

Um Algoritmo Simples de Esqueletização

Arley Ferreira de Souza
aluno do curso de pós-graduação em
Computação Aplicada do INPE
arley@dpi.inpe.br

Gerald Jean Francis Banon
INPE
banon@dpi.inpe.br

Resumo

O artigo apresenta um algoritmo de esqueletização eficiente e de fácil implementação. Apresenta ainda a sua aplicação para extração de linhas intermediárias em mapas de curvas de nível, e sua aplicação para filtragem.

1. Introdução

A esqueletização é um procedimento que surgiu na década de 60, primeiramente introduzida por Blum [5]. O esqueleto constitui um conjunto de pontos no interior de um objeto de uma imagem, de modo a representá-lo. A definição de esqueleto diz que, um ponto pertence ao esqueleto se, ele é o centro de um círculo máximo, que toca a borda do objeto em pelo menos dois pontos distintos. O problema é a dificuldade de se implementar círculos no plano discreto e a sua aproximação é extremamente cara, computacionalmente falando. A maioria dos algoritmos de esqueletização encontrados na literatura [1, 2, 7, 8, 10, 11], utiliza o mesmo conceito aplicado ao centro de um losango, de um quadrado, ou uma combinação de ambos. Esta técnica além de ser bastante eficiente, consegue aproximar do conceito original de esqueletização.

Os esqueletos possuem várias aplicações em processamento de imagens, tais como: agrupamento, segmentação, vetorização, descrição de formas, reconhecimento de caracteres, inspeção e outras. Neste artigo, o algoritmo de esqueletização que será apresentado, sofrerá uns pequenos ajustes para gerar linhas intermediárias em mapas de curvas de nível, também será mostrado a sua aplicação para filtragem.

No próximo item será apresentado o algoritmo de esqueletização proposto.

2. O algoritmo de esqueletização

O principal problema na extração de esqueletos esta na grade discreta, pois não é possível extrair um esqueleto composto de linhas simples e com uma propriedade de

isotropia (uma definição de ponto isotrópico pode ser obtida em [9]) em todos os casos. A Figura 1 mostra um caso, onde não é possível extrair um esqueleto com linha simples de pontos e com alguma propriedade de isotropia. Os pontos marcados são os pontos de esqueleto do objeto. Isto ocorre todas as vezes que o objeto possuir um número par de linhas/colunas.

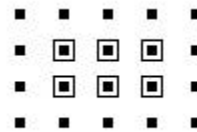


Figura 1. Um objeto e o seu esqueleto

Para solucionar o problema de linhas/colunas pares, a solução encontrada foi aplicar uma expansão por dilatação, apresentada em [3]. A expansão por dilatação gera número ímpar de linhas e colunas em todos os casos. A Figura 2 mostra o resultado.

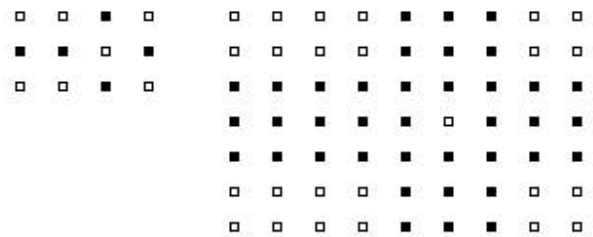


Figura 2. Expansão por dilatação

Observando as características dos objetos expandidos por dilatação, foi possível desenvolver um algoritmo de esqueletização específico para estes objetos. Cujas principais vantagens, é a necessidade de se utilizar um conjunto reduzido de regras de teste, para verificar se um ponto pertence ao esqueleto. O algoritmo possui ainda a vantagem de percorrer a imagem seqüencialmente por apenas duas vezes, uma em modo raster (da esquerda para direita e de cima para baixo) e outra em modo anti-raster (da direita para a esquerda e de baixo para cima).

Os passos que compõem o algoritmo são apresentados a seguir.

- O primeiro passo consiste em aplicar a expansão por dilatação na imagem.
- O segundo passo consiste em aplicar a transformada distância *Chessboard* [6] na imagem. Esta transformada rotula todos os pontos do objeto desejado com o valor da sua distância até o complemento (pontos da imagem que não pertencem ao objeto), e rotula os pontos do complemento com valor de distância 0.
- O terceiro passo consiste em percorrer a imagem duas vezes para extrair os pontos de esqueleto. Denota-se por, $d(x)$ o valor de distância de um ponto x pertencente a imagem, e por $x + (1, 1)$ o par $(x_1 + 1, x_2 + 1)$; os pontos de esqueleto serão marcados com valores negativos:

→ fazer em modo raster, para todo ponto x pertencente a imagem

se $d(x) > 0$ então

se $|d(x + (-1, 0))| \leq d(x)$ e $|d(x + (0, -1))| \leq d(x)$ e $(d(x + (1, 0)) \leq d(x)$ ou $d(x + (-1, 0)) < 0$) e $(d(x + (0, 1)) \leq d(x)$ ou $d(x + (0, -1)) < 0)$ então $d(x) = d(x) * (-1)$;

→ fazer em modo anti-raster, para todo ponto x pertencente a imagem

se $d(x) > 0$ então

se $(d(x + (1, 0)) < 0$ e $d(x) < |d(x + (-1, 0))|$) ou $(d(x + (0, 1)) < 0$ e $d(x) < |d(x + (0, -1))|$) então $d(x) = d(x) * (-1)$.

A Figura 3 apresenta o resultado da esqueletização utilizando o método apresentado. Como é possível observar o algoritmo extrai esqueletos com grande sensibilidade a variações na borda do objeto, ou seja, gera ramificações desnecessárias para a representação e reconstrução do objeto.

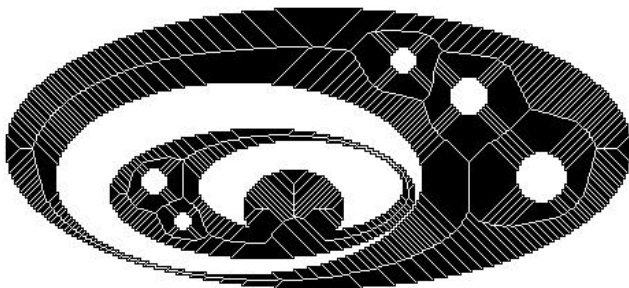


Figura 3. Imagem esqueletizada

Para retirar estas ramificações basta percorrer a imagem duas vezes, uma em modo raster e outra em modo anti-raster, verificando a condição a seguir:

Para um ponto x pertencente ao esqueleto ser apagado, as duas condições a seguir devem ser satisfeitas:

- o número de transições ponto-de-esqueleto para ponto-não-esqueleto na 8-vizinhança do ponto x (excluindo o ponto x), deve ser igual a um;

- existe um ponto na 8-vizinhança de x que possui distância maior que a distância de x .

A primeira condição garante que o ponto que está sendo verificado é uma extremidade, evitando assim, que o esqueleto se torne desconexo. Enquanto que a segunda condição, garante que existe um quadrado centrado em um outro ponto de esqueleto que cobre o quadrado centrado no ponto em teste. Esta segunda condição é importante para continuar garantindo a reconstrução do objeto.

A Figura 4 mostra o esqueleto sem as ramificações.

Os esqueletos obtidos segundo este método possuem todas as propriedades desejáveis a um processo de esqueletização, que são:

- preservar a conexidade: o esqueleto de um objeto é apenas um esqueleto. Na Figura 4 existem dois objetos e dois esqueletos;
- existir uma inversa: o objeto original pode ser reconstruído a partir do seu esqueleto;
- espessura de um pixel: o esqueleto possui linhas com um pixel de espessura;
- alguma propriedade de isotropia: todos os pontos do esqueleto são centros de quadrados que tocam pelo menos duas bordas distintas do objeto;
- minimalidade: não existe um outro conjunto de pontos menor com as mesmas propriedades;
- invariância a rotações: o algoritmo é invariante apenas a rotações de 90°;
- sensibilidade a ruídos: o algoritmo é sensível a ruídos, mas os mesmos podem ser retirados.

O algoritmo funciona para imagens não expandidas por dilatação, mas não existe garantia das suas propriedades.

No item a seguir será apresentada a utilização do algoritmo para gerar linhas intermediárias em mapas de curva de nível.

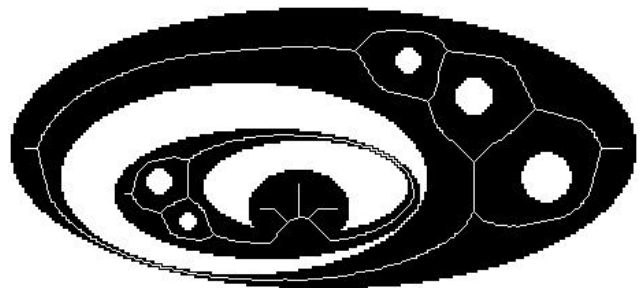


Figura 4. Imagem esqueletizada sem as ramificações

3. Geração de linhas intermediárias

Os mapas de curvas de nível são compostos por um conjunto de curvas, onde cada curva possui uma cota (valor de altura). Os mapas de curvas de nível possuem várias aplicações, uma delas consiste em gerar o modelo de elevação do terreno, que possui inúmeras aplicações.

Acontece que, os métodos de geração de modelos de elevação de terreno podem ser melhorados, se forem adicionadas curvas entre as existentes. Uma forma comum de gerar novas curvas é por esqueletização.

Para representar as curvas cotadas de um mapa de curvas de nível em uma imagem, as curvas foram representadas com cores indicando o valor de sua cota. A Figura 5 mostra parte de um mapa de curvas de nível, com o esqueleto (na cor azul) obtido entre as curvas, utilizando o método apresentado.

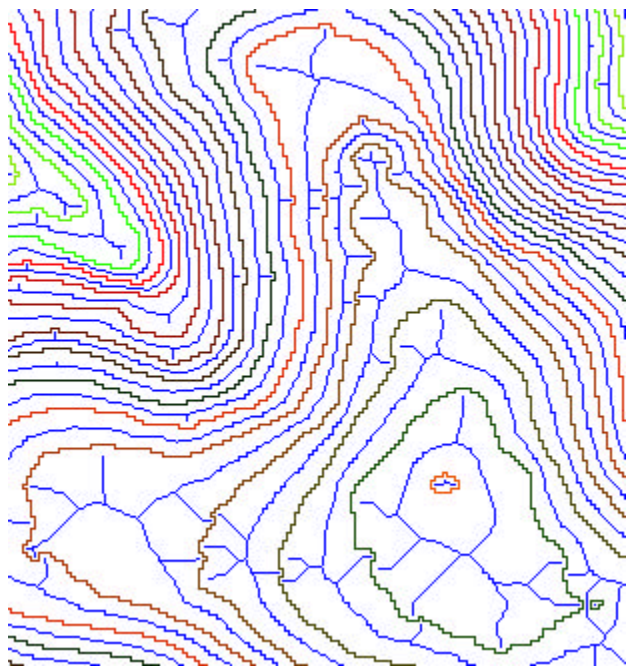


Figura 5. Mapa de curvas de nível com o esqueleto entre as curvas

As curvas de nível possuem a propriedade de não possuírem ramificações, ou seja, as curvas de nível são fechadas e não possuem extremidades, salvo as curvas que não são fechadas por estarem na borda do mapa, mas estas possuem apenas duas extremidades. Observando a Figura 5, verifica-se que, os esqueletos obtidos possuem várias ramificações e também não estão cotados, ou seja, da maneira como estão representados não podem ser utilizados.

Para retirar as ramificações desnecessárias e cotar os pontos de esqueleto com os valores corretos, utilizou-se o seguinte procedimento.

Para todo ponto x pertencente ao esqueleto,

- verificar se, a borda do quadrado de tamanho $d(x) + 1$, toca dois pontos com valor de cota distintos,
→ se tocar, então some os dois valores, divide por 2 e atribua ao ponto em teste;
→ se não tocar, então apague o ponto em teste.

A Figura 6 mostra o resultado, com linhas intermediárias cotadas e sem ramificações.

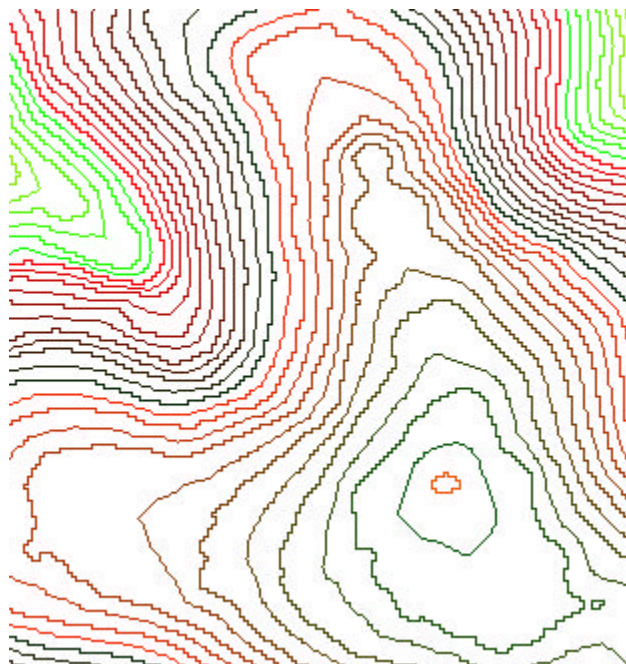


Figura 6. Mapa de curvas de nível com linhas intermediárias

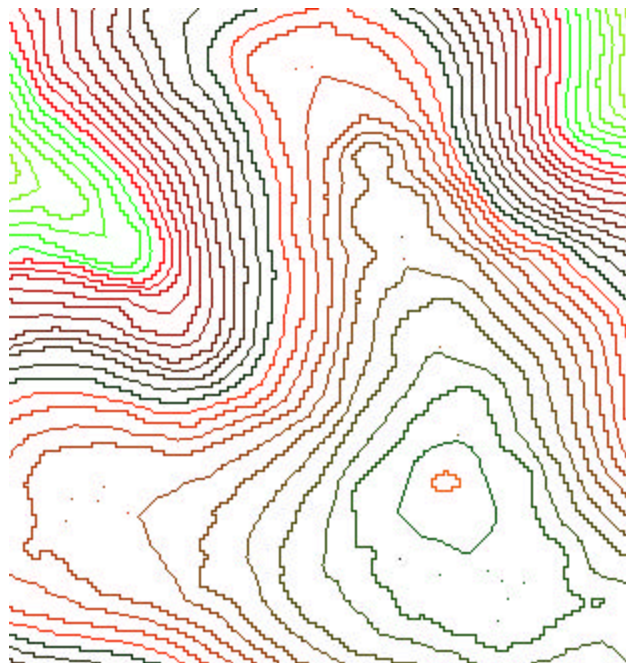


Figura 7. Mapa de curvas de nível com linhas intermediárias e pontos extras

Para tornar mais eficiente o procedimento que gera o modelo de elevação, é possível inserir pontos extras, onde antes existiam as ramificações do esqueleto.

Os pontos extras são extraídos das ramificações descartadas no procedimento anterior. O procedimento para extrair pontos extras é apresentado a seguir.

Primeiro é necessário escolher um valor de distância mínima para um ponto ser selecionado, e também é necessário escolher uma distância mínima entre dois pontos a serem selecionados.

Para todo ponto pertencente às ramificações:

- verificar se o ponto possui valor de distância superior ao valor mínimo e está a uma distância mínima do último ponto selecionado.

A Figura 7 mostra o mapa de curvas de nível com as linhas intermediárias e os pontos extras adicionados. Os pontos extras foram obtidos usando o valor de distância mínima 8 e distância 12 entre dois pontos.

4. Filtragem

A filtragem é uma operação extremamente importante em processamento de imagens, pois torna possível retirar áreas desnecessárias na imagem.

De forma bem simples é possível fazer uma filtragem utilizando o algoritmo de esqueletização apresentado. Para isto, basta não utilizar para reconstruir os objetos de origem, os pontos que possuírem distância inferior a um determinado valor. A Figura 8 mostra os objetos reconstruídos (em vermelho) a partir dos pontos de esqueleto com distância superior a 8. Como é possível observar, as ramificações, áreas pequenas e finas podem ser eliminadas da imagem utilizando este procedimento.

Adicionando ao procedimento para retirar ramificações desnecessárias, um item para retirar todos os pontos de esqueletos abaixo de um determinado valor, é possível fazer uma filtragem apenas nas ramificações e áreas pequenas, preservando a conectividade do objeto. A Figura 9 mostra o resultado desta filtragem utilizando fator de corte igual a 8.

5. Conclusões

O artigo apresenta como principal contribuição, um novo algoritmo de esqueletização, capaz de extrair de forma rápida e eficiente, esqueletos com todas as propriedades desejáveis a um processo de esqueletização.

O algoritmo é de fácil implementação e necessita percorrer a imagem apenas duas vezes, de forma sequencial. Para um ponto ser atribuído ao esqueleto, necessita apenas verificar a sua 4-vizinhança (os pontos: superior, inferior, esquerdo e direito).

O artigo mostra ainda a utilização do algoritmo para gerar linhas intermediárias em mapas de curvas de nível, mostra ainda algumas filtragens utilizando os esqueletos.

Seria interessante verificar a conjectura que o procedimento de filtragem proposto é uma abertura algébrica [4].

O artigo mostra que o algoritmo de esqueletização apresentado, permite além das aplicações tradicionais de esqueleto, outras aplicações, pois outros procedimentos de filtragem podem ser implementados em cima do algoritmo de esqueletização.



Figura 8. Filtragem de ramificações, áreas pequenas e finas na imagem, utilizando o algoritmo de esqueletização



Figura 9. Filtragem de ramificações e áreas pequenas na imagem, utilizando o algoritmo de esqueletização

Referências

- [1] Arcelli, C.; Cordella, L. P.; Levialdi, S. From local maxima to connected skeletons. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. PAMI-3, n. 2, p. 134-143, 1981.
- [2] Arcelli, C.; Baja, G. S. A one-pass two-operation process to detect the skeletal pixels on the 4-distance transform. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 11, n. 4, p. 411-414, 1989.
- [3] Banon, G. J. F. New insight on digital topology. In: Goutsias, J.; Vincent, L.; Bloomberg, D. S. **Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 139-148.
- [4] Banon, G. J. F.; Barrera, J. **Bases da morfologia matemática para a análise de imagens binárias**. São José dos Campos, MCT/INPE; 1998. 242 p. Disponível na biblioteca digital URLib: <dpi.inpe.br/banon/1998/06.30.17.56>. Acesso em: 27 out. 2003.
- [5] Blum, H. A transformation for extracting new descriptors of shape. In: Wathen-Dunn, W. **Models for the Perception of**

- Speech and Visual Forms**. Amsterdam: MIT Press, 1967. p. 362-380.
- [6] Borgefors, G. Distance transformations in digital images. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 34, p. 344-371, 1986.
- [7] Leymarie, F.; Levine, M. D. Simulating the grassfire transform using an active contour model. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 14, n. 1, p. 56-75, 1992.
- [8] Maragos, P. Morphological skeleton representation and coding of binary images. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing**, v. 34, p. 1228-1244, 1986.
- [9] Souza, A. F. **Esqueletos 8-isotrópicos**. fev. 2002. 93 p. (INPE-8856-TDI/804). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002. Disponível na biblioteca digital *URLib*: <dpi.inpe.br/lise/2003/01.16.09.47>. Acesso em: 27 out. 2003.
- [10] Xia, Y. Skeletonization via the realization of the fire front's propagation and extinction in digital binary shapes. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 11, n. 10, p. 1076-1086, 1989.
- [11] Zhang, T. Y.; Suen, C. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. **Communications of the ACM**, v. 27, n. 3, p. 236-239, 1984.