

大規模環境レーザ計測点群からのパイプ及び接続要素の自動認識

北海道大学 ○川島 千明, 金井 理, 伊達弘昭 国立ソウル大校 金 泰完
要 旨

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配管システムを自動的に認識抽出することを目的とし, 配管システムに含まれる直進パイプと接続要素, 及びその接続関係を自動的に認識するアルゴリズムの開発を行った. 配管システム上の点群抽出, 直進パイプ部分への円筒面フィッティング, 配管システムの軸線追跡に基づく認識アルゴリズムを適用した結果, 直進パイプの認識率 88%, エルボの認識率 79%, ジャンクションの認識率 75%を達成した.

1 はじめに

プラント設備のレーザ計測点群から 3D as-built 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. こうした要求に対して, 既に計測点群や計測画像から幾何曲面を抽出し, プラント設備を構成する規格部材の認識を行う研究がある[1][2]. しかし, これらの手法では画像を併用する必要があったり, 認識対象が含まれる領域を手動で指定する必要がある.

そこで, 本研究では, プラント設備の 3D モデル化で必須の対象となる配管システムを, レーザ計測点群内から全自動で認識, モデル化する手法の開発を目的とする. 前報[3]では, 共分散行列を用いた配管システム点群の自動抽出, 法線テンソルを用いた直進パイプの認識, 及び直進パイプ間の接続関係の自動認識手法を提案し, 約 450 万点の計測点群に対して直進パイプの認識率 84.2%を達成した. しかし, 共分散行列と法線テンソルの計算に合計 2 時間程度もかかること, エルボとジャンクションの認識率は未だ 48%, 43%程度に留まる問題があった.

そこで本報では, 改善点として, 共分散行列を用いない配管システム点群の自動抽出, グリッド化を用いた法線ベクトル・法線テンソル計算の高速化, 配管の軸線追跡による直進パイプ, 接続要素の認識精度の向上と接続要素の 3D モデル化に必要なパラメータの抽出を行ったので報告する.

2 配管システムの自動認識アルゴリズム

提案するアルゴリズムの概要を図 1 に示す. 配管システムの認識は以下の手順で行われる.

2.1 グリッド作成 (A1)

法線ベクトルと法線テンソルの計算の効率化のため, 計測点群全体に対して, 幅 w を持つ 3 次元グリッドを配置し, 各グリッドで内部の点群を管理する. w は計測環境内に存在するパイプの最小径の 1/3 倍とする.

2.2 法線ベクトルの算出 (A2) [4]

グリッド毎に, 1 近傍内のグリッド内部の点群 $\{p_j\}$ に対して移動放物面近似による曲面フィッティング[4]を行う. グリッドの重心点を \mathbf{X} , \mathbf{X} から点群に局所フィットする 2 次曲面 S 上におろした垂線の足を \mathbf{O}_x , \mathbf{O}_x における曲面 S の法線ベクトルを \mathbf{n} , \mathbf{n} に互いに直交するベクトルを $\mathbf{u}(\mathbf{n}), \mathbf{v}(\mathbf{n})$ とし, 局所座標系 $\mathbf{O}_x - \mathbf{u} - \mathbf{v} - \mathbf{n}$ を考える. ここで $\mathbf{q}_j = \mathbf{p}_j - \mathbf{X}$, $\mathbf{O}_x = \mathbf{X} + \zeta \mathbf{n}$, $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{n}$ 軸方向の座標値を (u, v, w) とおくと, 点群にフィットする 2 次曲面 $w(u, v) = 1/2(au^2 + 2buv + cv^2)$ は, 式(1)の制約付最適化問題の解として与えられる.

$$\min f(\mathbf{n}, \zeta, a, b, c) = \sum_{j=1}^n \left[\mathbf{q}_j^T \mathbf{n} - \zeta - \frac{1}{2} \left\{ a(\mathbf{q}_j^T \mathbf{u}(\mathbf{n}))^2 + 2b(\mathbf{q}_j^T \mathbf{u}(\mathbf{n}) \mathbf{q}_j^T \mathbf{v}(\mathbf{n})) + c(\mathbf{q}_j^T \mathbf{v}(\mathbf{n}))^2 \right\} \right]^2 e^{-\frac{\|\mathbf{q}_j - \zeta \mathbf{n}\|^2}{\rho^2}}$$

$$\text{s.t. } \mathbf{n}^T \mathbf{n} - 1 = 0 \quad (1)$$

この最適化問題を Newton-Raphson 法により解いた後, グリッド内の各点 \mathbf{p}_j を得られた曲面 S に投影し, その投影点における曲面の法線ベクトルを各点 \mathbf{p}_j の法線ベクトル \mathbf{n}_j と定める.

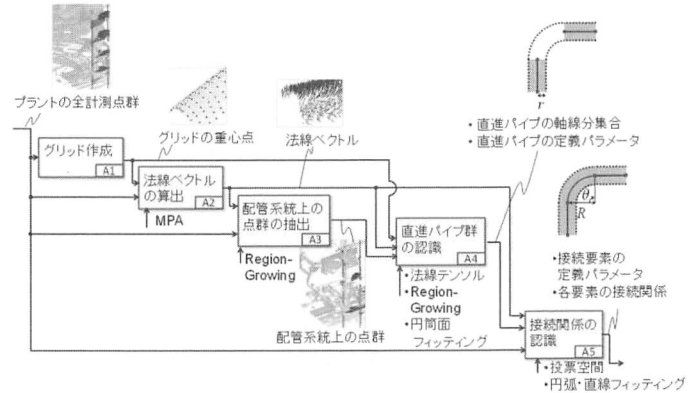


図 1 配管システム認識アルゴリズムの概要

2.3 配管システム上の点群の抽出 (A3)

点群全体からランダムに選択した 1 点 \mathbf{p}_s をシード点として, その法線ベクトル \mathbf{n}_s との内積が $|\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_i| > \tau_n$ を満たす法線ベクトル \mathbf{n}_i を持つ点群 $\{p_i\}$ を Region-growing によって探索し, グループ化を行う. 次にベクトル \mathbf{n}_s を法線とする平面にグループの点群を投影し, その AABB の短幅 l を求める. このとき, パイプ表面のような曲面上の点群は非常に細い幅を持つものに対して, 床面や壁面といった平面上の点群は広い幅を持つ. そのため, $l < \tau_l$ を満たすグループの点群のみを配管システム上の点群として抽出する. 閾値 τ_l は計測環境内に存在するパイプの最小径とする.

2.4 直進パイプ群の認識 (A4) [3]

配管システム上の点群を含むグリッド毎に, グリッドの重心点を中心とした半径 r_2 以内にある点群を探索し, 法線テンソルの計算と固有値解析を行い, グリッド内部の点群に最小固有値 λ_3 を割り当てる. その後, 全点群の固有値 λ_3 に対して判別分析法による二値化を行い, 直進パイプ上の点群を抽出する.

その後, 直進パイプ上の点群をセグメンテーションし, 個々の直進パイプに対応する点群グループに分割した後, 円筒面を非線形最小二乗法によってフィッティングし, 個々の直進パイプの径, 軸位置・方向を抽出する.

2.5 接続関係の認識 (A5)

認識されたフィッティング円筒面の軸線分から, その直進パイプに接続している未認識の直進パイプと接続要素の認識とパラメータ抽出を行う. ただし, 認識された直進パイプと接続要素の半径が, フィッティング円筒面の半径値 r と等しいものに限定する.

2.5.1 配管の軸線上の点列の認識

図 2-(a)のように, フィッティング円筒面の軸線分の端点 e_j を中心に半径 r_p の球面を置き, 球面付近の点群 $\{p_k\}$ を探索する. 次に, 図 2-(b)のように, パイプ内部に向かう法線ベクトル \mathbf{n}_k 方向にフィッティング円筒面の半径値 r 移動した点 \mathbf{p}'_k を考える. 次に, 図 2-(c)のように, 端点 e_j を重心とした長さ $2r_p$ の立方体内部にグリッド状の投票空間を作成し, 点群 $\{p'_k\}$ を含むグリッドへ投票を行い, 最多投票数のグリッドとその一近傍内のグリッドにある点群の平均座標を新しい軸線上の点 \mathbf{d} として設定する. 以上の処理を球面上に点が存在し

ないか、選択したグリッド内に投票された全投票数が全点の1/2倍に達しなくなるまで繰り返すことで、配管の軸線上の点列の認識を行う。

2.5.2 円弧・直線のフィッティング [5]

配管の軸線上の点列 $[d_1, d_2, \dots, d_n]$ に対して, [5]の方法で連続した円弧と直線のフィッティングを行う。

初めに, 図3のように, 3点 d_j, d_{j+1}, d_{j+2} 上を通る平面 Σ を考え, 点列 $[d_j, \dots, d_{j+2}]$ を投影する. 次に, 直線 $l_1 = d'_j d'_{j+1}$, $l_2 = d'_j d'_{j+2}$ とその交点 L を考え, 投影点 $d'_k \in \{d'_{j+1}, d'_{j+2}, \dots, d'_n\}$ に対して, l_1, l_2, d'_k に接する円 C を以下の様に求める。

$$R = \|c - p'_k\| = \|c - M_1\| \quad (2)$$

このとき, 円の中心を c , l_1 の方向ベクトルを v , l_1, l_2 の二等分線方向ベクトルを t とおき, $c = L + \lambda t$, $w = t - (t \cdot v)v$, $y = \{L - p'_k - ((L - p'_k) \cdot v)v\}$, $z = L - M_1$ とすると, λ は以下の式(3)の解として求まる。

$$(\|w\|^2 - \|t\|^2)\lambda^2 + 2\{(w \cdot y) - (t \cdot z)\}\lambda + (\|y\|^2 - \|z\|^2) = 0 \quad (3)$$

この方程式の解の内, 絶対値が大きいものが求める円となる. そして, 残りの点列 $[d_{j+1}, \dots, d_n]$ に対して新たに平面への投影と円弧・直線のフィッティングを繰り返す。

ただし, 直進パイプ部分に非常に大きな半径の円弧がフィットされる場合もあるため, 円弧とそれに接続している2本の直線線分がほぼ一直線上にある場合は, この3本の線分を1本の直線線分に置き換える. 以上の認識結果から, 直線線分を直進パイプ, 円弧をエルボとして分類する。

2.5.3 ジャンクション部分の認識と接続要素のパラメータ抽出

パラメータ抽出

2.5.1節で用いた軸線追跡法は, ジャンクション部分のように軸線が2つに分かれる箇所では, その内の一方のみしか認識することができない. そのため, ジャンクション部分の軸線の認識結果は, 図4(a)-(d)のいずれかとなる. これらの結果からジャンクション部分の軸線分を正しく認識するため, 全ての直線線分と円弧に対して以下の処理を行う。

図4(a),(b)のように円弧が認識されている場合は, step1のように接続している直線線分 S_j, S_k をそれぞれ延長した線分を軸とするフィッティング半径 r の円筒面を置き, 円筒面内部に計測点群が含まれるかどうかを判断する. 含まれない場合は, step2のように円弧を除去する. さらに図4(a)のように, 円筒面内部に他の軸線分の端点が存在しない場合は, 延長した線分の端点から新たに軸線追跡を行うことで未認識の直進パイプの認識を行う. 一方, 図4(c),(d)のように直線線分が認識されている場合は, step1のようにフィッティング半径より少し大きい径を持つ円筒面を置き, その面付近にある点群に対して2.5.1節と同様の処理を行う. ここで, 図4(c)のように, 軸上の点が認識できて, かつ円筒面内部に他の軸線分の端点が存在しない場合は, step2のようにこの点を端点として新たに軸線追跡を行うことで未認識の直進パイプの認識を行う。

次に, ジャンクションに接続している直線線分を接続するため, step3のように, 全ての直進線分集合の中から, ほぼ同一線上に存在し, 端点間の距離が非常に近い直線線分のペアを選択し, 端点間に直線線分を挿入する. さらに, 延長した直線が非常に近い距離で交差する直線線分ペアを選択し, 端点と交点の間に直線線分を挿入する。

その後, step4のように, ジャンクション部分に対応する直線線分を作成するため, 連続した直線線分を一つの直線線分に置き換えた後, step5のように, ジャンクション部分に接続している全ての直線線分を, ジャンクション部分の端点から r の距離でそれぞれ2つの直線線分に分割する。

また, 認識された軸線分から, 円弧の角度と径からエルボの「曲がり角」と「曲がり径」, ジャンクション部分の軸線分間の角度からジャンクションの「軸角度」を, 接続要素のパラメータとして抽出する。

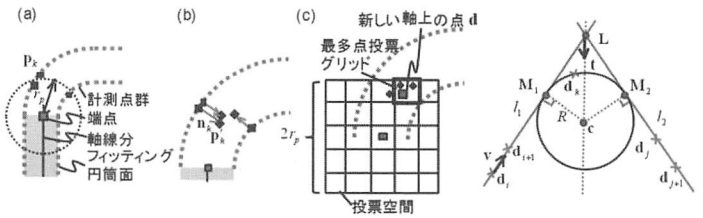


図2 配管システムの軸線の追跡

図3 円弧・直線フィッティング

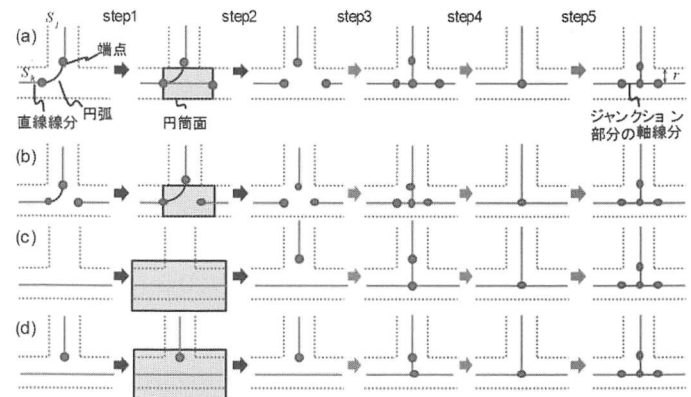


図4 ジャンクションの軸線認識

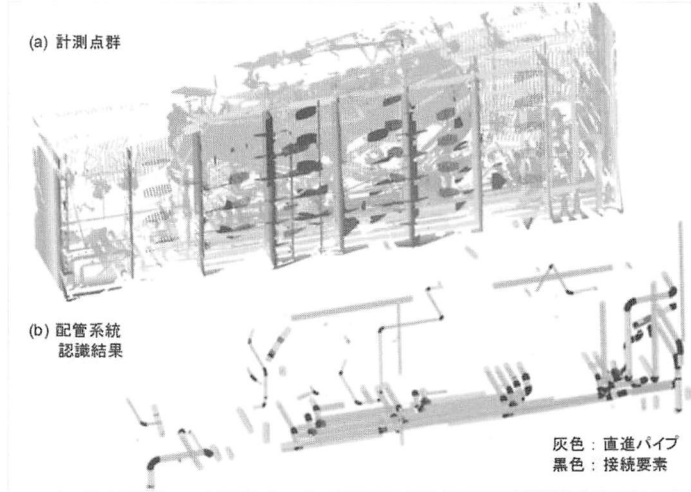


図5 入力プラント計測点群と最終配管システム認識結果

3 実行結果

実際の石油リグのレーザ計測点群を入力として, 提案アルゴリズムによる配管システム内のパイプ認識, 接続関係の認識を行った. 入力となる計測点群(点数: 4,524,324)と, 最終的に認識された直進パイプ, エルボ, ジャンクションの3Dモデルを図6に示す. また, 計測環境内の直進パイプ及び接続要素と思われるものを目視で数え, 本報と前報[3]のアルゴリズムの認識結果と比較した. CPUはCore2Duo 2.40GHzを使用した.

前報[3]からの認識率の改善効果は, 直進パイプ: 84.2%→88.0%, エルボ: 48.1%→79.6%, ジャンクション: 43.7%→75.0%, 実行時間の改善効果は 10843秒→4434秒となった. 特にエルボ, ジャンクションの認識率が大幅に改善され, 全要素を十分な精度で認識できていることが確認できる。

謝辞

本研究のレーザ計測データは(株)ライカジオシステムズからご提供頂いた. 記して感謝する。

参考文献

- [1] Rabbani T; "3d industrial reconstruction by fitting CSG models to a combination of images and pointclouds", Remote Sensing and Spatial Information Sciences vol.35 (Part B3), 7-12.(2004)
- [2] 藤井 他; "大規模点群からの既知部品の検出とパラメータの同定". 2010年度精密工学会春季大会学術講演会.B12(2010)
- [3] 川島 他; "大規模環境レーザ計測点群からの配管システムの自動認識". 精密工学会誌, 78巻, 8号, (2012)
- [4] Zhouwang Yang; "Moving parabolic approximation of point clouds", Computer-Aided Design vol.39, Issue 12, (2007)
- [5] Ulrich Bauer; "Generating parametric models of tubes from laser scans", Computer-Aided Design, vol.41, Issue 10, (2009)