

Navegação Aérea Autônoma por Imagens

Maurício P. Martins, Felipe L.L. Medeiros, Marcus V. Monteiro, Elcio H. Shiguemori, Leidson C.A. Ferreira,
Marco A. P. Domiciano

CTA - Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial / IEAv - Instituto de Estudos Avançados. Rod dos Tamoios, km 5,5 - Putim - São José dos Campos - SP

Resumo — O objetivo do trabalho é apresentar um sistema de navegação autônoma para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) com estimação de posição obtida por meio de um sistema de visão computacional. O sistema de navegação permite, em tempo real, verificar situações de risco (estas consistem na existência de obstáculos entre a posição do VANT e a coordenada seguinte da rota), bem como, planejar trajetórias mais seguras. No sistema de visão computacional, a estimação da posição do VANT é realizada em tempo real, através do processamento de imagens obtidas por uma câmera e de mosaicos armazenados em bancos de dados geográficos. Resultados promissores foram obtidos utilizando um simulador de voo, imagens aéreas e de satélite.

Palavras-chaves — Navegação autônoma, processamento de imagens, tempo-real.

I. INTRODUÇÃO

Devido ao rápido desenvolvimento da tecnologia militar, principalmente nos países mais ricos, há um desafio à nação brasileira: multiplicar os investimentos em projetos que melhorem a capacidade das Forças Armadas em cumprir o seu papel constitucional. Durante os últimos conflitos, pode-se observar um contínuo aumento do emprego de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) com sistemas de navegação autônoma, por exemplo, aeronaves de reconhecimento. O projeto Processamento de Imagens em Tempo Real (PITER), que está em desenvolvimento no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do CTA, tem por objetivo realizar o estudo sobre navegação aérea autônoma baseada em visão, sem depender de dados GPS por estes serem suscetíveis à interferência ou mesmo bloqueados. Uma das tarefas do PITER é a identificação do local sobrevoado com a finalidade de corrigir o sensor Inercial para melhorar a precisão da navegação. Neste escopo, algumas metodologias para o reconhecimento dos pontos de controle em imagens de satélite a partir de imagens aéreas têm sido realizadas. Entre elas utilização de informações da correlação entre o gradiente e informação mútua, além do uso de informações de textura obtidas pelo filtro de Wavelets/Gabor e redes neurais artificiais [1]-[3]. Testes e simulações foram realizados utilizando imagens de videografias realizadas em São José dos Campos e imagens do satélite Ikonos [3], além de simulações Ikonos-Ikonos. Pesquisas sobre o sistema de navegação também estão sendo realizadas com o objetivo de calcular uma trajetória segura e corrigir a navegação para cumprimento de uma rota pré-planejada.

Várias pesquisas focam o problema de navegação aérea, terrestre e náutica de veículos autônomos baseados em visão [4]-[6]. Quando o enfoque são sistemas de navegação autônoma baseada em visão para Veículos Aéreos Não Tripulados mudanças têm de ser tratadas. O sistema de visão

captura uma grande quantidade de dados que tem que ser processados em tempo real para que a informação relevante seja extraída para alimentar os sistemas de controle e navegação. Essa informação é fundamental para o cumprimento seguro e eficiente de uma missão pré-planejada para o VANT.

O sistema de reconhecimento de pontos de controle para um VANT tem requisitos como: velocidade de processamento, carga útil limitada e variações de pontos de controle devido a fatores como ação do homem, iluminação e condições meteorológicas.

O projeto PITER está em fase de desenvolvimento, sendo simulado numa rede de computadores onde os sistemas de navegação, visão computacional e simulação estão em diferentes máquinas. Testes com imagens de diferentes sensores estão sendo realizados, além de testes reais com imagens obtidas por uma câmera acoplada a um helicóptero em baixo nível de voo sobre a cidade de São José dos Campos, estado de São Paulo, Brasil. Resultados promissores têm sido obtidos mostrando a aplicabilidade do PITER em futuras missões de VANTs.

Um diagrama simplificado do projeto é apresentado na Figura 1. Após o registro entre as imagens geográficas e da câmera, o sistema de visão computacional, com algumas informações do sistema inercial, localiza o local sobrevoado e corrige o sistema inercial, essas informações são passadas ao sistema de navegação autônoma que atua no piloto automático e no VANT.

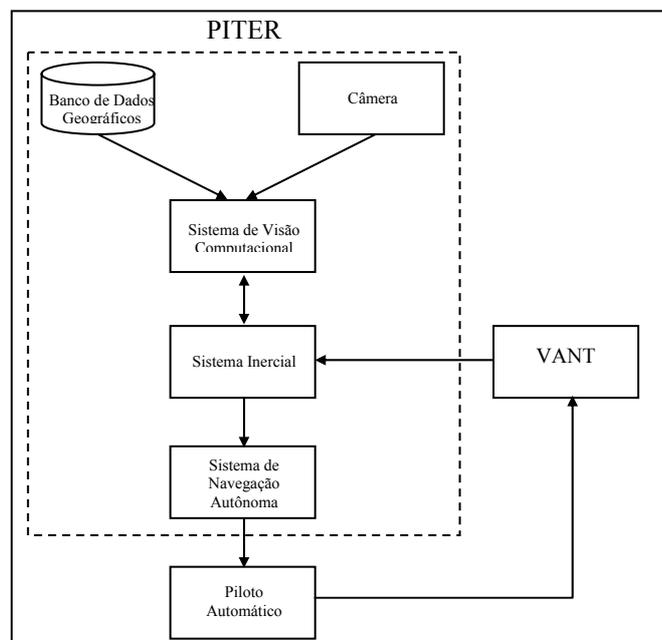


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de navegação por imagens.

Para testes dos sistemas de navegação e visão computacional duas videografias foram realizadas com a condição de céu claro as imagens foram obtidas por uma câmera de vídeo digital, acoplada ao esqui de um helicóptero. As videografias foram realizadas em regiões de área urbana e área rural, sobre marcos significativos.

II. SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

O sistema de navegação autônoma (NAV) do projeto PITER é um sistema computacional de tempo-real que tem por objetivo calcular a trajetória segura de um VANT para atingir determinado objetivo e, durante o voo, gerar informações (ou instruções) para o cumprimento de uma rota pré-planejada [7]. Tem como principais funcionalidades: a representação de obstáculos no ambiente de navegação [8]; o cálculo da trajetória segura [9]; e o replanejamento de trajetórias em voo quando o sistema detecta erros importantes de posicionamento, os quais podem levar a aeronave a colidir com obstáculos. Para a representação de obstáculos, o NAV gera uma grade binária com base na altitude de navegação do VANT e no modelo digital de elevação (DEM) da região a ser sobrevoada. Cada célula da grade corresponde à determinada porção da região. A célula é rotulada de “obstáculo” caso algum ponto coberto por ela tenha altitude igual ou superior à diferença entre a altitude de navegação prevista e certa altura de segurança. Neste trabalho, a altitude de navegação é determinada previamente e considerada constante durante o voo.

A navegação autônoma é realizada por meio do cálculo da instrução de voo do ângulo de proa do VANT. Esta instrução é calculada a partir da rota de navegação, coordenada/posição, ângulo de proa (ângulo formado pelo norte geográfico e o vetor velocidade da aeronave), curso atual (ângulo formado pelo norte geográfico e o segmento de reta delimitado pela coordenada atual do VANT e a próxima coordenada a ser alcançada), curso desejado (ângulo formado pelo norte geográfico e o segmento de reta delimitado pela última coordenada alcançada e a próxima coordenada a ser alcançada) e o rumo do VANT (ângulo formado pelo vetor velocidade no solo e o norte geográfico). A instrução de voo “coordenada atual” e outras duas previamente determinadas, também são utilizadas: a velocidade e a altitude de navegação. Em seguida, as instruções de voo são enviadas para os controladores do piloto automático a fim de que estes atuem nas superfícies de comando do veículo aéreo e que as mudanças de atitude necessárias aconteçam.

O NAV possui um agente de *software* que, a cada instante, verifica se o VANT está em uma situação de risco, isto é, se o VANT está se deslocando para um obstáculo. Caso isso aconteça, uma trajetória mais segura é calculada e novas instruções são enviadas aos controladores.

III. SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL

Uma das tarefas do projeto é pesquisar metodologias de correção de posicionamento de sensores inerciais através do reconhecimento do local sobrevoado pelo VANT, captado por câmeras embarcadas. O objetivo é apresentar um sistema capaz de reconhecer pontos de controle no solo, em imagens de satélite [6] georreferenciadas [3], a partir de quadros de vídeo gerados em voo de helicóptero sobre a mesma região. Uma vez reconhecidas as feições, as suas coordenadas

geográficas são inseridas no “sensor inercial” para a correção do mesmo, permitindo a realização precisa da navegação.

O foco na realimentação do sistema por imagens é o co-registro de imagens pancromáticas Ikonos georreferenciadas e quadros de vídeo obtidos de uma câmera apontada verticalmente para o solo, embarcada em um helicóptero. A partir desta informação de registro é possível determinar a posição da câmera no instante da captura do quadro de vídeo, permitindo obter a posição aproximada do helicóptero.

Em todo processo de registro de imagem as medidas de similaridade (MS) servem como parâmetro de qualidade do registro. As medidas de similaridade mencionadas em [10][11] foram testadas para registrar as imagens deste estudo, no entanto melhores resultados foram obtidos utilizando Gradiente Conjugado (GC), Informação Mútua (IM) e Combinação das duas técnicas, que são apresentadas nas próximas seções.

A. Gradiente de Correlação

As medidas baseadas em Gradiente concentram-se na informação de borda, filtrando baixas frequências espaciais. Devido à diferença dos sensores usados, há uma similaridade de posição de borda. Baseado nisso, a correlação do gradiente da imagem poderia apresentar a transformação relativa entre as duas imagens. Uma atenção deve ser tomada pra reduzir o ruído das imagens devido à sensibilidade ao ruído do gradiente.

O Gradiente é obtido filtrando imagens com derivadas horizontais e verticais dado por:

$$H_i = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}; H_j = H_i^T \quad (1)$$

Essas duas imagens filtradas são usadas para formar uma imagem complexa dada por (figura 2):

$$\nabla I = H_i * I + jH_j * I \quad (2)$$

Onde * representa o operador de convolução e $j = \sqrt{-1}$.

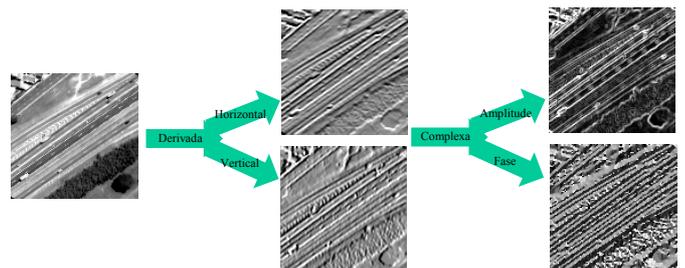


Figura 2. Formação do gradiente complexo.

As duas imagens complexas são então correlacionadas usando as propriedades da Transformada Rápida de Fourier (FFT)

$$GC(I_i, I_v) = FFT^{-1} \{ FFT(\nabla I_i) \times conj(FFT(\nabla I_v)) \} \quad (3)$$

Na teoria a direção do gradiente irá apresentar discriminação de similaridade quando a direção do gradiente em ambas as imagens for similar.

B. Informação Mútua

A Informação Mútua é dada por:

$$IM(I_i, I_v) = \sum_{i,v} p(I_i, I_v) \log \frac{p(I_i, I_v)}{p(I_i)p(I_v)} \quad (4)$$

onde $p(I_i, I_v)$ é a soma da distribuição de probabilidade e $p(I_i)$ e $p(I_v)$ são distribuições de probabilidades em imagens individuais. A IM apresenta a probabilidade da co-ocorrência de valores em ambas as imagens e é maximizada no registro.

C. Combinação de Informação Mútua e Informação do Gradiente

A combinação é definida [12] por

$$\begin{aligned} CMI(I_i, I_v) &= G(I_i, I_v) \times MI(I_i, I_v) \\ G(I_i, I_v) &= \sum w(\alpha) \min(|\nabla I_v|, |\nabla I_i|) \\ w(\alpha) &= \frac{\cos(2\alpha) + 1}{2} \quad \alpha = \text{phase}(\nabla I_i \times \text{conj}(\nabla I_v)) \end{aligned} \quad (5)$$

O objetivo da função $G(\cdot)$ é aumentar os pesos de regiões onde os gradientes são alinhados e aumentar a influencia de regiões onde o gradiente é alto em ambas as imagens.

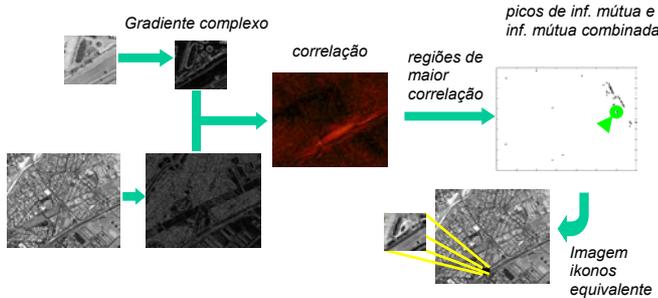


Figura 3. Esquema do Sistema de Visão com utilização de informações do Gradiente Complexo e Informação Mútua e Informação Mútua Combinada.

Associando três medidas de similaridades entre imagens - correlação cruzada de gradiente, informação mútua e informação mútua e gradiente combinados - associadas à informação de proa da aeronave, foi possível obter bons resultados em dois experimentos realizados na área urbana de São José dos Campos.

No método utilizado para registro das imagens, ilustrado na Figura 3, primeiro calcula-se o Gradiente de Correlação das duas imagens, em seguida, a Informação Mútua e Informação Mútua e gradiente Combinados (CMI) são calculados em pontos onde se obtém os maiores valores da correlação entre gradientes. Na escolha de cada ponto deve-se criar uma vizinhança onde novos pontos não possam ser escolhidos, de forma a permitir o teste em regiões diferentes. Finalmente as posições dos picos dessas três medidas de similaridade ou a coincidência de alguns destes picos são analisadas para onde ocorre o registro correto.

No primeiro experimento 23 quadros de vídeo foram escalonados para a mesma resolução espacial da imagem Ikonos e girados para que seu eixo horizontal coincidisse com da imagem Ikonos de São José dos Campos. No segundo experimento simulou-se o vídeo com pedaços de um mosaico de imagens ortoretificadas obtidas por aerofotogrametria. Em ambos os experimentos verificou-se que a utilização

combinada das medidas de similaridade promoveu melhora na detecção, principalmente reduzindo o falso alarme.

IV. RESULTADOS

A. Resultados do sistema de navegação

Inicialmente, para testar o sistema de navegação do PITER, foi utilizado o simulador de voo *FlightGear* [14][15]. A rota de navegação foi visualizada por meio do *software* SIVISAT – Sistema de Vigilância por Satélites, desenvolvido no Instituto de Estudos Avançados com o principal objetivo de visualizar rotas de navegação. Um modelo digital de elevação de São José dos Campos e a aeronave Cessna 310 foram usados na simulação. Foram considerados os efeitos do vento e de condições climáticas. A Figura 5 apresenta uma navegação feita pelo sistema de navegação do PITER, considerando a localização baseada na integração entre sensores inerciais e o GPS. A rota planejada está em vermelho, a rota de navegação do VANT (Cessna 310) está em amarelo e os obstáculos estão em azul. Observa-se que, para efeito de teste, foi colocado um obstáculo entre a segunda e a terceira coordenada da rota planejada. No momento em que o VANT passa pela segunda coordenada da rota há um replanejamento e o VANT navega à direita do obstáculo. A Figura 4 apresenta telas capturadas do *FlightGear* com o VANT sendo comandado pelo sistema de navegação do PITER e alcançando as coordenadas da rota planejada. A coordenada obtida pelo replanejamento não está apresentada. As coordenadas da rota são:

- (a) Latitude -23.360123, longitude -46.078868 (Figura 4. a);
 - (b) Latitude -23.303345, longitude -45.950327 (Figura 4. b);
 - (c) Latitude -23.189789, longitude -45.970327 (Figura 4.c);
 - (d) Latitude -23.189789, longitude -45.7 (Figura 4.d); e
 - (e) Latitude -23.25112, longitude -45.86167 (Figura 4.e).
- A altitude considerada foi a de 3000 pés.

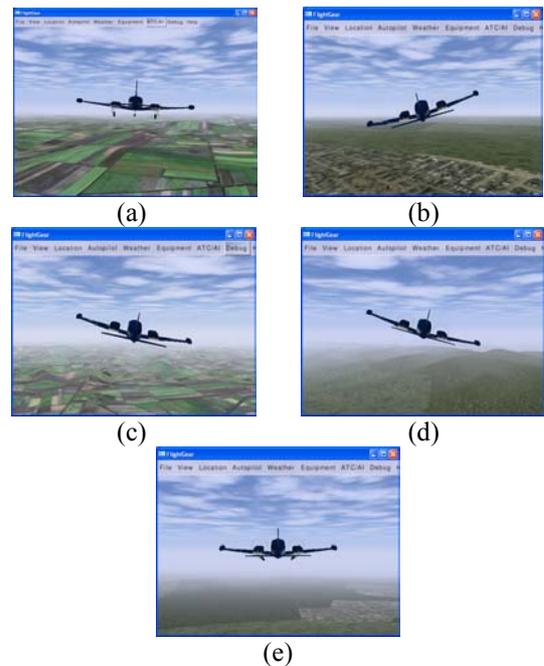


Figura 4 – VANT alcançando as coordenadas da rota planejada.

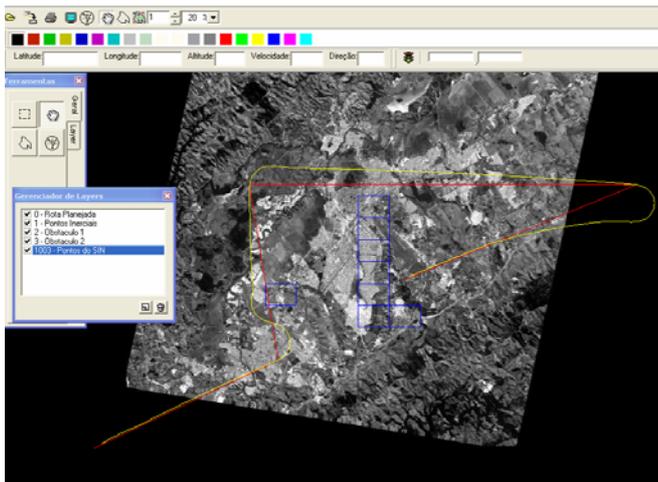


Figura 5 – Navegação considerando a integração entre sistema inercial e GPS.

B. Resultados do sistema de visão computacional

A tabela 1 mostra os resultados de casamento no primeiro experimento com os 23 *frames*, utilizando a posição dos picos 50 pontos de medidas de GC, IM e CMI de forma isolada ou combinada.

Tabela 1: Resultado dos registros corretos (C) e errados (E) considerando-se a posição dos picos das SM

| | GC | IM | CMI | GC IM | GC CMI | IM CMI | GC, IM CMI |
|---|----|----|-----|-------|--------|--------|------------|
| C | 11 | 18 | 18 | 10 | 10 | 18 | 10 |
| E | 12 | 5 | 5 | 0 | 1 | 1 | 0 |

O resultado mostra que as combinações das medidas de similaridade promovem uma acentuada redução no falso alarme mantendo uma taxa de registro correto em torno de 50%.

No segundo experimento o sistema de navegação foi integrado ao de visão computacional, conforme ilustra a figura 6. A esquerda encontra-se o mosaico de referência Ikonos, a imagem do canto superior direito é um pedaço menor da imagem de referência que tem o seu tamanho alterado conforme o erro estimado do sistema inercial. No canto inferior direito é apresentada a imagem da câmera simulada pelo recorte de um mosaico da aerofotogrametria. A trajetória correta da aeronave é representada pela seqüência de losangos verdes. As cruces vermelhas indicam a posição determinada pelo módulo de visão computacional. Os pontos onde os losangos verdes coincidem com as cruces vermelhas indicam a correta determinação da posição pelo sistema de visão computacional. O mesmo modelo digital de elevação de São José dos Campos e a aeronave Cessna 310 foram usados na simulação da navegação, considerando-se os efeitos do vento e de condições climáticas. A altitude de navegação considerada foi a de 1500 pés.

Neste experimento, a coincidência dos três picos de MS foram utilizados como critério para seleção de registro correto. Com este critério obteve-se uma taxa de falso alarme menor que 5% e detecção acima de 85%.

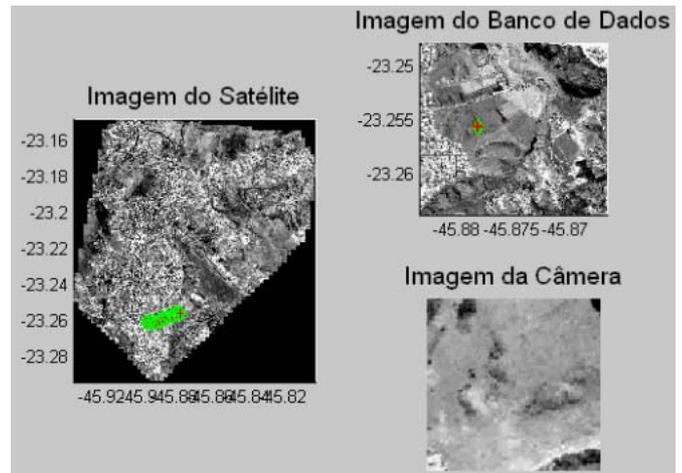


Figura 6 – Simulação da navegação do módulo de visão computacional.

V. CONCLUSÕES

No trabalho foi apresentado um sistema de navegação autônoma para Veículos Aéreos Não Tripulados com estimação de posição obtida por meio de um sistema de visão computacional. As simulações comprovam que o projeto pode ser utilizado em VANT's para reconhecimento, tanto para aplicações civis como militares, uma vez que os dados de GPS não são utilizados, reduzindo, portanto, interferências e bloqueio de sinais. O *software FlightGear* permitiu simulações, considerando situações reais de voo (efeitos do vento, das condições climáticas e obstáculos naturais, entre outros), constatando a eficiência do sistema de navegação autônoma elaborado.

A utilização das técnicas no módulo de visão computacional: Gradiente de Correlação, Correlação Mútua e a Combinação das anteriores para a localização do VANT mostraram-se eficientes, mesmo em se utilizando imagens obtidas por diferentes sensores, v.g., quadros de videografias aéreas, imagens georreferenciadas e fotografias aéreas.

As atuais diretrizes do projeto visam o aperfeiçoamento do sistema, para realizar: a navegação aérea autônoma tridimensional de forma eficiente (considerando aspectos de representação tridimensional do ambiente, capacidade de planejamento de trajetórias e a restrição de carga útil do VANT), o processamento e o reconhecimento das imagens em tempo real, enfrentando variações de iluminação, chuva, entre outras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a *Space Imaging* do Brasil que gentilmente disponibilizou a imagem Ikonos da região de São José dos Campos. E o apoio aéreo do Grupo Especial de Ensaio em Voo do CTA e a Base de Patrulhamento Aéreo da cidade de São José dos Campos - Polícia Militar do Estado de São Paulo para a realização das videografias.

REFERÊNCIAS

- [1] Martins, M. P., Guimarães, L. N. F. and Fonseca, L. M. G. "Texture Feature Neural Classifier for Remote Sensing Image Retrieval Systems". Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI) (Oct. 2002).

- [2] Martins, M. P., Shiguemori, E. H., Monteiro, M. V. T., Medeiros, F. L. L., Domiciano, M. A. P. Reconhecimento Automático de Pontos de Controle para Navegação Aérea Autônoma baseada em Visão, II SERFA – Encontro de usuários de Sensoriamento Remoto das Forças Armadas. São José dos Campos, Outubro de 2006.
- [3] Martins, M. P., Monteiro, M. V. T., Shiguemori, E. H., Medeiros, F. L. L., Domiciano, M. A. P. Navegação Aérea Autônoma por Imagens. VI WAI – Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados. São José dos Campos, Junho de 2006.
- [4] Space Imaging do Brasil (<http://www.spaceimaging.com.br/>)
- [5] Kundur, S. e Raviv, Daniel, “A Vision-Based Pragmatic Strategy for Autonomous Navigation”. Pattern Recognition, Elsevier Science, Vol. 31, N. 9, pg. 1221-1239, 1998.
- [6] Azinheira, José R. et al. “Visual Servo for the Hovering of an Outdoor Robotic Airship”. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, USA, may, 2002.
- [7] Sim D.G., Park, R.H., Kim R. C., Lee S. U, Kim, I.C “Integrated Position Estimation Using Aerial Image Sequences”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, January. 2002, pp. 1-18
- [8] Blakelock, J. H. *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, 2rd ed.. Wiley-Interscience, 1991, 672 p.
- [9] Bader, D. *Pathfinding: Search Space Representations. AI Game Programming Wisdom 2*, 2003, chapter 2.1. http://www.cse.lehigh.edu/~munoz/CSE497/classes/BaderPathfinding_2_1.ppt#256,1. Pathfinding: Search Space Representations
- [10] Ferguson, D., Likhachev, M., Stentz, A. *A Guide to Heuristic-based Path Planning. Proceedings of the International Workshop on Planning under Uncertainty for Autonomous Systems, International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, Junho de 2005, pp. 9-18.
- [11] Maintz, J. B. A. and Viergever M. A., “A Survey of Medical Image Registration”, Med. Imag. Anal., vol.2, no. 1, pp. 1-36, 1998.
- [12] Penny, GP, Weese J., Little J. A., Desmedt P., Hill DLG, and Hawkes, D., “A Comparison of Similarity Measures for Use in 2-D-3D Medical Image Registration”, IEEE Trans. On Medical Imaging, , August 1998, pp. 586-595.
- [13] Puim, J. P. W., Maintz, J. B. A., and Viergever, A. M., “Image Registration by Maximization of Combined Mutual Information and Gradient Information”, IEEE Trans. on Med. Imaging., vol 19, no 8, August 2000, pp. 809-814.
- [14] Medeiros, F. L. L., Ferreira, L. C. A., Shiguemori, E. H., Domiciano, M. A. P., Monteiro, M. V. T., Martins, M. P. Integração do Módulo de Navegação Autônoma do Projeto PITER com o SIVISAT e o Simulador de Vão *FlightGear*. VI WAI – Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados. São José dos Campos, Junho de 2006.
- [15] *FlightGear, software*. www.flightgear.org. Acessado em Outubro de 2006.