

3次元形状モデリングのための点群の再構成に関する研究

粟野 直之*

A Study on Geometry Reconstruction of Acquired Point Clouds for 3D Shape Modeling

Naoyuki AWANO*

ABSTRACT : Over the past few years, point clouds have attracted attention as a new shape model, because they can be easily created using 3D-digitizers, which have seen rapid development lately. Correspondingly, there has been an increase in research on point clouds in the field of CG and CAD. Generally, point clouds include many noises and defects. Therefore, it's so difficult to apply existing CG methods for polygon mesh to point clouds such as rendering, modeling, visualization, etc. This paper introduces one of my research works of geometry reconstruction for point clouds modeling.

Keywords : 3DCG, modeling, point cloud, geometry reconstruction

(Received September 20, 2013)

1. はじめに

3DCGや3DCADにおいて、3次元CGオブジェクトを容易に作成できることは重要な問題である。従来はモデリングソフトウェアを利用して3次元形状を作成することが一般的であったが、その完成度は専門知識や経験に依存する。一方、実物を計測するだけで3次元形状を作成できる3次元計測機器が急速に発達してきた。最近では安価な計測機器も市販されているため、その用途は急速に広がっている。

3次元計測機器による形状作成では、通常のカメラと同様に計測対象を撮影（計測）することで3次元データを得ることができる。しかし、3次元データは一方向からの計測ではそのすべてを取得することは困難であり、図1の太線部のようなカメラから可視の部分を計測した後、別方向から再計測することや、計測対象を回転させることによって全体を計測できるようにする必要がある。そのため、より簡単に計測できるようにするため、近年ではハンディタイプの3次元計測機器も開発されている。

3次元計測機器から得られるデータは形状を点群で構成しているデータである。上述したように、多方向から計測する必要があるため、得られる点群の密度は不均一とな

る。これまで、点群を形状モデルとして扱う研究では、CGにおいて一般に利用されているポリゴンモデルよりも優位性のある面もあることが示されているが、できるだけ均一な点群であることを前提としていることが多い。

提案手法では、点群を3次元空間上でできるだけ均一になるように再構成する手法について述べる。なお、本稿は著者による論文²⁾を概説したものである。

2. 関連研究

点群からノイズを除去して均一になるように再構成する方法として、移動最小二乗曲面を用いた平滑化や、曲面上で点群を再サンプリングする手法などがある³⁾⁵⁾。しかし、曲面を利用することで形状のエッジを構成する部分が欠落することや、曲面を構築するためのサンプリング問題により細部が欠落するなどの問題がある。

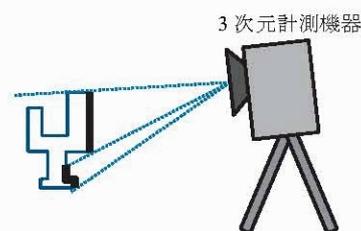


図1 3次元計測

* : 情報科学科 助教 (naoyuki-awano@st.seikei.ac.jp)

曲面を構築せず、点群を均一になるように再構成する手法として、Locally Optimal Projection (LOP)⁶⁾がある。この手法では、点群の各点における近隣点のみから再構成後の点座標を算出できる。また、出力する点群の点数も任意の点数とすることができる。さらに、LOPによる出力点群をより均一になるように改良した手法として Weighted Locally Optimal Projection (WLOP)⁷⁾もある。

WLOPでは、入力点群と射影点群の2種類の点群を用意し、射影点群を入力点群上に射影する。そして、できるだけ均一になるように整列させることによって、射影点群を再構成後の点群として取得する手法である。具体的には、入力点群 $P = \{p_j\}_{j \in J} \subset \mathbb{R}^3$ に対して射影点群 $X = \{x_i\}_{i \in I} \subset \mathbb{R}^3$ を射影する場合、式(1)~(9)を任意回数 $k(=1,2,\dots)$ 回反復計算することによって、徐々に均一な点群 X を得ることができる。

$$x_i^{k+1} = E_1^k + \mu E_2^k \quad (1)$$

$$E_1^k = \sum_{j \in J} p_j \frac{\alpha_{ij}^k / v_j}{\sum_{j \in J} (\alpha_{ij}^k / v_j)} \quad (2)$$

$$E_2^k = \sum_{t \in I(t)} (x_i^k - x_r^k) \frac{w_r^k \beta_{ir}^k}{\sum_{r \in I(t)} (w_r^k \beta_{ir}^k)} \quad (3)$$

$$\alpha_{ij}^k = \frac{\theta(\|x_i^k - p_j\|)}{\|x_i^k - p_j\|} \quad (4)$$

$$\beta_{ir}^k = \frac{\theta(\|x_i^k - x_r^k\|) \eta(\|x_i^k - x_r^k\|)}{\|x_i^k - x_r^k\|} \quad (5)$$

$$v_j = 1 + \sum_{j' \in J(j)} \theta(\|p_j - p_{j'}\|) \quad (6)$$

$$w_i^k = 1 + \sum_{r \in I(i)} \theta(\|x_i^k - x_r^k\|) \quad (7)$$

$$\theta(r) = e^{-r^2 / (h/4)^2} \quad (8)$$

$$\eta(r) = -r \quad (9)$$

ここで、 I と J は異なる2種類の集合を表しており、式(1)中の μ は、射影点群 X を入力点群 P に吸着させる吸着項 E_1 と、射影点群の点間で反発させる反発項 E_2 の調整係数である。このとき、ユーザ設定のパラメータの指標として、 $\mu = 0.45$ 、 $h = 4\sqrt{d_{bb}/|J|}$ が最適であるとしている。また、 d_{bb} は入力点群のバウンディングボックスの対角距

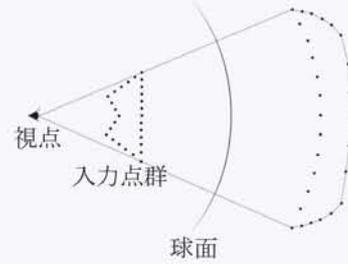


図2 球面反転による陰点消去

離である。

しかし、WLOPにおいても形状のエッジを構成する部分を維持することが難しいという問題がある。これは、式(2)で表される吸着項 E_1 に注目すると、重み付き平均座標を計算していることがわかる。形状の各点において近隣点との平均座標を新たな点座標とすればスムージングの効果が得られることと同様に、吸着項 E_1 の算出方法がエッジを構成する部分を維持することが難しい要因であると考えられる。

3. エッジを維持した形状再構成

入力点群のエッジを構成する部分を維持したまま再構成を行うため、前章で述べたWLOPを改良する。ここで、WLOPではエッジを構成する部分を維持することが難しいが、それ以外の部分であれば適切に再構成を行うことができる。このことに着目し、エッジを構成する部分をなめらかにする空間へ写像し、その空間でWLOPを適用した後に、元の空間へ逆写像する。逆写像の方法として、本手法では図2に示すようなKatzらの点群描画法⁸⁾を参考にする。同図に示すように、視点を中心とした球を入力点群を包含するように作成し、球面で点群を反転させる。反転後の点群は球面に近いなめらかな形状へと変形されることから、反転後の点群と視点を用いて凸包を作成し、凸包を構成する点は入力点群の空間で可視表面上の点群であるとしている。提案手法では、球面反転によってなめらかな形状の点群へと変形されることを利用し、これを逆写像の方法として利用する。

以下、各点における球の中心座標 c_i の算出方法と球の半径 R について説明し、反転空間上での吸着項 E_1 の算出方法についても説明する。

3.1 球の中心座標

提案手法では、各射影点 x_i において距離 h 内にある点群をそれぞれ参照して球を作成し、入力点群と射影点 x_i を球面反転する。そのため射影点ごとに球を作成できる

ようにする。具体的には、入力点群の法線ベクトル $N = \{n_j\}_{j \in I}$ を利用し、式(10)~(12)によって球の中心座標 c_i を算出するようにする。このとき、 k_h は射影点 x_i から距離 h 内にある近隣点数を表している。

$$c_i = x_i + \frac{d_{bb} \sum_{l=1}^{k_h} n_l}{2k_h} \quad (10)$$

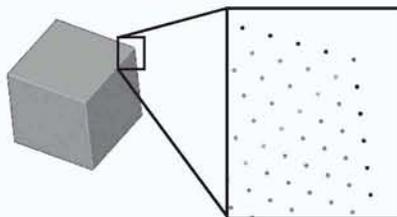
$$\arg \min_{n_j} \sum_{l=1}^{k_h} (n_j \cdot ((p_l - p_j) - q_j)) \quad (11)$$

$$q_j = \frac{\sum_{l=1}^{k_h} (p_l - p_j)}{k_h} \quad (12)$$

ここで、一般に定義される法線ベクトルは形状表面に対して外側を向くようなベクトルを指すが、式(11)~(12)で求める法線ベクトルは逆方向となることがある。しかし、提案手法における球の中心が順方向か逆方向かに関わらず、球面反転後の点群はなめらかになるため、逆方向のベクトルでもそのまま利用する。また、同じような簡易法線ベクトルの算出方法として、主成分分析(PCA)の第3主軸を利用する方法も広く利用されているが、エッジを構成する部分において、図3に示すように方向が不安定になることが多いため、同式を用いた簡易法線ベクトルを利用する。

3.2 球の半径

Katzらの手法では、入力点群は閉じた曲面上にサンプリングされたものであることを前提としている。そのため、入力点群の空間に対して半径 R を大きくしすぎた場合、例えば図2に示した点群がすべて可視と判定される



(a) 入力点群



(b) PCA



(c) 式(11)(12)

図3 簡易法線ベクトル

ようになる。これを解決するために、可視と不可視の境界が正しく求まるような半径 R を算出できるようにしている。

一方で提案手法では、反転する点群を射影点 x_i から距離 h 内にある局所的な点群のみに限定しているため、開いた曲面上の点群と仮定できる。したがって、Katzらの手法のように可視と不可視の境界となるような点群に関しては考慮する必要がないため、半径 R は h に対して十分大きい値とする。

3.3 反転後の空間での E'_1

前節までに説明した方法によって求めた球の中心座標と半径を利用して、入力点群を球面反転する。そして、同時に射影点 x_i も球面反転し、得られた x'_i を用いて球面反転空間上で E'_1 を算出する。ここで、図4に示すような状況において、球面反転前と反転後における近隣点数が大きく異なることがわかる。これは、球面反転後の点群は入力点群と比較して大きく広がりをもつためである。しかし、式(2)で示した吸着項は局所的な点群に吸着させることを前提としている。

そこで、局所領域を参照しつつ、この問題に対処するため、反転後の点群をアップサンプリングする。具体的には、反転球の中心 c_i から射影点 x_i までのベクトル l を生成し、 x_i の近隣点を l 移動させ、さらに反転球の半径を $\|l\|/2$ 拡大する。この条件で再度球面反転すると、部分的にアップサンプリングすることができる。同様に、射影点の近隣点をさらに移動させ、反転球の半径もさらに拡大した条件で球面反転する処理を、 x'_i の近隣点数 k'_h が x_i の近隣点数 k_h 以上になるまで繰り返す。

したがって、射影点 x_i を点群に吸着させる場合、式(13)を用いて球面反転後の $x'_i = f(x_i, c_i, R)$ を求める。

$$f(p, c, r) = p - c + 2(r - \|p - c\|) \frac{p - c}{\|p - c\|} \quad (13)$$

また、式(14)~(15)によってアップサンプリング後の点群 U_i を得る。このとき、 K は I と J とは異なる集合を表す。

$$U_i = \{u_s | \cup_{l=0}^{K-1} P'_i(l), k_h \leq k'_h\}_{s \in K} \quad (14)$$

$$P'_i(l) = \left\{ p'_j | f\left(p_j + lt, c_i, \left(1 + \frac{\|l\|}{2}\right)R\right) \right\} \quad (15)$$

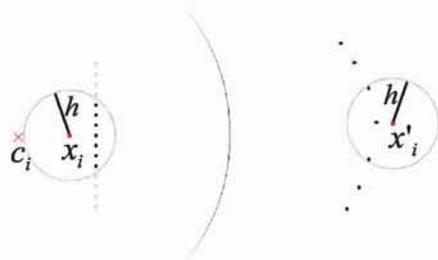
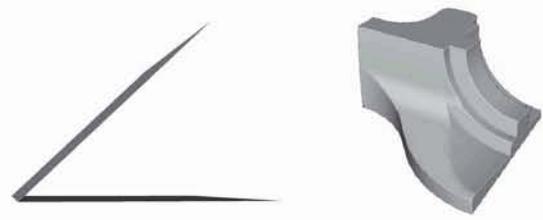


図4 反転前と反転後の空間



(a) 頂点数 21,009 点 (b) 頂点数 155,354 点

図5 実験対象のメッシュデータ

x'_i と U_i を用いて式(16)-(18)によって E'_1 を算出し、最後に式(19)によって元の空間へ球面逆反転することによって提案手法における E_1 を得る。

$$E'_1 = \sum_{k \in S} u_s \frac{\alpha_{is} / v'_s}{\sum_{s \in K} (\alpha'_{is} / v'_s)} \quad (16)$$

$$\alpha'_{is} = \frac{\theta(\|x'_i - u_s\|)}{\|x'_i - u_s\|} \quad (17)$$

$$v'_s = 1 + \sum_{s \in K \setminus \{s\}} \theta(\|u_s - u'_s\|) \quad (18)$$

$$E_1 = f(E'_1, c_i, R) \quad (19)$$

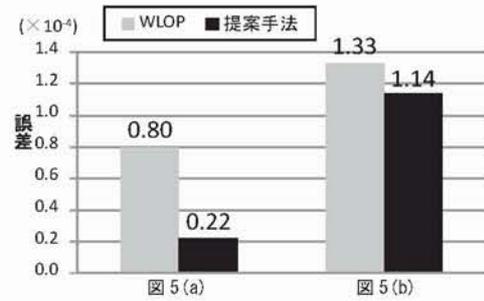


図6 誤差の算出結果

4. 結果と考察

提案手法の有効性を検証するために実験を行った。以後、形状のバウンディングボックスの対角距離である d_{bb} を 1.0 として正規化しているものとして実験を行う。また、十分に収束させた結果で評価するため、 k を 100 とする。

4.1 精度の検証

精度の検証方法を以下に示す。

- ① 入力メッシュデータの頂点を点群として扱い、ランダムに選出した頂点群を射影点群とする。
- ② WLOPと提案手法を適用する。
- ③ 再構成後の点群の各点において、最近隣メッシュまでの距離を算出する。
- ④ ③で算出した距離の平均を誤差（精度）とする。

実験には、図5に示す2種類の形状を用いた。実験では、主に形状のエッジを構成する部分を維持できているかに着目する。そのため、頂点の並びが不均一なメッシュデータの形状を用い、その形状がどの程度維持できるのかを検証した。その結果を図6に示す。同図より、提案手法は誤差が少なく、精度が高いことがわかる。

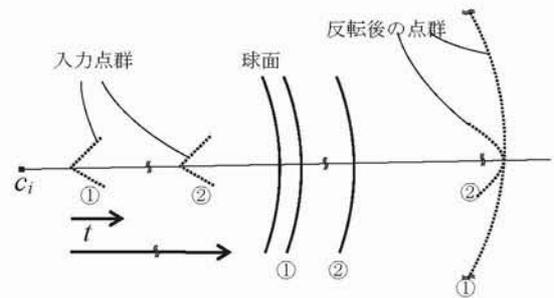


図7 反転後の形状の違い

4.2 移動ベクトル l_i について

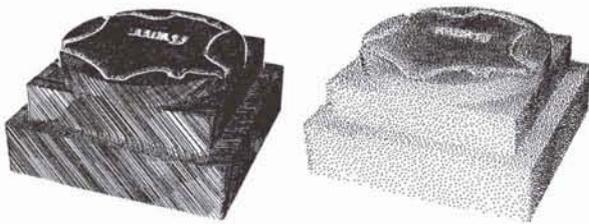
提案手法では球面反転後の空間において吸着項 E'_1 を算出する際にアップサンプリングを行っている。ここで、図4に示したように球面反転の対象となる点群は局所的に参照した点群であり、微小領域はおおよそ平面を構成しているため、同図に示したようアップサンプリングが可能となる。一方、エッジを構成する部分では、球面反転後の形状が大きく異なる。図7に示すように、入力形状が c_i に近い場合には、同図中の①で示す反転後の点群が得られるが、 c_i から遠い場合には同図中の②で示す反転後の点群が得られ、①と②では反転後の点群の形状が大きく異なる。そのため、 $\|l_i\|$ をできるだけ微小にし、②のように c_i から大きく離れた位置で球面反転をしないようにする必要がある。

そこで、 $\|l_i\| = R/m$ とし、前節で示した精度を異なる m

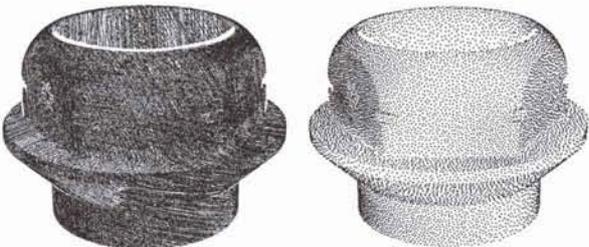
で検証したところ、 $m > 10$ において大きな差異がないことを実験により確認した。そこで、提案手法では $m = 20$ とし、以後すべての実験でも同様とする。

4.3 計測点群での検証

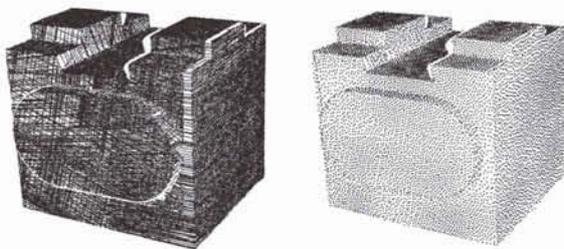
計測点群を用いて提案手法の有効性の検証を行うため、図8に示す形状で実験を行った。ここで、射影点群は入力点群からランダムに20,000点選出した。視覚的に、同図の左側に示す入力点群よりも、右側に示す提案手法のほうが均一であることがわかる。



(a) 入力点群：889,076点，射影点群：20,000点



(b) 入力点群：1,656,198点，射影点群：20,000点



(c) 入力点群：1,011,679点，射影点群：20,000点

図8 実験結果（左：入力点群，右：提案手法）

ここで、均一な点群が得られたかどうかを定量的に評価するため、式(20)に示すSchlömerらの均一度 $\overline{d_x}$ ⁹⁾を算出する。

$$\overline{d_x} := \frac{1}{X} \sum_{x \in X \setminus \{x\}} d_T(x, y) / \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}|X|} \quad (20)$$

なお、 $0 \leq \overline{d_x} \leq 1$ であり、高い値ほど均一であることを表す。ここで、Schlömerらは単位正方空間での点群の整列のため、正方空間の対辺が連続している空間での整列を

実現している。そのため、同式中の d_T はトロイダル距離⁹⁾としている。本実験では単一の形状を計測した点群を利用しており、閉じた曲面上の点群であると仮定できるため、 d_T をユークリッド距離とする。

均一度の算出結果を図9に示す。同図からわかるように、従来手法のWLOPと比較して提案手法のほうが均一度が向上していることがわかる。これは、提案手法では吸着項の算出において球面反転することによって、従来手法よりも局所的な点群を参照できるようになり、不均一な入力点群の密度差に影響されなくなったことが要因であると考えられる。

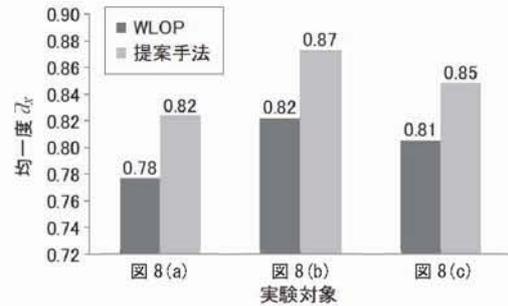


図9 WLOPと提案手法の均一度の比較

5. むすび

本研究では3次元計測機器から得られる点群を整列させることで形状を再構成する手法を提案した。提案手法では従来手法のWLOPをベースとし、入力形状のエッジを構成する部分を維持できるように改良した。その際、球面反転を利用することでなめらかな空間へ写像できることを利用した。実験により、WLOPよりもエッジを維持できることを確認し、さらに均一な点群を得られることも確認した。なお、本稿は著者による論文²⁾を概説したものである。

WLOPは、膨大な点群に対しては計算コストが高くなる傾向があり、近年の3次元計測機器では高密度な点群が得られやすくなっていることから、処理速度が問題となる。そのため、WLOPは点単位での処理を行うことができるアルゴリズムであることに着目し、並列演算を利用することによって高速化する手法¹⁰⁾が提案されている。提案手法でも同様に点単位での処理を行うことができるため、今後は高速化も検討する。

謝辞

The input point clouds in Fig.8 are provided by the courtesy of the AIM@SHAPE Shape Repository.

参考文献

- 1) M.Gross, H.Pfister, “POINT-BASED GRAPHICS The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics”, Morgan Kaufmann Publishers, 2007.
- 2) 栗野 直之, 西尾 孝治, 金谷 孝之, 小堀 研一, “特徴を考慮した点群の整列による形状再構成”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J96-D, No.7, pp.1636-1644, 2013.
- 3) Y.Ohtake, Belyaev, M.Alexa, G.Turk, and H.P.Seidel, “Multi-level partition of unity implicits”, ACM Trans. Graphics, Vol.22, no.3, pp.463-470, 2003.
- 4) M.Alexa, J.Behr, D.Cohen-Or, S.Fleishman, D.Levin, and C.T.Silva, “Point set surfaces”, IEEE Visualization 2001, pp.21-28, 2001.
- 5) S.Tanaka, A.Shibata, H.Yamamoto, and H.Kotsuru, “Generalized stochastic sampling method for visualization and investigation of implicit surfaces”, Computer Graphics Forum, Vol.19, No.3, pp.359-367, 2001.
- 6) Y.Lipman, D.Cohen-Or, D.Levin, and H.Tal-Ezer, “Parameterization free projection for geometry reconstruction”, ACM Trans. Graphics, Vol.26, No.3, pp.22.1-22.6, 2007.
- 7) H.Huang, D.Li, H.Zhang, U.Ascher, and D.cohen-Or, “Consolidation of unorganized point clouds for surface reconstruction”, ACM Trans. Graphics, Vol.28, No.5, 108, 2009.
- 8) S.Katz, A.Tal, and R.Basri, “Direct visibility of point sets”, ACM Trans. Graphics, Vol.26, No.3, pp.24.1-24.11, 2007.
- 9) T. Schlömer, D.Heck, and O.Deussen, “farthest point optimized point sets with maximized minimum distances”, SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics, pp.135-142, 2011.
- 10) C.Buchart, A.Amundarain, and D.Borro, 3-D surface geometry and reconstruction: Developing concepts and applications, chapter Hybrid surface reconstruction through points consolidation, IGI Global, 2011.