

ボリウムデータの 適応的四面体メッシュ表現並列生成アルゴリズム

高 間 康 文[†] 木 村 彰 徳^{††} 田 中 弘 美[†]

一般的に、医用断層画像などから再構成されるボリウムデータは膨大であり、効率的にタスクを行うためには、ボリウムデータの複雑さに応じて圧縮し表現できる適応的ボリウム表現が必要とされる。そこで本論文では、入力ボリウムデータの複雑さに適応し、指定された近似精度を満たす、「クラック（空間の隙間/割れ目）」のない適応的四面体メッシュ表現を生成する並列アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムを実現するための、(1) ボリウムデータの勾配や等値面の曲率などの局所特徴の変化に適応的な階層的四面体メッシュ生成法と、(2) 各メッシュ要素をそれぞれ独立に分割する過程で発生するクラック問題を回避するために考案した再帰的近傍探索法について述べる。本手法の特長は、ボリウムデータの局所微分特徴やその不連続性に基づいて適応的に生成された少数のボクセル集合から、クラックのないボリウム近似表現（適応的四面体メッシュ表現）を時間的・空間的に上限のある並列局所計算にて高速に生成することである。本並列アルゴリズムを分散型 PC クラスタを用いて実装し、CT データから再構成したボリウムデータを用いた実験結果から提案アルゴリズムの信頼性と有効性を示す。

Tetrahedral Adaptive Mesh for Parallel Hierarchical Tetrahedralization of Volume Data

YASUFUMI TAKAMA,[†] AKINORI KIMURA^{††} and HIROMI T. TANAKA[†]

Recent advances in volume scanning techniques have made the task of acquiring volume data of 3-D objects easier and more accurate. Since the quantity of such acquired data is generally very large, a volume model capable of compressing data while maintaining a specified accuracy is required. The objective of this work is to construct a multi resolution tetrahedral representation of input volume data. This representation adapts to gradient of field values while preserving their discontinuities. In this paper, we present a tetrahedral adaptive representation technique. We have developed a parallel algorithm of tetrahedral adaptive mesh generation, according to local field properties such as the orientation and curvature of isosurfaces, until the entire volume has been approximated within a specified level. Experimental results demonstrate the validity and effectiveness of the proposed approach.

1. はじめに

CT（Computed Tomography）や MRI（Magnetic Resonance Imaging）に代表される断層画像撮影装置の高速・高精細化にともない、獲得された画像列から再構成されるボリウムデータの容量も増大している。このような膨大なボリウムデータを効率的に処理するためには、指定された近似精度に基づいて特徴の変化に応じて適応的にボリウムデータを圧縮し表現で

きる、階層的な適応的ボリウム表現が必要である。

階層的なボリウム表現は、入力データを再帰的に分割することにより比較的容易に生成され、多重解像度でボリウムデータを近似できるという特長を持つ^{1)~3)}。従来は、階層的ボリウム表現（階層的ボリウムメッシュ表現）を生成する方法として、3次元空間を構成する立方体をメッシュ要素とし、再帰的に8分割するオクツリー表現法¹⁾が用いられてきた。しかし、オクツリー表現では階層間で8倍の精度差があり、解像度が不連続であるため、入力データの任意精度の近似表現を生成することが困難であった。そこで、3次元空間を構成する最小の空間要素である四面体をメッシュ要素とし、再帰的に細分割することにより、階層的なボリウム表現を生成する新しいアプローチが提案されてきた^{2)~5),8),11),12)}。また、Maubach は

[†] 立命館大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

^{††} 足利工業大学工学部

Faculty of Engineering, Ashikaga Institute of Technology

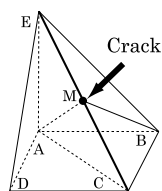


図1 クラック問題

Fig.1 The crack problem.

N次元グリッド（メッシュ）データの再帰的二分割法を提案した¹²⁾。四面体をメッシュ要素とすることにより、従来の立方体のメッシュ要素を定義する同一のボクセル集合から、より高精度、高圧縮、かつ、階層間の精度差を2倍にまで縮小する、より連続的な近似精度を持つ階層的なボリューム表現を生成することが可能である。さらに、等値面生成⁴⁾やデータ補間の高精度化⁵⁾、ならびに高速化も見込まれる。

一方、近年のPCクラスタなどの並列計算機の進展や普及にともない、複数のプロセッサにタスクを分散し、並列演算による高速処理や並列アルゴリズムの研究が進められてきた^{6),7),13)~15)}。複数のプロセッサに入力データを分割して配分し、並列に、適応的なボリューム表現を生成するためには、各メッシュ要素がそれぞれ独立に分割される過程で発生する「クラック（ボリュームデータの隙間/割れ目）問題」を解決する必要がある。図1に示すように、クラックとは、隣接するメッシュ要素内の分割結果を互いに考慮していないために、隣接メッシュ要素間の境界で現れる位相の不整合であり、ボリュームデータに隙間/割れ目をつくる。その結果、等値面に穴が生じたり、補間されたフィールド値が一意に定まらないなどの不整合が生じる。

クラック問題の対処のために、規則的な分割と不規則な分割を組み合わせる手法⁸⁾、レンダリング時にクラックの影響を受けないように表示する手法^{9),10)}が提案されている。また、Maubachは、各メッシュ分割結果を近傍のメッシュ要素に伝播し発生したクラックを修繕する手法を提案した¹²⁾。しかし、これらの従来法は「すでに発生した」クラックを解決する方法であり、各メッシュ要素が独立に分割された結果の整合性、つまり、独立に分割される過程でクラックを発生させないこと、を保証する並列アルゴリズムは提案されていない。

そこで本論文では、入力ボリュームデータの複雑さに適応し、指定された近似精度を満たす、クラックのない適応的四面体メッシュ表現を生成する並列アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムを実現するため

の、(1) ボリュームデータの勾配や等値面の曲率などの局所特徴の変化に応じて、指定された近似精度を満たすまで、メッシュ要素を再帰的に二分割する再帰的四面体二分割法と、(2) 各メッシュ要素をそれぞれ独立に分割する過程で発生するクラック問題を回避するために考案した、再帰的近傍探索法について述べる。

本論文で提案する手法は、クラックの発生を回避するために、各メッシュ要素の近傍領域内のボリュームデータの局所特徴の変化を周辺方向へ再帰的に探索し、既存格子点連結関係との整合性を確認した結果からメッシュ要素の二分割の必要性を判定する。メッシュ要素の二分割による影響の波及限界に基づいて、局所特徴の変化を探索する範囲を一定の近傍領域内に、つまり局所的に限定できることから、各メッシュ要素を独立に分割することが可能である。そのため、クラックのないボリューム近似表現（適応的四面体メッシュ表現）を、時間的空間的に上限のある並列局所計算によって生成することが可能である。

本並列再帰アルゴリズムを分散型PCクラスタを用いて実装し、CTデータから再構成したボリュームデータを用いた実験結果から提案アルゴリズムの信頼性と有効性を示す。

2. 適応的四面体メッシュ表現並列生成アルゴリズム

本アルゴリズムは、Tanakaらによって提案された、入力画像の2次元適応格子表現並列生成アルゴリズム（アダプティブメッシュ）^{13),14)}を3次元に拡張したものである。アダプティブメッシュでは、2次元の画像空間を構成する「最小の空間要素」である三角形をメッシュ要素とし、再帰的二分割により、距離/カラーデータの複雑さに適応するクラックのない適応的三角パッチ表現を並列に生成した。本論文では同様に、3次元ボリューム空間を構成する「最小の空間要素」である四面体をメッシュ要素とし、再帰的二分割により、ボリュームデータの複雑さに適応するクラックのない適応的四面体メッシュ表現を並列に生成するアルゴリズムを提案する。この3次元への拡張を実現するために、1) ボリュームデータの勾配や等値面の法線・曲率などの、視線の変化に不変な局所微分幾何特徴に基づく再帰的四面体二分割法、2) 四面体の独立分割によるクラック発生を回避するための再帰的近傍探索法、を新たに提案する。さらに、3) 初期分割の方向性のバイアスと近似誤差について述べる。

2.1 全体アルゴリズムの概要

まず入力として、ボリュームデータの疎な初期（規

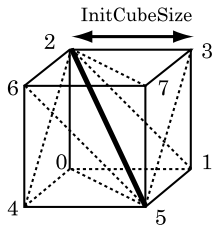


図2 立方体の初期分割
Fig. 2 Initial tetrahedralization.

則) メッシュ (立方体の 3 次元配列) と近似精度のしきい値 (Acc_Thresh) が与えられる. 初期メッシュの分割は, 各立方体メッシュ要素 (以下, 立方体と記す) を単位として, その近傍領域内の特徴変化に基づいて, それぞれ独立に行われる.

アルゴリズムは, (1) 初期分割とデータ構造の初期化, および (2) 四面体メッシュ二分分割手続き ($Divide_Tetrahedron$) の再帰的呼び出し, から構成される. さらに, 四面体メッシュ二分分割手続きは, 周辺のボリュームデータの局所特徴変化を探索する手続き ($Neighbor_Require_for_Subdivision$) を再帰的に呼び出す. したがって, アルゴリズムは, 入れ子構造をなす 2 つの再帰手続きから構成される: (i) 各立方体の近傍領域の局所特徴変化を, 外側 (探索領域の境界へ漸近する) 方向へ再帰的に探索する. (ii) 探索した結果に基づいて, 探索領域の境界から内側 (立方体中心へ漸近する) 方向へ, 四面体を再帰的に二分分割し, 階層的四面体メッシュ表現を表す二分木構造を形成する.

2.2 初期分割とデータ構造の初期化

まず, 初期メッシュとして与えられた, 1 辺が $InitCubeSize (= 2^n)$ の各立方体 $Cb(i, j, k)$ の各格子点において, ボリュームデータの局所特徴, 1) ボクセル値^{*}と, 2) ボクセル値の勾配, を与える.

次に, 図2に示すように, $Cb(i, j, k)$ を, その対角線を共有する同形状 (鏡面对称を含む) の 6 つの四面体メッシュ要素 $Rt[l]$ ($0 \leq l \leq 5$) に初期分割し, それぞれの四面体メッシュ要素 (以下, 四面体と記す) をルートとする二分木構造を初期化する.

2.3 四面体プリミティブの種類と周期性

四面体の再帰的二分割の過程では, 図3に示すように, 親四面体の分割レベル n_{div} を $3k$ とすると, n_{div} が $3k, 3k+1, 3k+2, 3(k+1)$ と進むごとに, 四面体の形状は, $TYPE0, TYPE1, TYPE2$, さらに, ($n_{div} = 3k$ レベルの $TYPE0$ の各辺を半

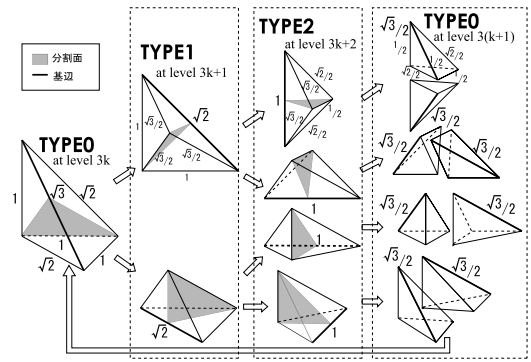


図3 周期的四面体二分分割
Fig. 3 Cyclic subdivision of a tetrahedron.

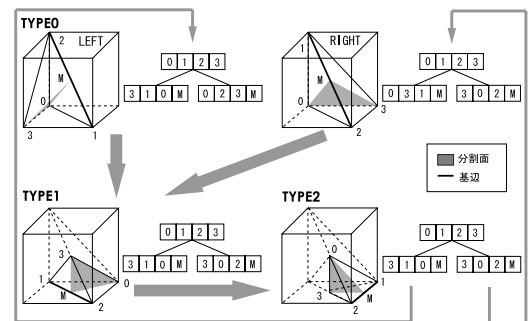


図4 周期的に定義される 3 種類の四面体プリミティブ
Fig. 4 Recursive definition of three tetrahedral primitives.

分にした) $TYPE0$ の順に循環する. ただし, 周期数 $k = \lfloor n_{div}/3 \rfloor$ とする. これらの 3 種類の四面体をプリミティブと呼ぶ. 各プリミティブのそれぞれの最長辺 (以下, 基底 E と記す) E_0, E_1, E_2 の長さの比は, $E_0 : E_1 : E_2 = \sqrt{3} : \sqrt{2} : 1$ である. また, これら 3 種類の四面体プリミティブの形状は, Maubach の N 次元グリッドの細分割法における, $N = 3$ の場合に用いられるものに対応する¹²⁾.

2.4 再帰的四面体メッシュ二分分割法

親四面体 T_p の分割は, T_p 内とその近傍領域の局所特徴の変化に基づいて決定される ($Neighbor_Require_for_Subdivision$). もし, T_p と近傍領域内の近似精度が, 指定の近似精度 Acc_Thresh に達していなければ, T_p の二分分割が決定される. その場合は, T_p の基底 E_p の中点に新しい格子点 M が生成され, 図4に示すように, 左右子四面体 T_l, T_r が T_p の 4 つの格子点と M の継承規則に従って定義される. 次に, それぞれの T_l と T_r に対して, Acc_Thresh が達成されるまで再帰的に二分分割が繰り返される.

図3に示すように, 再帰的四面体二分分割が 3 段階の分割を 1 周期とし, 1 周期ごとに四面体の各辺が

* ボクセル値は, 空間の点を持つ物理的な場 (フィールド) に関係する値 (温度, C/T 値など) を表すことから, フィールド値とも呼ばれる.

1/2 に減少することから、再帰的四面体二分分割の分割レベルの上限 $n_{div,max}$ は、 $InitCubeSize (= 2^n)$ から、式 (1) により与えられる。

$$n_{div,max} = 3 \log_2(InitCubeSize) \quad (1)$$

以下に、再帰的四面体メッシュ二分分割アルゴリズム (**Divide_Tetrahedron**) の概略を示す。

Procedure_Divide_Tetrahedron(T_p, Acc_Thresh)

(* T_p : a parent tetrahedron *)

(* Acc_Thresh : the accuracy criterion *)

begin

Step 1: (* Collect subdivision requests from neighbors
for crack handling *)

If !Neighbor_Require_for_Subdivision(T_p, Acc_Thresh)
then return (!NeedSubdivision)

Step 2: (* Divide T_p into two child tetrahedra T_l and T_r
and process them independently *)

Step 3: (* Recursive Subdivision of T_l and T_r *)

Divide_Tetrahedron(T_l, Acc_Thresh);

Divide_Tetrahedron(T_r, Acc_Thresh);

end

2.5 再帰的近傍探索法

各メッシュ要素でそれぞれ独立に、分割を行う場合は、しばしば隣接するメッシュ要素間で既存格子点間との連結関係が損なわれ、クラックが発生する恐れがある。たとえば、隣接する初期メッシュ要素間の境界の近傍で特徴が大きく変化している場合は、境界面に沿ってクラックが発生する。これは、境界の片側の特徴変化が大きいメッシュ要素内のみ細分割されるためである。クラックの発生を事前に検知しその発生を回避するためには、格子点生成による周辺メッシュへの波及範囲の確認と、範囲内の格子点連結関係の位相の整合性をとる必要がある。以下では、クラックの発生を回避するために、近傍の局所特徴の変化を周辺方向へ再帰的に探索した結果から、四面体二分分割の条件を判定する方法を述べる。

2.5.1 分割条件

親四面体 T_p は、以下の分割条件 (1) か (2) のいずれか成立した場合に、基辺 E_p の中点に新たに生成された格子点 M を用いて、左右子四面体 T_l, T_r に二分分割される。

(1) 基辺に沿った近似精度が指定の近似精度に達していない。

(2) 基辺以外の (四面体の他の) 5 本のいずれかの辺に沿った近似精度が指定の近似精度に達していない。

また、四面体二分分割法では、すべての四面体は基辺の中点で二分分割されるため、基辺を共有するすべ

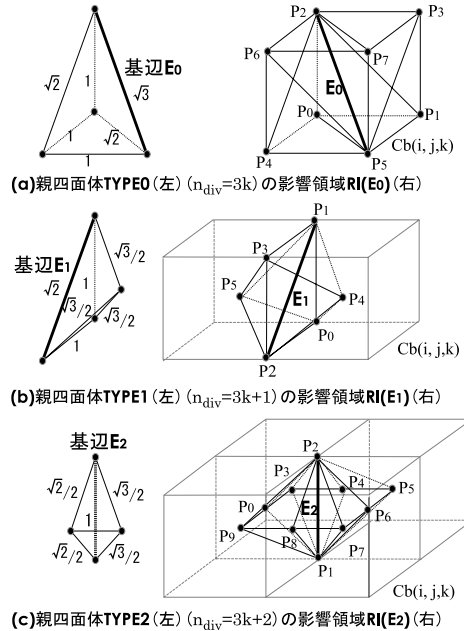


図 5 3 種類の四面体プリミティブ二分分割の影響領域 $RI(E_n)$
Fig. 5 Three types of Region of Influence ($RI(E_n)$).

ての四面体に分割の影響が波及する。そこで E_p を共有する四面体集合 $\{T_{pi}\}$ を「 T_p の二分分割」による影響が波及する領域 (以下、影響領域と記す) $RI(E_p)$ (Region of Influence) とする。図 5 (a), (b), (c) に示すように、 $RI(E_p)$ は、(T_p の分割レベル n_{div} によって決まる) 3 種類の四面体プリミティブ $TYPE0$, $TYPE1$, $TYPE2$ のそれぞれの基辺 E_0, E_1, E_2 に対して、3 種類の影響領域 $RI(E_0), RI(E_1), RI(E_2)$ が定義される。図 5 (a) の $TYPE0$ 四面体 ($n_{div} = 3k$) の $E_0(\overline{P_2P_5})$ に示すように、 E_0 が立方体の対角線であれば、 $RI(E_0)$ は 6 つの四面体から構成される立方体となる。また、図 5 (b) の $TYPE1$ 四面体 ($n_{div} = 3k+1$) の $E_1(\overline{P_1P_2})$ に示すように、 E_1 が立方体を構成する平面の対角線であれば、 $RI(E_1)$ は 4 つの四面体から構成される。さらに、図 5 (c) の $TYPE2$ 四面体 ($n_{div} = 3k+2$) の $E_2(\overline{P_1P_2})$ に示すように、 E_2 が立方体を構成する辺であれば、 $RI(E_2)$ は 8 つの四面体から構成される。なお、各影響領域の各頂点の算出法は、付録 A.1 に示す。

したがって、 T_p が二分分割される場合は、 $RI(E_p)$ を構成するすべての四面体 $T_{pi} \in RI(E_p)$ を二分分割しなければクラックが発生するため、以下の条件を T_p の分割条件 (3) として追加する。

(3) 基辺の影響領域を構成するいずれかの四面体が二分分割される。

以上の分割条件 (1), (2), (3) により、 T_p は、「 E_p ,

あるいは $RI(E_p)$ を構成するいずれかの四面体のいずれかの辺に沿った近似精度が、指定された近似精度 Acc_Thresh に達していない」場合に、左右子四面体 T_l , T_r に二分割される。

2.5.2 再帰的分割条件判定

クラックの発生を回避するために、2.5.1 項で述べた親四面体の分割条件 (1), (2), (3) を、近傍領域の周辺方向へ再帰的に判定し、その結果を、周辺から逆に近傍領域の内側方向へ順次伝播させる近傍探索法を述べる。

初期メッシュの各立方体 $Cb(i, j, k)$ の 6 つのルート四面体 $Rt[l]$ ($0 \leq l \leq 5$) を各親四面体として、それぞれ独立に親四面体の分割条件の判定を行う。

各親四面体 T_p において、まず、分割条件 (1) を判定するために、基辺 E_p に沿った近似精度を評価する。もし、指定された近似精度 Acc_Thresh に達しておらず、分割条件 (1) が成立した場合は、近傍探索を行わずに、以下の理由から、 T_p をただちに二分割する。

- 分割条件 (3) から、 $RI(E_p)$ 内のすべての四面体 T_{pi} が二分割されるため、 $RI(E_p)$ 内でクラックは発生しない。
- T_p の二分割は、 $RI(E_p)$ 以外の周囲の四面体分割に影響を及ぼさない。

分割条件 (1) が成立した場合は、同時に、すべての $T_{pi} \in RI(E_p)$ にとって分割条件 (3) が成立することから、すべての $T_{pi} \in RI(E_p)$ を二分割する。

次に、分割条件 (1) が成立しない場合は、分割条件 (2) の判定を行う。分割条件 (2) の判定は、親四面体 T_p の基辺 E_p 以外の 5 辺 E_m ($1 \leq m \leq 5$) をそれぞれ基辺とする、5 つの四面体 T_m とその影響領域 $RI(E_m)$ を再帰的に定義し、分割条件 (1) が成立するまで、近傍領域の局所特徴変化を探索した結果を待たて行われる (*Neighbor_Require_for_Subdivision*)。

T_p にとって分割条件 (1) が成立しない場合は、まず、すべての $T_{pi} \in RI(E_p)$ を二分割し、それぞれの左右子四面体 T_{li} , T_{ri} と、基辺 E_{li} , E_{ri} の影響領域 $RI(E_{li})$, $RI(E_{ri})$ を定義する。次に、 $RI(E_{li})$, $RI(E_{ri})$ 内の近似精度が、 Acc_Thresh に達しているかを評価する。これは、 $RI(E_{li})$ と $RI(E_{ri})$ を構成する、「すべての四面体のすべての辺に対して影響領域を定義し、いずれかの影響領域を構成するいずれかの四面体のいずれかの辺で、分割条件 (1) が成立するまで、再帰的に分割条件 (1) の判定を繰り返す」、ことを意味している。

図 6 に、1 辺が $InitCubeSize$ の初期メッシュの立方体 $Cb(i, j, k)$ のルート四面体を 3 周期

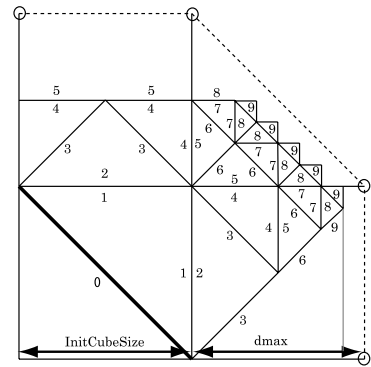


図 6 初期立方体 ($InitCubeSize^3$) の分割のために参照される近傍探索領域の範囲。辺の添え字は、再帰レベルを示す
Fig. 6 Neighboring regions considered in the subdivision of initial cubic cell.

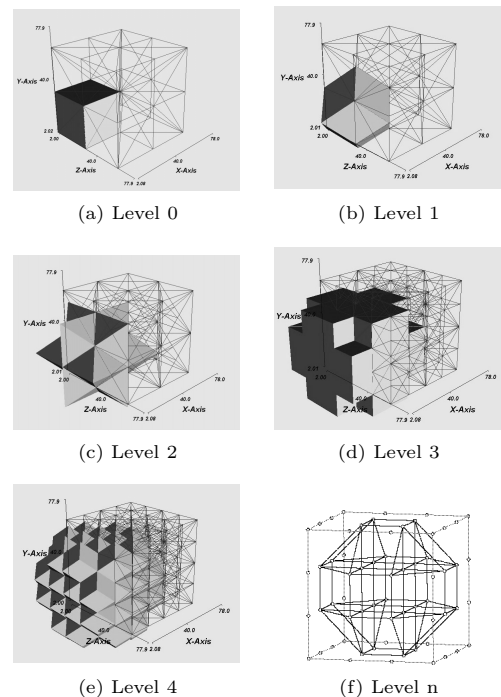


図 7 参照領域の再帰的拡張
Fig. 7 Recursive expansion of region of reference.

(9 回) 二分割する過程で再帰的に定義された影響領域の全体 $\{RI(E_p)\}$ を 2 次元に投影したものを示す。これは、 $Cb(i, j, k)$ の分割のために参照される近傍探索領域 (以下、参照領域と記す) $RR(Cb(i, j, k))$ (*Region_of_Reference*) の範囲を示している。また、四面体は 1 周期 (3 回) 二分割されるごとに基辺 E の長さが $1/2$ となることから、 $RI(E_p)$ の体積は $1/8$ に減少する。しかし、図 7 (a)~(e) に示すように、 $RR(Cb(i, j, k))$ は、 $RI(E_p)$ が加わるこ

により、徐々に周辺方向へ再帰的に拡張されてゆく。

もし、探索レベル $n_{neighbor} = n$ の親四面体 $T_{p(n)}$ にとって分割条件 (1) が成立した場合は、 $T_{p(n)}$ が二分割され、その判定結果が分割条件 (2) の判定結果として、順次、 $n_{neighbor}$ が $n-1$, $n-2$ と遡り、 $T_{p(0)}$ まで伝播される。その伝播過程ですべての祖先の四面体 $\{T_{p(n)}\} | (0 \leq n_{neighbor} \leq n)$ が二分割され、クラック発生を回避する。それ以外はさらに、最小四面体 $T_{p(n_{neighbor, max})}$ になるまで、再帰的に探索が繰り返され、同時に、 $RR(Cb(i, j, k))$ が再帰的に最大になるまで拡張される。この場合は、 $RR(Cb(i, j, k))$ 全領域で Acc_Thresh に達していることを示しており、 $\{T_{p(n)}\} | (0 \leq n_{neighbor} \leq n_{neighbor, max})$ に、二分割の必要がないことが伝播される。

また、四面体は 1 周期 (3 回) 二分割されるごとに基底長の $1/2$ だけ $RR(Cb(i, j, k))$ の先端が外側方向に移動することから、 $Cb(i, j, k)$ の境界から $n_{neighbor} = n$ で定義された $RR(Cb(i, j, k))$ の先端までの距離 d は、以下の式 (2) で与えられる。

$$d = \sum_{n=1}^k \frac{InitCubeSize}{2^n} < InitCubeSize \quad (2)$$

ただし、周期数 $k = \lfloor n/3 \rfloor$ 。

つまり、 E_p の近傍で局所特徴変化が大きい場合は、 $n_{neighbor}$ は小さく、 d は短い。逆に、 E_p の近傍で特徴変化が小さい場合は、クラック発生を回避するための二分割の必要性を確認するために、 $n_{neighbor}$ は大きくなり、より遠方まで特徴変化を探索する。しかし、式 (2) で d は漸近級数で与えられることから、 d の上限 d_{max} は、 $InitCubeSize$ を超えない。

したがって、 $Cb(i, j, k)$ を分割するために必要な近傍探索の範囲、つまり、 $RR(Cb(i, j, k))$ の体積の上限は、図 7 (f) に示すように、(1) 立方体 $Cb(i, j, k)$ 、(2) 面で隣接する 6 個の立方体、(3) 辺で隣接する 12 個の $1/2$ 立方体、(4) 点で隣接する 8 個の $1/4$ 立方体、の計 $15 (= 1 + 6 + 12 \times 1/2 + 8 \times 1/4) \times InitCubeSize^3$ に限定される。そのため、各立方体内での新格子点生成は $RR(Cb(i, j, k))$ を超えて影響を及ぼすことはなく、各立方体間で並列に格子点を生成し、四面体メッシュ分割を行うことができる。

再帰 (探索) レベルの上限 $n_{neighbor, max}$ もまた、 $InitCubeSize$ により、式 (3) で与えられる。

$$n_{neighbor, max} = 3 \log_2(InitCubeSize) \quad (3)$$

つまり、各立方体の分割は、 $15 \times InitCubeSize^3$ の大きさに限定される近傍領域内の局所特徴変化により完全に決定される。また、式 (3) から、各立方体につ

いて $O(\log_2(InitCubeSize)^3)$ の局所並列演算で、クラックのない適応的四面体メッシュ表現を生成することが可能となる。

以下に、再帰的近傍探索アルゴリズム (**Neighbor_Require_for_Subdivision**) の概略を示す。

Procedure Neighbor_Require_for_Subdivision(T_p, Acc_Thresh)

```
(*  $T_p$  : a parent tetrahedron *)
(*  $Acc\_Thresh$ : the homogeneity criterion *)
begin
    (* check the size of  $T_p$  *)
    If  $T_p$  is the smallest tetrahedron
        then return (!NeedSubdivision)
    Step 1: (* Evaluate  $Acc\_Thresh$  for  $T_p$  *)
    If the homogeneity along  $E$  doesn't reach  $Acc\_Thresh$ 
        then return (NeedSubdivision)
    Step 2: (* Associate  $E$  with  $RI(E)$  of a group of
        tetrahedra  $\{T_{pi}\}$  sharing  $E$  *)
    Step 3: (* Recursive Expansion of  $RR(Cb(i, j, k))$  *)
        (* Evaluate  $Acc\_Thresh$  for  $T_l$  and  $T_r$  of
        each of  $T_{pi} \in RI(E)$  independently *)
    for each  $T_{pi} \in RI(E)$ 
        Step 3.1: Define  $T_{pi}$  into  $T_{li}$  and  $T_{ri}$  at a middle point of  $E$ 
        Step 3.2:
            If Neighbor_Require_for_Subdivision( $T_{li}, Acc\_Thresh$ )
                then return (NeedSubdivision)
            If Neighbor_Require_for_Subdivision( $T_{ri}, Acc\_Thresh$ )
                then return (NeedSubdivision)
    Step 4: If any neighbor of  $T_{li}$  or  $T_{ri}$  of  $T_{pi}$  requires for subdivision
        then require for the subdivision of  $T_p$ 
    return (!NeedDivision)
end
```

3. 初期分割の方向性バイアスと近似誤差

初期メッシュの各立方体 $Cb(i, j, k)$ を 6 つのルート四面体に初期分割する場合は、図 8 (a) に示すように、対角線のとる異なる 4 方向に依存した 4 種類の顕著な立方体の方向性パターン (A), (B), (C), (D) が存在する。これらのルート四面体集合の持つ方向性のバイアスは、等値面の形状やその可視化、また、ボリュームレンダリングにおける誤差の要因とされている。そこで、初期四面体メッシュ表現の持つ方向性バイアスと、再帰的四面体二分割により生成される適応的四面体メッシュ表現の近似誤差について述べる。

Carr らは、立方体を、5, 6, 12, 24, 48 四面体分

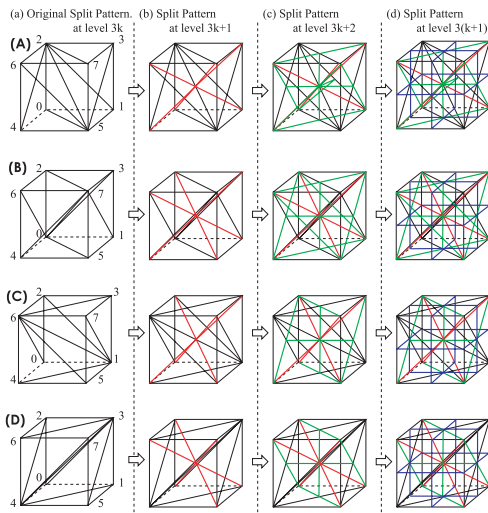


図 8 初期分割の方向性パターンの解消過程

Fig. 8 Step by step improvements of 4 initial directional biases.

割する各方法のボリウムデータの近似誤差について比較・分析した¹⁶⁾。立方体を 6 四面体分割する場合は、対角線の方角をすべて同一にするか、あるいは、隣接する立方体間で交互に反転しなければ、四面体内のボクセル値は、i) 不連続になり、ii) 立方体の反転や回転に対して非対称になる。そのため、等値面にクラックが発生したり、等値面形状に方向性による誤差が生じたりすること、しかし、立方体を 24 および 48 四面体分割する場合は、「等方的かつ近似誤差が最小であること」を報告している。

そこで、Carr らの比較・分析法に基づいて、初期四面体メッシュ表現の持つ方向性バイアスの影響が、再帰的四面体二分分割の呼び出しにともなって、どのように変化するかを分析する。

図 8(a) に示す、分割レベル $n_{div} = 3k$ で、方向性パターンがそれぞれ (A), (B), (C), (D) の立方体の四面体集合を、 $n_{div} = 3k + 1, 3k + 2$ の順に、再帰的に 1 周期 3 回二分分割した結果を図 8(b), (c), (d) に示す。図 8(a) に示すように、 $n_{div} = 3k$ において、異なる方向性パターン (A), (B), (C), (D) の立方体のそれぞれの四面体集合を、1 周期 3 回二分分割した過程で、徐々に方向性のバイアスが解消され、図 8(d) に示すように、 $n_{div} = 3(k + 1)$ においては、等しい細分割結果を持つに至る、つまり、方向性パターン (A), (B), (C), (D) の立方体のいずれも同様に等方向性を持つに至ることが分かる。図 9 に、方向性パターン (A) の立方体の四面体集合 (図 9(a)) を、1 周期 3 回二分分割した後の細分割結果 (図 9(b)) と異なる方向性パ

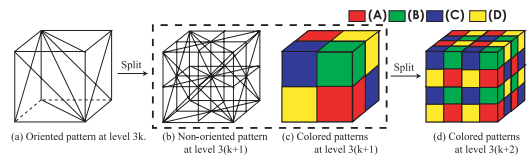


図 9 2 周期 (6 回) 二分分割後の異なる方向性を持つ分割パターンの隣接関係

Fig. 9 Adjacency between four directional patterns reached at the finer ($= n + 3$) level.

ターンを持つ立方体間の隣接関係 (図 9(c)) を、さらに、2 周期 6 回二分分割した後の (辺が 1/4 の立方体集合の) 方向性パターン (A), (B), (C), (D) を持つ立方体間の隣接関係 (図 9(d)) を示す。その結果から、「面と辺で隣接する立方体間では互いに異なる方向性パターンを持つ」、つまり、面で隣接する立方体間の対角線の方角は互いに $\pi/2$ 異なっており、さらに、再帰的四面体二分分割により、初期分割の方向性バイアスが徐々に解消されてゆくことが分かる。

以上から、Carr により提案された四面体分割の評価基準¹⁶⁾に従うと、再帰的四面体二分分割により生成される適応的四面体メッシュ表現は、立方体の 48 四面体分割に等しく、ボクセル値の i) 連続性と、ii) 対称性を持ち、最小の近似誤差を与える、高品質の四面体メッシュ近似表現であることが確認できる。

4. 分割判定基準

ボリウムデータの複雑さに応じて、全体を均一精度で近似するためには、格子点における微分特徴の変化の大きさと格子点間隔を反比例させなければならない。本論文では、四面体の各辺に沿った局所微分特徴の変化率を用いることにより、全空間において一様な基準、つまり単位 3D 距離あたりの微分特徴変化量、を用いて近似精度を評価し、四面体分割の必要性を判定する。

各四面体 T の任意の辺 E の両端の格子点 P_A, P_B 、における局所特徴 $f(=\{\text{ボクセル値 } V, \text{勾配ベクトル } \mathbf{N}\})$ をそれぞれ $f_A(=\{V_A, \mathbf{N}_A\})$, $f_B(=\{V_B, \mathbf{N}_B\})$ とすると、 E に沿った勾配の変化率が指定の近似精度 $Acc_Thresh = \{N_{thresh}, \theta_{thresh}\}$ に達していない場合に、つまり、以下の式 (4) あるいは式 (5) を満たしていない場合に、四面体を二分分割する。

$$\frac{\|\mathbf{N}_A\| - \|\mathbf{N}_B\|}{\|P_A - P_B\|} \leq N_{thresh} \quad (4)$$

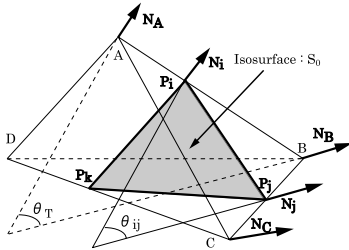
$$\cos(\mathbf{N}_A \cdot \mathbf{N}_B)^{-1} \leq \theta_{thresh} \quad (5)$$

式 (4) の勾配の変化率 N_{thresh} により、任意の (大きさの) 四面体の各辺の単位 3D 距離あたりの勾配の大

表 1 実験結果 (同心球集合)

Table 1 Exp. result — concentric spheres.

Acc..Thresh (θ_{thresh})	size of tetra $ base\ edge /\sqrt{3}$	# of tetra cells	# of pathces	# of nodes		comp. rate [%]	error [%]
				adaptive	non-adaptive		
$2\pi/6$	16	4,704	444	1,061	6,859	15.5	1.71
$2\pi/12$	8	15,396	1,560	3,009	50,653	5.94	1.60
$2\pi/24$	4	83,952	5,232	15,655	389,017	4.02	1.05
$2\pi/48$	2	490,344	18,624	90,897	3,048,625	2.98	0.601
$2\pi/96$	1	2,906,448	70,512	543,035	24,137,569	2.21	0.483



等値面 S_0 と四面体 ABCD の任意の二辺 AB, BC との交点を P_i, P_j とすると、それぞれにおける単位勾配ベクトル $\mathbf{N}_i/||\mathbf{N}_i||$, $\mathbf{N}_j/||\mathbf{N}_j||$ は P_i, P_j における S_0 の法線に等しい。四面体内では勾配 N が線形に補間されることから、 $\mathbf{N}_i$ と $\mathbf{N}_j$ の成す角 θ_{ij} は、 $\theta_{ij}(=\cos^{-1}(\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{N}_j)) \leq \theta_T(=\cos^{-1}(\mathbf{N}_A \cdot \mathbf{N}_B)) \leq \theta_{thresh}$ を満たす。したがって、 N の変化 θ_{thresh} により等値面の近似精度、つまり隣接する三角パッチ間の角度を指定することができる。

図 10 局所特徴に基づく分割判定基準

Fig. 10 Accuracy criteria from local features.

きさの変化を制限することが可能である。また、図 10 に示すように、等値面と四面体の各辺との交点における法線が線形に補間されることから、式 (5) の勾配ベクトルの方向変化 θ_{thresh} を用いることにより、各等値面の近似精度、つまり隣接する三角パッチ間の法線の角度、を指定することが可能である。

5. 実験

本並列アルゴリズムの実装には、開発言語として C++、表示用のグラフィックライブラリに VTK4.0、並列処理言語は MPI (Message Passing Interface) を用いた。また、実験には、1 ノード PC に Intel Pentium4 2.8 GHz のプロセッサと 2 GB のメインメモリを持つ 16 ノードの分散メモリ方式 PC クラスタを用いた。本実験では、1 ノード PC を入力データの配分と生成結果の統合に、残りの 15 ノード PC を適応的四面体メッシュ表現の生成に割り当てた。また、すべての実験で InitCubeSize = 32 と設定した。

5.1 分割判定基準と近似精度

まず、人工ボリュームデータを用いて、指定した近似精度と、生成された適応的四面体メッシュ表現において達成された近似精度を比較し、本分割判定基準の妥当性を評価した。実験に用いた同心球状の人工デー

タ ($289 \times 289 \times 289$, 8 bit)、中心のボクセル値を 255、中心から半径 r のボクセル値を $(255 - r)$ と設定した。

表 1 に、同心球状の人工ボリュームデータを用いて、指定した分割判定基準 ($Acc..Thresh(\theta_{thresh})$) と、達成された近似精度を、i) 四面体サイズ (基底長/ $\sqrt{3}$)、ii) 四面体数、iii) 等値面の三角パッチ数、iv) 格子点数、v) 圧縮率、vi) 近似誤差、を用いて評価した結果を示す。圧縮率 ($comp.rate$) は、適応的四面体メッシュ表現における格子点数 ($adaptive$) と、規則メッシュ表現における格子点数 ($non-adaptive$) の比である。なお、規則メッシュの格子点間隔は四面体サイズに一致させた。近似誤差 ($error$) は、各四面体内で重心 (barycentric) 補間¹⁶⁾ されたボクセル値とボリュームデータのボクセル値の相対誤差を表す。 θ_{thresh} を $2\pi/6$ から $2\pi/96$ と減少させると、格子点数および四面体数はそれぞれ約 512 倍、約 618 倍と増加するが、圧縮率は 15.5% から 2.21% へ向上し、近似誤差は 1.71% から 0.483% へ減少した。 $\theta_{thresh} = 2\pi/96$ の場合は、約 2% の圧縮率および、約 0.5% の近似誤差が達成された。図 11 に、分割判定基準に対するボクセル数と四面体数の増加を示す。さらに、図 12 に分割判定基準に対する格子点数の増加および、圧縮率の向上を示す。

図 13(a) と図 13(b) に、同心球データを用いて $\theta_{thresh} = \{2\pi/6, 2\pi/24\}$ の場合に生成された適応的四面体メッシュ ($128 \leq z \leq 160$) (左図) と、適応的四面体メッシュ表現から生成された等値面 (ボクセル値 $V = 200$) (右図) を示す。図 13(a) と図 13(b) の右図に示すように、 $\theta_{thresh} = \pi/3$ の場合の等値面に比べて、 $\theta_{thresh} = \pi/12$ の場合の等値面形状は、滑らかな球面に近づいており、さらに、図 13(a) と図 13(b) の左図に示すように、指定された近似精度 θ_{thresh} に基づいて、四面体メッシュ表現が適応的に生成されたことが確認できる。

また図 14 に、 θ_{thresh} の減少による等値面 (ボクセル値 $V = 200$) の三角パッチ数の増加を示す。一般に、球面を正 20 面体の細分割により近似する場合は、1 回の分割で、各三角パッチの 2 頂点の法線ベクトル

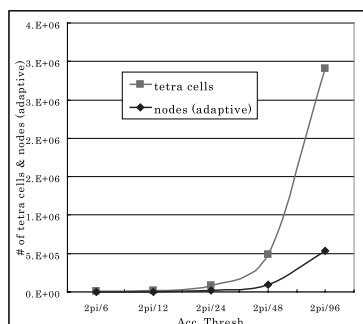


図 11 分割判定基準と四面体数，格子点数
Fig. 11 $Acc_Thresh(\theta_{thresh})$ V.S.
of tetra cells & nodes.

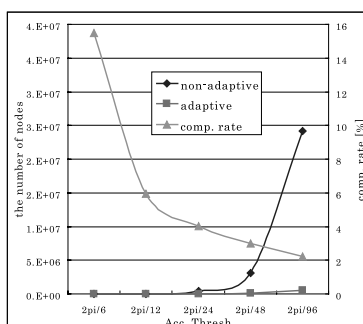


図 12 分割判定基準と圧縮率
Fig. 12 $Acc_Thresh(\theta_{thresh})$ V.S.
compression rates.

表 2 実験結果 (歯)

Table 2 Exp. result — tooth.

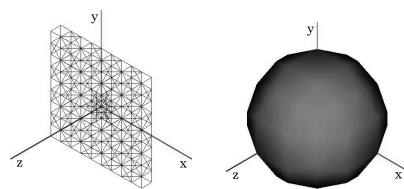
Acc_Thresh (N_{thresh})	# of tetra cells	# of nodes adaptive	comp. rate [%]	error [%]
35	1,463,680	263,700	2.48	9.61
30	2,890,638	519,046	4.88	2.89
25	4,753,730	846,831	7.96	1.47
20	5,888,212	1,034,697	9.73	1.17

のなす角は $1/2$ に減少し，パッチ数は 4 倍に増加する。図 14 に示すように，本アルゴリズムにおいても， θ_{thresh} を半減させると，等値面の三角パッチ数がほぼ 4 倍になることが分かる。以上から，局所特徴の変化率に基づく本分割判定基準は，適応的四面体メッシュ表現の近似精度を高精度に制御することが可能な適切な判定基準であるといえる。

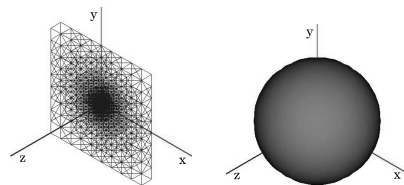
5.2 圧縮率と誤差

次に，CT 画像から再構成された歯の実ボリュームデータ ($257 \times 257 \times 161$, 16 bit, 図 15) を用いて，生成された適応的四面体メッシュ表現の圧縮率と誤差を評価した。

表 2 に，歯データの実験結果を示す。 N_{thresh} を大きくするほど，近似誤差 (error) が減少することが分



(a) $\theta_{thresh} = 2\pi/6 = \pi/3$



(b) $\theta_{thresh} = 2\pi/24 = \pi/12$

図 13 適応的四面体メッシュと等値面生成結果—同心球
Fig. 13 The result of adaptive grid and
isosurface (=200) — concentric sphere.

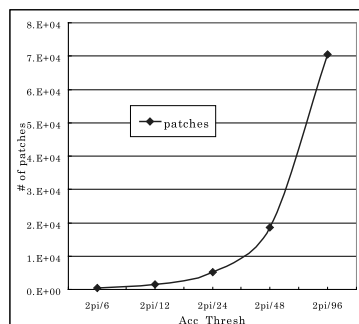


図 14 分割判定基準と三角パッチ数
Fig. 14 $Acc_Thresh(\theta_{thresh})$ V.S.
of triangle patches.

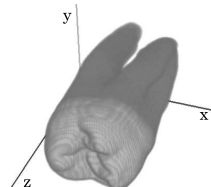
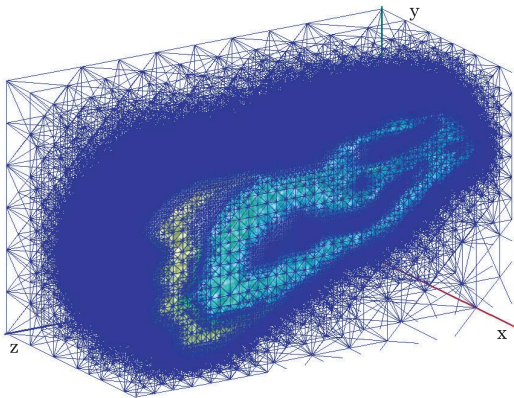


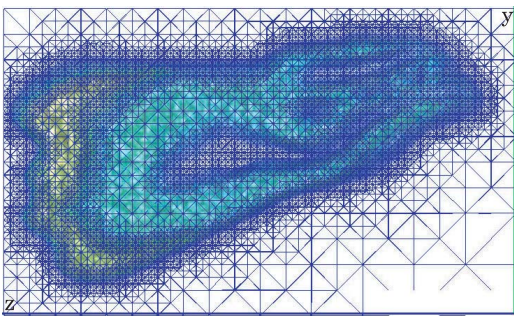
図 15 入力データ：歯
Fig. 15 Input data.

かる。 N_{thresh} が 20 の場合，圧縮率 (comp.rate) は約 9.73% まで上昇し，近似誤差 (error) は約 1.17% まで減少した。

図 16(a) と図 16(b) に歯データの，図 17(a) と図 17(b) に足データ ($161 \times 329 \times 129$, 8 bit) の適応的四面体メッシュ表現と 2 次元断面のボリュームレンダリング結果を示す。図 18 の歯データの CT 値のヒストグラムが示すように，CT 値の分布範囲は約 70 以上であり，大きさの異なる 3 つのピーク CT 値を持つ。これらの 3 つのピークは，それぞれ，背景と歯髄領域



(a) Tetrahedral Adaptive Mesh in 3D



(b) Projected (a) to YZ plane

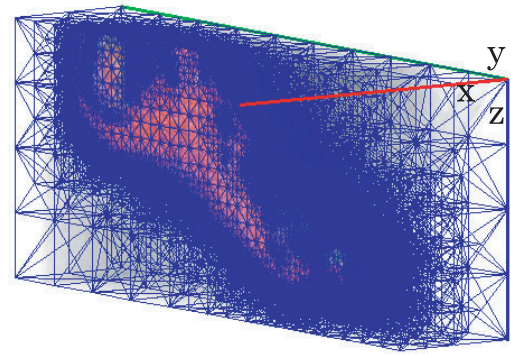
図 16 適応的四面体メッシュ表現生成結果—歯

Fig. 16 The result of tetrahedral adaptive mesh — tooth.

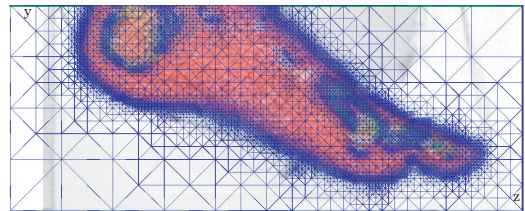
(85%), 象牙質 (11%), エナメル質 (4%) に対応している. そこで, 勾配のヒストグラムを作成し, その分布を正規分布として, 平均値 $Mean$ と標準偏差 σ を求め, 勾配が小さい領域 (85%) と勾配が大きい歯領域 (15%) の境界で分割されるように, 歯データの場合は, 分割判定基準を $N_{thresh} = 12.4 (= Mean + 3\sigma)$ に, 足データの場合は, $N_{thresh} = 5.66$ に設定した.

6. おわりに

入力ボリュームデータの複雑さに適応し, 指定された近似精度を満たす, クラックのない適応的四面体メッシュ表現を生成する並列アルゴリズムを提案した. 提案アルゴリズムを実現するための, (1) ボリュームデータの勾配や等値面の曲率などの局所特徴の変化に応じて, 指定された近似精度を満たすまで, メッシュ要素を再帰的に二分割する再帰的四面体二分合法と, (2) 各メッシュ要素をそれぞれ独立に分割する過程で発生するクラック問題を回避するために考案した, 再帰的近傍探索法について述べた. 本並列アルゴリズムを分散型 PC クラスタを用いて実装し, 提案アルゴリズムの信頼性と有効性を示した. 人工ボリュームデータを用



(a) Tetrahedral Adaptive Mesh in 3D



(b) Projected (a) to YZ plane

図 17 適応的四面体メッシュ表現生成結果—足

Fig. 17 The result of tetrahedral adaptive mesh — foot.

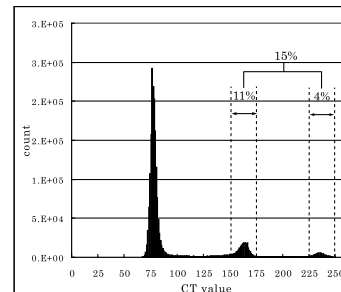


図 18 歯のヒストグラム

Fig. 18 Histogram of tooth.

いた実験結果から, 約 2% の圧縮率および, 約 0.5% の近似誤差を達成し, 局所特徴の変化率に基づく本分割判定基準が, 適応的四面体メッシュ表現の近似精度を高精度に制御することが可能な適切な判定基準であることを確認した. また, 2 種類のデータを用いた実験結果から, 圧縮率は約 10%, 近似誤差は約 1% を達成し, 実ボリュームデータに対する有効性を確認した.

今後の課題として, 柔軟物体の変形と切断に実時間で適応可能な, 動的適応的四面体メッシュ表現法への拡張があげられる.

謝辞 本研究の一部は, 総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE), また, 文部科学省科学研究費補助金の援助を受けて行われた.

本研究を進めるにあたり, 的確な助言を与えてくださった立命館大学田中寛教授, 本 SCOPE, 科研プロ

ジェクトメンバの方々, ならびに丁寧なコメントをいただいた査読者の方々に厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) Chien, C.H. and Aggarwal, J.K.: Volume-Surface Octrees for the Representation of Three-Dimensional Objects, *Computer Vision Graphics and Image Processing*, Vol.36, pp.100–113 (1986).
- 2) Nielson, G.M.: Tools for triangulations and tetrahedrizations, *Scientific Visualization, Overviews, Methodologies, and Techniques*, pp.429–525, IEEE Computer Society, Washington DC, USA (1997).
- 3) Nielson, G.M.: Volume Modelling, *Volume Graphics*, pp.29–48, Springer (2000).
- 4) Zhou, Y., Chen, B. and Kaufman, A.: Multiresolution Tetrahedral Framework for Visualising Regular Volume Data, *Proc. IEEE Visualization '97*, pp.135–142 (1997).
- 5) Roxborough, T. and Nielson, G.M.: Tetrahedron Based, Least Squares, Progressive Volume Models with Application to Freehand Ultrasound Data, *Proc. IEEE Visualization 2000*, pp.93–100 (2000).
- 6) 佐川立昌, 西野 恒, 倉爪 亮, 池内克史: 大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.SIG5(CVIM6), pp.41–53 (2003).
- 7) 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤志, 倉爪 亮, 池内克史: 分散メモリシステムにおける大規模距離画像の並列同時位置合わせ手法, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.9, pp.2369–2378 (2005).
- 8) Bey, J.: Tetrahedral mesh refinement, *Computing*, Vol.55, No.13, pp.355–378 (1995).
- 9) Nielson, G.M., Holliday, D. and Roxborough, R.T.: Cracking the cracking problem with Coons patches, *Proc. IEEE Visualization '99*, CA, pp.285–290 (1999).
- 10) Holliday, D.J. and Nielson, G.M.: Progressive Volume Models for Rectilinear Data using Tetrahedral Coons Volumes, *Data Visualization 2000*, pp.83–92, Springer, Berlin (2000).
- 11) Gregorski, B., Duchaineau, M., Lindstrom, P. and Pascucci, V.: Interactive View-Dependent Rendering Of Large Isosurfaces, *Proc. IEEE Visualization 2002*, pp.475–482 (2002).
- 12) Maubach, J.M.: Local bisection refinement for N-simplicial grids generated by reflection, *SIAM Journal of Scientific Computing*, Vol.16, No.1, pp.210–227 (1995).
- 13) Tanaka, H.T.: Accuracy-Based Sampling and Reconstruction with Adaptive Meshes for Parallel Hierarchical Triangulation, *Int. Journal of Computer Vision and Image Understanding*, Vol.61, No.3, pp.335–350 (1995).
- 14) 田中弘美, 岸野文郎: 曲面再構成のための適応格子生成法—階層的三角パッチ表現並列生成アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1691–1703 (1993).
- 15) 木村彰徳, 山添 悠, 高間康文, 田中 覚, 田中弘美: 適応的四面体格子に基づく複数領域同時分割アルゴリズム, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005) (2005).
- 16) Carr, H., Möller, T. and Snoeyink, J.: Artifacts Caused By Simplicial Subdivision, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, No.2, pp.231–242 (2006).

付 録

A.1 影響領域 (Region of Influence) の定義

基底 E を共有する四面体集合から構成される影響領域 $RI(E)$ の各頂点の算出方法について述べる。

x, y, z 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ $I_x = (1, 0, 0)$, $I_y = (0, 1, 0)$, $I_z = (0, 0, 1)$ とし, L を各分割レベル n_{div} における立方体格子の 1 辺の長さとする。

まず, 図 5(a) に示した TYPE0 四面体の基底 $E_0(\overline{P_2P_5})$ を共有する影響領域 $RI(E_0)$ は, 6 つの四面体から構成される立方体となる。この立方体の 8 頂点 P_i ($0 \leq i \leq 7$) は, 式 (6) で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_5 \\ P_2 \\ P_5 \\ P_2 \\ P_5 \\ P_2 \\ P_5 \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} -I_y \\ -I_z \\ 0 \\ I_x \\ -I_x \\ 0 \\ I_z \\ I_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

次に, 図 5(b) に示した TYPE1 四面体の基底 $E_1(\overline{P_1P_2})$ を共有する影響領域 $RI(E_1)$ は, 4 つの四面体から構成され, それぞれの 6 頂点 P_i ($0 \leq i \leq 5$) は式 (7) で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_1 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} -I_y \\ 0 \\ 0 \\ I_z \\ I_x/2 \\ -I_x/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

最後に、図 5(c) に示した *TYPE2* 四面体の基底 $E_2(\overline{P_1P_2})$ を共有する影響領域 $RI(E_2)$ は、8 つの四面体から構成され、それぞれの 10 頂点 P_i ($0 \leq i \leq 9$) は、式 (8) で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (P_1 + P_2)/2 \\ P_1 \\ P_2 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \\ (P_1 + P_2)/2 \end{bmatrix} + \frac{L}{2} \begin{bmatrix} -I_x \\ 0 \\ 0 \\ -I_x - I_z \\ -I_z \\ I_x - I_z \\ -I_x \\ I_x + I_z \\ +I_z \\ -I_x + I_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

(平成 18 年 9 月 5 日受付)

(平成 19 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 佐藤 洋一)



高間 康文 (学生会員)

2002 年立命館大学理工学部情報学科卒業。2004 年同大学大学院理工学研究科博士課程前期課程修了。コンピュータビジョン、ポリウムグラフィックスの研究に従事。IEEE

会員。



木村 彰徳 (正会員)

1993 年広島工業大学工学部電気工学科卒業。1996 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。2000 年新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程単位取得退学。博士 (理学)。2000 年大阪工業大学工学部嘱託講師。2003 年立命館大学理工学部助手。2004 年科学技術振興機構 CREST 研究員。2005 年足利工業大学工学部講師。3 次元コンピュータグラフィックス、ポリウムグラフィックス、確率論の応用に関する研究に従事。IEEE、可視化情報学会、日本物理学会各会員。



田中 弘美 (正会員)

1975 年お茶の水女子大学理学部物理学科卒業。1975～1978 年 (株) 富士通勤務。1981 年米国ロチェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程修了。1988 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。1988～1994 年 ATR 通信システム研究所客員研究員。1994 年立命館大学理工学部情報学科教授。現在、同大学情報理工学部知能情報学科教授。CG, CV, VR, 3 次元画像通信の研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、VR 学会、VR 医学会、芸術科学会各会員。