

3次元医療データにおけるサーフェスレンダリング手法

吉田 亮、土井 章男

日本アイビーエム(株) 東京基礎研究所

この論文では、CTなど3次元医用データから等値面(サーフェスデータ)を抽出するアルゴリズムについて述べる。3次元ボリュームデータに対し、従来の四面体格子法を用いて等値面を抽出すると、その格子点数の多さから、複雑かつ大量の多面体データが生成される。そこで、このような特徴を持つ多面体データに対応するため、境界表現で用いられるデータ構造を用い、そのデータの品質を損ねることなく、データ量を高速に、かつ、大幅に削減する方法について述べている。これにより、医療データから生成されるサーフェスデータに関しても、画像生成時間が短くなり、対話的に回転・拡大などの操作が可能になる。

Surface Rendering Technique for 3-D Medical Data

Ryo YOSHIDA and Akio DOI

Tokyo Research Laboratory, IBM Japan Ltd.
5-19 Sanbancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102, Japan

A rapid triangulation and data-volume reduction method is presented for approximating equi-valued surfaces to polyhedra. It is very useful for 3D medical data, because after that approximation, the enormous and complicated data sets of polyhedra are generated from fine grids based on the resolution of CT. The method uses a data structure of the boundary representation in CAD and reduces the data volume drastically and rapidly without image deterioration. As the result, it makes possible to generate the surface rendered image quickly and to rotate or magnify it interactively.

1 はじめに

現在、多面体データについては、グラフィックワークステーションにより容易に画像生成可能であり、回転・縮小などの対話的な操作も行なえるようになっている。そのため、多くの多面体近似アルゴリズム [1, 2] が提案されてきた。これらの技術は、多くの分野に応用され、3次元医用データもその対象となってきた。この場合、等値面の多面体近似とは、データの等濃度面の抽出ということになり、結果として骨の表面形状などが抽出される。

ところが、実際に CT などに代表される医用データについて、等濃度面の多面体近似を行なうと、数十万もの多面体からなる複雑な形状が生成されることになる。これは、データ計測点数（格子点数）が非常に多いことに起因するが、その他にも、例えば、頭骸骨と鼻付近の微小骨のように、様々な大きさの近似の対象が同時に多数含まれていること、それらが必ずしもなめらかな曲面を形成しているとは限らないこと、ノイズが多く含まれること、など、従来扱ってきた関数値曲面ではみられなかった特徴を持っている。結果として、大量になった多面体データに基づく画像の生成には、非常に時間がかかる、また、大量のシステムメモリを必要とする、などの問題が生じる。

このような状況下で、画像の回転などを対話的に行うことは現実的でなくなってくるため、そのデータ量を減らして、画像生成速度を速めることが重要になってくる。しかし、従来、これほど大量の多面体データを扱うアプリケーションがなかったため、生成された多面体データの間引きについては、ほとんど提案されなかった。したがって、このような場合には、近似するデータそのものの粗さにより、生成されるデータ量を調整してきたが、これでは、粗さによって、近似の精度が大きく損なわれてしまうことが明かである。また、従来用いてきた、三角形リストと頂点リストを組み合わせたデータ構造（図1）では、その要素を削除できるかどうか判断するための情報が不足しており、高速なデータ量削減は難しいと考えられる。

そこで今回は、上のように大量かつ複雑なデータからなる3次元医用データのためのサーフェスレンダリング手法として、近似多面体データを生成するための四面体格子法 [3] と、それに対する間引き用データ構造を利用した高速かつ有効なデータ量削減手法について述べていく。

三角形テーブル		頂点テーブル		
三角形 ID	3 頂点 ID のリスト	頂点 ID	頂点の座標	曲面の法線
1	V-1, V-2, V-3	1	$V1_x, V1_y, V1_z$	$N1_x, N1_y, N1_z$
2	V-1, V-2, V-3	2	$V2_x, V2_y, V2_z$	$N2_x, N2_y, N2_z$
3	V-1, V-2, V-3	3	$V3_x, V3_y, V3_z$	$N3_x, N3_y, N3_z$
	⋮		⋮	

三角形テーブルは、三角形の3頂点のIDの組からなる配列、頂点テーブルは、各頂点の座標と、そこでの法線ベクトルの6実数の組からなる配列である。

図 1: 多面体近似のデータ構造

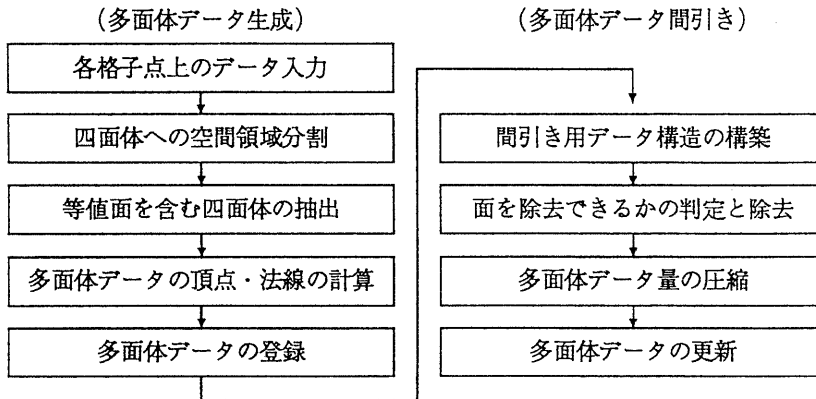


図 2: 処理の流れ

2 多面体データの生成

まず、3次元医用データから等値面を抽出し、その結果を三角形の多面体データの集合として得る。四面体格子法は、格子点を頂点とする四面体への空間領域分割を行ない、等値面を含む四面体の辺上で多面体近似の頂点を求めることにより、多面体データを作成する方法である。多面体の頂点は格子点上の関数値のみから計算されるので、各四面体で生成された多角形は互いに接続する。図 2 に、多面体データの生成過程である四面体格子法と、次に述べる多面体データ間引き過程について、全体の流れを示しておく。

2.1 多面体データ生成のアルゴリズム

2.1.1 四面体への空間領域分割

格子点を頂点とする四面体への空間領域分割は、いくつかの分割方法が考えられるが、ここでは、5 個の四面体への直方体分割を用いる。

2.1.2 等値面を含む四面体の抽出

格子点上の関数値からどの四面体に等値面が存在するか調べる。四面体を構成する 4 頂点の値から表 1 の 15 通りの場合分けができる。生成される多面体データの頂点が存在するためには、四面体の辺の両端が異符号か一端が零でなければならない。ケース 9 では、四面体の 4 辺で両端が異符号となり、四角形となるが、ここでは、2 個の三角形に分割する。また、ケース 13 から 15 では、生成される三角形がもとの四面体の面と一致するが、データの重複を避けるため、ケース 14 と 15 では三角形を生成しない。

ケース	-	0	+	生成される多角形
1	4	0	0	なし
2	0	0	4	なし
3	3	1	0	なし
4	0	1	3	なし
5	2	2	0	なし
6	0	2	2	なし
7	3	0	1	三角形 (1個)
8	1	0	3	三角形 (1個)
9	2	0	2	三角形 (2個)
10	2	1	1	三角形 (1個)
11	1	1	2	三角形 (1個)
12	1	2	1	三角形 (1個)
13	1	2	0	三角形 (1個)
14	0	3	1	なし
15	0	4	0	なし

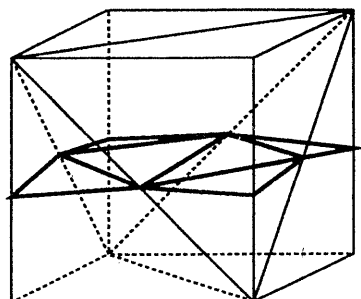


表 1: 四面体頂点の関数値と生成三角形 (5分割時の例)

2.1.3 多面体データの頂点座標、法線方向の計算

最後に、抽出された多面体データの頂点座標と法線方向の計算を行なう。この際の法線方向であるが、これまでは、格子点上の値の変化そのものを基準としてきた。しかし、医用データの場合、そのデータの性質上、値の変化勾配を基準に考えることで、画像の品質が大幅に改善される。後の実際の適用例では、この方法を用いている。

以上で、近似された多面体データが得られたことになる。

3 多面体データの間引き

次に、得られた多面体データについて、データの品質を損なうことなくその量を減らすことを考える。先に述べたように、3次元医用データは、その格子点数が非常に多いだけでなく、結果が必ずしもなめらかな曲面を形成しているとは限らないなど、関数値曲面ではみられなかった特徴を持っている。当然、得られる多面体データも同じように複雑な形状であり、そのような場合でも高速な処理が可能でなければならない。そこで、ここでは境界表現 (Boundary-representation) に見られるデータ構造を用いた。この構造からは、以下で述べる条件判断に必要な情報が即座に得られるので、面積、各頂点間における法線の振れ、面の融合回数、多面体の縁であるかどうか、などから面を除去できるかどうか判断し、可能であれば面を取り除いて、面の3頂点を融合させていく。面の除去にあたっては基本的に、1.) 曲率の小さいなめらかな表面形状の部分は、ひとつの大きい面で代表させる、2.) 多面体に切口があるような形状の場合、切口はそのまま保存する、3.) 相対的に小さい面については削除するが、近似された結果、小さい四面体となった場合でも体積はなくさない、の3点を考慮した。

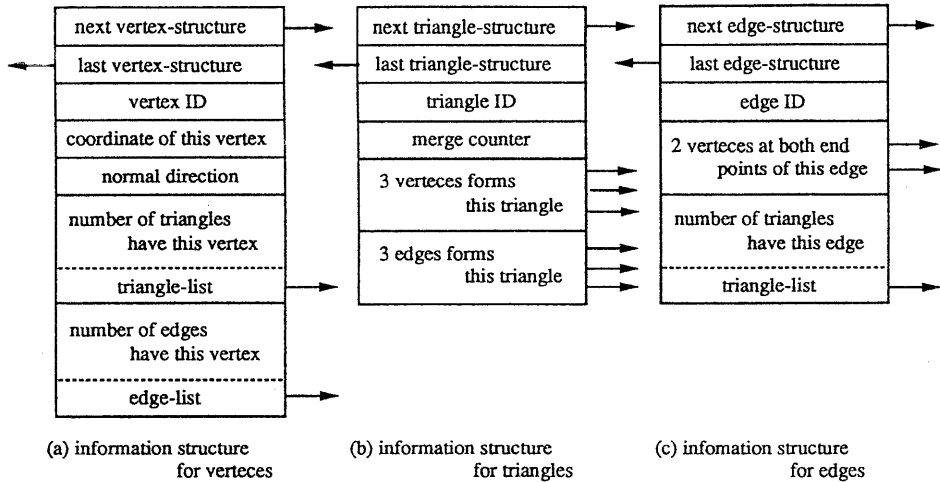


図 3: 各要素に関するデータ構造

3.1 間引きのアルゴリズム

3.1.1 データ構造の構築

多面体は、頂点、辺、面（三角形）の各要素から構成されるので、このそれぞれについて、図3のような情報を持ったデータ構造を作成する。これにより、ある要素に接続する他の要素群について、例えば、ある頂点に接続するすべての面などを即座に知ることができる。

3.1.2 頂点、辺、面の除去

上のデータ構造から得られる情報を用い、すべての面について順に除去できるかどうか判定を行っていく。可能であれば面を除去し、除去された面の各頂点を、ひとつの頂点としてその重心に融合する。面についての走査が一順すれば、十分なデータ量の削減が可能であるが、繰り返すことにより、さらに削減できる。以下に、面が除去しない場合を示す。(図4参照)

1. 面を構成する各辺の、両端における法線の振れが大きい場合。
 - $(\text{各辺の両端における法線どうしの内積}) < (\text{ユーザが与える内積のしきい値})$
2. 各面の融合回数。頂点の融合に伴う面の変形をある回数に抑える。
 - $(\text{各面の融合回数}) > (\text{ユーザが与える融合回数のしきい値})$
3. 隣接する面、あるいは自身が多面体の縁を構成する場合。接続する面の各頂点について
 - $(\text{頂点に接続する三角形の数}) = 1$
 - $(\text{頂点に接続する辺の数}) - (\text{頂点に接続する三角形の数}) = 1$

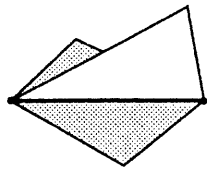
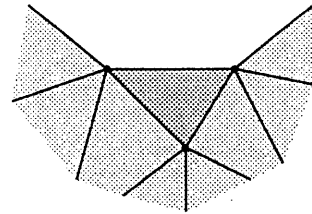
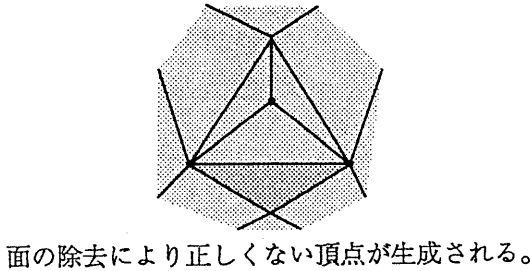
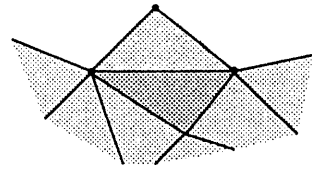
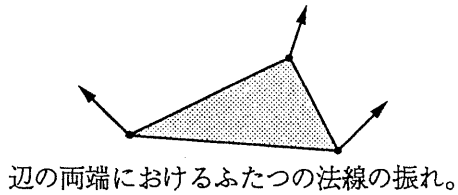


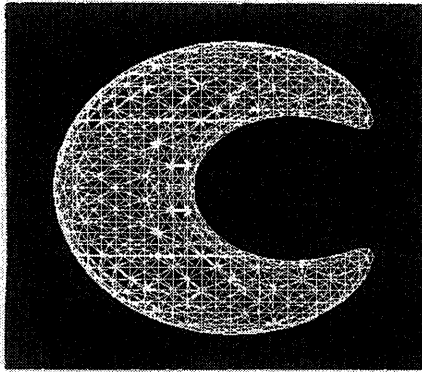
図 4: 面を除去しない場合

4. 正しくない頂点が生成される場合。辺で接続する三角形の、辺に向かい合う頂点について
 - (頂点に接続する三角形の数) ≤ 3
5. 面を構成するいずれかの辺において、面が分岐する場合。
 - (辺で接続する面の数) > 2
6. 面の面積が小さい場合。
 - (面の面積) $>$ (ユーザが与える面積のしきい値)

除去される面に隣接する面が小さい場合、面の除去にともなって、それが拡大されてしまう場合も考えられる。ゆえに、面積が小さい面の除去は間引きに有効である。

3.1.3 データの圧縮

以上の処理が終ると、そのデータ構造から、不要な要素はすでに除去されているので、これをもとに多面体データを更新する。今回は、図 1 に示したデータ構造に戻して画像生成を行っている。



$$F(x, y, z) = (x^2 + y^2 - 1)^2 + 4z^2 + 0.5x$$

$F(x, y, z) = 0.4$, 法線の振れ 0.85, 面融合回数 3 の時

多面体近似された頂点の正確度

格子幅	本手法適用時		非適用時	
	0.10	0.05	0.10	0.05
頂点数	1,458	5,957	3,764	15,288
関数曲面 までの距離	平均	最大	平均	最大
	0.45×10^{-2}	0.43×10^{-3}	0.96×10^{-3}	0.34×10^{-5}
	0.45×10^{-1}	0.11×10^{-1}	0.12×10^{-1}	0.99×10^{-3}

多面体近似された三角形の重心の正確度

格子幅	本手法適用時		非適用時	
	0.10	0.05	0.10	0.05
三角形数	2,912	11,910	7,524	30,572
関数曲面 までの距離	平均	最大	平均	最大
	0.44×10^{-2}	0.87×10^{-3}	0.16×10^{-2}	0.15×10^{-3}
	0.53×10^{-1}	0.25×10^{-1}	0.21×10^{-1}	0.93×10^{-2}

表 2: 多面体データの正確度

4 評価および適用例

本手法の有効性を検証するため、関数曲面を用いて正確さを評価した。尺度として、近似された頂点から関数曲面までの平均距離、および、近似された三角形の重心から関数曲面までの平均距離を用いる。表 2 に、関数曲面とその結果を示す。四面体格子法により生成された多面体データに対して、間引きする前と後で十分な精度が確保されていることがわかる。

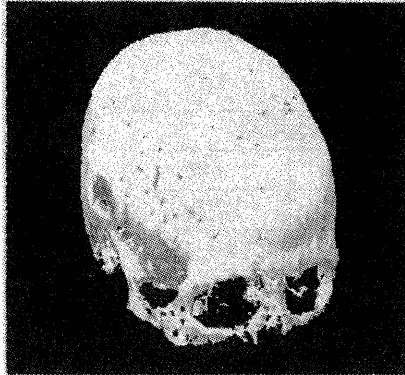
図 5 に、実際の 3 次元医用データに対して本手法を適用した例を示す。データには、 $256 \times 256 \times 40$ の CT データを平均により、 $64 \times 64 \times 40$ としたデータを用いている。図からわかるように、間引き処理により面データ量を約 1/2 にしたにもかかわらず、形状は損なわれていない。なお、以上の例は IBM RS/6000 550 上で行ない、図 5 については、Z-buffering, Gouraud-shading を用いている。

5 おわりに

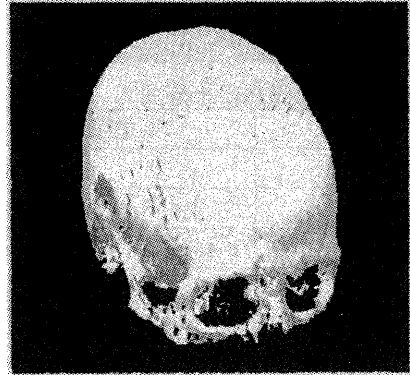
本手法により、3 次元医用データに関して多面体近似を行なった場合の、大量の多面体データが引き起こす問題に対する解決法が見い出された。これは、医用データに関して、その等

	本手法適用時	非適用時
データサイズ	64 × 64 × 40	64 × 64 × 40
CPU time	多面体生成	4.65 sec.
	間引き	30.76 sec.
多面体数	50,154	106,852
頂点数	25,166	53,515

(濃度 220, 法線の振れ 0.80, 面融合回数 3 の時)



(a) 本手法適用時



(b) 非適用時

図 5: 多面体データ削減の例

値面の対話的な操作（回転・拡大）を可能にするものである。さらに、縁部に関して形状が保たれるため、より大量のデータを処理する際には、いくつかの部分に分けて処理を行ない、得られたデータから順に表示し、最終的にひとつの画像を生成することも可能である。本手法は、頂点座標と法線方向の情報のみをもつ一般的な多面体近似データからでも簡単に適用でき、その応用範囲は広い。

参考文献

- [1] D. G. Purvis, C. Culberson: "On the Graphical Display of Molecular Electrostatic Force-Fields and Gradients of the Electron Density," *NATO Conference*, pp. 317-332, July 1985.
- [2] W. E. Lorensen, H. E. Cline: "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *ACM Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
- [3] A. Doi, A. Koide: "An Efficient Method of Triangulating Equi-Valued Surfaces by Using Tetrahedral Cells," *IEICE Transactions*, Vol. E-74, pp. 214-224, Jan. 1991.