

3D Active Gridを用いた3次元ボリュームの抽出

土井章男[†] 小向順^{††} 小山田耕二[†]

3次元画像データ(ボリュームデータ)から境界が不確かな3次元領域を自動的に抽出するために、我々はエネルギー最小化原理を用いた3次元格子モデルである3D Active Gridを開発した。本モデルは、従来手法である3D Active Netに比べて、対象領域の輪郭情報だけでなく、領域内部の情報も用いることで、安定した3次元領域の抽出が可能になった。また、本モデルの3次元格子データは、有限要素法(FEM)の入力データに変換できるため、応力解析や手術シミュレーション等に活用できる。

3D Volume Extraction by Using 3D Active Grid

AKIO DOI,[†] JUN KOMUKAI^{††} and KOJI KOYAMADA[†]

In order to extract arbitrary 3D regions from 3D image data (volume data) automatically, we have developed "3D Active Grid", which is a 3D grid model using a minimum energy theory. It enables to extract 3D regions stably by using both boundary and interior information in comparison with 3D Active Net. Moreover, since the generated geometry data can be used as an input data of FEM (Finite Element Method), it is applicable for virtual simulation of surgery and so on.

1. はじめに

最近、仮想現実感の医療分野への適用として、手術シミュレーション、医療診断、医療教育等があげられる。これらは、人体の内部組織を計算機でリアルに表現し、ユーザの応答に対して、現実に近い反応が可能になっている。具体的には、CT, MRI, VHD¹⁾等の3次元画像データから骨、内臓、表皮等の組織を3次元幾何モデルとして抽出し、グラフィックスワークステーションを用いて対話的表示を行う²⁾。また、有限要素法^{7),8)}等の応力解析手法を併用して、シミュレーションの精度やリアリティ(reality)を高めることに成功している^{9)~12)}。

3次元幾何モデルを抽出する方法として、領域が比較的明確な組織の抽出には、等値面生成手法^{3)~6)}がよく用いられている。しかしながら、対象となる組織の境界が不確かな場合、3次元画像データから3次元幾何モデルに変換することは一般に困難である。たとえば、筋肉等を等値面で分離することは非常に難しい。

また、Photoshop等で手動により構築する方法も試みられているが、専門的な知識や膨大な時間が必要であり、抽出されたデータは位相構造を持たない画素レベルであるため、一貫性のある3次元幾何モデルに変更できない。

そのため、このような場合、対象とする領域の幾何学的な特徴を利用して、幾何モデルをその領域に変形させながら対応付けを行う方法が開発されている。これらの手法は、大別すると、ボリュームデータを2次元画像の集合として取り扱う方法と直接3次元的に取り扱う方法に分類できる。前者はSnakes¹³⁾やActive Net^{14),15)}であり、最初に2次元領域を抽出し、次にその2次元領域をつなぎ合わせることでボリュームを抽出する。後者は、Active Netを3次元空間に拡張した3D Active Net¹⁶⁾があげられる。

これらの手法により抽出される領域は表面のみのモデルであるため、有限要素法で解析するためには、非構造メッシュに変換する必要がある。土井らは3D Active Netの網モデルから6面体要素の非構造メッシュを生成する方法を提案しているが¹⁷⁾、対象となる領域が複雑に変形している場合、矛盾のない内部ノードの連結が困難である。

また、非構造メッシュを生成せずに、ボクセルを6面体格子に変換して有限要素法を用いる方法をZhuら

[†] 岩手県立大学ソフトウェア情報学部
Faculty of Software and Information Science, Iwate
Prefectural University

^{††} 岩手大学工学部情報工学科
Faculty of Engineering, Iwate University

が提案しているが¹⁸⁾、境界部分はボクセル近似となるため、表面の精度が悪くなる欠点を有し、使用するメモリ量および計算量も多い。

そのため、我々はボリュームデータから領域を抽出し、直接、境界適合格子や有限要素法の 6 面体要素からなる非構造メッシュを生成する手法として、3D Active Grid を開発した¹⁹⁾。3D Active Grid は内部ノードを持つ 3 次元格子モデルからなり、3D Active Net では用いていなかった領域の内部情報を活用しながら、対象となる 3 次元領域を抽出する。3D Active Grid の格子とボリュームデータ内部の整合は、格子を縮小させる格子の内部エネルギーと 3 次元領域内部の適合性エネルギーを対象にしたエネルギー最小化問題を解くことで行う。

本論文では、2 章で 3D Active Grid の定義について述べ、3 章でその実装、4 章でボリュームデータからの領域の抽出例、5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 3D Active Grid

本章では、Active Net を 3 次元空間に拡張したモデルである 3D Active Grid について説明する。3D Active Grid のモデルは、6 面体要素からなる格子構造からなり、各格子点は、3 次元空間における位置を表すパラメータ p, q, r を用いて、以下のように表現される。

$$v(p, q, r) = (x(p, q, r), y(p, q, r), z(p, q, r)), \quad (1)$$

$$0 \leq p \leq 1, 0 \leq q \leq 1, 0 \leq r \leq 1$$

また、 (p, q, r) 方向の格子点数を (n_p, n_q, n_r) 、 $l = 1/n_p$ 、 $m = 1/n_q$ 、 $n = 1/n_r$ 、とすると図 1 のように表せる。

次に式 (1) で表現されるモデルに対して、グリッド

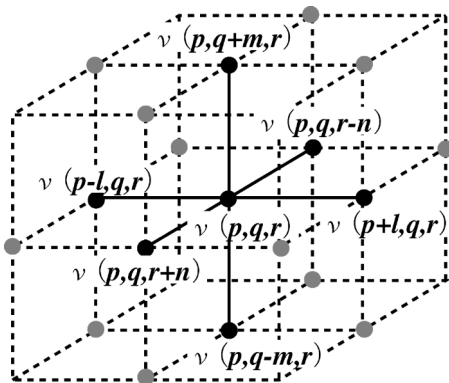


図 1 3D Active Grid の格子点
Fig. 1 Node points of 3D Active Grid.

のエネルギー E_{grid} を式 (2) により定義する。

$$E_{grid} = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 (E_{int}(v(p, q, r)) + E_{image}(v(p, q, r)) + E_{cons}(v(p, q, r))) dpdqdr \quad (2)$$

ここで、 E_{int} はグリッドの内部歪みエネルギー、 E_{image} は画像の適合性エネルギー、 E_{cons} はグリッドの制約を規定するエネルギーを表す。

E_{int} はグリッドを滑らかに縮小させ、かつ、その形状を保とうとする力であり、 E_{image} はグリッドをボリュームデータの特徴的な領域、たとえばある濃度値の所に移動させる力である。また、外力によるエネルギー E_{cons} は、ユーザによる外部からの強制的な制約を表す力である。たとえば、3 次元モーフィング等で制約が必要な場合、 E_{cons} はグリッドの一部を固定するといった場合に用いられる。

具体的には、 E_{int} を以下の式で定義する。

$$E_{int} = \alpha(|v_{pp}|^2 + |v_{qq}|^2 + |v_{rr}|^2) + \beta(|v_{pppp} + 2v_{ppqq} + v_{qqqq} + 2v_{pprr} + v_{rrrr} + 2v_{qqrr}|)/2 \quad (3)$$

$$v_{pp} = \frac{\partial^2 v}{\partial p^2} = \left(\frac{\partial^2 x}{\partial p^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial p^2}, \frac{\partial^2 z}{\partial p^2} \right) \quad (4)$$

$$v_{qq} = \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} = \left(\frac{\partial^2 x}{\partial q^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial q^2}, \frac{\partial^2 z}{\partial q^2} \right) \quad (5)$$

$$v_{rr} = \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \left(\frac{\partial^2 x}{\partial r^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial r^2}, \frac{\partial^2 z}{\partial r^2} \right) \quad (6)$$

$$v_{ppqq} = \frac{\partial^4 v}{\partial p^2 \partial q^2} = \left(\frac{\partial^4 x}{\partial p^2 \partial q^2}, \frac{\partial^4 y}{\partial p^2 \partial q^2}, \frac{\partial^4 z}{\partial p^2 \partial q^2} \right) \quad (7)$$

$$v_{qqrr} = \frac{\partial^4 v}{\partial q^2 \partial r^2} = \left(\frac{\partial^4 x}{\partial q^2 \partial r^2}, \frac{\partial^4 y}{\partial q^2 \partial r^2}, \frac{\partial^4 z}{\partial q^2 \partial r^2} \right) \quad (8)$$

$$v_{pprr} = \frac{\partial^4 v}{\partial p^2 \partial r^2} = \left(\frac{\partial^4 x}{\partial p^2 \partial r^2}, \frac{\partial^4 y}{\partial p^2 \partial r^2}, \frac{\partial^4 z}{\partial p^2 \partial r^2} \right) \quad (9)$$

$$v_{pppp} = \frac{\partial^4 v}{\partial p^4} = \left(\frac{\partial^4 x}{\partial p^4}, \frac{\partial^4 y}{\partial p^4}, \frac{\partial^4 z}{\partial p^4} \right) \quad (10)$$

$$v_{qqqq} = \frac{\partial^4 v}{\partial q^4} = \left(\frac{\partial^4 x}{\partial q^4}, \frac{\partial^4 y}{\partial q^4}, \frac{\partial^4 z}{\partial q^4} \right) \quad (11)$$

$$v_{rrrr} = \frac{\partial^4 v}{\partial r^4} = \left(\frac{\partial^4 x}{\partial r^4}, \frac{\partial^4 y}{\partial r^4}, \frac{\partial^4 z}{\partial r^4} \right) \quad (12)$$

式 (3) の右辺第 1 項はグリッドを収縮させる力を生じ、第 2 項はグリッドの平行性および直進性を保持する力

を生じる．また， α および β は第 1 項と第 2 項のそれぞれの力を制御する定数パラメータである．

次に，画像の適合性エネルギー E_{image} を定義する． E_{image} の定義の仕方により，抽出対象とする特徴を選択的に決定できる．したがって，目的とする領域の特徴を顕著に表現している E_{image} を定義することで，より高精度な領域抽出が可能となる．本論文では E_{image} を以下のように定義する．

$$E_{image} = wI(x, y, z) \quad (13)$$

ここで， $I(x, y, z)$ は，点 (x, y, z) における濃度値を表す．また， w は E_{image} を制御する定数パラメータである． $w > 0$ の場合，画像の適合性エネルギー E_{image} は，濃度値の低い（暗い）場所に動かす力となる．また， w の大きさにより，濃度値の影響力を調整することができる．

E_{cons} は，対話システムを用いて，各ノードの制約を具体的に与えることで行うが，本論文の目的が 3D Active Grid を用いた基礎的な領域抽出であるため，ここでは，簡略化のため E_{cons} を省略する．

3D Active Grid は，3D Active Net と同様，Active Net を 3 次元に拡張したモデルであるが，内部ノードを考慮している点で，3D Active Net とは異なる．3D Active Net では，ポリウムデータの輪郭（表面）情報のみを使用していたが，3D Active Grid は輪郭情報と内部情報を利用するため，精度面で 3D Active Net より有利である．

3. インプリメンテーション

文献 14) で示されているように，式 (2) のエネルギー関数を最小にするグリッドを，反復法に基づいた数値解法で解くことを試みる．ここで，最小化問題の解に対する必要条件であるオイラー・ラグランジュ方程式として， x, y, z それぞれについて以下の式が得られる．

$$\begin{aligned} & -\alpha(x_{pp} + x_{qq} + x_{rr}) + \beta(x_{pppp} + 2x_{ppqq} \\ & + x_{qqqq} + 2x_{pprr} + x_{rrrr} + 2x_{qqrr}) \\ & + \partial E_{image} / \partial x = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & -\alpha(y_{pp} + y_{qq} + y_{rr}) + \beta(y_{pppp} + 2y_{ppqq} \\ & + y_{qqqq} + 2y_{pprr} + y_{rrrr} + 2y_{qqrr}) \\ & + \partial E_{image} / \partial y = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & -\alpha(z_{pp} + z_{qq} + z_{rr}) + \beta(z_{pppp} + 2z_{ppqq} \\ & + z_{qqqq} + 2z_{pprr} + z_{rrrr} + 2z_{qqrr}) \\ & + \partial E_{image} / \partial z = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式 (14) の偏微分係数を差分方程式に置き換えるために，ここでは，以下の差分近似式を使用する．

$$\begin{aligned} x_{pp} &= \frac{\partial^2 x}{\partial p^2} \\ &\approx x_{i-1,j,k} - 2x_{i,j,k} + x_{i+1,j,k} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} x_{qq} &= \frac{\partial^2 x}{\partial q^2} \\ &\approx x_{i,j-1,k} - 2x_{i,j,k} + x_{i,j+1,k} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} x_{rr} &= \frac{\partial^2 x}{\partial r^2} \\ &\approx x_{i,j,k-1} - 2x_{i,j,k} + x_{i,j,k+1} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} x_{pppp} &= \frac{\partial^4 x}{\partial p^4} \\ &\approx x_{i-2,j,k} - 4x_{i-1,j,k} \\ &+ 6x_{i,j,k} - 4x_{i+1,j,k} + x_{i+2,j,k} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} x_{ppqq} &= \frac{\partial^4 x}{\partial p^2 \partial q^2} \\ &\approx x_{i-1,j-1,k} - 2x_{i,j-1,k} \\ &+ x_{i+1,j-1,k} - 2x_{i-1,j,k} + 4x_{i,j,k} \\ &- 2x_{i+1,j,k} + x_{i-1,j+1,k} - 2x_{i,j+1,k} \\ &+ x_{i+1,j+1,k} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x_{qqqq} &= \frac{\partial^4 x}{\partial q^4} \\ &\approx x_{i,j-2,k} - 4x_{i,j-1,k} \\ &+ 6x_{i,j,k} - 4x_{i,j+1,k} + x_{i,j+2,k} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} x_{pprr} &= \frac{\partial^4 x}{\partial p^2 \partial r^2} \\ &\approx x_{i-1,j,k-1} - 2x_{i,j,k-1} \\ &+ x_{i+1,j,k-1} - 2x_{i-1,j,k} + 4x_{i,j,k} \\ &- 2x_{i+1,j,k} + x_{i-1,j,k+1} - 2x_{i,j,k+1} \\ &+ x_{i+1,j,k+1} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} x_{rrrr} &= \frac{\partial^4 x}{\partial r^4} \\ &\approx x_{i,j,k-2} - 4x_{i,j,k-1} \\ &+ 6x_{i,j,k} - 4x_{i,j,k+1} + x_{i,j,k+2} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} x_{qqrr} &= \frac{\partial^4 x}{\partial q^2 \partial r^2} \\ &\approx x_{i,j-1,k-1} - 2x_{i,j,k-1} \\ &+ x_{i,j+1,k-1} - 2x_{i,j-1,k} + 4x_{i,j,k} \\ &- 2x_{i,j+1,k} + x_{i,j-1,k+1} - 2x_{i,j,k+1} \\ &+ x_{i,j+1,k+1} \end{aligned} \quad (25)$$

よって，式 (14) は次のように変形できる．

$$\begin{aligned} & -\alpha(x_{i-1,j,k} + x_{i,j-1,k} + x_{i,j,k-1} \\ & - 6x_{i,j,k} + x_{i+1,j,k} + x_{i,j+1,k} \\ & + x_{i,j,k+1}) + \beta(x_{i,j,k-2} + 2x_{i,j-1,k-1} \\ & + 2x_{i-1,j,k-1} - 12x_{i,j,k-1} + 2x_{i+1,j,k-1} \\ & + 2x_{i,j+1,k-1} + x_{i,j-2,k} + 2x_{i-1,j-1,k} \\ & - 12x_{i,j-1,k} + 2x_{i+1,j-1,k} + x_{i-2,j,k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -12x_{i-1,j,k} - 12x_{i+1,j,k} + x_{i+2,j,k} \\
 & + 2x_{i-1,j+1,k} - 12x_{i,j+1,k} + 2x_{i+1,j+1,k} \\
 & + x_{i,j+2,k} + 2x_{i,j-1,k+1} + 2x_{i-1,j,k+1} \\
 & - 12x_{i,j,k+1} + 2x_{i+1,j,k+1} + 2x_{i,j+1,k+1} \\
 & + x_{i,j,k+2} + 42x_{i,j,k} = -\partial E_{image}/\partial x \quad (26)
 \end{aligned}$$

式 (15) と式 (16) についても、上式と同様の式を得ることができる。

式 (26) で示される連立 1 次方程式は以下に述べるヤコビ法に基づく並列型反復法を用いて解く。ヤコビ法の利点は、将来の並列計算機への適用が容易である点と 3D Active Grid の変形が均一に行われる点である。まず、式 (26) を以下の行列で表現する。

$$Ax = b \quad (27)$$

ここで、 A は係数行列、 x は解、 b は式 (26) の右辺に対応する。

次に A を以下のように分解する。

$$A = D + E + F \quad (28)$$

D は対角行列、 E は下三角行列、 F は上三角行列を示している。反復法による表現を式 (28) を用いて行くと、以下の式が求まる。

$$\xi^{t+1} = D^{-1}(b - (E + F)x^{(t)}) \quad (29)$$

$$x^{t+1} = x^{(t)} + \gamma(\xi^{t+1} - x^{(t)}) \quad (30)$$

ここで、 γ は収束の速度を制御する定数パラメータを示す。上式は、第 (t) ステップ目の解 $x^{(t)}$ より、第 $(t+1)$ ステップ目の近似解 $x^{(t+1)}$ を求めるための式である。

4. 実 験

本論文では、提案した手法の実験のためのボリュームデータとして、 $128 \times 128 \times 128$ 画素のモノクロ 256 階調のボリュームデータ (図 2) を用いた。図 2 は、3 次元空間中に中心と半径を設定し、半径より内部の部分黒で埋め尽くしたエネルギー画像である。まず、図 3 に、 E_{image} を考慮しない場合の 3D Active Grid の収束例を示す。格子数は $15 \times 15 \times 15$ である。 E_{image} を考慮しない場合、3D Active Grid は、 E_{grid} に従って、平行性と直進性を保ったまま収束を行う。次に、 E_{image} を考慮した場合の収束例を示す。図 4 は、図 2 に対して 3D Active Grid を適用した図である。

図 2 において、中心部の濃度値が均一な場合と、中心部の濃度値を徐々に大きくした場合の格子断面を図 5 および図 6 に示す。重み係数 w の値にも依存するが、中心部の濃度値が大きい場合、中心部付近の格子点はより内側に引っ張られる。ただし、格子形状を保つ力を考慮しているため、格子点が完全に歪んだりはない。また、適切なパラメータを設定することで、格子構造全体が最後まで縮小することもない。

ここで、収束に用いたパラメータは、 $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 1.0$ 、 $\gamma = 0.5$ 、 $w = 5.0$ であり、本論文での実験で用いたパラメータはすべてこれらの値を用いた。 E_{image} によって、3D Active Grid は対象とする領域の特徴ある部分に向かって収束し、良好な領域抽出結果が得られていることが確認できる。

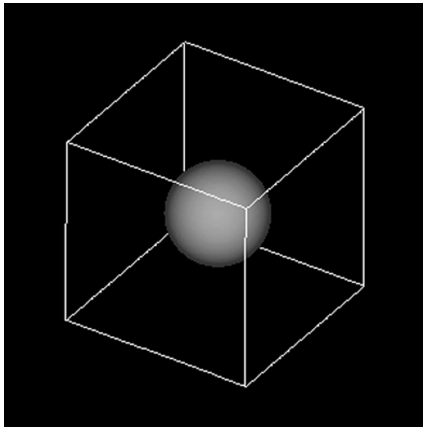


図 2 球のエネルギー画像
Fig. 2 An image energy for a sphere.

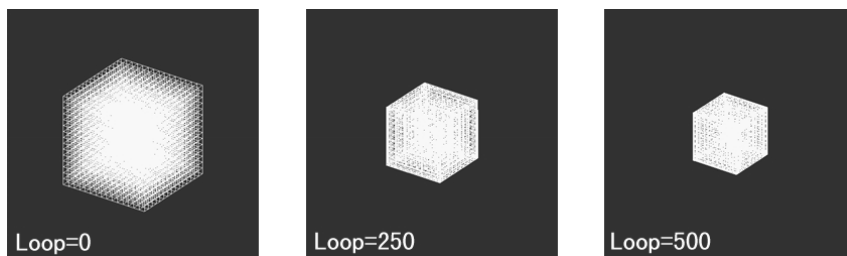


図 3 3D Active Grid の収束例
Fig. 3 An example of iterations of 3D Active Grid (no image energy).

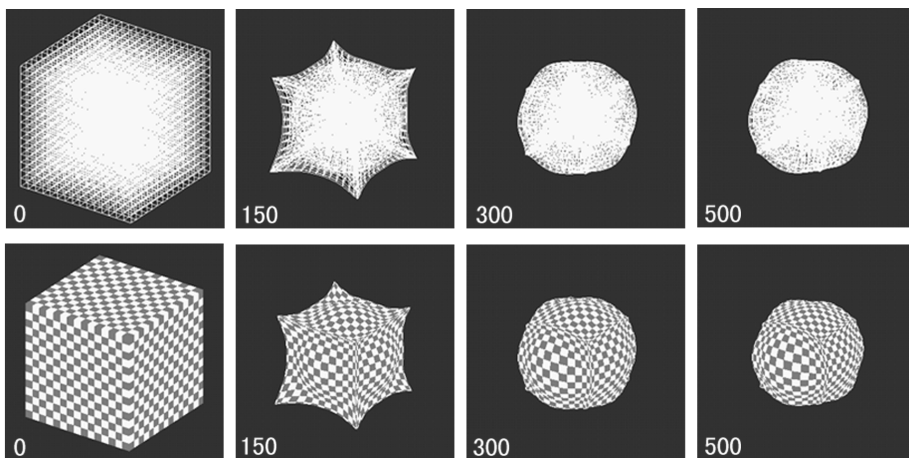


図 4 球への適用

Fig. 4 An example of iterations of 3D Active Grid (a sphere).

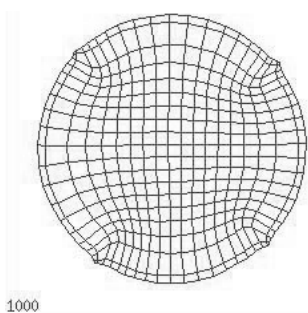


図 5 内部の濃度値が均一な場合のメッシュ断面

Fig. 5 A cross section of 3D Active Grid with an equal image energy.

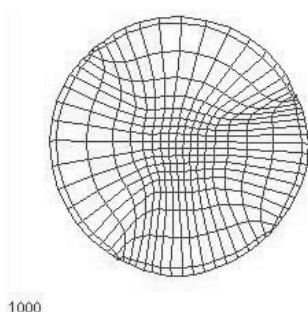


図 6 内部の濃度値が異なる場合のメッシュ断面

Fig. 6 A cross section of 3D Active Grid with a different image energy.

簡単な形状のエネルギー画像を対象とした領域抽出が良好に行われることを確認できたため、次は、より実用的な適用例として、VHD(Visible Human Dataset)からの領域抽出を試みる。VHDは、Visible Human Projectで公開されている男性および女性の死体の凍結前後のCTデータ、MRIデータおよび断面写真の3種類のデータによる、全身のデータである。

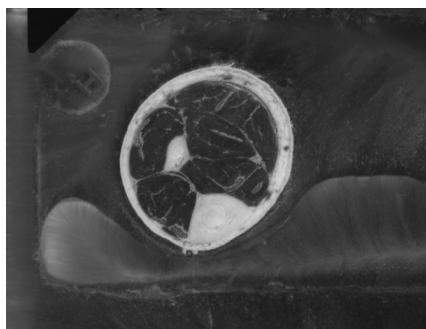


図 7 断面写真の部分例

Fig. 7 An example of a cross section picture (VHD).

本論文では、高解像度でR、G、Bの3チャンネルで構成されている断面写真からなるボリュームデータを用いて、男性の足首の部分の領域を抽出する実験を行った。図7に、VHDによる断面写真のサンプルを示す。

VHDのボリュームデータからの領域抽出のための前処理として、まず、VHDから足首の部分を含む、 $180 \times 180 \times 180$ 画素の、RGBの3チャンネルを持つカラーのボリュームデータを抽出した(図8)。次に、このデータに対して3D Active Gridを適用するため、このデータから足の部分の特徴を顕著に示す部分を取り出す。RGBのそれぞれのチャンネルに対して適切な閾値を定め、目的とする部分を閾値処理により、エネルギー画像を作成した(図9)。

3D Active Gridにより領域抽出したVHDの足の部分を図10に示す。3D Active Gridにより、ボリュームデータから足の部分の領域を良好な形で抽出できていることが確認できる。500回の反復処理による領域抽出に要した時間は、SGI Octane (R10000-175MHz、

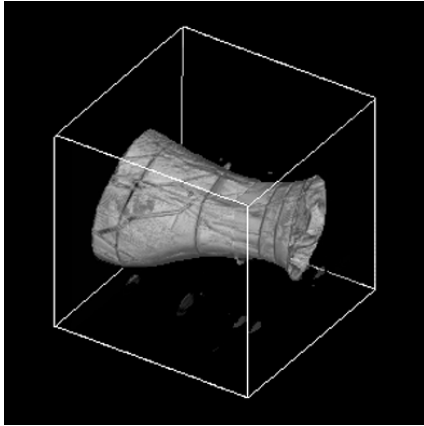


図 8 足首のボリュームデータ
Fig. 8 A volume data of an ankle.

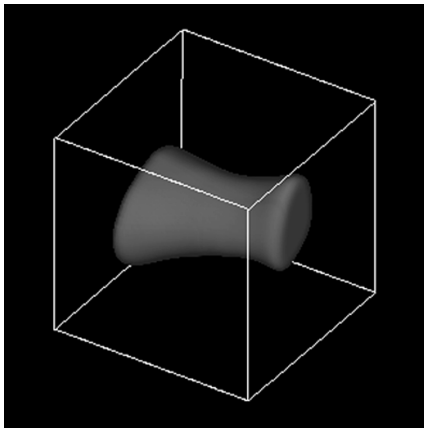


図 9 足首のエネルギー画像
Fig. 9 An image energy of an ankle.

主記憶メモリ 256 MB) で 13.0 秒要した。用いた 3D Active Grid の格子数は $15 \times 15 \times 15$ である。

5. おわりに

本論文では、2次元の Active Net を 3次元空間に拡張した 3D Active Grid のモデル構造、エネルギー関数、インプリメンテーションについて述べた。また、テストデータや VHD データに適用して、領域抽出が容易に行えることを確認した。また、3D Active Net に比べて、抽出される領域は 3次元格子モデルとして得られるため、直接、有限要素法の解析やモーフィングへの応用²⁰⁾ に用いることが可能である。

しかしながら、3D Active Grid は、対象とする領域がグリッドから大きく離れた領域にある場合や、初期グリッドが複数の形状にわたっていたりした場合に抽出結果が乱れることがある。そのため、今後の課題として、グリッドの初期位置や大きさを対話的に変更したり、制約条件を付加したりできるインターフェースの開発が必要である。また、今回はモデルが単純な構造格子であったが、これらを組み合わせたより複雑な初期形状モデルによる領域抽出を行う予定である。

謝辞 本研究を進めるにあたり、貴重なご意見をいただくとともに、ご討論いただいた電子技術総合研究所村木茂氏と岩手大学工学部千葉則茂教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) National Library of Medicine: The Visible Human Project. http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html (1997).

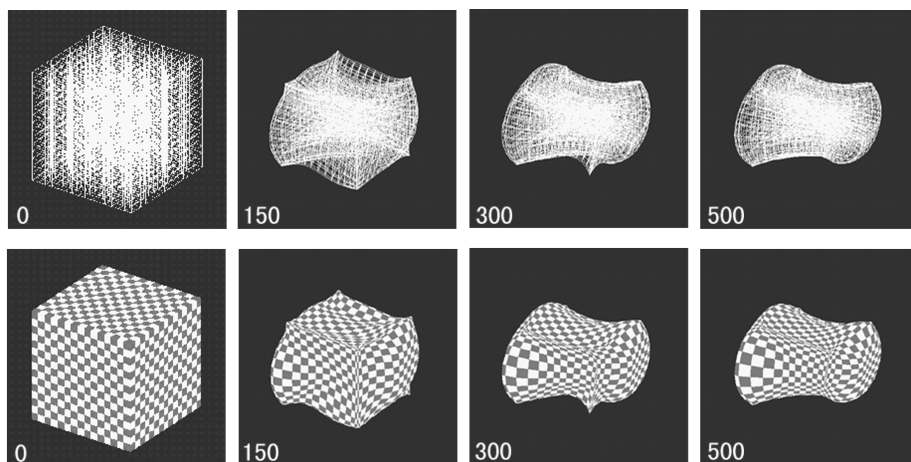


図 10 VHD への適用
Fig. 10 An example of iterations of 3D Active Grid (VHD).

- 2) Hong, L., Muraki, S., Kaufman, A., Bartz, D. and He, T.: Virtual Voyage: Interactive Navigation in the Human Colon, *Proc. SIGGRAPH '97*, pp.27-34 (1997).
- 3) Lorensen, W. and Cline, H.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Proc. SIGGRAPH '87*, Vol.21, No.4, pp.163-169 (1987).
- 4) Doi, A. and Koide, A.: An Efficient Method of Triangulating Equi-Valued Surfaces by Using Tetrahedral Cells, *IEICE Trans.*, Vol.E74, No.1, pp.214-224 (1991).
- 5) Shinagawa, Y., et.al.: The Homotopy Model: A Generalized Model for Smooth Surface Creation from Cross Sectional Data, *The Visual Computer*, Vol.7, No.3, pp.72-86 (1991).
- 6) Fujishiro, I., Maeda, Y., Sato, H. and Takeshima, Y.: Volumetric Data Exploration Using Interval Volume, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.2, No.2, pp.144-155 (1996).
- 7) Sabonnadiere, J.C. and Coulomb, J.L.: 有限要素法を使った CAD, サイエンス社 (1988).
- 8) 三好俊郎: 有限要素法入門改訂版, 培風館 (1994).
- 9) Bro-Nielsen, M. and Cotin, S.: Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation, *Computer Graphics Forum, Eurographics '96*, Vol.15, No.3, pp.57-66 (1996).
- 10) Koch, R., Gross, M., Carls, F., von Buren, S., Gankhauser, G. and Parish, Y.: Simulating Facial Surgery Using Finite Element Models, *Proc. SIGGRAPH '96*, pp.421-428 (1996).
- 11) Clyne, J., Middleton, D. and Reining, K.: Computer Applications of the Visible Human Dataset, *Visual Proc. SIGGRAPH '96*, p.110 (1996).
- 12) Salisbury, K. and Srinivasan, M.: Phantom-Based Haptic Interaction with Virtual Objects, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.17, No.5, pp.6-10 (1997).
- 13) Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models, *International Journal of Computer Vision*, Vol.1, No.4, pp.321-331 (1988).
- 14) 坂上勝彦, 山本和彦: 動的な網のモデル ActiveNet とその領域抽出への応用, *テレビジョン学会誌*, Vol.45, No.10, pp.1155-1163 (1991).
- 15) 坂上勝彦: 遺伝的アルゴリズムとアクティブネットの組み合わせによるステレオマッチング, *信学論*, Vol.J77-D-11, No.11, pp.2239-2246 (1994).
- 16) 高梨郁子, 村木 茂, 土井章男, Kaufman, A.: 3D Active Net—3次元ポリュームの抽出, *映像情報メディア学会誌*, Vol.51, No.12, pp.2097-2106 (1997).
- 17) 土井章男, 三浦泰弘, 千葉則茂: ポリュームデータから有限要素法メッシュを構築する一手法, *信学論*, Vol.J82-D-II, No.1, pp.162-165 (1999).
- 18) Zhu, Q.-H., Chen, Y. and Kaufman, A.: Real-time Biomechanically-based Muscle Volume Deformation using FEM, *Proc. Eurographics '98*, pp.124-133 (1988).
- 19) 小向 順, 土井章男, 小山田耕二: 3D Active Grid を用いた 3 次元ポリュームの抽出, 第 59 回情報処理学会全国大会特別セッション(2)講演論文集, pp.17-24 (1999).
- 20) He, T., Wang, S. and Kaufman, A.: Wavelet-based Volumetric Modeling Technique, *Proc. Visualization '94*, pp.85-91 (1994).

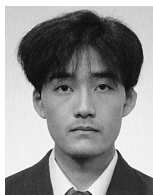
(平成 11 年 9 月 10 日受付)

(平成 12 年 2 月 4 日採録)



土井 章男(正会員)

昭和 57 年神戸大学大学院工学研究科修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。平成 7 年岩手大学工学部情報工学科講師。平成 11 年岩手県立大学ソフトウェア情報学部教授。コンピュータグラフィックスや画像処理に関する研究に従事。工学博士。著者に「3次元グラフィックスの基礎と応用」(共著)等。電子情報通信学会, 画像電子学会, ACM, IEEE 等会員。



小向 順

平成 10 年, 岩手大学工学部情報工学科卒業。同年, 同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期入学。画像符号化, 画像処理に関する研究に従事。



小山田耕二(正会員)

昭和 58 年京都大学工学部電気工学科卒業, 昭和 60 年京都大学大学院修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。平成 10 年岩手県立大学ソフトウェア情報学部助教授。サイエンティフィックビジュアルライゼーションの研究。開発に従事。工学博士。日本機械学会, 日本シミュレーション学会, IEEE 等会員。