

Estimação Automática do Modelo Digital de Elevação a partir de Imagens Aéreas

Marco Antonio Pizani Domiciano^{1,2}
Luiz Alberto Vieira Dias²
Elcio Hideiti Shiguemori¹
Paulo Fernando F. Silva Filho¹

¹ Instituto de Estudos Avançados – IEAv/EGI-S
São José dos Campos – SP, Brasil
pizani, elcio,silvafilho@ieav.cta.br

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/IEC
São José dos Campos - SP, Brasil
vdias@ita.br

Abstract. The development and employment of UAV have grown in last years. With this, the applications have also been increase. Among the applications, an important process is to automatic estimation of the Digital Elevation Model for a specific area. In many cases, it is important that the flight be made autonomously. The successful autonomous aerial navigation is dependent on several factors, among them the location of the unmanned aerial vehicle into the geographical space. In order to achieve this goal, there exist techniques that combine the Satellite Position System (SPS) with the Inertial Navigation System (INS). However, these techniques have been dependent on external data (signal from the SPS), that could not be available during the vehicle operation. When the SPS and the INS are not available, Computational Vision is an alternative for the navigation. Some studies have been developed about navigation with the use of images and Digital Elevation Models. In this paper it is presented an approach to automatically estimate a Digital Elevation Model using aerial images. Different techniques have been used to obtain characteristic points, from two images obtained at different instants. The Zernike Moment and Particle Collision Algorithm are used to find correspondence between the aerial images. The results show that the proposed techniques have been suitable for this problem.

Keywords: remote sensing, image processing, DEM sensoriamento remoto, processamento de imagens, DEM

1. Introdução

Durante as últimas décadas observa-se a evolução da tecnologia em diversos ramos das Ciências, por exemplo, Eletrônica, ciência da Computação, Comunicação, Materiais, entre outras, e que tem propiciado o desenvolvimento de aeronaves sem tripulação também conhecidas como veículos aéreos não tripulados (VANT) ou também conhecidos por Drones e Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Um VANT pode ser empregado para executar várias missões, como sensoriamento remoto, vigilância, aquisição de alvos, transporte de cargas, observação meteorológica, e, ainda, servir como aeronave de reabastecimento aéreo [Bolkcom e Bone 2003] [Manzar et al. 2008]. Em muitas aplicações, é importante que o voo seja autônomo. O sucesso de uma navegação aérea autônoma depende de vários fatores, entre eles, a localização do veículo aéreo autônomo em um espaço geográfico. De forma a atingir esse objetivo, existem técnicas que combinam o sinal do Sistema de Navegação por Satélites (SPS), com o do Sistema de Navegação Inercial (INS). Porém, essas técnicas dependem de dados externos não controlados (sinal do SPS), que podem não estar disponíveis durante a operação do veículo [Woo et al. 2007]. Quando o SPS não está disponível, a visão computacional é uma alternativa para a navegação [Woo et al. 2007], [Melo, SILVA FILHO e Shiguemori

2016], uma das abordagens é o uso de Modelos Digitais de Elevação (DEM) para prover a navegação autônoma [Jianchao 2002]. Na literatura existem diferentes abordagens para estimação do modelo digital de elevação [Wolf 1983]. Algumas delas estimam o modelo digital de elevação com medições em campo. Outros fazem uso de estereoscopia, mas que requerem a interpretação de um operador. Algumas técnicas tem sido propostas para estimar automaticamente o DEM, por exemplo, com uso de laser altímetro, outras fazem uso de interferometria. 1) Mais recentemente, propostas têm sido apresentadas considerando a identificação automática de pontos correspondentes em duas imagens. 2) No entanto, tem sido pouco observadas propostas que fazem identificação automática de pontos correspondentes em duas imagens. Para a navegação autônoma baseada em imagens, frequentemente há voos sobre regiões com quantidade de pontos característicos insuficiente. Para suprir esta necessidade, uma solução é considerar uma região de análise. Para a aplicação em tempo real busca-se por técnicas com baixo custo computacional, uma vez que há a necessidade de processamento de várias imagens.

Neste trabalho é apresentado um novo método para estimar automaticamente o DEM, usando (i) pontos característicos, obtidos com algoritmo SIFT [Lowe 2004]; (ii) área similares obtidas com o uso de Momentos de Zenike [Mohammed e Jie 2002], [Zen e Shu-Kuo 2010] e Algoritmo de Colisão de Partículas (PCA) [Sacco e Oliveira 2005], [Lobato et al. 2010]. Estas técnicas foram aplicadas devido ao fato de que o algoritmo SIFT sozinho não produz uma nuvem densa o suficiente para geração do DEM. Assim, ele também foi usado para encontrar a correspondência entre os centros das imagens, estimar a linha de base aérea real, e possíveis desalinhamento das imagens. Quando se usa a combinação de Momentos de Zernike com PCA, é possível construir um algoritmo que percorra duas imagens do terreno e, a partir de janelas pré-definidas, procurar a melhor localização para a área, obtendo, desta forma, a correspondência entre os pontos centrais, permitindo calcular a altitude. Então o DEM pode ser obtido a partir de imagens adquiridas de VANT e comparado com um DEM armazenado para a área alvo. Desta forma, a posição pode ser estimada, sem o uso do SPS.

2. Trabalhos Relacionados

A informação da localização é um dos requisitos essenciais para a realização de um voo autônomo. A literatura apresenta diversos trabalhos que abordam o problema de navegação autônoma de VANT por meio de imagens, destacando entre eles, o trabalho de Schultz et al. (2000). Eles desenvolveram um sistema para gerar o Modelo Numérico do Terreno Georreferenciado. A partir de uma sequência de imagens, o Modelo 3D do Terreno era obtido, porém, o trabalho não relaciona o uso do Modelo para navegação autônoma. O projeto de Sinopoli et al. (2001) usa o DEM para navegação aérea de VANT em um ambiente parcialmente conhecido, com Wavelets, no entanto, o DEM não é estimado em tempo real. No trabalho de Sim et al. (2002-1) um sistema integrado para estimação de posição usando uma sequência de imagens aéreas é apresentado. O principal objetivo foi desenvolver um algoritmo para estimação de posição com base em visão, para ser aplicado em tempo real, no trabalho, o DEM não é considerado. O algoritmo proposto por SIM e PARK (2002-2) é composto por duas fases. Na primeira fase, um perfil de amostra de elevação é construído por computação de elevações, em pontos característicos de amostras ao longo de uma linha arbitrária horizontal, baseado na correspondência estéreo, com a correspondência pontual estabelecida entre duas consecutivas imagens aéreas. Na segunda, um ponto correspondente no DEM é encontrado através da busca da localização do terreno, cujo local é o mais semelhante ao Mapa Recuperado de Elevação – REM (Recovered Elevation Map), quando REMs relativos e DEMs são empregados. O sistema proposto por JIANCHAO (2002) difere

de outras abordagens, pois ao invés de utilizar as características da trajetória para calcular o movimento 3D da plataforma, utilizam-se os parâmetros de transformação geométrica da imagem entre quadros consecutivos para inferir o deslocamento 3D da câmera. SHAW, et al.(2004) propuseram um pacote de Imageamento e Localização (IPL) que permitia a aquisição de imagens a fim de permitir a reconstrução de modelos 3D topográficos da superfície de um planeta explorado, enquanto também proporcionava a localização do balão em relação ao ambiente marciano. Nesta aplicação particular os DEM foram utilizados no ILP para apoiar a localização global por comparação com um DEM global e avaliação da imagem. WOO, et al.(2007) propuseram um método para extração de horizonte e picos de montanhas, que estimava a posição do VANT pela correspondência entre o horizonte e os picos de montanhas extraídos das imagens aéreas com aqueles extraídos do DEM em situações que a altitude é conhecida. Segundo Li et al. (2010) foi apresentada uma abordagem para navegação aérea baseada em no casamento de contornos de terreno retirados de uma sequência de imagens. A confiabilidade do método de correspondência de imagens diminui caso a imagem da cena seja afetada pela estação, pelo tempo (clima) e pela duração do tempo de disparo, mas o contorno do terreno é relativamente estável e, portanto, a navegação TCM é mais robusta [Li et al. 2010]. Para resolver os problemas anteriormente mencionados, o método de estimar o terreno por um sensor de imageamento passivo tem sido pesquisado e encontrou a sua aplicação em veículos autônomos [Li et al. 2010]. LI, et al.(2010) desenvolveram um método de navegação baseada em visão, em tempo real e automático utilizando a correspondência do terreno por meio da reconstrução 3-D do terreno a partir da sequência de imagens. A reconstrução 3-D do terreno a partir da sequência temporal de imagens é um processo fundamental para a navegação. Ele inclui a seleção quadros-chave, extração e registro de pontos característicos dos quadros-chave, e estimativa de 3-D [Li et al. 2010].

3. Estimação Automática do DEM

A fim de obter a correspondência entre as imagens e desta forma obter a posição do veículo em um sistema geográfico, as técnicas mais utilizadas são: (i) classificação; (ii) análise de textura [Cui et al. 2005]; (iii) casamento de imagens; (iv) correspondência de fases 1D [Miura et al. 2012], [Shibahara et al. 2007], e [Shibahara et al. 2008]; (v) correspondência de áreas; (vi) pontos característicos [Lowe 2004], [Domiciano, Shiguemori e Dias 2010-1], [Domiciano et al. 2011], and [Kroon 2010]; (vii) soma das diferenças absolutas; (viii) soma dos quadrados das diferenças; (ix) transformadas de ondas; (x) redes neurais; (xi) momentos de Zernike [Chen e Sun 2010] [Khotanzad e Hong 1990], [Mohammed e Jie 2002], [Pawlak 2006], [Zen e Shu-Kuo 2010] [Chen e Sun 2010] e TERCOM [Li et al. 2010]. Neste trabalho optou-se pela utilização das técnicas de: (i) pontos característicos, (ii) Momentos de Zernike e (iii) Algoritmo de Colisão de Partículas (PCA) para realizar a correspondência entre as imagens e a Equação 1 utilizada em fotogrametria para obtenção das altitudes dos pontos.

$$h_a = H - \frac{B \cdot f}{x_a - x'_a} \quad (1)$$

onde H é a altitude de voo em relação a um Datum, B a linha base aérea, f a distância focal, x_a a distância do ponto “a” até o centro da primeira imagem e x'_a a distância do ponto “a” até o centro da segunda imagem. Estas técnicas foram selecionadas devido ao fato de o algoritmo SIFT não gera uma nuvem de pontos densa o suficiente para criação do DEM e foi tentado encontrar a correspondência entre os centros das imagens e estimar a base aérea e um possível desalinhamento das imagens. Usando a combinação entre Momentos de Zernike e PCA, propõe-se um algoritmo que varre as duas imagens a partir de uma dada janela, procurando

a melhor correspondência com a área de interesse, obtendo, desta forma, a correspondência entre os centros destas áreas, e permitindo calcular a altitude.

4. Metodologia

Uma das possibilidades de obter a posição da aeronave em um determinado instante de tempo baseia-se na construção, em tempo real e embarcado, de um DEM a partir das imagens obtidas durante o voo de um VANT e compará-lo com um modelo pré-existente [Schultz et al. 2000], [Domiciano et al. 2008-2], [Schultz 1995]. Para isto, necessita-se identificar pontos correspondentes em duas imagens sequenciais. Após isso, obtém-se a altitude de cada ponto identificado em relação a um Datum especificado com o uso da equação 1 empregada em fotogrametria. Objetivo é construir um sistema para cálculo do DEM em tempo real e compará-lo com um DEM pré-existente a fim de obter as coordenadas para o subsistema de navegação autônoma visando melhorar a eficiência dos sistemas existentes, as condições para navegação aérea autônoma, reduzir os riscos de desorientação da aeronave e o desperdício de recursos envolvidos. Descrição do processo de localização do VANT pelo sistema ICARO: O sistema ICARO solicita uma imagem para a câmera do VANT, baseado na altura de voo, velocidade e distância focal da câmera, pré-definidos no planejamento, calcula-se o tempo necessário para que uma nova imagem seja obtida a fim de que o recobrimento longitudinal de aproximadamente 60% seja atingido. Correções são necessárias em virtude da variação dos parâmetros citados anteriormente. De posse das duas imagens iniciais, executa-se a identificação do centro da primeira imagem na segunda, e vice-versa. Este procedimento é necessário para que seja caracterizada a linha de voo, por onde a aeronave passou durante a obtenção das imagens. Processo importante para o cálculo das altitudes. Parte-se para a rotação das imagens, se necessário, para determinar a linha de voo e começar a identificar pontos correspondentes nas imagens a fim de calcular as altitudes e construir o DEM. Com o DEM pronto é necessária a comparação com um modelo de referência que esteja georreferenciado, a fim de que se possa obter as coordenadas do centro da imagem e transmiti-la para o sistema de navegação que fará as correções necessárias. Após isso, retorna-se ao ponto de contagem de tempo para uma obtenção de nova imagem, fazendo com que a última imagem adquirida passe para a primeira posição; e processo se repete. A metodologia proposta consiste em fornecer um Sistema de Visão Computacional capaz de estimar a posição de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) no terreno com a utilização de um Modelo Digital de Elevação pré-existente (DEM_Ref) e o cálculo de um Modelo Digital de Elevação (DEM_Calc) em tempo real e em voo baseando-se nas imagens ópticas obtidas pelo (VANT). A fim de atingir este objetivo a metodologia consiste de onze passos descritos a seguir:

- 1 – Obter uma imagem.
- 2 – Obter o intervalo de tempo para o recobrimento de 60%.
- 3 – Obter outra imagem.
- 4 – Aplicar um algoritmo para identificação de pontos semelhantes nas imagens. Aplicar SURF/SIFT para encontrar centro nas imagens.
- 5 – Obter os coeficientes de um polinômio de segundo ou terceiro grau com a utilização dos pontos encontrados no passo 4.
- 6 – Aplicar Momentos de Zernike
- 7 – Determinar a posição com PCA
- 8 – Calcular Altitudes e Construir DEM.
- Realizar o cálculo da altitude do ponto, 1, obtido no passo 7 e obter o modelo digital de elevação.
- 9 – Voltar ao passo 6 até que toda imagem seja percorrida.
- 10 – Aplicar filtro para eliminar pontos muito discrepantes em relação à mediana
- 11 – Calcular a diferença entre DEM_Calc e DEM_Ref.

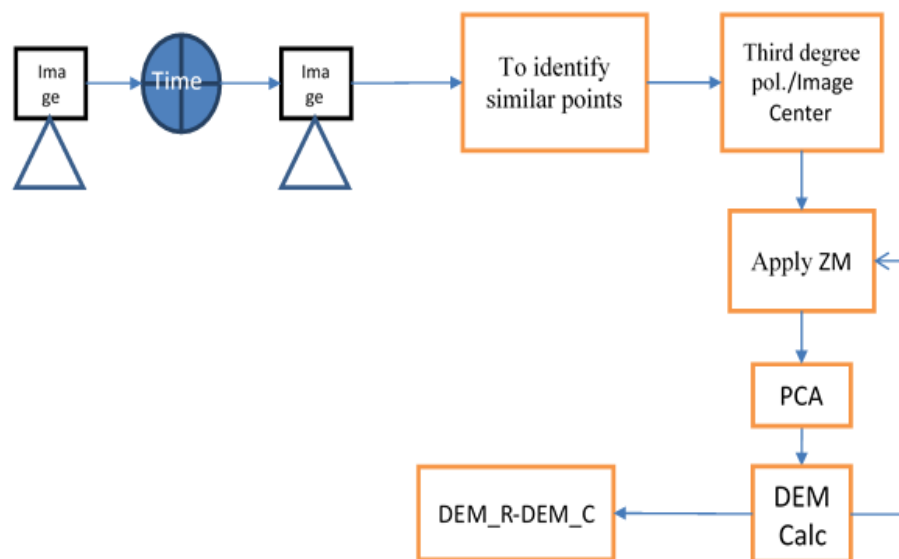


Figura 1 - A Metodologia Proposta.

5. Estudo de Caso

Para os resultados obtidos neste estudo, foram empregadas quatro conjuntos de fotografias aéreas da cidade de São José dos Campos, São Paulo, com recobrimento longitudinal aproximado de 60%. Estas fotografias foram fornecidas pelo (1º/6º GRUPO DE AVIAÇÃO, baseado em Recife, Estado de Pernambuco, Brasil [1º/6º Grupo de Aviação 1999]). A fim de se obter as correspondências entre os centros das duas imagens, utilizou-se o algoritmo SIFT [Lowe 2004]. Encontrar os centros das imagens é importante para o cálculo da base aérea que será utilizada para obter as altitudes dos pontos. Como ambos algoritmos não produziam uma densidade suficiente de pontos para o cálculo das altitudes, utilizou-se os Momentos de Zernike da seguinte forma: a primeira imagem foi percorrida por uma janela na qual era aplicava-se os Momentos de Zernike com o uso do Algoritmo de Colisão de Partículas procurava-se a correspondência na segunda imagem. Com o resultado calculava-se a altitude. É importante ressaltar que além da resolução espacial, no caso do cálculo do DEM, existe a resolução altimétrica do pixel que irá influenciar nas medidas, pois, dois objetos de altitudes diferentes podem ser representados com altitudes iguais devido ao fato da diferença não ser suficiente para serem representadas em pixels de linhas diferentes e, portanto, apresentam a mesma altitude. No caso deste trabalho, a resolução altimétrica é de aproximadamente 2,24m (2,238 a 2,268m).

6. Análise dos Resultados

A Tabela 1 apresenta a diferença média entre as altitudes do modelo de referência e o modelo calculado para os dados disponíveis. Nota-se que as médias são menores que mais ou menos 15 metros, inferior a 2,4% em relação à média das altitudes do DEM de referência.

Nas Figuras 2 a 4 ilustram imagens que contém um entroncamento rodoviário e o modelo digital de elevação calculado (DEM_Calc).

Tabela 1: Estatísticas dos Testes
 Estatísticas dos Testes (Todos Testes)

Imagem	Média das Diferenças Absolutas	Média das Diferenças Relativas	Altitude Média DEM no DEM_Ref	Altitude Média DEM no DEM_Calc
Entroncamento rodoviário	12.999m	10.769m	645.85m	631.26m
Terreno sem rodovia	14.995m	-11.765m	641.51m	656.49m
Terreno	11.926m	-9.758m	643.28m	652.55m
Pista de pouso, Hangares e Terreno	5.123m	-4.465m	637.34m	641.75m

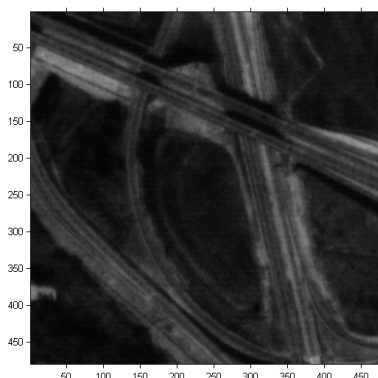


Figura 2 - Entroncamento Rodoviário com 0,88 m de resolução espacial.

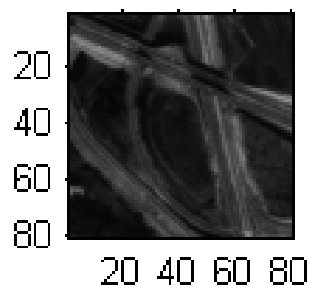


Figura 3 - Entroncamento Rodoviário com 5 m de resolução espacial.

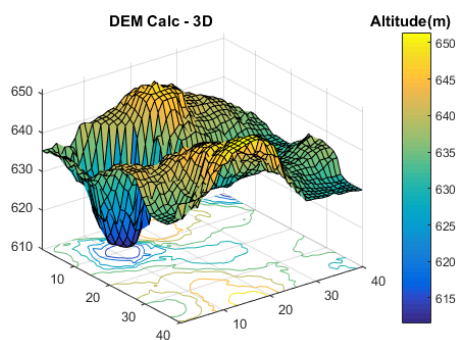


Figura 4 - DEM_Calc com 40x40 pontos em 3D.

7. Conclusão

Neste trabalho é apresentada uma proposta para estimação da posição de uma aeronave a partir da estimação automática do Modelo Digital de Elevação, sem depender de informação de GNSS. É apresentada uma nova proposta integrando as técnicas SIFT, Momentos de Zernike e Algoritmo de Colisão de Partículas. Foram utilizadas imagens obtidas na região de São José dos Campos, com recobrimento longitudinal de 60%. Os resultados indicam que as técnicas empregadas são adequadas para estimar a posição da aeronave, principalmente visando a implementação em sistemas embarcados.

Referências

- 1º/6º Grupo de Aviação. Fotografias aéreas de São José dos Campos. Brazilian Air Force, 1999.
- BOLKCOM, C.; BONE, E. Unmanned aerial vehicles: Background and issues for congress. n. RL 31872, 25/04/2003 2003.
- CHEN, Z.; SUN, S.-K. A zernike moment phase-based descriptor for local image representation and matching. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, v. 19, n. 1, p. 15, 2010.
- CUI, P. et al. Rotation and scaling invariant texture classification based on radon transform and multiscale analysis. Elsevier, n. 408, p. 6, 2005.
- DOMICIANO, M. A. P.; SHIGUEMORI, E. H.; DIAS, L. A. V. Utilização de imagens aéreas e pontos característicos para estimação automática da altitude. Instituto de Pesquisas da Marinha do Brasil, Instituto de Pesquisas da Marinha do Brasil - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil, 2010–1.
- DOMICIANO, M. A. P. et al. Using aerial photographs and characteristic points for automatic estimation of altitude of the reference points. CRC Press - Taylor and Francis Group, Porto - Portugal, único, p. 460, 2011.
- DOMICIANO, M. A. P. et al. Estudo da influência do tamanho real do ccd para o cálculo do dem. Instituto de Estudos Avançados, 2008–2.
- JIANCHAO, Y. A new scheme of vision based navigation for flying vehicles-concept study and experiment evaluation. *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002.*, v. 2, p. 643 – 648, 2002.
- KHOTANZAD, A.; HONG, Y. H. Invariant image recognition by zernike moments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 12, n. 05, p. 09, 1990.
- KROON, D.-J. Surf (speeded up robust features). 2010.
- LI, L. et al. A new navigation approach of terrain contour matching based on 3-d terrain reconstruction from onboard image sequence. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, v. 53, n. 5, p. 1176–1183, 2010.
- LOBATO, F. S. et al. Algoritmo de colisão de partículas aplicado ao projeto de sistemas de engenharia. Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia, 2010.
- LOWE, D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.
- MANZAR, M. et al. New image matching technique based on hyper-vectorisation of grey level sliced binary images. *IET Image Processing*, v. 2, n. 6, p. 337 – 351, 2008.

- MELO, A. d. S.; SILVA FILHO, P.; SHIGUEMORI, E. H. Automatic landmark selection for uav autonomous navigation. In: CAPPABIANCO, F. A. M. et al. (Ed.). *Electronic Proceedings of the 29th Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI'16)*. São José dos Campos, SP, Brazil: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://gibis.unifesp.br/sibgrapi16>>.
- MIURA, M. et al. High-accuracy image matching using phase-only correlation and its application. 2012.
- MOHAMMED, A.-R.; JIE, Y. Practical fast computation of zernike moments. *Journal of Computer Science and Technology*, v. 17, n. 2, p. 8, 2002.
- PAWLAK, M. Image analysis by moments: Reconstruction and computational aspects. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polônia, único, 2006.
- SACCO, W. F.; OLIVEIRA, C. R. E. d. A new stochastic optimization algorithm based on a particle collision metaheuristic. p. 6, 2005.
- SCHULTZ, H. Reconstruction from widely separated images. v. 2486, p. 113–123, 1995.
- SCHULTZ, H. et al. A system for real-time generation of geo-referenced terrain models. Boston, p. 8, 2000.
- SHAW, A. et al. An autonomous imaging and localisation capability for planetary aerobots. p. 31.1 – 31.8, 2004.
- SHIBAHARA, T. et al. A sub-pixel stereo correspondence technique based on 1d phase-only correlation. *Proc. the 2007 IEEE International Conference on Image Processing, Sept*, p. V–221 – V–224, 2007.
- SHIBAHARA, T. et al. A high-accuracy stereo correspondence technique using 1d band-limited phase-only correlation. *IEICE Electronics Express*, v. 5, n. 4, p. 125 – 130, 2008.
- SIM, D.-G.; PARK, R.-H. Localization based on dem matching using multiple aerial image pairs. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 11, n. 1, p. 52–55, 2002–1.
- SIM, D.-G. et al. Integrated position estimation using aerial image sequences. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 24, p. 18, 2002–2.
- SINOPOLI, B. et al. Vision based navigation for an unmanned aerial vehicle. IEEE, Seoul, Korea, v. 2, p. 1757 – 1764, 2001.
- WOLF, P. R. Elements of photogrammetry. McGraw-Hill, único, p. 628, 1983.
- WOO, J. et al. Vision-based uav navigation in mountain area. p. 236–239, 16 - 18 May 2007 2007.
- ZEN, C.; SHU-KUO, S. A zernike moment phase-based descriptor for local image representation and matching. *Image Processing, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 1, p. 205–219, 2010.