

3

Métodos de Extração de Malhas a partir de Volumes

Extrair uma malha a partir de um dado volumétrico trata-se, na realidade, de uma forma de conversão entre dois modelos de representação muito comuns em Computação Gráfica. Dado um objeto volumétrico (em cujas amostras está definida uma função de densidade D), e um valor de densidade d_0 (que descreve implicitamente uma iso-superfície dentro do volume), o objetivo é obter uma malha que represente a iso-superfície (descrição explícita).

Este capítulo lista uma série de propriedades importantes em uma malha extraída, discute e relaciona vários métodos de extração de malhas a partir de volumes, destaca as principais estratégias e discute os principais problemas enfrentados durante a extração da malha.

3.1

Propriedades das Malhas Extraídas

Um bom método de extração de malhas a partir de volumes deve ir ao encontro de uma série de propriedades importantes (ou pelo menos a maioria delas). Dentre tais propriedades, destacam-se:

1. Topologia Correta. A malha extraída deve manter a correta topologia do objeto implicitamente representado no volume.
2. Rápido Processamento da Malha. Operações aplicadas à malha (como *rendering*) devem ser processadas em um intervalo razoável de tempo (de alguns segundos a alguns minutos).
3. Malha Adaptativa. É de grande importância a capacidade de representar de forma satisfatória a geometria do objeto. Esta propriedade permite que o conjunto de vértices, faces e arestas da malha se adapte aos contornos do objeto, de modo que regiões de alta curvatura possam ser satisfatoriamente representadas.

4. Razão de Aspecto dos Triângulos. Malhas com triângulos muito finos, além de atribuírem um aspecto deselegante ao objeto, são inadequadas para uma série de processamentos da malha. Portanto, o ideal é que seus triângulos apresentem uma boa razão de aspecto, ou seja, sejam o mais regulares possível.
5. Malhas Regulares e Semi Regulares. Em geral algumas operações como *edição*, *filtragem* e *compressão* de malhas são extremamente difíceis de se aplicar a malhas que possuam uma estrutura irregular. Portanto, malhas regulares e semi-regulares (seção 2.5) são bastante recomendáveis, de modo a viabilizar uma série de aplicações.
6. Superfícies Conexas e Superfície não Conexas. É muito comum os objetos implícitos serem desconexos dentro do volume. A malha extraída deve ter a capacidade de expressar estas discontinuidades do suporte geométrico do objeto.
7. Superfícies com Borda e Superfície Compactas. É importante que uma malha possa representar tanto superfícies compactas (por exemplo, homeomorfas à esfera) quanto superfícies com borda (por exemplo, um subconjunto de um plano). Uma das principais dificuldades de se representar superfícies com bordas é que quase sempre as propriedades da malha, como valência dos vértices, relação de vizinhança de arestas e faces e outras, se alteram na borda.
8. Malha Converte para a Superfície. O suporte geométrico da malha resultante deve convergir para a superfície do objeto, ou seja, as coordenadas de seus vértices devem se aproximar ao máximo da superfície.
9. Malha em Multi-resolução. Como mostrado nas seções 2.4 e 2.5, a representação da malha em multi-resolução se torna uma importante ferramenta para o processamento de superfícies. Assim, na representação em multi-resolução, é extraída uma malha inicial, a partir da qual é criada uma família de malhas, através de modificações locais da malha inicial.
10. Refinamento Adaptativo. O refinamento deve ser aplicado de modo que as características geométricas do objeto vão progressivamente se adaptando à malha (ou mantenham-se adaptadas, no caso da simplificação).

11. Subdivisão Consistente de Triângulos. Durante o refinamento da malha, os triângulos são subdivididos (no caso da simplificação, há união dos triângulos). Esta subdivisão deve ser consistente, de modo que a malha continue sendo um complexo (por exemplo, a intersecção entre dois triângulos deve ser apenas um vértice, uma aresta ou vazia). Além do mais, a subdivisão deve contribuir para manter a malha regular ou semi-regular.

Dentre os diversos métodos desenvolvidos, há sempre alguma(s) propriedade(s) acima que não é(são) satisfeita(s). As próximas duas seções mostram este fato tanto para os métodos que extraem malhas com resolução constante quanto para os métodos que extraem malhas em multi-resolução.

3.2

Extração de Malhas com Resolução Fixa

Dependendo da forma como o volume está estruturado, a malha pode ser gerada através de *métodos baseados em voxels* ou através de *métodos baseados em fatias*.

3.2.1

Extração de Malhas a partir de Voxels

O método clássico deste tipo de extração de malhas é o *marching cubes* [12], que percorre os voxels do volume e gera uma triangulação local, dentro de cada voxel. Apesar de poder reconstruir superfície com ou sem borda (propriedade 7) e poder ser aplicado a superfícies conexas e não conexas (propriedade 6), o *marching cubes* apresenta casos ambíguos durante a extração da malha, de forma que as propriedades 1 e 8 nem sempre são garantidas. Devido à superamostragem (por se tratar de um método de extração com resolução constante) operações de rendering e outros processos aplicados à malha são muito lentos. Além disto a malha é bastante irregular e os triângulos não apresentam boa razão de aspecto.

3.2.2 Extração de Malhas a partir de Fatias

Esta classe de métodos reconstrói a superfície a partir de um conjunto de fatias paralelas do volume [49, 29, 30, 8, 14, 42, 16, 37]. Dado um conjunto de *contornos* ou curvas fechadas $C_i, i = 1, 2, \dots, n$, onde cada elemento C_i está situado no plano $z = z_i$, o objetivo destes métodos é reconstruir a superfície S de modo que os contornos C_i sejam a interseção de S com o plano z_i , como mostra a figura 3.1.

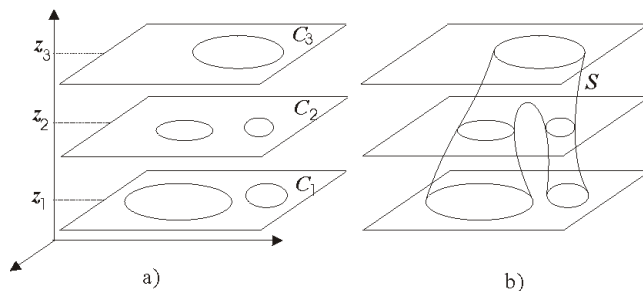


Figura 3.1: (a) Contornos sobre as fatias. (b) Superfície reconstruída.

Duas formas de extrair as malhas são através dos *Métodos Heurísticos* e através dos *Métodos Implícitos*, discutidos a seguir.

Métodos Heurísticos

Estes métodos extraem a malha a partir de um conjunto de heurísticas. Em geral, são aplicadas as seguintes etapas para extrair a malha: *correspondência* entre os contornos, *triangulação* dos contornos correspondentes e *bifurcações*.

A etapa da **Correspondência** visa estabelecer quais contornos de uma fatia serão conectados a quais contornos de uma fatia adjacente. Este problema se torna consideravelmente complicado quando a correspondência entre contornos adjacentes não é 1-1, o que é bastante comum. Uma das principais dificuldades nestes casos é a ambiguidade da malha gerada, uma vez que para duas fatias vizinhas, é possível estabelecer várias correspondências entre seus contornos, como mostra a figura 3.2. Quando a resolução entre as fatias é alta, as decisões de correspondência podem ser tomadas localmente, baseadas em projeções dos contornos nas fatias vizinhas [10, 16, 31]. Quando a resolução entre as fatias é baixa, há métodos que utilizam informações mais globais, como por exemplo, aproximar os

contornos por elipses e agrupá-los em cilindros, como forma de estabelecer a correspondência [9, 20].

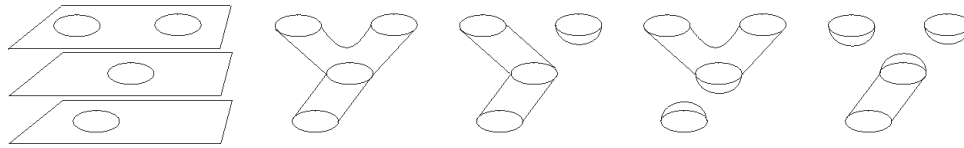


Figura 3.2: Diferentes correspondências entre contornos.

Na etapa da **Triangulação**, após estabelecida a correspondência entre os contornos, é gerada uma triangulação entre contornos correspondentes. Esta etapa também apresenta algumas limitações, principalmente se os contornos correspondentes forem muito diferentes. Em [32], Gitlin et al. mostram um exemplo em que não é possível construir uma malha triangular entre dois contornos. Alguns métodos utilizam heurísticas a partir de critérios topológicos para gerar a triangulação entre os contornos [29, 30]. Outros métodos utilizam critérios métricos, como a geração de um poliedro com volume mínimo [3] ou a geração de um poliedro com área mínima [6] entre contornos correspondentes; em ambos os casos a triangulação gerada entre os contornos, baseia-se na busca do caminho mínimo (volume mínimo [3] ou da área mínima [6]) em um grafo. Os métodos que utilizam os critérios acima são aplicados principalmente quando os contornos são semelhantes. Quando os contornos são muito diferentes, há métodos que utilizam um outro critério baseado no *mapeamento de contornos*, no qual os contornos são mapeados em polígonos auxiliares e em seguida a triangulação é gerada através destes polígonos [7, 16, 8].

O problema das **Bifurcações** ocorre quando um contorno de uma fatia corresponde a mais de um contorno da fatia vizinha, ou seja, há uma mudança na topologia da superfície. As bifurcações caracterizam pontos de sela na superfície. Para resolver este problema, várias soluções foram propostas, como mostra a figura 3.3. Na figura 3.3b, uma curva ou ponto L é colocada entre as duas fatias para modelar o ponto de sela formado pela bifurcação [29]. Na figura 3.3c a curva L é colocada sobre a fatia que contém apenas um contorno. Na figura 3.3d o segmento de reta L é colocado entre os dois contornos, para formar um único contorno composto [7, 17, 16]. Na figura 3.3e é gerado um polígono composto formado pelo fecho convexo dos contornos; a região limitada pelo fecho convexo é então triangulada [20]. Comparando topologicamente estas soluções, a da figura 3.3b, em geral, é a mais correta, pois corresponde mais fielmente às propriedades topológicas do objeto reconstruído. Em outros métodos [14, 22, 41] são

geradas triangulações 2D de Delaunay em cada fatia; cada triangulação é projetada em fatias adjacentes e em seguida é gerada uma triangulação de Delaunay 3D entre as duas fatias adjacentes.

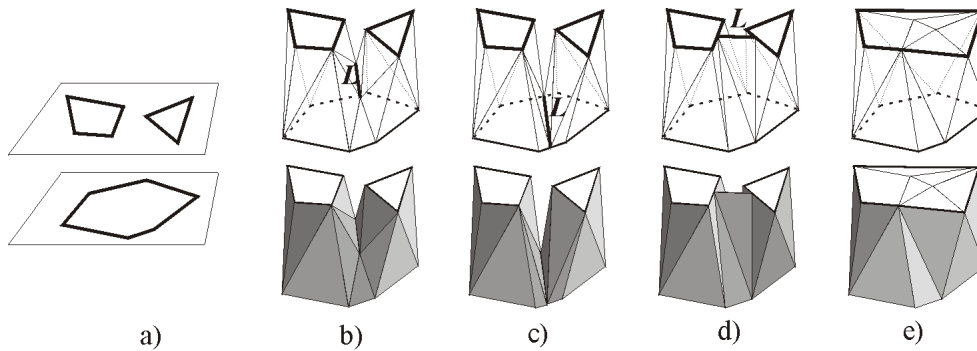


Figura 3.3: a)Duas Fatias. b)Curva L entre as fatias. c)Curva L sobre uma fatia. d)Ponte. e)Fecho dos contornos.

A resolução da malha gerada pelos métodos heurísticos acima depende muito da resolução dos dados de entrada, que, em geral, são muito grandes. A malhas geradas, portanto, são superamostradas e apresentam dificuldades durante operações como rendering. Dependendo da heurística aplicada durante as etapas da correspondência, triangulação e bifurcações, a topologia correta da malha não é garantida. Em geral, as malhas reconstruídas são muito irregulares. Portanto muitas das propriedades da seção 3.1 não são garantidas.

Métodos Implícitos

Para extrair a malha, estes métodos [31, 33, 42, 11] aplicam basicamente as seguintes etapas:

Field Functions Sobre cada fatia é definida uma função, chamada *field function*.

Interpolação Através da interpolação das field functions é definida uma função F sobre todo o volume, de modo que a superfície é representada pela iso-superfície zero ($F=0$).

As field functions são definidas localmente nas fatias. Para construir uma superfície natural e suave é necessário escolher apropriadamente as field functions, pois, dependendo da escolha, nem sempre elas originam uma superfície da forma correta. Um exemplo de field function bastante utilizado é a *função distância com sinal* [33, 42, 11], $D_C : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, calculada

sobre o contorno C de uma determinada fatia. Dadas as coordenadas (x, y) sobre a fatia, $D_C(x, y)$ calcula a menor distância entre o ponto (x, y) e a curva C .

A interpolação das field functions gera uma função F , definida em todo volume. A superfície reconstruída deve interceptar os voxels $\{(i, j, k)\}$ nos quais $F(i, j, k) = 0$. Pelo *Teorema da Função Implícita* [5, 13], quanto mais suave for a função F , mais suave também será a superfície (iso-superfície $F = 0$). Se a função interpolada F não for construída adequadamente, é possível que a iso-superfície $F = 0$ ocorra em pontos (i, j, k) indesejados e, portanto, a superfície reconstruída pode ter uma aparência desagradável. A interpolação da função F pode ser feita globalmente a partir do conjunto de fatias [33] ou pode ser feita localmente entre cada duas fatias adjacentes [42].

Devido à forma como F é construída e a malha é extraída, os métodos implícitos não tratam diretamente as etapas de correspondência, triangulação e bifurcações como os métodos heurísticos. Porém, dependendo da escolha das field functions e da forma como a função F é interpolada, a topologia e geometria da superfície podem ser calculadas incorretamente, contrariando algumas das propriedades importantes da malha. Além disso, a malha depende muito do método final aplicado para percorrer os voxels por onde passa a iso-superfície $F = 0$. Por exemplo, caso seja usado o marching cubes, o método implícito herda todas as suas deficiências e, mesmo possuindo boas field functions e boa interpolação, pode gerar malhas sem as propriedades desejadas.

3.3

Extração de Malhas em Multi-resolução

Como mostrado nas seções 2.4 e 2.5, é muito importante se ter uma malha representada em multi-resolução. Os métodos discutidos na seção anterior geram malhas com resolução constante, apesar de ser possível aplicar algum pós processamento para obter uma resolução variável. No caso das malhas originadas de dados volumétricos, existem várias estratégias para se obter uma representação em multi-resolução.

Uma das primeiras decisões a ser tomada durante a elaboração de um método de extração de malhas em multi-resolução a partir de volumes é especificar se a multi-resolução, em si, deve ser aplicada ao volume ou à malha:

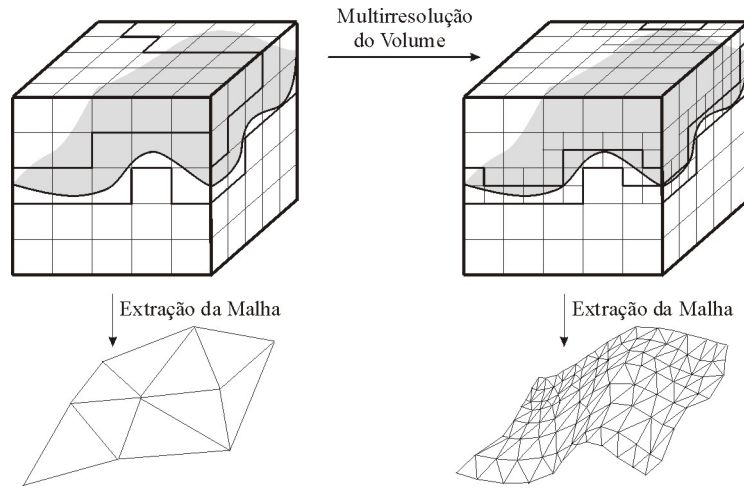


Figura 3.4: multi-resolução do volume.

Multi-resolução do Volume Nesta estratégia o processo de multi-resolução é aplicado ao próprio volume de dados [25, 36] (seção 2.6). A cada instante obtém-se um novo volume com uma resolução diferente, a partir do qual uma malha é extraída [43, 44] (figura 3.4).

Multi-resolução da Malha Nesta estratégia é extraída uma malha inicial do volume de dados. O processo de multi-resolução é então aplicado à malha extraída (figura 3.5).

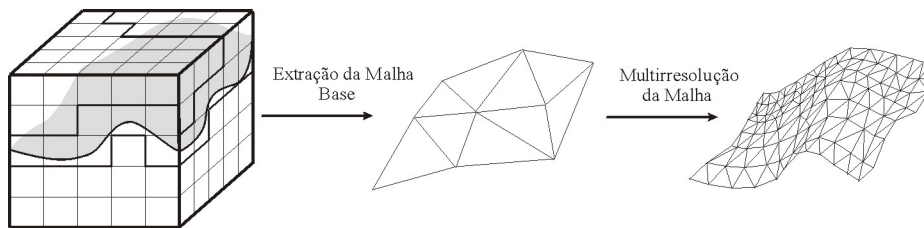


Figura 3.5: multi-resolução da malha.

Um dos maiores desafios dos métodos de extração de malha com multi-resolução do volume é manter a topologia dos objetos nos vários níveis hierárquicos.

No caso dos métodos de extração com multi-resolução da malha, para obter uma representação em multi-resolução a partir de uma malha inicial, são aplicadas operações de refinamento ou simplificação sobre a malha (seção 2.5):

Simplificação Nesta estratégia é extraída uma malha super amostrada. Técnicas de simplificação são então aplicadas para que sejam progressivamente geradas malhas com resoluções menores.

Refinamento Nesta estratégia é extraída uma malha inicial com uma amostragem grosseira (malha sub amostrada), chamada *malha base*. Esta malha base vai sendo então gradativamente refinada, ou seja, vão sendo acrescentadas novas amostras, criando assim malhas com resoluções maiores.

3.3.1

Métodos de Simplificação

Muitos algoritmos utilizam operações de simplificação para obter uma malha representada em multi-resolução [27, 45, 38]: a malha inicial pode ser calculada por algum método de extração com resolução constante (como os discutidos nas seções anteriores). Existe ainda uma série de métodos de simplificação que recebem como dados de entrada uma *nuvem de pontos* que constitui informações superamostradas de uma superfície, sem nenhuma informação de conectividade entre os pontos [59]. Esta nuvem de pontos pode resultar de modernas técnicas de aquisição [50, 60], bem como pode resultar também de dados volumétricos.

De um modo geral os métodos de simplificação podem ser divididos em [59]:

Métodos de Aglomerações Estes métodos classificam os pontos iniciais em um número de subconjuntos, que são os *aglomerados* de pontos. Em cada aglomerado é selecionado um representante que irá fazer parte da malha simplificada [23]. A geração de um aglomerado pode se dar por um processo de *crescimento* ou por um processo de *partição*. No processo de crescimento, novos pontos são acrescentados ao aglomerado através de uma propagação que parte de um ponto inicial p_0 . No processo de partição o conjunto de pontos inicial vai sendo hierarquicamente particionado através de uma *árvore de partição binária* (bsp) [55].

Métodos Iterativos Nestes métodos são aplicadas operações de *decimação* aos dados, de modo que os pontos vão sendo sucessivamente eliminados do conjunto de pontos inicial, de acordo com uma medida de erro aplicada aos dados [56].

Métodos de Simulação de Partículas Nestes métodos, as posições dos pontos que irão compor a malha simplificada são calculadas através do movimento de partículas definidas sobre partes da superfície representada pelos dados iniciais. Os deslocamentos são definidos de

acordo com um conjunto de forças repulsivas que atuam internamente no sistema de partículas [21].

3.3.2 Métodos de Refinamento

Em geral, métodos de simplificação são empregados quando os dados iniciais representam informações super amostradas. Porém, em muitas situações, processos de simplificação podem ser insuficientes para solucionar determinados problemas, sendo necessárias também operações de refinamento para que a malha extraída contenha propriedades importantes, como as descritas na seção 3.1. Por exemplo, nas situações descritas abaixo a simplificação apresenta uma série de desvantagens em relação ao refinamento:

- Em geral as malhas resultantes da multi-resolução por simplificação são muito irregulares. Isto dificulta estabelecer uma relação entre os parâmetros da malha (parametrização espacial) e o parâmetro da resolução (parametrização temporal). A relação entre estes parâmetros é importante, por exemplo, para compressão de dados [51].
- Em multi-resolução adaptativa, o refinamento é mais apropriado do que a simplificação, uma vez que vão sendo progressivamente acrescentadas amostras à malha de acordo com as características do objeto que ela representa. Em geral, regiões de alta curvatura requerem mais amostras do que regiões de baixa curvatura.
- Para a transmissão de dados através de uma rede, a multi-resolução por refinamento se mostra muito mais natural, uma vez que seriam inicialmente transmitidas as informações de uma malha grosseira (em baixa resolução) e em seguida seriam progressivamente transmitidos os detalhes.

Em [47] Wood desenvolveu um método de extração de malhas, onde a representação de multi-resolução é obtida por refinamentos. Porém a malha reconstruída não suporta componentes não conexas, nem superfícies com bordas, devido à forma como a topologia do objeto é extraída. Outro inconveniente deste método é que a subdivisão dos triângulos não é feita de forma consistente durante o refinamento: há várias possibilidades de subdivisão de triângulos, que devem ser tratadas caso a caso.

No método desenvolvido em [54] é gerada uma malha já refinada a partir de um objeto volumétrico. É possível obter malhas refinadas em vários

níveis de resolução. Este método é baseado no processamento de conjuntos de dados intermediários como uma cobertura de discos e outros (capítulo 5). Apesar de a malha final ter uma boa aparência, principalmente pelo fato de os triângulos apresentarem boa razão de aspecto, ela é bem irregular. Outro problema é que é difícil estabelecer uma relação hierárquica entre malhas de diferentes níveis de resolução.