

要 旨

近年、製品のライフサイクルの短命化に伴い、プラント設備の変更・増設が頻繁に繰り返されている。そこで、設備をレーザ計測機で計測したデータから3次元形状モデルを構築することで管理工程を効率化することが期待されている。本研究では、プラント施設のレーザ計測点群中から、設備の中に良く現れるパイプなどの線状構造物を自動的に認識抽出することを目的とし、構造物の空間中の存在位置と姿勢とを自動的にラフに認識するアルゴリズムの開発を行う。

1 はじめに

近年、化学、材料、食品プラントでは、商品のライフサイクルの短命化に伴い、既存設備の更新や変更の頻度が高まっている。しかし、図面データ上に既存設備の実態が正確に記載されていないケースが多く、更新や変更工事の際に、想定外の配管や機器間の干渉が起き、工期遅れや追加費用発生が頻繁に生ずる問題を抱えている。そこで現在、生産設備やプラント設備のレーザ計測データを利用し、既存設備の実態が反映された3D形状モデル(as-built型モデル)を作成し、工事の際の配管等の部品間干渉などの想定外作業を無くし、工期短縮とコスト削減をはかる動きが出てきている[1][2]。しかし、プラント設備をレーザスキャナで計測した点群データは、非常に膨大かつ大きな計測ノイズを多く含んでいる。そのため、点群データから配管などの3次元モデルを構築するには、現在多くの手作業に頼っており、その自動化が求められている。

そこで本研究では、プラント設備の3次元モデル化では必須の対象となるパイプやH型鋼といった線状構造物を、レーザ計測点群内から自動的に認識し、モデル化する手法の開発を目的とする。本報では、まず円筒状の配管の空間内の存在位置と姿勢をラフに自動認識するアルゴリズムの開発を行う。

2 法線テンソルに基づく配管の認識

2.1 アルゴリズム概要

本研究で提案するアルゴリズムの概要を図1に示す。本アルゴリズムは、ジョイントで接続された複数本の径の異なるパイプ群を一地点からレーザスキャナで計測した点群を入力とし、この点群から個々のパイプ直進部分を認識し、径と位置、走行方向を認識する。

まず局所2次曲面フィッティング[3]により、各点の法線ベクトルを推定した後、法線テンソルの固有値解析[4,5]を行い、パイプ直進部の頂点群と、エルボや連結部分の頂点群とに分離を行う。その後、直進部分の頂点群に対してRegion Growingによるセグメンテーションを行い、個々の直進部に対応する領域に頂点群を分割する。その後、分割された頂点群に対して、円筒面をフィッティング[6]して、パイプの径と位置、走行方向を抽出する。以下にその詳細を述べる。

2.2 法線ベクトルの認識

まず、計測点群内の各頂点 v_i の初期法線ベクトル \mathbf{n}_i を、 v_i の近傍頂点群 $N(i, l_1)$ に対して最小二乗フィッティングされた平面の法線ベクトルとして計算する。 $N(i, l)$ は、 v_i を中心として、ユークリッド距離 l 内にある頂点 v_j を含む頂点集合である。次に、別な近傍頂点群 $N(i, l_2)$ をこの平面上に投影し、算出した各投影点の2次元座標 (u_j, w_j) から、最小二乗法を用いて、2次多項式曲面のフィッティングを行い[3]、頂点 v_i に対応する曲面上の点における単位法線ベクトル \mathbf{n}_i を、頂点 v_i の法線ベクトルとする。

2.3 法線テンソルの作成

入力点群の各頂点 v_i の近傍頂点群 $N(i, l_3)$ が持つ法線ベクトル集合から法線テンソル S_i を式(1)で計算する。

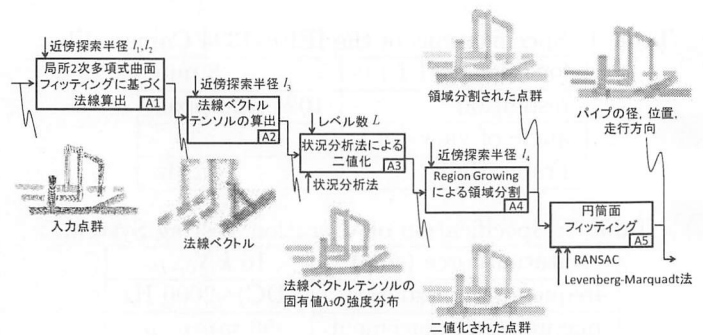


図1 法線テンソルに基づく配管認識アルゴリズム

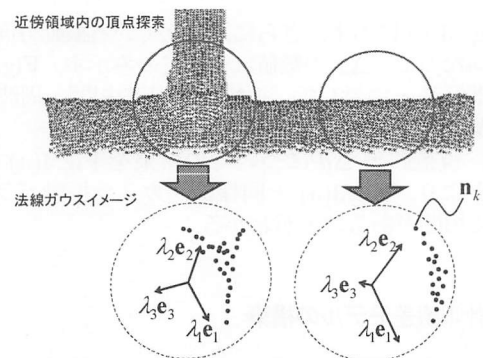


図2 法線ガウスイメージとテンソルの固有ベクトル

$$S_i = \frac{1}{|N|} \sum_{k \in N(i, l_3)} \mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T \quad (1)$$

次に法線テンソル S_i の固有値分解を行い、 S_i の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$)と、固有ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ を得る。

この固有値・固有ベクトルは、図2に示すように、近傍 $N(i, l_3)$ に含まれる全法線の法線ガウス球上での分布状況を示している。すなわち図2のように、パイプ直進部分の頂点近傍では、法線ベクトルがガウス球上で単一平面上に分布し、固有値 λ_3 が λ_1, λ_2 に比べ非常に小さくなる。これに対し、エルボや連結部分の頂点では、法線ベクトルが3次的に分布するため、前者の場合に比べ λ_3 が大きくなる。

従って、法線テンソルの最小固有値 λ_3 に適切な閾値を設けることで、計測点群内の各点周辺がパイプ直進部か、もしくはエルボや連結部分であるのか、のラフな判別が可能となる。

2.4 判別分析法による二値化

法線テンソルの最小固有値 λ_3 の適切な閾値は、判別分析法により設定した。いま各頂点 v_i の法線テンソル S_i が持つ固有値 λ_3 の分布を閾値 t で2つのクラスに分割したとき、2つのクラスが最も分離するようにパラメータ t を決定する。ここで全頂点の固有値平均を M_T 、クラス内分散を σ_B^2 、クラス間分散を σ_B^2 、全頂点の固有値の分散を σ_T^2 とすると式(2)の関係が成

り立つ。

$$\sigma_T^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2 \quad (2)$$

ここで、2つのクラスを分離するための尺度としてクラス間分散とクラス内分散の比を採用し、これを判別比とすると、判別比は式(3)で表わせる。

$$\frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2} = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2 - \sigma_B^2} \quad (3)$$

ここで、 σ_T^2 は t に依存しない定数であるので、判別比を最大にするため、 σ_B^2 を最大になるように閾値 t を設定する。

2.5 Region Growing による領域分割

上述の処理により「パイプ直進部」と判定された頂点群を対象として、ランダムにシード頂点 v_s を1点選択し、頂点 v_s の近傍 $N(s, l_s)$ の探索を行い、新しい「パイプ直進部」判定点群をこの領域に加える。そして、新しく得られた頂点群に含まれる頂点一つ一つを新たなシード点として近傍探索を行い、新しい頂点群を得る処理を、探索範囲内に対象頂点が存在しなくなるまで繰り返すことで、Region Growingを行う。この処理を、対象点が存在しなくなるまで繰り返して、個々の直進部に対応する領域に分割された頂点群を得る。

2.6 円筒面フィッティングによるパラメータ抽出

分割されたパイプ直進部の頂点群に対して、2.2の処理で求めた2次多項式曲面から最大主方向ベクトル \mathbf{d}_{max} を求め、これを単位球へ投影し、最大主方向ガウスイメージを作成する。ガウスイメージにフィッティングする平面をRANSACによって求め、この平面の法線ベクトルをパイプの軸ベクトル初期値とする。さらに、この平面に投影した頂点にフィッティングする円を最小二乗法によって求め、円の中心座標と半径の初期値を得る。次に、これらの初期値をもとにパイプ直進部の全頂点群に対してLevenberg-Marquadt法による非線形最小二乗フィッティング[6]を行い、最終的なパイプの径、位置、走行方向を抽出する。

3 実行結果

外径32.2mmと48.2mmの塩化ビ製T字パイプを組み立ててプラント内部の配管を再現したもの(概略寸法:横900mm,奥行き360mm,高さ370mm)を図3、これを、赤外線レーザー計測器(DeltaSphere3000, 解像度:距離0.25mm, 角度0.015度)を用いて前方から計測し、得られたVRMLデータからパイプ部分以外の頂点データを除き、頂点座標のみを取り出して表示した入力点群を図4に示す。

この入力点群データ(頂点数:20652)を入力とし、提案アルゴリズムによるパイプ部分の抽出を行った。近傍領域探索の径、 l_2, l_4 は、複数のパイプ上の頂点を同時に認識する危険性を減らすため、径を出来る限り小さく設定した。 l_3 は径を小さくすると、エルボや連結部分の頂点群が十分に認識されないため、頂点群が上手く分離されず、大きくすると、異なるパイプ上の頂点を同時に選択してしまい、パイプ直進部の頂点群が認識されない可能性がある。そのため、パイプの半径より小さい範囲で、かつ最低限の頂点群の分離が行われる径を実験的に求めた。この結果、 $l_1=10.0\text{mm}$, $l_2=1.0\text{mm}$, $l_3=12.0\text{mm}$, $l_4=1.0\text{mm}$ と設定した。

法線テンソルの最小固有値 λ_3 を図示した結果を図5、判別分析法による二値化を行った結果を図6、Region Growingによる領域分割の結果を図7に示す。判別分析法では、 λ_3 (最大値0.133, 最小値 1.06×10^{-6})を256段階のレベルに分割し、得られた閾値 t は0.045であった。直進部分の頂点群に円筒面をフィッティングした結果を図8、認識されたパイプの外径と実際のパイプの外径との誤差を比較した結果を表1に示す。図8より、パイプの位置と走行方向を正しく認識出来ていることが確認できる。表1から、一部を除き外径誤差は6.0[mm]程度に収まっており、パイプの規格品とのマッチングを行えば、正しい外径を認識可能であると思われる。

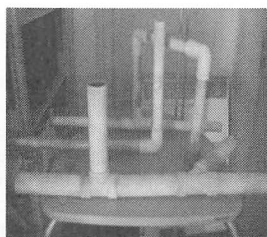


図3 計測したパイプ

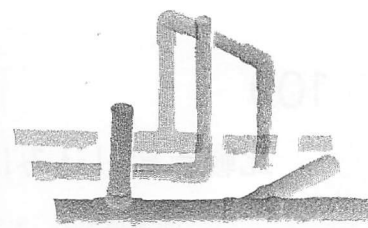


図4 入力点群データ

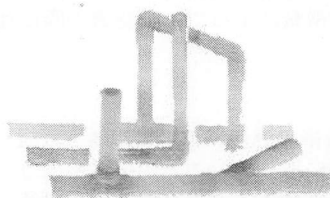


図5 λ_3 強度分布

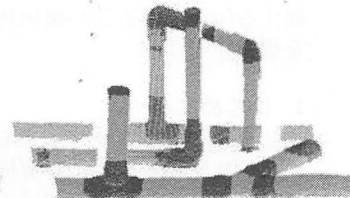


図6 二値化された点群

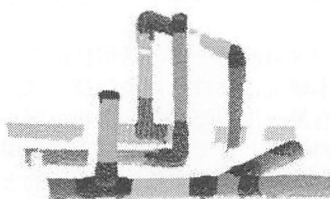


図7 領域分割結果

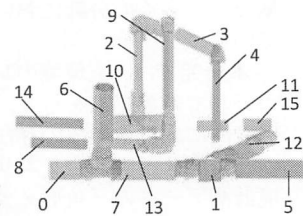


図8 円筒面フィッティング結果

表1 パイプの外径の誤差[mm]

領域	認識した外径	実際の外径	誤差	領域	認識した外径	実際の外径	誤差
0	46.3	48.2	-1.9	8	26.1	32.2	-6.1
1	56.6	48.2	8.4	9	26.6	32.2	-5.6
2	21.5	32.2	-10.7	10	44.6	32.2	12.4
3	32.6	32.2	0.4	11	26.7	32.2	-5.5
4	19.3	32.2	-12.9	12	48.7	48.2	0.5
5	46.8	48.2	-1.4	13	26.7	32.2	-5.5
6	49.0	48.2	0.8	14	26.7	32.2	-5.5
7	46.8	48.2	-1.4	15	30.8	32.2	-1.4

4 おわりに

法線テンソルの固有値解析, Region Growing と円筒面フィッティングを組み合わせ、計測点群からパイプの径、位置、姿勢を自動的に認識、抽出するアルゴリズムを開発し、実験によりその有効性を確認した。今後は、パイプ以外の背景物体による影響、各領域点群からのオクルージョン部の補充、パイプの連結性の認識、データベース上の規格品とのマッチングによるモデル整形などを行う予定である。

参考文献

- [1] SPAR2009J 3次元計測フォーラム講演資料, <http://www.sparj.com>.
- [2] 川村幸二, 「連載:プラントライフサイクルにおける3次元計測の活用」, <http://www.sparj.com>.
- [3] 溝口 他: "Region Growing/Mergingを用いた効率的なメッシュセグメンテーション", 精密工学会誌74(7),752-759 (2008)
- [4] Qian-Yi Zhou, Ulrich Neumann: Fast and Extensible Building Modeling from Airborne LiDAR Data, ACM GIS, 7, (2008)
- [5] Leo Reyes, Gérard G. Medioni, Eduardo Bayro-Corrochano: Registration of 3D Points Using Geometric Algebra and Tensor Voting, International Journal of Computer Vision, 75(3), 351-369 (2007)
- [6] C.M.Shakarji: Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 103, 6, (1998) 633.