Pesquisas em Geociências

http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias

Extração de Rodovias Utilizando Snakes

Rafael Montanhini Soares de Oliveira, Aluir Porfiro Dal Poz

Pesquisas em Geociências, 31 (2): 31-39, set./dez., 2004.

Versão online disponível em:
http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19572

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos

UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br
Políticas: http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy
Submissão: http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions
Diretrizes: http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines

Data de publicação - set./dez., 2004.
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Pesquisas em Geociências, 31 (2): 31-39, 2004
ISSN 1518-2398

Instituto de Geociências, UFRGS
Porto Alegre, RS - Brasil

Extração de Rodovias Utilizando *Snakes*

RAFAEL MONTANHINI SOARES DE OLIVEIRA & ALUIR PORFIRO DAL POZ

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista
Caixa Postal 467, CEP 19060-900, Presidente Prudente – SP. rmso@pos.prudente.unesp.br

(Recebido em 03/04.Aceito para publicação em 10/04)

Abstract - This paper presents a methodology for semi-automatic road extraction from digital images using active contour models or snakes. Snakes was proposed almost two decades ago, consisting in a parametric curve controlled by photometric and geometric constraints. This last ones generate internal forces that control the shape of the snakes curve. The photometric constraints generate external forces that attract the snakes curve to the selected feature, i.e., the road. As this snakes-based method is semi-automatic, firstly the operator must describe the road roughly using at least six seed points. From this initial position, the snakes curve moves around at each interation, stabilizing when it coincides with the road. This road extraction methodology was tested with digital aerial images of different resolution. The experimental results obtained with these images showed the method's potential in accurate and reliable road extraction.
Keywords - active contour models;digital photogrammetry; road extraction; edges.

INTRODUÇÃO

A extração de feições em imagens digitais é uma tarefa de grande importância em Fotogrametria Digital e Visão Computacional. Em aplicações cartográficas a extração de feições é fundamental no contexto de coleta e atualização de informações espaciais relacionadas aos objetos feitos pelo homem (como por exemplo, rodovias e edificações) e feições naturais (como por exemplo, rios), envolvendo tarefas complexas de análise de imagens digitais aéreas ou de satélite. Em se tratando do problema específico envolvendo a feição rodovia, há décadas que vários métodos para a extração de rodovias em imagens digitais vêm sendo pesquisados na área de Visão Computacional e Fotogrametria Digital, podendo ser apontados como precursores os trabalhos de Bacsy e Tavacoli (1976) e Quam (1978). Neste contexto, uma das metodologias atrativas baseia-se em contorno ativo ou *snakes*, tendo sido proposto originalmente em Kass *et al*. (1987). Trata-se de em uma curva representada parametricamente e controlada por injunções fotométricas e geométricas. As injunções fotométricas geram forças externas que atraem a curva *snakes* para a feição a ser extraída. Já as injunções geométricas geram forças internas que controlam a forma da curva *snakes*, garantindo sua suavidade. Por ser um método de extração semi-automático, inicialmente o operador deve descrever a rodovia de maneira grosseira utilizando no mínimo seis pontos sementes. A partir desta posição inicial a curva *snakes* evolui a cada iteração, fazendo com que a mesma se posicione sobre a rodovia. O equilíbrio ou a estabilização da curva *snakes* ocorre quando sua energia atinge um mínimo. Existem ainda algumas tentativas de se melhorar a eficiência do método *snakes*, como uma utilizando esquemas adaptativos proposta por Williams e Shah (1992). Esta implementação utiliza um algoritmo que executa a tarefa de minimização da função de energia a cada iteração, de maneira que qualquer movimento será sempre aquele que leve à minimização da função de energia. Em Neuenschwander *et al*. (1997), é apresentada uma solução inovadora para o problema em foco utilizando um tipo especial de *snakes*, denominado *ziplok snakes*. Enquanto que o método proposto por Kass *et al*. (1987) é específico para extração de feições que se comportam na imagem como bordas e linhas, o *ziplock snakes* é específico para a extração de feições que se manifestam como faixas estreitas e alongadas, como é o caso de rodovias em imagens de média e alta resolução, correspondendo respectivamente a imagens com pixels entre 0,7 m e 2 m no terreno e com pixels menores que 0,7 m no

Em respeito ao meio ambiente, este número foi impresso em papel branqueado por processo parcialmente isento de cloro (ECF).

terreno (Mayer *et al*. (1997)). Um exemplo de aplicação do *ziplock snakes* no contexto de extração de rodovia é encontrado em Mayer *et al*. (1997).

Boa parte das soluções existentes para a extração de rodovias usando *snakes* tem por base imagens de baixa resolução, isto é, pixels > 2 m no terreno (Mayer *et al*. (1997)). Este trabalho mostra que é possível aplicar o método originalmente proposto por Kass *et al*. (1987) para a extração de rodovias tanto em imagens de baixa resolução quanto em imagens de média e alta resolução. A metodologia para extração de feições usando *snakes* é apresentada na Seção 2. A Seção 3 apresenta os resultados experimentais obtidos com a extração de rodovia em imagens reais de diferentes resoluções. As principais conclusões são apresentadas na Seção 4.

METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS UTILIZANDO *SNAKES*

A idéia básica dos métodos baseados em contorno ativo consiste na minimização de uma função de energia para extrair as feições de interesse de uma imagem. Portanto, o problema em questão tem dois componentes: a função de energia e a estratégia para resolvê-la.

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, $x(s)$ e $y(s)$, Li(1997). Sendo ζ 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 expressada por Li (1997):

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

onde,

- E_{int} é a energia interna das *snakes*;
- E_{ext} é a energia externa das *snakes*;
- λ é o parâmetro que controla a importância relativa dos termos E_{int} E_{ext};
- v_s é a primeira derivada da função v em relação ao parâmetro s; v_s é conhecido como termo de 1º ordem e é responsável pelo controle da suavidade da *snakes*;
- v_{ss} é a segunda derivada da função v em relação ao parâmetro s; v_{ss} é conhecido como termo de 2º ordem e é responsável pelo controle de rigidez da *snakes*;
- $P(v(s))$ é uma função penalidade;
- $w_1(s)$ e $w_2(s)$ são respectivamente os pesos dos termos de 1º e 2º ordem;
- $w(s)$ é o peso da função penalidade.

O primeiro termo (ou primeira integral) da equação 1 está relacionado com a energia interna $E_{int}(v)$ 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}, que é positiva para linhas claras e negativa para linhas escuras, 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 um peso.

Solução da Função de Energia

A função de energia associada a *snake* (equação 1) deve ser mínima quando a *snake* se encontrar sobre a feição de interesse. Assim, tem-se o problema de obter a função *v(s)* que minimiza a função de energia. Como será visto mais abaixo, este problema pode ser transformado num outro que consiste na resolução da equação diferencial de 4º ordem de Euler-Lagrange (Kass *et al.* 1987).

Como as duas integrais da equação 1 possuem a mesma variável de integração (*s*) e os mesmos intervalos de integração, as mesmas podem ser agrupadas, resultando num único integrando, dado por:

$$F(s,v,v_s,v_{ss}) = w_1(s)\,|v_s(s)|^2 + w_2(s)\,|v_{ss}(s)|^2 + w(s)P(v(s)) \quad (4)$$

Como já foi mencionado, o problema de minimização da equação 1 pode ser transformado num problema de resolução da equação diferencial de 4º ordem de Euler Lagrange. Dessa forma, a solução procurada corresponde à função v(s) que satisfaz (Kass *et al.* 1987):

$$F_v - \frac{\partial}{\partial s}F_{v_s} + \frac{\partial^2}{\partial s^2}F_{v_{ss}} = 0 \quad (5)$$

onde F_v, F_{vs} e F_{vss} são as derivadas parciais $F(s, v, v_s, v_{ss})$ e, relação a v, v_s e v_{ss} respectivamente.

A solução da equação 5 exige que uma aproximação inicial da função *v(s)* seja conhecida, de modo a possibilitar a atração da curva *snakes* pela feição de interesse na imagem. Desta maneira, é necessário que um operador descreva a rodovia de forma aproximada utilizando uma quantidade mínima de 6 pontos sementes próximos a ela. Quando a curva *snakes* coincidir com a feição selecionada (rodovia), as forças entram em equilíbrio e o sistema entra em um estado estacionário. Nesse caso diz-se que a energia da snakes (equação 1) foi minimizada.

A obtenção de uma solução analítica para a equação 5, isto é, as funções $x(s)$, e $y(s)$ é muito difícil. Assim, deve-se lançar mão de recursos de discretização para aproximar a equação 5. Uma primeira medida nessa direção é a escolha de uma aproximação adequada para v(s) e que seja computacionalmente viável. Como geralmente o objeto rodovia é suave, o mesmo pode ser modelado adequadamente por uma linha poligonal com longos segmentos de reta. Uma linha poligonal (v) pode ser vista como uma seqüência de vértices, isto é, $v=[v_i]=[x_i, y_i]$ $i=1, ..., n$, com n sendo o número de vértices. Pode também ser vista como uma seqüência de segmentos de reta conectados nos vértices *v*. Aproximando-se agora as derivadas parciais da equação 5 por diferenças finitas, tem-se:

$$\begin{aligned}
&-2\cdot[w_1(s_{i+1})(v_{i+1}-v_i) - w_1(s_i)(v_i - v_{i-1})] \\
&+2\cdot[w_2(s_{i-1})(v_{i-2}-2v_{i-1}+v_i) - 2w_2(s_i)(v_{i-1}-2v_i+v_{i+1}) \\
&+w_2(s_{i+1})(v_i - 2v_{i+1}+v_{i+2})] \\
&+w(s_i)[P_x(x(s_i), y(s_i)), P_y(x(s_i), y(s_i))] = 0
\end{aligned} \quad (6)$$

onde:

$$\begin{aligned}
p_x(x(s_i), y(s_i)) &= \frac{\partial}{\partial x}E_{ext}(x(s_i), y(s_i)) \\
p_y(x(s_i), y(s_i)) &= \frac{\partial}{\partial x}E_{ext}(x(s_i), y(s_i))
\end{aligned} \quad (7)$$

A equação 7 também implica na necessidade do uso de diferenças finitas para discretizá-la e na reamostragem dos tons de cinza nas posições v_i, uma vez que as respectivas coordenadas (x_i, y_i) não correspondem aos pixels da imagem.

Notar que a equação 6 envolve 5 vértices da linha poligonal *v*. Assim, 5 vértices possibilitariam escrever 2 equações independentes, isto é, uma para a componente x e outra para y, não havendo portanto possibilidade de solução. O número mínimo de pontos para que se possa ter solução para o problema é 6, isto porque, neste caso, é possível escrever 2 sistemas de equações lineares independentes, casa qual com 6 equações e 6 incógnitas para as coordenadas x ou y. Generalizando, a equação 6 pode ser escrita para n combinações adequadas dos vértices v_i, obtendo-se dois sistemas de equações lineares independentes, um para x e outro para y, que podem ser expressos matricialmente como segue (Oliveira, 2003):

$$\begin{aligned}
Ax + WP_x(x,y) &= 0 \\
Ay + WP_y(x,y) &= 0
\end{aligned} \quad (8)$$

onde W é a matriz diagonal (n x n) formada pelos peso $w(s)$, P_x e P_y são vetores n x 1 contendo respectivamente $p_x(x(s_i), y(s_i))$ e $p_y(x(s_i), y(s_i))$ e A uma matriz (n x n) bandada dada por (Oliveira, 2003):

$$A=-2W_1D^2+2W_2D^4 \tag{9}$$

Onde D^i é o operador diferença de ordem i, definido como:

$$D^i = DD^{i-1} \tag{10}$$

$$D=\begin{bmatrix} -1 & 1 & & & & \\ & -1 & 1 & & & \\ & & . & . & . & \\ & & & & -1 & 1 \\ & & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

e W_1 e W_2 são matrizes diagonais contendo os pesos $w_1(s)$ e $w_2(s)$, respectivamente.

O sistema dado pela equação 8 pode ser resolvido interativamente, e de forma eficiente, como segue (Oliveira, 2003):

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= (A+\gamma I)^{-1}(\gamma x_t - WP_x(x_t, y_t)) \\ y_{t+1} &= (A+\gamma I)^{-1}(\gamma y_t - WP_x(x_t, y_t)) \end{aligned} \tag{12}$$

onde,

- t é o número de iterações;
- γ é uma constante positiva usada para controlar a velocidade de convergência e estabilizar a solução;
- I é a matriz identidade de dimensão (n x n);
- x_t é um vetor (n x 1) que contém as coordenadas "x" dos pontos da linha poligonal representando a solução da equação 1; no início (t = 0), x_t contém as coordenadas "x" do pontos sementes fornecidos pelo operador;
- y_t é definido de forma análoga a x_t, com a diferença de que y_t contém as coordenadas "y";
- A matriz (nxn) pentadiagonal A é obtida pela equação 9, possuindo o seguinte padrão:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 & & \dots & & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & 0 & & \dots & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 & e_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_4 & b_4 & c_4 & d_4 & e_4 & 0 & \dots 0 \\ & & \dots & & & \dots & & \\ 0 \dots 0 & & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} & d_{n-2} & e_{n-2} & \\ 0 & \dots & 0 & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} & d_{n-2} & \\ 0 & & \dots & 0 & a_{n-} & b_{n-} & c_{n-} & \end{bmatrix} \tag{13}$$

sendo,

- $a_i=2w_2(s_{i-1})$;
- $b_i=-2w_1(s_i)-4w_2(s_{i-1})-4w_2(s_i)$;
- $c_i=2w_1(s_{i+1})+2w_1(s_i)+2w_2(s_{i-1})+8w_2(s_i)+2w_2(s_{i+1})$;
- $d_i=-2w_1(s_{i+1})-4w_2(s_i)-4w_2(s_{i+1})$;
- $e_i=2w_2(s_{i+1})$.

A equação 12 leva a um esquema de solução das equações diferenciais parciais de Eule-Lagrange onde a *snake* evolui no tempo através da solução de um sistema linear pentadiagonal. As interações são interrompidas quando o vetor solução se estabiliza.

A metodologia apresentada para extração de feições (no caso rodovias), possui duas vantagens. A primeira é que as injunções geométricas são usadas diretamente para guiar a busca por feições da imagem e, a segunda, é que as informações fotométricas das características das feições são integradas ao longo de toda a curva, provendo um grande suporte, sem incluir informações irrelevantes de pontos que não são da curva.

Adensamento Progressivo da Linha Poligonal

Para que a curva *snake* convirja para a feição de interesse é necessário que o polígono descrito inicialmente pelo operador seja o mais próximo possível desta feição. A fim de melhorar as propriedades de convergência da curva *snake* e eliminar a necessidade de um número excessivo de pontos iniciais necessários para uma boa extração, tem-se que usar alguma estratégia para o adensamento progressivo da linha poligonal inicial. Assim, inicialmente o usuário deve fornecer pelo menos 6 pontos sementes que descrevem a rodovia de forma grosseira. No decorrer do processo de otimização, novos pontos vão sendo automaticamente adicionados à linha poligonal inicial a partir dos pontos sementes, os quais estão mais próximos da rodovia a ser extraída, facilitando a captura da rodovia pela curva *snake*. Primeiramente, a linha poligonal inicial definida pelos pontos sementes fornecidos pelo usuário é otimizada. O resultado desta otimização inicial é uma linha poligonal definida pelo mesmo número de pontos fornecidos pelo operador, só que agora mais próxima da feição de interesse. Embora este resultado inicial aproxime melhor a feição de interesse, geralmente o número de pontos é insuficiente para descrever bem a feição desejada. Como os pontos da linha poligonal a serem otimizados não devem estar muito distantes da feição de interesse, a estratégia de

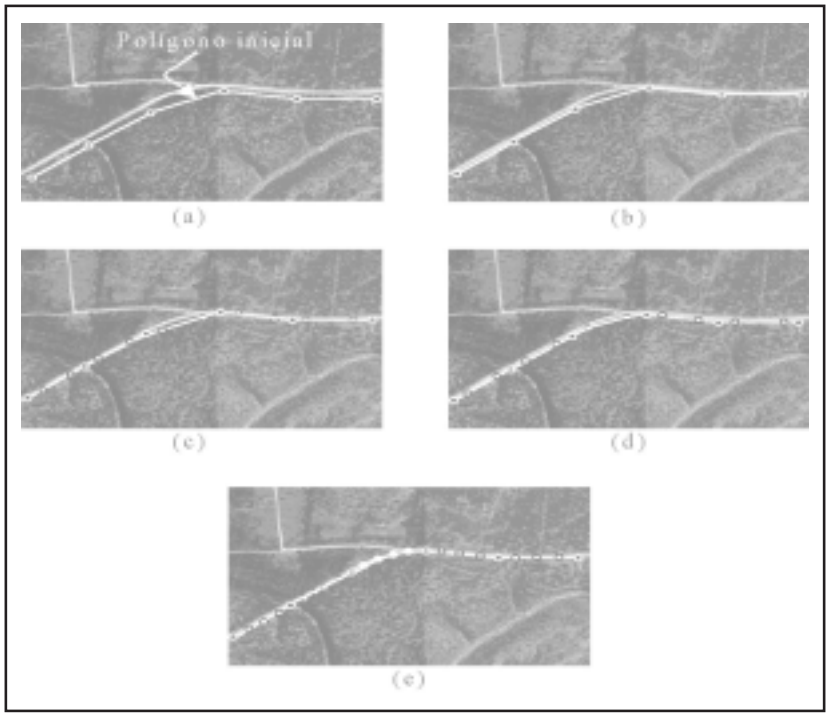

Figura 1 - Processo de adensamento da linha poligonal. (a) Pontos sementes fornecidos pelo operador e a linha poligonal inicial, (b) primeira otimização; (c) primeiro adensamento linear; (d) segunda otimização; (e) resultado final.

adensamento deve gerar novos pontos para otimização que cumpram o mencionado requerimento. A estratégia de adensamento desenvolvida (Oliveira, 2003) é apresentada a seguir.

Como mostra a figura 1(a), o primeiro passo consiste na colocação de pelo menos seis pontos sementes (pontos pretos na figura 1(a)), esparsamente distribuídos ao longo da rodovia, dando origem a uma linha poligonal inicial (linha clara na figura 1(a)). O segundo passo (Fig. 1(b)) consiste na realização da primeira otimização, tratando-se do processo iterativo baseado em *snakes* descrito anteriormente. Notar que a linha poligonal resultante é melhor que a inicial. Como mostra a figura 1(c), o terceiro passo consiste na interpolação linear de novos vértices (círculos claros). Esta interpolação é feita para cada par de pontos fornecidos pelo operador. Tomando-se um determinado par de pontos sementes consecutivos, realiza-se duas interpolações lineares, conforme mostra a figura 2. Esta figura mostra que os pontos interpolados (v'_i e v'_{i+1}) estão a uma distância w a partir dos respectivos pontos sementes. O parâmetro w deve ser pequeno (por exemplo, algo em torno da largura aproximada da rodovia) para possibilitar a interpolação de pontos próximos à rodovia, necessidade decorrente da exigência do método por bons valores iniciais para as coordenadas dos pontos envolvidos na otimização. O mesmo parâmetro é mantido fixo, já que não se conhece, a priori, a forma da rodovia entre as seções de interpolação. Este procedimento de interpo-lação é repetido para todos os pares possíveis de pontos sementes consecutivos.

Figura 2 - Interpolação linear de dois pontos entre dois pontos sementes.

A figura 1(d) mostra que o passo seguinte consiste numa nova otimização, resultando numa linha poligonal melhor que a otimizada anteriormente. Na seqüência, os pontos previamente otimizados são novamente usados para adensar a linha poligonal, cujo processo é idêntico ao utilizado no primeiro adensamento. Após repetir este processo várias vezes, parando quando as distâncias entre todos os pontos forem menores que a distância de interpolação *w*, tem-se o resultado mostrado na figura 1 (e).

RESULTADOS E ANÁLISE

O método apresentado na seção anterior foi implementado em linguagem C para o ambiente Windows-PC. Uma dezena de experimentos foram realizados com imagens de baixa, média e alta resolução. Devido à limitação de espaço, foi selecionada uma imagem para cada faixa de resolução mencionada acima.

Os resultados obtidos são analisados de forma visual e numérica. No primeiro caso, as rodovias extraídas são projetadas sobre a imagem de entrada, permitindo uma verificação visual do desempenho do método. O procedimento numérico de avaliação permite avaliar quantitativamente as linhas poligonais representando as rodovias extraídas. Os parâmetros numéricos de qualidade definidos logo abaixo se baseiam nas seguintes entidades (Maia, 2003):

- **Rodovia extraída**: Linha poligonal representando a rodovia extraída usando *snakes*; e
- **Rodovia referência**: Linha poligonal representando a rodovia extraída manualmente por um operador.

A rodovia de referência é extraída independentemente dos dados gerados pelo método de extração. A ferramenta computacional utilizada (Maia, 2003), possui uma interface gráfica interativa para a extração confiável e acurada das rodovias de referência. Essa ferramenta computacional realiza também a correspondência ponto a ponto entre as rodovias extraídas e de referência. A metodologia para o estabelecimento de correspondência baseia-se no princípio de que a distância entre dois pontos correspondentes, pertencentes às rodovias de referência e extraída, é mínima.

Os seguintes parâmetros de qualidade são utilizados para avaliar numericamente os resultados obtidos pela metodologia de extração de rodovia usando *snakes* (Maia, 2003, Wiedemann *et al*., 1998):

- **Desvio médio (*e*)**: Sendo e_i, com i = 1,...,n, as distâncias entre os n pontos correspondentes entre as rodovias extraídas e as correspondentes de referência, tem-se:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i}{N} \qquad (14)$$

- **RMS**: é o erro médio quadrático entre as rodovias extraídas e as correspondentes de referência, sendo dado por:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}{n}} \qquad (15)$$

O parâmetro *e* permite avaliar a proximidade geométrica entre as rodovias extraídas e as de referência. Já o RMS permite inferir sobre a acurácia da metodologia de extração.

A seguir são apresentados os resultados obtidos e as respectivas análises.

No primeiro experimento (Fig. 2) é utilizada uma imagem (694X444 pixels) de baixa resolução, com a rodovia manifestando-se na imagem com largura de 1 a 2 pixels. Desta forma, esta rodovia se apresenta na imagem como uma feição linear. Os pontos sementes usados estão projetados como círculos claros na imagem (Fig. 2). A linha poligonal resultante da extração usando *snakes* é plotado em branco sobre a imagem original. Uma inspeção visual sobre o resultado obtido comprova um excelente desempenho do método.

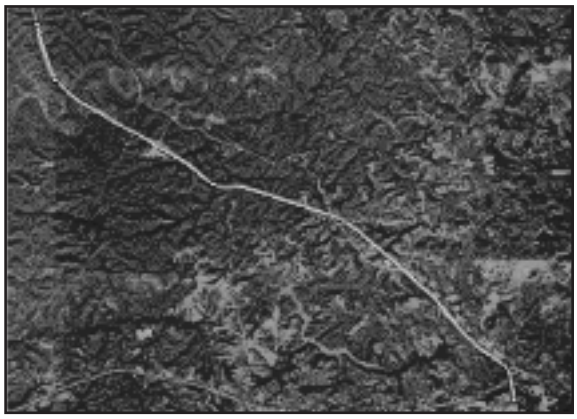

Figura 3 - Resultado da extração de uma rodovia em imagem de baixa resolução.

Os parâmetros numéricos de avaliação obtidos para o primeiro experimento são mostrados na tabela 1

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade para a rodovia extraída no primeiro experimento.

Desvio Médio (pixel)	RMS (pixel)
0,6	0,7

O desvio médio de 0,6 pixels mostra a grande proximidade da rodovia extraída em relação à rodovia de referência. Também a acurácia, indicada

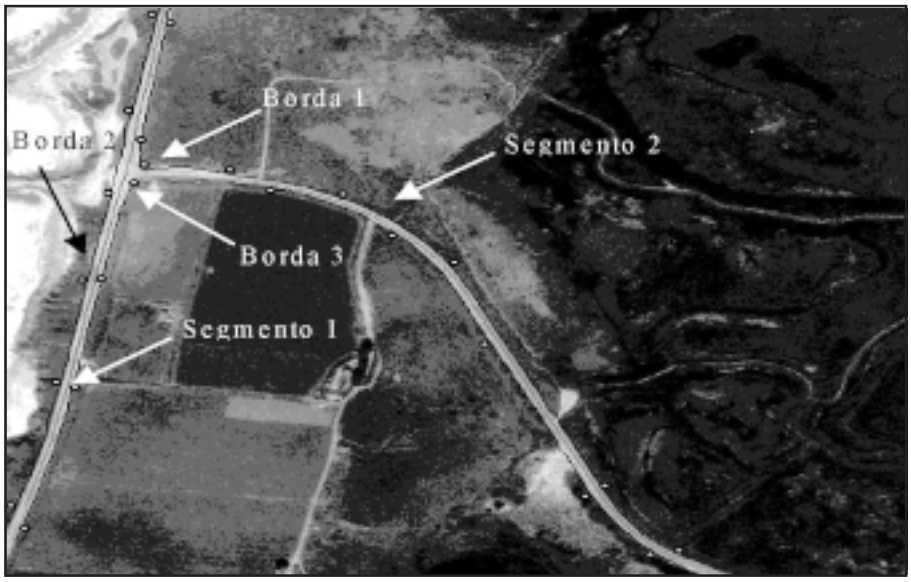

Figura 4 - Resultado da extração de uma rodovia em imagem de média resolução.

pelo valor de RMS de 0,7 pixels, mostrou-se bastante satisfatória. Portanto, verificou-se tanto de forma visual quanto numérica um bom desempenho do método baseado em *snakes* com a imagem usada neste experimento.

O segundo experimento foi realizado com uma imagem (500X500 pixels) de média resolução (Fig. 4), onde as rodovias manifestam-se como faixas alongadas de aproximadamente 5 pixels de largura. Os resultados gerados pelo método de extração usando *snakes* (Fig. 4), isto é, as bordas de rodovia, encontram-se plotados em preto sobre a imagem de entrada. Na mesma figura são mostrados os eixos da rodovia obtidos pela interpolação de pontos médios entre as linhas poligonais representando os pares de borda de rodovia. Na figura 4 são mostrados também os pontos sementes fornecidos pelo operador, que são indicados por pequenos pontos brancos próximos as bordas da rodovia, gerando linhas poligonais que descrevem de maneira grosseira a bordas de rodovia. Notar que, conforme mostra a figura 4, neste caso o objetivo é extrair as três bordas que margeiam ambas as rodovias. Geralmente é necessário o posicionamento de uma maior quantidade de pontos nas regiões de maior curvatura, locais onde a rodovia muda mais rapidamente de direção. Vale lembrar também que o número mínimo de pontos para iniciar o processo de extração é seis.

A figura 4 mostra que os resultados obtidos são bastante satisfatórios, isto porque as linhas poligonais extraídas descrevem de forma precisa as correspondentes bordas de rodovia. O desempenho do método foi adequado mesmo onde não existem as bordas de rodovia. A ótima qualidade do eixo interpolado de rodovia é conseqüência do bom desempenho do método na extração das bordas.

A tabela 2 mostra os parâmetros de qualidade para os eixos interpolados de rodovia. Estes parâmetros confirmam o excelente desempenho do método. De fato, nota-se que o desvio médio entre as rodovias extraídas e as correspondentes de referência é de 0,5 pixel, mostrando que os resultados obtidos estão bastante próximos dos de referência. O RMS no nível de sub-pixel (isto é, 0,6 pixel) mostra que os resultados obtidos estão muito pouco dispersos em relação aos dados de referência. Em outras palavras, os resultados obtidos são bastante acurados.

O terceiro experimento foi realizado com uma imagem de (1168X272 pixels) de alta resolução (Fig. 5), onde o segmento de rodovia manifesta-se como uma faixa alongada de aproximadamente 15 pixels. Nesta imagem nota-se alguns locais onde as bordas são mal definidas como, por exemplo, na região

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade dos eixos de rodovia extraídos no segundo experimento

Rodovia	Desvio Médio (pixel)	RMS (pixel)
Segmento 1	0,3	0,4
Segmento 2	0,7	0,8
Toda malha	0,5	0,6

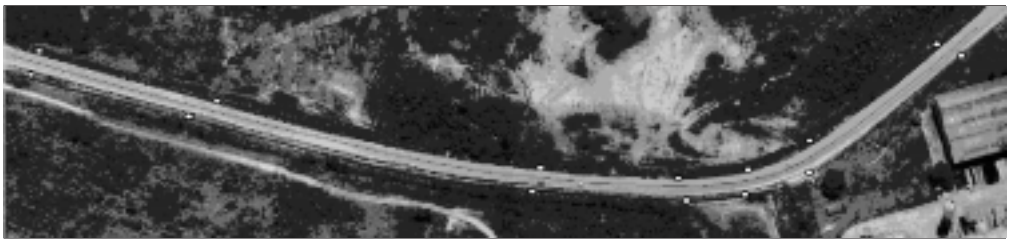

Figura 5 - Resultado da extração de uma rodovia em imagem de alta resolução

de maior curvatura da rodovia. Por ser uma imagem de alta resolução, pode-se verificar a presença de automóveis sobre o leito da rodovia, o que pode dificultar a extração. A exemplo dos experimentos anteriores, as bordas extraídas e o eixo de rodovia interpolado estão sobrepostos sobre a imagem de entrada. Os pontos sementes também estão dispostos ao longo das duas bordas que se deseja extrair.

Observando a figura 5, pode-se notar que o método usando *snakes* mostrou-se bastante eficaz na extração de bordas. Apesar das dificuldades encontradas com a ausência de bordas bem definidas, principalmente na região de maior curvatura, as linhas poligonais representando as bordas são de boa qualidade. Conseqüentemente, o eixo da rodovia interpolado é também de boa qualidade. Nota-se também que automóveis, não influenciaram o resultado final da extração

Os parâmetros de qualidade, embora estejam um pouco acima de 1 pixel, indicam um bom desempenho do algoritmo baseado em *snakes*. Como mostra a tabela 3, o erro médio e o RMS são de 1,2 pixels e 1,4 pixels, respectivamente. Estes valores estão bem acima dos obtidos nos experimentos anteriores, fato que está diretamente relacionado com a resolução da imagem. Isto é, quanto maior a resolução da imagem, maior será o erro de pontaria cometido pelo operador, uma vez que o eixo de rodovia é uma linha imaginária. Os resultados obtidos neste experimento e no anterior podem ser comparados em termos de precisão relativa (razão entre o RMS e a largura média da rodovia). Nota-se que a precisão relativa para ambos os casos é de aproximadamente 1/10, o que, aliás, ocorreu para os outros experimentos realizados e não apresentados neste artigo. Assim, independentemente da resolução da imagem de entrada, é esperada uma precisão relativa de 1/10 para o método de extração apresentado neste artigo.

.

Tabela 3 - Parâmetros de qualidade para o eixo de rodovia extraído no terceiro experimento

Desvio Médio (pixel)	RMS (pixel)
1,2	1,4

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi apresentado e testado um método para a extração semi-automática de rodovias em imagens de baixa, média e alta resolução, tendo por base o método baseado em *snakes* proposto por Kass *et al*. (1987), que tem sido utilizado para a extração de feições em imagens digitais. O assunto pesquisado pertence a um tema mais geral, de grande interesse da comunidade científica afim, envolvendo a extração de feições cartográficas para alimentação ou a atualização de base de dados de SIG (Sistemas de Informações Geográficas).

Os resultados experimentais mostraram que a utilização do método baseado em contorno ativo na extração de bordas de rodovias mostrou-se satisfatório. Além das energias geradas pela imagem que atraem a curva *snakes* para a feição que se deseja extrair, o método possui injunções de contorno que garantem uma curvatura suave. Assim, mesmo em casos onde é identificada a ausência de bordas, a curva *snakes* não se perde, mostrando robustez nestas situações. Uma outra observação importante está relacionada com a precisão relativa do método, que se mantém em torno de 1/10, independentemente da resolução da imagem de entrada.

Agradecimentos - Este trabalho contou com apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) - Processo no. 2001/01168-5. Contou também com apoio do CNPq, através de Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do co-autor do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bacsy, R. & Tavacoli, M. 1976. Computer recognition of roads from satellite pictures. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 6**(9): 76-84.

Kass, M., Witkin, A. & Terzopoulos, D. 1987. Snakes: Active contour models. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 1987, Londres, **Proceedings...** Londres, p. 259-268.

Li, H. 1997. **Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images**. Zurich-Suiça. 152p., PhD thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH.

Maia, J. L. 2003. **Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais.** Presidente Prudente. 116p. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista.

Mayer, H., Laptev, I., Baumgartner, A. & Steger, C. 1997. Automatic road extraction based on multi-scale modeling, context, and snakes. In: INTERNATIONAL ARCHIVES FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, Columbus, OH, **Proceedings...**Columbus, v. 32, p. 106-113.

Neuenschwander, W. M., Fua, P., Iverson, L., Szekely, G. & Kubler, O. 1997. Ziplock snakes. **International Journal Computer Vision,** 25(6): 191-201.

Oliveira, R. M. S. 2003. **Extração de rodovias utilizando snakes**. Presidente Prudente. 80p. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista.

Quam, L. H. 1978. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: IMAGE UNDERSTANDING WORKSHOP, 1978, Ann Arbor, MI, **Proceedings...**Ann Arbor, p. 51-55.

Wiedemann C., Heipke C., Mayer H. & Jamet O. 1998. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. In: Bowyer K.J. & Phillips P.J. (Eds.). **Empirical evaluation techniques in computer vision**. Los Alamitos, IEEE Computer Society Press. p.172-187.

Williams, D. J. & Shah, M. 1992. A fast algorithm for active contours and curvature estimation. **CVGIP: Image Understanding**, 55(1):14-26.