大規模点群からのトーラスと楕円体の抽出

東京大学○松岡 諒，増田 宏

Extraction of Tori and Ellipsoids from Large-Scale Point-Clouds

The University of Tokyo: Ryo Matsuoka, Hiroshi Masuda

Recently, number of research to reconstruct 3D models of factories is more and more increasing. By reconstructing such 3D models, we can add more information which we can't deal with 2D models of factories such as design drawing. This leads to improvement of productivity or reduction of costs. Factories are composed of many primitive shapes, such as spheres, cylinders, planes, cones, tori, ellipsoids and so on. We can reconstruct comparatively simple shapes such as spheres, cylinders, planes. However, it has been considered to be difficult to fit tori and ellipsoids to point clouds scanned by laser scanners, because it is needed to calculate many curve parameters by non-linear optimization methods. Tori and ellipsoids are used as shapes of elbows and valves. So, reconstructing these shapes is important to reconstruct 3D models of factories. In this study, we attempt to consider practical curve fitting methods by reducing degree of freedom based on information obtained from objects which are near the target.

1. はじめに

近年のレーザースキャナーの向上に伴い，計測された大規模点群からプラントの 3 次元形状を再構成するための手法の開発が求められている．プラントの 3 次元形状を再構成する事でより多くの情報を付加し，生産性の向上やコストの低下に繋げることができる．

プラントを構成する部材の多く，平面，円柱，球，円錐，トーラス，楕円体といった曲面形状で構成されている．トーラスと楕円体はエルボやバルブ等の部材形状に用いられている．円柱，平面，球は自由度が小さいため，レーザースキャナーで得られた点群から実用的な精度での形状再構成が可能である．

しかしながら，トーラスは自由度が 7 であり，またバルブの楕円体も回転体であるため自由度は 7 である．プラントにおいてはレーザ計測によって対象の一部分しか点群が得られないことが一般的であり，多くのノイズを含む．そのため，このような自由度の大きな形状の曲面フィッティングでは計算が非常に不安定になり，実用的な曲面計算は困難であった．本研究ではこの問題について扱う．

プラントのモデリングに関しては，周囲の構成物における制約条件を用いて，曲面計算における自由度を減らせることが多い．例えば，図 1 のようにエルボに接続する二つの円柱のパイプが得られている場合，エルボの径や軸の方向などが得られるため，自由度を 1 まで下げることが可能である．

そこで本研究では，実用的に想定される制約に基づいてトーラスと楕円体の自由度を減らすことで，実用的な精度での曲面検出を行う手法を検討する．

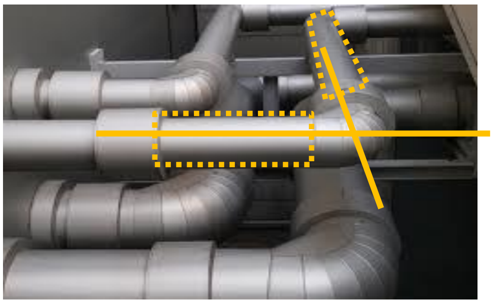

図 1　周囲の構成物からの軸の推定

2. 提案手法

バルブが使われている状況として，以下の場合が考えられる．

- 一つのパイプに接続している．
- フランジに接続している．

また，エルボが使われている状況として，以下を想定する．

- ２つのパイプに接続している．
- １つのパイプに接続している．
- フランジに接続している．

本研究では，このような条件下での曲面再構成手法を考える．

曲面当てはめには RANSAC 法と最小二乗法を用いる事が多い．これらを組み合わせて用いる事も多く，その場合，RANSAC 法で曲面パラメータを計算し，その値を初期値とする非線形の最小 2 乗法で精度を向上させる．そこで，本研究では，RANSAC 法と最小 2 乗法による曲面再構成手法を考える．

さらに，対象部材に関する実データや擬似データに対して提案手法による形状当てはめを行うことで，提案手法の有効性を検証する．

2.1 中心軸が既知の楕円体の計算

中心軸がわかっている状況では，図 2 のように軸上の 1 点，大半径，小半径の 3 パラメータによって楕円体を決定することができる．この場合の自由度は 7 から 3 まで減らすことができる．点群を中心軸の周りに回転し，一つの平面上に投影すれば楕円となる．したがって，適当な座標変換を施せば，この問題は式(1)の楕円のフィッティング問題に帰着する．t は，中心軸上の 1 点を指定するための媒介変数である．計算法を以下に示す．

$$\frac{(x-t)^2}{R^2}+\frac{y^2}{r^2}=1 \tag{1}$$

RANSAC 法：投影面上のランダムな 3 点を用いて楕円のパラメタを計算し，楕円から一定の距離にある点の個数の多さによって，パラメータを計算する．楕円との距離は，図 3 におけるθの値を式(2)から計算した上で，式(3)から求めることができる．

$$(R^2-r^2)sin\theta cos\theta - Rx_i sin\theta + ry_i cos\theta = 0 \tag{2}$$

$$D=\sqrt{(x_i-Rcos\theta)^2+(y_i-rsin\theta)^2} \tag{3}$$

最小二乗法：RANSAC 法によって計算されたパラメータを初期値として，(4) で表される周囲の点群に対する誤差の二乗和を最小にするパラメータを，非線形最適化手法によって計算する．

$$\sum\left\{\frac{(x_i-t)^2}{R}+\frac{y_i^2}{r^2}-1\right\}^2 \to \min \tag{4}$$

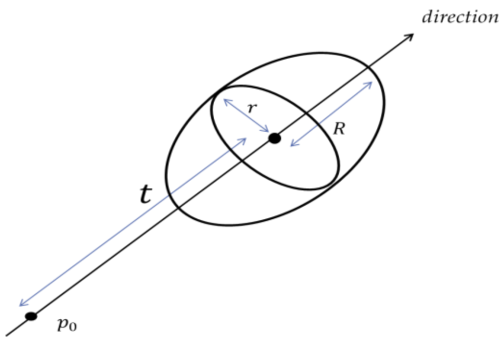

図 2 楕円体の決定パラメータ

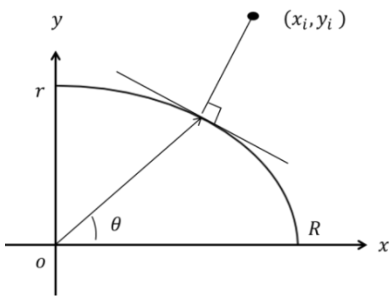

図 3 楕円表面からの距離の計算

2.2 接続する２つの円柱が既知なトーラスの計算

図 4 は既知の二つのパイプの軸を含む平面を真上から見た様子であり, この場合に決定すべきパラメータについて検討する.

まず, 2 つの円柱の半径から, トーラスの小半径を求めることができる. 2 つの円柱とトーラスが滑らかに接続するためには, エルボの中心がパイプの二つの軸を含む平面上にある必要があり, さらに軸が平面に垂直である必要がある. また, エルボが 4 分の 1 トーラスであるためには, 中心がパイプの二つの軸の二等分線を通る必要がある. これらの条件から, トーラスを再構成するためには, 図 4 におけるパラメータtを求めれば良い.

RANSAC 法: トーラスの軸を Z 軸, 図 4 のトーラス中心が乗っている直線を Z 軸とする. トーラス上の任意の 1 点の座標と法線から決まる直線 L_i は, トーラスの中心軸と交わることが必要である. したがって, 直線 L_i と XZ 平面との交点を求めることで, パラメータ t が決定する. ここでは, 効率化のために, ランダムな 2 点のパラメータが一致した場合のみ, トーラス上の点の個数を数える.

最小 2 乗法: トーラスからの距離をパラメータ t を用いて表し, RANSAC で得られた t を用いて非線形最適化を行う.

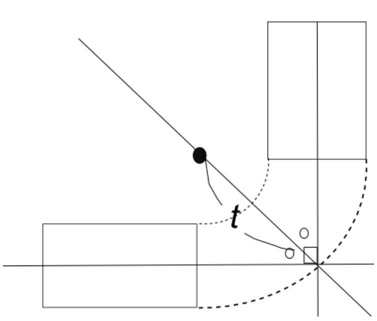

図 4 トーラスの決定パラメータ（i）

2.3 接続する一つの円柱が既知のトーラスの計算

トーラスに接続する 1 つの円柱が分かっている状況において, 図 5 は既知のパイプと, エルボのトーラスを表している. 円柱の半径からトーラスの小半径が決定できる. また, トーラスの大円は, 円柱の軸に接する. そのため, この場合のトーラスを決定するためには軸上におけるトーラスの大円が接する位置を表すパラメータt, 円柱の軸まわりの角度を表すパラメータw, パイプの軸からトーラス中心までの距離Rの 3 つのパラメータを求めれば良い.

RANSAC 法: ランダムな 3 点を$\boldsymbol{p_0}, \boldsymbol{p_1}, \boldsymbol{p_2}$とし, それぞれの法線方向ベクトルを$\boldsymbol{n_0}$, $\boldsymbol{n_1}$, $\boldsymbol{n_2}$, 既知の方向ベクトルを$\boldsymbol{n_l}$とする. 2 つのパラメータt_0, t_1によって, $\boldsymbol{p_0}$, $\boldsymbol{p_1}$を通るそれぞれの法線方向の直線を表すことが出来る. 軸がこの 2 つの直線と交わり, さらに$\boldsymbol{p_2}$を通る法線方向の直線が軸を通るという条件から, ベクトル三重積に関する式(5)が得られる. また, 既知の軸とトーラスの軸が直交するという条件から式(6)が得られる. 式(5)(6)から軸を計算し, 得られた情報を用いて残りのパラメータを決定する. トーラスの小半径と円柱の半径を比較することで, 有効性を検証する.

$$[(\boldsymbol{p_0} + t_0\boldsymbol{n_0} - \boldsymbol{p_2}), (\boldsymbol{p_1} + t_1\boldsymbol{n_1} - \boldsymbol{p_0} - t_0\boldsymbol{n_0}), \boldsymbol{n_2}] = \boldsymbol{0} \tag{5}$$

$$[(\boldsymbol{p_1} + t_1\boldsymbol{n_1} - \boldsymbol{p_0} - t_0\boldsymbol{n_0}), \boldsymbol{n_l}] = \boldsymbol{0} \tag{6}$$

最小 2 乗法: トーラスを, 既知の軸上の点からの接点までの距離t, 既知の軸とトーラスの軸との距離R, 軸の方向を表すパラメータwの 3 パラメータで表し, RANSAC で得られた結果を用いて非線形最適化を行う.

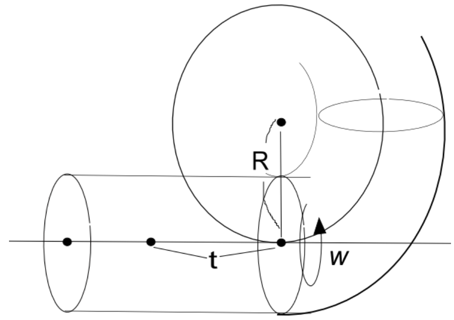

図 5 トーラスの決定パラメータ（ii）

3. 検証結果

図 6 はバルブの疑似データに対して提案手法により楕円体当てはめを行ったものである. 軸周りに関して半分の点群しか得られていない状況を想定し, 3 次元座標に関して σ=3.0 の標準偏差に従うノイズを加えた. 2 つの半径の比に関しては 1 対 2 とし, 軸方向の長さが短くなるようにした. 正しい軸を入力することで, 妥当な当てはめ結果が得られている事が確認できる. しかし, ノイズのレベルや得られている部分の割合の違いによって妥当な当てはめ結果が得られない場合や, 同じ割合でも楕円体のどの部分が得られているのかによって成功しない場合が確認された.

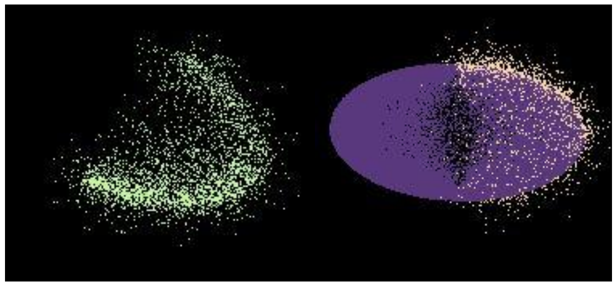

図 6 軸が既知の場合の楕円体形状再構成

4. まとめ

対象の周囲の構成物からの情報に基づいて, 曲面の自由度を減らすことができる状況での曲面検出手法について検討している. 今後は, 疑似データや実データを用いた詳細な実用性の検証や, 制約条件の差異に伴う誤差への許容度の違い等の検証を行う予定である.

参考文献

1) Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R.: Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, Computer Graphics Forum, 26(2), 2007, 214-226.
2) Lukacs,G.;Marshall, A.D.; Martin, R.R.: Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation, Proceedings, 5th European Conference on Computer Vision, pp. 671–686, 1998.