

# 大規模点群からの曲面抽出に基づく生産設備の形状再構成

東京大学 ○増田 宏, 松岡諒

## Surface Extraction and Shape Reconstruction of Engineering Facilities

The University of Tokyo: Hiroshi Masuda, Ryo Matsuoka

In this paper, we propose a method to automatically extract cylindrical faces and rectangle faces from a large-scale point-cloud. We segment a large point-cloud into a large number of regions and detect surfaces by using the RANSAC method. Our method can detect various sizes of objects in a practical time. We introduce rules for components of engineering facilities and reconstruct object shapes by connecting detected surfaces.

### 1. はじめに

生産設備やプラント設備は、改修を行いながら長期間に渡って利用される。最近では経済環境の変化が激しいため、新規に工場を建造するよりも既存の工場を改修しながら新製品に対応していく傾向があり、設備の迅速で手戻りのない改修作業が求められている。

近年、そうした作業を支援するための手段として、中距離用のレーザスキャナによる点群データを用いた作業検証が注目されている。位相差方式のレーザスキャナを用いれば、毎秒 50 万から 100 万個の点群が取得でき、短時間で高密度の点群データが得られる。

しかし、生産設備やプラント設備には、様々なスケールの部材が大量に存在する。異常値も多く、またノイズレベルは距離や素材によってまちまちである。オクルージョンも非常に多く発生する。点群密度の粗密も大きい。こうした状況化での形状再構成では、単一部品のリバースエンジニアリングや、建物のモデリングとは異なる難しさが存在する。一方で、幸いなことに、ほとんどの構成部材は単純な曲面で構成され、標準品も多い。また、点は緯度経度に沿って、格子状に並んでいるという特徴がある。

大規模点群に基づくモデリングに関して、対話的に立体再構成を行う手法を示しているが<sup>1)</sup>、この方法ではモデリングに多くの時間を必要とするので、できる限り自動化することが求められる。本稿では、大規模点群から自動的に曲面要素を検出し、部材の再構成を行う手法について論じる。

### 2. 曲面抽出

#### 2.1 セグメンテーション

ここでは、PTX フォーマットで記録された点群を対象とする。これは、計測装置を原点とする座標系で点群座標を記述し、世界座標系への変換行列をヘッダ領域に持つフォーマットである。また、緯度と経度を主軸とした距離画像になっている。

大規模点群を処理するために、まず、距離画像から連結領域を抽出し、点群を分割する。この際、隣接する 2 点が同一の曲面上に乗っているかどうかを判定する必要があるが、計測された点群は、計測装置からの距離が大きくなるに従って点間距離が大きくなる。大規模設備のモデリングにおいては、この影響を考慮する必要がある。

ここでは、距離画像の隣接点が同一面上に存在するかどうかの判定に、 $s_i = c |\mathbf{p}_i|^2 \Delta \phi / |(\mathbf{p}_i, \mathbf{n}_i)|$  を閾値として用いる。  $\Delta \phi$  は点群

計測における角度のピッチ、 $\mathbf{n}_i$  は点  $\mathbf{p}_i$  における法線で、 $k$ -近傍の座標から計算される。また、 $c$  は定数で、ここでは  $c=1.2$  としている。隣接点との距離がこの値以下なら連結、それ以外は非連結とする。図 1 は、距離画像を連結成分に分割したものである。全体が約 13000 個の領域に分割されている。



Fig. 1: Continuous regions

#### 2.2 曲面計算

連結領域に対して RANSAC 法を適用し、平面と円柱の候補となる点群を検出する。RANSAC 法はロバストであるが、大きな領域から小さい曲面を検出するには、非常に多くの試行が必要となる。ここでは、Schnabel らの手法<sup>2)</sup>と同様に、平面は 3 個、円柱は 2 個の点から計算するものとする。連結領域に含まれる点の個数を  $N$ 、曲面要素の点が  $n$  個とすると、曲面を確率  $p$  で検出できる最小の試行回数は、 $T = \log(1-p) / \log(1-(\delta n/N)^k)$  で計算できる。ここで、 $k$  は平面では 3、円柱では 2 である。 $\delta$  は、質のよい点群の比率であり、誤差が正規分布に従うとすると、 $0.5\sigma$  以内の比率は 0.38 となる。この式は  $n/N$  が小さいときには非常に大きな値となり、面積の小さい面の検出は実質的に困難となる。設備のモデリングでは、部材のスケールの差は非常に大きいため、探索領域を限定するための工夫が必要である。

図 1 の例では、床面や壁を介して部材が連結したときに大きな連結領域が得られている。そのような部材は床面部分の点群を除くことで非連結となる。床面や壁面は大きな面積を占め、少ない試行回数で検出できるので、大きな面積の平面が検出されたときはその面を除外して連結領域を再計算すれば探索領域を限定できる。本手法では、連結領域を再帰的に再計算していくことにより、面積の小さい面でも検出できるようにしている。

また、RANSAC 法によって曲面領域が検出できたら、それらに対して最小 2 乗法で曲面の方程式を算出して、計算精度を向上させる。

ここで注意すべきなのは、長い梁のように、単一であっても、部分によって計測装置からの距離が大きく異なる部材の計算である。計測装置から近い部分では点群密度が高く精度がよいが、遠い部分では疎で低精度になる。この影響に起因する誤差は、大規模構造物のモデリングでは無視できない。

この影響を回避するには、点群密度とノイズレベルを考慮する必要がある。ノイズが正規分布に従うとき、曲面式:  $S(\mathbf{p}; \mathbf{a}) = 0$  を以下の式で計算するとき最尤となる。ここで、 $\mathbf{a}$  は曲面式の係数、 $\sigma_i$  は点  $\mathbf{p}_i$  における標準偏差である。

$$\sum (S(\mathbf{p}_i; \mathbf{a}) / \sigma_i)^2 \rightarrow \min$$

距離の差が十分に小さければ、 $\sigma_i$  を一定として無視できるが、計測装置によっては各点で異なる。我々の実験では、例題で用いたレーザ計測装置 Z+F Imager5003 では標準偏差を  $\sigma_i = k / \sqrt{I_i}$  で近似できた。 $I_i$  はレーザ反射強度であり、 $k$  はレーザ計測装置に依存する定数である。この近似式は計測装置によって異なり、Leica ScanStation C10 では、 $\sigma_i$  は距離に因らずほぼ一定であった。また、点群密度は距離に近いほど大きくなるので、そのまま最小 2 乗法を用いると、近くの部分が過度に重視され、遠方でずれを生じる。この影響を加味して、最小 2 乗法は以下の式で計算する。

$$\sum (|\mathbf{p}_i| \cdot S(\mathbf{p}_i; \mathbf{a}) / \sigma_i)^2 \rightarrow \min$$

### 2.3 曲面検出

約 4000 万点の点群データに対して、曲面検出処理を行った。図 2 は、検出された曲面、レーザ反射強度から作成した画像、その画像上に曲面を上書きした図を示している。この例では、3981 個の平面と 1141 個の円柱が検出されている。曲面の最小点数は 300 点と設定した。計算時間は、3GHz の CPU、12GB のメモリを搭載した 64bit PC で 4 分 50 秒であった。最大の曲面は 25 万点、最小は 300 点で、さまざまなスケールの面が実用的な時間で検出できている。

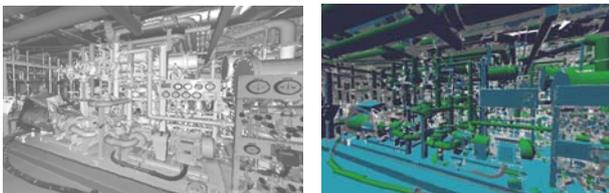
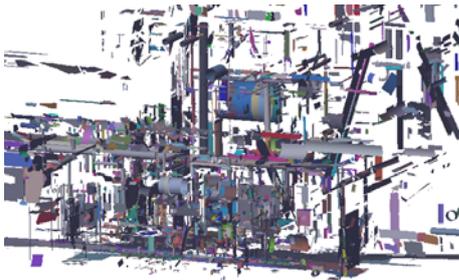


Fig. 2: Surface extraction

### 4. 形状再構成

図 2 で検出された曲面に関して、隣接する曲面を調べることで、配管などの標準部品の形状を再構成することを考える。

円柱は端面で、平面は境界付近で、他の曲面と接合すると考えられる。そこで、円柱については、中心軸の端点、平面は境界上の点

を kd ツリーに入力し、近傍面を探索する。立体を再構成するために、以下の規則を用いて曲面をグループ化する。

- (1) H 鋼などの部材は、直交または平行な構成面で構成されるので、ある閾値内にある平行または直交する平面群をグループ化する。閾値は規格表の寸法に基づいて決める。
- (2) 配管は、軸が同軸。直交または 45 度に交差する円柱から構成されるので、その条件を満たして隣接する円柱群を検出する。また、配管は、フランジやエルボなどの部材によって接続される。図 3 は検出された円柱の図を示している。円柱を接合する部材については、検出された円柱から推定し、その形状に相当する点群が存在するかを検証する。接合部材を図 4 に示す。いずれも、接続する円柱が決まれば、形状が 1, 2 通りに決まる。以下に検出規則を示す。
  - (1) 半径が同じ円柱が微小な間隔で隣接すれば結合する。
  - (2) フランジ径と一致する円柱があればフランジと見做す。
  - (3) 半径が同じ同軸円柱が十分な間隔で隣接するとき、その間にフランジが存在するかを検証する。
  - (4) 同じ半径の円柱が端点付近で直交すれば、エルボが存在するかを検証する。端点以外で直交するときは、ティーが存在するかを検証する。
  - (5) 半径の異なる同軸円柱が接合するとき、レジューサが存在するかを検証する。

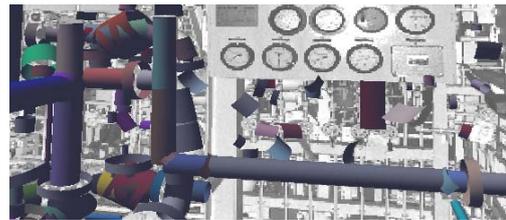


Fig. 3: Extracted cylinders

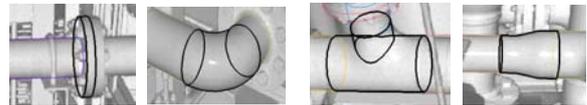


Fig. 4: Features

以上の規則を用いることで、配管形状の再構成が行える。ただし、曲面の誤検出や曲面が大きな誤差を持つ場合も少なくなく、これらに対処する方法については今後の課題である。

### 5. まとめ

本稿では、大規模点群から平面と円柱を自動検出し、それらを組み合わせることで、標準部品を再構成する方法を示した。

今後は、安定した形状再構成法や、規格表にない立体形状の再構成を検討していく予定である。また、本稿で用いたレーザスキャナは初期モデルで精度が低いので、最新のスキャナを用いることで高精度な形状再構成ができるかを検討していきたい。なお、本研究は科学研究費補助金(21360069)の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] 画像インターフェースを用いた大規模点群からのソリッドモデリングシステム: 増田宏, 機械学会論文集(C 編), 76 巻 771 号 C 編, pp.2748-2752, 2010.
- [2] Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, R. Schnabel, et.al., Computer Graphics Forum, 26(2), 214-226, 2007.