

大規模点群データからの幾何曲面抽出

東京大学 藤井智, 村上健治, 増田宏,
東京電機大学 黒木翔, 中島大樹, 田中一郎

Extraction of Surface Primitives from Large-Scale Point-Cloud

The University of Tokyo, Kenji Murakami, Hiroshi Masuda
Tokyo Denki University, Kuroki Show, Nakajima Daiki, Ichiro Tanaka

As-built 3D models are useful for simulating maintenance processes of manufacturing facilities, but it is necessary to process hundreds of millions of 3D points with relatively large errors and outliers. In this research, we extract surface primitives from large scale mesh models. First, we subdivided a large mesh model into a set of connected components in a streaming manner. Then we load connected components in core memory and extract quadratic surfaces. We calculated an equation for each surface and evaluated the accuracy of fitted surfaces.

1. 目的

大規模設備の迅速な更新は多くの企業において重要な課題となっている。そうした作業を短時間・低コストで行うためには、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有効である。近年では、レーザスキャニング装置の急速な進歩により、大規模設備の点群計測が短時間で容易に行えるようになってきた。

ただし、計測自体は容易に行えるものの、大きな誤差や異常値を含む大量の点群を処理することはまだ簡単ではない。本研究では、大規模点群から生成されたメッシュモデルにセグメンテーションを施し、円筒や平面を出来る限り精度良く抽出する手法を考える。

2. 大規模点群モデルのセグメンテーション

2.1 メッシュモデル

今回実験で用いたのは、発電プラントの計測で得られる約5000万点の点群から作成された約1000万頂点のメッシュモデルであり、[1]に示す手法により異常値除去と平滑化を施されている。

大規模なメッシュモデルを少ないメモリで処理するために、ストリーミングメッシュ形式[2]を用いた。このフォーマットでは、頂点座標(X, Y, Z)と三角形の頂点インデックス(I, J, K)が混在して格納される。利用されなくなった頂点インデックスは負の値で示され、メモリ解放のタイミングがわかるようになっている。

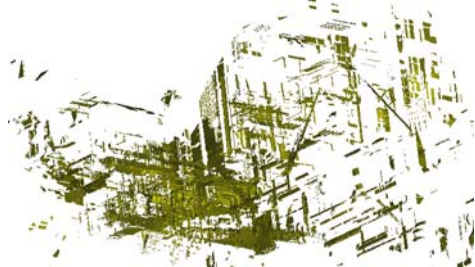


図1. 発電プラントのメッシュモデル(簡略化表示)

2.2 連結成分の抽出

アズビルトモデリングは、計測データに基づいて、作業者が対象物の情報を補いながら行うので、インタラクティブな環境が必要である。しかし、1000万頂点規模のメッシュを通常のPCで扱うのは困

難である。過度なポリゴン簡略化は細い配管のデータを損なうので好ましくない。一方、大規模設備は多数の部品から構成され、壁や床を除けば、ほとんどの連結成分はインタラクティブ処理が可能な数十万頂点以下に納まっている。そこで、本研究ではメッシュモデルを連結成分ごとに分離して処理を行うこととした。

連結成分抽出では、連結頂点に同じ領域番号を付けていく近傍探索が必要となる。そこで、必要な近傍が得られるようにストリーミングメッシュでのメモリ解放を遅延させる。図2はそのためのデータ管理を示している。[entity flag bits]は読み込まれたデータが頂点か面かをビット列で表す。[hash table]では、ファイルから読みこんだ頂点を、順序をキーとしてハッシュに格納する。各頂点には、座標、連結情報、領域番号が格納できるようにする。また、三角形が読み込まれたときは、連結頂点間に連結情報を付加する。[face queue]には、面の頂点インデックスを格納する。[finalized queue]には、利用されなくなった頂点のインデックスを格納する。

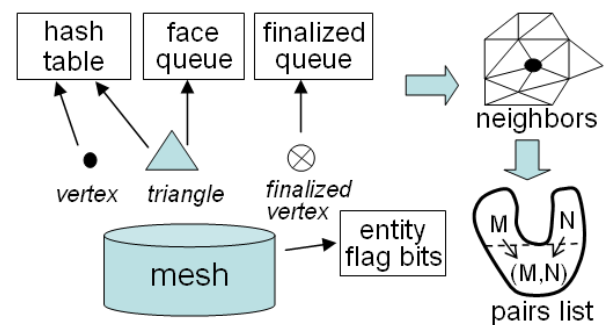


図2. ストリーミング処理で管理されるデータ

以上の情報を管理しながら以下の手順で連結成分を抽出する。

- (1) finalized queue のデータ数が閾値 N を超えたら、頂点をハッシュから順に取り出し、近傍頂点に同じ領域番号をつける。もし、探索の過程で図2の右下の図に示すように異なる番号の領域をマージする必要があるときは、その領域番号のペアを保存する。
- (2) finalized queue のデータ数が閾値 $2N$ を超えないように、古い順にメモリを解放する。それにより前後 N 個の頂点が保持される。1回目のファイル読み込みでは、領域番号のペアを作成する。2回目

の読み込みでは、領域番号のペアを参照して、連結した領域を同じファイルに格納する。頂点数が少ない領域はノイズとみなす。

本手法を約 1000 万頂点のメッシュに適用した。一つのファイルが 100 万頂点を出来るだけ越えないようにして、距離の近い連結成分が同じファイルになるように格納した。その結果、全体を 11 個のファイルに分割でき、100 万頂点を超えたのは、単一の連結成分が 225 万頂点となった 1 ファイルのみとなった。このファイルについては、頂点を単位球面上に投影し、球面上でメッシュを切断する。

2.3 セグメンテーション

次に、連結メッシュから曲面成分を抽出する。セグメンテーションは、メッシュデータをメモリ上に展開して計算を行う。ここでは、点群に対して 2 次曲面を当てはめてセグメンテーションを行った。まず、近傍 100~200 個程度の点群をシード領域として初期曲面を算出し、次に、曲面からの距離が閾値以内になる頂点を順次取り込んで領域を成長させる。曲面の種類に応じて異なるセグメンテーションが得られるが、オーバーラップした領域については、大きく成長した曲面のグループを優先させる。平面と円柱を抽出してメッシュの分割を行った例を図 3 に示す。

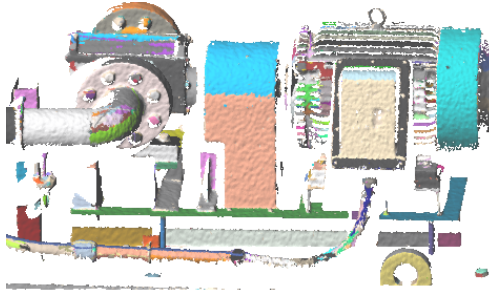


図 3. 平面と 2 次曲面の抽出

3. 曲面のフィッティング

3.1 曲面の当てはめ

点群 $\{p_i\}$ への 2 次曲面へのフィッティングは、円柱などの曲面の種類が指定されたとき、曲面のパラメータ $\mathbf{s}$ を算出する問題として定式化される。計算は Lukacs らの手法[3]を用いた。2 次曲面と点 p_i との距離 d は適当な関数 g と h を用いて以下の形式で書ける。

$$d(\mathbf{s}, p_i) = \sqrt{g(\mathbf{s}, p_i)} - h(\mathbf{s}, p_i)$$

パラメータを安定に算出するために、 $d(\mathbf{s}, p) = 0$ での一階微分値が同じになる関数 $\tilde{d}$ を用いて、下記の計算を行う。

$$\sum \tilde{d}(\mathbf{s}, p_i)^2 = \sum \{(g - h^2) / 2h\}^2 \rightarrow \min$$

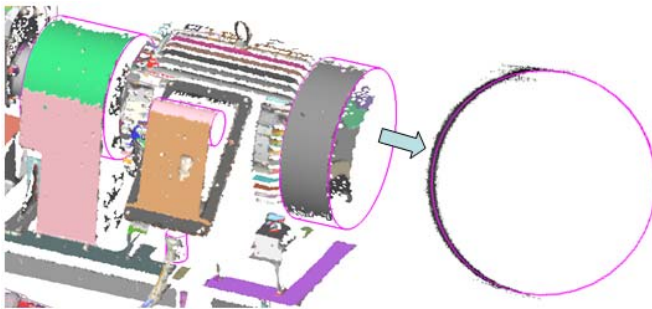


図 4. 曲面当てはめの結果 (右図は計測点群との重ね合わせ)

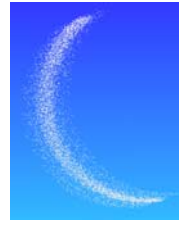


図 5. 生成した点群

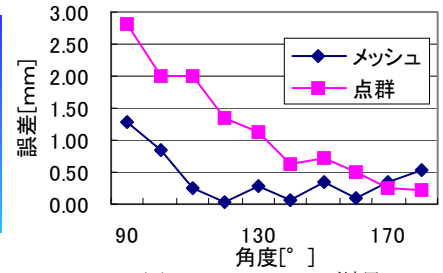


図 6. フィッティング結果

図 4 では、左図に、抽出された円柱を示している。右図は、検出された円柱を元の計測点群と重ねて表示したものである。ほぼ中立面が取られており、見た目からは十分妥当な結果であると推定される。

3.2 曲面の当てはめの精度と堅牢性

本手法の精度と堅牢性を定量的に検証するため、計測点群を擬似的に生成し、フィッティングの実験を行った。生成した点群は、半径 30mm から 400mm の円柱面で、それぞれ点の分布角度を 90° から 180° にとり、さらに計測装置の標準的な誤差とされる $\pm 6\text{mm}$ の範囲で計測方向に測定誤差を乗せた。点の数は、1000, 10000, 100000 の 3 通りとした。図 5 に、生成した点群の例を示す。本手法との比較のため、点群に対して直接フィッティングを行う方法も試みた。

図 6 に、実験結果の例として、直径 30mm、点の数 1000 の場合の両手法によるフィッティングで求めた直径の誤差を示す。この例のように、平滑化されたメッシュを用いてフィッティングを行う本手法は、点群に対して直接フィッティングを行う手法に比べ、良好な計算結果が得られることが分かった。特に点群の分布角度が小さい場合は、円柱の半径や点の数に関わらず、本手法の方が良好なフィッティング結果が得られた。レーザスキャニング装置による計測では、計測方向に対する面の角度が大きいと計測誤差が大きくなるため、分布角度が小さくても高精度が得られる本手法は有利と考える。

点群に対して直接フィッティングを行った場合、半径の誤差は最大 3.5 mm 程度だったのに対し、本手法の場合は最大 1.5 mm 程度の誤差であった。プラントのモデリングに要求される精度が 5mm 程度なので、本手法のフィッティング精度は十分高いと考える。

両手法とも点の分布角度が大きいほど、また半径が大きいほどフィッティング精度が高い傾向があった。

4. まとめ

本稿では大規模メッシュからの幾何曲面抽出手法について述べた。まずストリーミング方式で連結成分を抽出し、曲面当てはめに基づいて領域抽出を行った。また、曲面当てはめの精度検証を行った。今後の課題としては扱える曲面の種類を増やし、セグメンテーションの品質を向上させる必要がある。また、複数の方向から計測された大規模点群を連携させる手法も必要である。

参考文献

- [1] 増田, 村上, 藤井: 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, 2007 年度精密工学会秋季大会.
- [2] M. Isenburg, P. Lindstrom: *Streaming mesh*, Visualization' 05, pp. 231-238, 2005.
- [3] G. Lukacs et al: *Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori*, RECCAD, Computer and Automation Institute, Budapest, 1997.