

(46) 建造物の壁面を用いた欠損に頑健な 地上LiDARデータの精密位置合わせ

出口 翔理¹・須崎 純一²・栗木 周³

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:deguchi.shori.76r@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院技術職員 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kuriki.amane.3w@kyoto-u.ac.jp

近年、レーザ測量の分野においてmobile mapping system (MMS) の利用が進んでいる。しかし通行車両や歩行者等のため、計測領域の一部のデータが欠損することがある。同一地域や地物を計測した複数のMMSデータを統合して扱うには位置合わせが必要だが、欠損の影響で位置合わせが困難となる場合がある。そこで本研究では欠損に頑健な位置合わせ手法を提案する。提案手法は二段階の処理から構成され、第一段階では欠損に頑健に抽出しやすい建造物の壁面を利用し、大まかな位置合わせを図る。第二段階では共通領域のみを対象として、従来の代表的な手法で、良好な初期値の下で高精度の位置合わせを実現できるIterative Closest Point (ICP)を適用する。屋外での地上light detection and ranging (LiDAR) で取得したデータを部分的に欠損させたデータを用いた検証では、提案手法は欠損に頑健でRMSEが約4 mmの精度で位置合わせできた。

Key Words : co-registration, LiDAR, ICP, point cloud, robustness against occlusion

1. はじめに

近年、道路の効率的な維持管理や市街地の3Dモデリングの手段として mobile mapping system (MMS) の利用が進められている。MMS計測の際には、一つの計測エリアに対して、片道の計測では取得できない死角部分を相互に補うために、道路を往復してデータを取得することがある。また、時系列的な変化を調べたい場合にも、同じエリアを複数時期にわたって計測することが予想される。しかし、MMS計測で取得した点群データには、主にglobal navigation satellite system (GNSS) の測位精度から生じる系統誤差が含まれるため、複数のデータを統合し、同じ座標系で扱いたい場合には位置合わせ処理が必要である。手動で位置合わせするには大きな労力を要するため、自動での位置合わせ手法が求められる。

現在提案されている点群位置合わせの手法として代表的なものに、BeslらによるIterative Closest Point (ICP)が挙げられる¹⁾。ICPは、二つの点群間での対応点ペアの決定と、対応点間距離の二乗和を最小化する変換を繰り返すこと

で、非常に精密な位置合わせを達成できる手法である。

しかしICPでは、二つの点群の初期の相対移動量や相対回転量が大きい場合や、対応するはずの領域において一方の点群が欠損している場合に、適当な対応点ペアを決定することができず、最適解に収束しないことがある。

MMSデータは、GNSSの測位誤差等により二時期のデータの位置ずれが大きく、また車両や人により生じるデータの欠損が大きいこともあり得る。したがって、MMSデータを位置合わせする際にICPを直接適用することは、安定性や位置合わせ精度の面で実用的ではない。

そこで本研究では、まずICPの欠点を克服するような処理をした上で、改めてICPを適用することで精密な位置合わせを達成する手法を提案する。つまり、ICPより位置合わせ精度は劣るものの、欠損と初期値に対して頑健な位置合わせ手法を提案する。次に、大まかな位置合わせが完了していることを利用して欠損の影響を軽減する処理を施す。そうしてICPの欠点を克服した後に改めてICPを適用する。また本研究では、ICPで通常用いられる点对点の距離を誤差とする方法とともに、点对面の距

離を誤差とする方法についても検証する。

表-1 使用データの点数

	点群 1	点群 2
点数	1,449,929	4,210,109

2. 使用データ

2015年11月3日午前、京都大学桂キャンパスCクラスターにおいて、地上据置型light detection and ranging (LiDAR) であるRiegl社製LMS-400を用いて計測を実施した(図-1)。0.04°の計測間隔で、鉛直方向に仰角-40°から60°、水平方向に360°の範囲で計測した。

異なる二地点にLiDARを設置し、点群データ(点群1, 2)を取得した(図-2)。また、欠損の影響を検証するため、計測時には反射ターゲットを9個設置し、精度検証に用いた。各データの点数を表-1に示す。



(a)



(b)

図-1 計測の様子。(a)計測場所(画像中央の通路: GoogleEarth)、(b)計測場所の様子

3. 提案位置合わせ手法

(1) 概要

本研究の提案手法のフローチャートを図-3に示す。本研究の位置合わせは大きく二段階に分かれる。第一段階では、鉛直角の回転量、方向角の回転量、x軸方向の平行移動量、y軸方向の平行移動量、鉛直方向の平行移動量という順で、逐次補正しながら各補正量を求める。各補正量を求めるにあたって、地盤面を構成する点群と壁面を構成する点群をそれぞれ抽出して利用する。但し、点群を取得する際の鉛直軸が傾いていると壁面の抽出性能が著しく低下する。そのため、壁面の抽出は鉛直軸の補正後に行う。第二段階では、最適解の近傍にある初期値の下では良好な結果が得られるICPを適用して、最終的なパラメータを決定し、最終的に高精度な位置合わせを達成する。

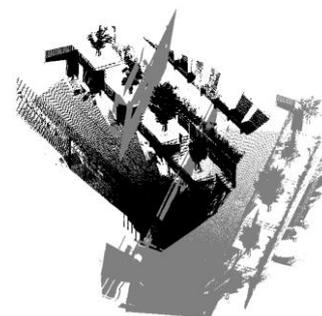


図-2 計測データ(黒:点群1, グレー:点群2)

(2) サンプリング

計測データの前処理として、点群1, 2をそれぞれ空間的に均等にサンプリングした(一辺12.6 cmの立方体に1点の割合)。これは、点数を減らすことで計算コストを抑えるのと同時に、後に行う処理の都合上、点密度を一定にしておくためである。

(3) フィルタリング

点群にフィルタリングを適用し、地盤面を表す点群を抽出する。本研究では、局所的な傾斜と一定区画内の最低標高値を利用しつつ、平坦な地形と急峻な地形が混在していても柔軟に対応可能なSusakiのアルゴリズム²⁾を利用する。1つの正方形グリッド(一辺10 cm)に複数の点が存在する場合には、最低標高値を持つ点の座標を当該グリッドの代表値として採用する。

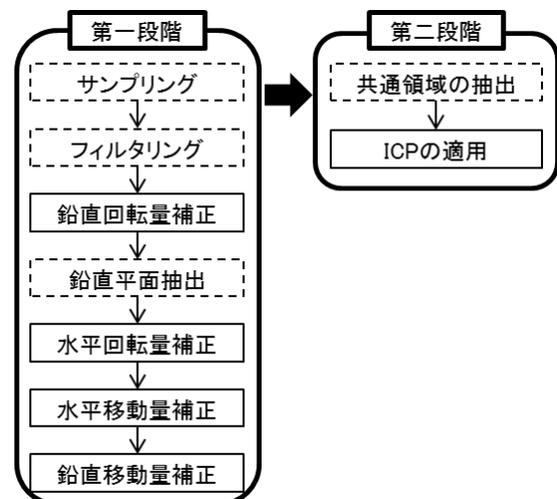


図-3 提案手法のフローチャート

(4) 第一段階の位置合わせ手法

a) 鉛直回転量の決定

まず鉛直回転量を決定し、補正する。そのために地盤面を構成する点群を一边10 cmの正方形グリッドで分割する。注目グリッドと隣接するグリッド内の点から推定される回帰平面の法線ベクトルを求め、それらの法線をすべてのグリッドについて求め合成する。点群1, 2それぞれの合成法線ベクトルが鉛直上向きとなるような回転量を鉛直回転量として、点群1, 2をそれぞれ回転させる。

b) 壁面の抽出

次に、一边50 cmのボクセル単位で主成分分析を行い、それぞれのボクセルから壁面と思われる構造を持つ点群を抽出する。本研究では、第一主成分方向と第二主成分方向によって張られる平面のRMSEが1 cm以下かつ、第三主成分方向とz軸のなす天頂角が85度から95度のものを壁面として抽出した。

c) 水平回転量の決定

水平方向の回転量の補正では、壁面の向きの分布を用いる。ここでは計測範囲の壁面の多くが、ある一定の方向を向いていると仮定する。壁面の法線をxy平面に投影した際のx軸とのなす角を ϕ とし、(b)と同様の立方体ボクセルごとに ϕ を計算する。 ϕ のヒストグラムを図-4に示す。このとき最大の確率をとる ϕ をそれぞれ方向角の補正量として点群1, 2を回転させる。つまり、多くの壁面の法線の向きがx軸の向きと一致するようにする。

d) x軸方向移動量の決定

c)までの処理で二つの点群間での相対的な回転は補正されているものとし、次にx軸方向の平行移動量を決定する。まず点群1, 2のそれぞれについて、壁面を構成する点群から、xについて点の発生確率を計算しヒストグラムを作成する(図-5)。次に、点の発生確率の高いピーク上位5つずつを、位置合わせの基準となる特徴位置の候補とする。次に各点群で特徴位置の一つずつ選ぶ。この特徴位置の差を仮の平行移動量として算出し、仮の移動を実行する。その結果、特徴位置を示す座標の差の絶対値が10 cm以内に収まっているピークの数を知る。すべての組み合わせについてこの数を知る。それが最も多くなる組み合わせを適切な組み合わせとして採用する。採用する組み合わせが決まれば、その差を改めてx軸方向の平行移動量として決定し、x軸方向の移動量とする。

e) y軸方向移動量の決定

y軸方向についてもd)と同様の方法で対応付けして平行移動量を決定し、移動を適用する。

f) z軸方向の平行移動量補正方法

z軸方向の平行移動量補正方法を示す。まず地盤面を水平方向に一边10 cmの正方形グリッドで分割する。各グリッドで最小のz座標を代表値として採用する。次に、点群1と点群2で対応するグリッドの代表値の差を鉛直距

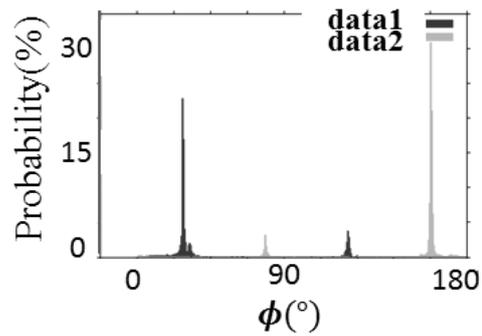


図-4 ϕ のヒストグラム

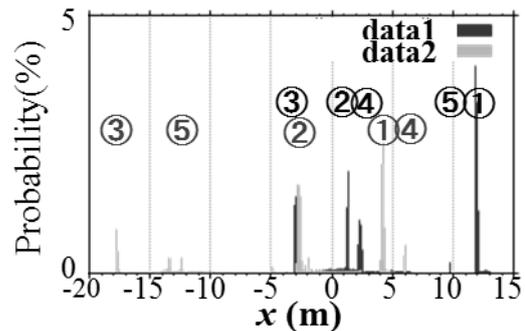


図-5 xについての点の発生確率と上位5つの位置

離として計算する。その後、その鉛直距離の二乗和を最小化するような目的関数のもとで準ニュートン法を用い、平行移動量を決定する。

(5) 第二段階の位置合わせ手法

a) 概要

第二段階では、第一段階終了後の点群の壁面の点群と地盤面の点群を統合した点群データに対してICPを適用する。ただし、適用前に欠損の影響を抑える前処理を加えることで高精度化を目指す。

b) 共通領域の抽出

ICPでは対応するはずの領域において一方の点群が欠損している場合に、位置合わせ精度が低下することがある。そこで、第一段階で大まかな位置合わせが完了していることを利用して、おおよその共通領域のみを抽出するために以下の処理を適用する。まず点群1, 2を共通の座標系において一边15 cmの立方体ボクセルで分割する。その後、点群1, 2の点が共通して格納されているボクセル内の点のみを抽出する。

c) ICPの適用

最後にICPを適用する。本研究では、ICPで通常用いられる点と点の距離を誤差とする方法とともに、点と面の距離を誤差とする方法についても試した。

4. 実験と結果

本研究の主目的は、データ欠損に頑健な位置合わせ手法を確立することである。そのため、提案手法の適用対象データとして計測された点群1, 2そのものだけでなく、人為的に欠損させた点群も検討対象に加え、提案手法による位置合わせを行った。

図-6は、欠損なし及び欠損ありの点群に対する第一段階の位置合わせ結果と、同じ点群に対して第一段階の処理を施さずに、比較手法であるICPを直接適用した位置合わせ結果である。図-6に示したとおり、ICPを直接適用しても正しい位置合わせができないようなデータに対しても、提案手法によって位置合わせを達成できた。

また、反射ターゲットを用いて精度検証して得られたRMSE (root mean squares of errors) を表-2に示す。欠損なし、欠損ありのいずれについても、第二段階で点対面の誤差を用いるICPを適用した場合のRMSEが最も小さく、それぞれ4.1 mm, 3.9 mmであった。点对点の誤差を用いるICPではやや精度が低く、それぞれ47.8 mm, 32.9 mmであった。

5. 考察

第一段階で方向角の回転量を求める際には、市街地を想定して構造物の向きに支配的な成分があると仮定した。しかし、曲線的な道路や、そもそも壁面を持つ構造物が少ないような場所では提案手法を適用するのが困難であると考えられる。また、水平移動量決定の際には、点の発生確率を示すヒストグラムから、上位5つのピーク同士の対応付けを行った。本研究では、対応付けの適切さを評価する方法として、各対応における移動後に一致するピークの数と比較したが、より安定的に対応付けを実現するためには、ヒストグラムの全体の整合性なども考慮する必要があると考えられる。

第二段階では、点对点よりも点対面によるICPの方が精度の高い結果となった。その理由として、点对点の誤差を計算する場合には、点密度が十分大きくないために対応付けが正確に行えず、適切な誤差評価ができないのに対して、点対面の誤差を計算する場合には、点密度による影響を受けにくいためであると考えられる。

6. 結論

本研究で提案した手法を用いることで、屋外を対象とした地上据置型 LiDAR 計測データに対して、点群に欠

損のある場合にも RMSE 約 4 mm の高精度な位置合わせを達成できた。

今後の課題として、壁面の対応付けが適切かの評価法の検討や、曲線的な道路や坂道を含む場合への対応、壁面が少ない場合への対応などが挙げられる。

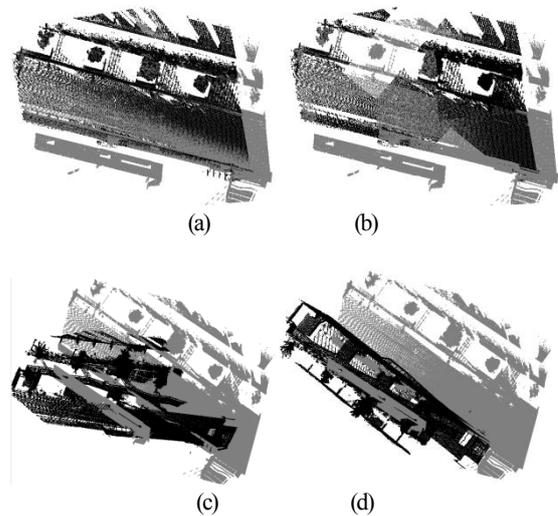


図-6 位置合わせ結果 (a)欠損なし第一段階終了後, (b)欠損あり第一段階終了後 (c)欠損なし ICP 直接適用後 (点对点) (d)欠損なし ICP 直接適用後 (点対面)

表-2 位置合わせ結果. 表中の「a」は点对点間, 「b」は点対面間の距離を用いて評価したことを表す.

		RMSE(mm)			
		全体	x成分	y成分	z成分
位置合わせ前		10745	5931	8344	3263
欠損なし	第一段階終了後	73.5	16.6	28.9	65.5
	第二段階終了後 a	47.8	33.3	20.1	27.9
	第二段階終了後 b	4.1	2.9	2.4	1.6
	直接 ICP 適用 a	15269	9655	581	11814
	直接 ICP 適用 b	18379	15609	4057	8813
欠損あり	第一段階終了後	68.0	47.1	6.4	48.7
	第二段階終了後 a	32.9	30.0	5.6	12.4
	第二段階終了後 b	3.9	3.3	1.4	1.5
	直接 ICP 適用 a	15323	10313	1594	11221
	直接 ICP 適用後 b	17987	15686	4707	7436

参考文献

- 1) Besl, P. J. and McKay, H. D.: A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp.239-256, 1992.
- 2) Susaki, J.: Adaptive slope filtering of airborne LiDAR data in urban areas for digital terrain model (DTM) Generation, *Remote Sensing*, vol. 4, pp.1804-1819, 2012.