

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

東京大学 宮川俊樹, 東京電機大学 角田将一, 東京電機大学 入谷太基,
東京電機大学 飯川義文, 東京大学 増田宏, 東京電機大学 田中一郎

Generation of Plant Geometry Model from Laser-scan Data

The University of Tokyo, Toshiki Miyagawa, Tokyo Denki University, Shouich Kakuda,
Tokyo Denki University, Daiki Iriya, Tokyo Denki University, Yoshiaki Iikawa,
The University of Tokyo, Hiroshi Masuda, Tokyo Denki University, 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 a framework for generating as-built models from such a point cloud, and then compare two algorithms for fitting cylinders to measured data.

1. 目的

老朽化した設備の改修による長寿命化, 迅速な設備更新は多くの企業において重要な課題となっている。そうした作業を短期間・低コストで行うためには, アズビルモデリングが有効である。アズビルモデリングとは, 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である。モデルベースで作業工程, 干渉, 改修部品の検討を行った後に実作業を行うため, 作業が短時間で確実に行え, 設備の停止期間も短縮することができる。

アズビルモデリングで現在優位を占めているのは, フォトグラメトリと呼ばれる方法で, 複数の場所から写真撮影を行い三角法で位置を計算する。多数のペア写真から線分を逐次3次元化することが必要なため, 部品点数の多いプラントの3次元化には膨大な工数がかかる。そのため, モデリングコストが非常に高くなる。

それに対して, 近年レーザスキャンによる点群計測が注目されている。この方法では, 対象物にレーザを照射して3次元座標を取得する。現場計測が短時間でできる利点があるが, 大規模建造物に適した点群処理技術がまだ未成熟で, 測量分野においてはモデリング工数や精度に関して十分な優位性が確立できていない。そこで, 本研究では大規模建造物に適した点群処理手法について検討する。

2. システム構成

2.1 点群計測装置

今回, 点群計測にはZ+F社のImager5003を使用した。この装置は連続Waveレーザ方式を用いており, 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, 水平方向に360°垂直方向に310°である。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。

2.2 点群処理の概要

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, 計測誤差が約100倍から1000倍大きく, 奥行き方向に $\pm 3\sim 5$ mm程度

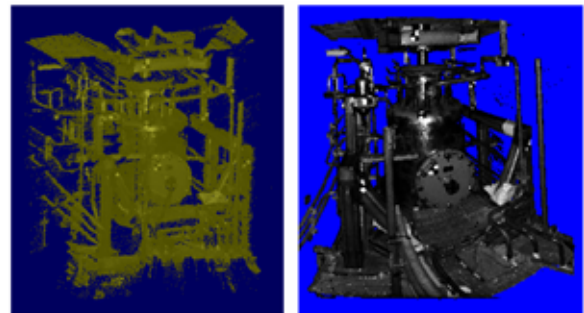


図.1 計測された点群 (左: 点群表示, 右: 画像上に投影)

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ため, それらの手法をそのまま適用することはできない。

そこで, 本研究では, (1) 数億点規模の大量点群, (2) 比較的大きな誤差, (3) 多数の異常値, (4) 多数の部品の混在, を前提とした点群処理システムを考える。図1は, 1回の計測で得られた点群(約1.7億点)の一部である。取得した点群データを一括処理するのは, 点の数が膨大なうえ, 複数部品が混在するので簡単にはできない。そこでまず, 図2に示すように, 点群を適当な処理単位に切り分け, その後に曲面の当てはめと部品の推定を行うことを考える。

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。そこで, 解像度が元の点群よりも粗い球面画像とそのデプスマップを生成し, 領域分割を行う。図1右は, 投影された明暗画像を示している。デプスマップに対して領域分割を施した結果をステンシルとして利用し, 点群を切り分ける。この処理は, 大量点群であっても比較的短時間でできる。

次に, 切り分けられた点群に対して, 曲面当てはめを行う。プラントにおける構成部品はほとんどがJIS等の規格で指定されている。また, 構成面も, 平面, 円柱, トーラスなどの単純なものがほとんどである。こうした制約に基づいて, 曲面の推定と部品の同定を行

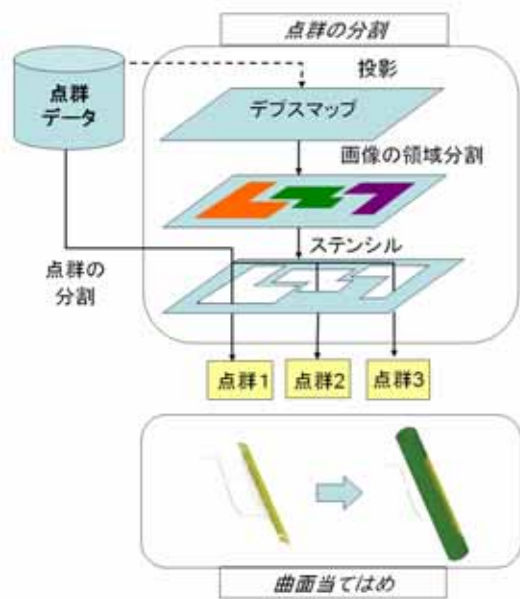


図.2 処理の概要

い、点群から自動的に立体モデルを作成することを目標とする。

3. 当てはめの手法

本稿では特に異常値を含む点群への曲面当てはめについて考える。最も多く現れるパイプ部への円柱当てはめを対象として、二通りの手法を実装して比較を行ったのでそれについて報告する。

3.1 最小二乗法

円柱は、回転軸方向の単位ベクトル \mathbf{p} と、軸状の点の位置ベクトル \mathbf{a} 、半径 R で指定できる。円柱面と点の距離の二乗和を最小にする \mathbf{p} 、 \mathbf{a} 、 R は以下のような非線形最小二乗問題となる。

$$\sum |\mathbf{p} \times (\mathbf{x}_i - \mathbf{a}) - R|^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

この最適化はLevenberg-Marquardt法を用いて解くことができる。しかし、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。この場合においても、初期値によっては大きな誤差が生じた。そこで、点群データから以下に示す方法で初期値を推定した。まず、視点と点群の重心を通る平面 P_1 を考える。平面 P_1 の法線は、平面との距離が十分近い点群の分布が直線に近くなるように選ぶ。次に平面 P_1 に直交し、視点を通る平面 P_2 を考える。平面 P_2 に十分近い点群を取り出し、円柱の中心位置を推定する。

3.2 ロバストな当てはめ

一般に最小二乗法は異常値があると誤差が大きくなる。そこで上記の方法とは別に、異常値を含む点群に対する当てはめ手法を考える。ここでは、以下の式を最大にする \mathbf{p} 、 \mathbf{a} 、 R を求める。

$$\sum \frac{1}{k |\mathbf{p} \times (\mathbf{x}_i - \mathbf{a}) - R|^2} \rightarrow \max \quad (2)$$

ここで、 k は測定機器のノイズの大きさによって決まる定数を表す。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、大きなノイズの影響を受けにくい。

この式を計算するために、ランダムに5点選び出し、その5点を通る円柱を求める。その円柱に対して、上記の評価関数を求める。

この手順を繰り返し、評価関数の値が最大となる円柱を採用する。

図3の点群は、現場計測データから手動で切り出した円柱近辺のデータで、境界部に多数の異常値を含んでいる。本手法では、このような点群に対しても円柱の方程式が計算できることを確認した。

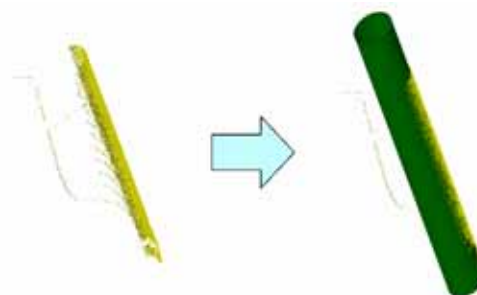


図.3 異常値を含む点群への当てはめ

4. 誤差の検討

上記の二通りの手法を実装して、試験的に作成した点群に対して円柱当てはめを行い、半径誤差を測定した。結果を表1に示す。例題は、半径10高さ50の円柱の側面上100°の範囲で分布する10000個の点群に対して、円柱面と点との符号付き距離が平均0、標準偏差0.1となるように誤差を与えた点群と、さらにそれに加えて円柱面との距離30のところに異常値を1点与えた点群を作成した。

表1: 当てはめ結果

	異常値無	異常値有
初期値	0.2393	0.30153
最小二乗法	0.05244	3.50577
ロバスト法	0.09379	0.13918

実験の結果、最小二乗法当てはめは円柱からの距離が正規分布に従っている場合には高い精度となるが、正規分布では確率的にありえない水準の異常値が1点でも含まれると、初期値以上に精度が落ちることがわかった。それに対し、ロバストな当てはめ手法では異常値が無い場合は最小二乗法に劣るが、異常値の影響を受けにくいことが確かめられた。

以上の結果から、最小二乗法では精度は高い反面、適切な初期値に加えて異常値をすべて除去することが不可欠であること、また、ロバストな当てはめ手法は精度では劣る反面、異常値に強いことがわかった。したがって、これらを組み合わせることでロバストかつ高精度な当てはめが行えることが期待できる。

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システムのフレームワークについて提案した。また、円柱に対する曲面当てはめの手法を示し、二つの手法の比較検討を行った。今後の課題としては扱える曲面の種類を増やすこと、安定したセグメンテーション手法の開発、部品の種類の同定法の開発などが挙げられる。

参考文献

G. Lukacs et al: Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori, RECCAD, Computer and Automation Institute, Budapest, 1997