

Método de Extração Semiautomático de Contornos de Telhados Convexos de Edifícios Baseado em *Snake*

Diego Venâncio Thomaz

Núcleo de Matemática e Estatística, UTFPR,
85884-000, Medianeira, PR
E-mail: dvthomaz@utfpr.edu.br

Aluir Porfírio dal Poz

Departamento de Cartografia, FCT, UNESP,
19060-900, Presidente Prudente, SP
E-mail: aluir@fct.unesp.br.

Resumo: *Este trabalho propõe um método de extração de contornos de telhados convexos de edifícios a partir de dados de um Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn). A modelagem do contorno é feita através do modelo de snake, onde um funcional de energia dependente de muitas variáveis será otimizado através do algoritmo de Programação Dinâmica (PD). O processo de extração se inicia por um único ponto semente sobre o telhado. Este ponto se expande radialmente até encontrar o limite do telhado, tornando-se uma curva poligonal fechada. E por fim, são realizados refinamentos sobre os lados do polígono, para que todos os pontos da curva poligonal encontrem o contorno do telhado. O método de extração foi implementado no MATLAB e testado utilizando dados reais. Os resultados são polígonos representando os contornos de telhados de edifícios.*

Palavras-chave: *Contorno Ativo, Snake, Programação Dinâmica*

1 Introdução

As *snakes* foram inicialmente propostas por Kass et al. em 1988 [2], e desde então, têm se destacado em pesquisas na área de segmentação de imagens, podendo-se citar Cohen [1] que utilizou as *snakes* para extração de feições em imagens médicas. No trabalho de Cohen de 1991[1], é proposto o modelo de *snake balloon* que apresenta algumas melhorias em relação ao modelo de *snake* original. Pode ser interpretado geometricamente como um laço que se expande. Neste modelo é adicionada uma força de expansão ao termo de energia externa, aumentando assim o raio de convergência do modelo.

O MDSn é a representação discreta, na forma de uma malha regular, de objetos situados acima da superfície terrestre, cujas cotas dos pontos da malha são elevações acima da superfície. A extração de contornos de telhados de edifícios a partir de um MDSn é um procedimento que pode ser adequadamente formulado em termos de um problema de otimização, que por sua vez pode ser solucionado a partir da utilização de técnicas específicas. O requisito básico para tal é a formulação de um modelo matemático representativo do objeto de interesse a ser extraído. O modelo de *snake*, apresenta características atrativas para a construção de um modelo matemático representando contornos de telhados de edifícios. O modelo resultante apresenta uma estrutura particularmente adequada para ser solucionado através do algoritmo de PD. A solução ótima para o modelo são polígonos representando os contornos extraídos de telhado de

edifícios. Entretanto, os conceitos de *snakes* e PD têm sido pouco explorados na área de extração de características de edifícios a partir de imagens ou modelos digitais de superfície.

O método de extração de contornos de telhados convexos de edifícios proposto neste trabalho tem por motivação principal o modelo de *snake balloon*. Os pontos representativos do contorno do telhado apresentam-se sobre o edifício, isto sugere que o ponto semente seja dado sobre o telhado. Este ponto possui a capacidade de expandir radialmente até o limite do telhado do edifício, tornando-se uma curva poligonal fechada. Por isso, é proposto um potencial que valoriza o crescimento da curva em direções radiais. Por fim, são realizados refinamentos sobre os lados da curva poligonal para que encontrem o contorno do telhado desejado. Obtendo assim, o polígono representativo do contorno do telhado de edifício.

2 O Modelo de *Snakes*

As *snakes* foram inicialmente propostas em [2] e, desde então, têm-se destacado como uma das mais ativas e bem-sucedidas áreas de pesquisa na segmentação de imagens, sendo largamente aplicadas em procedimentos como a detecção de fronteiras, segmentação, modelagem de formas, detecção de movimentos etc.

Definição: Uma *snake* é dada pelo conjunto de curvas definidas em um espaço de admissíveis deformações $A \subset R^2$ que se movem ao longo das direções x e y e representadas por uma função vetorial paramétrica bidimensional v da forma [2]:

$$\begin{aligned} v(s) : \Omega = [a, b] &\rightarrow R^2 \\ s \mapsto v(s) &= (x(s), y(s)), \end{aligned} \tag{1}$$

e um funcional $E(v)$ que representa a energia do modelo que será minimizada e tem a seguinte forma [2]:

$$\begin{aligned} E : A \subset R^2 &\rightarrow R \\ v \mapsto E(v) &= \int_{\Omega} \left(w_1(s) |v_s|^2 + w_2(s) |v_{ss}|^2 + w(s)P(v(s)) \right) ds, \end{aligned} \tag{2}$$

na qual, $x(s)$ e $y(s)$ são funções paramétricas de s ; $\Omega \subset R$ representa o intervalo no qual a função vetorial está definida; v_s e v_{ss} denotam respectivamente as derivadas parciais de primeira e segunda ordem de v em relação a s e P é uma função potencial generalizada associada as forças externas.

O modelo de *snake* apresentado anteriormente é bastante dependente de uma boa aproximação inicial. Além disso, a curva pode ser presa por falsos pontos de borda (provocados por algum ruído na imagem) e não possuir força para evoluir para o contorno desejado. Por isso em [1] é proposto o modelo de *snake balloon*, onde são definidas novas forças e um funcional potencial.

Uma das forças definidas no modelo de *snake balloon* está associada com a normalização da força da imagem, fazendo com que a expansão da curva ocorra com mesma velocidade em todos os seus pontos. A outra força está associada com a convergência da curva, garantindo a expansão da curva ao longo de suas direções normais, parando quando a fronteira da região de interesse for alcançada.

O potencial proposto neste trabalho busca valorizar o crescimento da curva nas direções normais aos vértices, tendo como motivação o modelo de *snake balloon*. A força associada com a convergência faz com que a curva v evolua em direção ao vetor normal \vec{n} de cada um dos seus vértices até encontrar os pontos de borda. Em outras palavras, busca-se a maior taxa de variação do MDSn na direção normal de um ponto $v(s)$. Uma ferramenta que permite medir a taxa de variação numa determinada direção, são as derivadas direcionais. Assim, para $\nabla MDSn(v) \neq \vec{0}$, temos que a derivada direcional do MDSn na direção do vetor normal é dada por:

$$\frac{\partial MDSn}{\partial \vec{n}}(v) = \langle (\nabla MDSn(v), \vec{n}) \rangle = |\nabla MDSn(v)| |\vec{n}| \cos \theta, \tag{3}$$

onde θ é o ângulo entre os vetores $\nabla MDSn(v)$ e \vec{n} .

Como o vetor \vec{n} é unitário, ou seja, $|\vec{n}| = 1$ então:

$$\frac{\partial MDSn}{\partial \vec{n}}(v) = \langle (\nabla MDSn(v), \vec{n}) \rangle = |\nabla MDSn(v)| \cos \theta, \quad (4)$$

Vale observar que $\frac{\partial MDSn}{\partial \vec{n}}(v)$ terá valor máximo para $\theta = 0$, ou seja, quando o vetor normal \vec{n} for o versor de $\nabla MDSn(v)$. Então:

$$\vec{n} = \frac{\nabla MDSn(v)}{|\nabla MDSn(v)|}. \quad (5)$$

Além disso, $\cos \theta = 1$, então o valor máximo é $|\nabla MDSn(v)|$, pois

$$\frac{\partial MDSn}{\partial \vec{n}}(v) = |\nabla MDSn(v)|. \quad (6)$$

Assim, uma outra formulação para o potencial P é dada por

$$P(v) = \begin{cases} -|\nabla MDSn(v)| \cos \theta & \text{se } \nabla MDSn(v) \neq \vec{0} \\ 0 & \text{se } \nabla MDSn(v) = \vec{0}, \end{cases} \quad (7)$$

onde $|\nabla MDSn(v)|$ é a magnitude do vetor gradiente e $\vec{0}$ é o vetor nulo.

Assim a energia do modelo de *snake*, pode ser dada por:

$$E(v) = \int_{\Omega} \left(w_1(s) |v_s|^2 + w_2(s) |v_{ss}|^2 \right) ds + \int_{\Omega} w(s) P(v) ds. \quad (8)$$

onde o termo de energia interna dado sobre a primeira integral é o mesmo do modelo de *snake* original, e o potencial P é dado pela Equação (7).

3 Otimização do Modelo de Contornos de Edifícios Através de PD

Para o processo de extração de contornos de telhados de edifícios, é desenvolvida uma estratégia de solução do funcional de energia resultante (Equação (8)) a partir de um único ponto semente. A solução do problema de otimização por PD é encontrada obedecendo duas etapas.

Etapa 1. Nesta etapa, o objetivo é que a curva poligonal evolua até encontrar os limites do telhado do edifício. Para isso são utilizados os seguintes passos:

Fornecimento de um ponto semente: De modo a inicializar o processo de extração, o operador identifica o edifício no MDSn e então fornece um único ponto semente no interior do telhado. A Figura (1) ilustra o primeiro passo num MDSn em condições ideais, sendo que o retângulo branco representa o telhado do edifício, o fundo cinza representa o terreno e o ponto preto representa o ponto semente.

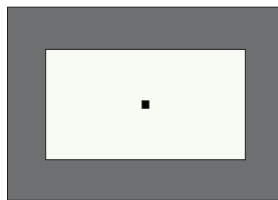


Figura 1: Ponto Semente Dado Pelo Operador.

Construção do espaço de busca: Neste passo são geradas 8 linhas radiais centradas no ponto semente. Alguns pontos candidatos a representar o polígono inicial são amostrados ao

longo das linhas radiais. Com intuito de amostrar somente os pontos candidatos a representar o contorno do telhado do edifício, são trazidos alguns conhecimentos sobre Modelos Digitais. Sabe-se que para cada ponto da malha do MDSn, tem-se a altura do correspondente ponto na superfície. Com base no conhecimento sobre a altura mínima que uma edificação, como por exemplo uma casa, deve possuir, pode-se concluir que um ponto da malha que não está situado sobre um edifício possui altura menor que 2 metros. Assim, os pontos situados sobre a superfície do terreno serão eliminados e não serão considerados pontos candidatos.

O número de elementos em cada linha radial é de no máximo 3 pontos amostrados sequencialmente e a distância adotada entre eles é de um groundel (termo utilizado em analogia ao termo pixel, denotando elemento de terreno - *ground elements*). Por exemplo, se para uma determinada linha radial o terceiro ponto a ser amostrado não for candidato, então para esta linha são considerados candidatos apenas 2 pontos.

O objetivo é encontrar os pontos que geram o polígono inicial. Tais pontos possuem magnitude do gradiente máxima dentro desta janela de busca. O problema de otimização é solucionado através do algoritmo de PD. No exemplo ilustrativo da Figura (2), os pontos em vermelho correspondem aos vértices do polígono inicial.

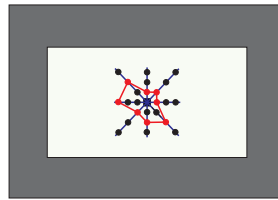


Figura 2: Polígono Inicial Obtido por PD.

A partir de cada um dos vértices do polígono anterior, é gerada uma linha na mesma direção e sentido da linha radial em que o mesmo se encontra. Ao longo de cada linha são amostrados regularmente no máximo 3 pontos, onde sempre é levado em consideração a localização do ponto em relação ao terreno, como foi feito na construção do primeiro espaço de busca. Estes procedimentos são repetidos até na tentativa de construir um próximo espaço de busca, não existem pontos satisfazendo a condição necessária de estar sobre o edifício. O exemplo da Figura (3) mostra o polígono azul que ilustra a solução da primeira etapa do problema de otimização. Então, dá para saber quais segmentos modelam partes do contorno do edifício.

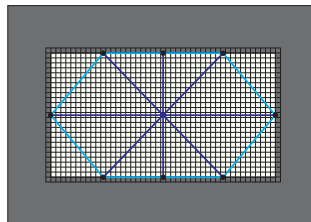


Figura 3: Polígono Obtido ao Final da Primeira Etapa.

Etapa 2. Nesta etapa, o objetivo é que a curva poligonal fechada busque as regiões que não foram alcançadas anteriormente. Para isso são utilizados os seguintes passos:

Construção do espaço de busca: É possível que entre dois vértices consecutivos do polígono obtido ao final da primeira etapa existam informações relevantes do edifício. Por isso, neste passo é proposto um refinamento sobre os lados do polígono. É criado um critério de amostragem entre dois vértices consecutivos. São amostrados pontos sobre os lados do polígono que apresentem distância entre dois vértices consecutivos maior que 8 groundels e a partir deles são criados espaços de busca. O processo de otimização por PD é aplicado apenas sobre os lados que necessitam de refinamento, parando quando todos os lados estiverem estáveis. O exemplo ilustrativo da Figura (4) mostra o espaço de busca que foi construído sobre um dos lados do

polígono obtido ao final da primeira etapa. Os pontos em preto foram amostrados sobre as linhas transversais e os pontos em laranja sobre a superfície do terreno.

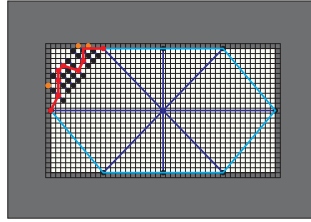


Figura 4: Primeiro Polígono Obtido na Segunda Etapa.

Para dar continuidade no processo de extração são repetidos os mesmos passos de construção do primeiro espaço de busca, ou seja, o polígono encontrado no espaço de busca anterior, é considerado inicial para a construção de um próximo espaço de busca, e o algoritmo de PD encontra mais um polígono candidato a ótimo.

Estes procedimentos são repetidos até que o critério de convergência seja satisfeito, após $t + 1$ iterações

$$|v_{t+1} - v_t| < T, \quad (9)$$

onde T é um limiar pré-definido.

A convergência ocorre quando o polígono v_{t+1} obtido na iteração $t + 1$, esteja bem próximo ao polígono v_t obtido na iteração anterior t . Então o valor do limiar T tende a zero.

A mesma estratégia de refinamento adotada anteriormente é utilizada para os outros lados do polígono. Ao final da segunda etapa é encontrada a solução final do problema de otimização pelo algoritmo de PD e o contorno do telhado convexo do edifício é extraído. O exemplo ilustrativo da Figura (5) mostra o polígono azul que é obtido ao final da segunda etapa.

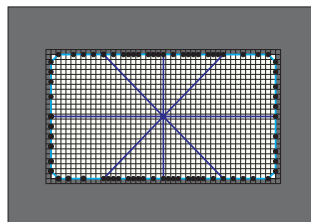


Figura 5: Polígono Obtido ao Final da Segunda Etapa.

4 Testes Numéricos

Além da avaliação visual é também realizada uma análise numérica dos resultados obtidos. Esta análise é baseada na estimação de parâmetros numéricos de qualidade, a partir da comparação dos contornos extraídos utilizando a metodologia proposta com os contornos correspondentes extraídos manualmente. Para cada teste realizado, foi calculado o valor de completude de área C que é estimado a partir das áreas A_M do objeto extraído através do método e A_R do objeto extraído manualmente, utilizado como referência. Este valor é dado por [3]:

$$C = \left(1 - \frac{|A_M - A_R|}{A_R}\right) 100\% \quad (10)$$

A completude de área é uma medida percentual da área do objeto extraído, comparada à área do objeto de referência.

A Figura (6) mostra os resultados de quatro testes realizados. O principal objetivo foi avaliar o desempenho do método na tarefa de extrair o contorno do telhado. Foram escolhidos

edifícios isolados para evitar problemas de confusão com conjuntos de árvores adjacentes. Pode-se observar que o método de extração foi bem sucedido, mas irregularidades no modelo de superfície impediram a extração de alguns pontos correspondentes as laterais e quinas do telhado.

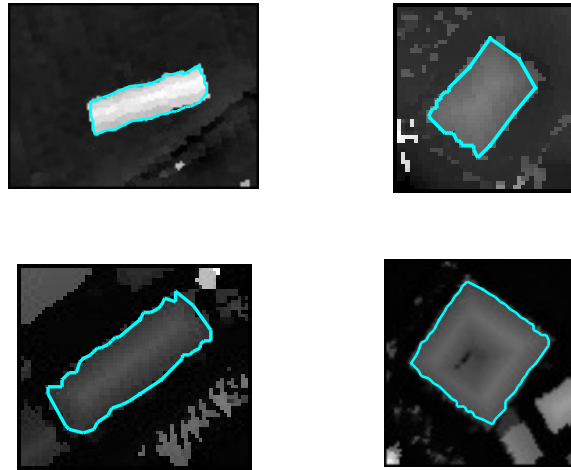


Figura 6: : Resultados Obtidos: (a) Teste 1. (b) Teste 2. (c) Teste 3 e (d) Teste 4.

O valor resultate de completeza de área apresentado na Tabela 1 indica que o contorno extraído pelo método possui boa correspondência com os limites reais do telhado do edifício. De um modo geral, o método de extração funcionou adequadamente, mesmo com as anomalias nas laterais e regiões de canto do edifício. Os pontos correspondentes as regiões de canto que não foram extraídos contribuíram para que o parâmetro de qualidade não fosse ainda maior.

Teste	Completeza de Área
Teste 1	96,8%
Teste 2	93,5%
Teste 3	94,6%
Teste 4	95,8%

Tabela 1: Análise Numérica de Cada Um Dos Testes

5 Conclusões

A estratégia de solução do modelo matemático através do algoritmo de PD desenvolvida, mostrou-se eficiente na extração de contornos de telhados convexos de edifícios. O método de extração semiautomático proposto foi implementado no *software* MATLAB. Através de uma inspeção visual e de uma análise numérica dos resultados obtidos, foi possível concluir que o método funciona adequadamente na extração de contornos de telhados convexos de edifícios a partir de um MDSn.

Referências

- [1] L. D. Cohen, “On Active Contour Models and Balloons”, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding*, **53** (1991), 211–218.
- [2] M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos, “Snakes: Active Contours Models”, *International Journal of Computer Vision*, **56** (1988), 321–331.
- [3] H. Ruther, H. M. Martine, E. G. Mtaló, “Application of Snakes and Dynamic Programming Optimisation Technique in Modeling of Buildings in Informal Settlement Areas”, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **56** (2002), 269–282.