

DELINEAMENTO DE ESTRADAS VICINAIS USANDO TÉCNICAS DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS

Secondary road delineation by using image correlation techniques

TATIANA SUSSEL GONÇALVES MENDES¹
ANTÔNIO JULIANO FAZAN²
ALUIR PORFÍRIO DAL POZ³

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas –
FCT/UNESP

² Graduando do Curso de Engenharia Cartográfica – FCT/UNESP

³ Departamento de Cartografia – FCT/UNESP

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
sussel@pos.prudente.unesp.br; ajfazan@estudante.prudente.unesp.br;
aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Este artigo apresenta um método para o delineamento de estradas vicinais em imagens digitais. Baseia-se numa combinação entre uma técnica de extrapolação linear e um delineador de rodovia baseado em técnicas de correlação. Um ponto do eixo de rodovia, previamente extraído, é linearmente extrapolado, resultando numa posição aproximada. Esta posição é corrigida pelo delineador de rodovia baseado na correlação entre perfis de tons de cinza, extraídos transversalmente ao eixo da rodovia. Esta estratégia é então repetida até que todo o eixo da rodovia em consideração seja delineado. O processo de extração é interrompido se a porcentagem de falhas na correção das posições extrapoladas, num segmento predefinido de rodovia, for maior que um dado limiar. A fim de inicializar o processo de extração o operador necessita fornecer a posição, a direção e a largura da rodovia em um ponto inicial. Sempre que o método não for capaz de proceder com o delineamento, o operador pode intervir para fornecer as informações necessárias para a reinicialização do processo. Os resultados experimentais obtidos a partir da aplicação do método aos dados reais são apresentados e discutidos neste artigo.

ABSTRACT

This paper presents a method for the secondary road delineation from digital images. It is based on a combination between a linear extrapolation technique and a correlation-based road delineator. A previously extracted road axis point is linearly extrapolated, resulting in an approximate position. This approximate position is corrected by the correlation-based road delineator using 1D grey level profiles extracted perpendicularly to the road axis. This strategy is then repeated to allow the entire road axis to be extracted. The extraction process is halted if the percentage of fails in correcting the extrapolated points in a pre-defined road segment is greater than a given threshold. In order to initialize the extraction process, the operator needs to supply a starting point plus direction and width. Whenever the method cannot proceed itself, the operator may re-enter the needed information to restart the road extraction process. Experimental results obtained from the application of the method to real image data are presented and discussed in this paper.

1 INTRODUÇÃO

A automação em Fotogrametria tem evoluído significativamente em alguns processos fotogramétricos, justamente naqueles que se caracterizam pelo caráter mais geométrico. Por exemplo, pode-se citar o caso da medida automática de marcas fiduciais e da determinação automática da correspondência entre pontos homólogos (BAUMGARTNER et al., 1999). Este último avanço trouxe ganhos práticos consideráveis aos processos de orientação relativa, de geração de MDT (Modelos Digitais do Terreno) e de aerotriangulação. Outro processo fotogramétrico de cunho geométrico relativamente bem resolvido é a geração automática de ortofoto. Já os processos de cunho semântico são muito mais difíceis de serem automatizados, pois necessitam da determinação do significado dos objetos cartográficos, além dos respectivos delineamentos geométricos. Dá-se a esse processo a denominação genérica de extração de feições, envolvendo duas tarefas básicas, isto é, a de reconhecimento e a de delineamento. Geralmente a tarefa de reconhecimento é muito mais difícil de ser realizada, justamente porque depende de conhecimentos semânticos para atribuir o significado ao objeto. Após o reconhecimento, cada objeto pode ser delineado geometricamente usando basicamente informações de cunho geométrico e radiométrico. Os métodos automáticos para a extração de feições desempenham ambas as tarefas de reconhecimento e de delineamento, mas, em se tratando de métodos semi-automáticos, é apenas inerente a tarefa de delineamento, uma vez que o reconhecimento fica a cargo da habilidade interpretativa do operador humano.

Especialmente a extração de rodovias em imagens digitais tem recebido considerável atenção de pesquisadores da área de Fotogrametria e, também, de outras áreas, como a de Visão Computacional. De fato, o problema de extração de rodovia vem sendo alvo de inúmeras pesquisas desde os trabalhos pioneiros de

Bajcsy e Tavakoli (1976) e de Quam (1978). Até o presente momento, sistemas totalmente automatizados para a extração de rodovias estão muito longe de um estado maduro e, conseqüentemente, nenhum sistema operacional deverá estar disponível num futuro próximo. Em relação aos sistemas semi-automáticos, provavelmente alguns sistemas existentes já podem ser utilizados na coleta regular de informações espaciais relacionadas com malha viária. As metodologias de extração que podem ser implementadas nos sistemas semi-automáticos são geralmente categorizadas em dois grupos. Num primeiro grupo estão os chamados delineadores seqüenciais, os quais se caracterizam principalmente pelo uso de informações locais para decidir seqüencialmente pela inclusão de um próximo ponto na lista de pontos extraídos até então. Estes delineadores são inicializados por dois pontos sementes próximos, geralmente locados pelo operador no início da rodovia selecionada para extração, com intuito de fornecer a posição e a direção inicial para o algoritmo. Exemplos típicos destas metodologias são encontradas em McKeown e Denlinger (1988) e Dal Poz e Silva (2003). Num segundo grupo estão os delineadores baseados em algum processo de otimização global, como, por exemplo, programação dinâmica (MERLET e ZERUBIA, 1996, GRUEN e LI, 1997) e contorno ativo (KASS et al., 1987, AGOURIS et al., 2000). Estas metodologias usam informações de toda a rodovia selecionada para extração, tendo como informações externas iniciais alguns pontos sementes locados pelo operador ao longo da mesma.

Este trabalho tem por inspiração principal a constatação de que, mesmo em estados mais desenvolvidos do país, existem grandes extensões de rodovias vicinais não mapeadas, geralmente ligando pequenas cidades, bairros, vilas e comunidade de agricultores. Só no estado de São Paulo se estima algo em torno de 200.000 Km. Os métodos semi-automáticos para extração de rodovias podem acelerar bastante o processo de captura ou atualização das malhas viárias vicinais em imagens aéreas e de satélite, uma vez que ao operador caberia apenas identificar as rodovias vicinais e fornecer poucos pontos sementes. Nesta perspectiva, este trabalho apresenta uma metodologia semi-automática com grande potencial de contribuir neste contexto. A Seção 2 apresenta esta metodologia, seguida da apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos (Seção 3). Por último, as principais conclusões e perspectivas futuras são apresentadas na Seção 4.

2 METODOLOGIA PARA O DELINEAMENTO DE RODOVIAS BASEADA EM TÉCNICAS DE CORRELAÇÃO

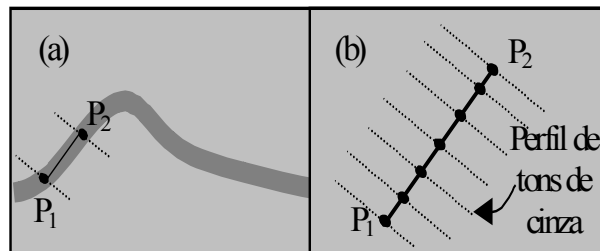
O método consiste basicamente das etapas de inicialização e de delineamento seqüencial da rodovia. A etapa de inicialização conta necessariamente com a participação de um operador, que deve fornecer dois pontos iniciais, também chamados de pontos sementes, sobre a rodovia. Já a etapa de delineamento é totalmente automática, dependendo apenas do algoritmo computacional de delineamento. A seguir são descritas estas etapas.

2.1 INICIALIZAÇÃO

Num primeiro momento, a inicialização é efetuada pelo operador através do mouse, que indica dois pontos sementes (P_1 e P_2) em uma região aproximadamente reta da rodovia (figura 1(a)). O primeiro ponto indica o início da rodovia e o segundo a sua direção. Neste momento, é necessário também que o operador forneça visualmente a largura aproximada da rodovia.

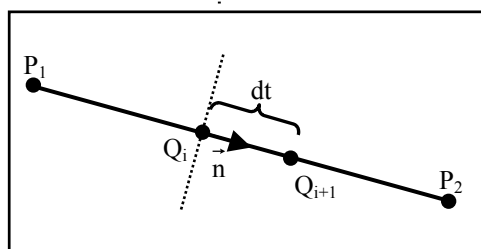
A inicialização procede com a amostragem de uma sequência de pontos regularmente espaçados ao longo do segmento de reta $\overline{P_1P_2}$ (figura 1(b)). Nestes pontos são obtidos perfis de tons de cinza na direção transversal ao segmento $\overline{P_1P_2}$. A inicialização é finalizada com o cálculo de um perfil médio de tons de cinza, denominado perfil modelo. Os procedimentos matemáticos para a amostragem de pontos e perfis de tons de cinza são apresentados a seguir.

Figura 1 - Inicialização do processo. (a) Segmento de reta formado pelos pontos iniciais P_1 e P_2 . (b) Sequência de pontos e extração de perfis de tons de cinza.



2.1.1 INTERPOLAÇÃO DE UM PONTO QUALQUER (Q_{i+1})

Sejam $P_1(L_{P1}, C_{P1})$ e $P_2(L_{P2}, C_{P2})$ os pontos sementes fornecidos pelo operador (figura 2). O ponto a ser interpolado a uma distância dt a partir do ponto $Q_i(L_{Qi}, C_{Qi})$ é representado por $Q_{i+1}(L_{Qi+1}, C_{Qi+1})$. Os elementos entre parêntesis são as coordenadas digitais (linha e coluna) dos pontos envolvidos na situação mostrada na figura 2.

Figura 2 - Processo de interpolação.

A equação para interpolar Q_{i+1} a partir de Q_i , é dada por:

$$\begin{bmatrix} L_{Q_{i+1}} \\ C_{Q_{i+1}} \end{bmatrix} = dt \cdot \vec{n} + \begin{bmatrix} L_{Q_i} \\ C_{Q_i} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde, $\vec{n} = (\alpha \ \beta)$ é um vetor unitário correspondente à direção definida pelos pontos P_1 e P_2 .

2.1.2 EXTRAÇÃO DE UM PERFIL EM Q_{i+1}

Na posição interpolada (Q_{i+1}), uma seção perpendicular à rodovia é tomada, e nesta é estabelecida uma janela 1D através da amostragem de tons de cinza de pontos espaçados regularmente. As posições dos pontos na janela são calculadas através da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} L \\ C \end{bmatrix}_J = K \cdot r \cdot \begin{bmatrix} -\beta \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{Q_{i+1}} \\ C_{Q_{i+1}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sendo que:

- $(L, C)_J$: são as coordenadas de pontos amostrados na janela;
- $(L_{Q_{i+1}}, C_{Q_{i+1}})$: coordenadas de um ponto interpolado do eixo da rodovia, sendo este o centro da janela (ou perfil);
- K : varia de $1, \dots, n_{\text{mod}}$ num lado do eixo da rodovia e de $-1, \dots, -n_{\text{mod}}$ noutro lado do eixo da rodovia;
- $\vec{n}_o = (-\beta \ \alpha)$: é um vetor unitário perpendicular ao eixo da rodovia, sendo portanto normal ao vetor $\vec{n} = (\alpha \ \beta)$, já definido anteriormente na equação 1;
- r : é a resolução da janela (ou perfil). A fim de possibilitar uma precisão *sub-pixel*, o valor de r deve ser menor que 1 *pixel*; e

- n_{mod} : é o número de pontos reamostrados em cada lado do eixo da rodovia, sendo calculado da seguinte forma:

$$n_{\text{mod}} = \text{int}(0,55 \cdot w / r) + 1 \quad (3)$$

Para definir o parâmetro n_{mod} (equação 3), primeiramente é adotada a largura da janela de busca (em *pixel*) como sendo igual à largura da rodovia (w) com uma tolerância de 10%, ou seja, $1,1w$. Com essa tolerância, toma-se uma janela de busca um pouco maior que largura da rodovia, possibilitando, numa próxima etapa, realizar a correlação. Finalmente, calculam-se os tons de cinza para as posições da janela definida acima através de um processo de reamostragem ou interpolação de tons de cinza. Para tal, geralmente, são utilizados os métodos de interpolação bilinear, interpolação pelo vizinho mais próximo e convolução cúbica (RICHARDS, 1986). Na metodologia proposta é utilizado o método bilinear.

2.1.3 OBTENÇÃO DO PERFIL MODELO E DE UMA SEQUÊNCIA DE PONTOS

Como mostra a figura 1(b), uma lista de pontos é amostrada ao longo do segmento de inicialização. Esses pontos são obtidos através do emprego da equação 1 a passo (dt) constante. Se d for a distância entre os pontos sementes P_1 e P_2 , então o número de pontos a serem amostrados é $\ell = \text{int}(d/dt)$. Como ambos os pontos sementes devem ser incluídos na lista de inicialização, então a lista final é $\{P_1, Q_1, \dots, Q_\ell, P_2\}$.

O perfil modelo, a ser usado para continuar a extração da rodovia na próxima etapa, é obtido através de uma média aritmética dos elementos (tons de cinza) correspondentes dos perfis de tons de cinza extraídos nos pontos da lista de inicialização.

2.2 DELINEAMENTO DA RODOVIA

Esta etapa baseia-se no mesmo princípio usado na inicialização (etapa anterior), com algumas diferenças fundamentais.

Na inicialização, o segmento da rodovia selecionado era reto. Já nesta etapa, a rodovia apresenta forma desconhecida, podendo ser modelada apenas localmente por uma reta ou outro modelo de trajetória. Tendo em vista que uma rodovia geralmente possui forma suave, uma modelagem adequada pode ser obtida através de longos segmentos de reta conectados, isto é, uma linha poligonal. Assim, segmentos de reta são adotados como modelos locais de trajetória, os quais são estabelecidos através dos últimos pontos extraídos. No início do delineamento da rodovia, o modelo de trajetória baseia-se na própria sequência de pontos determinada na inicialização.

Uma outra diferença é em relação à posição extrapolada, que nesta etapa necessita ser refinada através do processo de correlação, que estabelece a melhor correspondência entre o perfil modelo previamente estabelecido e um perfil extraído num ponto extrapolado. Aqui é usada uma estratégia bem conhecida em Fotogrametria para a determinação precisa de pontos correspondentes. Primeiramente, funções de correlação são usadas para dar uma primeira aproximação para o problema. Na seqüência, a solução obtida é refinada usando técnicas de correlação pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

2.2.1 PASSOS PARA EXTRAPOLAR E EXTRAIR UM PONTO NA RODOVIA

Para realizar a extrapolação e extração de um único ponto são necessários os seguintes passos: estabelecimento do modelo de trajetória; extração de um perfil medido; correlação entre o perfil medido e o perfil modelo; validação do novo ponto, refinamento do novo ponto usando correlação pelo MMQ e atualização do perfil modelo. Todos os passos são descritos a seguir:

- a) Estabelecimento do modelo de trajetória e extrapolação de um ponto um passo adiante

Nos últimos pontos extraídos (por exemplo, 10 a 15 pontos) realiza-se o ajuste pelo MMQ de uma reta, estabelecendo-se assim o modelo da trajetória local. No início do delineamento da rodovia, utiliza-se como últimos pontos extraídos a lista de pontos obtida na inicialização. O modelo de trajetória é usado para extrapolar o último ponto extraído um passo adiante (por exemplo, dois ou três *pixels*). Para tanto, é usado o mesmo princípio apresentado na figura 2.

- b) Extração de um perfil medido

Procedimento análogo ao da Subseção 2.1.2, com uma diferença em relação à largura da janela de busca (n_{med}), que nesse caso, é adotada como sendo igual à largura da rodovia (w) com uma tolerância de 20%, ou seja, $n_{med} = \text{int}(0,6 \cdot w/r) + 1$. A tolerância é maior, para que o perfil medido seja maior que perfil modelo, possibilitando assim realizar a correlação, tendo como resultado a posição relativa de maior similaridade entre os perfis modelo e medido. O perfil medido é estabelecido no ponto previamente extrapolado pelo modelo de trajetória.

- c) Correlação entre os perfis modelo e medido

Trata-se de um procedimento de correlação unidimensional usando uma função de correlação. Neste trabalho utilizou-se a função erro quadrático, que tem como característica desejável o fornecimento da posição de melhor correlação com maior exatidão, sendo expressa matematicamente por (YANNIRIS, 1974):

$$S(j) = \frac{1}{2 \cdot n_{mod} + 1} \sum_{i=1}^{i=2 \cdot n_{mod} + 1} (A(i) - B(i + j))^2 \quad (4)$$

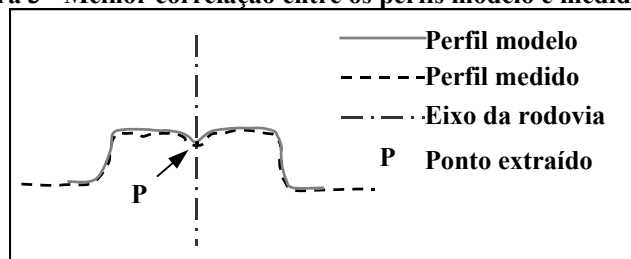
Onde:

- A é um vetor com $2.n_{\text{mod}} + 1$ elementos representando o perfil modelo;
- B é um vetor com $2.n_{\text{med}} + 1$ elementos representando o perfil medido;
- $0 \leq j \leq 2.(n_{\text{med}} - n_{\text{mod}})$: é um contador que permite a realização das $2.(n_{\text{med}} - n_{\text{mod}}) + 1$ possíveis comparações entre ambos os perfis.

A posição de melhor correlação entre ambos os perfis é encontrada quando o coeficiente de correlação $S(j)$ for mínimo. A posição corrigida do eixo da rodovia é dada pelas coordenadas do elemento do perfil medido correspondente ao ponto central do perfil modelo (figura 3).

A figura 3 mostra a posição de melhor correlação entre dois perfis ideais de rodovia. Como uma rodovia em imagens de média e alta resolução ($\text{pixel} < 2\text{m}$) é geralmente uma faixa alongada de alta intensidade de brilho, com grande contraste em relação às adjacências, as formas características de ambos os perfis se aproximam da forma ideal mostrada na figura 3. No caso de imagens de baixa resolução (como por exemplo, imagens SPOT de 10 m de resolução) o perfil teria a forma de um corte de uma cumeira. De um modo geral, a forma do perfil não é um fator crítico, desde que o mesmo se mantenha adequadamente estável por um curto segmento de rodovia.

Figura 3 - Melhor correlação entre os perfis modelo e medido.



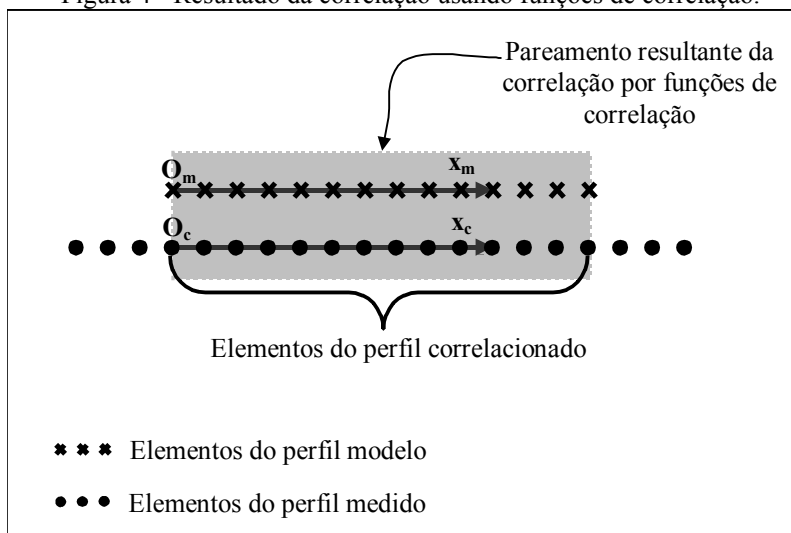
d) Validação do ponto extraído

Se o coeficiente de correlação não for pobre (ou seja, se for menor que um limiar pré-definido), o ponto é aceito se não provocar uma mudança abrupta de direção da rodovia. Caso seja aceito, a lista de coordenadas do eixo da rodovia e a lista dos últimos pontos extraídos são atualizadas, eliminando o ponto mais antigo desta última lista.

e) Refinamento usando o MMQ

A posição do eixo obtida no passo c pode ser refinada usando a conhecida estratégia de correlação pelo MMQ (SCHENK, 1999). A figura 4 mostra como seria o resultado da estratégia de correlação baseada em funções de correlação.

Figura 4 - Resultado da correlação usando funções de correlação.



Como mostra a figura 4, a correlação usando funções de correlação gera um pareamento entre o perfil modelo e um segmento do perfil medido. Para evitar ambigüidades, este último será denominado daqui a diante de perfil correlacionado. Notar que nos perfis são definidos dois referenciais 1D ($O_m X_m$ e $O_c X_c$), cujas origens são os pontos iniciais à esquerda de ambos os perfis.

O seguinte modelo matemático é utilizado para relacionar os tons de cinza de ambos os perfis:

$$g_m(x_m) + n(x_m) = r + r' g_c(x_c = ax_m + b) \quad (5)$$

Onde:

- g_m e g_c são os tons de cinza dos perfis modelo e correlacionado, respectivamente;
- n é o ruído da imagem;
- r e r' são os parâmetros necessários para modelar linearmente as diferenças radiométricas entre ambos os perfis, os quais são necessários porque estes perfis não correspondem às mesmas regiões da imagem; e
- a e b são parâmetros geométricos designados para modelar possíveis diferenças em escala e translação de ambos os perfis, cujas razões são parecidas com as apresentadas no item anterior.

Após linearizar o membro da direita da equação 5 em torno dos parâmetros aproximados (a_0 , b_0 , r_0 , r'_0), obtém-se por reagrupamento de termos a equação de observação linearizada para um par de pontos correspondentes i :

$$\Delta g_i + n_i = \begin{bmatrix} \Delta g_c^i a_0 & \Delta g_c^i & 1 & g_c(x_c^i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} da \\ db \\ dr \\ dr' \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde:

- $\Delta g_i = g_m(x_m^i) - g_c(x_c^i)$ é a observação na equação 5;
- $\Delta g_c^i = g_c(x_c^i) - g_c(x_c^{i-1})$; e
- $X^T = [da \ db \ dr \ dr']$ é o vetor das correções aos parâmetros aproximados $X_0^T = [a_0 \ b_0 \ r_0 \ r'_0]$.

Sendo n o número de elementos no perfil modelo ($g_m(x_m^0), \dots, g_m(x_m^{n-1})$) e no perfil correlacionado ($g_c(x_c^0), \dots, g_c(x_c^{n-1})$), pode-se escrever a partir da equação 6 o seguinte sistema linear de equações de observações:

$$\begin{bmatrix} \Delta g_1 \\ \vdots \\ \Delta g_{n-1} \end{bmatrix}_{(n-1) \times 1} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{n-1} \end{bmatrix}_{(n-1) \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta g_c^1 a_0 & \Delta g_c^1 & 1 & g_c(x_c^1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta g_c^{n-1} a_0 & \Delta g_c^{n-1} & 1 & g_c(x_c^{n-1}) \end{bmatrix}_{(n-1) \times 4} \cdot \begin{bmatrix} da \\ db \\ dr \\ dr' \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (7)$$

onde pode-se facilmente identificar, conforme terminologia usual de Ajustamento de Observações, o vetor das observações (Lb) e a matriz A . Considerando as observações como estatisticamente independentes e de mesma qualidade, e considerando também a variância de unidade peso *a priori* igual a variância das observações, a solução desejada é da forma:

$$X_a = (A^T A)^{-1} A^T Lb + X_0 \quad (8)$$

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T A)^{-1} \quad (9)$$

onde X_a e $\sum X_a$ são respectivamente o vetor dos parâmetros ajustados e a matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados, e $\hat{\sigma}_0^2$ é a variância da unidade peso *a posteriori*.

É importante ressaltar que a solução dada pela equação 8 é iterativa. No início, é conveniente adotar $X_0^T = [1 \ 0 \ 0 \ 1]$, implicando em cálculos apenas com os elementos originais dos perfis modelo e correlacionado. Após a realização do primeiro ciclo de cálculo, os elementos iniciais de X_0 variarão, sendo assim

necessária a reamostragem de todos os elementos (isto é, tons de cinza) do perfil correlacionado. As iterações prosseguem com a necessidade de reamostragem do perfil correlacionado em cada iteração, parando quando as correções aos parâmetros aproximados forem desprezíveis.

Após a convergência do processo de correlação é necessário ainda calcular a posição corrigida do eixo de rodovia. O primeiro passo consiste em calcular a posição do elemento central do perfil modelo ($x_m^{central}$) no perfil correlacionado:

$$x_c^{central} = a^{aj} x_m^{central} + b^{aj} \quad (10)$$

onde, $x_c^{central}$ é a posição do eixo de rodovia no referencial do perfil correlacionado e a^{aj} e b^{aj} são os parâmetros geométricos ajustados, obtidos através da equação 8.

Como mostra a figura 4, a posição do primeiro elemento do perfil correlacionado ($x_c=0$ ou ponto O_c) é conhecida *a priori* no referencial da imagem, isto porque a posição de cada elemento do perfil medido é conhecida neste referencial. Sendo as coordenadas deste ponto dadas por (L_0, C_0), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} L_c \\ C_c \end{bmatrix} = x_c^{central} \begin{bmatrix} -\beta \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0 \\ C_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde $\bar{n}_0 = [-\beta \ \alpha]$ já foi definido anteriormente e (L_c, C_c) são as coordenadas refinadas de um ponto do eixo da rodovia.

f) Atualização do perfil modelo

O perfil modelo é atualizado através de uma média ponderada entre o perfil modelo atual e o segmento correspondente do último perfil medido (figura 3), adotando-se um peso maior para o perfil modelo, evitando assim uma mudança abrupta do perfil modelo. No presente trabalho, foi adotado peso 1 para o perfil medido e 4 para o perfil modelo.

2.2.2 PROSSEGUIMENTO E PARADA DO PROCESSO DE EXTRAPOLAÇÃO E EXTRAÇÃO

O processo de delineamento para apenas um ponto descrito na Subseção 2.2.1 é repetido sequencialmente para possibilitar a extração de toda a rodovia. O ideal é que o processo prossiga até o final da rodovia, mas obstruções (por exemplo, árvores e sombras) e outras irregularidades podem provocar a parada do processo. Em ambos os casos, o critério de parada consiste em verificar se as falhas sucessivas excedem uma tolerância pré-definida. No caso de ocorrer a parada automática do processo de extração, o operador pode intervir para reiniciar o processo ou, até mesmo, finalizá-lo.

3 RESULTADOS E ANÁLISE

O método previamente descrito foi implementado em ambiente PC usando a linguagem Borland C++. O *software* desenvolvido não possui, até o momento, uma interface gráfica-interativa para auxiliar o operador no fornecimento de informações necessárias (por exemplo, os pontos sementes) para a inicialização ou reinicialização do processo de extração. Os pontos sementes são coletados independentemente através de um *software* comercial disponível e fornecidos, junto com outras informações, via arquivo ao sistema de extração. A fim de avaliar experimentalmente o potencial do método na extração semi-automática de estradas vicinais, foram utilizadas quatro imagens de média resolução - isto é, com resolução aproximada de 2 m, equivalendo a vias com aproximadamente 5 *pixels* de largura. Embora as vias presentes nessas imagens não sejam propriamente vicinais, possuem em alguns casos características parecidas (por exemplo, largura irregular e obstruções causadas por árvores) com estas vias, como é o caso das vias presentes nas imagens das figuras 5, 6, 7 e 8.

Figura 5 - Resultados obtidos com a área teste 1.



A figura 5 mostra os resultados obtidos com uma imagem real de média resolução e de dimensão 500x500 *pixels*. Nesta imagem observa-se duas rodovias principais, com largura regular e bordas bem definidas, enquanto que as rodovias

secundárias apresentam-se mal definidas devido principalmente ao baixo contraste. Os pontos sementes referentes a cada rodovia e os vetores extraídos foram projetados sobre a imagem de entrada. Os pontos sementes foram escolhidos numa região da rodovia mais próxima de uma reta. Analisando visualmente os resultados, observa-se que com esta imagem o método apresentou um ótimo desempenho, devido ao conteúdo da imagem ser bastante favorável. Mesmo quando os pontos sementes foram obtidos em uma área com bordas irregulares, como no caso da rodovia curva, o método demonstrou robustez, extraíndo o eixo da rodovia. Ainda é possível verificar que os eixos centrais obtidos por este método são bem próximos aos que seriam obtidos usando uma visão natural. No entanto, podem ser observadas algumas irregularidades, como por exemplo, no cruzamento de ambas as rodovias, onde é possível observar um desvio do eixo central da rodovia. Em relação à análise numérica, o eixo da rodovia curvilínea extraído pelo método apresentou um deslocamento médio de 0,61 *pixel* em relação ao eixo real extraído visualmente. Já o eixo extraído da outra rodovia apresentou um maior deslocamento médio de 1,38 *pixels*.

Figura 6 - Resultados obtidos com a área teste 2.



A figura 6 mostra os resultados obtidos com uma imagem real de dimensão 500x500 *pixels*. Esta imagem apresenta uma rodovia aproximadamente reta, mas com uma largura mal definida devido à areia da praia que obstrui as bordas da rodovia. Os pontos sementes e o vetor extraído são também projetados sobre a

imagem de entrada. Como neste caso a rodovia possui largura de no máximo 3 pixels, o vetor projetado e a própria rodovia se confundem. Pelas razões já expostas, os pontos sementes foram obtidos em uma porção reta da rodovia. A análise visual dos resultados revela que o método funcionou satisfatoriamente, verificando que as regiões bastante problemáticas são os segmentos de rodovia onde as bordas são obstruídas pela areia. Da análise numérica conclui-se que o eixo da rodovia extraído pelo método apresentou um deslocamento médio de 1,93 *pixels* quando comparado com o eixo real extraído visualmente.

A figura 7 mostra os resultados obtidos com uma imagem real de média resolução e de dimensão 553x583 *pixels*. Nesta imagem observa-se uma rodovia principal com curvas suaves cuja largura apresenta-se um pouco irregular devido à presença de árvores obstruindo as bordas. Os vetores extraídos e os pontos sementes são identificados sobre a imagem de entrada. Esta imagem não apresenta um conteúdo muito favorável, pois apesar da rodovia apresentar curvatura relativamente suave e largura da rodovia uniforme, observam-se obstruções que recobrem parcialmente as bordas da rodovia, desfavorecendo o desempenho do método. No entanto, através da análise visual dos resultados, verifica-se que o método teve um ótimo desempenho e demonstrou robustez frente aos obstáculos presentes. Já em relação a análise numérica, tem-se que o eixo da rodovia extraído pelo método apresentou um deslocamento médio de 0,5 *pixel* quando comparado com o eixo extraído visualmente.

Figura 7 - Resultados obtidos com a área teste 3.



A figura 8 mostra os resultados obtidos com uma imagem real de média resolução e de dimensão 567x567 *pixels*. Esta imagem apresenta uma rodovia principal com bordas bem definidas e com curvatura suave, com exceção de uma curva acentuada na parte mais inferior da imagem. É possível observar na imagem outras rodovias, mas que se apresentam mal definidas. Como nos experimentos anteriores, os pontos sementes e o vetor extraído foram projetados sobre a imagem de entrada. Através da análise visual dos resultados, pode-se concluir que o método geralmente apresentou um bom desempenho, inclusive na região da rodovia de grande curvatura. Tal desempenho foi possível devido a flexibilidade do modelo de trajetória, que permite o uso de tamanhos variados de passos de extrapolação. Regiões de curvatura muito acentuadas são modeladas adequadamente através de passos de extrapolação pequenos, como, por exemplo de 1 ou 2 *pixels*. Ao analisar visualmente o eixo da rodovia extraído, verifica-se que o método, geralmente, não conseguiu extrair o eixo central da rodovia. Entretanto, o eixo extraído não é muito diferente em relação ao que seria obtido usando a visão natural. Na análise numérica, o eixo da rodovia extraído pelo método apresentou um deslocamento médio de 1,61 *pixels* quando comparado ao eixo real extraído visualmente.

Figura 8 - Resultados obtidos com a área teste 4.



4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi apresentado um método semi-automático para a extração de rodovias em imagens digitais, incluindo aquelas com características de vias vicinais. O método tem o potencial para ser usado como um assistente de extração da malha viária. Neste esquema de captura de informações espaciais as decisões de alto nível (por exemplo, a identificação das rodovias) são deixadas a cargo de um operador humano, enquanto as operações de medida, que exigem precisão e são cansativas e morosas, são realizadas via algoritmos computacionais.

A avaliação experimental usando quatro imagens reais de média resolução mostrou que o método é bastante promissor. Todas estas imagens apresentaram irregularidades associadas às bordas (por exemplo, ausência ou definição ruim), à variação da largura e às obstruções provocadas principalmente por árvores. Mesmo nestas situações desfavoráveis, a estratégia de delineamento provou ser geralmente robusta e acurada o suficiente, permitindo concluir que o desempenho é comparável ao obtido através da visão natural.

Uma importante direção para trabalho futuro será o desenvolvimento de uma interface gráfica amigável que permita ao operador uma fácil interação com o sistema computacional de extração da malha viária. O ideal é que a intervenção do operador fique limitada apenas a poucos cliques de *mouse*, reduzindo a um mínimo o trabalho do operador. Isso garantiria produtividade com qualidade e pouco

esforço do operador. Uma outra possibilidade ainda não explorada pelo sistema atual é a demarcação pelo operador de segmentos de rodovias plenamente viáveis de serem extraídos pelo algoritmo. No sistema atual o operador dá apenas dois pontos sementes próximos e o delineador prossegue até encontrar o final da rodovia ou encontrar obstáculos intransponíveis. A idéia é modificar um pouco esse princípio, adicionando um ponto semente (ou ponto de controle) para marcar até onde o delineador deve ir. Isto daria mais controle à estratégia de delineamento, ao mesmo tempo que não implicaria em um esforço adicional significativo por parte do operador.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho conta com apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) - Processo no. 2001/01168-5 (Auxílio à Pesquisa) e do CNPq (Bolsa de Mestrado do primeiro autor, Bolsa de Iniciação Científica do segundo autor e Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do terceiro autor).

REFERÊNCIAS

- AGOURIS, P., GYFTAKIS, S., STEFANIDIS, A. **Uncertainty in image-based change detection.** In: Accuracy 2000, Proceedings... Amsterdam, 2000. p. 1-8.
- BAJCSY, R.; TAVAKOLI, M. **Computer recognition of roads from satellite pictures.** IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, v. 6, n. 9, 1976. p. 623-637.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H., **Automatic road extraction in rural areas.** In: International Archives Photogrammetry and Remote Sensing, v. 32, Part 3-2W5, 1999. p. 107-112.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. **Road segment delineation using active testing principle and an edge-based post-processing strategy.** Journal of Geomatica, Canadá, v. 57, n. 4, 2003. p. 399-410.
- GRUEN, A.; LI, H. **Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 63, n. 8, 1997. p. 985-995.
- KASS, M., WITKIN, A. TERZOPOULOS, D. **Snakes: Active contour models.** International Conference on Computer Vision, 1., London, Proceedings ... London, 1987. p. 259-268.
- MCKEOWN, D. M., DENLINGER, J. L. **Cooperative methods for road tracking in aerial imagery.** In: Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition, 1988. 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, 1996. p. 426-431.

- QUAM, A. **Road tracking and anomaly detection in aerial imagery.** Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, 1978. p. 51-55.
- RICHARDS, A. J. **Remote Sensing Digital Image Analysis.** Berlin: Springer-Verlag, 1986. 363 p.
- SCHENK, T. **Digital Photogrammetry.** Estados Unidos: TerraScience, 1999. 428p.
- YANNIRIS, Y. **Improvements to the off-line epipolar correlation.** Dissertação de mestrado, Universidade de New Brunswick, 1974. 104 p.

(Recebido em março/04. Aceito em outubro/04.)