da aeronave para obter a imagem ou dos resultados imediatos obtidos por câmaras da aeronave).

A abordagem seguida no projecto e concepção de sistemas autónomos aéreos caracteriza-se pois por um conjunto de linhas orientadoras:

- **Concepção do sistema autónomo de raiz** permitindo tirar partido de novas opções tecnológicas e conceitos não aplicáveis (ou de difícil aplicabilidade) no desenvolvimento de aeronaves tradicionais bem como responder a necessidades específicas de novas aplicações
- **Autonomia de decisão e processamento a bordo**, encarando os sistemas como veículos autónomos aéreos em vez de aeronaves não tripuladas (muito embora o primeiro englobe o segundo o inverso não é necessariamente verdade). Dotando-se desta forma os sistemas de cres-

cente autonomia de decisão e processamento a bordo e desta forma por um lado reduzir os requisitos de comunicação necessários à operação bem como permitir centrar o ênfase na aplicação/tarefa em causa e não na aeronave em si (libertando o utilizador de tarefas de controlo da aeronave e simplificando a operação)

- **Integração sistémica** tendo em vista não só considerar o sistema autónomo mais do que a aeronave envolvendo todos os subsistemas associados à sua utilização, mas também nos casos em que tal se justifique o sistema como um todo envolvendo múltiplos veículos autónomos (eventualmente heterogéneos). Nesta abordagem a autonomia (de decisão, de operação, temporal, energética, etc) é um conceito aplicado ao sistema global podendo ou não traduzir-se em diferentes graus nos seus subsistemas constituintes. Por outro lado, este conceito de integração aplica-se externamente na previsão e desenvolvimento de capacidades de integração dos sistemas/aeronaves com outros sistemas externos (um caso paradigmático consiste na integração com controlo de tráfego aéreo ou capacidade de operação em espaço aéreo não segregado).

Os veículos aéreos podem ser categorizados de acordo com o seu princípio base de voo e esta separação impõe desde logo um conjunto de restrições ao projecto. Podem ser aeronaves de asa fixa, asa móvel, veículos de sustentação aeroestática (balões ou dirigíveis) ou veículos de propulsão a reacção (aqui considerados apenas os veículos do tipo foguete com reduzidas superfícies de sustentação).

Um conjunto de aplicações como monitorização, detecção ou vigilância envolve a necessidade das aeronaves autónomas possuírem alguma autonomia de voo bem como percorrerem áreas consideráveis. Nestes casos particulares os sistemas de asa fixa apresentam a melhor relação desempenho/eficiência.

Os veículos autónomos aéreos abordados neste trabalho são aeronaves de asa fixa (muito embora o trabalho em percepção sensorial apresentado possa ser facilmente aplicado em outro tipo de sistemas).

O cenário de case study de monitorização florestal e detecção de incêndios apresentado anteriormente constituiu um destes casos de aplicação e tipifica um conjunto de características para os veículos no seguimento das linhas orientadoras enunciadas.

Sob o ponto de vista de características de voo os veículos autónomos aéreos são projectados tendo em atenção a autonomia (temporal) reduzindo o consumo energético. Este sendo proporcional ao quadrado da velocidade penaliza fortemente esta. Temos pois, sistemas operando com velocidades baixas otimizando os recursos energéticos disponíveis, mas com capacidade para operar em condições atmosféricas típicas para os cenários de interesse (As situações de maior risco de incêndio estão tipicamente associadas a ventos fortes) Estas aeronaves de asa fixa obtêm configurações de voo tipo planador.

Ainda sob a perspectiva do airframe as dimensões deste são limitadas. A abordagem de múltiplos veículos autónomos em conjunção com requisitos de alta operacionalidade sem forte infra-estruturação do meio origina aeronaves que possuem baixos requisitos logísticos (como por exemplo facilidade de transporte em automóveis ou descolagem/aterragem em espaços disponíveis como ruas ou terrenos adequados) limitando características físicas como peso e dimensões. Uma vantagem adicional consiste na redução de risco e minimização de danos em caso de acidente. A limitação de carga útil traduz-se no tipo e características dos sistemas e sensores utilizados a bordo.

O voo é de baixa altitude operando o veículo quer abaixo da zona de operação de aeronaves tripuladas quer eventualmente até 2km de altura (este limite é absolutamente arbitrário apenas traduz por um lado o tipo de voo de baixa altitude e por outro a consequência das dimensões e meios de propulsão limitados). Embora do ponto de vista de propulsão das aeronaves não exista um tecto de voo tão apertado (tanto mais que sendo elas de propulsão eléctrica estão menos sujeitas aos limites dos motores de combustão externa) as fortes limitações actuais de voo são impostas quer pela inexistência de legislação específica enquadrando este tipo de veículos (aeronaves não tripuladas) quer pelas dificuldades técnicas de operação em espaço aéreo não segregado cumprindo as regras de aviação civil (com par-

ticular destaque as regras de navegação visual "VFR-Visual Flight Rules", problema para o qual o presente trabalho pretende contribuir).

Note-se ainda que as necessidades de precisão, detalhe e qualidade nos dados de monitorização (obtidos por exemplo por sensores de imagem) requerem voo relativamente próximo do solo por forma a não onerar (caso, peso ou energia) excessivamente os componentes sensoriais bem como permitirem uma maior operacionalidade. Esta decorre da eficiência de utilização em áreas muito limitadas e fraccionadas (para as quais o voo em média e alta altitude não é compensador) e também do óbvio ganho de eficiência energética obtido por não ser necessário efectuar uma ascensão muito elevada (sendo esta a fase de voo tipicamente de maior consumo).

O voo de baixa altitude possui ainda a vantagem de não requerer meios especiais de comunicação podendo-se tirar partido de sistemas convencionais e de infraestruturas existentes (como a rede celular móvel de comunicações).

A abordagem de projecto focada na autonomia de decisão perspectiva dotar os veículos de capacidades de descolagem e aterragem autónomas. Ao considerar o sistema como um todo envolvendo múltiplos veículos (para além de infra-estruturas ou sistemas de suporte, processamento de informação e interface homem-máquina) o conceito de autonomia de voo é transferido da aeronave para o sistema. Autonomia esta, só conseguida por múltiplos veículos se estes não requererem intervenção humana na descolagem/aterragem. Outro factor a considerar consiste na facilidade de operação por utilizadores não treinados pelo que mesmo um único veículo possui uma gama muito mais alargada de aplicações se simplificar e automatizar o seu processo de lançamento e recolha.

Sob o ponto de vista de opções energéticas e de propulsão os sistemas recorrem totalmente a energia eléctrica.

Esta opção de projecto claramente demarca o conceito de veículo aéreo autónomo tal como é aqui apresentado da aeronave convencional. Muito embora a densidade energética das baterias eléctricas seja inferior à dos combustíveis líquidos, as vantagens de aeronaves completamente eléctricas para este fim (VAA) são determinantes. Desde a simplicidade de operação e redução de manutenção mecânica, à redução de ruído, facilidade de controlo

por computador a bordo (sem problemas de paragem e rearranque de motores no ar ou no solo), redução do risco de incêndio em caso de queda, gestão energética a bordo, possibilidade de produção de energia em voo recorrendo a painéis fotovoltaicos até ao não menos relevante aspecto de permitir carga automática (o que seria bastante mais complexo com combustível). Estes factores claramente apontam a solução energética como sendo eléctrica. É de notar também que os constantes avanços na tecnologia de baterias indiciam um incremento de densidade e redução de risco bem como a possibilidade de utilizar hoje em dia motores DC sem escovas de alta eficiência e em múltiplas configurações.¹

Do ponto de vista de hardware de bordo e tendo em vista a utilização generalizada pretendida, os veículos devem de uma forma geral utilizar componentes comercialmente disponíveis e sistemas e soluções de navegação de baixo custo. Entre estes destaca-se sistemas GPS e sistemas de navegação inercial de baixo custo (como sistemas "strapdown" baseados em tecnologia MEMS)²

Do mesmo modo e atendendo às limitações de espaço/peso/consumo e de custo também quer as soluções computacionais, quer os sistemas sensoriais e em particular sistemas de visão (em espectro visual e infra-vermelho de particular interesse para aplicações de detecção de fogos) estão sujeitas às restrições de custo, dimensões, consumos e peso.

Desta forma e dada a quantidade e qualidade de informação que produzem, os sistemas de visão constituem um sensor da maior relevância não só na aplicação específica do veículo mas também e aqui directamente relacionado com este trabalho no apoio à navegação e desvio de obstáculos. Note-se que limitações de espaço, peso e custo tornam bastante mais problemática a opção por outras soluções sensoriais para estes fins como o RADAR.

Consequência clara do conceito de autonomia do robô temos a existência a bordo de processamento computacional não só para navegação, controlo de missão e de voo mas também para processamento sensorial. É aliás

¹Com este tipo de motores é possível escolher múltiplas configurações de propulsão com mais ou menos motores para uma dada potência total sem perdas significativas de eficiência). Já com motores de combustão é muito mais eficiente ter um motor do que dois mais pequenos totalizando a mesma potência

²Esta abordagem enquadra-se nas linhas de I&D do LSA/ISEP com a possível utilização ds solução dedicada INS de baixo custo em desenvolvimento

primordial considerar processamento sensorial a bordo e em particular de imagem como factor relevante para garantir autonomia de decisão e limitar a necessidade de comunicações.

Note-se que transversal a todo o projecto dos veículos robóticos autónomos aéreos temos a consideração energética. Ou seja, as soluções particulares a serem adoptadas têm de na medida do possível pautar-se por um consumo reduzido de energia. Esta consideração aliada à necessidade de processamento em tempo real da informação impõe fortes restrições ao tipo de soluções de hardware e software a adoptar em cada caso.

3.2 Conceito integrado de VAA

A abordagem integrada aos veículos aéreos autónomos implica a consideração dos diferentes componentes do sistema global ³. Estes componentes podem assumir maior ou menor complexidade e são determinados pela aplicação em caso. Desta forma o sistema integrado pode ser subdividido em:

- Veículo(s)
- Sistema de suporte ao voo e operação em terra
 - Sistema de lançamento / decolagem
 - Sistema de recolha / aterragem
 - Sistema de comunicações
 - Sistema de gestão energética (carga)
- Sistema de processamento e gestão de informação
- Sistema de interface, supervisão controlo e apresentação de resultados

Os veículos necessitam de uma forma geral de um sistema de suporte em terra. Este cumpre as funções imediatas relacionadas com o voo, as funções específicas relacionadas com a aplicação (tais como armazenamento e gestão

³Mesmo apenas um robô aéreo relativamente simples terá pelo menos um meio de controlo e interface para ser de utilidade

de dados) bem como é responsável pelo interface entre os utilizadores e o sistema integrado.

No apoio ao voo propriamente dito temos desde os sistemas de lançamento e recolha (quando existentes), os mecanismos de comunicação com a aeronave tais como redes wireless ethernet, redes móveis celulares ou dispositivos rádio específicos ⁴ e sistemas em terra para carga automática das aeronaves. Estes são necessários para sistemas integrados com aterragem/descolagem autónoma e com longos períodos de operação em intervenção humana.

São também necessários mecanismos de comunicação entre os utilizadores e o sistema (eventualmente com diferentes funções e níveis de utilização). Sejam estes para supervisão directa de voo, planeamento de missões ou apenas recola de informação e definição de objectivos de aplicação.

Não menos importante do que o veículo e o seu suporte de voo é todo o processamento, gestão e armazenamento de informação (quando aplicável) relacionado com a aplicação. Analisando o problema da aplicação de veículos aéreos não tripulados e o impacto sócio-económico dos mesmos, a sua eficácia depende grandemente não só das características do sistema robótico em si mas também de todo o hardware e software necessário para tornar útil o seu uso. Isto traduz-se nos sistemas de análise de dados, de gestão e manutenção bem como nos meios de apresentação (e interacção) de informação relevante aos diferentes utilizadores.

O projecto do veículo autónomo aéreo em si contempla um conjunto de componentes, alguns dos quais com ligação directa ao trabalho de percepção sensorial relatado neste trabalho. Na figura 3.1 podemos observar o conjunto de sistemas/componentes que constituem o veículo autónomo. Cada um dos elementos elencados apresenta uma área de desenvolvimento enquadrando o VAA como um sistema integrado.

Os componentes enunciados definem perspectivas parcelares sobre o veículo e problemas de projecto a resolver em cada uma das áreas

A estrutura física da aeronave ("airframe") e as suas características de voo bem como o problema de controlo e estabilização do mesmo são um problema clássico no projecto aeronáutico.

⁴Embora não estritamente necessários à operação de um VAA de modo genérico existem permitindo supervisão e controlo em tempo real.



Figura 3.1: Componentes aeronave autónoma

A gestão energética quer em termos de energia disponível ou consumo quer em termos de produção a bordo ou carga em terra, constitui uma área de desenvolvimento. Problemas de gestão de baterias, sistemas de carga/descarga e conversão energética são aqui relevantes. O subsistema energético encontra-se relacionado com os sistemas de propulsão bem como com todos os restantes subsistemas a bordo.

Na definição do subsistema de comunicações encontram-se compromissos como o de proporcionar conectividade adequada à aplicação garantindo desempenho para distâncias que podem ser consideráveis, com consumo energético, custo e objectivo global de minimizar o recurso a soluções com infra-estruturas (aproveitar existentes quando possível/viável).

A consideração da aplicação do robô restringe todos os aspectos de "design" desde o "airframe" aos sensores e sistemas a bordo.

Em consideração temos também os problemas de implementação a bordo das soluções computacionais necessárias para a navegação e controlo e para processamento sensorial. Estes estão sujeitos a requisitos de tempo real sendo necessária estabelecer compromissos face a capacidade computacional, fiabilidade, redundância ou consumo e peso.

Os problemas de fusão sensorial, localização e navegação são particularmente desafiadores nos veículos autónomos aéreos uma vez que por um lado não existem pilotos humanos e por outro o tipo e qualidade de sensores disponíveis é limitado. Os problemas de precisão para a navegação impostos pela dimensão dos sistemas e aplicações exigindo detalhe e qualidade de voo têm de ter resposta pela utilização de método de fusão sensorial e processamento a bordo em vez da utilização de sensores dispendiosos.

Este processamento é também relevante como já foi referido na informação sensorial recolhida. Algoritmos de processamento em tempo real e de baixo custo computacional tem de ser utilizados para fornecer informação de nível de abstracção superior por forma a permitir adequar capacidades de autonomia de decisão a bordo.

Os problemas de segurança de voo nos VAA não se prendem tanto com a segurança do voo do veículo por forma a impedir a sua queda ou destruição como nas aeronaves tripuladas onde a preservação de vidas é o ponto primordial a atender no projecto, implementação e manutenção, mas sim na medida em que se pretende garantir a segurança na utilização dos veículos. Aqui o problema reside em por uma lado minimizar o custo e a probabilidade de perda com quedas e mais importante do que este em minimizar a probabilidade de acidente por forma a garantir um risco extremamente reduzido para pessoas e bens. Este traduz-se não só por pessoas e bens no solo como também pela eventuais colisões no ar com outros sistemas e aeronaves (tripuladas ou não).

O problema de segurança de voo está também directamente relacionado com a aplicabilidade prática deste tipo de sistemas uma vez que dele depende a capacidade das autoridades reguladoras e do estado de produzir legislação que enquadre estes veículos e permita a sua operação em cenários de interesse.

O problema de detecção de obstáculos a bordo em tempo real situa-se claramente no âmbito das questões de segurança de voo e processamento sensorial com inter-relação com os restantes componentes do VAA. Este problema bem como o trabalho apresentado nesta dissertação assume pois uma relevância particular consistindo num passo fundamental para o desen-

volvimento de VAAs com aplicação prática e impacto socio-económico.

3.3 VAA FALCOS

O conceito de VAA apresentado neste capítulo tem vindo a ser desenvolvido na linha de investigação em robótica móvel aérea do LSA-ISEP enquadrado no projecto *FALCOS - Flight Autonomous Light Cooperative Observation System*. Este visa o desenvolvimento de aeronaves autónomas de asa fixa de dimensão reduzida e voo a baixa altitude para aplicações de monitorização. Uma das aplicações motivadoras quer para o projecto em si quer para as várias instanciações consiste na detecção precoce de fogos florestais.

O projecto dos robôs aéreos segue as linhas orientadoras apresentadas anteriormente bem como corporiza o conjunto de características identificadas.

Na Figura 3.2 pode-se observar um esquema da arquitectura de hardware utilizada nos robôs autónomos aéreos FALCOS.

Os veículos utilizam motores DC "brushless" para propulsão (quer no caso de protótipos bimotor quer monomotor). Cada motor e seu controlador associado recebe alimentação a partir do sistema de gestão de energia de bordo (que faz interface com baterias Li-Po) e comandos de velocidade de um módulo de geração de PWM.

Este módulo gera referências em PWM para os servomotores de controlo de superfícies e motores de propulsão de acordo com a referência recebida pelo sistema de processamento central a bordo. Por forma a facilitar os testes e o processo de desenvolvimento este sistema faz também interface com um receptor RC standard (de modelos aerocomandados, dele recebendo as referências quando em modo totalmente manual) permitindo efectuar a comutação entre controlo manual e automático de voo.

O sistema computacional de bordo (3.3) é constituído por uma SBC ("Single Board Computer- computador de uma única placa) embebida de dimensões reduzidas e baixo consumo, o seu sistema de alimentação e um cartão de memória CF como dispositivo de armazenamento externo. Este CPU possui um interface wireless (IEEE 802.11 a/b) obtido quer por uma

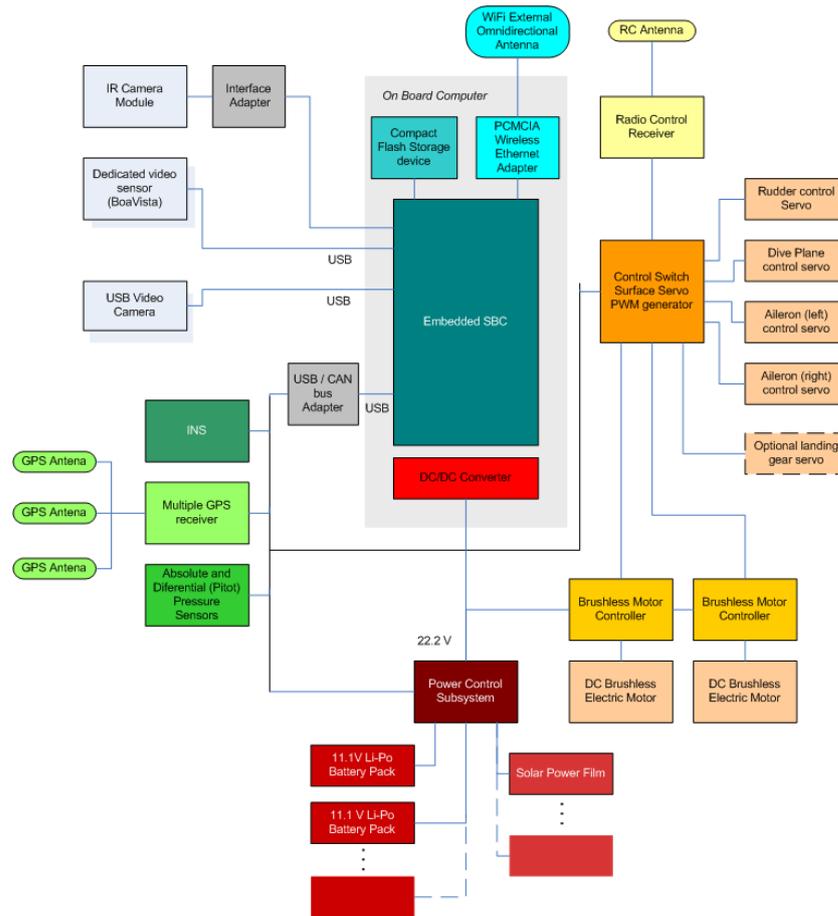


Figura 3.2: Arquitectura do VAA FALCOS

placa PCMCIA ou um módulo AP externo.

Como sensores de navegação temos sensores de pressão absoluta e diferencial, receptor GPS um sistema de navegação inercial. Estes sensores comunicam via barramento de comunicações CAN cujo interface com o CPU central é obtido por um adaptador USB.

O sistema GPS (3.4) incorpora 3 antenas colocadas na ponta das asas e cauda da aeronave e permite a recolha de informação para determinação da atitude da mesma. Nos protótipos desenvolvidos foram utilizadas diversas configurações desde a integração externa de receptores OEM ao desenvolvimento de um circuito impresso integrando 3 módulos de recepção e processamento local.

O sistema inercial foi desenvolvido no LSA-ISEP incorporando 3 acelerómetros e 3 giroscópios MEMS e com processamento local num microcontrolador embebido (3.5).

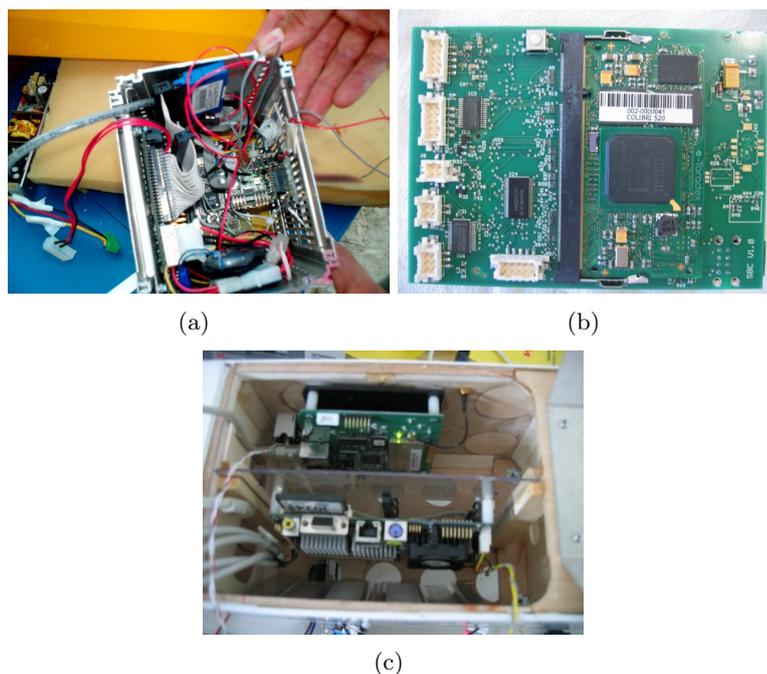


Figura 3.3: Sistemas de processamento de bordo dos protótipos AAV FALCOS

Os sensores de visão consistem em câmaras em espectro visível, no espectro "near-infrared", módulos de câmaras termográficas embebidos e o sensor de visão robótica BoaVista. Estes sistemas usam barramento USB como meio de comunicação com o CPU central.

O sistema BoaVista consiste numa câmara dedicada desenvolvida no LSA-ISEP utilizado lógica programável para efectuar processamento local e fornecer informação de maior nível de abstracção do que a imagem (como por ex: objectos identificados, fronteiras, "blobs" etc).

Para experiências de detecção de fogo foram testados em alguns dos

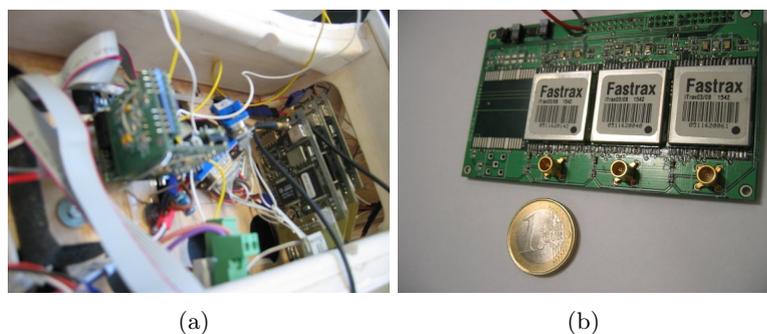


Figura 3.4: Sistemas GPS



Figura 3.5: Sistema INS embebido

protótipos câmaras USB adaptadas para detecção na faixa "near-infrared" bem como no espectro visível. Na figura 3.6 podemos observar a sua montagem num dos protótipos.



Figura 3.6: Câmaras num protótipo FALCOS

Foram implementados diversos protótipos de teste para o AAV FALCOS Figura 3.7. Os airframes utilizados variam entre modelos RC comercialmente disponíveis (como modelos de Piper Cub, ou planadores Cularis), modelos RC desenvolvidos especificamente ⁵ a um protótipo de airframe concebido especificamente para constituir um AAV (protótipo FALCOS Douro).

Foram efectuados testes de voo autónomo e de processamento de informação sensorial a bordo, nomeadamente detecção de fogos em ambi-

⁵Foram desenvolvidos diversos modelos RC de grande dimensão segundo configuração tradicional (envergadura de asas superior a 2m, modelos básicos com asa superior e monomotor) tomando em consideração o espaço interior disponível para hardware bem como disponibilização de características físicas para a montagem de sensores

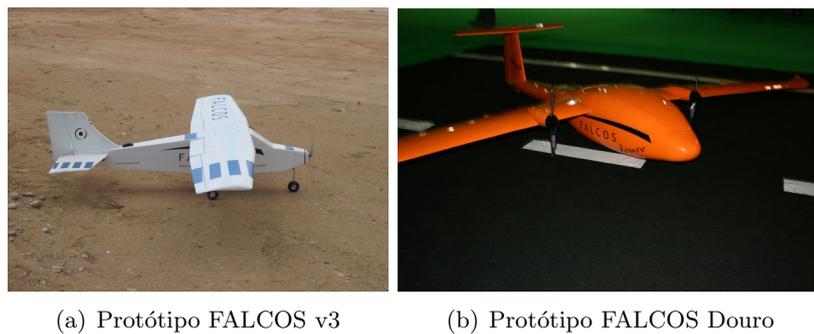


Figura 3.7: Alguns protótipos AAV FALCOS

ente controlado e em cenário operacional (zona florestal no concelho de Alvaiàzere).

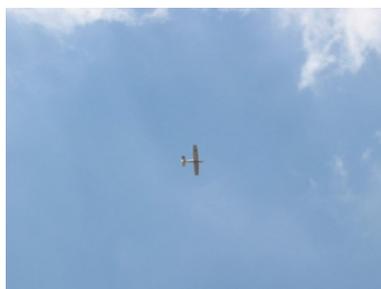


Figura 3.8: Testes de voo

O veículo autónomo aéreo FALCOS (quer do ponto de vista de conceito e projecto global quer pela implementação descrita) exemplifica uma classe importante de sistemas para os quais o sistema de percepção visual para detecção de colisões é relevante.

Os sensores de visão utilizados no AAV FALCOS independentemente do tipo de espectro de luz a que são sensíveis podem ser subdivididos em duas categorias: sensores/câmaras que fornecem uma imagem em formato digital ou os sensores dedicados com processamento embebido (como o sensor BoaVista). A utilização destes últimos para detecção de colisões no ar, requer que os algoritmos de detecção sejam adequados à sua implementação em hardware reconfigurável. Ou seja, por forma a tirar partido das características de processamento de imagem em pipeline devem poder ser aplicados sem ser necessário guardar uma frame integral (por forma a não onerar o sistema em termos de memória e latência no processamento). Os algoritmos

descritos no capítulo 6 permitem este tipo de implementação. No que diz respeito às câmaras convencionais, para este tipo de AAVs a sua resolução é em geral limitada (note-se que rapidez de "framerate" em geral origina um compromisso com a resolução) pelo que o sistema de detecção deve permitir com estes sensores detectar alvos a distâncias de interesse. As soluções de detecção devem pois permitir obter informação relevante com alvos na imagem a nível do pixel ou mesmo subpixel. No capítulo 9 podemos observar alguns resultados com método de detecção proposto utilizando sensores com resolução de 1.3Mpixel e com os alvos detectados a mais de 3km de distância.

Capítulo 4

Estado da arte

O desenvolvimento de sistemas de Sense & Avoid (SAA) para utilização em veículos autónomos aéreos, é actualmente um tópico de pesquisa e investigação ainda em aberto. Existe hoje em dia, um substancial investimento por parte da comunidade científica e industrial(meios militares, empresas de aviação) tanto em meios humanos bem como em bens materiais no desenvolvimento deste tipo de equipamentos. Tal deve-se fundamentalmente a duas razões mutuamente dependentes:

1. A enorme disseminação e aumento do número de aplicações em que os veículos autónomos aéreos podem desempenhar um papel decisivo. Nomeadamente em situações em que a sua capacidade operacional pode ser aproveitada de forma mais eficiente e com maior grau de fiabilidade comparada com a performance de um aviação com piloto humano.
2. Existe um conhecimento dado como adquirido pela comunidade científica [7, 8, 9] e pelas autoridades da aviação [10], que a razão principal pelo qual os UAV não tem acesso ao espaço aéreo cívil, é o facto de os UAV não cumprirem o requerimento de "see and avoid", como pode ser constatado no regulamento da Federal Airforce Administration FAA order 7610.4 [11] e no regulamento da NATO [12]. Nestes é referido explicitamente que os UAV tem de demonstrar possuir um nível de desempenho que seja equivalente ou superior ao nível de desempenho de um piloto humano, sem recorrer à utilização de comunicações coo-

perativas com outras aeronaves e sem conhecimento à priori do plano de vôo.

Por forma a desempenharem manobras de SAA, os UAV tem de ser equipados com sistemas de percepção que permita-lhes a tomada de decisão apenas baseada no denominado ambiente de vôo.

Existem dois tipos de sistemas de SAA: Cooperative Traffic Avoidance Systems(TCAS,ADS-B), utilizados normalmente pelas aeronaves tripuladas e os Non Cooperative Traffic Avoidance Systems, activos como o por exemplo: o Radar [13], sonar e Lidar [14] ou de índole passiva como os sistemas electro-ópticos/infravermelhos (nossa solução) que são mais indicados para serem utilizados em pequenas aeronaves não tripuladas de asa fixa.

O desenvolvimento de sistemas de visão com vista à integração operacional em UAVs, tem conhecido um maior grau desenvolvimento na área dos sistemas de navegação visuais [15]. Este tipo de sistemas são sistemas de navegação que normalmente não possuem mapa, e são baseados na estimação do movimento do veículo. Como exemplo pode ser referido os sistemas de fluxo óptico [16, 17], que funcionam bem em situações em que a aeronave possui uma velocidade constante. No entanto, estes sistemas não são eficazes em situações de baixa altitude, alta velocidade da aeronave e baixa visibilidade relativamente ao solo. O estudo de [15], também refere outras abordagens baseadas em visão, por exemplo: o uso de detectores de cantos de Harris, ou mesmo combinações de detectores com seguimento de alvos como o utilizado por [18].

Todavia, existem avanços significativas nas técnicas de detecção e seguimento de objectos por meios visuais, que ainda não foram incorporados em sistemas de navegação visual para UAVs. Nomeadamente, técnicas de visão como MSER - Maximal Stable Extremal Regions [19], SIFT - Scale Invariant Feature Transform [20] and SURF - Speeded up Robust Features [21] não foram ainda devidamente exploradas no domínio dos veículos autónomos aéreos em ambiente exterior. Desenvolvimentos recentes [22], demonstram que a combinação de MSER com SIFT permite uma melhor robustez a mudanças de iluminação e a oclusões a quando da detecção de

objectos.

Apesar de promissoras as técnicas de visão convencionais utilizadas para sistemas de navegação visuais para utilização em UAVs, não podem ser consideradas como ideais no que diz respeito a sistemas de SAA. Se referirmos, questões como a operacionalidade do UAVs, a falta de conhecimento prévio do ambiente de vôo e a baixa qualidade em termos de textura da imagem, para perceber-se que o seguimento de objectos no ar é uma tarefa muito difícil para um UAV.

Existem outras abordagens ao nível de técnicas de visão que podem ser facilmente migradas para aplicações de SAA. Já existe trabalho anterior desenvolvido recorrendo à utilização de técnicas de fluxo óptico para seguimento e desvio de obstáculos no meio aéreo [23, 16], que recorreram à utilização de fluxo óptico com visão stereo por forma a evitarem obstáculos. A visão stereo também foi utilizada por [24], para o desenvolvimento de uma arquitectura (VISTA) que permite a detecção e seguimento de alvos recorrendo à utilização de correspondências entre duas imagens em formato binocular numa escala de cinzentos.

Outros sistemas de SAA baseados em visão, tal como o desenvolvido por Utt [25]. Demonstrem a capacidade de detecção em tempo real de um avião a aproximar-se em diferentes ângulos de vista. Apesar de não divulgarem a distância de detecção, o sistema desenvolvido utiliza três câmaras com grande resolução (na ordem dos 0.5 mrad/pixel), enquanto mantêm um grande campo de visão lateral (à volta dos 90) num dos lados do avião.

Já no domínio da diversidade de espectro dos diferentes tipos de câmaras existentes, [26] utiliza um sistema visual que permite a identificação de alvos em imagens no espectro visível e no espectro dos infra-vermelhos. Outros como [27] misturam radar com visão, e [28], utiliza métodos de seguimento de alvos baseado na cooperação de múltiplos UAV.

Por fim, no que concerne a técnicas de visão, temos a análise morfológica da imagem. Esta técnica foi introduzida por [29], e foi mais tarde utilizada por [9] permite a detecção de pequenos objectos na imagem (ao nível do pixel e sub-pixel). O método baseia-se no uso de filtragem da imagem através de operações de adição e subtracção, erosão e abertura. Estas operações

são efectuadas ao nível do pixel da imagem juntamente com a utilização de programação dinâmica. Tal deve-se ao facto da técnica pretender diminuir o número de falsos positivos ao longo de uma sequência de imagens. Existem outros métodos de análise morfológica como o Track-Before-Detect. Todavia, esta abordagem foi testada por [9], que se referiu a ela como sendo apropriada mais a *benchmark* de algoritmos do que à sua utilização em sistemas de SAA em tempo real.

Capítulo 5

Formulação do problema / Análise

De forma a poderem ser certificados os voos com UAV's em espaços não segregados, estes devem satisfazer as regras mínimas de segurança que oferecem os aviões pilotados. A questão que se levanta é se os UAV's realmente conseguem detectar e evitar colisões com objectos fixos e móveis que não denunciam a sua posição.

Os aviões pilotados respeitam dois tipos de normas para poderem voar em segurança, as normas de voo por instrumentos e as normas de voo visuais. Como se pode verificar na figura 5.1 existem alguns métodos bastante usados para respeitar estas regras, nomeadamente a utilização de TCAS - Traffic Alert & collision avoidance system. O uso deste tipo de equipamentos num UAV torna-se limitado, pois os principais requisitos de sense & avoid para UAV's são pequenas dimensões e baixo consumo.

Dentro do problema de sense & avoid, podemos separar os obstáculos em dois tipos, sendo designados como cooperativos e não cooperativos. No caso de um obstáculo cooperativo, este disponibiliza de alguma forma e sua posição, velocidade e orientação, sendo que no outro caso o obstáculo é considerado um intruso no espaço. Os obstáculos não cooperativos podem ser detectados por elementos activos ou passivos, sendo que neste trabalho iremos apenas abordar a detecção por elementos passivos, uma vez que o objectivo é embarcar uma solução de processamento de imagem de baixo consumo energético e baixo custo num UAV. Para além disto, a detecção por

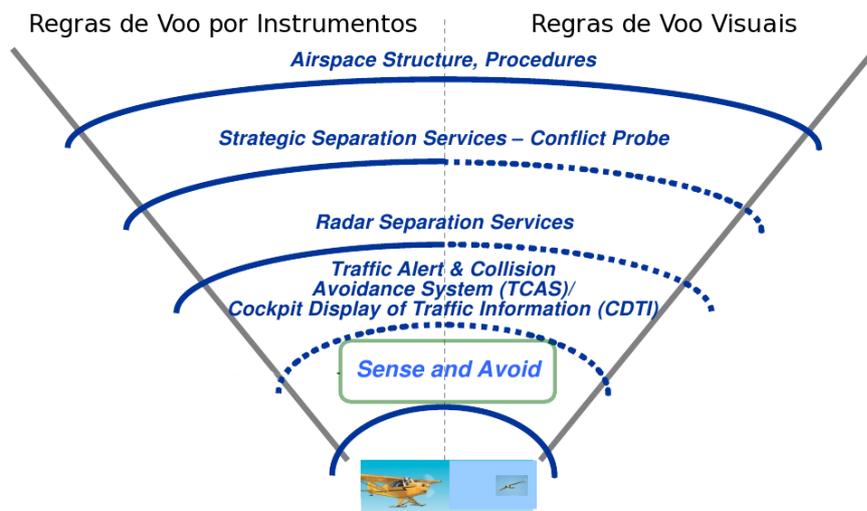


Figura 5.1: Background Sense and Avoid

elementos activos presupõe o aumento do consumo energético, pois são usados retornos de sinal (Exemplo: laser, radar), contudo estes sensores podem fornecer com bastante exactidão a distância ao objecto, a sua velocidade e orientação.

Para este fim têm sido usados diferentes sensores, o que leva a um largo número de soluções (Figura5.2).

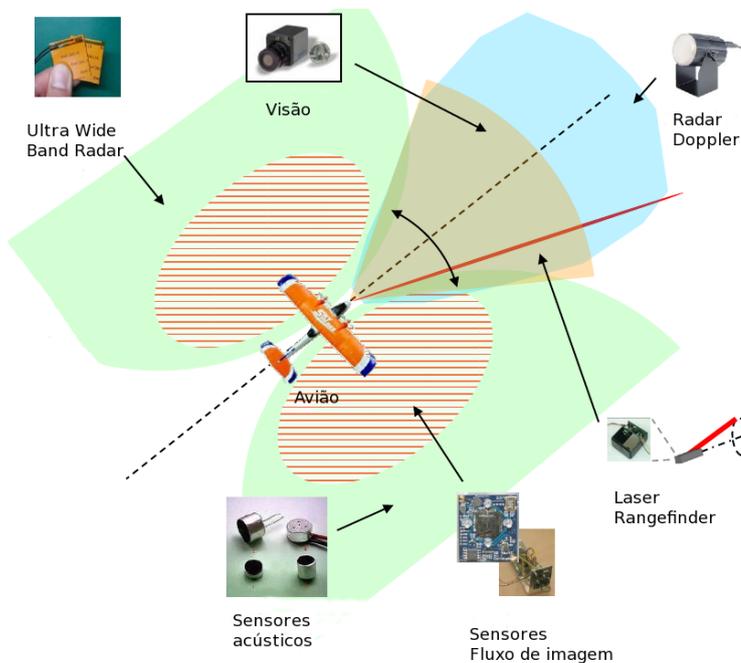


Figura 5.2: Exemplos de sensores para sense & avoid

Nesta dissertação, vamos abordar a problemática de sense & avoid com

sensores passivos por visão, capazes de solucionar as diferentes situações de perigo endereçadas pelas “Visual Flight Rules“, sejam elas colisões no ar ou com obstáculos fixos como elevações de terra ou estruturas.

No âmbito do trabalho científico desenvolvido na área de sistemas autónomos no LSA, e aproveitando trabalho realizado, os requisitos para o desenvolvimento de um sistema de detecção para o veículo autónomo FALCOS endereçam principalmente o baixo consumo energético, dimensões reduzidas.

Analisando o problema de percepção de uma forma menos abstracta, a figura 5.3 mostra uma imagem real de um cenário de aproximação de aviões numa pista de aterragem. Se pensarmos nesta imagem como a visão por parte de um piloto dentro de um avião, este provavelmente (assim como o leitor) não conseguiria perceber a aproximação de um avião no horizonte.



Figura 5.3: Cenário Real

Nestas duas imagens pretende mostrar-se a problemática da percepção de obstáculos através de meios visuais. De forma a que seja possível detectar atempadamente obstáculos para evitar colisões, é necessário que o sistema de processamento de imagem tenha a capacidade de fornecer resultados em tempo real. Uma vez que os aviões se movem a considerável elevada velocidade, são necessárias elevadas taxas de aquisição de imagem e consequentemente elevado poder de processamento. Desta forma foram estudadas algumas implementações do estado da arte de forma a poder em-



Figura 5.4: Realce da perturbação no horizonte

barcar os algoritmos de processamento num sistema embebido.

Capítulo 6

Métodos de Detecção

Conteúdo

| | | |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| 6.1 | Algoritmo CMO | 39 |
| 6.2 | Programação Dinâmica | 42 |

Até à data não existem muitos algoritmos para detecção em tempo real de obstáculos para aplicação em UAV's. Um dos algoritmos testados e passível de ser implementado num sistema embebido é o *close-minus-open* (CMO) Este algoritmo incide no processamento de imagem “front end” para extracção de pontos característicos (Potencialmente correspondentes à distância do avião em rota de colisão) em cada imagem.

Um algoritmo subsequente de seguimento como o proposto por [30] pode então ser usado para identificar os pontos característicos que possam mostrar movimento e propriedades de expansão correspondente a uma verdadeira ameaça aerea.

6.1 Algoritmo CMO

Para este fim, um filtro morfológico chamado CMO que é usado para extrair pontos característicos numa imagem. O resultado passa então através de um algoritmo de programação dinâmica, melhorando o desempenho de detecção em imagens com baixa relação sinal ruído. Uma abordagem alternativa é também apresentada, segundo o qual o filtro CMO foi modificada a fim de reter as informações sobre o sinal dos valores das características detectadas, com o objectivo de aumentar a resistência ao ruído de imagem.

Uma descrição detalhada destes algoritmos de detecção e uma comparação é apresentada a baixo.

Filtros espaciais baseados em morfologia à escala cinza são uteis para extrair pequenos pontos característicos que estão presentes numa imagem, entre (clutter), tais como as nuvens. Tais filtros são derivados de duas operações fundamentais conhecidas como dilatação e erosão.

A dilatação de uma imagem em escala de cinzentos, $I(x, y)$ por um elemento estrutural morfológico, $S(x, y)$ é definido pela equação:

$$I(x, y) \oplus S(x, y) = \max_{(x', y') \in S} \{I(x - x', y - y') + S(x - x', y - y')\} \quad (6.1)$$

Onde as gamas de x' e y' são definidas pelo tamanho do elemento estruturante. Similarmente a erosão de uma imagem em escala de cinzentos $I(x, y)$ por um elemento estruturante morfológico $S(x, y)$ é definido pela equação:

$$I(x, y) \ominus S(x, y) = \min_{(x', y') \in S} \{I(x - x', y - y') - S(x - x', y - y')\} \quad (6.2)$$

Estas duas equações fundamentais podem então ser compostas de forma a formar duas equações secundárias, denominadas por equação de *abertura* e de *fecho*, estas equações são extremamente úteis para detecção de “targets”

A *abertura* morfológica de uma imagem em escala de cinzentos $I(x, y)$ por um elemento estruturante $S(x, y)$ é definido como uma erosão seguida de uma dilatação.

$$I \circ S = (I \ominus S) \oplus S \quad (6.3)$$

Inversamente, o *fecho* morfológico de uma imagem em escala de cinzentos $I(x, y)$ por um elemento estruturante $S(x, y)$ é definido como uma dilatação seguida de uma erosão.

$$I \bullet S = (I \oplus S) \ominus S \quad (6.4)$$

Conceptualmente o processo de *abertura* morfológica pode ser descrito como o escurecimento de pequenas áreas brilhantes (Áreas que são pequenas de mais para acomodar o elemento estruturante morfológico apresentado) para os valores dos pixels vizinhos.

Por outro lado, o *fecho* morfológico é usado para clarear pequenas áreas escuras de forma a aproximar os valores destes pixels com os pixels vizinhos.

Dadas estas definições básicas, é claro que a diferença entre uma imagem e sua abertura morfológica é útil para identificação positiva (mais brilhante do que os pixels vizinhos) de “targets”. Assim, a diferença entre uma imagem fechada e seu original pode ser usada para identificação negativa (escuro) de targets.

A equação seguinte, definida como um filtro close-minus-open (CMO), gera uma resposta não negativa que simultaneamente identifica “targets” quer de natureza positiva quer negativa.

$$CMO(I, S) = (I \bullet S) - (I \circ S) \quad (6.5)$$

Esta implementação foi baseada numa aproximação proposta por [31] que toma a resposta mínima de um par de filtros CMO, usando espaços horizontais e verticais como elementos estruturantes. Esta aproximação de duplo filtro reduz a probabilidade de falsos positivos na detecção de “targets” devido aos limites irregulares das zonas mais obscuras “clutter”.

O filtro CMO torna-se é bastante atractivo devido à sua simplicidade, contudo a sua saída é não negativa por natureza o que provoca com isso que os falsos positivos gerados por “zero-mean image noise” não são mais caracterizadas por “zero mean”.

Isto reduz a eficácia do processo subsequente de média temporal usando programação dinâmica. Por este motivo, uma abordagem alternativa é apresentada, sendo esta chamada de *Preserved- Sign* (PS).

Este algoritmo adiciona as diferenças entre a imagem original e a sua abertura e fecho morfológico, o que corresponde a uma duplicação dos valores da intensidade de uma imagem, seguidos por uma subtração de ambas as imagens abertas e fechadas.

$$PS(I, S) = (I - (I \bullet S)) + (I - ((I \circ S))) \quad (6.6)$$

$$PS(I, S) = 2I - (I \bullet S) - (I \circ S) \quad (6.7)$$

Desta forma, características positivas na imagem geram uma resposta com valores positivos e características negativas geram uma resposta negativa. Assim, a informação a cerca da polaridade das características detectadas é mantida à custa de um pequeno aumento da carga computacional. De forma a reduzir a probabilidade de falsas detecções devido a limites irregulares em "large clutter", foi estudada uma configuração de duplo filtro.

Enquanto o filtro morfológico é efectivo na detecção de sinais de pequenos "targets", é também susceptível a detecções falsas devido a ruído aleatório nos pixels individuais. O resultado do filtro morfológico é então passado por um algoritmo dinâmico que reduz o efeito do ruído aleatório.

6.2 Programação Dinâmica

O algoritmo de programação dinâmica mede a sequência de imagens dos resultados do filtro morfológico ao longo das trajetórias possíveis dos "targets", com uma decisão sobre a presença de "targets" a ser feita apenas, após o somatório de várias imagens. O número de trajetórias possíveis pode ser reduzido considerando as transições de estado possíveis do alvo entre imagens consecutivas.

O sinal de um target numa imagem pode ser representado por $-1 \leq u, v \leq 1$ um estado (i, j, u, v) , consistindo na posição de uma imagem 2D (i, j) e a velocidade de uma imagem 2D (u, v) . O espaço da velocidade é discretizado e limitado à gama de velocidades possíveis, com ramos distintos no algoritmo dinâmico usado para processar cada (u, v) possível. Para o problema de detecção e desvio de obstáculos, a natureza quase estacionária do sinal do "target" permite-nos limitar o espaço de velocidade discreto de pixels por frame. Isto corresponde à velocidade constante de um "target" contínuo de qualquer valor entre 0 e ± 1 pixels por imagem. A posição discreta no espaço (i, j) correspond ao índice da linha-coluna de pixels em

cada imagem.

Assumindo que a velocidade é constante, pode mostrar-se que para cada estado discreto do “target” (i, j, u, v) na frame k , existem 4 transformações de estado possíveis correspondendo a imagem $K + 1$. Dado o espaço de velocidade para este problema, quatro ramos de velocidade são suficientes para acomodar o movimento possível do “target”.

O algoritmo de programação dinâmica está dividido em 3 estados - inicialização, recorrção e decisão.

Inicialização:

Uma função de mérito $F_{uv}(i, j, k)$ que recursivamente segue possíveis estados de “targets” de imagem para imagem é criada para cada ramo de velocidade discreta e inicializada com o valor 0.

Para todos os (u, v) :

$$F_{uv}(i, j, 0) = 0 \quad (6.8)$$

Recurção:

A função de mérito para a imagem k é definida como a soma ponderada da imagem actual e o valor obtido na função de mérito anterior na imagem $k - 1$. Este valor é a resposta máxima da janela de 4 pixels das transições válidas para estados do “target” (i, j, u, v) .

Para todos os (u, v) :

$$F_{uv}(i, j, k) = [(1 - \alpha) f(i, j, k)] + \left[\alpha \times \max_{(i', j') \in Q(i, j, u, v)} F_{uv}(i', j', (k - 1)) \right] \quad (6.9)$$

Onde:

$f(i, j, k)$ é a imagem filtrada recebida na imagem k .

$0 \leq \alpha \leq 1$ representa um factor de memória.

$Q(i, j, u, v)$ representa a janela de quatro pixels de transições de retaguarda válidas para os estados do “target” (i, j, u, v) .

Uma vez que esta adição é efectuada de forma recursiva, $Q(i, j, u, v)$ é equivalente à reflexão em torno de (i, j) das transições possíveis para a frente.

Decisão:

Na imagem k o valor máximo numa base de pixel é tomada a partir dos quatro ramos distintos de velocidade.

$$F_{max}(i, j, k) = \max_{(u,v)} F_{uv}(i, j, K) \quad (6.10)$$

Capítulo 7

Projecto

Conteúdo

| | | |
|-----|-----------------------------------|----|
| 7.1 | Arquitectura do sistema | 45 |
| 7.2 | Bloco Ego-Motion | 51 |

O sistema de detecção e percepção desenvolvido neste trabalho pode ser dividido em vários subsistemas como se pode ver na figura 7.1.

7.1 Arquitectura do sistema

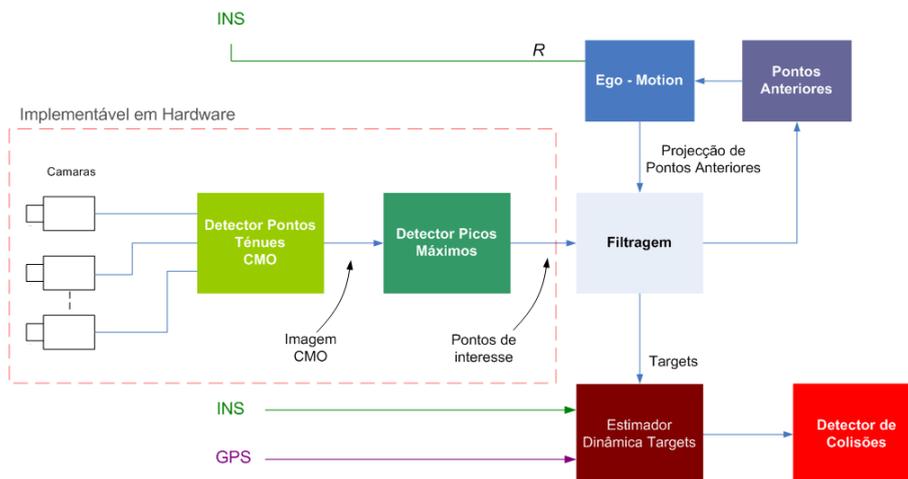


Figura 7.1: Arquitectura do sistema

Na figura 7.1 é apresentada a arquitectura proposta para sistema de S&A. Devido aos requisitos de percepção em termos de cobertura espacial e aos requisitos em termos de resolução espacial (pode ser da ordem de 0.3mRad/pixel), ambas dependente da aplicação, leva a que, seja necessário

a combinação de vários sensores de imagem por forma a obter uma solução funcional. Deste modo a arquitectura do sistema de S&A tem de permitir a possibilidade de integrar um número variável de sensores de imagem. Por outro lado, os requisitos em termos energéticos, motivam a que as camadas de processamento de imagem ao nível do pixel sejam implementadas em hardware dedicado de baixo consumo energético. Estes blocos estão esquematizados na figura 7.1 dentro do bloco a tracejado.

O bloco do detector de pontos ténues, como foi descrito no capítulo 6, tem como entrada uma imagem em tons de cinzento e vai ter como saída uma imagem de intensidade do resultado do CMO, com dimensão idêntica a de entrada menos a dimensão do kernel utilizado nas operações morfológicas utilizadas no CMO. Na implementação efectuada usou-se um kernel de 7x7.



Figura 7.2: Imagem original a cores e em escala de cinzentos

Na figura 7.2 podemos observar um exemplo típico de uma imagem de entrada do bloco de CMO (respectivamente a cores e em escala de cinzentos). O resultado da aplicação do algoritmo CMO, pode ser visualizado nas figuras 7.3, onde facilmente se pode observar a existência de picos que vão corresponder a possíveis pontos de interesse (estes picos correspondem a pontos que são significativamente diferentes do background que os rodeia). Este facto pode ser observado na figura 7.4, sendo representado o resultado de CMO para a região em torno de um target.

O resultado deste bloco passa por um detector de máximos locais, que por sua vez são sujeitos a um teste de intensidade do Máximo. Assim os picos com intensidade superior a um limiar de aceitação são considerados para o bloco de filtragem.

Quer o bloco de detecção de pontos ténues que o do detector de máximos,

são adequados para implementação embebida (podendo-se tirar partido de capacidades de paralelização de dispositivos de lógica programável como FPGA). Deste modo, seria possível aumentar o número de sensores de imagem sem comprometer o consumo energético.

O bloco de filtragem de imagem vai receber os pontos de interesse na imagem actual, e com base na memória do filtro (que consiste nos pontos de interesse das imagens anteriores e da consistência dos mesmos) fará a actualização da consistência dos pontos de interesse em memória, a eventual adição de novos pontos de interesse bem como a eliminação dos pontos com baixa consistência.

Este bloco irá recorrer ao um bloco de Ego-motion para compensar o movimento de rotação da câmara, por forma a que o resultado em situações dinâmicas seja semelhante ao da situação estática, ou seja, vai determinar a transformada que é necessário aplicar a cada ponto de interesse em memória para calcular qual a posição que teriam na imagem actual caso não se movimentassem.

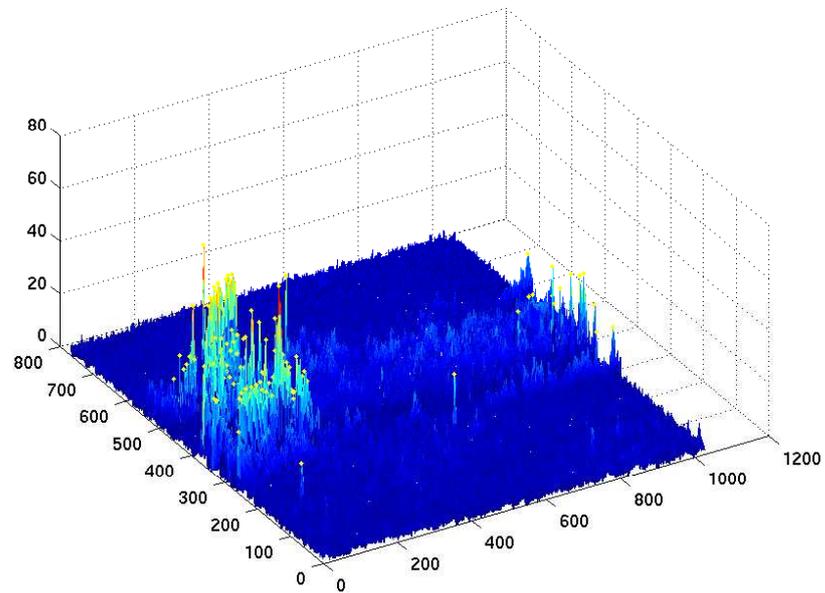


Figura 7.3: Resultado do algoritmo CMO

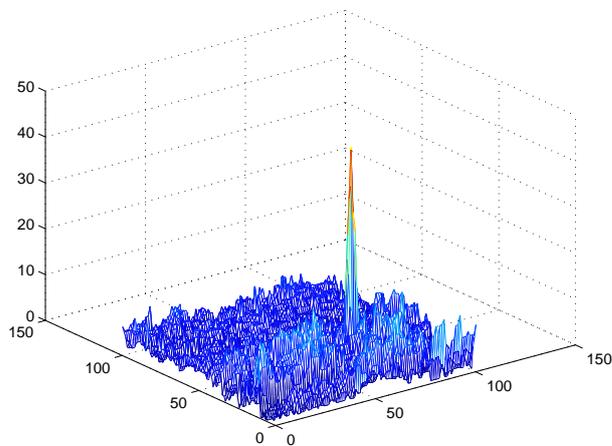


Figura 7.4: Zoom do resultado CMO "mesh" na zona do target

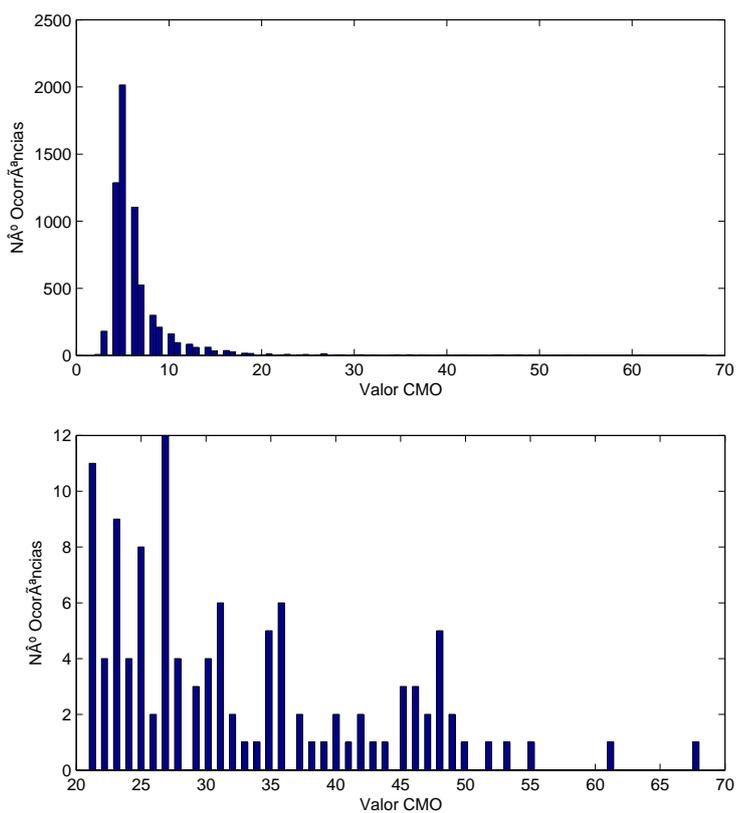


Figura 7.5: Histograma do número de ocorrências de cada intensidade dos máximos locais do resultado do CMO. Cima - Todos os máximos locais, Baixo - Os máximos locais a cima do limiar de aceitação

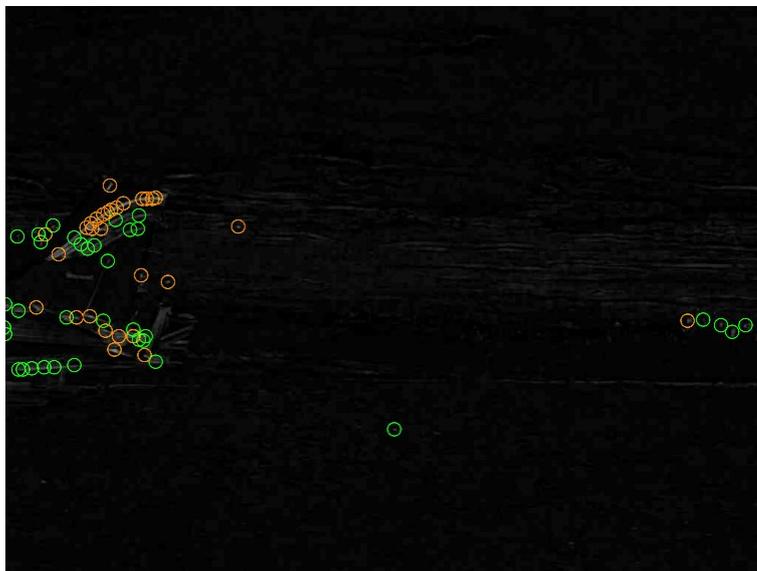


Figura 7.6: Resultado do CMO com sobreposição das features



Figura 7.7: Imagem original com sobreposição das features

7.2 Bloco Ego-Motion

O seguimento de objectos com camaras em movimento é um desafio nos dias de hoje na comunidade científica. O movimento global induzido pela camara em movimento, coloca o *target* fora da area esperada tendo em conta a dinâmica do objecto. A aproximação típica para a resolução deste problema é o uso de um algoritmo para compensar o movimento da camara.

Em situações que envolvam vários objectos em movimento e *backgrounds* afectados pelo problema de abertura, a qualidade da imagem adquirida pode ser muito baixa, diminuindo drasticamente a performance do seguimento de objectos. Neste trabalho é apresentada uma aproximação de compensação de movimento por ego motion com camaras em movimento e onde se envolve objectos em movimento.

Sendo a compensação de movimento na imagem uma das principais contribuições neste trabalho, será feita uma descrição com maior pormenor do funcionamento deste bloco.

Um sistema de referências (mundo "NED" e avião x, y, z) são apresentados inicialmente. O sistema referencial NED é local e plano, cuja origem está na posição inicial do avião. O sistema de coordenadas do avião tem a sua origem no centro de massa do avião, onde o eixo x está sempre alinhado com a longitudinal do avião, o eixo z está direccionado para baixo e o eixo y é ortogonal aos dois anteriores, direccionado para a direita do avião conforme ilustrado na figura 7.8.

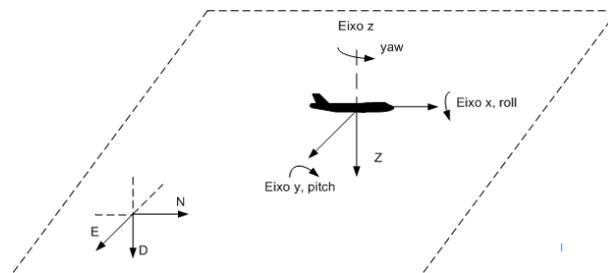


Figura 7.8: Sistema de referências do veículo

Relativamente ao modelo da camara e ao sistema de referências camara-imagem, foi usado um modelo geométrico de projecção normalmente designado por modelo de projecção de perspectiva. Este modelo representado na fig 7.9 é composto pelo plano π designado por plano da imagem e o centro

óptico O .

A distância entre o centro óptico e o plano da imagem designa-se distância focal f . O plano da imagem contém a projecção $2D$ do ambiente.

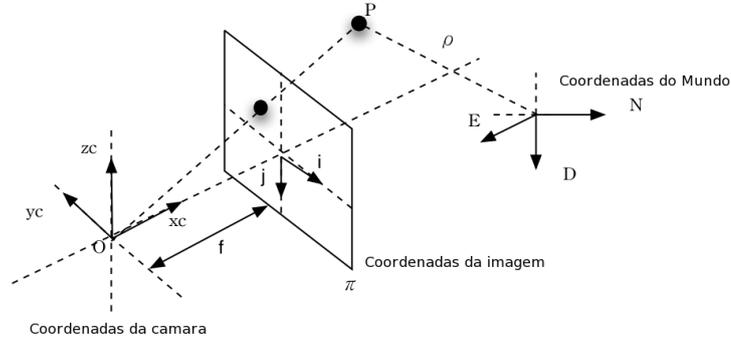


Figura 7.9: Sistemas referenciais da camara e da imagem

Qualquer ponto no espaço $3D$ é projectado na imagem em coordenadas $[i, j]^T$, este ponto encontra-se ao intersectar a linha que une o ponto do espaço com o centro óptico sobre o plano π . Este ponto do espaço com coordenadas do mundo $P_{ned} = [n, e, d]^T$ pode ser transformado em coordenadas da camara $P_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ usando a equação 7.1. Estes dois sistemas podem relacionar-se através de uma matriz de rotação R 3×3 e um vector de translação T 3×1 (equação 7.1). É importante ter em conta que no sistema de representação NED considera-se a altitude sobre o solo com valores negativos decrescentes ou crescentes em módulo. Assim o vector de translação T deve considerar uma mudança de sinal na componente vertical ($D \rightarrow z_c$) quando se transforma de P_{ned} para P_c . As matrizes R e T expressam magnitudes da camara em relação ao mundo.

$$P_c = R_{ned}^{cam} \times P_{ned} + T \quad (7.1)$$

A matriz de rotação R é normalmente expressa usando os ângulos de Euler ou quatriões, combinando a rotação sobre os três eixos, expressas por ϕ, θ, ψ (equação 7.2).

$$R_{ned}^{cam} = R(\phi) \times R(\theta) \times R(\psi) \quad (7.2)$$

Onde as matrizes de rotação individuais são dadas por:

$$\begin{aligned}
 R(\phi) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \\
 R(\theta) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \\
 R(\psi) &= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Ao realizar a multiplicação a matriz resultante é:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \tag{7.4}$$

Sobre o plano da imagem pode definir-se o seu sistema de referências, cuja origem se encontra situada no vértice superior esquerdo. sobre este sistema difinem-se as coordenadas da imagem em pixels (i, j) . A transformação do sistema camara-imagem pode ser feita através dos parâmetros intrinsecos (k) da camara, isto é, a distancia focal f , o centro da imagem (C_i, C_j) , a distorção óptica S definida como o angulo entre os pixels (i, j) e a relação pixel-mm na direcção horizontal e vertical, α_i e α_j , respectivamente.

Seja o ponto P^c em \mathfrak{R}^c no sistema de coordenadas (x_c, y_c, z_c) e o ponto P^{im} em \mathfrak{R}^{im} que representa a projecção na imagem com coordenadas (i, j) . A transformação $\mathfrak{R}^c \rightarrow \mathfrak{R}^{im}$ entre estes dois sistemas vem dada por:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \tag{7.5}$$

considerando os parâmetros intrinsecos anteriormente mencionados obtem-se:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_i & \alpha_i & S \\ C_j & 0 & \alpha_j \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (7.6)$$

Para a obtenção de um ponto na imagem por observação da imagem no instante(x) anterior utiliza-se a seguinte equação:

$$P_x = {}^k R_{ned\ x}^{cam} R_{cam\ x-1}^{ned} k^{-1} P_{x-1} \quad (7.7)$$

sendo :

$R_{ned\ x}^{cam}$ a atitude (roll, pitch, yaw) da camara no instante x .

Capítulo 8

Projecto de Setup Experimental

Conteúdo

| | | |
|-----|-----------------------------------|----|
| 8.1 | Setup Experimental | 55 |
| 8.2 | Projecto Experiências | 57 |
| 8.3 | ”Data-Set” | 58 |
| 8.4 | Experiências Realizadas | 60 |

8.1 Setup Experimental

Nesta secção é explicado o hardware e software utilizado para a realização das experiências de recolha de dados (Data-Set). Na figura 8.1 encontra-se ilustrado os principais componentes de hardware utilizados no decorrer das experiências.



Figura 8.1: Imap iNAV-FMS e Camaras JAI CB-080GE

Uma vez que as dimensões e consumo energético destes componentes não satisfazem os requisitos para os nossos projectos com UAV's, estes compo-

nentes não serão usados para esse fim, contudo para a recolha de dados, para posterior validação dos algoritmos de detecção foi então projectado um sistema com estes componentes. O sistema projectado utiliza um sensor inercial da iMAR com receptor GPS integrado e duas câmaras GigE da marca JAI. O sensor inercial para além de fornecer em tempo real a atitude, permite também registar em simultâneo vários dados, como posição GPS e dados brutos dos acelerómetros e giroscópios. A comunicação com este sensor poderá ser feita através de comunicação Ethernet, possuindo ainda outras interfaces para configuração, bem como sinais de entrada e saída. Para o controlo de “trigger” das camaras foi usado um sinal de saída (PPT) do sensor inercial. Este sinal de saída é sincronizado com o tempo GPS (PPS - Pulso por segundo) e pode ser configurado para a frequência pretendida. Esta frequência será configurada em função do número de imagens por segundo que forem necessárias para a experiência. No decorrer dos testes em laboratório foi verificado que com o aumento do número de frames, eram perdidos alguns pacotes de dados na comunicação ethernet com as câmaras, fazendo com que se perdessem algumas imagens. De forma a que seja possível marcar o tempo inicial e final da aquisição de imagem, foi usado um sinal de entrada do sistema inercial. Esta entrada é controlada por interruptor, que fará a ligação do trigger às camaras e dar o sinal de input para registo dos tempos. Este sistema foi projectado para ser instalado num avião ultraleve, onde seriam instaladas as duas câmaras na asas e o sensor inercial o mais perto possível do centro de gravidade. A figura 8.2 mostra a representação das ligações de hardware.

Para que fosse possível registar as posições do avião a detectar para posterior análise da posição e distância deste no instante da detecção, um segundo receptor GPS de dupla frequência da marca Septentrio com “logger” interno foi utilizado.

Para a aquisição de imagem foi desenvolvido um software em linguagem C++, utilizando a API GENiCAM, sobre a qual são usadas funções de acesso a registos de configuração das camaras, bem como funções de transmissão de imagem. Este software tem a possibilidade de guardar as imagens em formato “raw” ou num formato comprimido, por exemplo “JPG”.

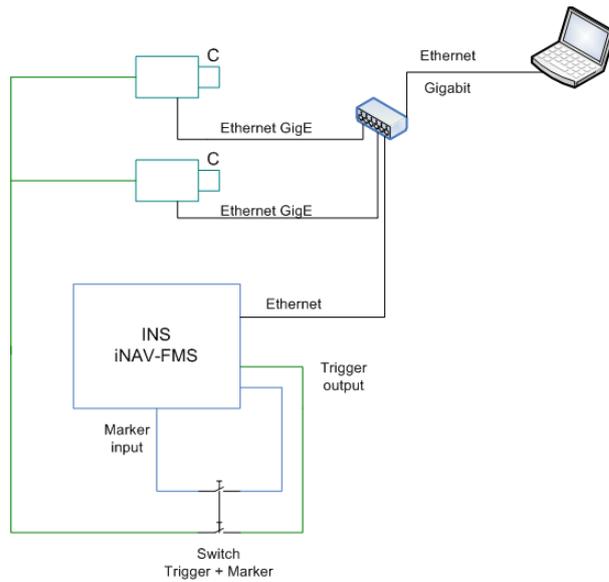


Figura 8.2: Arquitectura de setup

8.2 Projecto Experiências

Um conjunto de experiências foram programadas de forma a serem recolhidos os dados segundo diferentes condições para serem processados à posteriori. As experiências estão divididas em dois conjuntos de testes, estáticos e dinâmicos. Os testes estáticos consistiam em colocar o sistema inercial com as câmaras rigidamente fixas ao mesmo e este conjunto colocado num ponto da pista de aterragem do aeródromo, para assim obter imagens de aproximação do avião segundo diferentes orientações. Estes testes foram projectados para serem feitos segundo diferentes condições de luz e nebulosidade e com diferentes aviões. Perante a possibilidade da utilização de uma aeronave com uma luz frontal, foram planeados testes com esta aeronave de forma a serem obtidas imagens com e sem iluminação. As figuras 8.3 e 8.4 mostram as diferentes orientações do avião em relação ao sistema de detecção.

Um conjunto de trajectórias a diferentes distâncias e altitudes foram programadas, de forma a serem obtidas imagens com diferentes incidências de luz e a diferentes distâncias. Os testes estáticos seriam realizados num primeiro dia com dois aviões diferentes, sendo que para cada trajectória seriam obtidas (a partir de terra) imagens das aproximações do avião, bem como a posição GPS do mesmo.

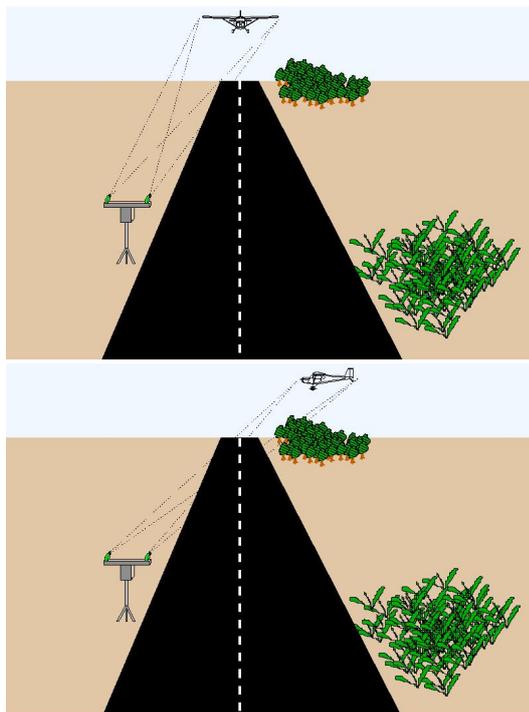


Figura 8.3: Representação das experiências estáticas

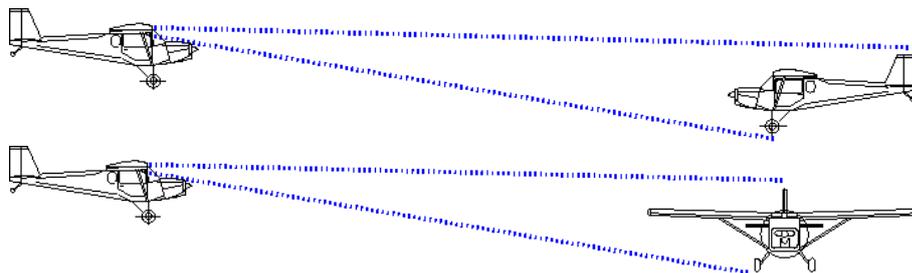


Figura 8.4: Representação das experiências dinâmicas

Para a realização dos testes dinâmicos, foi programada a utilização de dois aviões em simultâneo, sendo o sistema de detecção instalado num dos aviões e o sistema de localização e "logger" GPS no outro avião. Neste teste é possível construir o "Dataset" com dinâmica do avião, para posteriormente integrar a compensação de imagem por "ego-motion".

8.3 "Data-Set"

Para a validação dos algoritmos apresentados foi então criado um conjunto de dados que será disponibilizado à comunidade científica. Com este Dataset foi-nos possível testar diferentes implementações de algoritmos e comparação dos resultados obtidos. O referido Data-set é composto pelos seguintes da-

dos:

- *cam0_x.jpg* e *cam1_x.jpg* - Imagens no formato JPG de cada camera com o número de ordem de aquisição(x).
- *Nav_GPSPos.Asc* - Ficheiro em formato texto com a posição GPS do sistema inercial.
Este ficheiro contém o tempo GPS (s), latitude, longitude, altitude e os desvios padrões dos três últimos.
- *Nav_GPSVel.Asc* - Ficheiro em formato texto com a Velocidade GPS do sistema inercial no referencial ENU - "East, North, Up".
Este ficheiro contém o tempo GPS (s), velocidade no eixo "east", velocidade no eixo "north", velocidade no eixo "up" e os desvios padrões dos três últimos.
- *Nav_IMS.Asc* - Ficheiro em formato texto com o tempo GPS (s), a atitude "roll, pitch, yaw" e as acelerações angulares e velocidades angulares segundo os eixos x,y,z.
- *Nav_Signal.Asc* - Ficheiro em formato texto com o registo dos tempos de início e fim de aquisição das imagens.
Este ficheiro contém o tempo GPS (s) e a indicação do flanco de detecção do sinal, sendo que "+1" indica o início da aquisição e "-1" o fim da aquisição.
- *Nav_UTC.Asc* - Ficheiro em formato texto com o registo dos tempos em formato UTC - "Coordinated Universal Time" e no formato GPS "second-of-day".

No primeiro dia de experiências foram recolhidos 12.460 ficheiros de dados, a um "frame rate" de 5Hz, perfazendo um total de 6.1 GB num conjunto de oito "sets" de dados.

No segundo dia de experiências foram recolhidos 4.602 ficheiros de dados, tendo sido adquiridas as imagens à mesma taxa, perfazendo um total de 2.1GB's.

8.4 Experiências Realizadas

No decorrer deste trabalho, foram realizadas missões de campo para recolha de dados (“datasets”). As missões foram efectuadas nos dias 15 de Outubro e 26 de Novembro deste ano no aeródromo da Maia.

Nestas missões foram utilizadas duas aeronaves tripuladas diferentes (fig:8.5). Estas aeronaves têm algumas características que as distinguem, nomeadamente a cor e o facto de uma delas possuir um sistema de iluminação frontal, tendo sido usadas em missões diferentes e nunca em simultâneo.



Figura 8.5: Avião Cessna e Piper Cub

Ao contrário do que estava programado, não nos foi possível realizar o teste dinâmico no avião, uma vez que era necessário uma autorização especial para a colocação das câmaras nas asas do avião. Assim foram realizados testes estáticos e dinâmicos apenas em terra e não em voo.

Uma lista do equipamento utilizado encontra-se a baixo:

Setup AR

- Receptor GPS Septentrio PolarRx2e.
- Antena GPS dupla Frequência Novatel.
- Bateria 12V NiMh 4600mAh.

Setup Terra :

- Sistema Inercial Imar - iNAV-FMS com GPS integrado
- Duas câmaras GigE JAI CB-080GE 1.3Mpixel com lentes de 16mm.
- Hub switch Gigabit

- Computador portátil
- Bateria 12V LiFePO
- Inversor 12V - 220V, 1000W

As duas aeronaves levaram a bordo um sistema de localização GPS de dupla frequência (setup ar), que possui um “logger” interno. Este sistema de localização permitiu registrar todas as posições tomadas pelo avião, para depois ser possível relacionar a posição do avião no instante da detecção por parte do sistema visual.

A figura ?? mostra o equipamento montado e instalado ao lado da pista do aeródromo.



Figura 8.6: Setup Terra

Relativamente ao “setup terra“, as duas câmaras foram fixas ao sistema inercial, sendo alinhadas por um sistema mecânico do tipo “bosch“.Para guardar os dados, foi utilizado um portátil convencional com sistema operativo linux, onde era executado o software de aquisição de imagem e o software de configuração e controlo do sistema inercial.

No primeiro dia de experiências foi utilizado o avião Piper Cub para realizar aproximações à pista segundo diferentes orientações, altitudes e distâncias, conforme testes planeados. Neste setup foram usadas lentes com uma abertura de 60 graus, o que se veio a verificar excessivo, uma vez que a detecção só funcionaria para curtas distâncias, pois perdia-se profundidade de visão. Neste dia de teste foram então recolhidos dados estáticos e dinâmicos, sendo o sistema de visão perturbado à mão no sentido de movimento do avião. Assim por análise da atitude do sistema inercial é possível compensar na imagem a posição do avião.



Figura 8.7: Imagem da pista tirada do avião

No segundo dia de experiências foi utilizado o avião cessna para o mesmo tipo de aproximações, mas com a particularidade de o fazer com a luz frontal ligada ou desligada. Este teste com a luz frontal tinha o intuito de percebermos através do algoritmo se a detecção pode ser feita a uma distância maior. Por outro lado segundo determinadas condições de luz, poderá ser útil perceber a aproximação de aviões com luzes sinalizadoras. Neste conjunto de experiências foram utilizadas lentes com uma abertura de apenas 10° , aumentando assim a profundidade na visão e tornando mais difícil o alinhamento do sistema com o avião. Foram igualmente realizados testes dinâmicos movendo o sistema inercial à mão em terra.



Figura 8.8: trajetória efectuada pelo avião

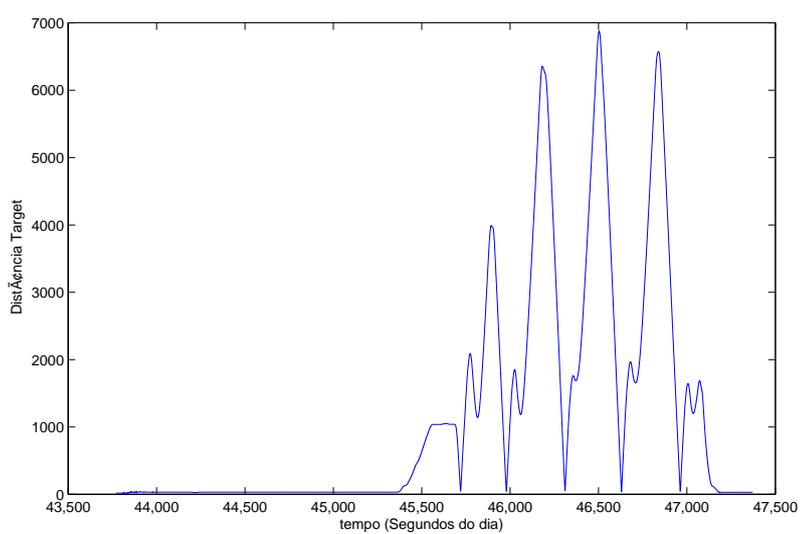


Figura 8.9: Distância do avião no tempo

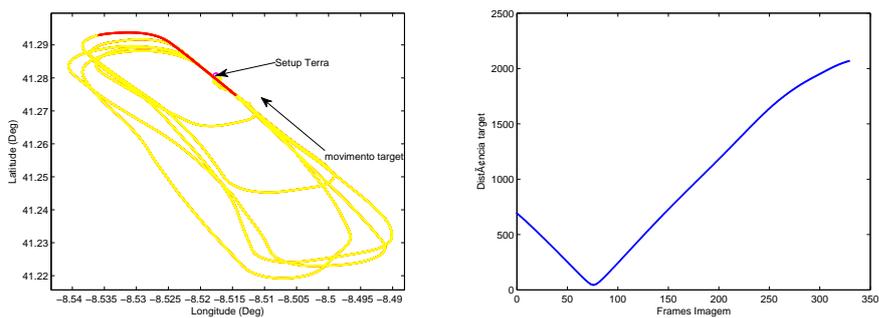


Figura 8.10: Trajectory 1 of the aircraft and distance of the aircraft versus frames acquired

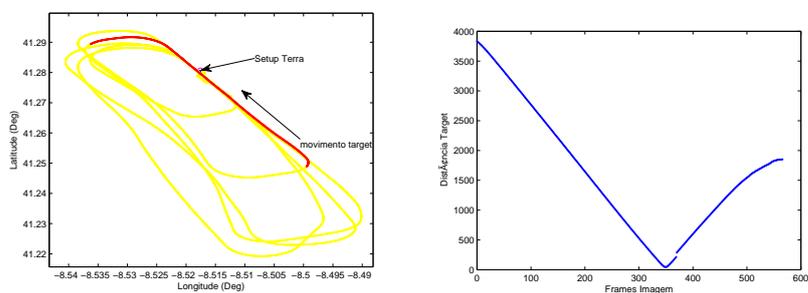


Figura 8.11: Trajectory 2 of the aircraft and distance of the aircraft versus frames acquired

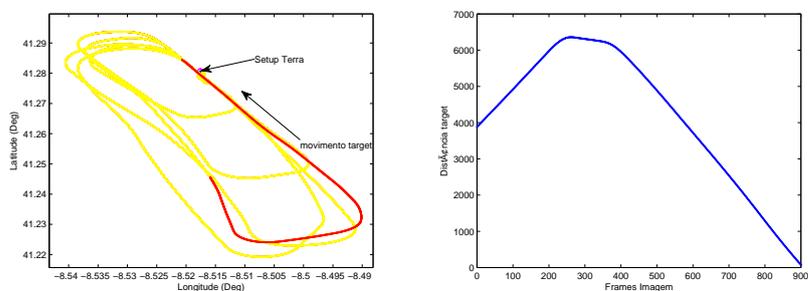


Figura 8.12: Trajectory 3 of the aircraft and distance of the aircraft versus frames acquired

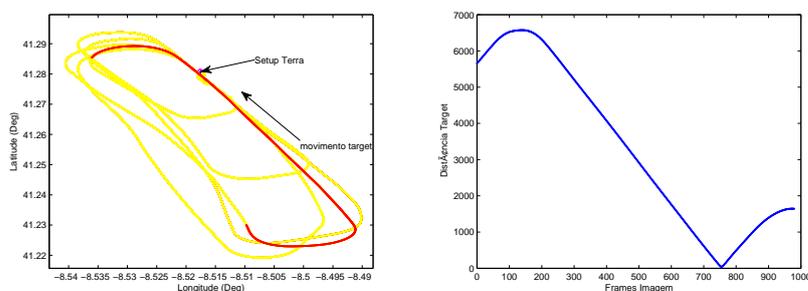


Figura 8.13: Trajectory 5 of the aircraft and distance of the aircraft versus frames acquired

Capítulo 9

Resultados

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados da aplicação de um protótipo do sistema de percepção para S&A ao Dataset obtido nas experiências de campo.

Os conjuntos de figuras seguintes será analisada uma das trajectórias de aproximação da aeronave (trajectoria 2).

As 8 figuras seguintes (9.2,??,9.3,9.4,9.5,9.6,9.7,9.8) representam o resultado das imagens processadas para diferentes pontos da trajectória igualmente espaçados no tempo. Podendo em cada figura observar-se a imagem original com as possíveis features sobrepostas e um detalhe do resultado do detector de CMO em torno do target (avião). De notar que em cada imagem está representada a distância a que se encontrava o avião. Desta sequência pode verificar-se que o nível de intensidade associado ao máximo local do target no CMO aumenta com a diminuição da distância assim como o volume associado ao resultado do CMO em torno do target.

A parte do dataset correspondente a essa trajectória é constituída por 556 frames (correspondendo a 486 MB), mas vamos focar a análise nas 300 primeiras frames de imagem da cada câmara, associadas a uma gama de distâncias entre 500m e 3800m.

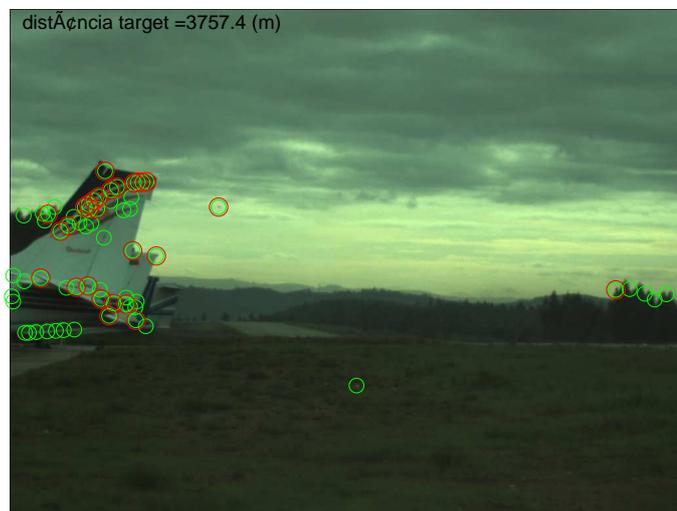
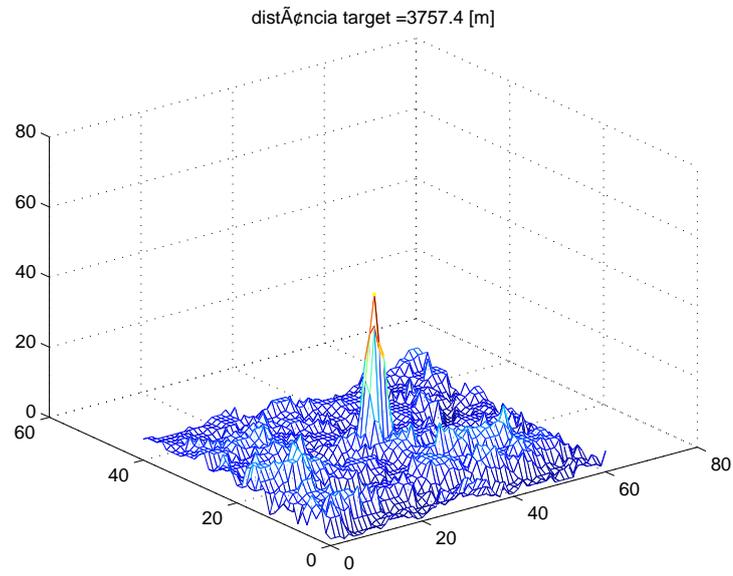


Figura 9.1: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 3757.4m.

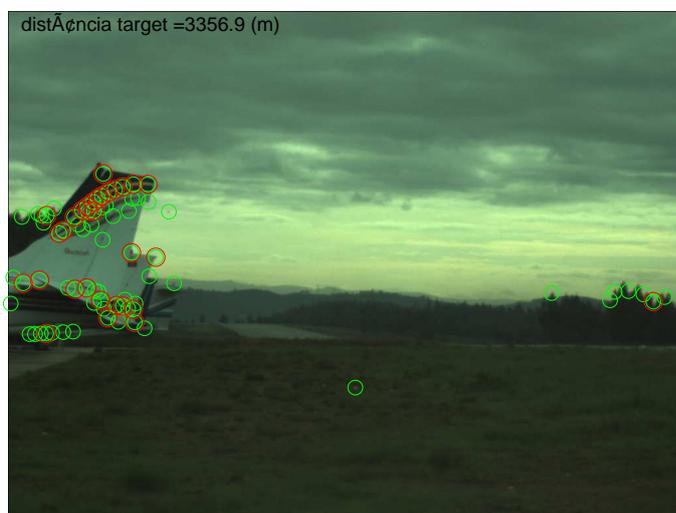
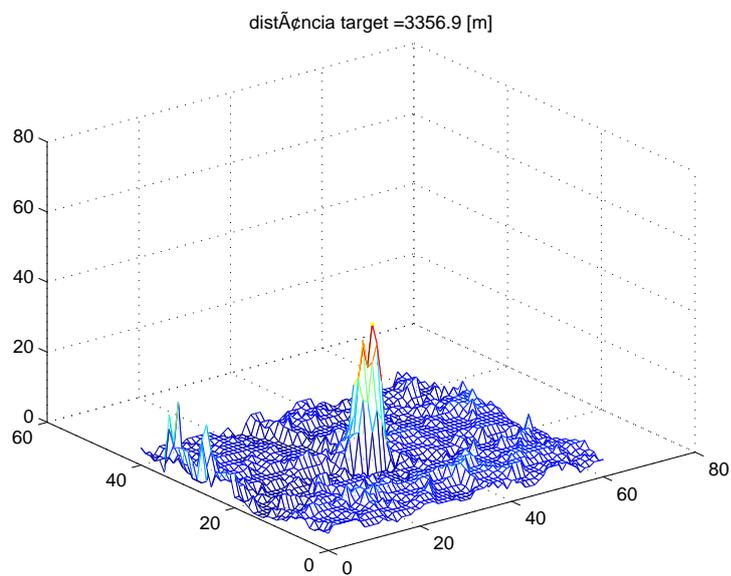


Figura 9.2: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 3356.9m.

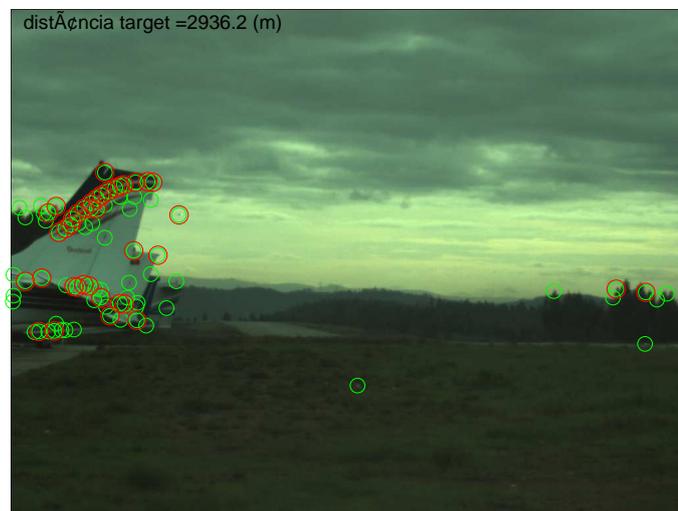
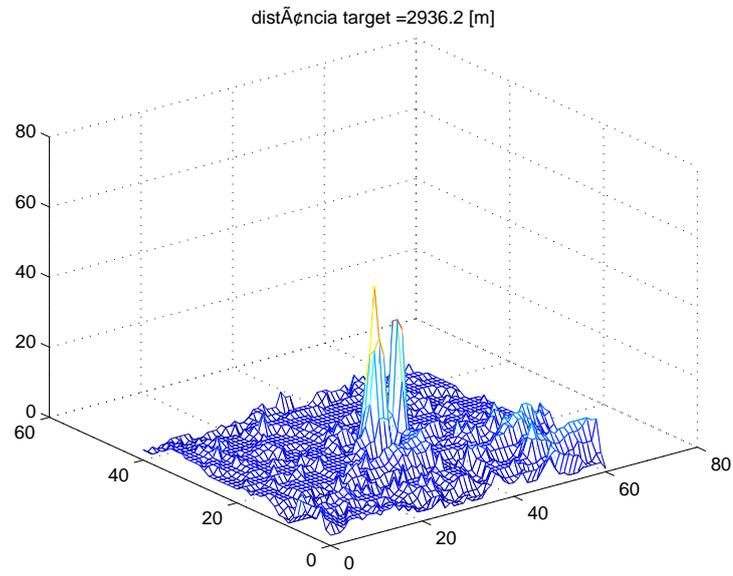


Figura 9.3: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 2936.2m.

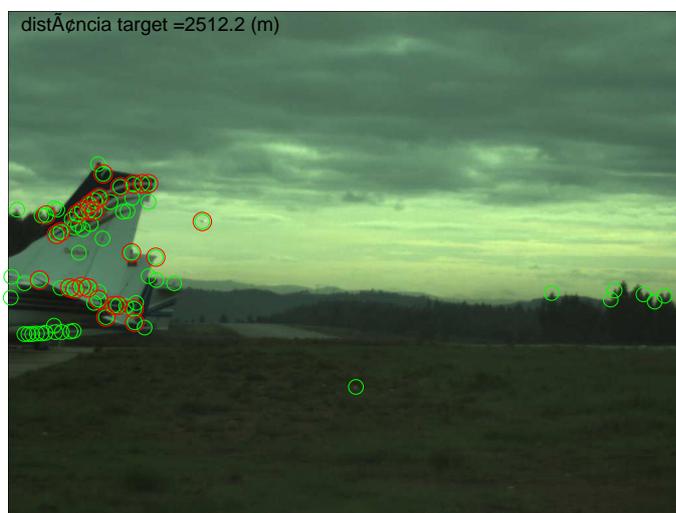
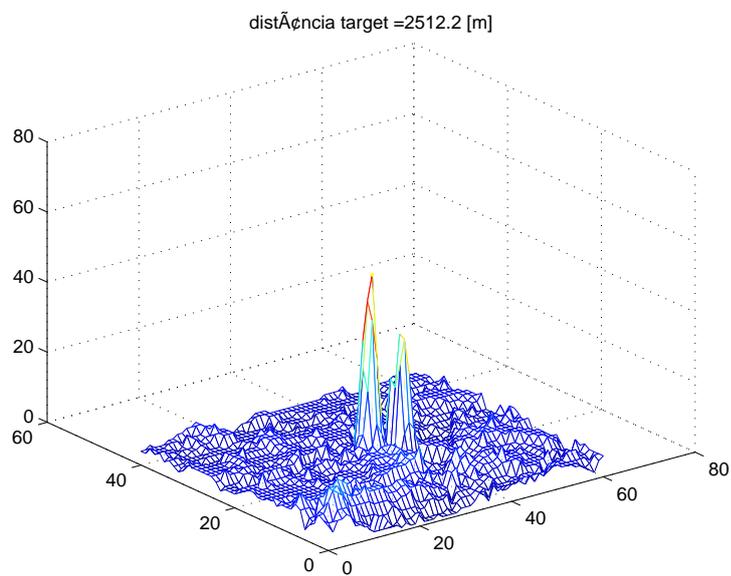


Figura 9.4: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 2512.2m.

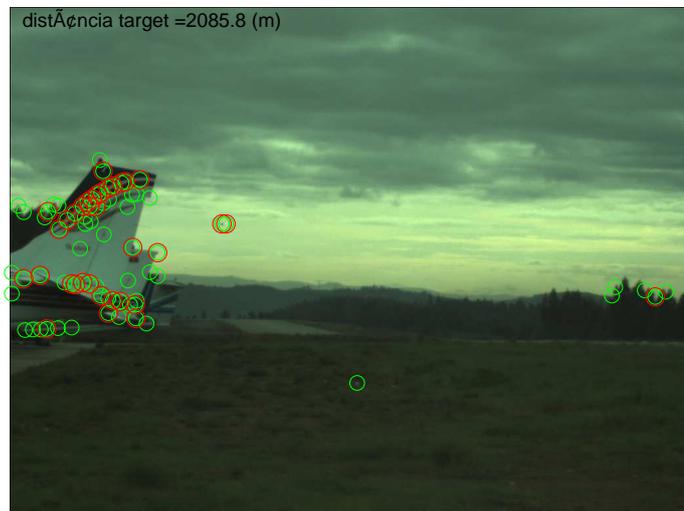
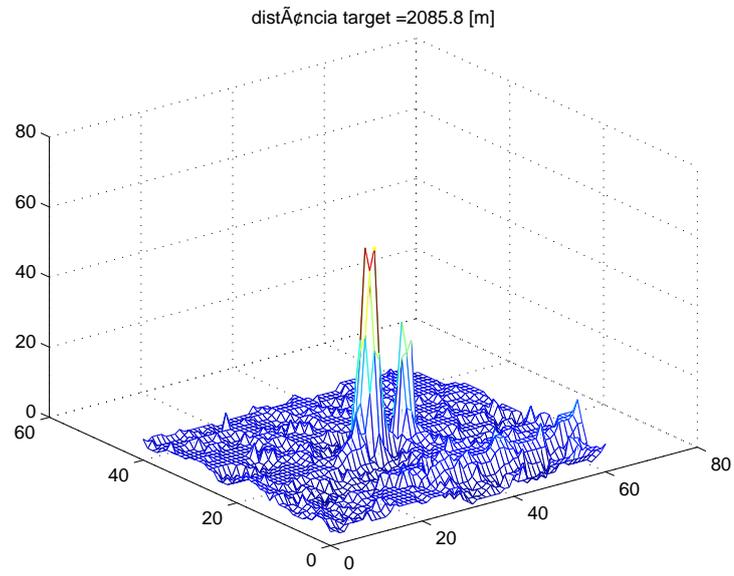


Figura 9.5: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 2085.8m.

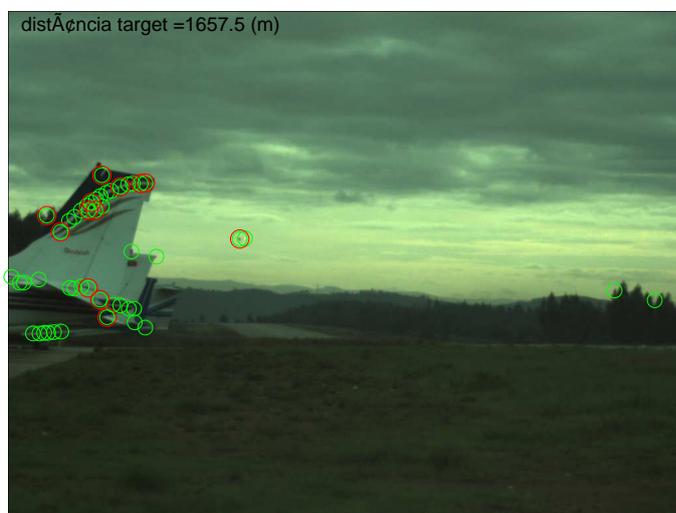
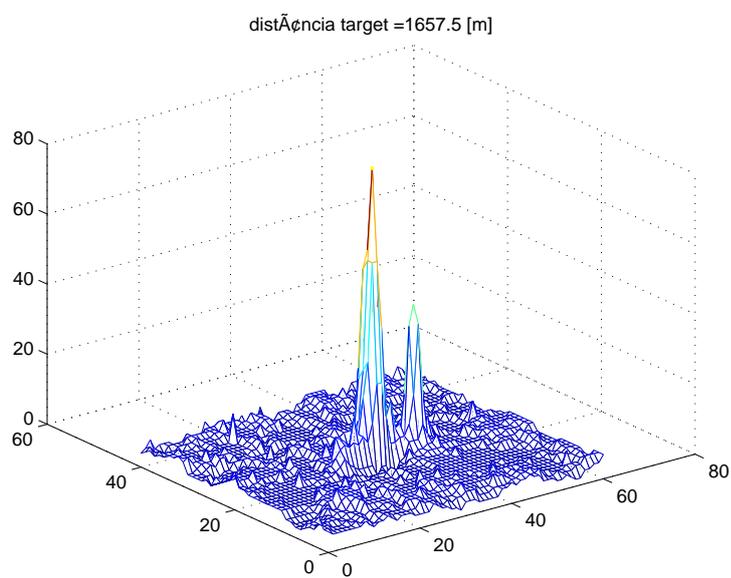


Figura 9.6: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 1657.5m.

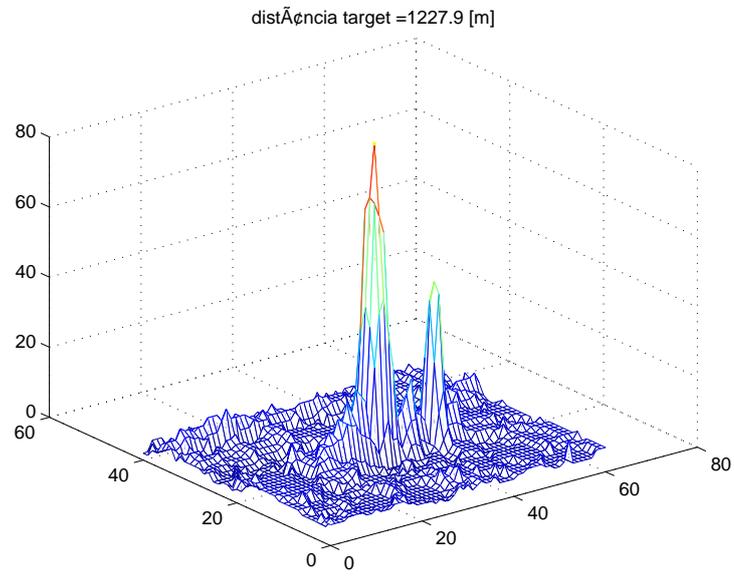


Figura 9.7: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 1227.9m.

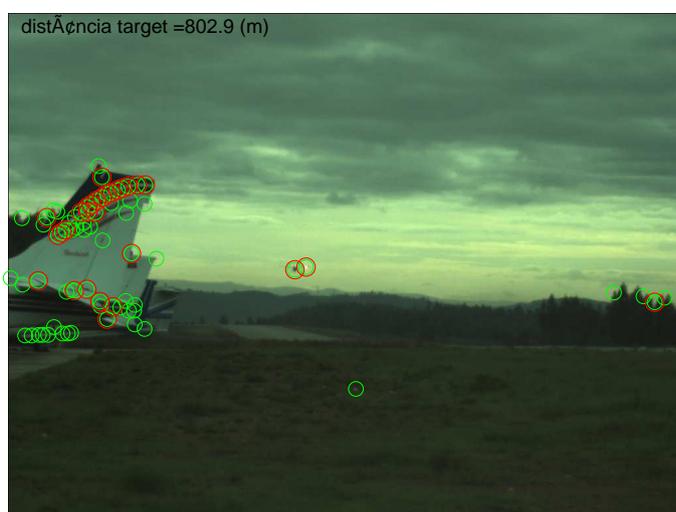
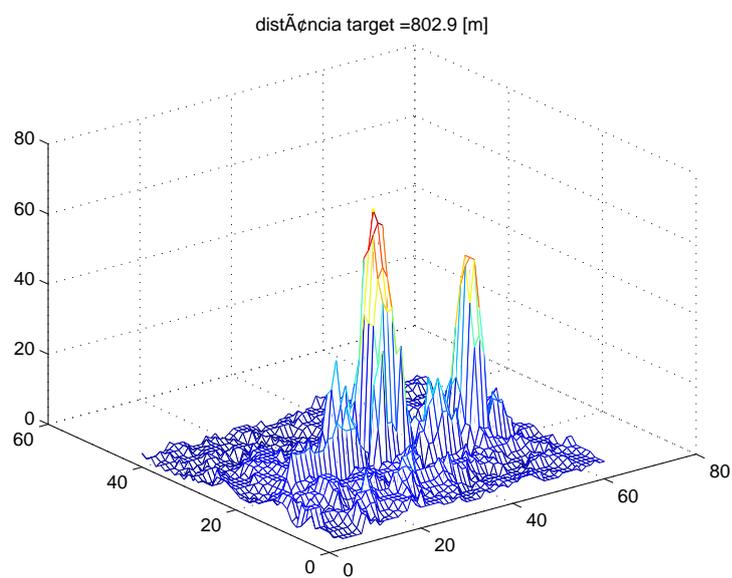


Figura 9.8: Imagem original com possíveis “features” e detalhe em torno do “target” para uma distância de 802.9m.

Nas figuras 9.9 e 9.10, pode ver-se respectivamente a evolução do valor máximo do CMO e do volume definido pela superfície da CMO correspondente ao target, para as 300 frames. Nestes gráficos os picos para distância elevadas, são devidos a frames de imagens corrompidas.

Pode ainda verificar-se que o comportamento aproximadamente linear no gráfico da intensidade do máximo local, deixa de verificar-se para distâncias inferiores a 1000m. Isto deve-se ao facto de para distâncias relativamente reduzidas o target ocupa uma área na imagem significativa e origina vários mínimos locais mas com menor intensidade no resultado do CMO. No entanto, apesar disso o volume do CMO correspondente ao target mantém o seu comportamento aproximadamente cúbico.

O número de pontos de interesse em cada frame pode ser observado no gráfico 9.11 e em mais detalhe em 9.12. Verifica-se que á excepção de algumas frames iniciais que estavam corrompidas, o número de pontos de interesse raramente ultrapassa os 80 pontos para o limiar de aceitação 1 (Threshold1) e os 40 pontos de interesse para o limiar de aceitação 2. Estas quantidades de pontos são facilmente processadas na parte de filtragem, descartando os pontos não consistentes nas sequências de imagem.

Na tabela 9.1, caracteriza-se a fiabilidade com que se detectou correctamente o target pretendido, classificando o resultado do processamento de cada frame em: Imagem inválida (caso a zona da imagem onde está o target esteja totalmente corrompida devido a problemas no driver de software das câmaras GigE utilizadas), não detectado (caso o target não tenha sido detectado com ambos os limiares de aceitação de máximos locais), Detectadas Threshold1 (caso tenha sido validado pelo limiar de aceitação mais relaxado), Detectadas Threshold2 (caso tenha sido validado pelo limiar de aceitação mais apertado). Podemos constatar que mesmo com o limiar de aceitação mais apertado (e originando menos de 40 pontos de interesse) o target foi detectado em 100% das frames para distâncias inferiores a 3Km, e em 50% das frames para distâncias entre os 3 e 4Km. Já no caso de se considerar o limiar de aceitação mais relaxado, e não considerando as frames corrompidas devido a problemas de aquisição das imagens por GigE, o target é detectado em cerca de 95% das frames no intervalo de distâncias

dos 3 a 4Km.

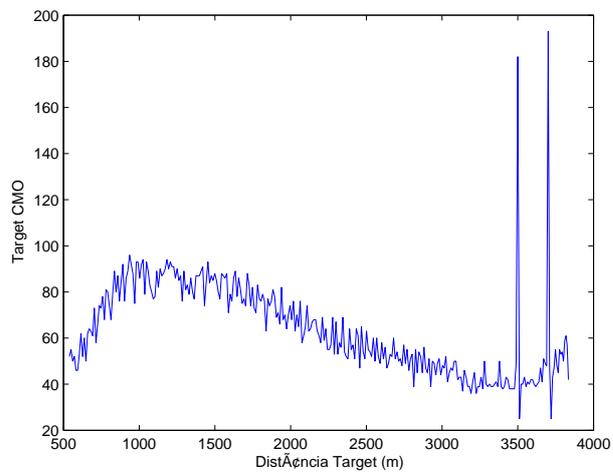


Figura 9.9: Máximo local do "target".

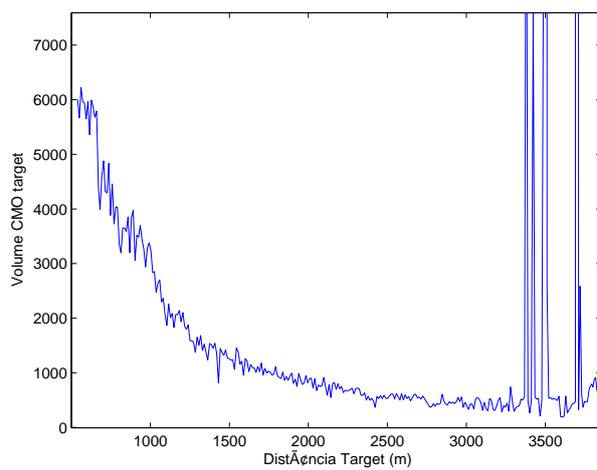


Figura 9.10: Volume associado ao "target".

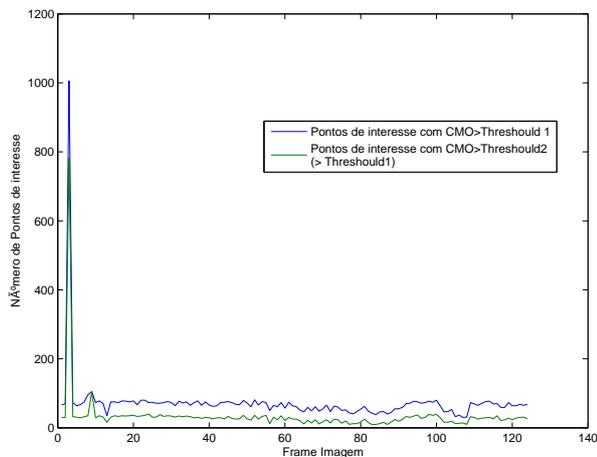


Figura 9.11: Número de pontos de interesse em cada "frame".

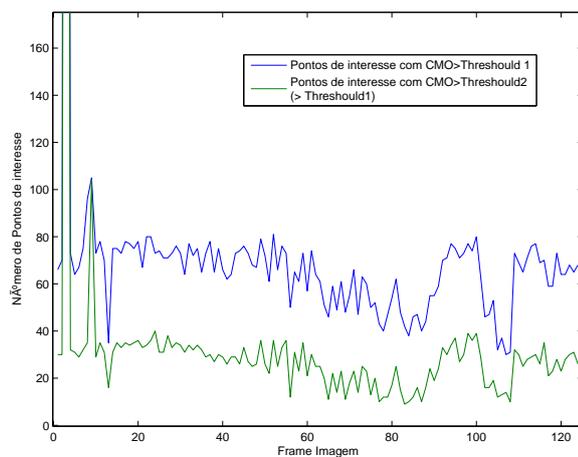


Figura 9.12: Número de pontos de interesse com "zoom".

Tabela 9.1: Tabela de estatística de resultados de detecção

| Distância (m) | Imagens Inválidas | Não detectadas | Detectadas Threshold 1 | Detectadas Threshold 2 |
|---------------|-------------------|----------------|------------------------|------------------------|
| ≥ 3500 | 12,5% | 0% | 37,5% | 50% |
| ≥ 3000 | 5,55% | 5,55% | 41,6% | 47,22% |
| ≥ 2500 | 0% | 0% | 0% | 100% |
| ≥ 2000 | 0% | 0% | 0% | 100% |
| ≥ 1500 | 0% | 0% | 0% | 100% |
| ≥ 1000 | 0% | 0% | 0% | 100% |
| ≥ 500 | 0% | 0% | 0% | 100% |

Capítulo 10

Conclusões

Esta dissertação aborda o problema de detecção e desvio de obstáculos (“SAA- Sense And Avoid”) em movimento para veículos aéreos. Em particular apresenta contribuições tendo em vista a obtenção de soluções para permitir a utilização de aeronaves não tripuladas em espaço aéreo não segregado e para aplicações civis.

Estas contribuições caracterizam-se por: uma análise do problema de SAA em UAVs civis; a definição do conceito e metodologia para o projecto deste tipo de sistemas; uma proposta de “*benchmarking*” para o sistema SAA caracterizando um conjunto de “*datasets*” adequados para a validação de métodos de detecção; respectiva validação experimental do processo e obtenção de “*datasets*”; a análise do estado da arte para a detecção de “*Dim point features*”; o projecto de uma arquitectura para uma solução de SAA incorporando a integração de compensação de *ego motion* e respectiva validação para um “dataset” recolhido.

O problema de SAA é analisado sob a perspectiva da utilização de UAVs civis quer na definição de requisitos impostos por estes sistemas para implementação a bordo quer pela análise dos cenários operacionais envolvendo a interacção com outras aeronaves. Neste contexto é relevante a análise de regras de voo visual, espaços de operação bem como as restrições impostas pelos UAVs em termos de peso, espaço e energia.

É apresentado um cenário de aplicação exemplo (“case study”) focando a detecção precoce de fogos florestais. Esta aplicação enquadra um conjunto de outros cenários operacionais envolvendo tarefas de monitorização e de-

tecção remota com veículos robóticos aéreos. Para este cenário é apresentada uma proposta de solução (sistema GRIFO) envolvendo múltiplos veículos aéreos não tripulados. Esta estende o conceito tradicional de aeronave não tripulada (UAV) para o de veículo autónomo aéreo (VAA) centrando-se na autonomia de decisão e do sistema global. O sistema incorpora múltiplas aeronaves com elevado nível de autonomia (envolvendo aterragem e descolagem autónoma) onde o problema de SAA se torna de extrema importância.

A abordagem quanto à concepção e definição do conceito de veículo aéreo autónomo é apresentada permitindo enquadrar os sistemas de percepção sensorial. Em particular é também introduzido o veículo aéreo autónomo FALCOS bem como alguns dos protótipos implementados. Este veículo permite definir requisitos tendo em vista o projecto do sistema de detecção bem como enquadrar os diversos passos a efectuar no seu desenvolvimento. Os requisitos particulares de fortes restrições de peso/dimensões a nível físico, consumo energético reduzido e desempenho em tempo real (por forma a permitir sinalização e actuação preventiva atempada em voo) são determinantes para os veículos aéreos não tripulados em questão. A análise dos diferentes sensores visuais empregues (ou contemplados) impõem também limitações em termos de resolução e framerate requerendo a utilização de algoritmos de detecção de "*dim point features*". De igual modo o poder computacional existente a bordo bem como as soluções de navegação utilizadas (e em particular o sistema INS) levam ao projecto de um sistema SAA capaz de ter implementação embebida e utilizar informação disponível do movimento próprio da aeronave (*ego motion*).

Uma análise ao estado da arte de algoritmos de detecção permitiu apontar métodos de análise morfológica e em particular filtragem CMO ("close minus open") como um método promissor para implementação embebida.

Tendo em vista a análise comparativa de diferentes métodos bem como a validação de soluções foi proposta a recolha de um conjunto de "datasets" de informação sensorial e de navegação. Para os mesmos foram definidas um conjunto de experiências e cenários experimentais.

Foi projectado e implementado um setup experimental para a recolha dos "datasets" e realizadas experiências de recolha recorrendo a aeronaves tripu-

ladas. O setup desenvolvido incorpora um sistema inercial de alta precisão, duas câmaras digitais sincronizadas (possibilitando análise de informação stereo) e um receptor GPS. Corresponde ao dispositivo de recolha de imagens e log de informação para o veículo que efectua a detecção. Embora não adequado para a implementação nos VAA permite a sua utilização com aeronaves tripuladas fornecendo dados de referência (em particular no que diz respeito a informação de *ego motion*). As aeronaves alvo transportam um receptor GPS com logger incorporado permitindo a correlação espacial dos resultados de detecção.

Com este sistema foram recolhidos dados referentes a cenários de aproximação com diferentes trajectórias e condições ambientais bem como incorporando movimento do dispositivo detector.

O método proposto foi validado para os datasets recolhidos tendo-se verificado, numa análise preliminar, a detecção do obstáculo (avião ultraleve) em todas as frames para uma distância inferior a 3km com taxas de sucesso na ordem dos 95% para distâncias entre os 3 e os 4km.

Os resultados apresentados permitem validar a arquitectura proposta para a solução do problema de SAA em veículos aéreos autónomos e abrem perspectivas muito promissoras para desenvolvimento futuro com forte impacto técnico-científico bem como sócio-económico. A incorporação de informação de ego motion permite fornecer um forte incremento em termos de desempenho.

O trabalho apresentado encontra-se ainda numa fase inicial perspectivando-se inúmeros desenvolvimentos em trabalho futuro. Entre estes contam-se a realização de mais experiências de recolha de informação para “datasets” bem como a definição detalhada de “benchmarks” para possíveis soluções; a implementação de mais módulos da arquitectura proposta, o projecto e desenvolvimento de implementações paralelizáveis em soluções de hardware embebido bem como a realização de testes, análise e validação extensiva da solução proposta com veículos aéreos não tripulados em cenários operacionais.

Bibliografia

- [1] A. Martins, J. Almeida, C. Almeida, A. Figueiredo, F. Santos, D. Bento, H. Silva, and E. Silva, “Forest fire detection with a small fixed wing autonomous aerial vehicle,” (France), Proc. IAV’07 International Autonomous Vehicles Conference, 2007.
- [2] A. Martins, H. Ferreira, C. Almeida, H. Silva, J. M. Almeida, and E. Silva, “Roaz and roaz ii autonomous surface vehicle design and implementation,” 2007.
- [3] H. Ferreira, C. Almeida, A. Martins, J. Almeida, N. Dias, A. Dias, and E. Silva, “Autonomous bathymetry for risk assessment with roaz robotic surface vehicle,” (Bremen, Alemanha), Maio 2009.
- [4] C. Almeida, H. Ferreira, A. Martins, J. Almeida, T. F. Eduardo Silva Instituto Superior de Engenharia do Porto, R. Santos, and J. C. C. Software, “Collision detection developments on usv roaz ii,” (Cannes, France), Junho 2009.
- [5] L. Lima, J. Almeida, A. Martins, and E. Silva, “Boavista - sensor dedicado de visão artificial baseado em hardware (re)configurável,” (Faro), 2005.
- [6] A. Martins, J. Almeida, A. B. Figueiredo, H. Silva, and E. Silva, “Vision based autonomous surface vehicle and autonomous aerial vehicle relative positioning and cooperation,” (italy), NATO AVT (Advanced Vehicle Technology Panel) Symposium on Platform Innovations and System Integration for Unmanned Air, Land and Sea Vehicles, 2007.
- [7] D. E. Grilley, “Resolution requirements for passive sense and avoid,” Alion Science and Technology, January 2005.

- [8] C.Geyer, S. Singh, and L. Chamberlain, "Avoiding collisions between aircraft: State of the art and requirements for uavs operating in civilian airspace," CMU Technical Report, January 2008.
- [9] R. Carnie, R. Walker, , and P. Corke, "Image processing algorithms for uav sense and avoid," ICRA, May 2006.
- [10] "Developing sense and avoid for all classes of uas," Defense Reseach Agency, 2006.
- [11] F. A. Administration, "Remotely operated aircraft, chapter 12, section 9," Special Military Operations. Washington D.C., USA, US Government Printing Office, 2006.
- [12] N. N. A. Group, "Sense and avoid requirements for unmmanned aerial vehicle systems operating in non-segregated airspace," NATO, 2008.
- [13] M. Skolnik, "Opportunities in radar-2002," in *Electronics and Communication Engineering Journal*, vol. 14, 2002.
- [14] S. Scherer, S. Singh, L. J. Chamberlain, and M. Elgersma, "Flying fast and low among obstacles: Methodology and experiments," in *he International Journal of Robotics Research*, pp. 549,574, may 2008.
- [15] F. Bonin-Font, AlbertoOrtiz, and G. Oliver, "Visual navigation for mobile robots: A survey," in *Journal of Intelligence Robotics Systems Springer*, may 2008.
- [16] S. Hrabar, "Vision based 3d navigation for an autonomous helicopter," U. Southern California Phd Thesis, 2006.
- [17] L. A. Mejias, "Controlo visual de un vehículo aéreo autónomo usando deteccion y seguimiento de características en espacios exteriores," Politechnic de Madrid Phd Thesis, 2006.
- [18] B. Call, R. W. Beard, and C. Taylor, "Obstacle avoidance for unmanned air vehicles using image feature tracking," AIAA Conference on Guidance, Navigation, and Control, Keystone CO, 2006.

- [19] M. Donoser and H. Bischof, "Efficient maximally stable extremal region (mser) tracking," *Computer Vision Pattern Recognition*, 2006.
- [20] D. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," in *International Journal of Computer Vision*, pp. 91–110, 2004.
- [21] T. T. Herbert Bay and L. V. Gool, "Surf: Speeded up robust features," pp. 404,417, 9th European Conference on Computer Vision, Springer LNCS volume 3951, 2006.
- [22] D. L. P. Forssen, "Shape descriptors for maximally stable extremal regions," *International Conference Computer Vision*, 2007., 2007.
- [23] N. N. Andres E. Ortiz, "Color optical flow: A computer vision approach for object detection on uavs," 25th Digital Avionics Systems Conference, 2006 IEEE/AIAA., 2006.
- [24] J. Byrne, M. Cosgrove, and R. Mehra, "Real time stereo based obstacle detection for uav threat avoidance," (Las Vegas), Proceedings of the 2005 Government Microcircuit Applications and Critical Technology (GOMACTech), 2005.
- [25] J. Utt, J. McCalmont, and M. Deschenes, "Development of a sense and avoid system," AIAA Infotech at Aerospace, Sep 2005.
- [26] A. B. Watson, "Uav see and avoid systems: Modeling human visual detection and identification," FAA NASA, 2005.
- [27] G. Fasano, "Multisensor based fully autonomous non-cooperative collision avoidance systemfor uavs," University Naples Phd Thesis, 2005.
- [28] B. Bethke, "Persistent vision based search and tracking using multiple uavs," MIT, Phd thesis, 2007.
- [29] T. Gandhi, M. Yang, R. Kasturi, O. Camps, L. Coraor, , and J.McCandless, "Detection of obstacles in the flight path of an aircraft," in *IEEE Transactions*, vol. 39, pp. 176–191, 2003.
- [30] T. Gandhi, M.-T. Yang, R. Kasturi, L. C. O. Camps, and J. McCandless, "Detection of obstacles in the flight path of an aircraft," in *Aeros-*

- pace and Electronic Systems*, vol. 39, pp. 176–191, IEEE Transactions, 2003.
- [31] D. Casasent and A. Ye, “Detection filters and algorithm fusion for atr,” in *Image Processing*, vol. 6, pp. 114–125, 1997.
- [32] N. Dias, C. Almeida, H. Ferreira, J. Almeida, A. Martins, A. Dias, and E. Silva, “Manoeuvre based mission control system for autonomous surface vehicle,” (Bremen, Alemanha), Maio 2009.
- [33] H. Ferreira, A. Martins, A. Dias, C. Almeida, J. Almeida, and E. Silva, “Roaz autonomous surface vehicle design and implementation,” (Guimarães, Portugal), Abril 2006.
- [34] D. A. Forsyth and J. Ponce, “Computer vision: A modern approach,” Prentice Hall, 2002.
- [35] S. F. Tim Hutchings, Susan Jeffryes, “Architecting uav sense and avoid systems,” Conference on Engineering and Technology on Autonomous Systems, 2007.
- [36] J. A. W.Fife, “Reconfigurable on-board vision processing for small autonomous vehicles,” No. 80141, 2007.

Appendices

ANEXOS

.1 Equações de movimento

As equações de movimento incluem a derivação das respectivas equações no que diz respeito ao referencial fixo que está ligado ao avião, bem como a posição e orientação do avião em relação a um referencial inercial fixo “Terra”.

O primeiro passo para a modelização dinâmica de um avião é considerá-la como um corpo rígido com seis graus de liberdade (DOF), seguido pela aplicação das leis de Newton para o corpo rígido (avião). Como mencionado anteriormente, um referencial Terra fixo faz análise impraticável uma vez que momentos e produtos de inércia variam com o tempo. Este não é o caso quando é considerado um referencial fixo no avião “body-fixed”, onde os momentos e produtos de inércia são constantes.

A Figura 1 mostra o referencial “body fixed” (referencial de movimento) que é anexado ao avião. O centro C do referencial fixo “body-fixed” C_{xyz} coincide com o centro de gravidade (CG) do avião. O plano C_{xz} coincide com o plano de simetria do avião com os eixos C_x C_z apontando para a frente e para baixo, respectivamente. O eixo C_y é perpendicular ao plano de simetria na direção da asa direita. O referencial “body-fixed” C_{xyz} é um sistema de coordenadas cartesianas normalmente designado por sistema de coordenadas da mão direita.

As componentes de velocidade linear do CG ao longo dos eixos C_x , C_y e C_z são definidos como U , V e W , respectivamente. As componentes de velocidade angular sobre os eixos do referencial “body-fixe” são definidos como P , Q e R , respectivamente.

No entanto, é importante esclarecer que os vectores da velocidade linear e angular do CG do avião são vectores em relação ao referencial inercial Terra, isto é, vectores vistos por um observador estacionário no referencial fixo Terra. Os valores de U , V e W são os componentes instantâneos desse vector em relação ao referencial fixo do avião. O mesmo é válido para as velocidades angulares.

As componentes das forças aerodinâmicas externas ao longo dos eixos

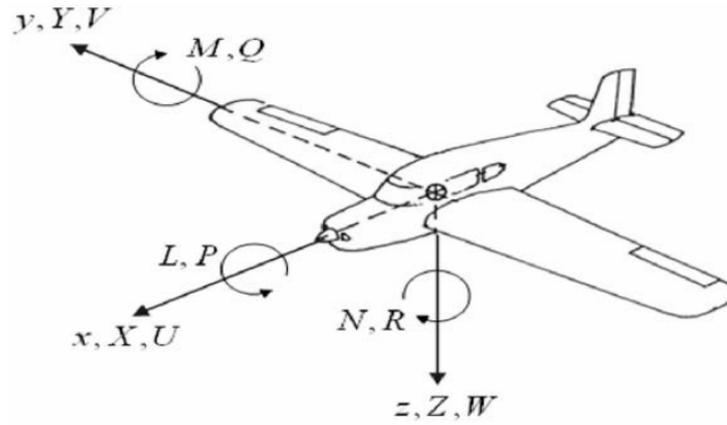


Figura 1: Sistema de coordenadas do avião

são indicados por X , Y e Z . As componentes sobre os eixos dos momentos aerodinâmicos externos são representadas por L , M e N , como mostrado na figura 1. A direção positiva das componentes de velocidade angular e das componentes do momento refere-se ao sentido dos ponteiros do relógio sobre os respectivos eixos. Conceitos básicos de análise cinemática de rotação dos referenciais são utilizados para derivar as equações do movimento. “Uma apresentação mais detalhada pode ser encontrada na [8]”. O primeiro passo é definir um referencial fixo Terra. É um sistema cartesiano de mão direita representado por $O_{x'y'z'}$. O pressuposto subjacente é que a Terra está fixa no espaço, então $O_{x'y'z'}$ é um referencial inercial.

Como ilustrado na Figura 2, $\vec{R}0$ é o vector posição da origem C em relação ao referencial fixo Terra. O conjunto dos vectores unitários para o referencial fixo do avião é representado por $\hat{I}, \hat{J}, \hat{K}$. O ponto P é a posição no espaço de um elemento de massa dm do avião. O ponto P é rigidamente anexado ao referencial fixo do avião. O vector posição do ponto P relativo ao referencial fixo do avião é indicado por r . Se as coordenadas de P em relação ao referencial fixo do avião são (x, y, z) , então:

$$\vec{r} = x\hat{I} + y\hat{J} + z\hat{K} \quad (1)$$

Se $\vec{R}(t)$ representa o vector de posição do elemento massa dm relativamente ao referencial fixo Terra, então:

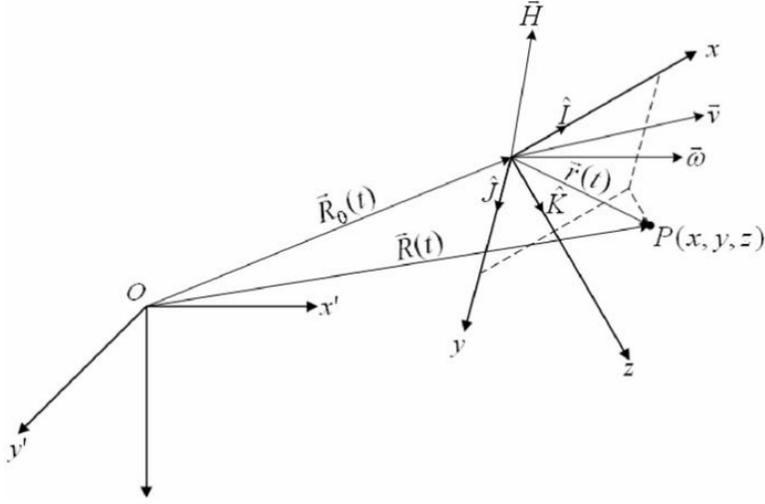


Figura 2: Movimento da aeronave em relação à terra

$$\vec{R} = R_0 + \vec{r} \quad (2)$$

A velocidade do elemento de massa no ponto P relativamente ao referencial terra (E) é dada por:

$$\vec{V}_p = \frac{d\vec{R}}{dt}|_E = \frac{d\vec{R}_0}{dt}|_E + \frac{d\vec{r}}{dt}|_E \quad (3)$$

Onde $\frac{d(\circ)}{dt}|_E$ representa a derivada no tempo de um vector no espaço em relação ao referencial fixo terra, como se este fosse visto por um observador no referencial terra. A derivada do vector posição \vec{R}_0 , em relação ao referencial fixo terra é igual a velocidade do CG. A velocidade linear de CG do avião é medida com relação ao referencial fixo terra. Uma vez que os componentes da velocidade linear ao longo dos eixos do referencial do avião são U, V, W , segue-se que: \hat{U}

$$\vec{v} = \frac{d\vec{R}_0}{dt}|_E = U\hat{I} + V\hat{J} + W\hat{K} \quad (4)$$

e \hat{v} representa a velocidade instantânea do CG do avião relativamente ao referencial fixo terra. O vector \vec{r} é o vector de posição do referencial de rotação do avião. de acordo com [8], a derivada no tempo de \vec{r} respeitante ao referencial fixo terra é:

$$\frac{d\vec{r}}{dt}|_E = \frac{d\vec{r}}{dt}|_B + \vec{w} \times \vec{r} \quad (5)$$

Onde $\vec{w} = P\hat{I} + Q\hat{J} + R\hat{K}$ representam a velocidade angular no referencial do avião, em relação ao referencial fixo terra. O operador (\times) é o vector produto externo. O termo $\frac{d\vec{r}}{dt}|_B$ representa a derivada no tempo do vector de posição $\vec{r}(t)$ em relação ao referencial do avião. De um modo geral, $\frac{d(\circ)}{dt}|_B$ representa a derivada de um vector do ponto de vista de um observador no referencial do observador. Uma vez que o ponto P está rigidamente ligado ao referencial do avião, segue-se que $\frac{d\vec{r}}{dt}|_B = \vec{0}$. Assim, a velocidade do elemento arbitrário massa do avião colocado no ponto P é dada por:

$$\vec{v}_p = \frac{d\vec{R}_0(t)}{dt}|_E + \vec{w} \times \vec{r}(t) \quad (6)$$

Se u_{P_x} , u_{P_y} e u_{P_z} forem as componentes de velocidade do elemento massa dm ao longo dos eixos do referencial do avião, equacionando ambos os lados da equação 6 obtém-se:

$$\begin{aligned} u_{P_x} &= U + Qz - Ry \\ u_{P_y} &= V + Rx - Pz \\ u_{P_z} &= W + Py - Qx \end{aligned} \quad (7)$$

O vector de aceleração \vec{a} do centro de gravidade do avião é:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}|_E \quad (8)$$

Uma vez que $\vec{v}(t)$ é expresso em relação aos vectores unitários do referencial do avião, e o mesmo está a rodar seguindo a análise apresentada em [3] e [8], o vector de aceleração da gravidade é dado pela seguinte equação.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}|_E = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}|_B + w \times \vec{v}(t) \quad (9)$$

Contudo, $\vec{v} = U\hat{I} + V\hat{J} + W\hat{K}$, então $\frac{d\vec{v}}{dt}|_B = UI + VJ + WK$, sendo $\frac{d\vec{v}}{dt}|_B$ a derivada no tempo da velocidade em relação ao referencial do avião.

O vector \vec{a} é o vector da aceleração instantânea do centro de gravidade do avião em relação ao referencial Terra. Se a_x , a_y e a_z representam as componentes instantâneas do vector \vec{a} ao longo dos eixos do referencial do avião, então da equação 9 se deduzem as seguintes equações algébricas:

$$\begin{aligned} a_x &= \dot{U} - RV + QW \\ a_y &= \dot{V} - PW + RU \\ a_z &= \dot{W} - QU + PV \end{aligned} \quad (10)$$

Se os vectores de todas as forças a actuar no avião forem expressas em função das suas componentes $\sum X$, $\sum Y$ e $\sum Z$ ao longo dos respectivos eixos do referencial do avião, então:

$$\begin{aligned} \sum X &= m(\dot{U} - RV + QW) \\ \sum Y &= m(\dot{V} - PW + RU) \\ \sum Z &= m(\dot{W} - QU + PV) \end{aligned} \quad (11)$$

Para concluir a dedução das equações de movimento, a segunda lei de Newton a aplicada a todos os momentos que actuam no centro de gravidade. Sendo $\vec{H} = h_x\hat{I} + h_y\hat{J} + h_z\hat{K}$ o vector do momento angular do avião expresso no referencial dos vectores unitários do avião. As componentes do momento angular do referencial do avião são expressas como uma função de momentos de inércia e produtos de inércia como:

$$\begin{aligned} hx &= I_{XX}P - I_{XY}Q - I_{XZ}R \\ hy &= -I_{YX}P + I_{YY}Q - I_{YZ}R \\ hz &= -I_{ZX}P + I_{ZY}Q - I_{ZZ}R \end{aligned} \quad (12)$$

Onde $I_{XX} = \sum dm(y^2 + z^2)$, $I_{YY} = \sum dm(x^2 + z^2)$, $I_{ZZ} = \sum dm(x^2 + y^2)$ e os produtos de inércia são $I_{XY} = \sum dmxy = I_{YX}$, $I_{XZ} = \sum dmxz = I_{ZX}$, $I_{YZ} = \sum dmyz = I_{ZY}$. Os somatórios descritos são aplicados a todos os elementos massa do avião, e x , y , z são as distâncias de cada elemento

massa desde a origem (centro de gravidade). Sendo C_{xz} o plano de simetria do avião, segue-se que $I_{XY} = I_{YX} = 0$ e $I_{YZ} = I_{ZY} = 0$.

Os momentos externos igualam à taxa de variação no tempo do momento angular em relação ao referencial terra. Uma vez que o momento angular é descrito pelos vectores unitários do referencial do avião, o seguinte é válido:

$$\frac{d\vec{H}}{dt}|_E = \frac{d\vec{H}}{dt}|_B + \vec{w} \times \vec{H} \quad (13)$$

O termo $\frac{d\vec{H}}{dt}|_E$ é a taxa de variação no tempo do momento angular em relação ao referencial terra. Em relação a $\frac{d\vec{H}}{dt}|_B$, a derivada no tempo do momento angular em relação ao referencial do avião é derivado como:

$$\begin{aligned} \dot{h}_x &= I_{XX}\dot{P} - I_{XZ}\dot{R} \\ \dot{h}_y &= I_{YY}\dot{Q} \\ \dot{h}_z &= -I_{ZX}\dot{P} + I_{ZZ}\dot{R} \end{aligned} \quad (14)$$

Sendo $\sum L$, $\sum M$ e $\sum N$ a representação dos momentos de todas as forças sobre os eixos do referencial do avião, os mesmos podem ser representados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \sum L &= \frac{dH_X}{dt} = I_{XX}\dot{P} + QR(I_{ZZ} - I_{YY}) - I_{XZ}(\dot{R} + PQ) \\ \sum M &= \frac{dH_Y}{dt} = I_{YY}\dot{Q} + PR(I_{XX} - I_{ZZ}) + I_{XZ}(P^2 - Q^2) \\ \sum N &= \frac{dH_Z}{dt} = I_{ZZ}\dot{R} + PQ(I_{YY} - I_{XX}) + I_{XZ}(QR - \dot{P}) \end{aligned} \quad (15)$$

Assim as equações finais de movimento em relação ao referencial terra mas expressas no referencial do avião, são dadas pela equação 11 para as forças e pela equação 15 para os momentos.

.2 Posição e Orientação do Avião

A maior desvantagem de usar um referencial fixo C_{xyz} ligado ao avião, é a impossibilidade de expressar a posição e orientação do avião em relação a este mesmo referencial do avião. A Posição e orientação de corpos rígidos

é definida em relação a referencial inerciais fixos. Assim as equações de posição e orientação do avião são obtidas, relativamente a um referencial genérico fixo terra.

Um sistema rígido cartesiano da mão direita $O_{x'y'z'}$ é inicialmente definido como sendo o referencial fixo terra. A direcção do avião num determinado instante de tempo é descrita pela orientação do referencial do avião em relação ao referencial terra. No instante de tempo $t=0$ o CG do avião coincide com a origem do referencial $O_{x'y'z'}$. A posição inicial do avião é descrita pelo referencial $C_{x_1y_1z_1}$ que está alinhado com $O_{x'y'z'}$. A orientação final do avião no instante t é representado pelo referencial $C_{x_2y_2z_2}$. A figura 3 representa o esquema da variação da orientação do avião.

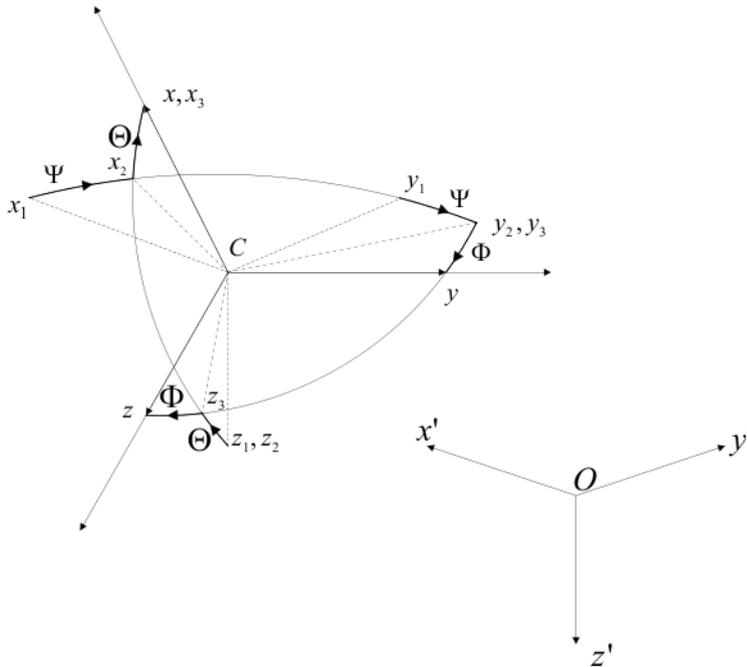


Figura 3: Orientação da aeronave

A orientação do avião em qualquer instante de tempo pode ser obtida executando três rotações consecutivas em relação ao referencial terra. As rotações devem obedecer a uma ordem não podendo ser consideradas vectoriais e tendo em conta que não são comutativas. Assim, a ordem de rotação é importante para a consistência, como podemos ver:

- Uma rotação no sentido contrário aos ponteiros do relógio de um ângulo Ψ sobre o eixo C_{z_1} . Esta rotação move o avião para a posição

descrita por $C_{x_2y_2z_2}$, trazendo C_{x_2} paralelo ao plano C_{xz_2}

- Uma rotação no sentido dos ponteiros do relógio de um ângulo Θ sobre o eixo C_{y_2} . Esta rotação move o avião para a posição descrita por $C_{x_3y_3z_3}$, alinhando os eixos C_{x_3} e C_x .
- Uma rotação no sentido contrário aos ponteiros do relógio de um ângulo Φ sobre o eixo C_{x_1} trazendo os eixos para a sua direcção final C_{xyz} .

.2.1 Posição do avião

A posição do avião pode ser calculada integrando a velocidade em cada instante de tempo. Sejam $\hat{I}, \hat{J}, \hat{K}$ os vectores unitários de C_{xyz} , $\hat{I}', \hat{J}', \hat{K}'$ os vectores unitários de $O_{x'y'z'}$ e $\hat{I}_i, \hat{J}_i, \hat{K}_i$ os vectores unitários dos referenciais $C_{x_iy_iz_i}$, onde $i = 1, 2, 3$. A velocidade linear do avião em relação ao referencial C_{xyz} e ao referencial terra é respectivamente:

$$\hat{v} = U\hat{I} + V\hat{J} + W\hat{K} \quad (16)$$

$$\hat{v} = \frac{dx'}{dt}\hat{I}' + \frac{dy'}{dt}\hat{J}' + \frac{dz'}{dt}\hat{K}' \quad (17)$$

Os vectores unitários do referencial do avião C_{xyz} são representados relativamente ao referencial $C_{x_3y_3z_3}$ como:

$$\begin{aligned} \hat{I} &= \hat{I}_3 \\ \hat{J} &= \cos \Phi \hat{J}_3 + \sin \Phi \hat{K}_3 \\ \hat{K} &= -\sin \Phi \hat{J}_3 + \cos \Phi \hat{K}_3 \end{aligned} \quad (18)$$

Os vectores unitários do referencial $C_{x_3y_3z_3}$ são representados relativamente ao referencial $C_{x_2y_2z_2}$ como:

$$\begin{aligned} \hat{I}_3 &= \cos \Theta \hat{I}_2 - \sin \Theta \hat{K}_2 \\ \hat{J}_3 &= \hat{J}_2 \\ \hat{K}_3 &= -\sin \Theta \hat{I}_2 + \cos \Theta \hat{K}_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Finalmente os vectores unitários do referencial $C_{x_2y_2z_2}$ relativamente ao referencial $C_{x_1y_1z_1}$ são descritos como:

$$\begin{aligned}\hat{I}_2 &= \cos \Psi \hat{I}_1 - \sin \Psi \hat{J}_1 \\ \hat{J}_2 &= -\sin \Psi \hat{I}_1 + \cos \Psi \hat{J}_1 \\ \hat{K}_2 &= \hat{K}_1\end{aligned}\tag{20}$$

Substituindo a equação (18) e a equação (20) e na equação (16) e juntando com a equação (17) as seguintes equações algébricas são obtidas para as componentes da velocidade do avião, relativamente ao referencial terra:

$$\begin{aligned}\frac{dx'}{dt} &= U \cos \Theta \cos \Psi + V(\sin \Phi \sin \Theta \cos \Psi - \cos \Phi \sin \Psi) + W(\cos \Phi \sin \Theta \cos \Psi + \sin \Phi \sin \Psi) \\ \frac{dy'}{dt} &= U \cos \Theta \sin \Psi + v(\sin \Phi \sin \Theta \sin \Psi + \cos \Phi \cos \Psi) + W(\cos \Phi \sin \Theta \sin \Psi + \sin \Phi \cos \Psi) \\ \frac{dz'}{dt} &= -U \sin \Theta + V \sin \Phi \cos \Theta + W \cos \Phi \cos \Theta\end{aligned}\tag{21}$$

Assim, as coordenadas de posição do centro de gravidade do avião são obtidas integrando (21). devido à sua complexidade de integração, as equações (21) são normalmente linearizadas para serem simplificadas.