

平面で構成された実物体を計測した点群からの 3次元モデリングと整形

二宮龍之介[†] 古谷博史[†] 椋木雅之[†]

概要: 本研究では、実物体の中でも平面で構成された物体を対象に、3次元モデリングと整形を行う。従来の研究では、点群に含まれた誤差もモデリングするため、整ったモデルを生成できない。本研究では、平面を近似し、平面の交線と交点から3次元モデルを生成する。生成されたモデルを線分の長さや角度の条件を基に調整し、整った形のモデルを生成する。

キーワード: 平面物体, 3次元モデリング, 整形, RANSAC, Delaunay 法, MarchingCubes 法

3D Modeling from the Point Cloud of a Plane Surface Object

RYUNOSUKE NINOMIYA[†] HIROSHI HURUTANI[†]
MASAYUKI MUKUNOKI[†]

Abstract: In this research, we generate a 3D model of a plane surface object from the point cloud measuring it. In previous studies, the 3D model is generated by connecting the measured points or isopleth lines of point density. In that case, the generated 3D model does not have clear corners and edges. To cope with that, we estimate the planes of the object and generate the 3D model by connecting the cross points of the planes. Furthermore, we refine the shape of the 3D model to equalize the edge lengths and angles. As the result, we can generate a fine shaped 3D model of the plane surface object.

Keywords: plane surface object, 3D modeling, shape refinement, RANSAC, Delaunay Method, Marching Cubes Method

1. はじめに

近年、個人用 3D プリンターの登場や一部企業が行っている 3 次元データの公開、パーソナルコンピュータの高性能化などにより、3 次元データを扱える環境が整ってきた。さらに、個人同士が 3 次元データを共有できるサービスや 3DCAD データを生成するサービスも展開されてきている。このような背景から実在する物体（以下、実物体と表記）の 3 次元データが求められる場面が生じている。そのため、実物体の 3 次元モデリングを行う技術が必要とされている。

2. 3次元モデリング

2.1 3次元モデリングと整形

本研究では、点群からサーフェイスモデルを生成することを 3 次元モデリングとする。サーフェイスモデルとは、3 次元グラフィックスで最も広く使われている 3 次元形状データの表現方法で、3 次元空間内の頂点、頂点同士をつないだ線分、いくつかの線分からなる閉ループである面によって表現される。サーフェイスは、モデルを構成する面のことを指す。最終的な形として求められる 3 次元モデルは、物体の角や稜線がはっきりしており、見た目にも整っている 3 次元モデルである。「整う」とは「きちんとそろう」。

調和がとれる”の意[1]である。即ち、整った形というのは、きちんとそろった形である。本研究では、整った形を実現するために 3 次元モデルの線分の長さや線分のなす角がそろうように調整することを整形とする。

2.2 従来の 3 次元モデリング

実物体の 3 次元モデリングの一手法として、点群計測を行い、その点群に対して、サーフェイスを生成する手法がある。

例えば[2]では、点群を三角形の網状につないで 3 次元モデルを生成している。[3]では、点群を格子状に区切り、点の密度の等値面をつないで 3 次元モデルを生成している。これらの手法により、任意の形状の実物体について計測した点群から 3 次元モデルを生成できるが、整った形の 3 次元モデリングが行えるとは限らない。[2]では、計測点をそのまま利用するので、点群に誤差があるとノイズを含んだ 3 次元モデルになってしまう。[3]では、[2]よりは滑らかな 3 次元モデルが得られるが、角や稜線のある 3 次元モデルは得られない。[4]では、密な点群データを使って、インタラクティブなモデリングを行うことで、[2][3]を改善しているが、数千万点規模の密な点群を対象にしているため疎な点群には対応できない可能性がある。

[†] 宮崎大学 工学部
Faculty of Engineering, University of Miyazaki

2.3 平面で構成された実物体の3次元モデリングと整形

本研究では、平面で構成された物体を対象とする。従来の方法では、実物体の計測データから3次元モデリングを行う場合、物体の角や稜線部分に計測点がないと、角や稜線がはっきりした3次元モデルを生成できない問題があった。一般に、角や稜線部分にちょうど点が計測できることはまれである。本研究では、平面で構成された物体を対象に、点群が多く存在する平面から近似平面を推定して、平面同士の交線や交点から角や稜線がはっきりした3次元モデリングを行う。

生成された3次元モデルを、線分の長さおよび線分のなす角による2つの条件をもとに整形する。本研究では近い長さの線分を同じ長さにそろえ、90度に近い角度を90度にそろえることで、整った形の3次元モデルを実現する。そろえる角度を90度に限定した理由は、平面で構成される物体には人工物のような90度の部分を多く持つ物体が多いためである。

3. 3次元モデリング処理

3.1 モデリング処理

3次元モデリング処理は以下の手順で行う。

1. 点群の計測
2. 点群を近似する平面の推定
3. 平面グラフの生成
4. 平面グラフの面の抽出
5. 採用する面の決定

3.2 点群の計測

実物体を3次元点群として計測する。計測には画像列からの形状復元手法 (Structure from Motion) に基づく VSFM[5] というツールを用いた。実物体の全方位からの写真を撮り、VSFM に入力として与えることで3次元データを出力することができる。

3.3 点群を近似する平面の推定

取得した点群から、物体を構成する全ての平面を取得するため、RANSAC 法[6]を用いて近似平面を推定する。本手法では、複数平面を順次推定する。ある平面を推定するとき、ほかの平面上の点ははずれ値とみなせる。

3次元点群のデータから3点の座標をランダムに抽出し、平面の式を求める。求めた平面と点群の各点との距離を計算し、その値が閾値 ε_p 以内となる点を求めた平面上の点とする。上記を一定回数繰り返し、得られた平面の中で平面上の点の数が最大となる平面を見つける。その平面上の点を用いて、最小二乗法により最終的な平面の式を求める。この作業をあらかじめ与えておいた平面の数だけ繰り返すことにより、すべての近似平面を得る。

3.4 平面グラフの生成

角や稜線がはっきりした3次元モデルを取得するため、面同士の交線と交点を用いてサーフェイスの候補を生成する。

まず、近似した平面から3つの平面の組全てを選択し、交点の3次元座標を求める。次に、2つの平面の組全てを選択し、求めた交点のうちその2平面の交線上にある点で隣り合う点同士を結ぶ。結果として、交点をノード、交点を結ぶ線をエッジとする、それぞれの面ごとのグラフが生成される。このグラフは平面上に存在し、どのエッジも交差しない平面グラフになっている。

3.5 平面グラフの面の抽出

次に、[5]の方法で平面グラフの面を抽出する。平面グラフの面とは平面グラフを構成する最小ループのことである。平面グラフの面が物体の3次元モデルを構成するサーフェイスの候補となる。

まず、平面グラフから1つのエッジを選択する。平面グラフを有向グラフと考え、エッジの一方のノードを始点、他方を終点とする。終点のノードについて、そのエッジから反時計回りに最初に見つかる接続エッジを選択する。選択したエッジについて、同様に処理を行う。この処理を最初に選択した始点に戻るまで繰り返すことで、平面グラフの1つの面を抽出する。面を抽出したら、平面グラフからそのエッジを取り除く。この処理を残りのエッジがなくなるまで繰り返すことで平面グラフの面を全て抽出する。

3.6 採用する面の決定

平面グラフの面の中には対象物体には存在しない面も含まれている。あらかじめ設定した閾値 N 以上の数の点が抽出した平面グラフの面上に存在したとき、その平面グラフの面を物体の3次元モデルを構成するサーフェイスとして採用する。

点が面上にあることの判定は以下のように行う。まず、面が三角形であるとする。三角形の1頂点から他の2頂点へのベクトルを $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 、法線ベクトルを $\vec{v}_3$ とする。点群の任意の点 p はこの3つのベクトルを用いて、

$$p = s\vec{v}_1 + t\vec{v}_2 + u\vec{v}_3$$

で表せる。 u は、点 p と面との距離である。点 p が面の上にあると判定する距離の誤差を ε_s とすると、

$$|u| < \varepsilon_s, s > 0, t > 0, s + t < 1$$

を満たすとき、点 p が面上にあると判定する。面が四角形以上の場合には3角形に分割し、同様に処理する。面の上にある点の総和が閾値 N 以上のとき、その平面グラフの面を物体の3次元モデルを構成するサーフェイスとして採用する。

4. 3次元モデルの整形

4.1 整形処理

整形処理は以下の手順で行う

1. 線分の長さの調整
2. 線分のなす角の調整

4.2 長さの調整

3次元モデルの長さをそろえるため、近い長さを持つ2つの線分の組の端点の3次元座標を調整する。

まず、任意の2線分を選択する。それぞれの線分を l_1, l_2 とし、長さを L_1, L_2 とし、その平均を L する。線分の長さの差 $|L_1 - L_2|$ が $\varepsilon_l \leq |L_1 - L_2|/L < \Delta L/L$ である場合、線分の長さが L となるよう端点の座標を調整する。ここで、 ε_l は線分の長さの差がこれ以下のとき線分の長さがそろったとみなす閾値、 ΔL は線分の長さの差がこれ以下のとき近い長さであるとみなす閾値である。上記の作業を、条件を満たす線分の組がなくなるまで繰り返すことで、3次元モデルの線分の長さをそろえる。

4.3 角度の調整

3次元モデルの角度をそろえるため、なす角が90度に近い線分の組に対して、なす角が90度になるように端点の3次元座標を調整する。

まず、任意の2線分を選択する。線分のなす角を α とする。なす角と90度との差 $|90 - \alpha|$ が $\varepsilon_t \leq |90 - \alpha| < \Delta T$ である場合、それぞれの線分の1つの端点が原点にくるように線分をずらし、なす角が90度になるよう、原点でない方の端点の3次元座標を原点周りに $|90 - \alpha|/2$ 分の角度だけ回転させる。ここで、 ε_t は線分のなす角と90度との差がこれ以下のとき、線分のなす角が90度になったとみなす閾値、 ΔT は線分のなす角と90度との差がこれ以下のとき、なす角が90度に近い線分の組とみなす閾値である。上記の作業を、条件を満たす線分の組がなくなるまで繰り返すことで、3次元モデルの線分のなす角をそろえる。

5. 実験

5.1 合成データでの3次元モデリングと整形

5.1.1 実験手順

提案手法による3次元モデリングにより、目標とした角や稜線のあるモデルが生成できるかを確認する。また整形の効果を確認する。

あらかじめ正解となるサーフェイスモデルを生成し、対象物体とした。対象物体は全ての辺の長さと角度が同じ立方体とした。正解のサーフェイスモデルにノイズを含む点を1つの平面ごとに200点ずつ生成し、合計1200点のモデリングに用いる点群データを生成した。ノイズは分散0.1の正規分布ノイズとした。

生成した点群データから提案手法により3次元モデリングを行った。また、比較のためDelaunay法[2]とMarching cubes法[3]による3次元モデル生成も行った。近似する平面数を6とした。実験に用いたパラメータを表1に示す。

表1 合成データ実験でのパラメータ

ε_p	N	ε_s	ε_l	$\Delta L/L$	ε_t	ΔT
0.05	50	0.05	10^{-4}	0.60	10^{-4}	5.00

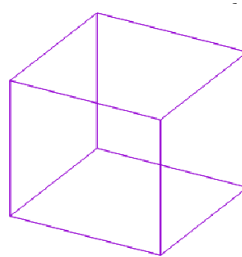


図1 正解モデル

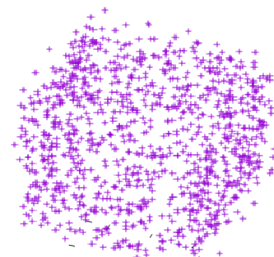
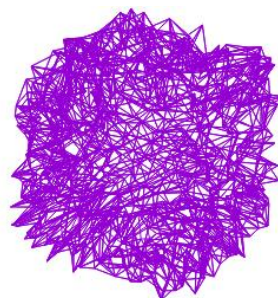
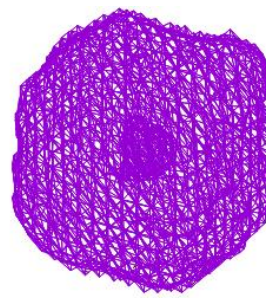


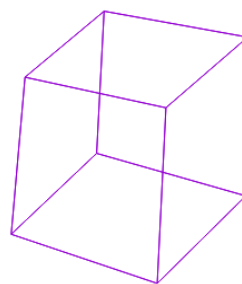
図2 点群



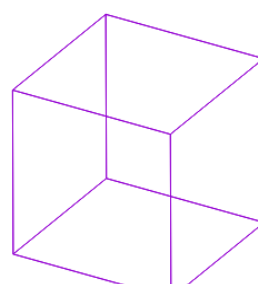
a) Delaunay 法



b) MarchingCubes 法



c) 提案手法(モデリング)



d) 提案手法(整形結果)

図3 3次元モデリングと整形の結果

5.1.2 実験結果

図3のa)はDelaunay法によるモデリング結果、b)はMarching Cubes法によるモデリング結果、c)は提案手法によるモデリング結果、d)はc)のモデルを整形した結果である。

整形前、整形後の線分の長さや角度についてそれぞれの誤差平均を表2に示す。

表 2 線分の長さの比較

線分の長さ(線分の長さと誤差の比率)		
	整形前	整形後
誤差平均	1.8625%	0.0000%
線分のなす角(度数法で表記)		
	整形前	整形後
誤差平均	1.2257°	0.0000°

5.1.3 考察

図 3 の c) は a), b) と比べて、角や稜線がはっきりとしたモデルを生成できた。しかし、整形後のモデルと見比べて、線分の長さや角度がそろっていないことから、提案手法によるモデリングでは点群の誤差の影響を多少受けることがわかった。整形を行った結果、整形後の誤差平均の値が線分の長さや角度ともに 0 になり、目視でも歪みが解消されていることから整った形を生成できることがわかった。

5.2 実物体の 3 次元モデリングと整形

実物体の点群データから、3 次元モデリングと整形を行い、整った形のモデルが生成できるかを確認した。対象とする実物体は、図 4 の立方体を 2 つ対角線上に並べたものである。8 つの平面で構成されており、全ての辺の長さがほとんど同じで、全ての角が直角に近い物体である。この実物体の 3 次元点群を取得した結果、点群の数が 43 万点を越えていた。疎な点群でも 3 次元モデリングができるかを確認するため、実験に使用したデータは、その約 1000 分の 1 の 436 点にランダムに減らしたものの(図 5)を使用した。



図 4 実物体

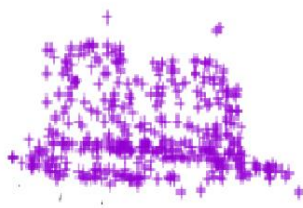


図 5 対象点群

図 5 のデータに提案手法を適用した。図 6 にその結果を示す。近似する平面数を 8 とした。実験に用いたパラメータを表 3 に示す。

表 3 実物体実験でのパラメータ

ε_p	N	ε_s	ε_t	$\Delta L/L$	ε_t	ΔT
0.01	20	0.05	10^{-4}	0.60	10^{-4}	10.0

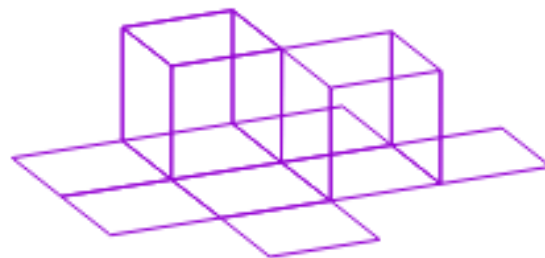


図 6 実物体整形後モデル

図 5 の点群は、はずれ値や誤差を含んだ疎な点群だったが、提案手法により、点群中のはずれ値や誤差の影響を受けずに目標としていた整った形の 3 次元モデルが得られた。

6. おわりに

本研究では、実物体の 3 次元モデリングと整形を行った。対象を平面で構成されたものに限定すれば、3 次元モデリングと整形は良い結果が得られることがわかった。

今後の課題として、本研究では平面で構成される実物体のみを扱ったが、曲面で構成される実物体に関してもモデリングと整形ができるような方法を考えていきたい。

参考文献

- [1] 大辞林, 三省堂, <http://www.weblio.jp/content/> (2016/02 参照)
- [2] E. L. Bras-Mhlman, M. Schmitt, O. D. Faugeras, J. D. Boissonnat, "How the Delaunay triangulation can be used for representing stereo Data", Proc. ICCV, pp. 54-63 (1988)
- [3] W. E. Lorensen, H. E. Cline: "Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm", Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp.163-169 (1992)
- [4] 藤井智, 増田宏, "密な点群からの平面抽出を利用したインタラクティブなモデリングシステム", NICOGRAPH, 2009, 秋季大会 (2009)
- [5] "VisualSFM: A Visual Structure from Motion System", <http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm> (2016/02 参照)
- [6] M. A. FISCHLER, R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Comm. ACM, Vol.24, No.6, pp.346-359 (1981)
- [7] 山田武夫, "平面グラフの全ての面を認識するアルゴリズム", 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 2001, pp.198-199 (2001)