

円筒オブジェクト一致制約を利用した プラント配管系統レーザスキャンデータの高精度レジストレーション

北海道大学 ○森谷 亮太, 金井 理, 伊達 宏昭
株式会社日立製作所 渡辺 正浩, 中野 隆宏, 山内 雄太

要 旨

円筒パイプが大部分を占めるプラント配管系統を複数個所からレーザスキャンした計測点群同士の位置合わせでは、点群間の重複が少ない場合、ICPのような既存手法では高精度な位置合わせが行えず、その後の配管のモデリングの精度低下を招く問題がある。その解決のため、本研究では、計測点群内から配管円筒オブジェクトを先に認識し、これらが空間で一致する幾何制約を利用し、配管系統レーザ計測点群間の高精度なレジストレーションを行う新たな手法を提案する。

1. はじめに

近年、大規模プラントや生産設備の3次元 as-built モデル化のために、レーザスキャナによる計測を活用する機会が増加してきている。レーザスキャンに基づく、プラント配管系統の as-built 3次元モデルの構築には、まず、円筒パイプが大部分を占める複数スキャン位置からの計測点群データを1つの点群に統合する位置合わせ(レジストレーション)が必要である。しかし、点群間の重複度が少ない場合、ICP[1]による位置合わせでは、統合後の点群データ上で配管円筒部の点群一致精度が低下し、これがその後の配管系統のモデル化時におけるモデリング精度の低下を招いてしまうという問題がある。

そこで本研究では、計測点群内から配管円筒オブジェクトを先に認識し、これらが空間で一致する幾何制約を利用し、プラント計測点群間の高精度なレジストレーションを実現できる新たな手法の開発を目的とする。

2. レジストレーションにおける基本概念

重複度が少ない配管系統点群同士を位置合わせする際、図1(a)のように、ICPのような従来手法では、重複部の点の計測誤差が点群間の相対的な位置・姿勢に与えられる影響が大きく、さらに、その点群に対し、円筒面をフィッティングするため、円筒面のモデリング精度が低下してしまう。一方、図1(b)に示す提案手法では、計測された点群が円筒上にあるという幾何制約を用いて位置合わせし、同時に円筒フィッティングも行なうため、誤差が重畳しないと考えられる。

提案手法の優位性を確認するため、本研究では、スキャンシミュレーションによって生成された計測誤差を含む擬似計測点群を用いて検証を行った。概要を図2に示す。

3. 配管系統モデルにおける擬似計測点群の生成

3.1. 円筒面測定誤差評価実験

スキャンシミュレーションのため、実際のレーザスキャナの円筒面計測時の偶然誤差評価実験を行った。スキャナにはFaro Focus3D S120を使用し、計測対象は径が $\phi 114.05\text{mm} \sim 318.60\text{mm}$ の4種類の塩化ビニール製パイプを使用した。2m~30mまで距離を変化させ計測し、計測点群にLevenberg-Marquardt法[2]を用いて、円筒精密フィッティングを行い、フィッティング円筒面からのレーザ照射方向の誤差を算出し、その誤差に対する距離依存性、入射角依存性についての誤差モデルを正規分布で近似し、作成した。

3.2. スキャンシミュレーション

上記の誤差評価実験で得られた誤差モデルを用いて、プ

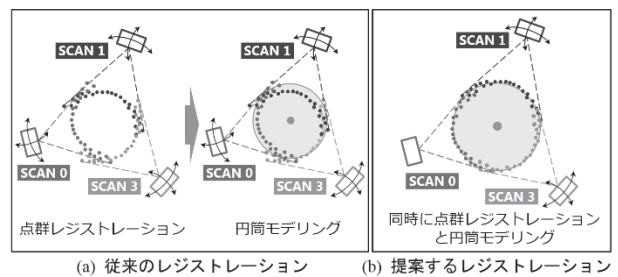


図1 レジストレーションの手法比較

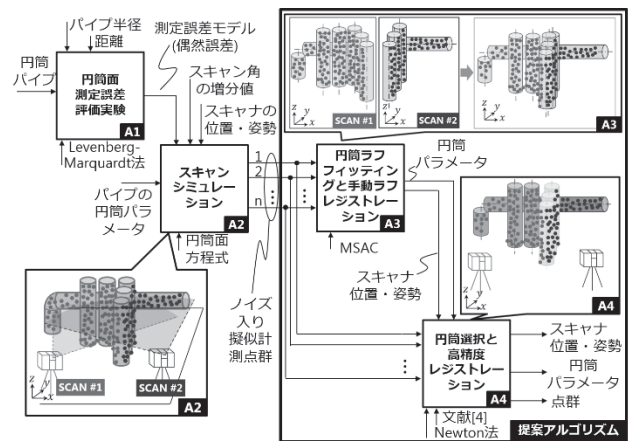


図2 提案手法概要

ラント配管 CAD データに対するスキャンシミュレーションで擬似計測点群を生成した。レーザ光を半直線、パイプ直進部を円筒方程式で表現し、交点を求め、さらに誤差モデルに従った誤差をレーザ照射方向に乗せ、1つの擬似計測点とする。これをスキャナ全方位角と全仰角に対して行なうことで擬似計測点群を生成した。

4. 提案する高精度レジストレーション手法

4.1. 円筒ラフフィッティングと手動ラフレジストレーション

生成した各スキャンの擬似計測点群に対して、主成分分析による法線ベクトルを計算し、MSAC[3]により、1本分の円筒を点群内から抽出し、Inlier点群と近似円筒パラメータを抽出する。さらに残りのOutlier点群を再度入力とし、Outlierの点数が閾値以下になるまで処理を繰り返し、点群内の配管円筒をすべて抽出した。その後、円筒軸同士がほぼ一致するようにスキャン点群同士を手動でラフレジストレーションした。

4.2. 高精度レジストレーション手法

手動ラフレジストレーションした点群の中から、精密レジストレーションに使用する円筒を複数本選択し、支配的な3軸に平行な円筒群に分類し、各々の円筒上の点群を円筒軸と垂直な平面に投影し、この面上に投影された円と対応計測点との誤差二乗和が最小化されるように、スキャナの位置・姿勢および、選択した円筒のパラメータ(円筒軸上の一点、軸の方向ベクトル、半径値)をニュートン法により同時に導出することで、レジストレーションを行う。この導出は文献[4]を参考にした。

スキャナ j から計測された円筒 k 上の計測点 i の座標値 $(X_{ijk}, Y_{ijk}, Z_{ijk})$ は、点が存在する円筒面上に位置するよう制約される。XY平面に垂直な円筒に対する制約式は、 $(X'_{ijk}, Y'_{ijk}, Z'_{ijk})$ を計測点 i の投影面上の座標値とすると、式(1)、(2)で表現される。

$$f_{vc}(x_{EOP_j}, x_{F_k}, l_{ijk}) = X'_{ijk}{}^2 + Y'_{ijk}{}^2 - r_k^2 = 0 \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} X'_{ijk} \\ Y'_{ijk} \\ Z'_{ijk} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2(\Phi_k)\mathbf{R}_1(\Omega_k) \left\{ \begin{bmatrix} X_{ijk} \\ Y_{ijk} \\ Z_{ijk} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{C_k} \\ Y_{C_k} \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

x_{EOP_j} : スキャナ0に対する各スキャナの位置・姿勢

x_{F_k} : 円筒パラメータ $(X_{C_k}, Y_{C_k}, \Omega_k, \Phi_k, r_k)$

X_{C_k}, Y_{C_k} : 軸上の一点, Ω_k, Φ_k : 回転角, r_k : 半径値

l_{ijk} : スキャナ0座標系における点の観測ベクトル

$\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$: X,Y軸周りの回転行列

YZ平面, ZX平面に対しても同様な制約式が成立するので、これらを全ての計測点と円筒, スキャナ位置・姿勢に対し連立させ、 x_{EOP_j}, x_{F_k} を変数とし、ニュートン法を用いて、最小二乗解を求めることによって、 x_{EOP_j}, x_{F_k} が同時に算出できる。

5. 精密レジストレーション実験および結果

図3に示される実プラント配管系統のCADデータ内に、図に示す7箇所のスキャナを配置し、擬似計測点群を生成した。各スキャナごとの点群に対して、円筒ラフフィッティングと、手動ラフレジストレーションを行い、図4に示すように計測点数が比較的多く、ねじれの位置に存在するような円筒を14本選択した。選択した円筒の7スキャン分の全点数は約3000万点である。その後、これらの点群に対し、提案手法と商用点群処理ソフトウェアによる精密レジストレーションを行った。結果を図5, 6に示す。提案手法による精密レジストレーションの処理時間は13.35minであった。なお、商用ソフトの精密レジストレーション点群に対しては、Levenberg-Marquardt法を用いて円筒パラメータを算出し、提案手法との比較を行なった。

提案手法が商用ソフトに比べ、より高精度に配管円筒部がレジストレーションされていることを図5, 6より目視

で確認できる。さらに、CADデータを真値とした際の円筒軸間の距離誤差, 円筒軸間の角度誤差, 円筒半径の誤差を図7-9に示す。いずれの誤差も提案手法の方が著しく少なく、優位性を確認できた。なお、提案手法の円筒2の誤差が大きい理由は、円筒を覆う点群の最大中心角度が約180度のため、円筒フィッティングアルゴリズムの系統誤差による影響が及んでいるためだと考えられる。

6. おわりに

本研究では、配管系統の円筒オブジェクト認識に基づく高精度レジストレーション手法を提案した。商用ソフトに比べ、点群同士の重複度に左右されず高精度なレジストレーションが行えることを確認できた。今後、精密レジストレーション時の制約式改良, 処理時間短縮などを行なう。

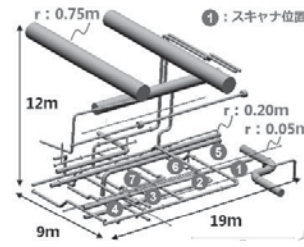


図3 配管系統 CAD データとスキャナ配置

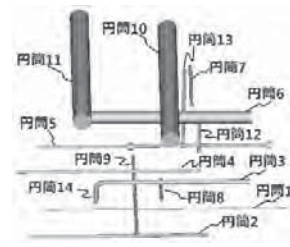


図4 選択した円筒

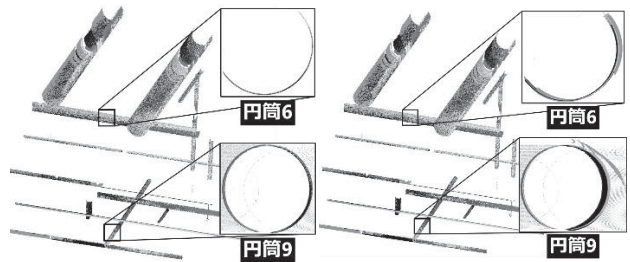


図5 提案手法による精密レジストレーション

図6 商用ソフトによる精密レジストレーション

謝辞

本研究の配管系統 CAD データは産機エンジニアリング株式会社からご提供いただいた。記して感謝する。

参考文献

- [1] Besl, Paul J., and Neil D. McKay, : "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - Special issue on interpretation of 3-D scenes—part II, 14(2), pp.239-256, (1992)
- [2] Craig 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), pp.633-641, (1998)
- [3] P. H. S. Torr and A. Zisserman, : "MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry", Computer Vision and Image Understanding, 78(1), pp.138-156 (2000)
- [4] T.O. Chan, D.D. Lichti, D. Belton, : "A rigorous cylinder-based self-calibration approach for terrestrial laser scanners", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 99, pp.84-99 (2015)

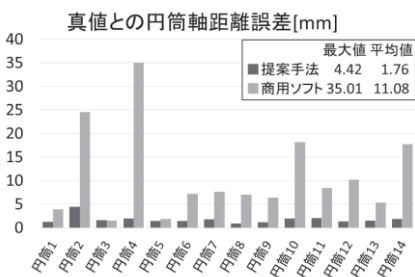


図7 円筒軸間の距離誤差 (円筒番号は図4に示す)

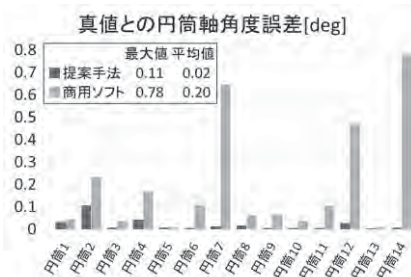


図8 円筒軸間の角度誤差 (円筒番号は図4に示す)

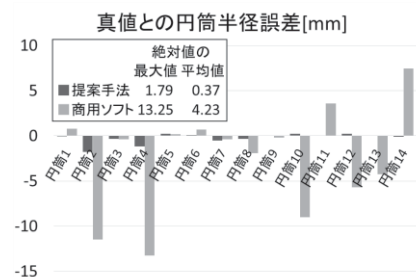


図9 円筒半径値の誤差 (円筒番号は図4に示す)