



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES
AUTHORS

TRIANGULAÇÃO
MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO
GERAÇÃO DE SUPERFÍCIES

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

Roberto Pereira da Cunha
Diretor SRE

AUTOR/RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

Carlos Alberto Felgueiras

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

CDU/UDC

621.376.5

DATA / DATE

October, 1989

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO
	INPE-4974-PRE/1539
GERAÇÃO DE MODELOS DE GRADE TRIANGULAR EM AMBIENTE DE MICROCOMPUTADOR	
AUTORES/AUTHORSHIP	Carlos Alberto Felgueiras Cláudia Akiko Urashima Márcia Lopes Cancio P. Soares

ORIGEM
ORIGIN

DPI

PROJETO
PROJECT

ANIMA

Nº DE PAG.
NO OF PAGES

08

ULTIMA PAG.
LAST PAGE

07

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Este trabalho apresenta uma metodologia para geração, em ambiente de microcomputador, de Modelos Digitais de Terreno em forma de grade triangular irregular. Os micromputadores apresentam restrições em relação à velocidade de processamento e quantidade de memória principal para execução de programas. A metodologia implementada procura otimizar as estruturas de dados, os processamentos e a quantidade de memória necessária para a triangulação de forma a viabilizar a obtenção do modelo em tempos curtos mesmo para casos em que o volume de amostras seja grande. Este trabalho apresenta ainda uma análise do desempenho do tempo de processamento em função da quantidade das amostras.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Trabalho apresentado no IV Simpósio Latinoamericano sobre Sensores Remotos, de 20 a 24 de novembro de 1989, Bariloche, Argentina.

GERAÇÃO DE MODELOS DE GRADE TRIANGULAR EM AMBIENTE DE MICROCOMPUTADOR

CARLOS ALBERTO FELGUEIRAS
CLAUDIA AKIKO URASHIMA
MARCIA LOPES CANCIO PEREIRA SOARES

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE
DEPARTAMENTO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS - DPI
AV. DOS ASTRONAUTAS 1758 - J. DA GRANJA - C.P. 515
CEP 12201 - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SÃO PAULO - BRASIL

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para geração, em ambiente de microcomputador, de Modelos Digitais de Terreno em forma de grade triangular irregular. Os microcomputadores apresentam restrições em relação à velocidade de processamento e quantidade de memória principal para execução de programas. A metodologia implementada procura otimizar as estruturas de dados, os processamentos e a quantidade de memória necessária para a triangulação de forma a viabilizar a obtenção do modelo em tempos curtos mesmo para casos em que o volume de amostras seja grande. Este trabalho apresenta, ainda uma análise do desempenho do tempo de processamento em função da quantidade das amostras.

ABSTRACT

This work presents a methodology to generate Digital Terrain Models in a triangular irregular form. The methodology is implemented in a microcomputer IBM-PC like environment. To compensate the limitations of processing speed and main memory of this environment one need to optimize the algorithms, data structures and the memory use to allows the program work with large amount of samples. An analysis of time cost versus the amount of samples is performed.

1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas clássicos de modelagem digital de terreno é o de geração de grades triangulares a partir de amostras tridimensionais (x,y,z) distribuídas não regularmente no espaço bidimensional (x,y) .

Este trabalho apresenta uma metodologia para implementar a triangulação de Delaunay em ambiente de microcomputador. Devido às restrições de tempo de processamento e limitação de memória principal dos microcomputadores o algoritmo procura otimizar as estruturas de dados e a quantidade de memória utilizada durante a execução.

O modelo de triangulação implementado será integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permite a integração desse modelo, ou produtos gerados a partir do mesmo, com outros tipos de dados, tais como, mapas cartográficos e imagens digitais de satélite. Dentre as principais aplicações do modelo de grade triangular gerado podem-se destacar: geração de carta imagem, obtenção automática de mapas de contornos, projeções geométricas planares, combinação com imagens de satélite para inclusão de informações de relevo na imagem, cálculos de projetos de engenharia (volumes, terraplanagens, projeto de estradas, etc...), análise de perfis, análise de intervisibilidade entre pontos e sombreamento sintético de imagens. As principais áreas de aplicação de modelagem digital de terreno por computador são: Cartografia, Geologia, Engenharia Civil, Agricultura, Manejo florestal, Gerenciamento de recursos rurais e urbanos, etc...

2. DEFINIÇÕES

Para se gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT) utiliza-se um conjunto de amostras do fenômeno que se quer modelar. Cada amostra possui uma posição espacial (x,y) e um valor de cota z que está associado ao fenômeno de interesse. Pode-se modelar valores de altura (relevo), profundidade (batimetria), temperatura, teor de um elemento químico, ou qualquer outro fenômeno associado a cada posição espacial da área de interesse.

Um Modelo Digital de Terreno (MDT) de grade triangular é um modelo tridimensional formado por faces triangulares cujos vértices pertencem ao conjunto dos pontos amostrados. Em geral esse conjunto de amostras tem distribuição espacial irregular. O processo de modelar uma superfície através de poliedros de faces triangulares é conhecido como triangulação.

A união dos pontos amostrados para gerar a triangulação não é única e nem todas as triangulações são ótimas para a representação de uma superfície. Como o comportamento da superfície em um ponto depende do comportamento da mesma para os pontos vizinhos, deve-se escolher uma triangulação cujos segmentos que unem as amostras não sejam excessivamente longos e finos. A triangulação de Delaunay é a única que satisfaz essa exigência (Pettinati,1983). Vários autores apresentam definições formais e até informais para a triangulação de Delaunay. Esta fora do escopo deste trabalho explorar essas definições com profundidade. Neste trabalho as definições aparecerão a medida que forem necessárias para compreensão do algoritmo implementado. Mesmo nesse caso não haverá preocupação com um rigor formal nas definições.

Dentre os vários métodos de geração da triangulação podemos destacar três: Os métodos de construção direta, os métodos de construção por otimização e os métodos de construção por partes. Os métodos de construção direta constroem a triangulação diretamente a partir de sua definição e propriedades. Estes algoritmos são também chamados de "one step" pois conseguem obter como primeira triangulação a própria triangulação de Delaunay. Os métodos de construção por otimização obtêm uma primeira triangulação, que geralmente não é a de Delaunay, e a partir dessa triangulação inicial aplicam-se sucessivamente testes baseados na definição de Delaunay até se chegar a triangulação ótima. Os métodos de construção por partes

constroem inicialmente triangulações de Delaunay para subconjuntos distintos de amostras e numa segunda fase une essas triangulações. Neste último caso a união das triangulações exige mudanças nas mesmas com o objetivo de se obter, no final, uma triangulação global de Delaunay.

Os vários métodos de geração da triangulação requerem uma análise local de vizinhança, ou seja a busca de uma ou mais amostras vizinhas de uma amostra qualquer. O conceito de vizinhança local esta associado ao conceito de Distância Máxima de Influência (DMI) de cada amostra em relação à região do espaço que envolve o conjunto de amostras. Apesar da análise ser local a determinação da vizinhança requer uma análise global de todas as amostras para se determinar o conjunto das amostras vizinhas à amostra de interesse. Quando se trabalha com um grande conjunto de amostras é conveniente utilizar-se um particionamento prévio, ou uma pré-ordenação, desse conjunto em subconjuntos, ou subpartições, com quantidades máximas de amostras pré-determinadas. Essa organização prévia é representada por uma árvore binária que otimiza a busca dos vizinhos limitando a análise apenas daquelas amostras que pertencem as subpartições próximas à amostra em questão.

Por último deve-se destacar que a obtenção de um modelo de grade triangular envolve, além da geração propriamente dita, o armazenamento da triangulação obtida. Isto requer a definição de estruturas de armazenamento eficientes de forma a não sobrecarregar a memória de armazenamento. Por outro lado essas estruturas devem conter o mínimo de informações necessárias para definir os triângulos e suas relações topológicas dentro do modelo. Em microcomputadores a triangulação fica armazenada em memória secundária, geralmente em disco rígido, e deve ser consultada sempre que se queiram obter informações relevantes sobre a superfície. Portanto as estruturas de armazenamento e busca de dados da triangulação podem determinar diretamente a eficiência dos algoritmos de utilização do modelo. Em resumo, as aplicações devem acessar de forma eficiente os triângulos obtidos e seus vizinhos.

3. METODOLOGIA IMPLEMENTADA

Abaixo está descrito um algoritmo para geração da triangulação de Delaunay muito simples de ser implementado. O algoritmo de geração da triangulação mostrado baseia-se diretamente na seguinte propriedade da triangulação de Delaunay:

Sejam P_i, P_j, P_k e P_n , com i, j, k e n diferentes entre si, pontos pertencentes ao conjunto P de pontos amostras. Um triângulo com vértices P_i, P_j e P_k é de Delaunay se e somente se não existe nenhum ponto P_n interno à circunferência definida pelos pontos P_i, P_j e P_k .

Abaixo descreve-se de forma estruturada o algoritmo utilizado para a geração da triangulação.

Seja: P o conjunto das amostras,
DMIQ a Distância Máxima de Influência ao Quadrado de um ponto sobre as demais amostras,
 Q_i o conjunto das amostras, excluindo-se P_i , pertencentes a P cuja distância ao quadrado do ponto P_i é menor do que a DMIQ,
 P_c o ponto central da circunferência que passa pelas amostras P_i, P_j e P_k pertencentes a P ,
 P_p o ponto mais proximo de P_c ,
DISTQ(A,B) função que retorna a distância euclidiana, no espaço (x,y) , ao quadrado entre os pontos A e B e,
ARMAZENA TRIANGULO(A,B,C) rotina que armazena o triângulo de Delaunay formado pelos pontos A, B e C.

Inicio

```
Para cada ponto Pi pertencente ao conjunto P
Inicio
  Determina-se o conjunto Qi
  Para cada ponto Pj pertencente a Qi
  Inicio
    Para cada ponto Pk pertencente a Qi com k)j
    Inicio
      Calcula-se Pc
      Procura-se Pp
      Se( DISTQ(Pc,Pp) ) DISTQ(Pc,Pi))
        ARMAZENA TRIANGULO(Pi,Pj,Pk)
    Fim
  Fim
Fim
Fim
Fim
```

Algumas considerações podem ser feitas sobre o algoritmo apresentado.

- todos os cálculos e comparações entre pontos do conjunto P são feitas utilizando-se apenas as informações da distribuição espacial no espaço (x,y) de cada ponto. Em suma a cota z de cada ponto não é utilizada durante a triangulação;

- a DMIQ pode ser definida pelo usuário e não deve ser menor que a menor distância entre dois pontos quaisquer do conjunto de amostras P. Um valor máximo para essa DMI é a distância da diagonal do retângulo envolvente das projeções dos pontos de P no espaço (x,y). Um valor ótimo para a DMI deve considerar a densidade espacial média e a distribuição dos pontos dentro da área de definição das projeções dos pontos de P no espaço (x,y);

- A definição de Qi e Pp envolve uma busca global sobre todos os pontos vizinhos de um ponto qualquer de P. A forma de se realizar essa busca é decisiva para se definir a velocidade de processamento para a geração da triangulação. Uma busca não otimizada pode tornar inviável a triangulação para conjuntos de amostras com cardinalidade alta, maior do que 1000 por exemplo. Uma forma bastante eficaz de se otimizar as buscas é a realização de uma pré-ordenação dos pontos de P como descrito no item de definições.

- A rotina ARMAZENA TRIANGULO pode ser implementada de duas formas: A primeira forma é armazenar, além do triângulo de Delaunay, as informações de vizinhança desse triângulo. A segunda, mais rápida, seria armazenar apenas o triângulo de Delaunay encontrado deixando para que as relações entre os triângulos sejam procuradas e definidas num processamento a posteriori. No primeiro caso, para cada triângulo a ser armazenado, deve-se fazer uma busca sobre os triângulos já armazenados para determinar-se se existem relações de vizinhança entre os mesmos. Caso existam, essas informações são atualizadas em ambas as estruturas de armazenamento dos triângulos vizinhos.

4. RESULTADOS OBTIDOS

As figuras 1,2,3 e 4 mostram triangulações de Delaunay distintas para um mesmo conjunto de pontos considerando-se as DMI's iguais a 2, 3, 4 e 5 respectivamente. Essas figuras demonstram a importancia da escolha da DMI na geração da triangulação. Observa-se na figura 1 o efeito de desmembramento da triangulação em 2 conjuntos de triângulos e ainda a presença de pontos que não foram considerados na triangulação. Este efeito decorre da escolha de um valor de DMI muito pequeno para a quantidade e distribuição de pontos dentro da área ocupada pelas amostras. A medida que o valor da DMI aumenta observa-se um aumento da quantidade de triângulos que compoem a triangulação. As figuras 2 e 3 apresentam triangulações cujas arestas mais externas

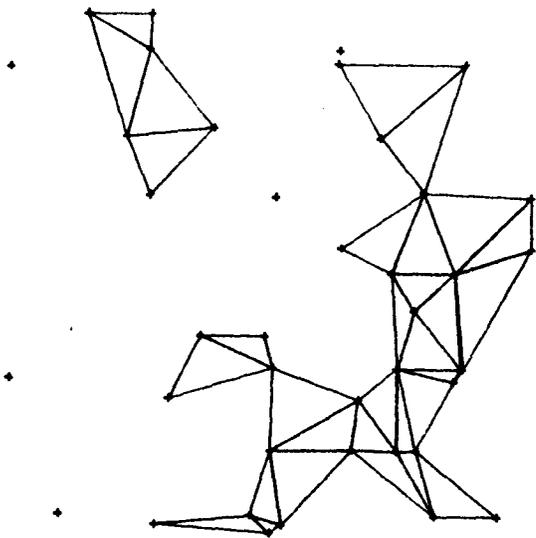


Figura 1 - DMI igual a 2

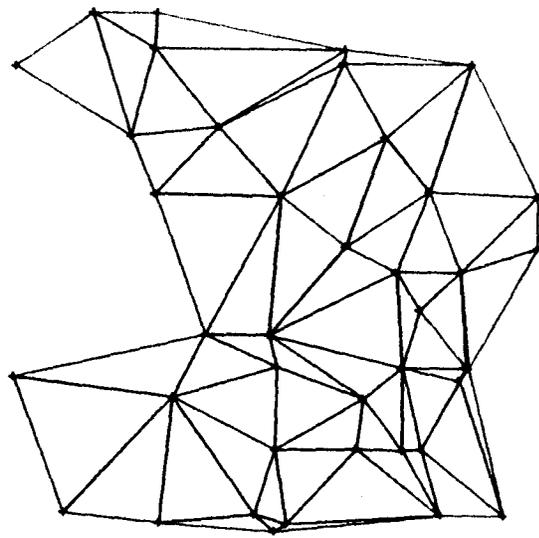


Figura 2 - DMI igual a 3

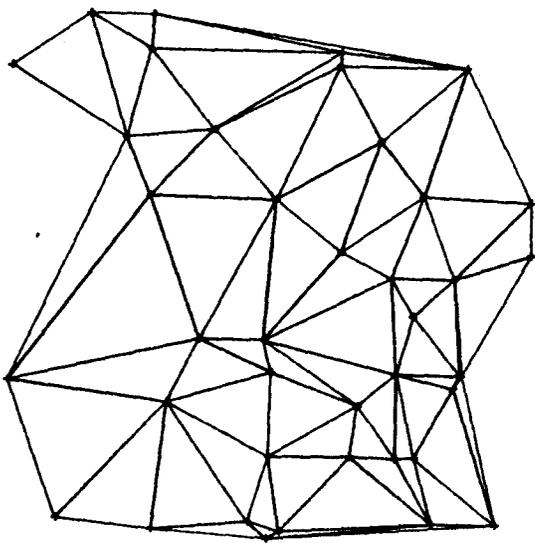


Figura 3 - DMI igual a 4

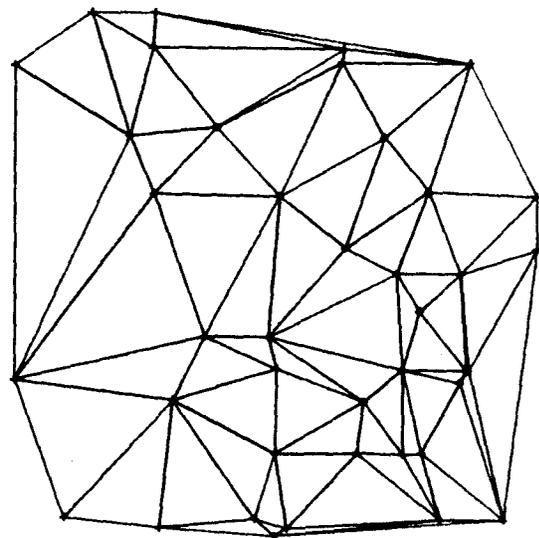


Figura 4 - DMI igual a 5

formam polígonos côncavos, também chamada de região restrita, enquanto que a figura 4 mostra uma triangulação envolvida por uma região convexa. A região convexa é o polígono de maior área que contém todos os pontos amostras. Uma vez obtida uma triangulação envolvida pela região convexa essa triangulação não será mais mudada para valores maiores de DMI. Entretanto um valor de DMI muito alto causa um aumento no tempo total de geração da triangulação pois aumenta o conjunto de amostras vizinhas que devem ser testadas para se definir os triângulos de Delaunay.

A tabela 1 mostra o comportamento da variação do tempo de processamento do algoritmo mostrado acima em relação à quantidade de amostras.

Numero de amostras	Tempo de processamento (segundos)
20	1.2
40	5.7
60	20.0
80	50.7
100	100.4

Tabela 1. Numero de amostras x tempo de processamento

Analisando-se a tabela 1 observa-se uma variação exponencial do tempo de geração da triangulação em relação à quantidade de amostras total de entrada. Os resultados apresentados na tabela 1 foram obtidos sem otimizações por particionamento do espaço ocupado pelas amostras. O objetivo inicial deste trabalho era já ter resultados comparativos do algoritmo mostrado anteriormente com o mesmo algoritmo já incorporando otimizações. Como isto não foi possível no tempo decorrido, pretende-se mostrar resultados comparativos quando da apresentação do trabalho no simpósio. De qualquer forma espera-se, teoricamente, uma melhora substancial em relação ao tempo total de geração da grade triangular após as otimizações.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se mostrar que implementação de algoritmos de geração de grades triangulares em microcomputadores requer estruturas de dados e processamentos eficientes afim de compensar as limitações de memória e tempo de processamento total da geração. Sem essas preocupações os processamentos podem tornar-se inviáveis operacionalmente devido ao longo tempo gasto para a geração do modelo.

O algoritmo apresentado é muito simples de ser implementado, utiliza método direto de geração da triangulação de Delaunay, e não necessita de estruturas de dados muito complexas para armazenamentos intermediários.

O algoritmo apresentado foi implementado em linguagem C sob o sistema operacional DOS em um computador compatível com a linha IBM-PC.

6. BIBLIOGRAFIA

DE FLORIANI L. Surface representations based on triangular grids. *The Visual Computer*. 3: 27-50, 1987.

FELGUEIRAS C. A. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores. Dissertação de mestrado em computação aplicada. INPE, São José dos Campos, São Paulo, 1987.

FRIEDMAN, J. H. et alii. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 3(3): 209-226.

GUIBAS L., STOLFI J. Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of Voronoi diagrams. *ACM Transactions on Graphics*. 4(2): 74-123, 1985.

PETRIE G., KENNIE T. J. M. Terrain modelling in surveying and civil engineering. *Computer Aided Design*. 19(4): 171-187, 1987.

PETTINATI, F.. Modelamento digital e representação gráfica de superfícies. Dissertação de mestrado apresentada na Escola Politécnica de São Paulo. USP, São Paulo, 1983.

WATSON D. F., PHILIP G. M.. Triangle based interpolation. *Mathematical Geology*. 16(3), 1984.