

プラントモデリングのための 大規模点群データのセグメンテーション

○東京大学 宮川俊樹, 東京電機大学 新納啓寿, 東京電機大学 角田将一,
東京電機大学 齋藤貴嘉, 東京大学 増田宏, 東京電機大学 田中一郎

Segmentation of Large-Scale Point Clouds for Modeling Industrial Plants

The University of Tokyo(UT)/Toshiki Miyagawa, Tokyo Denki University(TDU)/Hirohisa Niino,
TDU/Shouich Kakuda, TDU/Takahiro Saito, UT/Hiroshi Masuda, TDU/Ichiro Tanaka

As-built 3D models are useful for simulating maintenance processes of manufacturing facilities. So far, several 3D scanners have been developed to measure large plants, but they produce hundreds of millions of 3D points with relatively large position errors and outliers, which are difficult to process by existing reverse engineering techniques. In this paper, we propose methods for segmenting and calculating surfaces using outliers.

1. 目的

老朽化したプラントの迅速な設備更新やメンテナンスは重要な課題である。そうした作業を短時間・低コストで行うために、既存プラントの3次元計測に基づいて3Dモデルを作成するアズビルトモデリングが行われている[1]。そのための3次元計測として、近年、レーザスキャニングによる点群計測が注目されている[2]。

本稿で用いるレーザスキャナは、Z+F社のImager5003である。この装置は連続Sin波を照射し、送信波と受信波のピークの時間差から距離を計測する。計測範囲は1.0~53.5mで、10m先を3.1mmピッチで計測でき、2億点の点群計測を約6分で行うことができる。

しかし、大量点群の計測を短時間で行える反面、数億点規模の点群の処理が必要で、また異常値が非常に多いという問題がある。異常値とは、正規分布誤差では到底起こりえない誤差を持った計測値のことである。

本研究の目的は、こうした超大規模な点群データを現実的な時間で処理し、構成部品のモデルを作成することにある。通常、アズビルトモデルで必要とされる精度は、約3~5mmであるとされている。

2. 大規模プラントの計測点群の特徴

大規模建造物の3次元点群計測では、小型部品用の点群計測装置とは計測原理が異なる。短時間で数億点のデータが取得できる一方、奥行き方向に±3~5mm程度の誤差が生じる。また、対象物の境界上ではスポット光が分断され、極端に値がずれる異常値が多数観測される。これらの特徴は、小型部品のリバースエンジニアリングのための3次元計測とは大きく異なる。

図1は計測された点群を示している。この図に示すように、点のばらつきが大きく、特に境界部分では大きくずれていることがわかる。このまま処理を行うと、図1のようにノイズの極めて大きいメッシュが生成され、このようなデータに対して、円筒などの幾何曲面を当てはめるのは容易ではない。

我々の観察では、このような異常値が生じる大きな原因は、図2に示すようなスポット割れにある。ほぼすべての境界部でスポット

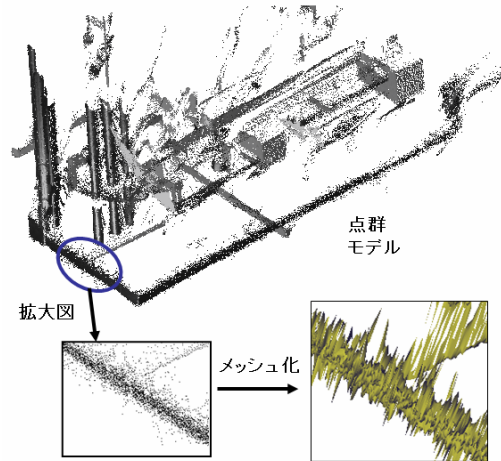


図1. 計測された点群

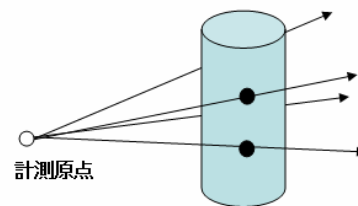


図2. スポット割れによって生じる異常値

割れと思われる異常値が観測された。遠方の対象物を計測する場合、レーザのスポット径が相対的に大きくなり、スポット割れが生じやすくなったと考えられる。スポット割れが生じると、計測値は図2の矢印方向にずれて、実際よりも大きな距離が計測される。

一方、逆にいえば、異常値が大量に生じている箇所は、「境界部」の候補であり、近傍の異常値は、円筒、平面、円錐などであれば、平面上に乗っている。通常、点群計測では境界部の正確な計測は困難であるが、このタイプの異常値には、境界部に関する幾何的な情報を保持している。そこで、本研究では、異常値を積極的に活用し、

セグメンテーションと曲面当てはめに利用することを考える。

3. メッシュ生成と異常値の検出

本研究で用いた計測装置はヘッドが2軸で回転するため、点群は球面座標に写像できる。図3 (a) は、図1で示した3次元の点群を球面上に投影し、平面に展開したものである。横軸は球面の緯度、縦軸は経度である。次に、投影した点群に対して、図3 (b) に示すように、2次元平面上でドロネー分割を施す。また、各頂点には、3次元空間における計測原点からの距離を持たせておく。図3 (b) において太線で示したのは、両端点における距離の差分が閾値よりも大きいエッジである。このようなエッジを異常値と考える。

異常値は、領域の境界を検出する手段として利用できる。2次元メッシュ上で、境界に沿って切り取り、エッジ長が長いものを削除した後に、各頂点に元の3次元座標を当てはめると、図3 (c) に示すような大きなノイズを除去した3次元メッシュを得ることができる。すなわち、2次元メッシュと3次元メッシュを連携させることにより、効率的に点群のセグメンテーションが行える。

4. 円筒の当てはめ

4.1 接平面を用いた円筒面の方程式

今回は、切り出された領域のうち、ユーザが円筒部を指定し、それらの点群に対して円筒当てはめを行なった。円筒の場合、分断されたスポット光は、計測原点を通る2つの接平面上に分布している。

図4はこの関係を示している。円筒の方程式を求めるために、まず、原点を通る2平面を法線 $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ を用いて、 $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{x} = 0$, $\mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{x} = 0$ と表す。ただし、 $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 < 0$ となるように法線の向きを決める。円筒の軸は接平面の法線と垂直なので、円筒の軸方向の単位ベクトルは、 $\mathbf{v} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2 / |\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2|$ となる。また、円筒の軸上の一点 $\mathbf{p}$ は、パラメータ k を用いて $\mathbf{p} = k(\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2)$ と書くことができる。円筒の半径は $r = k(1 + \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2)$ となるので、円筒の方程式 $|\mathbf{v} \times (\mathbf{x} - \mathbf{p})| = r$ は、結局、以下の式で表現できる。

$$|\mathbf{v} \times (\mathbf{x} - k(\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2))| = k(1 + \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2) \quad (1)$$

4.2 ロバストな当てはめ

式(1)は、未知数が一つであるため、この値を境界以外の点群を用いて計算する。一般に最小二乗法は異常値があると誤差が大きくなる。そこで、点群に対してロバストな当てはめ[3]を行い、異常値を除去する。ランダムに1点選び出し、その1点を通るようパラメータ k を求める。その k に対して、以下の評価関数を計算する。 c はノイズの大きさによって決まる定数である。

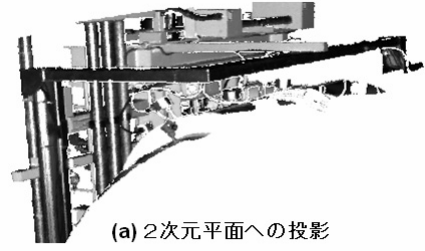
$$\sum \frac{1}{c[|\mathbf{v} \times \{\mathbf{x} - k(\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2)\}| - k(1 + \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2)]^2} \rightarrow \max \quad (2)$$

この式では、点と曲面の距離が大きいほど評価関数への影響が小さくなるため、異常値の影響を受けにくい。

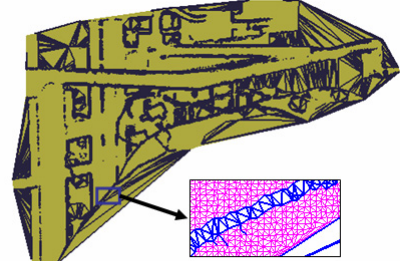
この手順を繰り返し、評価関数の値が最大となる円筒を求め、その円筒面から閾値以上離れた点を異常値とみなし除去する。

次に、精度を向上させるために、異常値除去後の点群に対して、次の1変数の非線形最小二乗法問題を解いて k の値を再計算することで、接平面の制約を満たした円筒の方程式を算出できる。

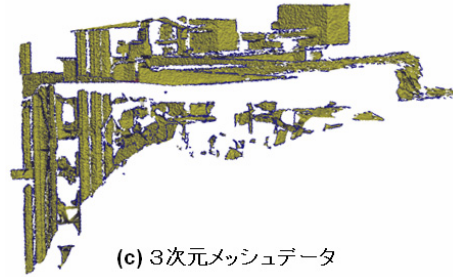
$$\sum [|\mathbf{v} \times \{\mathbf{x} - k(\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2)\}| - k(1 + \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2)]^2 \rightarrow \min \quad (3)$$



(a) 2次元平面への投影



(b) 投影点群のドロネー分割



(c) 3次元メッシュデータ

図3. 2次元投影点を用いたメッシュ生成

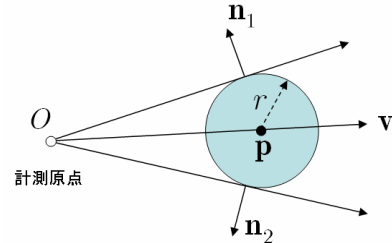


図4. 接平面と円筒

非線形最適化問題では適切な初期値の選定が大きな問題となるが、この場合には既により近似値が計算されているため、その値を用いて、円筒の方程式を計算することができる。

5. まとめ

本稿では大規模点群からのアズビルトモデル生成に関して、異常値を活用する方法を示した。異常値の原因がスポット割れであるときには、領域の境界と、曲面当てはめに異常値を利用できる。今後の課題は扱える曲面の種類を増やすこと、部品レベルへのセグメンテーション手法、部品の種類の同定法の開発である。

参考文献: [1] 矢作徹: プラントの3次元計測とモデリング, 日本設計工学会, 41(2) pp. 21-26, 2006. [2] 川村幸二: 3次元レーザスキャンによるエンジニアリング革新, 日本設計工学会, 41(2) pp. 27-31, 2006. [3] 宮川俊樹, 他: レーザスキャンデータに基づくプラントの形状モデリング, 精密工学会春季講演論文集, 2006.