

既設プラントモデリングのための 点群データ平滑化と曲面生成

東京大学 増田 宏, 村上 健治, 藤井 智

Surface Generation and Smoothing for As-Built Modeling of Industrial Plants
The University of Tokyo: Hiroshi Masuda, Kenji Murakami, Satoshi Fujii

As-built 3D models are useful for simulating maintenance processes of manufacturing facilities. However, 3D scanners for large facilities produce very noisy point-clouds with a lot of outliers. In this paper, we introduce a method for stably eliminating outliers and smoothing very noisy mesh models.

1. はじめに

プラント設備の保守や更新を短期間・低コストで行うために、アズビルモデリングが注目されている。アズビルモデリングとは、モデルベースで作業工程の検討を行うために、既存プラントの3次元計測に基づいて3Dモデルを作成する技術の総称である。

大型設備から膨大な点群を短時間で測定するには、位相差方式のレーザスキャン技術が適していると考えられる。この方式は、現地での計測期間が短くて済むという利点がある。しかし、計測点群は、奥行き方向に裾野の広い誤差分布を持つ。また、対象物の境界上でレーザ光が分断され、極端に値がずれる異常値が多数観測される。これらの前提条件は小型部品用の点群計測とは大きく異なるため、従来のリバースエンジニアリング技術をそのまま適用することはできない。そのため、現状では点群処理に長時間の手作業が必要で、現場計測よりも点群処理がボトルネックとなっている。

図1は、計測点群とメッシュを示している。点群は、曲面が存在していない部分にも分布している。これは、レーザのスポット割れなどが原因である。それらの点は、メッシュ生成に反映されてしまう。また、メッシュ表面は、高さ数mmのスパイク上の突起から生成され、局所的には滑らかな曲面にはなっていない。ここでは、曲面上の凹凸をノイズ、曲面が存在しない部分の計測点を異常値と呼ぶ。

本研究の最終的な目的は、大きなノイズと多くの異常値を含んだ大量点群から十分な精度の幾何曲面を自動抽出することである。本稿では、その前段階として、点群から、十分滑らかなメッシュモデルを作成することを考える。

2. 計測誤差と異常値のモデル化

計測点群 $\{p_i\}$ に対して、パラメータ $\mathbf{a} = \{a_k\}$ を持つ式 $S(p; \mathbf{a})$ を当てはめることを考える。ここで、 $r_i = S(p_i; \mathbf{a})$ と置く。 $N(i)$ は、測定点 p_i の近傍点である。

2.1. 点群平滑化の従来手法

Levin [1] は点群に平面と二次曲面を当てはめるために、移動最小二乗法を用いた。この方法では、 $\rho(r) = r^2/2$ とし、基準点 p_0 をパラメータに含め、以下の式を最小化した。

$$\sum_{j \in N(i)} \rho(r_j) \exp(-|p_j - p_0|^2 / h^2) \rightarrow \min \quad \dots (1)$$

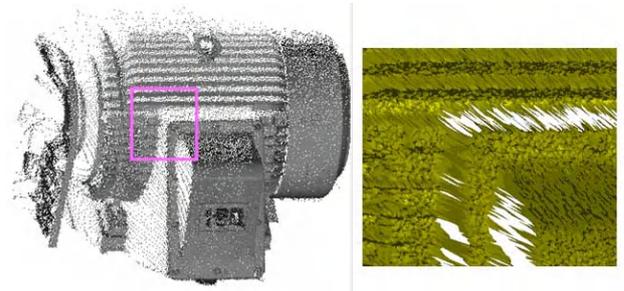


図1. 点群(左)とメッシュモデル(右)。

この式では、 p_j と基準点 p_0 の距離が定数 h に比べて十分小さければ $\rho(r_j)$ が優勢となり、大きければ急激に減衰する。Levin は、 p_i から近似曲面へ降ろした垂線の足を基準点 p_0 とし、 $S(p; \mathbf{a})$ を点と近似平面の距離として式(1)を計算した。そして、測定点を近似平面上に投影して height field を作成し、同様の方法で二次曲面当てはめを行って、点群を平滑化した。

Lipman ら[2] は、式(1)において、 $S(p; p_0) = |p - p_0|$ 、 $\rho(r) = |r|$ と置き、測定点 p_i の近傍点を代表する基準点 p_0 を計算した。この方法では、 p_i の近傍で点群密度に差がある場合、点群密度の大きい方に基準点が偏る。ここでは、この性質を利用して異常値の判別を行うことを考える。

しかしながら、誤差分布が正規分布より裾野が広く、また異常値が広い範囲に分布する場合、Levin や Lipman の方法で解を安定に算出するには、定数 h を大きく取ることが必要となる。しかし、その場合、式(1)のガウス関数は実質的に無効化され、異常値の影響を受けやすくなる。そこで、本研究では別の式を考える。

2.2. ロバスト推定

パラメータ \mathbf{a} は、目的関数 $\sum \rho(r_i)$ を最小化することで算出できる。この式を最小化する \mathbf{a} は、定義より以下の式を満たす。

$$\sum_{i=0}^n w_i \frac{\partial S(p_i; \mathbf{a})}{\partial a_k} = 0, \quad w_i = \frac{\partial \rho}{\partial r}(r_i) \quad \dots (2)$$

w_i は、計測点 p_i を式 $S(p; \mathbf{a})$ に当てはめる際の重みとなる。大きな誤差や異常値の影響を受けにくくするためには、 $S(p_i; \mathbf{a})$ の値が大きいほど、重み w_i が小さくなることが望ましい。

ロバスト推定では、誤差がどのような統計モデルに従うかによって、関数 $\rho(r)$ と重み w_i が以下のように決められる。

(a) 誤差が正規分布に従うと仮定するとき。

$$\rho(r) = r^2 / 2, \quad w_i = r \quad \dots (3)$$

(b) 誤差がラプラス分布に従うと仮定するとき。

$$\rho(r) = |r|, \quad w_i = 1 \quad (r \geq 0) \quad \dots (4)$$

(c) 誤差がローレンツ分布に従うと仮定するとき。

$$\rho(r) = \log(1 + r^2 / 2), \quad w_i = r / (1 + r^2 / 2) \quad \dots (5)$$

$r = x - 1$ としたときの各モデルの誤差分布を図2に示す。最小二乗法は、正規分布(a)を前提としているが、我々の実験では、計測点の誤差分布は(c)に最も近い。式(3)からわかるように、最小二乗法では、誤差が大きいほど重みが大きくなるため、正規分布に従わない誤差や異常値には敏感である。一方、式(5)では、最初は誤差の増大とともに重みが大きくなるが、次に減少していく。そのため、異常値はパラメータ推定にほとんど影響を与えず、ロバストである。

そこで、本研究では、式(1)の代わりに、以下の式を用いる。 h は、測定点 p_i の近傍での r_j の標準偏差に相当する量である。

$$\sum_{j \in N(i)} \log(1 + \frac{1}{2h^2} r_j^2) \rightarrow \min \quad \dots (6)$$

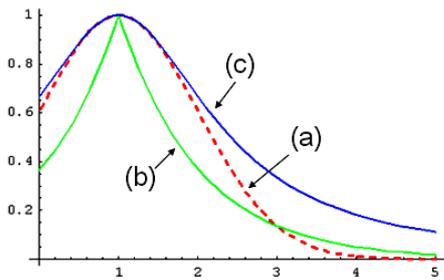


図2. 誤差分布. (a) 正規; (b) ラプラス; (c) ローレンツ.

3. 計測点群からの平滑化メッシュの生成

平滑化されたメッシュモデルの作成のために、以下の手順を取る。

3.1. メッシュ生成

位相差方式による点群計測では、原点位置はほぼ固定され、方向を決めてレーザー光を照射、対象物からの反射光の位相差から距離を測定する。したがって、球座標 (d, θ, φ) を用いると、計測点は単位球面上の点 (θ, φ) に単写像できる。位相差方式では、距離 d の誤差がかなり大きいものに対して、照射角 (θ, φ) は比較的正確に計測できている。そこで、 (θ, φ) を2次元平面上の点とみなして三角形メッシュを生成した後、各頂点に元の計測値 (x_i, y_i, z_i) を与える。図1の点群からは、図3(a)のメッシュモデルが生成される。

3.2. 異常値除去

計測点 p_i のレーザー照射方向の単位ベクトルを \hat{p}_i とする。球座標の距離 d_i を補正するために、以下の式を式(6)に代入する。

$$r_j = |p_j - k\hat{p}_i|$$

得られたパラメータ k を用いて、 p_i を $k\hat{p}_i$ で置き換える。異常値は密度の大きい点群の方向に大きくドリフトするため、移動距離が大きい点は異常値とみなして除去する。図3(b)(c)は、同じ個数の近傍点を用いて、式(1)を用いた手法と式(6)を用いた手法を比較した例である。式(6)を用いた方がよりよい結果が得られている。

3.3. 平滑化

次に、Levin の平滑化方法について考える。我々の実験では式(1)で定数 h を小さく取ると、解が収束しないケースが多かった。一方、大きい h は、実質的に最小二乗法となり、異常値の影響を受けやすい。我々は、目的関数に式(6)を用いることで、ロバストで安定した計算結果を得ることができた。図3(d)に結果を示す。

3.3. 大規模点群のメッシュ生成

大規模なプラントの計測点群は、数千万点から数億点になり、すべての点を一括して処理することは困難である。そのため、点群を複数の区画に分割して処理を行った。1.4GHzのPCで約5千万点の点群を処理するのに、約6時間を要した。図4は全体の約10分の1の約500万点からなる領域の平滑化メッシュモデルを示している。

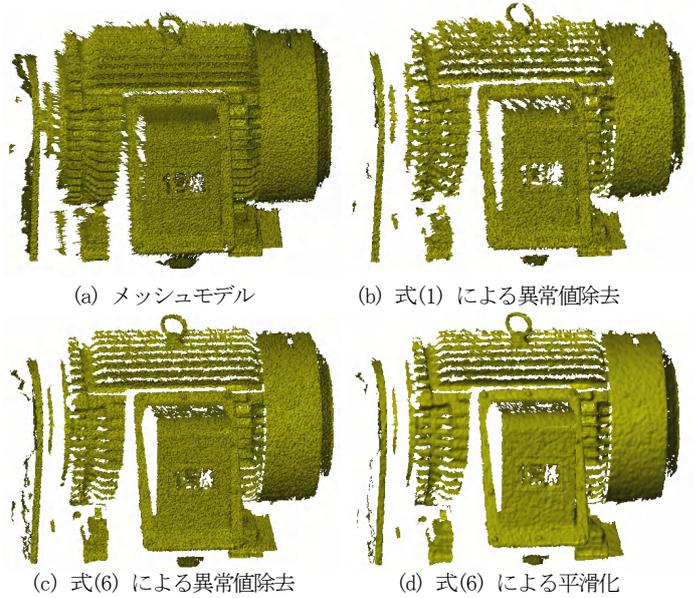


図3. メッシュモデルの異常値除去と平滑化



図4. プラントのメッシュモデル

5. まとめ

本稿では大規模点群からのメッシュモデル生成に関して、Levinの方法、Lipmanの方法、ロバスト推定を組み合わせ、ノイズと異常値の処理を行う手法を示した。今後は、平滑化されたメッシュモデルから、2次曲面などの幾何曲面を生成する処理の実装を行う予定である。

参考文献

- [1] D. Levin. Mesh-independent surface interpolation. Geometric Modeling for Scientific Visualization, 2003, 37-49.
- [2] Y. Lipman, et al. Parameterization-free projection for geometry reconstruction. SIGGRAPH 2007, to appear.