

# Registro e Mosaico de Imagens Obtidas por Câmera Digital a bordo de VANT

Marcos Eduardo Gomes Borges \*  
Marina Laís da Silva Nascimento \*  
Juliano E. C. Cruz \*  
Leila Maria Garcia Fonseca †

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Programa de Mestrado em Computação e Matemática Aplicada \*  
Divisão de Processamento de Imagens †  
São José dos Campos, Brasil  
{marcoseborges, marina.lsnascimento, juliano.ecc}@gmail.com, leila@dpi.inpe.br

**Resumo**—Neste trabalho foi pesquisado soluções para registro e mosaico de imagens adquiridas por câmera digital a bordo de VANT. A ideia é apresentar soluções para dois tipos de problemas que ocorrem ao mosaicar sequências de imagens aéreas: i) distorções geométricas inseridas nas imagens devido às variações de altitude, ii) distorções (escala, projeção e ângulo de visada) nas imagens de baixas altitudes e que possuem cenas de objetos altos, tais como prédios e montanhas.

**Palavras-chave**—Registro de Imagens, Mosaico, VANT, TerraLib, SIFT.

## I. INTRODUÇÃO

A utilização de Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) tem apresentado grande crescimento nos últimos anos devido a diversos fatores, tais como ausência de tripulação em tarefas tediosas, cansativas ou que envolvem riscos à tripulação, baixo custo operacional e de fabricação comparados às aeronaves convencionais, entre outros. Imagens aéreas obtidas através de VANTs possuem grandes aplicabilidades [1] e o objetivo geral deste trabalho é encontrar solução para distorções geométricas que surgem ao realizar registro e mosaico de imagens adquiridas por câmera digital a bordo de aeronaves não tripuladas.

O mosaico de sequências de imagens aéreas apresenta alguns problemas de distorções geométricas devido às variações de altitudes da aeronave e distorções devido as diferenças de escala, projeção e ângulo de visada em cenas de baixa altitude e que apresentam prédios e montanhas. Outro problema também enfrentado ao gerar o mosaico nesse tipo de imagem, é que quando a aeronave realiza curvas para seguir o plano de voo traçado captura imagens com sistema de coordenadas rotacionadas em ângulos diferentes e desconhecidos, e isso também gera distorções que buscamos resolver neste trabalho.

Na Figura 1 pode-se observar o exemplo de um plano de voo para um VANT. Neste trabalho, as imagens adquiridas pela câmera digital a bordo da aeronave não possuem georeferenciamento e são coletadas a cada um segundo. Após o término da aquisição das imagens, as mesmas necessitam ser mosaicadas. O procedimento inicial para essa tarefa é o registro de imagens, que inicia a busca por correspondências entre imagens diferentes que representam a mesma cena [2]. Neste trabalho, a busca por correspondências entre pontos de imagens diferentes é realizada e comparada entre os algoritmos: SIFT proposto por [3] e pelos algoritmos de registro implementados na biblioteca TerraLib.

## II. REGISTRO E MOSAICO DE IMAGENS

O registro de imagens pode ser entendido como um processo de casamento entre duas imagens que possuem uma área comum. A



Fig. 1. Exemplo de Plano de Voo do VANT

imagem tomada como base de registro é chamada de imagem de referência e a imagem a ser registrada é chamada de imagem de ajuste. O processo basicamente envolve três etapas:

- 1) Obtenção de pontos de controle;
  - a) Extração de feições;
  - b) Casamento das feições extraídas;
- 2) Determinação da função de transformação;
- 3) Sobreposição das imagens.

As imagens a serem registradas podem ser relacionadas através de função de transformação simples se a geometria das imagens for semelhante. Se a geometria das imagens for diferente, as transformações podem ser aproximadas utilizando um função polinomial cujos parâmetros são determinados a partir das coordenadas dos pontos de controle. O número de pontos de controle representa a situação de um sistema de equações determinado. Entretanto, como as coordenadas medidas dos pontos de controle estão sujeitas a erros, convém usar um número de pontos maior que o número mínimo, o que define um sistema de equações sobredeterminado.

O produto gerado através das técnicas de registro de imagens é o mosaico, que nada mais é do que uma composição de imagens

adquiridas de diferentes pontos de vista visando contruir uma imagem maior, permitindo assim uma visão global da cena.[4]

### III. FERRAMENTA UTILIZADA

#### A. TerraLib

TerraLib é uma biblioteca *open source* de classes e funções SIG disponível na Internet, possibilitando portanto um ambiente colaborativo e seu uso para o desenvolvimento de novas ferramentas. Atualmente é desenvolvida pelo INPE, PUC-Rio e FUNCATE.[5]

A utilização desta biblioteca se deu em todas as etapas necessárias para a realização do registro, ou seja, na obtenção de pontos de controle, na transformação espacial da imagem e na sobreposição das imagens.

### IV. DETECÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE

Ponto de interesse é como é chamado qualquer ponto de uma imagem em que o sinal tenha uma mudança bidimensional. Cantos ou ângulos no formato L, T e Y obedecem essa definição assim como pontos pretos em um fundo branco, o final de ramificações ou qualquer textura bidimensional significante.[6] Ponto de controle são, portanto, os pontos de interesse de imagens de sensoriamento remoto que são utilizados para aplicar transformações geométricas afim de realizar o processo de registro entre as determinadas imagens.[7]

Os algoritmos que serão descritos subsequentemente são utilizados por duas classes do TerraLib: `TePDIMMIOMatching` utiliza o operador Moravec e `TePDIOFMatching` utiliza o método de fluxo ótico.

#### A. Detector Moravec

O detector Moravec foi uma dos primeiros detectores de ponto de interesse a serem desenvolvidos, sendo descrito primeiramente em 1977 por Hans Moravec[8]. Esse detector é baseado na função de autocorrelação do signal. Ele compara as diferenças de nível de cinza entre a janela atual e de janelas deslocadas em quatro direções paralelas à colunas e linhas. Se o mínimo dessas quatro diferenças é superior a um determinado limiar, então um ponto de interesse foi encontrado.[6]

O operador Moravec pode ser definido matematicamente como:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{p(q-1)} \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-l}^{l-1} (g(i, j) - g(i, j+1))^2 \\ V_2 &= \frac{1}{(p-1)q} \sum_{i=-k}^{k-1} \sum_{j=-l}^l (g(i, j) - g(i+1, j))^2 \\ V_3 &= \frac{1}{(p-1)(q-1)} \sum_{i=-k}^{k-1} \sum_{j=-l}^{l-1} (g(i, j) - g(i+1, j+1))^2 \\ V_4 &= \frac{1}{(p-1)(q-1)} \sum_{i=-k}^{k-1} \sum_{j=-l}^{l-1} (g(i, j+1) - g(i+1, j))^2 \\ V &= \min(V_1, V_2, V_3, V_4) \end{aligned}$$

Onde  $p = 2k + 1$  e  $q = 2l + 1$ , sendo que  $k \times l$  é o tamanho da janela utilizada.

#### B. Fluxo Ótico

Fluxo ótico é a distribuição de velocidades aparentes do movimento de padrões de brilho em uma imagem.[9] Assim, pode-se obter informações importantes a respeito da distribuição espacial dos objetos visualizados e da taxa de mudança dessa distribuição. Discontinuidades do fluxo ótico podem ajudar a segmentar uma determinada imagem em regiões que correspondem a diferentes a diferentes objetos. Esse conceito começou a ser estudado na década de 1940 e foi publicado primeiramente pelo psicólogo James Gibson. [10] [11]

Um pixel tendo a localização  $(x, y, t)$  com intensidade  $I$  será movido em  $\Delta x, \Delta y$  and  $\Delta t$  entre os quadros de uma mesma imagem. Assim, chega-se a equação:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\Delta t}{\Delta t} = 0$$

simplificando tem-se que,

$$\frac{\partial I}{\partial x} V_x + \frac{\partial I}{\partial y} V_y + \frac{\partial I}{\partial t} = 0$$

Onde  $V_x$  e  $V_y$  são os componentes  $x$  e  $y$  do fluxo ótico.

#### C. SIFT

O algoritmo SIFT, acrônimo para *Scale Invariant Feature Transform*, foi publicado por David Lowe [12] em 1999 e tem função é construir descritores de pontos-chaves de uma imagem, sendo este descritores independentes das mudanças de escala, rotação, translação e luminosidade que uma imagem pode sofrer. Utilizou-se neste trabalho a implementação em C++ obtida em [13]. O SIFT é utilizado na busca por correspondências entre sequência de imagens diferentes que contenham partes da mesma cena. A busca é feita através de pontos-chave correspondentes, utilizando-se seus descritores. Nesta pesquisa a distância euclidiana é utilizada em três abordagens diferentes para avaliar a mais apropriada para imagens obtidas por VANTs. Os algoritmos de cada abordagem são: DistEuclidConvencional, o qual aplica a função de busca diretamente, sem tratar seus resultados. DistEuclidRedundante, que chama a função de busca duas vezes, a segunda chamada é feita invertendo-se os parâmetros da função, somente correspondências que ocorram em ambas são guardadas. DistEuclidEsc onde observa-se a continuidade de escala entre segmentos de reta traçados entre os pontos pertencentes e às correspondências geradas por esta função.

### V. CASAMENTO DE PONTOS DE CONTROLE

Após se obter os pontos de controle de ambas as imagens em que deseja-se realizar o registro, é necessário descobrir qual é o ponto da imagem de ajuste correspondente à um determinado ponto na imagem de referência.

Dentre diversos métodos existentes para se descobrir a correspondência entre os pontos, as classes de casamento do TerraLib utilizam o método estatístico de correlação cruzada normalizada. Seu funcionamento se dá ao extrair pequenas janelas ao redor de cada ponto de controle nas duas imagens. Aplica-se, então, aos pares o método(descrito abaixo) entre todas as janelas obtidas na imagem de referência com as obtidas na imagem de ajuste.[4][14][15]

$$R(i, j) = \frac{\sum_{l=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{L-1} W_z(l, m) \cdot S_{ij}(l, m)}{\sqrt{\sum_{l=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{L-1} W_z^2(l, m) \sum_{l=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{L-1} S_{ij}^2(l, m)}}$$

Onde  $S_{ij}$  é a janela da imagem de referência e  $W_z$  a janela da imagem de ajuste. Assim, quanto maior valor de  $R(i, j)$  maior é a semelhança entre as duas janelas comparadas.

### VI. TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

Com o casamento dos pontos de controle já realizado, agora é necessário aplicar funções de transformação geométrica para que se possa ter a imagem de ajuste adequada geométricamente e espacialmente afim de sobrepor as imagens obtendo o mosaico. Transformação geométrica é o nome que se dá à aplicação de uma determinada função matemática em uma determinada figura geométrica em que o resultado é geometricamente igual ou semelhante à figura original.

#### A. Transformações elementares

1) *Translação*: A translação desloca um determinado ponto ou conjunto de pontos uma determinada distância em um determinado sentido.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$

Onde  $t_x$  e  $t_y$  são respectivamente as taxas de translação no eixo  $x$  e  $y$ . [16]

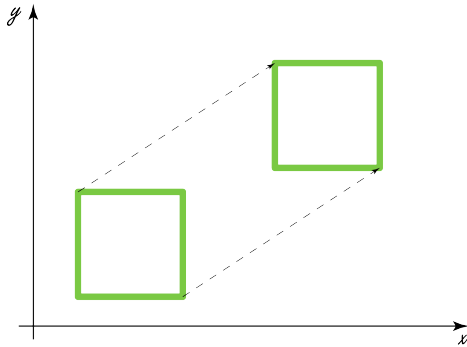


Fig. 2. Exemplo de translação em um espaço bidimensional

2) *Varição de escala*: A variação de escala é o fato de se esticar ou encolher uma determinada figura em relação ao eixos  $x$  e  $y$ .

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x & 0 \\ 0 & v_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Onde  $v_x$  e  $v_y$  são respectivamente as taxas de escala no eixo  $x$  e  $y$ . [16]

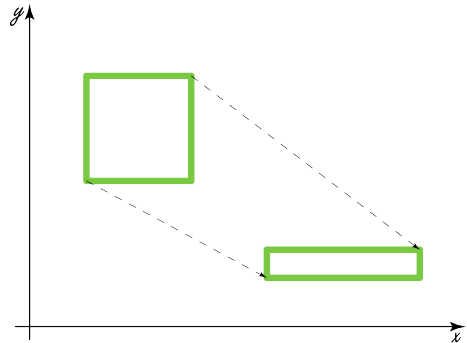


Fig. 3. Exemplo de variação de escala em um espaço bidimensional

3) *Rotação*: Na rotação rotaciona-se a figura em torno de um determinado eixo.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Onde  $\theta$  é o ângulo que a figura será rotacionada em relação a posição original levando em consideração a origem como eixo. [16]

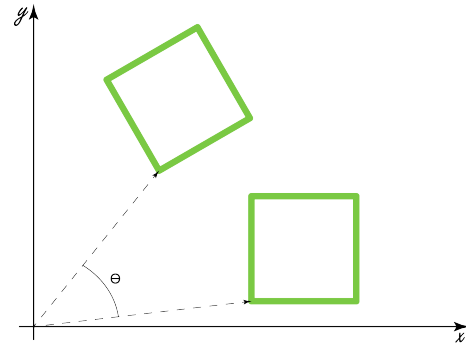


Fig. 4. Exemplo de rotação em um espaço bidimensional

4) *Cisalhamento*: O cisalhamento resulta em um movimento translacional na direção de um eixo no qual a magnitude aumenta ao longo do outro eixo.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Onde  $c$  é o coeficiente de cisalhamento. [16]

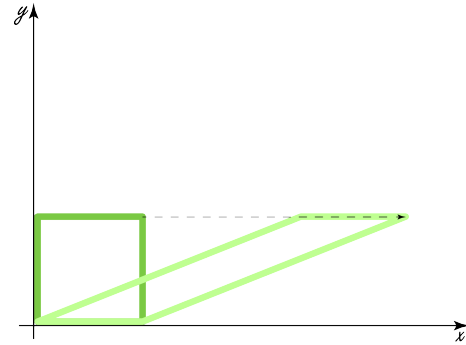


Fig. 5. Exemplo de cisalhamento em um espaço bidimensional

5) *Projeção*: Projeção é o processo no qual se obtém uma figura bidimensional a partir de uma cena tridimensional. [16]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \frac{z}{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

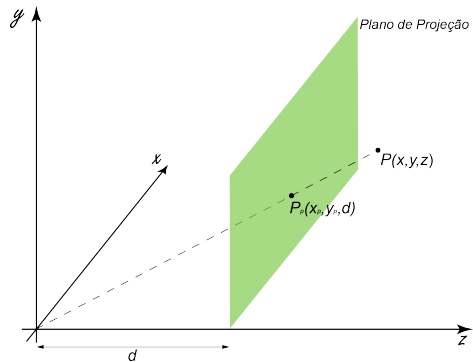


Fig. 6. Exemplo de projeção

## B. Tipos de transformação

É necessário primeiramente

1) *Linear*: A transformação linear ou também chamada de euclidiana, pode ser definida como:

$$F(x) = Qx$$

Sendo que  $Q = n \times m$ . Ou seja, transformações do tipo lineares são aquelas obtidas através de multiplicações matriciais. Assim, através das transformações lineares pode-se realizar operações de rotação, cisalhamento e variação de escala.[16]

2) *Afim*: A transformação Afim é uma transformação que compreende as operações que a transformação linear consegue executar mais a operação de translação. A transformada em questão pode ser definida como:

$$F(x) = Qx + q$$

Sendo que  $Q = n \times m$  e  $q$  tem tamanho  $m$ . [16]

3) *Polinômio Segundo Grau*: Existe também transformações de segundo grau que são descritas como:

$$F(x) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

4) *Projeção*: A projeção é nada mais que uma transformação linear em um espaço projetivo.[16] A forma geral da transformação projetiva é descrita como:

$$F(x) = \left( \frac{a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + a_{1n+1}x_{n+1}}{b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{n+1}}, \dots, \frac{a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + a_{m,n+1}x_{n+1}}{b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{n+1}} \right)$$

## VII. AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DO REGISTRO

Uma operação importante para um sistema de registro é a avaliação da transformação computada. Sejam  $g$  e  $G$  as imagens de ajuste e referência respectivamente, e  $x$ ,  $y$  e  $X$ ,  $Y$  os conjuntos de pontos de controle casados que definem uma transformação de distorção  $T$ . Podemos verificar o quão a transformação é correta através do cálculo do erro RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - T(X_i))^2 + (y_i - T(Y_i))^2}$$

onde:

$(x_i, y_i), (X_i, Y_i), i = 1..n$  é o conjunto de pares de pontos de controle obtidos no processo de casamento.  $T$  é a função de distorção entre as imagens obtida através do casamento de pontos de controle.

## VIII. FLUXOGRAMA PARA GERAR O MOSAICO

A montagem do mosaico se baseia em duas classes do TerraLib, o arquivo `MMIOMatching` recebe duas imagens e apresenta como resultado os pontos de controle da cena, que são representados através de dois vetores para cálculo da função de transformação. Esses pontos localizados são acrescentados na imagem que é salva com outro nome. (Talvez colocar algo da dissecação do Dmitri Fedorov) Já o segundo arquivo `Mosaic` recebe como entrada a saída do arquivo `MMIOMatching`, ou seja, os vetores que representam os pontos de controle, além das imagens que serão mosaicadas e o nome da nova imagem. (Devemos definir as configurações nesse item, qual foi a função de transformação que usamos entre outros detalhes, seria interessante fazer um desenho com explicando esse cliço)

## IX. RESULTADOS

Devemos descrever quanto tempo levou para executar, quantas imagens foram utilizadas para gerar o mosaico, quais as vantagens.

## X. COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS

Comparação do SIFT e dos algoritmos do TerraLib

## XI. CONCLUSÃO

Conclusão aqui.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Canhoto; E. H. Shiguemori; M. A. P. Domiciano, "Image sequence processing applied to autonomous aerial navigation," *Signal and Image Processing Applications*, 2009.
- [2] E. H. Shiguemori G. A. M. Goltz, "Aplicação do algoritmo sift em imagens de navegação autônoma," *Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do IEAv*, 2008.
- [3] David G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, 2004.
- [4] D. Fedorov, "Sistema semi-automático de registro e mosaico de imagens," M.S. thesis, INPE, 2002.
- [5] DPI/INPE, "Terralib website," <http://www.terralib.org/>, 2012.
- [6] C. Schmid; R. Mohr; C. Bauckhage, "Evaluation of interest point detectors," *International Journal of Computer Vision*, 2000.
- [7] *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, Elsevier Inc, 2007.
- [8] H. P. Moravec, "Towards automatic visual obstacle avoidance," *5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1977.
- [9] *The Perception of the Visual World*, Riverside Press, 1950.
- [10] J.J. Gibson, "On the analysis of change in the optic array," *Scandinavian J. PsychoL* 18, 1977.
- [11] B. Horn; B. Schunck, "Determining optical flow," *Artificial Intelligence* 17, 1981.
- [12] David G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," *International Conference on Computer Vision*, 1999.
- [13] A. Vedaldi, "Sift++: A lightweight c++ implementation of sift," <http://www.vlfeat.org/~vedaldi/code/siftpp.html>, 2011.
- [14] Fonseca L. M. G; Manjunath B. S., "Registration techniques for multi-sensor remotely sensed imagery," *PE&RS*, 1996.
- [15] F. Zhao; Q. Huang; W. Gao, "Image matching by normalized cross-correlation," *ICASSP*, 2006.
- [16] *Computer Graphics: Principles and Practice 2nd Edition in C*, Addison-Wesley, 1995.