

Extração Semi-Automática de Rodovias Usando Programação Dinâmica

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ¹

PEGGY AGOURIS²

¹UNESP- Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsem, 305, 19060-9000 Presidente Prudente, SP, Brasil

aluir@prudente.unesp.br

²Dept. of Spatial Information Science and Engineering - University of Maine
5711 Boardman Hall, Orono, Maine 04469-5711, USA

peggy@spatial.maine.edu

Resumo. Este artigo apresenta um método de extração semi-automática de rodovias em imagens de satélite ou em fotografias aéreas digitalizadas, visando a captura e atualização de base de dados de SIG (Sistema de Informação Espacial). Basicamente, um modelo genérico de rodovia é formulado usando 6 propriedades básicas de rodovia, sendo resolvido através do algoritmo de programação dinâmica. Alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a rodovia devem ser fornecidos pelo operador. Os fundamentos matemáticos do método e os resultados experimentais são apresentados e discutidos neste artigo.

Abstract. This paper presents a semi-automatic road extraction approach from aerial and satellite images for GIS (Geographic Information System) road network updating and capture. Basically, a generic road model is formulated using six basic road properties, which 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 experimental results are presented and discussed in this paper.

1 Introdução

A coleta e a atualização de dados para SIG são geralmente realizadas através de fotografias aéreas e imagens de satélite. Diversas pesquisas sobre extração automática e semi-automática 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 semi-automáticos. É possível identificar dois esquemas básicos de extração semi-automática 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 extraída. Normalmente se empregam algoritmos baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (Quam, 1978; Vosselman e de Knecht, 1995) ou na análise de bordas anti-paralelas (Nevatia and Babu, 1980, Dal Poz et al., 2000^a) 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* (Gruen e Li, 1997, Li, 1997, Dal Poz et al., 2000^a). 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, contexto (isto é, relações entre as rodovias e outros objetos) e 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) e Ruskoné et al. (1994).

A ausência de uma teoria unificada de visão computacional tem levado ao surgimento de uma grande variedade de técnicas. Como, até então, nenhuma solução automática provou ser competitiva frente a habilidade natural do operador humano, soluções semi-automáticas têm sido propostas combinando a habilidade de

interpretação do operador humano com a capacidade de medida do computador. A metodologia a ser apresentada neste artigo baseia-se numa solução de um modelo matemático geral de rodovia através do algoritmo de programação dinâmica proposta em Li (1997).

Na seção 2 são apresentados os fundamentos teóricos do método para extração semi-automática de rodovias através do algoritmo de programação dinâmica. Os resultados experimentais obtidos são apresentados na seção 3. Finalmente, a seção 4 apresenta as principais conclusões.

2 Extração de rodovias usando programação dinâmica

A metodologia de extração a ser apresentada consiste basicamente em resolver um modelo genérico de rodovia através de uma estratégia de otimização global usando programação dinâmica. Para inicializar o processo de extração é necessário que um operador forneça alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a rodovia. Este procedimento dá origem a um polígono inicial, a ser refinado através de uma estratégia iterativa. Em cada iteração novos vértices aproximados são interpolados linearmente entre os pares de vértices preexistentes. O polígono resultante é então refinado resolvendo o modelo geral de rodovia usando a estratégia de otimização global através de programação dinâmica. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento do polígono descrevendo a rodovia.

Nas próximas subseções serão apresentados o modelo geral de rodovia e alguns detalhes acerca de sua solução usando o algoritmo de programação dinâmica. Devido à limitação de espaço, o algoritmo de programação dinâmica não é apresentado neste artigo. Para uma compreensiva leitura sobre esta técnica, recomenda-se consultar Ballard e Brown (1982) e Li (1997).

2.1 Modelagem matemática de uma rodovia

A tarefa de extração de rodovias em uma imagem digital fica mais viável à medida que mais conhecimentos sobre rodovias forem incorporados num modelo genérico.

A modelagem matemática (Li, 1997; Grün; Li, 1997) da entidade rodoviária (figura 1) é desenvolvida com base em seis propriedades básicas, sendo três fotométricas e três geométricas. Primeiro, as propriedades fundamentais são apresentadas, juntamente com as respectivas formulações matemáticas. Posteriormente, o modelo geral é apresentado.

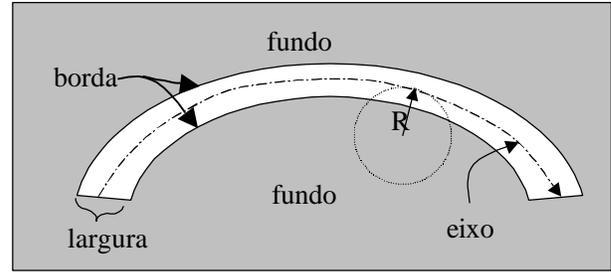


Figura 1 Elementos básicos de uma rodovia

A primeira propriedade é fotométrica e estatuí que os pixels de uma rodovia são mais claros que os de fundo. Isto significa que uma rodovia em uma imagem digital pode ser considerada como uma faixa estreita e contínua de alta intensidade de brilho, margeada por regiões (fundos) de baixa intensidade. Portanto, a soma dos quadrados dos tons de cinza da imagem ($G(x,y)$) ao longo da rodovia é máxima, isto é,

$$E_{p1} = \sum_i G^2(x_i, y_i) \rightarrow \text{Máx} \quad (1)$$

A segunda propriedade é também fotométrica e fundamenta-se no conhecimento a priori de que o material de rolagem, geralmente asfalto ou concreto, não varia muito em curtas distâncias. Isso implica em respostas espectrais similares em segmentos curtos. Portanto, uma expressão matemática baseada no conceito de homogeneidade pode ser escrita, como segue,

$$E_{p2} = \sum_i \sum_j [G(x_j, y_j) - G_{d^m}^{DS_i}]^2 \rightarrow \text{Mín} \quad (2)$$

onde, $G_{d^m}^{DS_i}$ é dada pela expressão 3.

$$G_{d^m}^{DS_i} = \frac{\sum_j G(x_j, y_j)}{DS_i} \quad (3)$$

Nas equações 2 e 3, o índice j é usado para indexar pontos ao longo de cada vetor ($i, i+1$). A distância DS_i é dada por,

$$DS_i = \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2} \quad (4)$$

A terceira propriedade é uma generalização das 2 primeiras. Visto que uma rodovia é uma feição linear de alta intensidade de brilho, e que os pontos mais distantes dessa curva têm menor influência na definição da mesma, pode-se escrever a seguinte expressão matemática para representar esta propriedade,

$$E_{p3} = \sum_i e^{-d_i^2} G^2(x_i, y_i) \rightarrow \text{Máx} \quad (5)$$

onde,

- d_i é a distância entre um ponto (x_i, y_i) e a curva discreta representando a rodovia; e
- $e^{-d_i^2}$ é uma função gaussiana, inversamente proporcional ao quadrado de d_i .

A quarta propriedade reflete uma característica geométrica fundamental de uma rodovia, isto é, a suavidade. Por questões práticas, uma rodovia é normalmente composta por segmentos retos e curvas suaves, geralmente circulares. Li (1997) apresenta a seguinte fórmula (figura 2),

$$E_g = \sum_i [2 - 2\cos(a_i - a_{i+1})] / DS_i \rightarrow \text{Mín} \quad (6)$$

onde,

- $a_i - a_{i+1}$ é o ângulo de deflexão entre dois vetores sucessivos da entidade discreta representando a rodovia ; e
- DS_i é a distancia entre o vértice i e $i-1$ ou $i+1$.

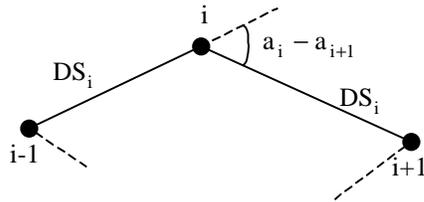


Figura 2 Curvatura no vértice i

A quinta propriedade estatui que a curvatura local de uma rodovia possui um limite máximo, isto é,

$$C_{gi} = |a_i - a_{i+1}| < T \quad (7)$$

onde, T é um limiar.

A sexta propriedade está relacionada com o fato da largura da rodovia não variar significativamente. Entretanto, esta propriedade já está implícita na 3ª propriedade.

Considerando agora que uma rodovia pode ser representada por um polígono de n vértices, o seguinte par de equações pode ser usado para modelar o objeto rodovia (Li, 1997),

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - bEp_2 + cEp_3)[1 + \cos(a_i - a_{i+1})]) / DS_i = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (8)$$

$$C_i = |a_i - a_{i+1}| < T, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (9)$$

onde, b e c são duas constantes positivas.

Portanto, o modelo matemático de rodovia é composto por 2 funções:

- E : corresponde à função objetivo (eq. 8), 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; e
- C_i : devido a sua definição (eq. 9), também é denominada de injeção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$.

O modelo matemático 8 é resolvido sequencialmente através do algoritmo a ser apresentado na próxima seção.

2.2 Solução para o modelo matemático geral

O princípio geral da extração de rodovias através da programação dinâmica é mostrada na figura 3. Como mostra esta figura, 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). O problema consiste então em encontrar o melhor caminho entre A e N. Pode ainda ser observado na figura 3 que:

- a entidade a ser extraída é descrita por um polígono de n vértices;
- os vértices que definem o caminho ótimo, isto é, a rodovia extraída, são calculados a partir das respectivas posições aproximadas. Cada vértice move em torno de sua respectiva posição aproximada, sendo que a área de busca é

normalmente tomada como uma pequena janela. As várias possibilidades que os vértices aproximados podem assumir implicam na geração de uma série de polígonos; e

- a seqüência de vértices que define o caminho ótimo é tal que maximiza a função objetivo E e satisfaz a injunção $C_i < T$.

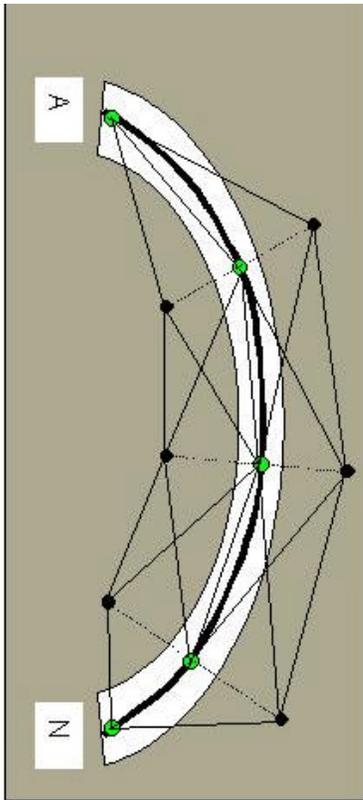


Figura 3 Princípio de método

Como já foi mencionado, geralmente a janela de busca é bidimensional. Sendo n o número de vértices e m o número de possibilidades que cada vértice pode assumir dentro da janela de busca, o esforço computacional será da ordem de $O(nm^3)$. Portanto, o uso de janelas maiores para aumentar o raio de convergência aumentaria significativamente o esforço computacional. Duas estratégias podem ser exploradas para diminuir o número de elementos (m) na janela de busca (Li, 1997):

- **uso de uma janela de busca unidimensional:** nesse caso, os elementos da janela de busca são tomados numa direção ortogonal ao polígono inicial no ponto P_i . Esse procedimento possibilita manter o raio de convergência, mas o esforço computacional é bem menor; e
- **uso de janelas de resolução variada:** esta estratégia está relacionada à teoria da pirâmide de imagem (Ballard e Brown, 1982), onde a base corresponde à imagem original e as outras camadas, na direção do topo, correspondem à mesma imagem, mas com resoluções cada vez menores. Uma solução alternativa, computacionalmente mais atrativa e que produz bom resultado, baseia-se na computação dos elementos da janela de busca em intervalos diferentes. Como será mostrado, a seguir, o processo de extração é iterativo, permitindo o refinamento sucessivo do polígono inicial. Portanto, intervalos com um maior número de pixels são usados no início, permitindo a obtenção de um grande raio de convergência. À medida que o processo de convergência vai sendo atingido, o intervalo entre pontos na janela de busca vai sendo diminuído também, até atingir o valor do sub-píxel, permitindo a obtenção de um resultado final com alta precisão.

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 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). Entretanto, algumas modificações foram realizadas na versão original do algoritmo. A figura 4 ilustra o princípio do processo de otimização usando programação dinâmica. Inicialmente, são fornecidos vários pontos sementes, cujas localização e distribuição são grosseiras (figura 4(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 4(b)). As linhas tracejadas (figuras 4(b) e 4(c)) representam as janelas de busca. O procedimento de otimização através da programação dinâmica gera uma nova aproximação para a rodovia (figura 4(c)); e
- **demais iterações:** procedimentos idênticos são repetidos nas demais iterações.

O processo converge quando numa determinada iteração todos os novos pontos inseridos são colineares aos pontos otimizados na iteração anterior. O resultado após a convergência é ilustrado na figura 4(d).

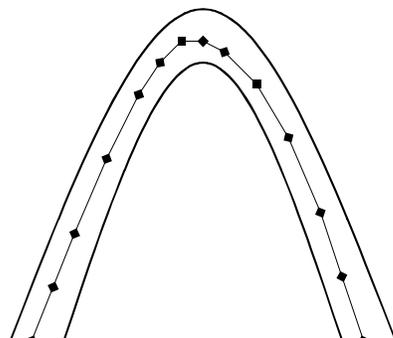
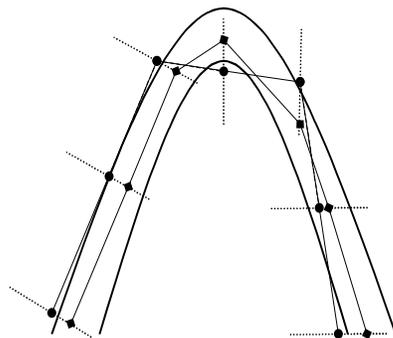
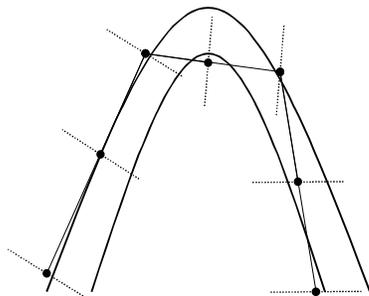
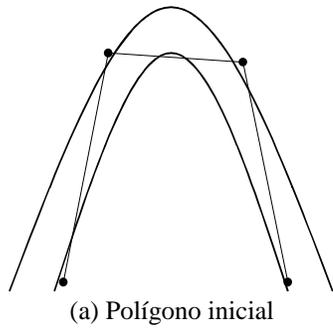


Figura 4 Ilustração do processo de otimização

3 Resultados e discussões

O método apresentado na seção 2 foi implementado em linguagem Borland C++ para o ambiente Windows-PC.

Foram utilizadas duas imagens reais (500x500 pixels) de média resolução, sendo que cada pixel corresponde a aproximadamente 2m no terreno. Essas imagens foram obtidas junto a *home page* do Sistema BADGER (<http://badger.parl.com/>), que é composta por um *software* para a distribuição via Internet de mapas e imagens da Baía de São Francisco, Califórnia, EUA.

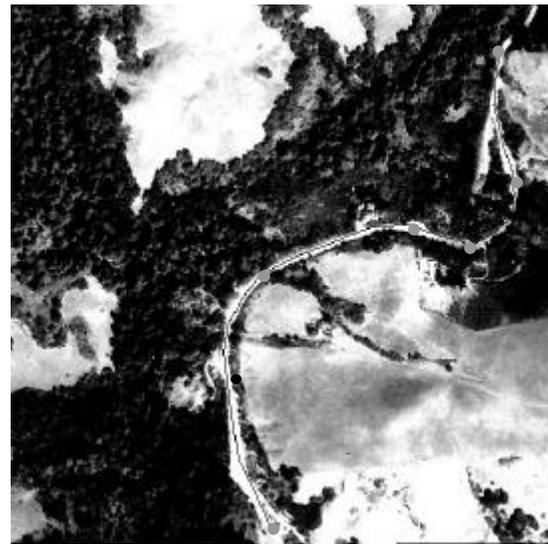


Figura 5 Resultados obtidos com a Imagem-1

O primeiro experimento foi realizado com a Imagem-1 (figura 5), cujo conteúdo é bastante desfavorável. A largura da rodovia é bastante irregular e várias obstruções encontram-se presentes numa região de curvatura acentuada. Os resultados obtidos e os pontos sementes usados foram sobrepostos sobre a imagem processada. Esses resultados podem ser considerados bastante satisfatórios, pois são poucos os trechos que provavelmente estariam em desacordo com a visão natural. Além disso, a rodovia em análise distancia-se consideravelmente do modelo ideal de rodovia - por exemplo, largura irregular, bordas irregulares, presença de obstáculos e sombras, etc. O fator inerente a este exemplo que beneficia o algoritmo de programação dinâmica é o bom contraste entre a superfície de rolagem e as adjacências. Nesse caso, as irregularidades geométricas (largura, borda) não são fatores críticos. A transposição de irregularidades na superfície de rolagem (por exemplo, árvores e sombras) é facilitada pela estratégia adotada envolvendo a inserção de novos vértices a cada iteração.

Embora todos os vértices já calculados, inclusive os que estão sendo inseridos, permaneçam livres para variar, maior restrição é imposta à medida que as iterações são realizadas. Dessa forma, a colocação de pontos sementes para evitar, no início, que novos vértices caiam sobre ou próximos aos obstáculos diminui a influência dos mesmos na otimização global.

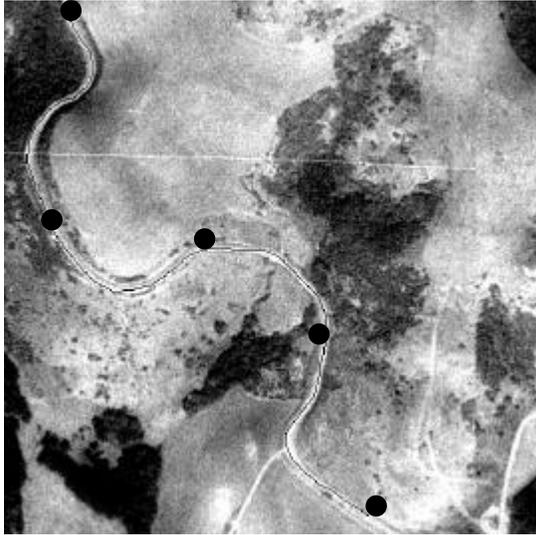


Figura 6 Resultados obtidos com a Imagem-2

A Imagem-2 (figura 6) apresenta uma rodovia principal com baixíssimo contraste em relação às adjacências. Os resultados obtidos e os pontos sementes usados foram sobrepostos sobre a imagem de entrada. Este resultado pode ser considerado excelente, podendo inclusive ser considerado bem razoável por um observador humano. Embora não haja obstáculos e sombras, em geral a rodovia é muito mal definida, existindo um trecho onde é difícil para um observador humano definir exatamente onde passa a rodovia. Vale também ressaltar a boa qualidade do eixo extraído. Apesar do baixo contraste da rodovia em relação às adjacências, existe um padrão não bem definido, cujo máximo da função objetivo ocorre nos pontos que definem a rodovia extraída. Nota-se também que em certos trechos existem regiões estreitas mais clara na faixa mais central da rodovia, fator que provavelmente deve ter contribuído para o bom resultado obtido.

4 Conclusões

Neste artigo foi apresentado e avaliado experimentalmente um método para extração de rodovias em imagens de satélite ou fotografias aéreas digitalizadas. Este método pode ser usado na captura semi-automática

de dados para base de dados de SIG. Neste caso, o operador humano realiza a tarefa de reconhecimento da rodovia e identifica alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. A identificação de pontos sementes pode também ser realizada automaticamente, levando a um processo de extração de rodovias totalmente automatizado. Uma outra aplicação da metodologia apresentada é na verificação de rodovias preexistentes, numa base de dados de SIG, em imagens recentes (Dal Poz e Agouris, 2000^b). Nesse caso, os pontos sementes necessários podem ser extraídos automaticamente da própria base de dados usando critérios topológicos e geométricos.

Para o tipo de imagem testada, i. e., imagens de média resolução, o método mostrou ser robusto frente à presença de obstruções, sombras, baixo contraste e outras irregularidades. A qualidade dos resultados foram compatíveis com os que seriam obtidos por um operador humano. Apesar de ser necessária uma pequena intervenção do operador para inicializar o processo, a tarefa cansativa e demorada de realizar medidas precisas da rodovia é deixada a cargo do algoritmo de programação dinâmica.

A continuidade desta pesquisa deverá abranger três direções. Primeiro, como as características do método apresentado são mais apropriadas para os casos envolvendo imagens de baixa e média resolução, algumas melhorias serão necessárias para os casos envolvendo imagens de alta resolução. Segundo, visando uma melhor avaliação do potencial do método, será necessária a realização de um maior número de experimentos envolvendo, basicamente, imagens de resolução e conteúdo diferentes. Finalmente, tendo em vista as aplicações do método, serão investigadas as possibilidades para a inicialização automática do processo de extração.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil), Processo no. 1998/15553-3, e NSF (*National Science Foundation, USA*), Processo no. IRI-9702233.

Referências bibliográficas

- [1] R. Bajcsy, M. Tavakoli, "Computer recognition of roads from satellite picture," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 6 (1976), 76-84.
- [2] D. H. Ballard, C. M. Brown, *Computer Vision*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- [3] M. Barzohar, D. Cooper, "Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic

- models and estimation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18 (1996), 707--721.
- [4] A. Baumgartner, C. Steger, H. Mayer, W. Eckstein, H. Ebner, "Update of road in GIS from aerial imagery: verification and multi-resolution extraction," In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*, 53--58, 1996.
- [5] A. Baumgartner, C. Steger, H. Mayer, W. Eckstein, "Multi-resolution, semantic objects, and context for road extraction," In: *Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*. Birkhäuser Verlag, Basel (Schweiz), 140--156, 1997.
- [6] A. Baumgartner, C. Steger, H. Mayer, W. Eckstein, H. Ebner, "Automatic road extraction in rural areas," In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*, 107--112, 1999.
- [7] A. P. Dal Poz, S. Gyftakis, P. Agouris, "Semi-automatic road extraction: Comparison of methodologies and experiments", In: *DC 2000 ASPRS Annual Conference*, Washington, DC, USA, May 2000^a (no prelo).
- [8] A. P. Dal Poz, P. Agouris, "Georeferenced road extraction and formulation of hypothesis for new road segments ", In: *SPIE's 14th Annual International Symposium on Aerospace/Defence Sensing, Simulation, and Controls - Conference Automated Geo-Spatial Image and Data Exploitation*, Orlando, FL, USA, April 2000^b (no prelo).
- [9] A. Gruen, H. Li, "Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63 (1997), 985--995.
- [10] H. Li, *Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images*. PhD thesis, Report No. 61, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland, 1997.
- [11] D. M. McKeown, J. L. Denlinger, "Cooperative methods for road tracking in aerial imagery," In: *Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition*, 662--672, 1988.
- [12] R. Nevatia, K. R. Babu, "Linear feature extraction and description," *Computer Graphics and Image Processing* 13 (1980), 257--269.
- [13] L. H. Quam, "Road tracking and anomaly detection in aerial imagery," In: *Image Understanding Workshop*, 51--55, 1978.
- [14] R. Ruskoné, S. Airault, O. Jamet, "A road extraction system using the connectivity properties of the network," *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 5 (1994), 174--180.
- [15] G. Vosselman, J. de Knecht, "Road tracing by profile matching and Kalman filtering," In: *Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*. Gruen, A. O. Kuebler, and P. Agouris (eds), Birkhäuser, Basel-Boston-Berlin, 265--274, 1995.
- [16] A. Zlotnick, P. D. Carnine, "Finding roads seeds in aerial images," *CVGIP: Image Understanding* 57(1997), 243--260.