

格子形状の変形による Marching Cubes 法の細部表現能力の向上

藤本 敬介^{†1} 守屋 俊夫^{†2} 中山 泰一^{†1}

陰関数表現から三角形メッシュを生成する手法として Marching Cubes 法 (MC 法) がよく知られているが、本論文ではその改良手法について述べる。従来の MC 法は、等間隔にグリッドを設定し、格子点に対して境界面との内外判定を行うことでメッシュを生成するため、(1) 格子に対して細い物体が存在するときにそれが欠損してしまう可能性がある、(2) 物体の鋭角部が鈍った形状に変換されてしまう、といった問題が発生していた。本論文では、これらの問題に対し各格子点の位置を物体の形状に対して適応的に移動させ各格子の形状を変形させる Deformed Marching Cubes 法 (DMC 法) を提案する。DMC 法では、各格子点の周辺を探索して重心点を求め、また格子と等値面の関係から鋭角の頂点座標を求め、それぞれ求めた座標に最も近い格子点を移動させる。これにより、少なくとも格子内に物体が 1 つしか存在しない場合においては、(1) 探索精度以上の細い物体の非欠損性の保証、および (2) 鋭角部の再現、を同時に実現した。実験により、MC 法における格子の 1 辺の長さに対し 1/5 以上の幅を持つ物体の非欠損性を保証する場合でも、従来に対し約 25% の計算時間増だけで処理されることを確認した。

Improvement of Detailed Expression on Marching Cubes Method by Deforming Grids

KEISUKE FUJIMOTO,^{†1} TOSHIO MORIYA^{†2}
and YASUICHI NAKAYAMA^{†1}

We describe an algorithm that improves the ability of detailed expression of the Marching-Cubes (MC) method. The MC method is a technique for generating triangular meshes from implicit function. It sets the uniform grid, and generates mesh with the judgment whether the lattice point is on the inside to the boundary. Therefore, it has two problems. First, there is a possibility that the thin part of the object is lost. Second, the sharp part is converted into the smooth shape. In this paper we present a Deformed-Marching-Cubes (DMC) method that changes the shape of the grid form by moving lattice points. The steps of the DMC method are: 1) detecting a thin part by searching for surroundings of each lattice point, 2) calculating coordinates of the sharp part, 3) moving a lattice point that is nearest from each calculated point. As a result, when only one object exists for the grid interval, this method realized guaranteeing the non-loss of an object that is bigger than the search accuracy, and reproducing the sharp part. Consequently, we proved that the method guarantee non-loss of the object of the width of 1/5 compared with the grid size only by the overhead of only about 25%.

1. はじめに

曲面表現をする際、陰関数表現を用いる方法が研究されている。陰関数表現とは、陰関数 $f(x, y, z)$ を与え、 $f(x, y, z) = 0$ となる境界面をオブジェクトの表面として 3 次元形状モデルを表す方法で、表面の混合、変形、集合演算といった位相的な処理を行う場合に適

したものであり、近年のモデリングやシミュレーションなど多くの分野で使われるようになりつつある。

陰関数曲面を可視化するために、レイトレーシング³⁾により直接表示する手法およびポリゴンメッシュ化する手法が一般に用いられる²⁾。

レイトレーシングは画素ごとに視点から光線を伸ばし、オブジェクトとの交点を計算することで直接形状を表現する手法であるが、多くの計算量をともなうために現段階では高精度な画像をリアルタイムで表示するのが難しい。

一方ポリゴン化する手法は 1 度ポリゴンを作成すれば高速に表示をすることができる。そのための手法

^{†1} 電気通信大学情報工学科

Department of Computer Science, The University of Electro-Communications

^{†2} 日立製作所基礎研究所

Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd.

として Bloomenthal の手法¹⁾ や Marching Cubes 法 (以下 MC 法⁷⁾ が有名である。特に MC 法については陰関数をポリゴン化するための多くの改良手法が提案されている⁴⁾⁻⁶⁾。

しかし, MC 法には次のような問題点がある。

- 薄い形状や細い形状の再現性が, 格子の間隔と位置の選び方によって大きく変化してしまう。
- 滑らかな表面はきれいに再現できる反面, 鋭角となっている部分まで滑らかにしてしまう。

上記の問題は格子間隔を小さくすることである程度抑えられるが, 格子間隔を小さくすると計算量が増え, 非常に大きなコストがかかる。

本論文では, 上記の問題点を解決するために, 本来は直交単位格子である格子の形状を, 物体の表面の形状に応じて自由に変形させる Deformed Marching Cubes 法 (DMC 法) を提案した。DMC 法は, 従来の MC 法に以下の手順を加える。

- (1) 重心点の算出
- (2) 鋭角部の検出
- (3) 格子点移動による格子形状の変形

以上の手順により, 格子の総数を増やすことなく, 非常に薄いまたは細い特徴が単独で存在する場合および鋭角形状を持つ場合に, それらの特徴部を欠損させずに再現することができる。また, 格子形状を変形させることができる場合, Bloomenthal らの手法¹⁾ など空間を格子状に分割する様々な手法に対し本アルゴリズムを適用することができると思われる。格子総数を増やさずに再現性を向上させることができるため, 従来手法で計算資源の限界近くまで格子を増やして精度を高めたうえで, さらに再現性を上げることが可能になった。実験により, MC 法における格子の 1 辺の長さに対し 1/5 の幅を持つ物体の非欠損性 (3 章参照) を保証する場合でも, 従来に対し約 25% の計算時間増だけで処理されることを確認した。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章では MC 法とその問題点について述べる。3 章では Deformed Marching Cubes 法のアルゴリズムについて述べ, 4 章では本研究の実験および評価について述べ, 5 章で考察を行い, 6 章でまとめる。

2. Marching Cubes 法

2.1 Marching Cubes 法の概要

MC 法は, 従来ポリウムデータからの等値面再構成法の中で最も有名でよく使われる手法の 1 つである。3 次元空間をボクセルと呼ばれる立方格子状に小さく区切る。ボクセルの頂点ごとに零値面までの符号付き

距離場を設定し, ボクセル内の各辺における頂点の符号が異なる場合に, スカラー値が 0 になる位置に頂点を補間して生成し, 各ボクセル内で適切に接続することにより, 等値面のメッシュを生成するものがある。立方体内におけるポリゴンの生成パターンは, 各頂点の符号によるため, 256 通りとなる。幾何学的構造を考慮し, 最終的に 15 通りのパターンとなる。MC 法はアルゴリズムが簡潔であり, 等値面の位相的な性質を保ったままロバストにメッシュを生成することができ, 特に球面のような滑らかな曲面に対し, 正確な再現をすることができるという特徴がある。また, MC 法は陰関数からメッシュを生成することも可能であり, 多くの改良手法が提案されている⁴⁾⁻⁶⁾。以下に手順の概要を述べる。

MC 法では, まず対象物体の 3 次元空間内の等値面 $S \subset \mathbf{R}^3$ に対し, 次を満たす陰関数 $f(\mathbf{p})$ を定義する。ここでは等値面として零値面を用いることとする。

$$\mathbf{p} \in S \iff f(\mathbf{p}) = 0 \quad (1)$$

$\mathbf{p} \in \mathbf{R}^3$ は 3 次元空間内の任意の点である。 f は S への距離に応じた値を返す関数であり, S は f の値が 0 の等値面と考えられる。

f を関数の形ではなく 3 次元空間上に等間隔でサンプルをして扱うことで, 効率良く計算を行う。サンプルの間隔を h として, 格子点 $\mathbf{p}_{i,j,k}$ を空間上に以下のように配置する。

$$\mathbf{p}_{i,j,k} : (hi, hj, hk) \quad (i, j, k) \in \mathbf{Z} \quad (2)$$

格子点 $\mathbf{p}_{i,j,k}$ から零値面までの符号付距離を

$$d_{i,j,k} = f(\mathbf{p}_{i,j,k}) \quad (3)$$

として与え, $d_{i,j,k}$ の値は物体の内部では負, 外部では正の値となるとする。

さらに, 8 つの点を頂点とする直交単位格子 $C_{i,j,k}(h)$ を以下のように定義する。

$$C_{i,j,k}(h) = [ih, (i+1)h] \times [jh, (j+1)h] \\ \times [kh, (k+1)h] \quad (4)$$

格子ごとに, $f(\mathbf{p}) = 0$ となる等値面を構成する三角形面を生成することで等値面を構成する。 d の値により物体の内部であるかを調べ, 近隣の 8 つの格子点の組合せにより 15 通りの三角形面を構成することができる。

2.2 問題点

2.2.1 鋭角部の再現

MC 法では格子上の点がポリゴンメッシュの頂点となる。よって対象物体の鋭角の先端部がグリッド辺上にある場合は, 鋭角部を再現することができる。しかしながら, ほとんどの場合において鋭角の先端部と格子辺が重なることはないため, 角として再現をするこ

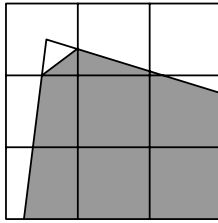


図 1 鋭角の再現に関する問題

Fig. 1 Problem in reconstructing sharp feature.

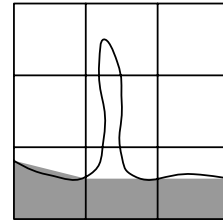


図 2 細い部分に関する問題

Fig. 2 Problem in reconstructing thin part.

とができない。図 1 は、鋭角部が欠損する状態を本来 3 次元である格子形状を、説明の都合上見やすくするために 2 次元に落として表現したものである。斜線部が実際にメッシュ化される部位となり、鋭角部はメッシュ化されない。

この問題に対処するために、Kobbelt らによる Extended Marching Cubes 法 (EMC 法)⁹⁾ は、各格子点が零値面までの xyz 各方向に対する距離を持つという独自の距離場を定義し、また、格子上的における零値面の関係より角となる部分を検出し、新たな三角形パッチを生成することにより鋭角部の再現を行った。また Tao らによる Dual Contouring¹⁰⁾ では、エルミートデータ (交点と法線のデータ) でエッジをタグ付けし、以前は特徴の明示的な特定と処理を不要とした QEF (quadratic error function) 用の 8 分木ベースの符号付きグリッドの境界生成法を提案し、鋭角部の再現を行った。

しかしながら、これらの方法では格子の大きさに比べて細い部位の再現をすることができないという問題がある。そのため、細い部位の先端となる鋭角部について再現をすることができない。本手法を用いると、細い部位を再現することができるために、この問題を解決できる。

2.2.2 細い部分の再現

MC 法は各格子点を囲んだメッシュが作成されるが、囲まれる格子点 p は空間上に一定間隔で配置された点であるために、対象物体が細い場合および薄い場合、格子点が対象物体内部に入らない場合がある。それによって、物体が存在するにもかかわらずメッシュ化されないという問題がある (図 2)。

Shekhar ら⁹⁾、Sagawa ら⁸⁾ は、MC 法に 8 分木を用いて異なる解像度のボクセルを含むボリュームデータに適応させることによって、局所的に精度の調整を行った。各立方体は、8 つの立方体に分割することができ、部分立方体内の零値面の形状の曲率が高い場合、さらに分割を進めてゆくことにより、データ量を減らすとともに精度を上げた。

これら可変解像度を用いる手法は効率的にメッシュを生成できるという点において優れているが、薄い部位においては細かなボクセルを用いる必要がある。そのため、平面などの単純な形状は通常少ないメッシュで再現をすることができ、薄い平面などを再現する場合はボクセルを細かくする必要があり、メッシュ数が増えるためにコストがかかってしまうという問題がある。それに対し、本手法では格子を変形させることで格子の総数を増やさずにそのような部位の再現を行うことが可能である。

3. Deformed Marching Cubes 法

MC 法では格子と等値面の位置の関係によって鋭角や稜線および細い部分を確実に再現することができないことが分かった。DMC 法では MC 法における格子の形状に対して、(1) 重心点の算出、(2) 鋭角部の検出、(3) 格子点移動による格子形状の変形をすることにより、格子の総数を変えずに、

- 非常に薄いまたは細い特徴が単独で存在する場合に、特徴部の非欠損性の保障、
- また従来の EMC 法や Dual Contouring 法では細い鋭角などで不可能であった鋭角の特徴が 2 ボクセル以上にわたり存在する場合の再現、

を実現した。ここで、非欠損性とは、格子の辺上で境界面との交点が 2 つ以上できない場合とする。つまり変形した格子における 1 つの格子に対し 1 つのオブジェクトしか存在しないこととなる。これは MC 法が 1 つの辺に対し、2 つ以上のポリゴンの頂点を持つことができないことによるからである。

本手法ではその場合でも再現をすることができる。以下に本アルゴリズムの手順を示す。

- 重心点への格子点移動
格子点周辺の範囲に等値面が存在するかどうかの探索を行い、等値面が存在する格子点を選択する。選択された点において、点周辺の等値面の重心点を計算し、格子点の移動を行う (図 3)。

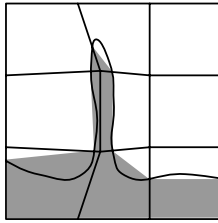


図 3 細い部分内への格子点の移動
Fig. 3 Moving lattice point into thin part.

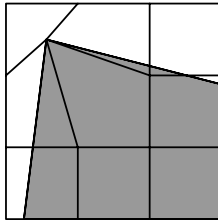


図 4 頂点への格子点の移動
Fig. 4 Moving lattice point on a top of sharp feature.

● 角および稜線の検出

格子と等値面の交点・交点上の法線によって角および稜線の検出を行う。それらが見つかった場合、近くの格子点の移動を行う(図4)。

3.1 等値面周辺の格子点の移動

MC法では格子点は空間上に等間隔で配置されている。そのために、細い部分が再現できない問題は、図2のように定位置に配置されている格子点が細い部分の内部に存在しないために起きる。そこで、等値面周辺の格子点を選択して、細い部分の内部に入るような位置に格子点の移動を行う(図3)。

まず、格子点 $p_{i,j,k}$ をMC法と同様に初期位置を式(2)の位置に設定し、それぞれ移動可能範囲を以下のように定義する。

$$\Omega_{i,j,k} : (h(i + \alpha), h(j + \alpha), h(k + \alpha)) \quad (-0.5 \leq \alpha < 0.5) \quad (5)$$

格子点 $p_{i,j,k}$ において、 $\Omega_{i,j,k}$ の範囲を任意のステップ s で対象物体の内部となる点の探索を行う(図5)。そして探索した点のうち、内部点であった点群の重心を求め、格子点の移動先とする。

$\Omega_{i,j,k}$ 上の点は格子点 $p \in R^3$ の集合の中で、 $p_{i,j,k}$ が最も近い点の集合であり、各 Ω は同じ領域を共有しない。また、点の x, y, z 方向において順序が入れ替わることはないので、格子辺どうしが交わることはない。これより、格子点 $p_{i,j,k}$ が Ω 内で移動をする限り、格子の形状は自由な6面体となり、MC法のメッシュ化のアルゴリズムを適用することができる。

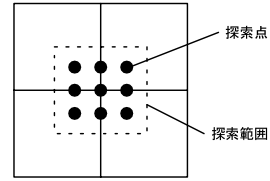


図 5 内部点の探索
Fig. 5 Searching the inner points.

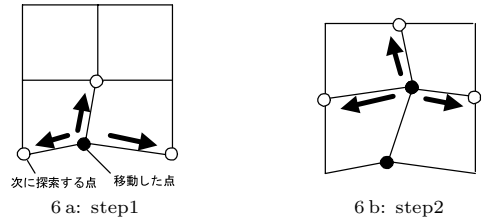


図 6 移動する格子点の追跡
Fig. 6 Tracking the moved point.

3.1.1 格子点の選択

すべての格子点に対して上記探索を行うと計算時間が大幅に増加するという問題があるため、探索中心となる格子点を図6のように逐次選択して計算量を減らす。

まず変形していない状態の格子点から内部となる点を1つ選択し、移動させる。続いて以下の手順で逐次格子点の選択を行う。

- (1) 移動された格子点に隣接する未探索の格子点に注目し、探索・移動を行う。
- (2) 移動が起きた場合、その点を初期点として再度(1)を行う。

ある格子点周辺に等値面が存在する場合、その格子点の移動が行われる(図6a, 中央下の黒点)。そこで、白点で示される近傍点に対し探索・移動を行う。図6aの中央の点に移動が起きた場合、その点を初期点として図6bのように再帰的に選択を進める。この操作の初期点は、変形前の格子を用いた場合に物体内部となる点の1つを用いるため、格子が変形される前の状態で内部となる点が存在しない場合、格子点の移動は起こらずメッシュは作られないことになると考えられる。

3.2 鋭角部の検出

メッシュモデルにおいて、鋭角や稜線を表現するためには、ポリゴンの頂点または辺が、オブジェクトの鋭角や稜線の位置にくる必要がある。MC法ではポリゴンの頂点は格子辺上に、ポリゴンの辺は格子辺をつなく面上になる。よって、鋭角や稜線の再現が困難であるという問題は、ボックス面が鋭角や稜線と重ならないことによって起きる(図1)。ポリゴンの頂点を

等値面上の頂点と一致させるためには、格子点を等値面の頂点の位置と一致させればよい。また、ポリゴンの辺を等値面上の稜線と一致させるためには、ポリゴンの辺をつなぐ格子边上の2頂点、または格子点を等値面上の稜線上に配置すればよい。DMC法では等値面の頂点に格子点を移動させ、また稜線上に格子点を移動させることで、これらの再現を行った(図4)。

鋭角や稜線の位置を求めるためには、格子と等値面の交点および法線が必要となる。そこで、はじめに法線の計算を行い、交点および法線の位置を求め、求めた位置から移動する格子点を選びそれらの位置に移動を行う。

3.2.1 法線の設定

境界を表す陰関数を $f(x, y, z) = 0$ としたとき、 f の偏微分によって求まる。

$$\mathbf{n} = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (6)$$

3.2.2 稜線および鋭角部の検出

稜線および鋭角部の検出を Kobbelt らの方法⁶⁾ によって求める。格子 $C_{i,j,k}(h)$ と等値面 $f(\mathbf{p}) = 0$ の交点を c_u ($u = 0, 1, 2, \dots$) とし、それらの交点上における法線を \mathbf{n}_u とする。各格子において、法線ベクトルの方向の関係から、その格子周辺に稜線および鋭角となる部分があるかどうかの判定を行う。まず、各法線ベクトルから任意の2つのベクトル $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ を選択し、内積が最小となる組合せ $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ を選ぶ(図7a)。

$$\theta = \min_{a,b \in u} (\mathbf{n}_a^T \mathbf{n}_b) \quad (7)$$

内積値がしきい値 θ_{sharp} より小さいならば稜線があると判定する。稜線を持つ法線の組は $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ 、それらの法線を持つ格子と等値面の交点は c_0, c_1 となる。また、 $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ は格子内で最も大きな鋭角部を囲む法線であり、

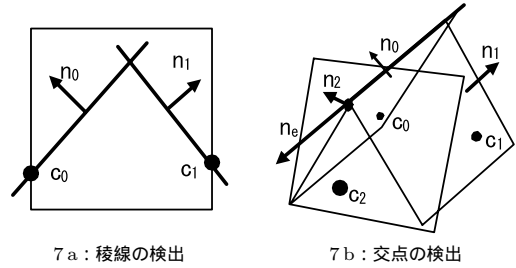
$$\mathbf{n}_e = \mathbf{n}_0 \times \mathbf{n}_1 \quad (8)$$

は $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ をそれぞれ法線として持つ平面の交線の方向ベクトルとなる。

次に交点の存在を調べる。図7bのように、稜線 \mathbf{n}_e に対して、垂直となる平面が存在する場合、鋭角点となる。そこで、法線 \mathbf{n}_u のうち $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ を除いた法線と \mathbf{n}_e の内積を最大とする法線 \mathbf{n}_2 を選ぶ。

$$\varphi = \max_{c \in u} |\mathbf{n}_c^T \mathbf{n}_e| \quad (9)$$

φ の値がしきい値 φ_{corner} より大きければ、鋭角を持つと判定する。鋭角部を持つ場合の法線の組は $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 、それらの法線を持つ格子と等値面の交点を c_0, c_1, c_2 とする。また稜線の閾値 θ_{sharp} を 0.9, 鋭



7 a : 稜線の検出

7 b : 交点の検出

図7 鋭角点の検出
Fig.7 Detecting feature point.

角の閾値 φ_{corner} を 0.7 とした。

● 鋭角部が見つかった場合

平面上の1点を c 、法線を \mathbf{n} とすると、平面 (c, \mathbf{n}) の式は

$$\mathbf{n}^T (\mathbf{x} - c) = 0 \quad (10)$$

となる。鋭角部の頂点は平面 $(c_0, \mathbf{n}_0), (c_1, \mathbf{n}_1), (c_2, \mathbf{n}_2)$ の交点となるため、

$$\begin{pmatrix} n_{0x} & n_{0y} & n_{0z} \\ n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_0^T c_0 \\ \mathbf{n}_1^T c_1 \\ \mathbf{n}_2^T c_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

を満たす $c_v = (x, y, z)$ の値が鋭角部の頂点座標となる。

● 鋭角部が見つからず、稜線が見つかった場合

平面 $(c_0, \mathbf{n}_0), (c_1, \mathbf{n}_1)$ の交線が稜線となる。2つの平面の交線の方向 \mathbf{v}_e は2つの平面の法線ベクトルの外積となるので

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{n}_0 \times \mathbf{n}_1 \quad (12)$$

とし、交線上の任意の1点を c_e とする。 c_e は $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ のいずれとも平行でない平面を用いて式(11)によって求める。

鋭角部が細い部位の先端にある場合、格子の外部に交点が発見されるため、その格子の格子点の移動だけでは再現ができない(図8左下の格子が右上の鋭角点を検出した場合など)。本手法では、鋭角部の検出を行う前に細い・薄い部位の探索を行い図9のようにあらかじめ格子を変形してから鋭角部検出をすることで、鋭角部の先端が格子外部であった場合でも再現が可能となる。

3.2.3 格子点の移動

各格子内で、鋭角や稜線などの特徴部位が発見された場合、近隣の格子点を鋭角や稜線の座標に移動する。

● 鋭角が見つかった場合の格子点の選択

3つの平面の交点 c_v から最も近い位置の格子点を交点の座標へ移動を行う。

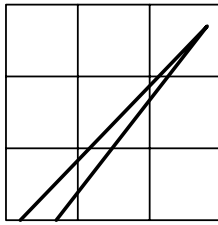


図 8 格子変形前

Fig. 8 Before deforming lattice.

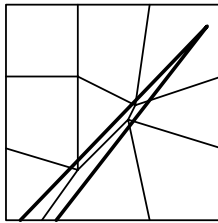


図 9 格子変形後

Fig. 9 After deforming lattice.

- 稜線が見つかった場合の格子点の選択
2つの平面の稜線 (c_e, v_e) の近隣となる, 稜線を検出した格子の格子点を稜線上へ移動させる.

4. 実験

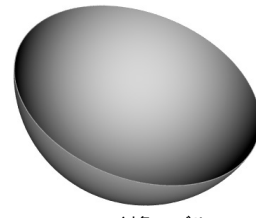
実験に利用した計算機は 2.80 GHz Dual CPU, 主記憶容量が 4 GB の PC である. 重心点および鋭角の検出, 続いて格子の大きさを固定した場合の計算時間および精度を固定した場合の計算時間についてそれぞれ評価をした.

4.1 薄い部位を持つ対象物への実験

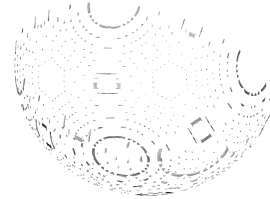
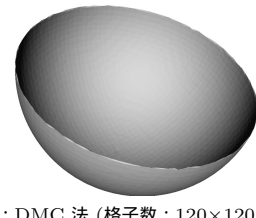
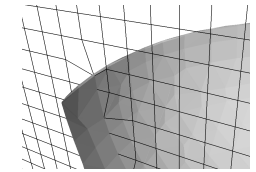
図 10 では, 式 (13) となる, 図 10 a のようなコンタクトレンズ形状の薄いオブジェクトに対して MC 法および DMC 法を適用した結果を示す.

$$\begin{aligned}
 f &= \max(f_0, f_1, f_2) \\
 f_0(x, y, z) &= x^2 + y^2 + z^2 - 9 \\
 f_1(x, y, z) &= 8.9 - x^2 - y^2 - z^2 \\
 f_2(x, y, z) &= y
 \end{aligned} \tag{13}$$

MC 法を用いて, 格子数を $120 \times 120 \times 120$ として実験を行ったところ, 図 10 b のように薄い部位が欠損してしまい, 正しくモデルが再現されないことが確認できる. MC 法は物体内部となる格子点の周りにメッシュを張るため, 対象物体が薄い場合, 対象物内部となる格子点が少なくなり, このように大きく欠損してしまう. 一方, DMC 法で同数の格子で実験を行った結果, 図 10 c のように薄い部位を再現することができた. また, この場合の変形された格子形状を図 10 d に示す.



10 a : 対象モデル

10 b : MC 法 (格子数 : $120 \times 120 \times 120$)10 c : DMC 法 (格子数 : $120 \times 120 \times 120$)

10 d : 格子の状態

図 10 薄い部位を持つオブジェクトに対する結果
Fig. 10 Result of object with thin part.

この対象物の場合, 物体の厚さが約 0.017 程度であるために, 従来の MC 法を用いた場合に正しく再現するためには格子間隔をそれ以下にする必要がある. しかしながら, MC 法は格子間隔に対し $O(n^3)$ の計算量であるため, 膨大な計算コストがかかってしまう. また, 8 分木を用いた分割手法もあるが, それを用いても境界面周辺の格子間隔を, 物体の厚さとなるまで繰り返し分割する必要がある, そのような細かい格子から生成されるメッシュは非常に数が多く, ポリゴンリダクションなどをする必要があるのである. 一方で DMC 法は格子内の探索ステップを小さくすることで, 物体形状が単純である場合に, 少ない格子数で薄い物体を再現することができる. 式 (13) のオブジェクトの場合, MC 法では格子を $800 \times 800 \times 800$ 程度にする必要があるが, それに対し DMC 法の場合は格子数は $120 \times 120 \times 120$ で再現することが可能であった. 格子数を減らすことができるためデータ量の点で有利であると考えられる.

4.2 細い部位を持つ対象物への実験

図 11 では、図 11 a のような非常に細いトゲのついたオブジェクトに対して MC 法および DMC 法を適用した結果を示す。

MC 法を用いて、格子数を $80 \times 80 \times 80$ にして実験を行ったところ、図 11 b のように大きくトゲの部分が欠損してしまうことが分かる。これは前述のように細い部位の内部に格子点がない場合、パッチが欠落してしまうためである。トゲの部位は局所的に非常に細いため、大きく欠損してしまう。それに対し、DMC 法を同数の格子で内部での探索ステップを格子間隔の 5 分の 1 とした DMC 法を適用した結果、図 11 d のようにトゲの内部に格子点を移動させることで格子の変形を行い、図 11 c のようにトゲの部位が再現された。これにより格子の変形を行うことで、MC 法と同等の格子数で再現性が向上することが分かる。

しかしながら、図 11 c ではトゲの根元の部分が膨らんでしまっていることが分かる。これは格子が粗いため、格子の大きさに対して、根元の部分の形状が複雑であることに起因する。これについては多重解像度の MC 法に対し、本手法を適用するなどによって解決する予定である。

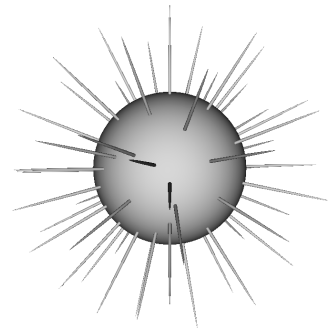
4.3 鋭角を持つ対象物への実験

図 12 では、図 12 a のような鋭角部を持つオブジェクトに対する再現結果を示す。

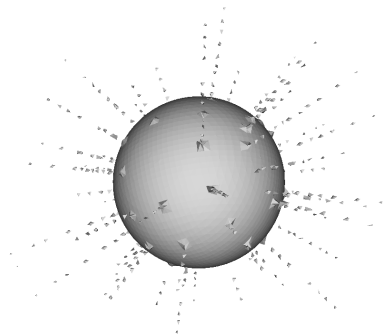
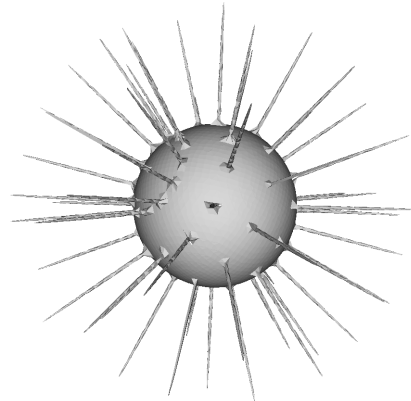
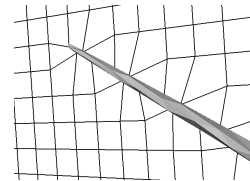
図 12 b は MC 法を用いた場合の結果である。鋭角部の先端と格子が一致することはほとんどないために先端部が欠損してしまい、鋭角部が再現されていないことが分かる。そこで、鋭角部を探索するのみの DMC 法を用いた結果を図 12 c に示す。するとこの手法でも部分的に欠けてしまっていることが分かる。これは鋭角周辺部が細くなっているため、鋭角部周辺のパッチが欠落し、そのために先端部も欠損してしまう。つまり、MC 法の改良手法である EMC 法⁶⁾ などでも、鋭角部周辺部を再現することができない場合に、同様に再現することができないと考えられる。そこで、細い部分の内部にグリッドの頂点を移動させてから鋭角の検出を行うことで図 12 d のようにオブジェクトの再現ができる。また、図 12 e のように格子を鋭角部の先端に移動させることで鋭角の再現ができることが分かる。

4.4 格子変形におけるオーバヘッド

DMC 法では通常の MC 法に対して (1) 重心点の算出 (2) 鋭角部の検出 (3) 格子の変形の手順を加える。そこで MC 法との計算時間の比較を行い、それらの手順のオーバヘッドを求めた。ここでは立方体に対す



11 a : 対象モデル

11 b : MC 法 (格子数 : $80 \times 80 \times 80$)11 c : DMC 法 (格子数 : $80 \times 80 \times 80$)

11 d : トゲの先端における変形された格子

図 11 細い部分を持つオブジェクトに対する結果

Fig. 11 Result of object with thin part.

る計算の比較を行う。これは、MC 法による計算で大きな欠損が起ると、生成される対象形状が大きく異なるために、パッチ生成などの DMC 法特有の手順以外の計算時間差ができてしまうため、MC 法でパツ

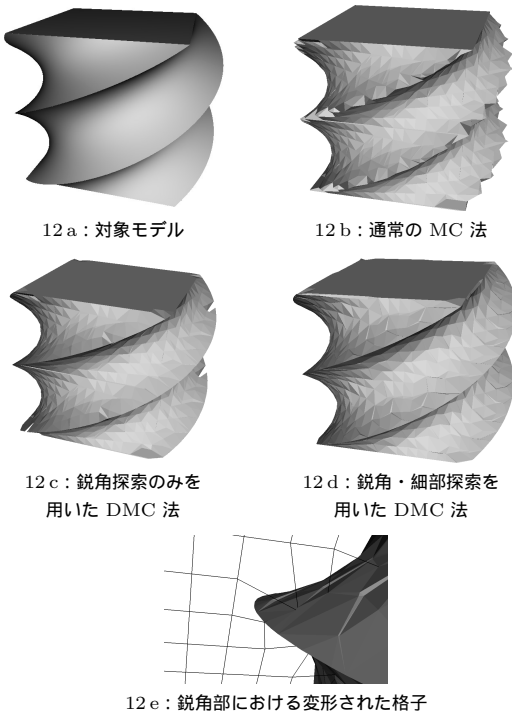


図 12 角探索と細部探索の統合例

Fig. 12 Integrated result of search for corner and thin part.

チの欠落の起きない単純な対象形状について比較を行った。

DMC 法は探索ステップを任意に決定することができる。そこで、MC 法と格子の数を等しくし、5 倍および 10 倍と探索ステップを細かくした場合の計算時間の比較を行った。比較結果を図 13 に示す。グラフの横軸が格子数であり、右に行くほど格子数は増え、再現性が向上する反面計算時間が増える。また、縦軸は計算時間である。

グラフより、格子の 5 分の 1 のステップ幅で探索を行った DMC 法でも格子総数が等しい MC 法に対し約 25% の計算時間増で済むことが分かる。実際に再現性を上げる場合は細い部位など従来欠落してしまう分のパッチ生成の計算時間も必要となるが、少ないオーバーヘッドで再現性を大きく向上させることができることが確認できた。

5. 考 察

MC 法は各格子ごとに、格子辺と境界面の交点を結びメッシュを生成するアルゴリズムである。従来の等間隔の格子を用いた場合、鋭角部や細い・薄い部位と格子点の位置関係によって、境界面との交点が作成さ

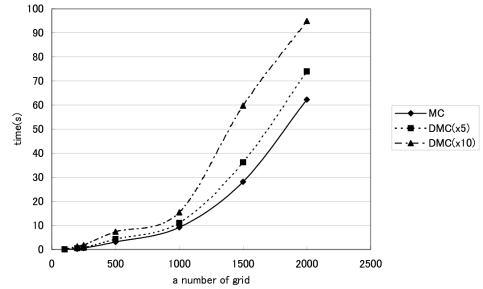


図 13 探索ステップの大きさに対する計算時間の比較
Fig. 13 Comparison of calculation time.

れずにメッシュが欠損してしまう場合がある。それに対し本手法では格子を境界面形状に従って変形させることにより、格子との位置関係より起因するメッシュ欠損の問題を解決した。

一方、MC 法のメッシュ生成パターンは、格子の各辺に対し境界面との交点が 1 つであることを前提としているため、格子辺に対し複数の交点ができる場合、従来の MC 法のメッシュ生成パターンでは対応することができないという問題があり、本手法においても同様の問題が起きる。たとえば柵状の物体や薄い平面が近い距離で平行に置かれるような状況や、格子点の周辺に 2 つ以上の異なる鋭角点が存在する場合に再現をすることができないと考えられる。格子の精度以上の複雑さを持つ対象物体の再現など、上記問題については、8 分木構造を用いた多重解像度による手法などの手段を本手法と組み合わせることで今後解決していくことができるものと考えられる。

本手法では格子点の移動先として重心点を用いた。重心とした理由は、単純な凸物体において、ほとんどの場合重心点は部位の内部となるからである(図 14)。部位の内部に格子点を移動させることで、近隣の物体外部となる格子点との間に境界面との交点ができるため凸部位が再現される。実験により多くの凸形状で良好な結果が得られることが確認できた。一方、凹物体を対象とする場合、凸物体とは反対の状況になるため図 15 のように物体の外部となる位置に格子を移動させる必要がある。しかし、重心を用いた方法では物体外部の位置を検出することができないために凹形状を再現することができない。したがって、これについては、格子点の移動手法を改良することで解決されるものと考えられる。本研究では格子の移動により再現性を向上させることができることを成果とし、格子点の最適な移動手法については今後の課題とする。

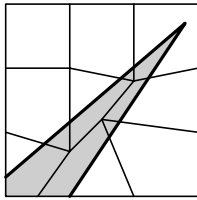


図 14 凸部位における格子変形

Fig. 14 Deforming lattice for convex object.

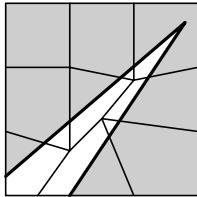


図 15 凹部位における格子変形

Fig. 15 Deforming lattice for concave object.

6. おわりに

本論文では MC 法の拡張を行い, (1) 直交単位格子形状に初期配置された格子点の周辺部の探索よりオブジェクトの局所的な重心点を検出し, (2) 格子辺と等値面の交点と法線ベクトルにより鋭角部を検出し, (3) それらの座標に基づき近傍に位置する格子点を適応的に移動させることによって格子の形状を変形する DMC 法の提案をした.

それによって以下の問題を格子の総数を変化させずに解決した.

- 鋭角部および稜線部が鈍ってしまうという問題
- 細い部位および薄い部位が欠損してしまうという問題

これらの問題は格子総数を増やすことで対応することができるが, メモリや計算時間の観点から使用可能な格子総数には限界がある. 本手法の貢献は, 計算資源の限界まで格子数を増やしたうえで, さらに再現性を向上させる手段を提供したことにある.

格子数を変化させない場合の, 鋭角部における再現性の問題を解決する従来の手法として EMC 法⁶⁾ などがあるが, DMC 法では, それらに対応できなかった細長い物体の先端部が鋭角となるような場合にも対応可能とした.

しかしながら, 格子の大きさに対して, 形状が細かすぎるような部位については正確に再現されないという問題, 凹形状の再現ができないという問題がある. 今後, 形状の再現性の問題に対し 8 分木を併用し, 格子点の移動手法について検討していく予定である.

参考文献

- 1) Bloomenthal, J.: Polygonization of Implicit Surfaces, *Computer Aided Geometric Design*, Vol.5, pp.341-335 (1988).
- 2) Bloomenthal, J.: *Introduction to Implicit Surfaces*, Morgan Kaufmann Publishers (1997).
- 3) de Groot, E. and Wyvill, B.: Rayskip: Faster ray tracing of implicit surface animations, *Proc. 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia (GRAPHITE'05)*, pp.31-36 ACM Press, New York (2005).
- 4) Cuno, A., Espærancia, C. and Olivera, A.: Fast Polygonization of Variational Implicit Surfaces, *Proc. XVII SIBGRAPI*, Curitiba, Brasil, pp.258-265 (2004).
- 5) Hilton, A., Stoddart, A., Illingworth, J. and Windeatt, T.: Marching triangles: range image fusion for complex object modelling, *Proc. Intl. Conf. Image Process 2*, pp.381-384 (1996).
- 6) Kobbelt, L.P., Botsch, M., Schanecke, U. and Seidel, H.P.: Feature-Sensitive Surface Extraction from Volume Data, *Proc. SIGGRAPH*, pp.57-66 (2001).
- 7) Lorensen, W.E. and Cline, H.E.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.163-170 (July 1987).
- 8) Sagawa, R., Nishino, K. and Ikeuchi, K.: Adaptively Merging Large-Scale Range Data with Reflectance Properties, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.27, No.3, pp.392-405 (2005).
- 9) Shekhar, R., Fayyad, E., Yagel, R. and Cornhill, J.F.: Octree-Based Decimation of Marching Cubes Surfaces, *IEEE Visualization*, pp.335-334 (1996).
- 10) Tao, J., Losasso, F., Schaefer, S. and Warren, J.: Dual contouring of hermite data, *Proc. SIGGRAPH*, Vol.21, No.3, pp.339-346 (2002).

(平成 19 年 3 月 26 日受付)

(平成 19 年 11 月 6 日採録)



藤本 敬介（学生会員）

2005年電気通信大学電気通信学部情報工学科卒業。2007年同大学大学院電気通信学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。同年同大学院電気通信学研究科情報工学専攻博士後期課程進学。2007年電気通信大学目黒会賞受賞。コンピュータグラフィックス，知能ロボットの研究に従事。日本ロボット学会学生会員。



中山 泰一（正会員）

1988年東京大学工学部計数工学科卒業。1993年同大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。同年電気通信大学電気通信学部情報工学科助手。現在，同学科准教授。オペレーティング・システム，並列・分散処理，ゲーム・プログラミングに興味を持つ。日本ソフトウェア科学会，電子情報通信学会，IEEE CS等の各会員。



守屋 俊夫（正会員）

1991年東京大学工学部精密機械工学科卒業。同年（株）日立製作所入社。システム開発研究所，基礎研究所にて3次元画像認識，実写CG合成，高臨場感ディスプレイ用映像制作システム，ロボットビジョン等の研究開発に従事。博士（工学）。IEEE，電子情報通信学会各会員。
