

EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE RODOVIAS ATRAVÉS DE UMA METODOLOGIA COOPERATIVA

Semi-automatic road extraction by means of cooperative methodology

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

Universidade Estadual Paulista - UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil

aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Este artigo apresenta um método semi-automático para extração de rodovias de imagens digitais de média e alta resoluções. Baseia-se na combinação entre dois delineadores de rodovia. Um desses métodos fundamenta-se no princípio de bordas anti-paralelas de Nevatia e Babu. O outro método alicerça-se num novo princípio de correlação envolvendo uma rodovia ideal e a correspondente real. Ambos métodos cooperam num laço de realimentação envolvendo as posições aproximadas do eixo da rodovia calculadas pelo método de correlação e as correspondentes posições acuradas e calculadas pelo método de bordas. Os fundamentos matemáticos do método e os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

ABSTRACT

This paper presents a semi-automatic road tracing approach from medium and high resolution images. The method is a combination between two road tracings. One method is based on the anti-parallel edge concept of Nevatia and Babu. The other method takes into account a new correlation principle involving an ideal road and the real one. The extraction process is basically a feedback loop between approximate positions of the road axis computed by the correlation-based method and corresponding accurate positions computed by the edge-based method. Mathematical fundamentals and obtained results are presented and discussed.

1 INTRODUÇÃO

Considerável progresso tem sido observado na automação de várias tarefas geométricas em fotogrametria, incluindo as orientações interior e relativa, a geração de ortofoto digital e a fototriangulação. Esses processos têm em comum o baixo nível de inteligência neles incorporados. Tudo é muito diferente quando a situação envolve um alto conteúdo semântico. Um caso típico é a extração de feições cartográficas de imagens digitais visando a captura e atualização de dados para SIG (Sistema de Informações Cartográficas). Nesta classe de problema está incluído o reconhecimento e extração da malha viária de imagens digitais.

Diversas pesquisas sobre extração automática e semi-automática de rodovias de 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) 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). 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. (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 na literatura (ver, por exemplo, Barzohar e Cooper (1996)).

A ausência de uma teoria unificada de visão computacional tem então levado, conforme pode ser notado pelo parágrafo anterior, ao surgimento de uma grande variedade de técnicas. Como, até então, nenhuma solução automática provou ser

competitiva frente o dom 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. Este artigo apresenta um novo método semi-automático para a extração de rodovias de imagens digitais de média e alta resoluções. Os fundamentos matemáticos do método proposto são apresentados na seção 2. Os resultados obtidos e respectivas discussões são apresentados na seção 3. A seção 4 apresenta as principais conclusões.

2 MÉTODO COOPERATIVO PARA A EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE RODOVIA

O método proposto trabalha com dois laços de realimentação controlando dois passos básicos (extrapolação e extração) e uma possível intervenção do operador. O laço interno monitora as falhas nos passos de extrapolação e extração e decide se o método pode ou não continuar por si só. O critério de parada baseia-se numa porcentagem de falha num segmento de rodovia predefinido. Uma característica importante desta estratégia de controle é sua robustez quando situações bastante desfavoráveis estão presentes, implicando em falhas sucessivas no passo de extração. Isto é possível porque o método de extrapolação é um delineador independente de rodovia. O laço externo envolve três situações distintas. Primeiro, no caso de sucesso na extração de um ponto do eixo da rodovia, o processo continua normalmente, isto é, um novo laço externo é inicializado. Segundo, em caso de falhas sucessivas o processo pode ser finalizado (por exemplo, quando o final da rodovia é detectado). Terceiro, a intervenção do operador pode ser requerida para finalizar o processo ou reinicializar o processo de extração.

2.1 PROCESSO DE EXTRAPOLAÇÃO

McKeown e Carnine (1988) e Quam (1978) usaram um modelo parabólico para descrever a trajetória da rodovia. Uma deficiência desta solução é que apenas os últimos pontos extraídos são usados para descrever localmente a trajetória da rodovia. Conseqüentemente, é esperada pouca tolerância às falhas sucessivas. Visando minimizar a deficiência apontada, uma nova solução foi proposta em Dal Poz et al. (2000). Nesta solução, as informações situadas adiante do último ponto extraído são também analisadas, possibilitando um melhor tratamento das irregularidades presentes na rodovia e nas adjacências.

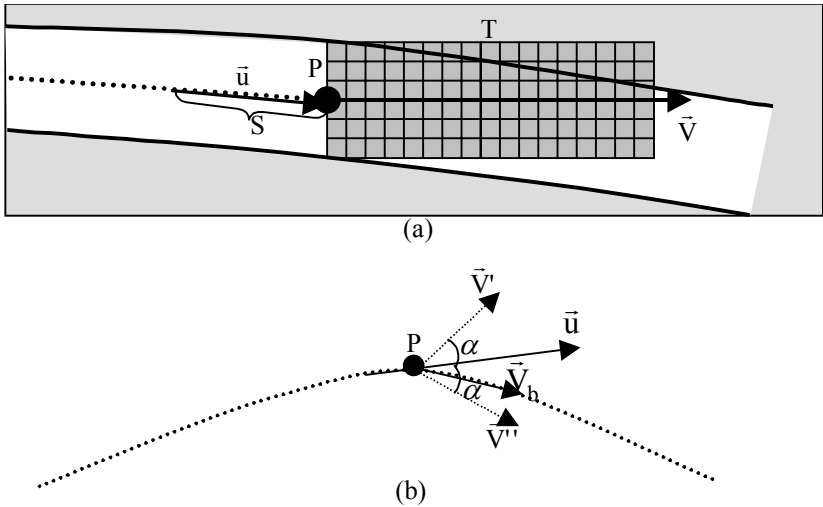


Figura 1 - Processo de extrapolação. (a) Definição do *template* T; e
(b) Princípio para calcular a melhor direção local da rodovia (\vec{V}_b).

A figura 1 mostra o princípio do processo de extrapolação. O cálculo da melhor direção local da rodovia no último ponto extraído é realizado através do *template* T (figura 1(a)). Este *template* é uma matriz de m linhas e n colunas. Para que o *template* T coincida com a rodovia localmente, o lado menor (m) é tomado como sendo igual à largura média local da rodovia e o lado maior (n), dependendo da curvatura, algumas vezes maior que m. Cada um dos nm elementos do *template* T é obtido a partir da imagem original através de algum método de interpolação de tons de cinza.

Para possibilitar o cálculo da melhor direção local da rodovia ($\alpha_{\vec{V}_b}$) no último ponto extraído (P), primeiramente é necessário calcular uma direção aproximada ($\alpha_{\vec{u}}$) no mesmo ponto. Isto é realizado ajustando-se, através do MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), uma linha reta ao conjunto (S) dos últimos pontos extraídos (figura 1(a)). A direção $\alpha_{\vec{V}_b}$ é então calculada rotacionando o *template* T em torno do ponto P em pequenos passos, α graus no sentido horário e o mesmo arco no sentido oposto, tendo a direção $\alpha_{\vec{u}}$ como origem (figura 1(b)). Portanto, o vetor \vec{V} é rotacionado até a posição \vec{V}' num lado do vetor \vec{u} e até a posição \vec{V}'' noutro lado. O cálculo da direção do *template* T correspondente à posição de melhor coincidência de T com a rodovia é realizado através de uma medida de similaridade (M). Duas propriedades básicas são usadas na definição da medida de similaridade M. A primeira propriedade estatui que os pixels da rodovia são mais claros que os de fundo. Já a segunda baseia-se no fato de que em segmentos curtos o material da

rodovia não varia muito, isto é, os tons de cinza dos pixels são praticamente constantes. Considerando o *template* T coincidente com um segmento curto de rodovia, pode-se escrever as seguintes expressões matemáticas para a primeira e segunda propriedades, respectivamente,

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T^2(x_i, y_j) \rightarrow \text{Máximo} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(x_i, y_j) - T_M]^2 \rightarrow \text{Mínimo} \quad (2)$$

onde,

- T é uma matriz (mxn) de níveis de cinza reamostrados a partir da imagem original;
- (x_i, y_j) , $i=1, \dots, m$ e $j=1, \dots, n$, são os elementos do *template* T; e
- T_M é o nível de cinza médio do *template* T (eq. 3).

$$T_M = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T(x_i, y_j) \quad (3)$$

Propõe-se a medida de similaridade (M) como sendo diretamente proporcional à somatória dos quadrados dos níveis de cinza do *template* T (eq. 1) e inversamente proporcional ao fator de homogeneidade do *template* T (eq. 2), isto é,

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T^2(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(x_i, y_j) - T_M]^2} \quad (4)$$

A melhor correspondência do *template* T com a rodovia ocorre quando M é máxima. Matematicamente, a eq. 4 não pode ser aplicada se o denominador assumir o valor nulo. Embora esta singularidade dificilmente ocorra com imagens reais, o denominador da eq. 4 é substituído, no caso do denominador ser nulo, pelo denominador médio calculado para os últimos pontos extraídos (conjunto S da figura 1). A orientação do *template* T relativa à posição de melhor coincidência com a rodovia é a melhor orientação local ($\alpha_{\vec{v}}$) da rodovia em P (figure 1(b)). Tomando-se agora um vetor diretor unitário (\vec{V}_b) correspondente à direção definida pela orientação $\alpha_{\vec{v}_b}$, o ponto P(x,y) pode ser extrapolado dt pixels adiante, como segue,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = dt\bar{V}_b + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

O ponto extrapolado $P'(x',y')$ e a melhor direção local da rodovia ($\alpha_{\bar{V}_b}$) são usados pelo modelo de bordas anti-paralelas (seção 2.2) para extrair um novo ponto do eixo da rodovia. Sempre que este processo falhar, o *template* T é transladado para P' e os processos de cálculo da melhor direção local e de extrapolação (eq. 5) são repetidos, possibilitando uma nova tentativa com o modelo de bordas anti-paralelas, e assim por diante.

2.2 PROCESSO DE EXTRAÇÃO

O processo de extração baseia-se no modelo de bordas anti-paralelas proposto em Nevatia e Babu (1980) e um pouco modificado em McKeown e Denlinger (1988). Primeiramente, o operador do gradiente de Sobel 5x5 é aplicado em pontos reamostrados ao longo de uma linha perpendicular à melhor direção local ($\alpha_{\bar{V}_b}$) no último ponto extraído P' (figura 2). Os valores de Sobel (direção e magnitude) calculados para cada ponto são usados para calcular um fator global (F) de borda baseado numa soma ponderada de outros três fatores específicos de borda. Cada um desses componentes específicos é uma função linear variando no intervalo [0; 1]. Os componentes específicos são definidos para a magnitude (F_m), para a diferença em orientação entre a orientação de borda e a melhor direção local da rodovia (F_d) e para a diferença em orientação entre pares de pontos vizinhos de borda (F_{dd}).

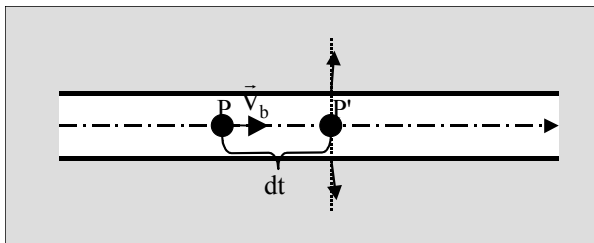


Figura 2 - Princípio do modelo de extração

Para possibilitar o cálculo dos fatores específicos de borda, o operador de Sobel é aplicado aos pontos reamostrados ao longo da seção transversal da rodovia em P' (linha tracejada na figura 2) e as seqüências de pontos cujas magnitudes excedam a um limiar predefinido (M_{min}) são detectadas. Essas seqüências são regiões potenciais de borda, sendo duas para os casos próximos à situação ideal ilustrada na figura 2. Os seguintes valores são então armazenados para todas as

seqüências detectadas: as coordenadas dos pontos, as respectivas direções e magnitudes, as diferenças de direção entre pontos vizinhos e a magnitude máxima (M_{\max}) para todas as seqüências. A fim de possibilitar uma precisão sub-pixel, a distância entre os pontos reamostrados nas seções transversais da rodovia deve ser menor que um pixel. O passo seguinte consiste no cálculo dos fatores específicos de borda e o fator geral para cada ponto das seqüências detectadas de ambas as margens da rodovia. A seguir, as fórmulas usadas são brevemente descritas.

O fator específico para magnitude é calculado pela seguinte expressão matemática,

$$F_m(M) = \frac{1}{M_{\max} - M_{\min}} (M - M_{\min}) \quad (6)$$

onde, M é a magnitude calculada pelo operador de Sobel e armazenada numa das seqüências detectadas. Portanto, M varia no intervalo $[M_{\min}; M_{\max}]$.

O fator específico para orientação é calculado como segue,

$$F_d(D) = \begin{cases} -\frac{1}{D_{\max}} D + 1, & \text{para } 0 \leq D \leq D_{\max}; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (7)$$

onde,

- $D = \|\alpha_{\bar{v}_b} - \alpha | -90^\circ |$ ($|$ significa valor absoluto);
- α é a direção de Sobel armazenada numa das seqüências detectadas; e
- D_{\max} (normalmente tomada como 30°) é a diferença máxima permitida para o ângulo D .

O fator específico para a diferença de orientação entre pontos de borda vizinhos é calculado usando a seguinte fórmula,

$$F_{dd}(DD) = \begin{cases} \frac{1}{DD_{\max}} DD, & \text{para } 0 \leq DD \leq DD_{\max} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (8)$$

onde,

- DD é a diferença de direção entre pontos vizinhos armazenados numa seqüência detectada; e
- DD_{\max} (também usualmente tomada como 30°) é a diferença máxima permitida de orientação entre pontos de borda vizinhos.

Finalmente, o fator global de borda pode então ser calculado pela seguinte média ponderada,

$$F = \frac{w_1 F_m (M) + w_2 F_d (D) + w_3 F_{dd} (DD)}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (9)$$

onde , w_1 , w_2 , e w_3 são os pesos a serem atribuídos aos fatores específicos de borda.

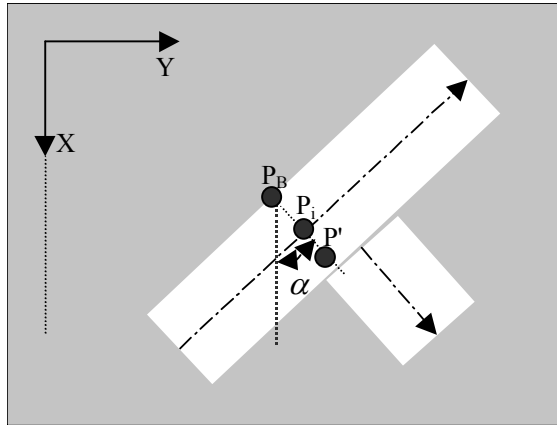


Figura 3 – Cálculo de um ponto do eixo da rodovia

Os fatores globais máximos encontrados em ambos os lados da rodovia, caso excedam um limiar predefinido, correspondem aos melhores pontos de borda. Três casos podem ser identificados: 1- dois pontos de borda são detectados em ambos os lados da rodovia; 2- um ponto de borda é detectado em um dos lados da rodovia (figura 3); e 3- nenhum ponto de borda é encontrado. Referente ao primeiro caso, o ponto do eixo da rodovia é calculado como sendo o ponto médio entre dois pontos de borda. Caso a terceira possibilidade ocorra, o método falha no cálculo do ponto do eixo central da rodovia. Neste caso, o processo de extrapolação é usado novamente, seguido de uma nova tentativa de extração usando o modelo de borda. Como mostra a figura 3, o segundo caso requer a transferência do ponto de borda $P_B(x_B, y_B)$ para o centro da rodovia. Neste caso, um ponto qualquer do eixo central da rodovia ($P_i(x_i, y_i)$) é então calculado através do ponto de borda (P_B), da largura da rodovia (ℓ) e da orientação (α) da seção transversal da rodovia contendo o ponto P_B , isto é,

$$X_i = X_B + \frac{\ell}{2} \cos\alpha$$

$$Y_i = Y_B + \frac{\ell}{2} \sin\alpha$$
(10)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método descrito na seção anterior foi implementado em linguagem Borland C++ para ambiente PC-Windows. Foram realizados experimentos com dados reais para verificar o potencial do método. As figuras 4 e 5 mostram duas imagens de média resolução (isto é, 2m por pixel) usadas nos experimentos. Estas imagens foram obtidas junto à *home page* (<http://badger.parl.com/>) do sistema BADGER, tratando-se de um sistema para distribuição, via Internet, de dados de mapa e imagem da área da baía de São Francisco, Califórnia, EUA.

O primeiro experimento foi realizado com a imagem 1 (figura 4), cujo conteúdo é bastante desfavorável. De fato, a largura e as bordas da rodovia são bastante irregulares, havendo também outros problemas, tais como, obstruções e sombras. Consequentemente, é esperado que o modelo de bordas anti-paralelas não modele adequadamente esta realidade. Portanto, nesse caso é conveniente deixar o fator específico de magnitude (F_m) dominar o fator global de borda (F). Para tanto, basta atribuir-lhe um peso maior. Os valores adotados para os parâmetros m , n e dt foram, respectivamente, 5 pixels (largura média da rodovia), 15 pixels e 3 pixels. Para facilitar a análise, os resultados obtidos e os pontos sementes usados foram sobrepostos à imagem processada. A análise visual desses resultados revela que o método funcionou satisfatoriamente na maior parte da rodovia. Uma exceção ocorreu onde a rodovia apresenta uma variação grande da largura, provocando uma mudança acentuada na direção do eixo da rodovia. Isso ocorreu porque o algoritmo seguiu temporariamente apenas uma das bordas da rodovia, resultando num segmento de rodovia mais próximo da borda detectada. Uma outra região problemática é o segmento de rodovia com curvatura mais acentuada, onde pode ser verificado a ocorrência de uma situação envolvendo obstruções e outras irregularidades. Consequentemente, o algoritmo extraiu um segmento coincidente com uma das bordas da rodovia.



Figura 4 - Resultados para a imagem 1

A figura 5 apresenta uma imagem com duas rodovias principais com curvas suaves, largura regular e bom contraste. Existem também algumas estradas não bem definidas. Devido principalmente ao baixo contraste destas entidades, o método foi aplicado apenas as duas rodovias principais, cujos resultados e pontos sementes utilizados foram projetados em preto sobre a imagem original. Os valores de m , n e dt são os mesmos adotados no experimento anterior. A análise visual dos resultados mostra que o método teve um desempenho muito satisfatório com esta imagem. Embora possam ser notadas algumas irregularidades geométricas (isto é, locais onde as rodovias são definidas por uma ou nenhuma borda), as rodovias selecionadas são predominantemente bem caracterizadas por duas bordas paralelas. Em outras palavras, o modelo de bordas anti-paralelas de Nevatia e Babu (1980) é um excelente modelo para esta realidade física. Consequentemente, o método proposto obteve resultados de alta qualidade, isto é, eixos centrais bem próximos aos que seriam obtidos usando a visão natural.



Figura 5 - Resultados para a imagem 2

4 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um novo método para extração de rodovias baseado na combinação entre o modelo de bordas anti-paralelas e um novo modelo de análise da superfície intensidade da rodovia. O método pode ser aplicado na captura de dados para SIG, a partir de imagens de média e alta resoluções. Neste esquema de captura de dados, as tarefas de alto nível (por exemplo, o reconhecimento da rodovia) são realizadas por um operador humano, enquanto que as tarefas de medida que requerem precisão e muito tempo são deixadas a cargo do algoritmo computacional de extração. Esta solução é bastante vantajosa, em relação a correspondente empregando a visão natural, sobretudo se uma interface gráfica interativa estiver disponível, por duas razões: 1- pode ser bem mais rápida; e 2- a confiabilidade e a precisão podem ser de mesmo nível.

A avaliação experimental do método usando as duas imagens de média resolução permitiram concluir que o método é bastante promissor. Mostrou ser robusto quando situações bastante desfavoráveis envolvendo, por exemplo, obstruções e sombras, estarem presentes. Tal performance foi possível, em grande parte, graças ao método de extrapolação desenvolvido. Diferente dos similares encontrados na literatura especializada, que utilizam apenas as informações geradas até o último ponto extraído (P), incorpora também informações localizadas adiante

do ponto P. Em outras palavras, pode-se dizer que o método de extrapolação “vê” adiante do ponto em que o método de extração se encontra e, o que é mais importante, vê além dos obstáculos e outras irregularidades.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi integralmente apoiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), processo número 1998/15553-3.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bajcsy, R., Tavakoli, M., 1976. Computer recognition of roads from satellite pictures. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 6, n. 9, p. 76-84.
- Barzohar, M., Cooper, D., 1996. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 18, n. 7, p. 707-721.
- Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H., 1999. Automatic road extraction in rural areas. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*. Vol. XXXII, Part 3-2W5, p. 107-112.
- Gruen, A., Li, H., 1997. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 63, n. 8, p. 985-995.
- Li, H., 1997. *Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images*. PhD thesis, Report No. 61, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland.
- McKeown, D. M., Denlinger, J. L., 1988. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: *Workshop of Comp. Vision and Pattern Recogn.*, p. 662-672.
- Nevatia, R., Babu, K. R., 1980. Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, v. 13, p. 257-269.
- Quam, L. H., 1978. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: *Image Understanding Workshop*, p. 51-55.
- Vosselman, G., de Knecht, J., 1995. 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, p. 265-274.
- Zlotnick, A., Carnine, P.D., 1993. Finding roads seeds in aerial images. *CVGIP: Image Understanding*, v. 57, n. 2, p. 243-260.
- Dal Poz, A. P., Gyftakis, S., Agouris, P., 2000. Semi-automatic road extraction: Comparison of methodologies and experiments, In: *DC 2000 ASPRS Annual Conference*, Washington-DC, USA, CD-ROM.

(Recebido em 06/12/01. Aceito para publicação em 21/03/01.)