

## 体積保存を考慮した表面形状復元

稲垣 嘉信<sup>†</sup> 金子 豊久<sup>†</sup> 栗山 繁<sup>†</sup>

CT や MRI 等から得られるポリウムデータからより忠実に表面形状を生成する方法を提案する。この分野では MC 法<sup>1)</sup> が広く使われている。しかし、MC 法にはさまざまな問題が報告されている。本研究では体積保存性や、生成される表面形状の精度を向上させるために、問題となるピクセルまたはボクセルを見つけ、パッチの構成に 1 点または 2 点を追加する生成法を提案する。2 次元および 3 次元画像について実験を行い、本方法が優れていることを検証した。

### Surface Restoration with Volume Preservation

YOSHINOBU INAGAKI,<sup>†</sup> TOYOHISA KANEKO<sup>†</sup>  
and SHIGERU KURIYAMA<sup>†</sup>

The marching cubes<sup>1)</sup>(MC) algorithm has been widely used in converting volume data into surface data. Initially it is shown that MC and other similar algorithms have poor performance with respect to volume preservation and fidelity in surface reconstruction. This paper proposes a new algorithm that has better performance regarding these aspects. Experiments for 2D and 3D data were conducted to demonstrate this property of the proposed algorithm.

#### 1. はじめに

近年 CT や MRI 機器は急速な発展をとげ、医療分野において画像診断などに使用されている。これらの機器から得られるデータはポリウムデータであり、データから表面形状を生成する方法として、Marching Cubes 法<sup>1)</sup>(MC 法) が広く使われている。MC 法はしきい値に相当する等値面を生成する。等値面の欠如などの問題が指摘され様々な改良手法が提案されている<sup>2)~12)</sup>。

MC 法で生成される表面形状の精度を向上させる方法として、MC 法におけるキューブに対応して、4 面体に分割し、対角線上にもパッチ頂点を設ける Marching Tetrahedra 法<sup>8)~10)</sup>(MT 法) が提案されている。この方法は表面形状の精度や体積保存性について改善しているが、4 面体分割の方向により結果が変わるといふあいまい性の問題がある<sup>11)</sup>。

MC 法の体積保存性を改善する方法としては、ポリウムデータの各ボクセルごとのしきい値を局所的に変化させる Surface Reconstruction with Volume Preservation 法<sup>12)</sup>(VP 法) が提案されている。この方

法は体積保存性を向上させるが、MC 法を前提にしているため隅の形状復元の精度がよい。

本研究では、まず MC 法におけるパッチの構成(パッチ構造)に 1 個もしくは 2 個の点を加えることにより体積が保存されるように表面形状を生成する方法を検討する。この新しい方法を point-based VP 法、略して p-VP 法と呼ぶ。

#### 2. 2 次元画像における輪郭線生成法

2 次元画像へ適用して、画像から輪郭線を生成する方法について説明する。デジタルカメラ、イメージスキャナなどの画像取得機器から得られた画像に基づいて輪郭線を生成する方法を考える。この問題は 3 次元ポリウムデータにおける表面形状生成と本質的に同義である。

##### 2.1 類似方法の問題点

MC 法、MT 法、VP 法を 2 次元画像に適用した場合の問題点について説明する。図 1(a) のような図形が与えられた場合について考える。実際に得られる画素値は画素濃度、またこの値はエリア値または面積率となる。この図 1 でしきい値を 0.5 とした場合、しきい値以上の画素のものを黒丸、しきい値以下のものを白丸として表す。

図 1(a) に示す入力画像に対して、MC 法、MT 法、

<sup>†</sup> 豊橋技術科学大学 情報工学系

Department of Information and Computer Science,  
Toyohashi University of Technology

VP法を適用した結果を図1(b)(c)(d)に示す。MC法から生成された輪郭線は凸部で面積が大きく欠損していることがわかる。また輪郭線の形状は隅の部分で大きく異なっている。MT法ではMC法よりも面積保存性と輪郭線の形状が改善されているが同様の傾向が見られる。ただし、格子をどう2分割するかについての問題がある。VP法では、面積保存性が大きく向上しているが、面積保持のもとに輪郭線を生成したため輪郭線の形状が元の画像と大きく異なっている。

p-VP法では、新たに頂点を1個追加し面積保存性の向上と生成される輪郭線の形状の改善する。つまり、図1(e)に示すように頂点Pを追加することによりパッチ構造を拡張し、面積を保持したまま輪郭線の形状を修正する。

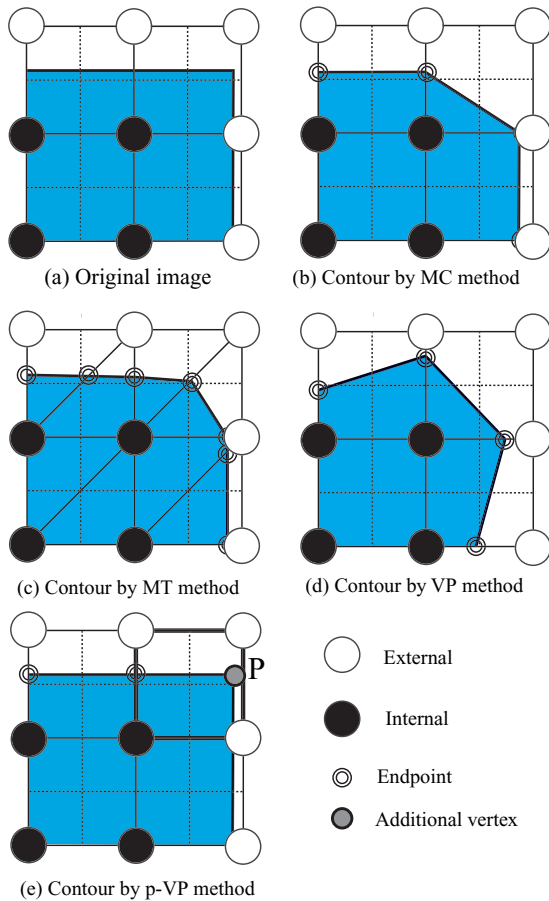


図1 類似方法の問題点  
Fig.1 Problems

## 2.2 p-VP法の説明

図2を用いてp-VP法を説明する。まず問題が生じるパッチ構造を見つける。それにはVP法を施し生成

された輪郭線を使用する。図2(a)の太線で示された格子を対象としたとき、隣接する格子の輪郭線の交点をつくりその成す角 $\theta$ を求める。この $\theta$ が経験的に与えたいしきい値 $\theta_0$ よりも小さいときにそのパッチ構造を拡張する。

ここで拡張したパッチ構造のことを拡張パッチと呼ぶ。拡張パッチは図2(b)に示すように、頂点 $P_2$ を1点追加し、格子の一边の長さを1とするとその座標 $(x, y)$ は $0 \leq x, y \leq 1$ のもとに次の2つの条件を満すように決める。

(1) 入力されたエリア値を $I$ 、それに対応する生成した輪郭線によるエリア値を $J$ としたとき、式1で表される面積誤差 $E$ を最小とする。

$$E = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 |J_{i,j} - I_{i,j}| \quad (1)$$

(2) 図2(b)に示す頂点 $P_0$ と頂点 $P_4$ を固定し、頂点 $P_1$ は頂点 $P_0$ と頂点 $P_2$ の線分上、頂点 $P_3$ は頂点 $P_2$ と頂点 $P_4$ の線分上に移動を限定する。

ここで解を探索するには、図3のように探索領域を4つの領域に分割し、その中心4点に追加した頂点 $P_2$ を設定した上で面積誤差を評価し、最小の領域をさらに4分割して探索を続ける。これを経験的に決定した探索回数 $m$ 回続ける。

最後に面積保存性をさらに向上させるため頂点 $P_0, P_1, P_3, P_4$ を格子上を面積誤差が減少する方向に変動させ、修正を行う。頂点 $P_2$ はすでに面積保存性を考慮して決定されているので固定とする。

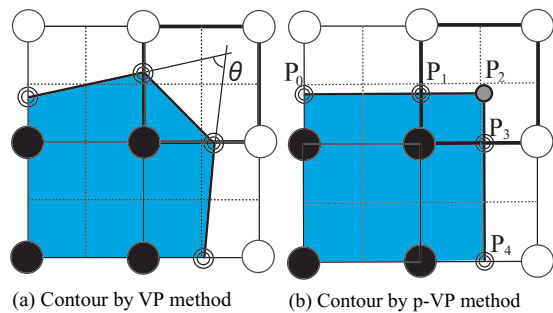
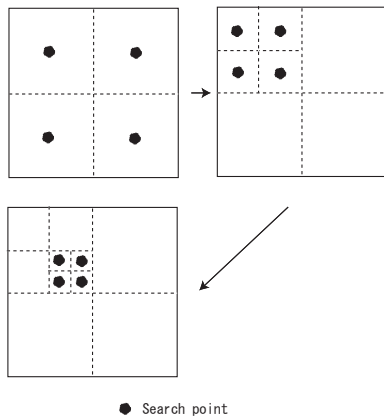


図2 2次元 p-VP法  
Fig.2 p-VP method for 2D

## 2.3 実験

### 2.3.1 パラメータの設定

今回の実験ではしきい値 $\theta_0$ を $120[deg]$ 、探索回数 $m$ を5と設定した。



● Search point  
 図3 4分割探索  
 Fig. 3 Searching by 4 division

### 2.3.2 実験結果

図4(a), 図5(a)の画像の解像度を16分の1に落として作成した図4(b), 図5(b)を入力画像として使用した。図4, 図5にそれぞれMC法, MT法, VP法, p-VP法を適用した結果を示す。また, 表1に各テスト画像と元の図形と比較した場合の面積誤差を示す。これは生成後の図形において, 欠損もしくは超過した面積率の和を表した値である。

MC法, MT法に対してp-VP法は面積誤差が大幅に少ないことがわかる。形状については特に図5の結果からコーナー部分における形状が元の形状により忠実である。処理時間はMC法が約0.02秒(Pentium4 3.2GHz)に対しp-VP法では約0.15秒であった。

表1 面積誤差の比較

Table 1 Comparison of Total Area Error

Sample	MC	MT	VP	p-VP
Fig 4	4.23	4.48	0.69	0.50
Fig 5	4.18	4.99	0.69	0.04

### 3. 3次元ボリュームデータにおける表面形状生成法

3次元に適用してボリュームデータから表面を生成する場合について説明する。

#### 3.1 類似方法の問題点

図6(a)のような図形が与えられた場合について考える。2次元の場合と同様に実際に得られるのはボリューム値である。この図でしきい値を0.5とした場合, しきい値以上の画素のものを黒丸, しきい値以下のものを白丸として表した。

図6(a)に示したボリュームデータに対してMC法, VP法を適用した結果を図6(b)(c)に示す。これより

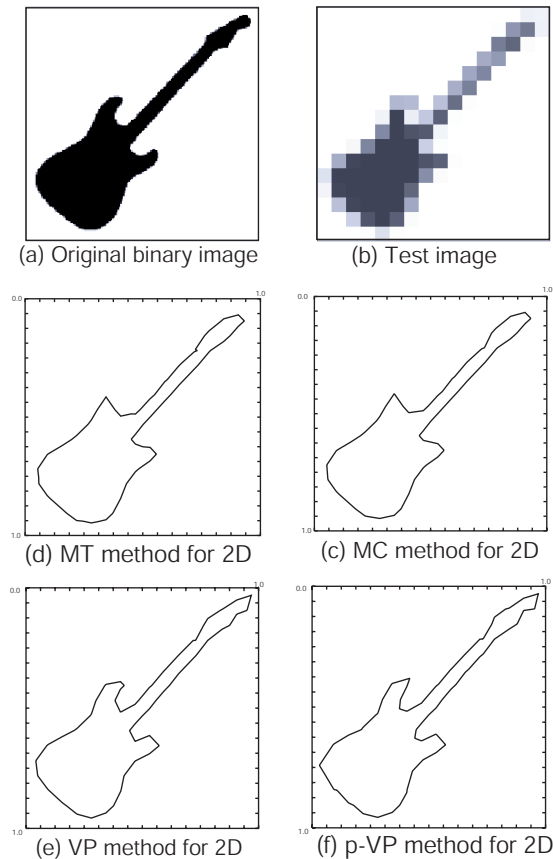


図4 図形(ギター)生成結果の比較  
 Fig. 4 Comparison of results (Guitar)

MC法から生成された表面の凸部で体積が大きく欠損していることがわかる。また, 表面の形状は隅の部分で大きく異なっている。VP法では, 体積保存性が大きく向上しているが体積保持のもとに表面を生成したため表面の形状が元のボリュームデータと大きく異なっている。この問題は2次元の問題と同様である。

p-VP法では, 新たに頂点を1個もしくは2個追加し, 体積保存性の向上と生成される表面の形状を改善する。

#### 3.2 p-VP法の説明

p-VP法では特に問題を生じる隅のボクセルでの表面生成を改善するために, 図7(a)に示す3種類のパッチ構造を拡張する。これらのパッチの中からVP法を適用し, 生成された表面の中から拡張すべきパッチ構造を見つける。図7(b)のように, 太線で示した格子を対象としたとき, それに隣接する斜線で示した複数の3角形パッチの法線方向を求める。求めた法線方向のずれ $\theta$ が経験的に与えたしきい値 $\theta_0$ よりも大きいときにそのパッチ構造を拡張する。

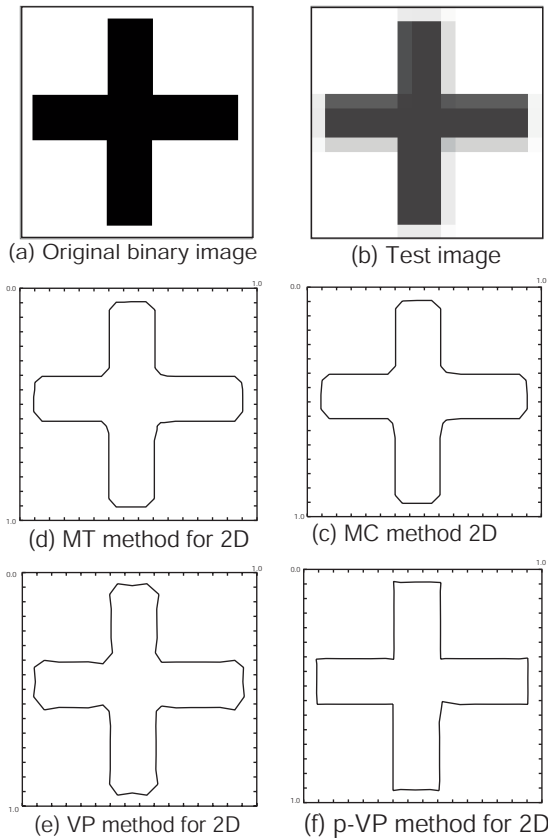


図5 図形(プラス)生成結果の比較  
Fig.5 Comparison of results (Plus)

図8を例に挙げて説明をする。拡張パッチは図8(a)のように、格子の一边の長さを1とするとそれらの頂点の座標  $(x, y, z)$  は、次の範囲で決定する。Pattern 1の頂点  $P_0$  は  $0 \leq x, y, z \leq 1$ 。Pattern 2の頂点  $P_1$  は  $x = 0$  かつ  $0 \leq y, z \leq 1$ 、頂点  $P_2$  は  $x = 1$  かつ  $0 \leq y, z \leq 1$ 。Pattern 3の頂点  $P_3$  は  $x = 0$  かつ  $0 \leq y, z \leq 1$ 、頂点  $P_4$  は  $y = 1$  かつ  $0 \leq x, z \leq 1$ 。つまり、Pattern 2とPattern 3の追加した頂点は格子の破線で示した面上で決定する。ここで、これらの頂点は次の条件を満たすように決める。

(1) 入力されたボリューム値を  $I$ 、それに対応する生成した表面によるボリューム値を  $J$  としたとき、式2で表される面積誤差  $E$  を最小とする。

$$E = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 |J_{i,j,k} - I_{i,j,k}| \quad (2)$$

(2) 図8(b)のようにPattern 1の頂点  $P_7, P_8$  を固定し、頂点  $P_0, P_7, P_8$  が作る三角形と頂点  $P_0, P_5, P_6$  が作る三角形が平行になるように頂点  $P_5, P_6$  を決める。同

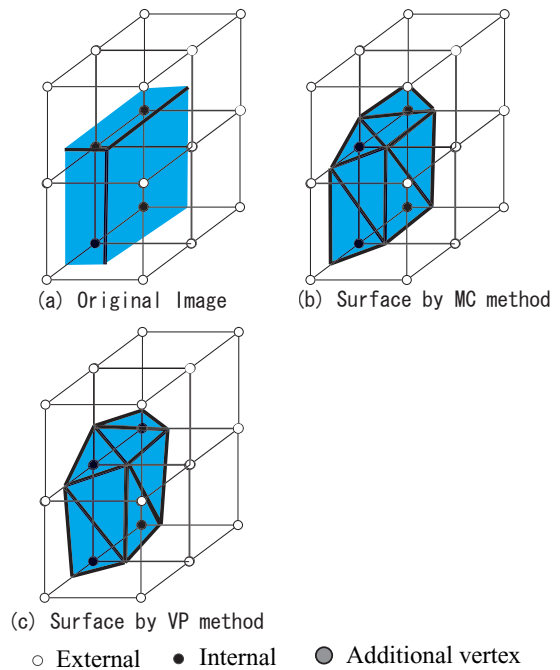


図6 類似方法の問題点  
Fig.6 Problems

様に他の頂点も決める。Pattern 2では、頂点  $P_{11}$  を固定し、頂点  $P_1, P_2, P_{11}$  が作る三角形と頂点  $P_1, P_2, P_9$  が作る三角形、頂点  $P_1, P_2, P_{10}$  が作る三角形が平行になるように頂点  $P_9, P_{10}$  を決める。同様に他の頂点も決める。Pattern 3はPattern 2の一つの面の方向が変わったものであると同様の方法で決定する。ここでPattern 1の解を探索するには、図9のように探索領域を8つの領域に分割し、その中心に頂点  $P_0$  を設定し体積誤差を評価する8分割探索法を用いる。これを経験的に決定した探索回数  $m$  回続ける。Pattern 2とPattern 3では2点を加え、2次元と同様にそれぞれ4分割して階層的に探索する。

最後に体積保存性をさらに向上させるため図8(b)の頂点  $P_5, P_6, P_9, P_{10}$  を含む格子上の頂点を、格子上で体積誤差が減少する方向に移動させ、修正を行う。追加した頂点  $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4$  はすでに体積保存性を考慮して決定されているので固定とする。

### 3.3 実験

#### 3.3.1 パラメータの設定

今回の実験ではしきい値  $\theta_0$  を  $40[deg]$ 、探索回数  $m$  を5と設定した。

#### 3.3.2 実験結果

図10(a)のボリュームデータの解像度を16分の1に落として作成した図10(b)を入力ボリュームデータ

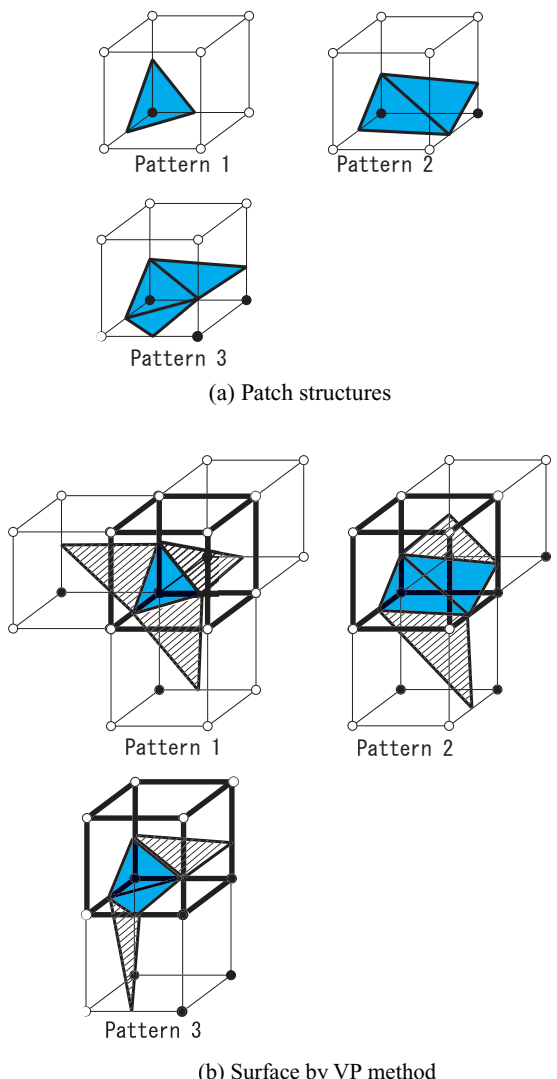


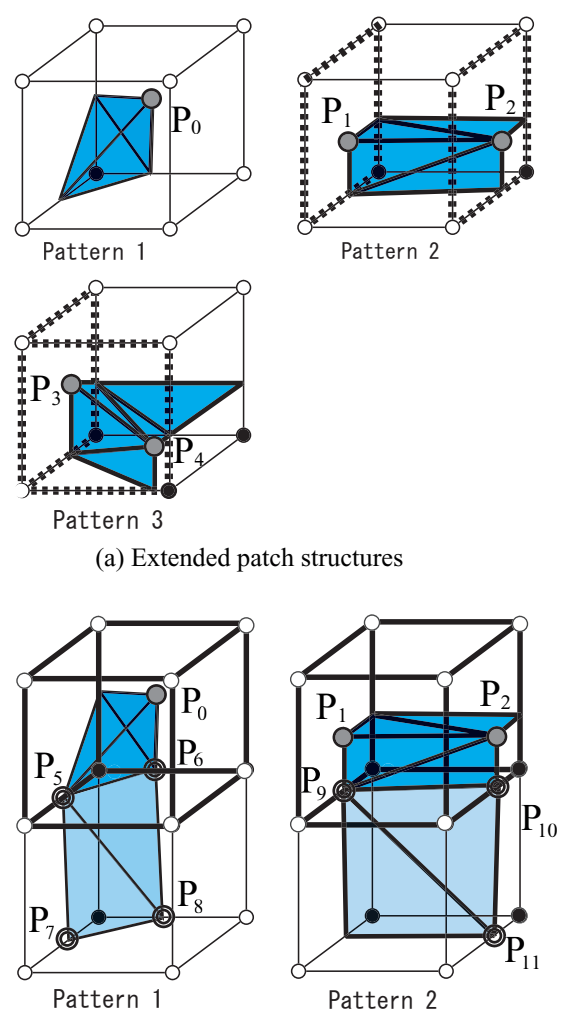
図 7 拡張パッチの適用

Fig. 7 Application of extended patch structures

として使用した．図 10(c)(d)(e) にそれぞれ MC 法，VP 法，p-VP 法を適用した結果を示す．また，表 2 に各テスト画像に元の図形と比較した場合の体積誤差を示す．これは生成後の図形の各ボクセルについて，欠損もしくは超過した体積率の和を表した値である．p-VP 法は他の 2 方法と比較して体積誤差が少ないことがわかる．形状生成についても p-VP 法がもっとも優れている．処理時間は MC 法が約 0.25 秒 (Pentium4 3.2GHz) に対し p-VP 法では約 5.35 秒であった．

4. ま と め

本研究では MC 法の体積保存性の問題と生成される表面形状の精度に着目した．その解決法として MC



◎ Endpoint

(b) Surface by p-VP method

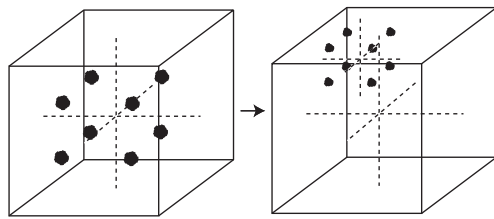
図 8 拡張パッチ

Fig. 8 Extended patch structures

表 2 体積誤差の比較  
Table 2 Comparison of Total Volume Error

Sample	MC method	VP method	p-VP method
Fig 10	41.27	28.12	23.15

法におけるパッチ構造に 1 個もしくは 2 個の点を加えることにより体積保存されるように表面形状を生成する方法を提案した．まず 2 次元画像の p-VP 法では，隅を持つ画素について，1 点を追加する輪郭生成を行うことにより，面積保存性と，輪郭生成精度を同時に向上させた．3 次元画像の p-VP 法では，隅を持つボクセルについて，1 点または 2 点を追加する生成法を



● Search point

図 9 8 分割探索

Fig. 9 Searching by 8 division

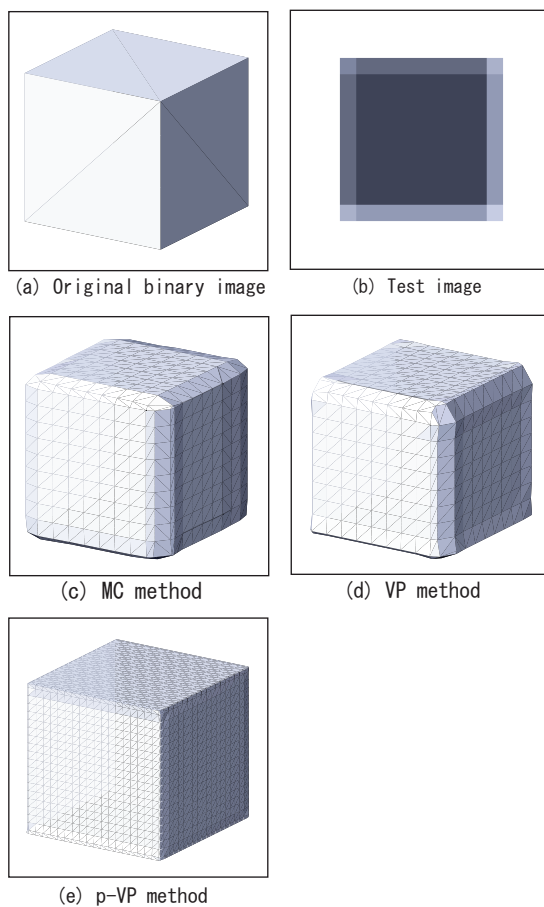


図 10 表面 (立方体) 生成結果の比較

Fig. 10 Comparison of results (Cube)

用いて、2次元同様に、体積の保存性と、表面生成精度の向上を同時に達成した。

今後の課題は、3次元自由曲面を持つ3次元物体を考慮すること及び計算速度を速くすることがあげられる。

## 参 考 文 献

- 1) W.E.Lorensen and H.E. Cline: "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm", Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.163-169(1987)
- 2) C.Montani, R.Scateni and R. Scopigno: "Discretized marching cubes" Visualization '94 Proc., IEEE Computer Society Press, pp.281-299(1994)
- 3) A. Guezic and R. Hummel: "Exploiting triangulated surface extraction using tetrahedral decomposition", IEEE Trans. on Visualization & Computer Graphics, Vol.1, No.4, pp.328-342(1995)
- 4) T. Itoh and K. Koyamada: "Automatic isosurface propagation using an extrema graph and sorted boundary cell lists", IEEE Trans. on Visualization & Computer Graphics, Vol.1, No.4, pp.319-327(1995)
- 5) 山本祐輝・金子豊久:「体積保存に着目した物体表面の生成」, 信学論 (D-II), Vol.J81-D-II, No.1, pp.101-108(1998-1)
- 6) 松下賢治・金子豊久:「ボリューム値を保存した3次元表面生成法」, 信学論 (D-II), Vol.J82-D-II, No.3, pp.449-457(1999-3)
- 7) 高橋友和・米倉達広:「4種類の連結性を考慮したデジタル物体の表面構成法」, 信学論 (D-II), Vol.J82-D-II, No.11, pp.2160-2164(1999)
- 8) 伊奈論:「ボリュームデータからの格子4面体分割による断面ポリゴン生成の一手法」, 信学技報, PRU92-86:63-70, December 1992.
- 9) 土井章男, 鈴木聡史, 小山田耕二, 三中西信治:「4面体分割アプローチの3重線形補間との誤差評価と可視化」, Journal of IIEEJ, 27(4):298-305, 1998.
- 10) A.DoI and A.Koide: "An Efficient Method of Triangulating Equi-Valued Surfaces by Using Tetrahedral Cells", IEICE Trans., E74(1):214-224, January 1991.
- 11) Tomokazu TAKAHASHI and Tatsuhiro YONEKURA: "Isosurface Construction From A Data Set Sampled On A Face-Centered-Cubic Lattice", Proc. of ICCVG2002, Vol. 2, pp. 754-763, September 2002.
- 12) K.Aoki, H.Yokota, and T.Kaneko: "Surface Reconstruction with Volume Preservation", The 10th Pacific Graphics Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2003), (2003-10), pp.399-403, Canmore-Alberta-Canada