

## Registro de imagens NOAA através de correlação de fase

Greice Martins de Freitas<sup>1</sup>  
Júlio César Dalla Mora Esquerdo <sup>2</sup>  
André Körbes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC/UNICAMP  
CP 6101 – CEP 13083-970 – Campinas – SP, Brasil  
greice, korbes@dca.fee.unicamp.br

<sup>2</sup> Embrapa Informática Agropecuária  
CP 6041 – CEP 13083-000 – Campinas – SP, Brasil  
julio@cnptia.embrapa.br

**Abstract.** This paper describes an automatic method for image alignment based on the Fourier transform. The method is based on some properties of the transform that allows matching of images and detection of rotation, scale and translation by a global evaluation of a pair of images. These properties were applied on a set of images of the state of São Paulo acquired from the NOAA satellites and matched against a reference grid supplied by IBGE, generating new images by applying the strictly necessary transforms for an alignment. Comparing the borders of the new images to the supplied grid the method achieves an RMS error of 1.2 pixels.

**Keywords:** remote sensing, image processing, Phase Correlation sensoriamento remoto, processamento de imagens, Correlação de Fase.

### 1. Introdução

A correção geométrica de imagens é fundamental em estudos envolvendo a análise da superfície terrestre. Imagens distorcidas ou sem correspondência geométrica não podem ser comparadas a outras bases de dados, como imagens de qualquer natureza, informações de GPS e malhas vetoriais, além de não poderem ser inseridas em Sistemas de Informações Geográficas.

Nas estações de recebimento, as imagens de satélite são normalmente georreferenciadas a partir de métodos baseados em parâmetros orbitais, que propagam coordenadas e transformam a imagem em uma projeção cartográfica conhecida. Esse processo nem sempre é preciso devido a modelos orbitais imprecisos, variações de atitude dos satélites e atraso dos relógios (EMERY; BROWN; NOWAK, 1989).

Para corrigir o problema, as imagens resultantes desse processo passam pela técnica do registro de imagens, definido como o processo que determina a mais precisa correspondência geométrica entre duas ou mais imagens (FLUSSER; SUK, 1994; MAO et al., 2001). O método é baseado em pontos de controle, que são pares de coordenadas coletados em feições geográficas conhecidas, presentes em uma imagem e em uma base cartográfica precisa. No entanto, esta atividade exige um intenso trabalho manual por conta do elevado número de pontos de controle necessários para a correção de uma única imagem. O problema se agrava quando se trabalha com séries temporais contendo um número elevado de imagens a serem corrigidas.

Métodos alternativos de correção geométrica de imagens vêm sendo propostos para automatizar esse processo e evitar qualquer intervenção humana. (EUGENIO; MARQUES, 2003) propõem um método de registro baseado na extração de contornos da imagem e minimização da distância a um contorno de referência. (MOIGNE; CAMPBELL; CROMP, 2002) utilizam decomposição e correlação da transformada Wavelet das imagens. Os pontos de máximo da transformada são tomados como pontos de controle e assim a técnica consegue corrigir distorções de rotação e translação. Estas técnicas são dependentes dos contornos da imagem, assim apresentam falhas na ausência de feições geográficas significativas como regiões costeiras e com grandes corpos d'água, além de falharem também no caso de oclusão por nuvens.

O registro por Correlação de Fase (CASTRO; MORANDI, 1987; REDDY; CHATTERJI, 1996) destaca-se pela rapidez de processamento e por tratar a imagem no domínio da frequência, desta forma o método não é afetado por variações na intensidade da luz e eventuais ruídos (AGGARWAL; DAVIS; MARTIN, 1981), além de distorcer não apenas imagens rotacionadas e transladadas mas também imagens com variação na escala.

O objetivo deste estudo foi aplicar a técnica de correlação de fase nos dados do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), a bordo da série de satélites NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration). Embora designadas para fins meteorológicos e oceanográficos que não demandam elevada precisão geométrica, as imagens AVHRR têm sido utilizadas para estudos temporais em terra, onde é fundamental a adoção de métodos de georreferenciamento automáticos e precisos.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Correlação de Fase

Uma das ferramentas mais utilizadas em processamento de imagens é a transformada de Fourier, a qual permite a visualização da imagem analisada no domínio da frequência. Na prática, a utilização de algoritmos para execução da Transformada Rápida de Fourier (FFT) (HUANG; TSAI, 1981; ALLINEY; MORANDI, 1986) juntamente com os teoremas de convolução e da correlação permitem, de maneira simplificada, a implementação das técnicas de filtros para eliminação de ruídos e interferências das imagens (ou de uma maneira geral, sinais) em análise.

Este método baseia-se na propriedade de deslocamento da transformada de Fourier: sejam  $f_1$  e  $f_2$  duas imagens que diferem apenas por um deslocamento  $(x_0, y_0)$ . As transformadas de Fourier correspondentes são  $F_1$  e  $F_2$  e são relacionadas por:

$$F_2(\xi, \eta) = \exp^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} F_1(\xi, \eta) \quad (1)$$

O produto cruzado de duas imagens  $f$  e  $f'$  com transformada de Fourier  $F$  e  $F'$  é definido por:

$$\frac{F(\xi, \eta)F'^*(\xi, \eta)}{|F(\xi, \eta)F'(\xi, \eta)|} = \exp^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} \quad (2)$$

onde  $F^*$  denota o complexo conjugado de  $F$ . Esta propriedade garante que a fase do produto cruzado é equivalente à diferença de fase entre as duas imagens. Tomando a inversa da transformada de Fourier obtém-se uma imagem com valores aproximados a zero exceto nas coordenadas que têm o deslocamento necessário para o registro ótimo da imagem (REDDY; CHATTERJI, 1996).

#### 2.1.1. Imagens com rotação

Seja  $f_2$  uma imagem de  $f_1$  transladada por  $(x_0, y_0)$  e rotacionada por um ângulo  $\theta$ , então:

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \theta + y \sin \theta - x_0, -x \sin \theta + y \cos \theta - y_0) \quad (3)$$

Pela propriedade (1), as transformadas das imagens  $f_1$  e  $f_2$  estão relacionadas por:

$$F_2(\xi, \eta) = \exp^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} * F_1(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta, -\xi \sin \theta + \eta \cos \theta) \quad (4)$$

Sejam  $M_1$  e  $M_2$  as magnitudes de  $F_1$  e  $F_2$ , temos:

$$M_2(\xi, \eta) = M_1(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta, -\xi \sin \theta + \eta \cos \theta) \quad (5)$$

Pode-se notar que as duas imagens diferem apenas por um ângulo  $\theta$ . Este ângulo pode ser determinado transformando a imagem para coordenadas polares, isto é:

$$M_2(\rho, \theta) = M_1(\rho, \theta_0 - \theta) \quad (6)$$

Desta forma, encontrar  $\theta$  reduz-se à utilização da correlação de fase em coordenadas polares.

### 2.1.2. Imagens com escala

Seja  $f_2$  uma imagem de  $f_1$  com fatores de escala  $(a, b)$  nas direções horizontal e vertical, respectivamente. De acordo com a propriedade de escala da transformada de Fourier, as transformações de  $f_1$  e  $f_2$  são relacionadas por:

$$F_2(\xi, \eta) = \frac{1}{|ab|} * F_1\left(\frac{\xi}{a}, \frac{\eta}{b}\right) \quad (7)$$

Convertendo os eixos para a escala logarítmica (CASASENT; PSALTIS, 1976), a escala reduz-se a um movimento de translação:

$$F_2(\log \xi, \log \eta) = F_1(\log \xi - \log a, \log \eta - \log b) \Rightarrow F_2(x, y) = F_1(x - c, y - d) \quad (8)$$

onde  $x = \log \xi$ ,  $y = \log \eta$ ,  $c = \log a$  e  $d = \log b$ .

## 2.2. Experimentos

As imagens AVHRR/NOAA foram obtidas do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI). O método proposto neste estudo corrige uma imagem alvo a partir de uma imagem referência (com deslocamentos mínimos). As imagens alvo foram processadas no software ENVI a partir de um método automático baseado em parâmetros orbitais, que resulta em erros de posicionamento de até 10 pixels. A imagem referência foi processada no mesmo software, porém foi corrigida manualmente por meio de pontos de controle, adotando-se como referência uma malha vetorial política do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). O erro quadrático médio (RMS) da imagem referência ficou em 0,5 pixel. A área de abrangência das imagens foi reduzida ao estado de São Paulo, entre as latitudes 19°38'S e 25°27'S e longitudes 44°01'W e -53°14'W.

O algoritmo de correlação de fase foi implementado em linguagem Matlab, assim as imagens processadas pelo software ENVI foram exportadas para o formato Bitmap para evitar perda de informação e processadas no ambiente Matlab tomando a imagem de referência para registrar as demais.

Os testes foram feitos em 15 imagens obtidas em dias diferentes e sem ruídos e mais 5 imagens com cobertura parcial de nuvens. Cada imagem registrada teve sua borda extraída por filtro de Sobel e o RMS foi calculado em relação à malha vetorial do contorno do estado de São Paulo.

## 2.3. Resultados e Discussão

As figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, recortes do litoral e do interior do estado e, em vermelho, a malha vetorial fornecida pelo IBGE, mostrando o contorno desejado. Podemos notar que a imagem, assim como outras da base de dados, foi registrada com erro inferior a um

pixel no interior, sendo este o resultado desejado, entretanto, no litoral este erro é superior a um pixel.

O RMS médio calculado foi de 1.2 pixels. Este erro deve-se principalmente à distorção radial das imagens, uma vez que o registro ideal também precisa lidar com a curvatura terrestre e o método proposto ajusta apenas distorções de rotação, translação e escala.

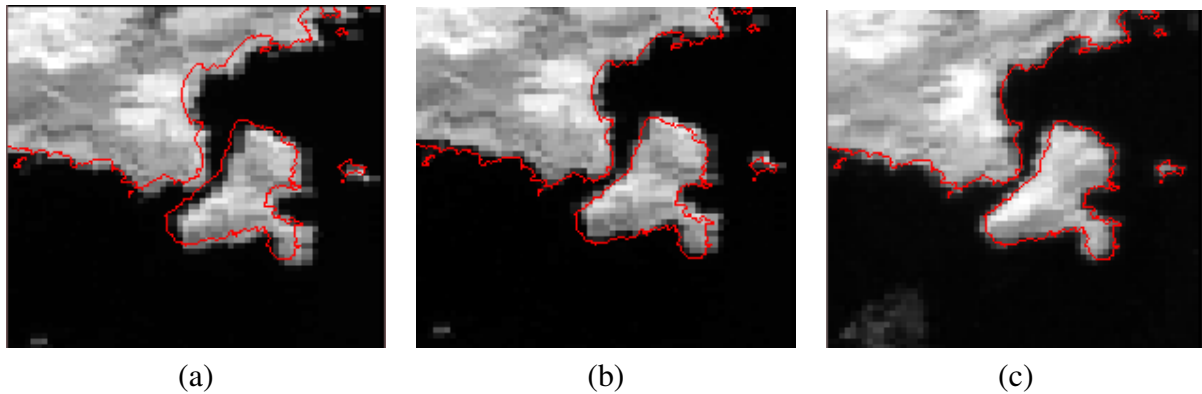


Figura 1: (a) Imagem sem registro, (b) após a correlação de fase, (c) imagem de referência.

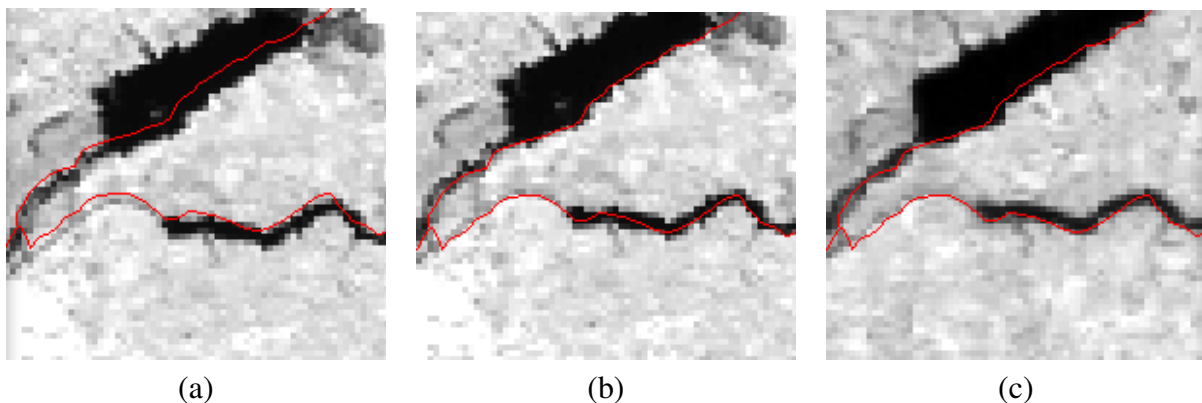


Figura 2: (a) Imagem sem registro, (b) após a correlação de fase, (c) imagem de referência.

O resultado da correlação de fase para imagens com nuvens não é tão imediato. A imagem com os valores de deslocamento possui mais de um pico significativo para este caso e nem sempre o pico mais alto é o valor de deslocamento correto para a imagem, portanto os deslocamentos precisam ser avaliados.

## 2.4. Conclusão

Devido à grande importância do registro de imagens de sensoriamento remoto para o monitoramento da superfície terrestre, o presente trabalho propôs um algoritmo de correlação de fase para o registro automático de imagens do satélite geoestacionário NOAA. A correlação de fase é baseada na propriedade do deslocamento da Transformada de Fourier e se dá no domínio da frequência, desta forma a técnica não é afetada por pequenos ruídos e variações na iluminação.

Os testes foram realizados com recortes de imagens NOAA abrangendo o estado de São Paulo e, para validar os resultados, uma malha vetorial do estado fornecida pelo IBGE foi utilizada. Os testes mostraram que as imagens foram bem corrigidas no interior do estado, onde o RMS foi inferior a um pixel, entretanto, no litoral este erro subiu para mais de um pixel, sendo

o erro médio igual a 1.2 pixels. Este erro deve-se principalmente às distorções radiométricas que a correlação de fase não corrige.

Como próximos trabalhos pretendemos corrigir também a distorção radiométrica das imagens e automatizar a correção para o caso de imagens com cobertura parcial de nuvens.

### Referências

AGGARWAL, J.; DAVIS, L.; MARTIN, W. Correspondence processes in dynamic scene analysis. *IEEE Proceedings*, v. 69, p. 562–572, maio 1981.

ALLINEY, S.; MORANDI, C. Digital image registration using projections. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, v. 8, n. 2, p. 222–233, 1986. ISSN 0162-8828.

CASASENT, D.; PSALTIS, D. Position oriented and scale invariant optical correlation. In: *Applied Optics*. [S.l.: s.n.], 1976. v. 15, p. 1793–1799.

CASTRO, E. D.; MORANDI, C. Registration of translated and rotated images using finite fourier transforms. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, v. 9, n. 5, p. 700–703, 1987. ISSN 0162-8828.

EMERY, W.; BROWN, J.; NOWAK, Z. Avhrr image navigation - summary and review. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 4, p. 1175–1183, ago. 1989.

EUGENIO, F.; MARQUES, F. Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Publication*, v. 41, n. 12, p. 2869–2880, dec 2003.

FLUSSER, J.; SUK, T. A moment-based approach to registration of images with affine geometric distortion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 32, p. 382–387, mar. 1994.

HUANG, T.; TSAI, R. Y. Image sequence analysis. In: \_\_\_\_\_. Berlin: Springer-Verlag, 1981. cap. 1.

MAO, Z. et al. Automatic registration of seawifs and avhrr imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, p. 1725–1735(11), 2001. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/tandf/tres/2001/00000022/00000009/art00007>>.

MOIGNE, J. L.; CAMPBELL, W.; CROMP, R. An automated parallel image registration technique based on the correlation of wavelet features. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 8, p. 1849–1864, Aug 2002. ISSN 0196-2892.

REDDY, B.; CHATTERJI, B. An fft-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *Image Processing, IEEE Transactions, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 8, p. 1266–1271, Aug 1996. ISSN 1057-7149.