

Métodos baseados em otimização para o delineamento semiautomático de rodovia

Aluir Porfírio Dal Poz¹
Érico Fernando de Oliveira Martins²

¹ Universidade Estadual Paulista – UNESP/FCT
19050-350 – Presidente Prudente - SP, Brasil
aluir@fct.unesp.br

² Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT/Faciex
Sinop - MT, Brasil
profericomartins@unemat.br

Abstract. This paper presents two semiautomatic road extraction approaches from aerial and satellite images. In the first approach, an active contour (snake) is used to model the road. This active contour is described by energy functional that contains external and internal forces. The internal forces allow the contour to stretch or bend at the specific point. The external image forces attract the contour to significant features in image. After the initialization, the snake moves until its energy is minimized. In order to compute the minimum of the energy function for the whole snake, there have been developed various techniques. One commonly used minimizing approach is based on a variational method (Euler-Lagrange equation). In the second approach, a generic road model is formulated using six basic road properties, describing photometric (e.g.: roads contrast with the background and their gray levels do not change much) and geometric (e.g.: roads are smooth curves and their local curvatures are upper bound) properties of roads. The generic road model is solved sequentially by a dynamic programming algorithm. A few seed points describing coarsely the road need to be provided by the operator. The mathematical fundamentals of the methods and examples are presented and discussed in this paper.

Palavras-chave: road extraction, active contour, dynamic programming, extração de rodovia, contorno ativo, programação dinâmica.

1. Introdução

A coleta e a atualização de dados espaciais são geralmente realizadas através de imagens aéreas e de satélite. Diversas pesquisas sobre extração automática e semiautomática de rodovias em imagens digitais têm sido realizadas por especialistas das áreas de Visão Computacional e Fotogrametria Digital, desde a década de 70. Trabalhos pioneiros nesta área são encontrados em Bajcsy e Tavakoli (1976) e Quam (1978). O critério mais comum usado para classificar os métodos de extração de rodovias está relacionado com a necessidade ou não de interferência do operador humano com o sistema de extração, dando origem aos denominados métodos automáticos e semiautomáticos. É possível identificar dois esquemas básicos de extração semiautomática de rodovias. Num primeiro, o operador necessita fornecer a posição e a direção da rodovia em um ponto inicial, a partir do qual o restante da rodovia é extraído. Normalmente se empregam algoritmos baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade (tom de cinza) extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (Quam, 1978; Vosselman e De Knecht, 1995; Kim et al., 2004; Lin et al., 2008) ou na análise de bordas anti-paralelas (Nevatia e Babu, 1980; Dal Poz et al., 2000; Zhou et al., 2006, Miao et al., 2014) ou na combinação entre ambos princípios (McKeown e Denlinger, 1988). Num segundo, o operador necessita fornecer alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. O polígono inicial pode então ser refinado através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica ou no princípio do contorno ativo ou *snakes* (Merlet e Zerubia, 1996; Gruen e Li, 1997; Neuenschwader et al., 1997; Li, 1997; Dal Poz et al., 2000; Yang e Ke-Ju, 2009; Dal Poz et al., 2010; Göpfert et al., 2011; Dal Poz et al., 2012, Anil e Natarajan, 2010). Se estes métodos forem combinados com métodos de detecção automática de pontos sementes, como um encontrado em Zlotnick e Carnine (1993), a metodologia resultante poderia ser considerada como automática. Entretanto, uma

metodologia originalmente desenvolvida para ser totalmente automática é apresentada em Baumgartner et al. (1997, 1999). Neste método, o contexto (isto é, relações entre as rodovias e outros objetos) e a análise de bordas ao longo do espaço-escala são combinados para extrair automaticamente as rodovias. Outros exemplos de métodos automáticos são encontrados em Barzohar e Cooper (1996), Ruskoné et al. (1994), Hu (2004), Kirthika e Mookambiga (2011) e Shi et al. (2014).

Neste artigo são comparados dois métodos para extração semiautomática de rodovias em imagens digitais. Estes métodos de extração são brevemente apresentadas na seção 2. O primeiro método baseia-se no princípio de contorno ativo ou *snakes*. Na sequência é apresentado um método baseado num modelo explícito de rodovia. Os resultados experimentais obtidos a partir de dados reais e sintéticos são apresentados na seção 3. Finalmente, as principais conclusões são apresentadas na seção 4.

2. Métodos para a extração de rodovias

2.1 Contorno ativo

O trabalho pioneiro nesta área é encontrado em Kass et al. (1987). Desde então, muito foi feito no campo teórico e prático. O conceito de contorno ativo é baseado na modelagem de contornos e linhas através de uma função de energia que combina energias interna e externa. A solução da função energia é obtida por otimização.

2.1.1 Função de energia

Snakes ou modelo de contorno ativo é um modelo deformável de segunda ordem, com parametrização unidimensional (o comprimento s da curva) e com 2 graus de liberdade de deformação, isto é, as coordenadas cartesianas ($x(s)$, $y(s)$) de um ponto da curva que modela um dado contorno. Sendo ξ uma curva plana que age como um modelo deformável sobre uma imagem digital, representada por uma função vetorial $v(s) = (x(s), y(s))$, que mapeia o parâmetro s pertencente ao intervalo $[a, b]$ para os pontos ($x(s)$, $y(s)$) na imagem digital, a energia de deformação da *snakes* é dada na forma (Kass et al., 1987):

$$E(v) = \int_a^b (w_1(s)|v_s(s)|^2 + w_2(s)|v_{ss}(s)|^2) ds + \int_a^b w(s)P(v(s)) ds = \lambda E_{\text{int}}(v) + (1 - \lambda) E_{\text{ext}}(v) \quad (1)$$

onde:

- $|x|$: significa norma do vetor x ;
- v : notação simplificada para a função vetorial $v(s)$;
- $E_{\text{int}}(v)$: energia interna da *snakes*;
- $E_{\text{ext}}(v)$: energia externa da *snakes*;
- λ : parâmetro que controla a importância relativa dos termos $E_{\text{int}}(v)$ e $E_{\text{ext}}(v)$;
- v_s : primeira derivada da função v em relação ao parâmetro s ; v_s é conhecida como termo de 1º ordem e é responsável pelo controle da flexibilidade da *snakes*;
- v_{ss} : segunda derivada da função v em relação ao parâmetro s ; v_{ss} é conhecida como termo de 2º ordem e é responsável pelo controle de rigidez da *snakes*;
- $P(v(s))$: função penalidade;
- $w_1(s)$ e $w_2(s)$: pesos dos termos de 1º e 2º ordem, respectivamente;
- $w(s)$: peso da função penalidade.

O primeiro termo (ou primeira integral) da equação 1 está relacionado com a energia interna $E_{\text{int}}(v)$ da *snakes*, responsável pelo controle dos parâmetros de elasticidade e rigidez da curva, através dos termos de primeira e de segunda ordem, respectivamente, cujos pesos $w_1(s)$

e $w_2(s)$ controlam a importância relativa de ambos os termos. O termo de primeira ordem sugere um comportamento da *snakes* segundo uma membrana elástica, onde as forças aplicadas sobre o contorno geram deformações que deixam de existir quando estas forças são removidas. O termo de segunda ordem sugere um comportamento semelhante a uma haste ou placa fina, onde a rigidez inerente evita que a *snakes* se dobre. De uma forma geral, à medida que a razão $w_1(s)/w_2(s)$ varia de zero ao infinito, a curva *snakes* varia de uma *spline* cúbica a uma linha poligonal.

O parâmetro λ , proveniente dos pesos $w_1(s)$, $w_2(s)$ e $w(s)$, é o parâmetro de balanceamento entre as energias interna e externa. O parâmetro λ assume valores no intervalo $[0;1]$. Quando $\lambda \approx 1$, o modelo produz soluções pouco sensíveis aos ruídos da imagem e, do contrário, quando o valor de λ for próximo ou igual a zero, o modelo produz uma solução que é eficiente na captura das feições de interesse a serem extraídas, mas ao mesmo tempo torna-se também muito vulnerável aos ruídos da imagem.

O termo $w(s)P(v(s))$ é responsável pela atração da curva *snakes* por parte da feição de interesse utilizando a energia da imagem, isto é, a energia externa ($E_{ext}(v)$). $E_{ext}(v)$ depende do tipo de feição a ser extraída. Quando a feição a ser extraída tem característica de linha, adota-se a soma dos quadrados dos níveis de cinza $G(x(s), y(s))$ dos pontos $v(s)$, multiplicada por uma constante w_{line} , isto é (considerando $G(x(s), y(s))$ contínua):

$$E_{line}(v) = \int_a^b P_{line}(v(s)) ds = w_{line} \int_a^b G^2(x(s), y(s)) ds \quad (2)$$

Ao contrário, quando a feição de interesse possui características de borda, o termo de energia externa é definido como segue:

$$E_{edge}(v) = \int_a^b P_{edge}(v(s)) ds = w_{edge} \int_a^b |\nabla G(x(s), y(s))|^2 ds \quad (3)$$

onde, $\nabla G(x(s), y(s))$ é o vetor gradiente na posição $(x(s), y(s))$ e w_{edge} é uma constante.

2.1.2 Solução da equação de energia

A solução da equação de energia (equação 1) consiste em determinar a função v que melhor representa o contorno selecionado, correspondendo ao mínimo global da função de energia. Várias técnicas de otimização foram desenvolvidas para esta finalidade. Uma solução comumente utilizada é encontrada em Kass et al. (1987), consistindo na utilização de um método variacional (equação de Euler-Lagrange) para resolver numericamente a função de energia. Este método requer o fornecimento, por parte de um operador, de vários pontos sementes ao longo do contorno selecionado, a exemplo de uma rodovia numa imagem digital.

2.2 Modelo explícito de rodovia

O modelo matemático de rodovia pode ser formulado levando em conta propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia. Considerando agora que uma rodovia pode ser representada (Figura 1) por um polígono $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (x_i, y_i)$ é o i -ésimo vértice, o seguinte par de expressões matemáticas pode ser usado para modelar a entidade rodovia (Li, 1997; Gruen e Li, 1997):

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - \beta Ep_2 + \gamma Ep_3)[1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})]) / \Delta S_i = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (4)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

onde:

- E : corresponde à função objetivo (equação 4), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) do polígono que representa a rodovia;
- C_i : devido à sua definição (equação 5), também é denominada de injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$;
- Ep_1 , Ep_2 e Ep_3 : funções baseadas em propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i (Figura 1);
- ΔS_i : distância entre os vértices $i-1$ e i (Figura 1); e
- β e γ : constantes positivas.

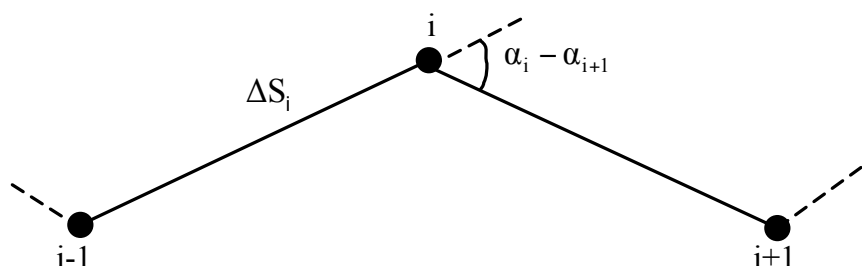


Figura 1. Polígono representando a rodovia.

O modelo matemático 1 pode ser eficientemente resolvido através do algoritmo a ser brevemente apresentado na próxima subseção.

2.2.2 Solução do modelo matemático de rodovia

Como mostra a equação 1, nem todos os vértices estão inter-relacionados simultaneamente. Nesse caso, a programação dinâmica é um algoritmo eficiente para resolver o problema de otimização (Ballard e Brown, 1982).

À primeira vista, a descrição de uma rodovia através de um polígono pode ser realizada com vértices equidistantes. Como nesse caso as posições dos vértices não estão geralmente relacionadas com a forma da curva, a quantidade de pontos é geralmente bem maior que a necessária para descrevê-la. Uma solução mais adequada é apresentada em Li (1997). A Figura 2 ilustra o princípio do processo de otimização usando programação dinâmica. Inicialmente, são fornecidos vários pontos sementes, cujas localizações e distribuição são grosseiras (Figura 2(a)). Ligando-se estes pontos, obtém-se a primeira aproximação para a rodovia. O processo de refinamento do polígono inicial é iterativo, como segue:

- 1ª iteração: entre cada par de pontos sementes é inserido um novo ponto através de interpolação linear (Figura 2(b)). As linhas tracejadas (Figuras 2(b) e 2(c)) representam as janelas de busca. O procedimento de otimização através da programação dinâmica gera uma nova aproximação para a rodovia (Figura 2(c)); e
- demais iterações: procedimentos idênticos são repetidos nas demais iterações.

O processo converge quando, numa determinada iteração, a otimização de todos os novos pontos inseridos linearmente gera apenas pontos colineares aos preexistentes, sendo também

estes últimos pontos, alvo do mesmo processo global de otimização. O resultado após a convergência é ilustrado na Figura 2(d).

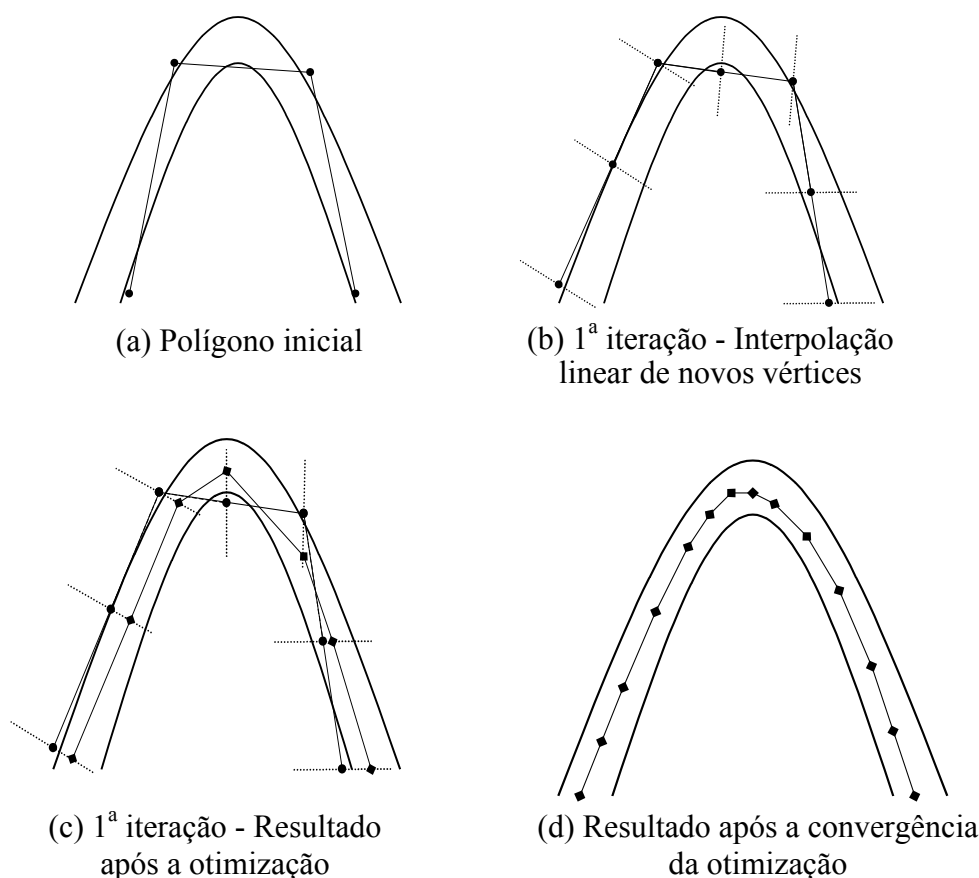


Figura 2. Ilustração do processo de otimização (Dal Poz et al., 2000).

3. Exemplos

Os métodos apresentados na Seção 2 foram implementados em linguagem Borland C++ para o ambiente Windows-PC. Visando à avaliação dos métodos apresentados, foram realizados experimentos com dados reais e sintéticos. Uma imagem sintética (642x350 *pixels*) de média resolução foi gerada, na qual pode ser observada uma rodovia de largura média de 5 *pixels* e com forma relativamente ondulada. Essa imagem foi corrompida com o ruído *salt & pepper*. Foi utilizada uma imagem real (500x500 *pixels*) de média resolução, sendo que cada *pixel* corresponde à aproximadamente 2m no terreno.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos usando a imagem sintética. Em ambos os casos os pontos sementes usados para inicializar o processo de extração são mostrados sobre as imagens. Todos os pontos sementes são fornecidos por um operador, que faz uso de sua habilidade natural em reconhecer na imagem os objetos de interesse (rodovias) e em identificar alguns pontos sementes descrevendo aproximadamente as rodovias. A tarefa tediosa e precisa de delinear é então deixada a cargo dos algoritmos computacionais de extração, cujos resultados mostram-se bastante satisfatórios. Contudo, tendo por referência o eixo central da rodovia, pode ser observado que o método baseado em programação dinâmica propiciou um resultado ligeiramente inferior.

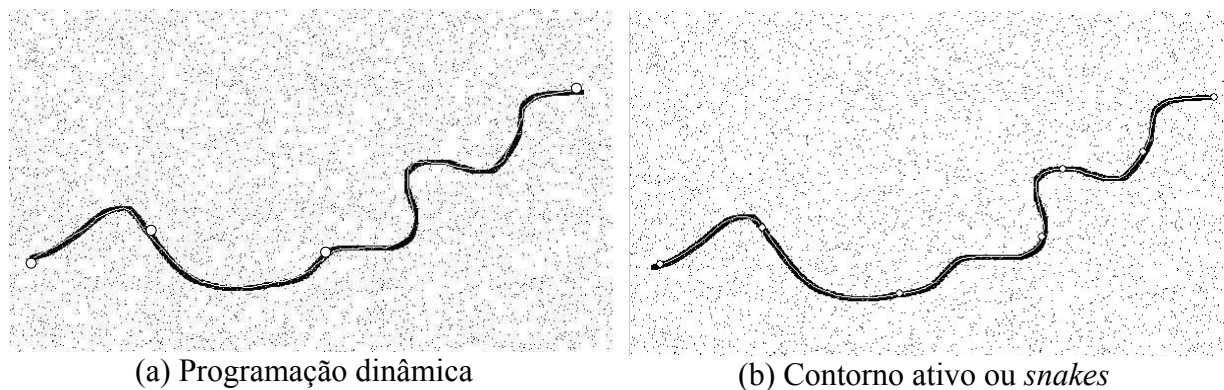


Figura 4. Resultados usando a imagem sintética.

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para a imagem real. Como no exemplo anterior, as rodovias extraídas e os pontos sementes usados estão sobrepostos na imagem de entrada. O conteúdo dessa imagem é bastante desfavorável, notando-se que a rodovia é bastante irregular e há várias árvores obstruindo a rodovia. Analisando-se os resultados, verifica-se que o desempenho foi satisfatório para ambos os métodos. Provavelmente, o mecanismo de controle destes dois métodos, que são baseados num conjunto de pontos sementes distribuídos ao longo das rodovias, devem ter favorecido os respectivos desempenhos no processamento desse caso bastante desfavorável.

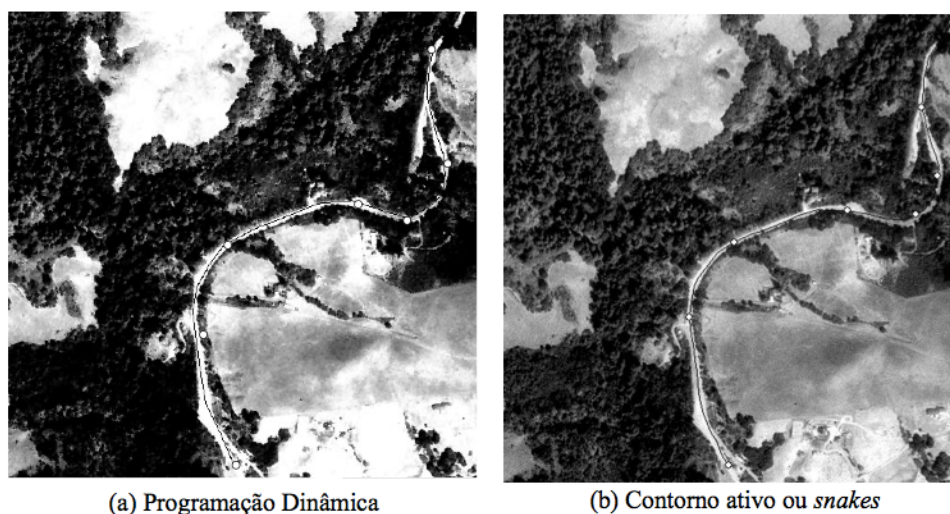


Figura 5. Resultados usando a imagem real.

3. Conclusões

Neste artigo foram apresentados dois métodos para extrair rodovias de imagens aéreas e de satélite. Estes métodos podem ser utilizados na captura semiautomática de dados espaciais. O operador realiza a tarefa de reconhecimento dos objetos de interesse e identifica e mede alguns pontos sementes sobre os mesmos, ficando a cargo dos algoritmos computacionais a tarefa demorada e precisa de delineamento. Os resultados obtidos, embora tenham sido baseados em poucos experimentos, evidenciam que ambos os métodos foram eficientes na tarefa de delineamento de rodovias.

Agradecimentos

Este artigo contou com apoio do CNPq, FAPESP e FAPMAT, na forma de projetos de auxílios à pesquisa e bolsas de estudo.

Referências

- Amini, A.; Weymouth, T.; Jain, R. Using dynamic programming for solving variational problems in vision. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, n. 12, p. 855-867, 1990.
- Anil, P. N.; Natarajan, S. A novel approach using active contour model for semi-automatic road extraction from high resolution satellite imagery. In: Second International Conference on Machine Learning and Computing, 2010. **Anais...** p. 263 – 266.
- Bajcsy, R.; Tavakoli, M. Computer recognition of roads from satellite pictures. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, N. 6, p. 76-84, 1976.
- Ballard, D. H.; Brown, C. M. **Computer Vision**, 1982.
- Barzohar, M.; Cooper, D. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, n. 18, p. 707-721, 1996.
- Baumgartner, A.; Steger, C.; Mayer, H.; Eckstein, W.; Ebner, H. Update of road in GIS from aerial imagery: verification and multi-resolution extraction. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1996. Viena. **Anais...** p. 53-58.
- Baumgartner, A.; Steger, C.; Mayer, H.; Eckstein, W. Multi-resolution, semantic objects, and context for road extraction. In: Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, 1997. Basel. **Anais...** p. 140-156.
- Baumgartner, A.; Steger, C.; Mayer, H.; Eckstein, W.; Ebner, H. Automatic road extraction in rural areas. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1999. Munique. **Anais...** p. 107-112.
- Dal Poz, A. P.; Gyftakis, S.; Agouris, P. Semi-automatic road extraction: Comparison of methodologies and experiments. In: DC 2000 ASPRS Annual Conference, 2000. Washington, **Anais...** CD-ROM.
- Dal Poz, A. P.; Gallis, R. B. A.; Silva, J. F. C. Three-dimensional semiautomatic road extraction from a high-resolution aerial image by dynamic programming optimization in the object-space. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. v. 7, n. 4, p. 796-800, 2010.
- Dal Poz, A. P.; Gallis, R. B. A.; Silva, J. F. C.; Martins, E. F. O. Object-space road extraction in rural areas using stereoscopic aerial images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. v. 9, n. 4, p. 654-658, 2012.
- Fiset, R.; Cavayas, F.; Mouchot, M. C.; Solaiman, B.; Desjardins, R. Map-image matching using a multi-layer perceptron: the case of the road network. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 53, p. 76-84, 1998.
- Göpfert, J.; Rottensteiner, F.; Heipke, C. Using snakes for the registration of topographic road database objects to ALS features. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 66, n. 6, p. 858-871, 2011.
- GRUEN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, N. 63, p. 985-995, 1997.
- HU, X.; TAO, C. V.; HU, Y. Automatic road extraction from dense urban area by integrated processing of high resolution imagery and LiDAR data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004. **Anais...** CD-ROM.
- Kass, M.; Witkin, A.; Terzopoulos, D. Snakes: Active contour models. In: 1st International Conference on Computer Vision, 1987. London. **Anais...** p. 259-268.
- Kim, T.; Park, S. R.; Kim, M. G.; Jung, S.; Kim, K. O. Tracking road centerlines from high resolution remote sensing images by least squares correlation matching. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 70, n. 12, p. 1417-1422, 2004.

Kirthika, A.; Mookambiga, A. Automated Road Network Extraction using artificial neural network. In.: IEEE International Conference on Recent Trends in Information Technology, 2011. **Anais...** p. 1061-1065.

Li, H. **Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images**. 1997. Tese, (Institute of Geodesy and Photogrammetry) – ETH, Zurich, Suíça.

Lin, X.; Zhang, J.; Liu, Z.; Shen, J. Integration method of profile matching and template matching for road extraction from high resolution remotely sensed imagery. In.: International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, 2008. **Anais...** CD-ROM.

MCKEOWN, D. M.; DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition, 1998. Ann Arbor. **Anais...** p. 662-672.

Merlet, N.; Zerubia, J. New prospects in line detection by dynamic programming. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 18, n. 4, 426-431, 1996.

Miao, Z.; Wang, B.; Shi, W.; Zhang, H. A semi-automatic method for road centerline extraction from vhr images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 11, p. 1856 – 1860, 2014.

Neuenschwader, W. M.; Fua, P.; Iverson, L.; Szekely, G.; Kubler, O. Ziplock snakes. **International Journal of Computer Vision**, v. 25, n. 6, p. 191-201, 1997.

Nevatia, R.; Babu, K. R. Linear feature extraction and description. **Computer Graphics and Image Processing**, n. 13, p. 257-269, 1980.

Plietker, B. Semiautomatic revision of street objects in ATKIS database DLM 25/1. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1994. **Anais...** p. 311-317.

Quam, L. H. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: Image Understanding Workshop, 1978. **Anais...** p. 51-55.

Ruskoné, R.; Airault, S.; Jamet, O. A road extraction system using the connectivity properties of the network. **Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung**, n. 5, p. 174-180, 1994.

Shi, W.; Miao, Z.; Debayle, J. An integrated method for urban main-road centerline extraction from optical remotely sensed imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 6, p. 3359 – 337, 2014.

Vosselman, G.; De Gunst, M. Updating road maps by contextual reasoning. In: 2nd Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 1997. Ascona. **Anais...** CD-ROM.

Vosselman, G.; De Knecht, J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering. In: Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 1995. **Anais...** p. 265-274.

Williams, D. J.; Shah, M. A fast algorithm for active contours and curvature estimation. **CVGIP: Image Understanding**, n. 55, p. 14-26, 1992.

Yang, H.; Ke-Ju, K. Road extraction from remote sensing imagery based on road tracking and ribbon snake. In.: Pacific-Asia Conference on Knowledge Engineering and Software Engineering, 2009. Shenzhen. **Anais...** p. 201-204.

Zhou, J.; Bischof, W. F.; Caelli, T. Road tracking in aerial images based on human - computer interaction and Bayesian filtering. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 61, n. 1, p. 108- 124, 2006.

Zlotnick, A.; Carnine, P. D. Finding roads seeds in aerial images. **CVGIP: Image Understanding**, n. 57, p. 243-260, 1997.