

## Representação de Modelos Pulmonares usando Malhas Triangulares

Samuel Silva\*, Joaquim Madeira, Beatriz Sousa Santos

**Resumo** – A utilização de modelos 3D representados usando malhas poligonais vem assumindo uma importância crescente em diversas áreas, em particular em Imagiologia e Visualização Médica. Após a apresentação sucinta das principais operações associadas à geração e ao processamento de malhas, é descrito o processo de criação de modelos pulmonares, a partir dos contornos segmentados em imagens TAC, usando malhas triangulares e a biblioteca *OpenMesh*.

**Abstract** – 3D models based on polygonal meshes are being increasingly used in many application areas, in particular for medical visualization. After a short presentation of the traditional mesh processing pipeline, the sequence of operations carried out to construct lung models, from their segmented contours, using triangular meshes and the *OpenMesh* library, is described.

### I. INTRODUÇÃO

A representação e o processamento de modelos geométricos, eventualmente complexos, usando malhas poligonais, são uma alternativa vantajosa e flexível aos modelos (mais tradicionais) baseados em representações implícitas ou paramétricas [1].

Representações usando malhas poligonais são hoje aplicadas em diversas áreas, nomeadamente em Imagiologia e Visualização Médica [2], em Arqueologia e Arte [3] e em sistemas de Desenho Assistido por Computador [4]. Paralelamente à utilização crescente de tais representações, têm também sido desenvolvidas técnicas de eliminação de ruído, suavização, compressão e transmissão de modelos, directamente aplicáveis a malhas poligonais e baseadas em algoritmos e métodos da área de Processamento de Sinal [5].

Em Imagiologia, a manipulação e visualização de modelos tridimensionais (3D) de órgãos pode ajudar os médicos na interpretação da informação proveniente de diferentes tipos de exames [1]. Tendo disponíveis os contornos resultantes da segmentação de exames pulmonares de Tomografia Axial Computadorizada (TAC) [6,7], pretende-se efectuar a construção dos correspondentes modelos 3D.

Este artigo começa por apresentar as fases principais do processo de criação e processamento de modelos usando malhas poligonais. De seguida, descreve a forma como as malhas pulmonares foram geradas e visualizadas.

Finalmente, refere ainda algumas ideias para trabalho futuro.

### II. OPERAÇÕES SOBRE MALHAS POLIGONAIS

O processo de criação e processamento de uma malha poligonal pode ser descrito pela seguinte sequência de operações [1]:

- Aquisição dos dados
- Geração da malha
- Avaliação
- Processamento da malha
- Visualização

Estas operações são apresentadas de seguida, de modo sucinto.

#### A. Aquisição dos dados

Quando se pretende criar uma malha que represente um objecto real, é necessário obter as características relevantes desse objecto, nomeadamente a geometria e textura, que permitirão reconstruir a sua superfície.

Um possível método para obtenção de informação de superfícies é o *range scanning* [8]. Neste método é medida a distância entre o dispositivo de medida e pontos pertencentes ao objecto. Por outro lado, em Medicina, para obter os dados volúmicos, podem ser usados métodos como a TAC ou a Ressonância Magnética.

#### B. Geração da malha

Depois de adquiridos os dados, o passo seguinte consiste na geração da malha. Dependendo da forma em que os dados obtidos estão estruturados, pode optar-se por diferentes processos de reconstrução:

- Nuvens de pontos: nesta situação não existe qualquer informação para além das coordenadas dos pontos recolhidos. Sendo este o caso mais geral, é também o que requer mais recursos computacionais. Existe uma descrição dos métodos de reconstrução usados nesta situação em [9].
- Contornos: em aplicações médicas, os dados volúmicos são, muitas vezes, processados secção a secção, sendo, para cada uma, segmentados o(s)

\* Financiado pela Unidade de Investigação 127/94 IEETA da Universidade de Aveiro.

contorno(s) de interesse. Neste caso, é possível explorar o facto de os contornos serem polígonos fechados e se apresentarem paralelos entre si, existindo diversos métodos de reconstrução aplicáveis, que são referenciados em [10].

É importante notar que é necessário armazenar numa estrutura de dados apropriada a informação geométrica (coordenadas dos vértices) e de conectividade (p.ex., as arestas incidentes num determinado vértice) dos diferentes elementos que constituem uma malha, para possibilitar a realização eficiente de posteriores operações sobre esta.

Em geral, na geração das malhas, são preferidas as compostas por triângulos, devido à simplicidade algorítmica, robustez numérica e velocidade no processo de *rendering* que lhes estão associadas [1]. Para além disso, as malhas de triângulos podem ser usadas ao longo de todo o processo de geração, processamento e manipulação, sem qualquer necessidade de conversão, o que diminui o tempo de processamento e reduz a possibilidade de erros por arredondamento.

### C. Avaliação

Depois de construída a malha que representa uma dada superfície, pode avaliar-se a sua qualidade. Os critérios de qualidade usados relacionam-se normalmente com a continuidade (*Smoothness*) e pouca variação (*Fairness*) da curvatura da superfície obtida [1]. Podem também ser usados critérios de qualidade para avaliar a forma dos triângulos que compõem a malha.

Os resultados dos diferentes métodos de avaliação podem ser apresentados quer de modo numérico, quer usando técnicas de visualização apropriadas [1], e permitem decidir se há ou não necessidade de aplicar um qualquer processamento posterior

### D. Processamento da malha

Na fase de processamento de uma malha podem efectuar-se diversas operações com distintos objectivos, como por exemplo:

- Suavização: ajuste da posição espacial dos vértices que compõem a malha, de modo a que seja globalmente mais suave.
- Decimação: diminuição da complexidade (número de vértices) da malha, para a tornar mais simples e fácil de manipular.
- Variação do nível de detalhe: construção de uma versão multi-resolução do modelo (com diferente número de vértices) para, por exemplo, a sua transmissão progressiva.
- Preenchimento de lacunas nos dados: geração de vértices adicionais, de modo a colmatar a ausência de informação em áreas particulares da malha gerada inicialmente [11].

Estas operações podem também apoiar-se em critérios adicionais de qualidade que se podem basear, por exemplo, no caso da decimação, na distância da malha decimada à malha original.

### E. Visualização

Após o processamento adequado, o modelo pode ser visualizado usando um ambiente de visualização apropriado. Este pode disponibilizar facilidades adicionais de manipulação e edição de modelos, permitindo a actuação directa sobre a malha poligonal; por exemplo, a alteração da posição espacial de vértices.

## III. GERAÇÃO DAS MALHAS PULMONARES

Descreve-se, de seguida, a sequência de operações desenvolvida para a geração das malhas pulmonares.

### A. Dados de entrada

A reconstrução tem por base contornos pulmonares (em que cada pulmão é processado independentemente) segmentados a partir de imagens de TAC [6,7]. Cada um dos contornos obtidos (Figura 1) é um polígono fechado, não havendo mais que um contorno por secção pulmonar. Uma vez que os dados disponíveis são uma descrição dos contornos *pixel a pixel*, estes têm de ser processados convenientemente antes de se proceder à construção da malha. Este processamento consiste na determinação dos pontos dominantes dos contornos, para reduzir o número de pontos a processar e, conseqüentemente, o esforço computacional para a construção da malha e sua visualização.

Para a detecção dos pontos dominantes dos contornos é utilizado o algoritmo de Teh e Chin (*kCos*) [12] disponibilizado na biblioteca *OpenCV* [13]. A redução conseguida para o número de pontos descrevendo os contornos foi elevada (entre 75% e 80%), sendo os resultados correspondentes a dois exames de TAC apresentados na Tabela 1.

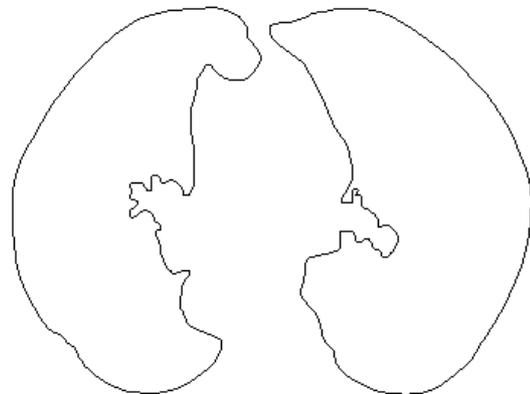


Figura 1 - Contornos correspondentes a uma secção de cada pulmão

Exame – Pulmão	Secções	Pontos Iniciais	Pontos Dominantes
A – Esq.	21	13.138	2.908
A – Dir.	21	14.293	3.267
B – Esq.	81	49.751	10.133
B – Dir.	81	48.774	9.850

Tabela 1 - Resultados da aplicação, aos pulmões correspondentes a dois exames de TAC, do algoritmo de detecção de pontos dominantes

### B. Construção da malha

A construção da malha, a partir dos pontos dominantes dos contornos pulmonares, é feita usando uma implementação parcial do algoritmo de reconstrução de Christiansen e Sederberg [14]: no caso dos pulmões, não se verifica qualquer bifurcação entre contornos, já que cada secção é composta unicamente por um contorno.

Cada par de contornos adjacentes é processado de forma independente dos outros. Antes de iniciar o processo de construção da malha, entre dois contornos, assegura-se que os pontos considerados inicialmente (um de cada contorno) são próximos. Esses pontos são ligados, constituindo-se assim uma das arestas do primeiro triângulo que for definido. Seguidamente, os contornos são percorridos, ambos no mesmo sentido, e sucessivos pontos dos contornos são ligados de modo a formar triângulos. Os triângulos construídos devem obedecer aos seguintes critérios:

- Cada triângulo deve conter pontos dos dois contornos;
- O triângulo escolhido, em cada passo, é aquele a que pertencer a menor diagonal.

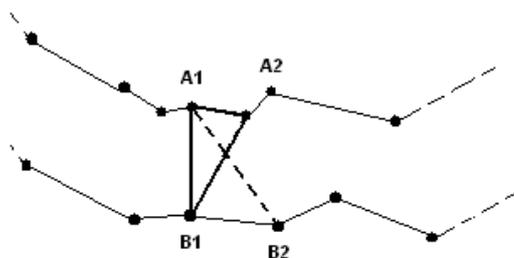


Figura 2 - Pormenor da construção de triângulos entre dois contornos

Na situação da Figura 2, o triângulo escolhido seria o A1-B1-A2, uma vez que o segmento de recta B1A2 é menor que o segmento A1B2.

Exame – Pulmão	Secções	Triângulos
A – Esq.	21	5.607
A – Dir.	21	6.237
B – Esq.	81	20.124
B – Dir.	81	19.501

Tabela 2 - Número de triângulos que compõem a malha gerada para cada um dos pulmões

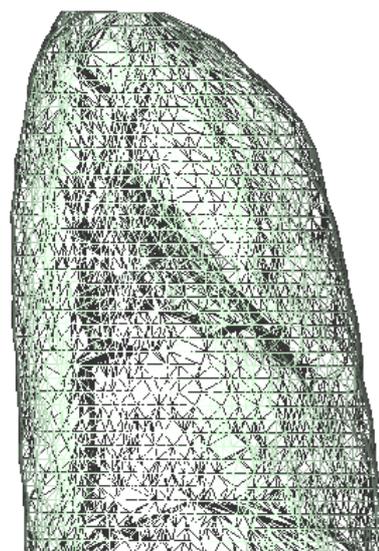


Figura 3 - Malha gerada para um pulmão

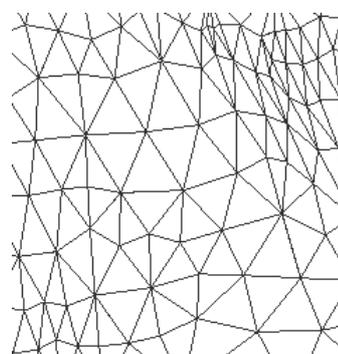


Figura 4 - Pormenor da malha de triângulos obtida

A Figura 3 apresenta a malha gerada para um pulmão. Um pormenor desta é apresentado na Figura 4.

O número de triângulos que compõem as malhas geradas, para os pulmões correspondentes aos dois exames de TAC da Tabela 1, é apresentado na Tabela 2.

### C. Representação Interna

Os dados dos contornos de cada pulmão são lidos de um ficheiro e armazenados numa estrutura de dados própria que permite manipulá-los de forma fácil, sendo o algoritmo de construção descrito acima aplicado a essa estrutura de dados.

Para armazenar a informação da malha de triângulos gerada existem diversos tipos de estruturas de dados possíveis: as que mantêm informação de conectividade ao nível das faces (*face-based*) e as que mantêm informação de conectividade ao nível das arestas (*edge-based*).

De entre das estruturas *edge-based* podem destacar-se as estruturas *Winged-Edge* [15], *Halfedge* [16] e AIF (*Adjacency and Incidence Framework*) [17]. A estrutura habitualmente usada é a *Halfedge*, pois permite um rápido acesso às entidades que constituem a malha (vértices, arestas e faces) e uma fácil manipulação da mesma.

Existem algumas bibliotecas que suportam estruturas de dados dos tipos anteriormente referidos. No caso da estrutura *Halfedge*, existem implementações, por exemplo, nas bibliotecas *CGAL* (*Computational Geometry Algorithms Library*) [18] e *OpenMesh* [19,20]. A biblioteca *CGAL* tem como principal objectivo proporcionar o acesso a alguns algoritmos utilizados no domínio da geometria, e tem algumas limitações ao nível do armazenamento eficaz de malhas que tenham que variar dinamicamente a sua complexidade [20]. Por outro lado, a biblioteca *OpenMesh* foi criada especificamente para suportar uma estrutura de armazenamento de malhas poligonais (*Halfedge*) e todas as ferramentas que possibilitem a sua manipulação. Permite, ainda, que se trabalhe especificamente com uma estrutura destinada a malhas triangulares, pelo que esta biblioteca foi usada para armazenar e manipular as malhas pulmonares geradas.

#### D. Armazenamento em Ficheiro

De modo a poder armazenar as malhas geradas, foi necessário encontrar uma forma de as guardar em ficheiro e depois recuperar essa informação. Existem alguns formatos de ficheiros de malhas que disponibilizam o código fonte para as operações de leitura e escrita como, por exemplo, o formato *PLY* [21,22]. A biblioteca *OpenMesh* disponibiliza métodos de leitura e escrita, para alguns formatos [19] (*OFF*, *OBJ*, *OM* e *STL*), de uma malha armazenada numa sua estrutura de dados. Uma vez que é usada uma tal estrutura de dados e os formatos de ficheiro disponibilizados são suportados por outras

aplicações, nomeadamente por programas de visualização, usou-se a biblioteca *OpenMesh* para assegurar as operações de leitura e escrita dos ficheiros de malhas.

#### IV. VISUALIZAÇÃO DAS MALHAS PULMONARES

Os ficheiros contendo as malhas geradas podem ser visualizados em diversos programas de visualização. Um exemplo desses programas é o *Machete3D* [23].

No entanto, a necessidade de controlar alguns dos parâmetros de visualização, tais como o modelo de iluminação aplicado à malha, motivou o desenvolvimento de um ambiente de visualização próprio. Este foi desenvolvido com recurso à biblioteca *OpenGL* [24] para fazer o *rendering* das malhas. Para o desenvolvimento da interface de utilizador colocaram-se várias hipóteses, nomeadamente as bibliotecas *Fox Toolkit* [25], *Qt* [26] e *GLUI* [27]. Uma vez que se pretendia uma interface bastante simples, foi utilizada a biblioteca *GLUI* que proporciona um conjunto de controlos razoável, sendo bastante fácil de utilizar. Esta biblioteca funciona sobre a biblioteca *GLUT* [28], e o desenho da interface de utilizador é feito usando *OpenGL*, pelo que o aspecto da mesma é independente da plataforma. Uma das características interessantes da biblioteca *GLUI* é o de disponibilizar um dispositivo de interacção que se assemelha a uma *trackball* virtual e que pode servir para operações de rotação do modelo. Na Figura 5 é apresentado o aspecto da interface de utilizador desenvolvida.

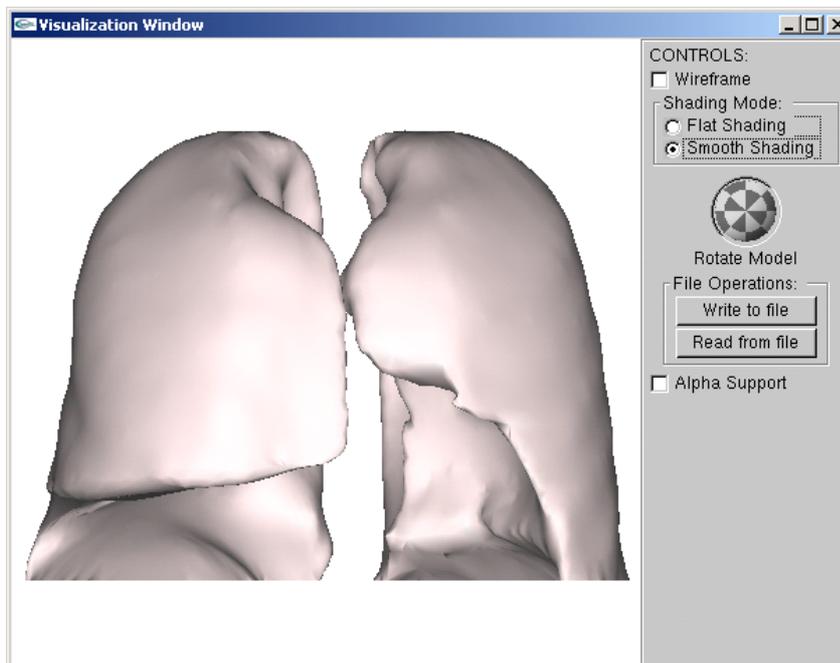


Figura 5 - Interface de utilizador do ambiente de visualização desenvolvido, mostrando um modelo criado

## V. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O trabalho desenvolvido permitiu a criação de modelos tridimensionais de pulmões, usando malhas triangulares, a partir de contornos obtidos através da segmentação de imagens médicas. Permitiu também a criação de um ambiente para visualizar os modelos criados.

Tomando como base o trabalho já efectuado, é possível agora testar e analisar os resultados de operações adicionais sobre os modelos gerados, nomeadamente:

- Avaliação da qualidade das malhas geradas;
- Suavização dos modelos;
- Decimação das malhas geradas;
- Processamento da informação de bolhas pulmonares [29] e geração das respectivas malhas, de forma a ser possível a visualização dos modelos dos pulmões incluindo as respectivas bolhas.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Dr. José Silvestre Silva a cedência dos dados dos contornos pulmonares.

## REFERÊNCIAS

- [1] L. P. Kobbelt, S. Bischoff, M. Botsch, K. Kähler, C. Rössl, R. Schneider, J. Vorsatz, "Geometric Modeling Based on Polygonal Meshes", *Tutorial - EUROGRAPHICS 2000*, Interlaken, Suíça, Agosto 2000
- [2] B. Geiger, "Three dimensional modeling of human organs and its application to diagnosis and surgical planning", *INRIA, Tech. Rep.*, 1993
- [3] The Digital Michael Angelo Project, <http://graphics.stanford.edu/projects/mich>, (Jan 2004)
- [4] Autocad, <http://www.autodesk.com/autocad/>, (Jan 2004)
- [5] G. Taubin, "Geometric Signal Processing on Polygonal Meshes", *State of the Art Report - EUROGRAPHICS 2000*, Interlaken, Suíça, Agosto 2000
- [6] J. S. Silva, A. Silva, B. S. Santos, "Lung Segmentation Methods in X-ray CT Images", *Proc. V Ibero-American Symposium on Pattern Recognition*, SIARP2000, Lisboa, Setembro 2000, pp. 583-588
- [7] A. Silva, J. S. Silva, B. S. Santos, C. Ferreira, "Fast Pulmonary Contour Extraction in X-ray CT Images: A Methodology and Quality Assessment", *Proc. SPIE 2001 vol 4321*, Progress in Biomedical Optics and Imaging, nº 26, San Diego, Fevereiro, 2001, pp. 216-224
- [8] P. Dias, "Reconstrução Tridimensional de Ambientes Reais Usando Dados Laser e de Intensidade", *Electrónica e Telecomunicações (Revista do DETUA)*, neste número
- [9] R. Mencl, H. Müller; "Interpolation and approximation of surfaces from three-dimensional scattered data points"; *State of the Art Report - EUROGRAPHICS 98*, Lisboa, Portugal, 1998
- [10] G. Barequet, D. Shapiro, A. Tal, "History Consideration in Reconstructing Polyhedral Surfaces from Parallel Slices", *Proc. IEEE Visualization '96.*, 1996, pp. 149-156
- [11] P. Liepa, "Filling Holes in Meshes", *Eurographics Symposium on Geometry Processing (2003)*, 2003
- [12] C. Teh, R. T. Chin, "On the Detection of Dominant Points on Digital Curves", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, Agosto, 1989, pp. 859-872
- [13] Open Computer Vision (OpenCV), <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv>, (Jan 2004)
- [14] H. N. Christiansen, T. W. Sederberg, "Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics", *Computer Graphics*, 13, 1978, pp. 187-192
- [15] B. G. Baumgart, "A Polyhedron Representation for Computer Vision", *Proc. National Computer Conference*, Anaheim, CA, 1975, pp. 589-596
- [16] K. Weiler, "Edge-Based Data Structures for Solid Modeling in Curved Surface Environments", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 5, N. 1, 1985, pp. 21-40
- [17] F. G. M. Silva, A. J. P. Gomes, "AIF - Uma estrutura de dados B-rep para modelos poligonais", *Actas do 12º Encontro Português de Computação Gráfica*, Porto, 2003, pp. 1-7
- [18] Computational Geometry Algorithms Library (CGAL), [www.cgal.org](http://www.cgal.org), (Jan 2004)
- [19] OpenMesh, [www.openmesh.org](http://www.openmesh.org), (Jan 2004)
- [20] M. Botsch, S. Steinberg, S. Bischoff, L. Kobbelt, "OpenMesh - a generic and efficient polygon mesh data structure", *OpenSG Symposium 2002*, 2002
- [21] the Stanford 3D Scanning Repository, <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>, (Jan 2004)
- [22] TriMesh, <http://graphics.stanford.edu/software/trimesh/>, (Jan 2004)
- [23] Machete 3D multiresolution mesh editor and signal processing tool, <http://graphics.cs.uiuc.edu/~awu/machete/>, (Jan 2004)
- [24] OpenGL, <http://www.opengl.org/>, (Jan 2004)
- [25] Fox Toolkit, [www.fox-toolkit.org](http://www.fox-toolkit.org), (Jan 2004)
- [26] Qt, <http://www.trolltech.com/products/qt/index.html>, (Jan 2004)
- [27] GLUT User Interface Library, <http://www.cs.unc.edu/~rademach/glui/>, (Jan 2004)
- [28] GLUT, <http://gd.tuwien.ac.at/graphics/GLUT/glut3.html>, (Jan 2004)
- [29] J. S. Silva, A. Silva, B. S. Santos, J. Madeira, "Detection and 3D representation of pulmonary air bubbles in HRCT volumes", *Proceedings of SPIE 2003 vol 5031*, Progress in Biomedical Optics and Imaging, Physiology and Function: Methods, Systems and Applications, San Diego, Fevereiro, 2003, pp. 430-439