

市街地 MMS 計測点群のレジストレーションとその精度評価法の検討

北海道大学 ○高井俊吾, 伊達宏昭, 金井理
アジア航測株式会社 新名恭仁, 織田和夫, 池田辰也

要旨

本研究では、MMS により得られる市街地レーザ計測点群のずれ修正を目的として、MMS 走行軌跡上からのずれ導出箇所の設定と改良型の ICP による点群ずれ量算出、ならびに走行軌跡に沿った点群ずれ量の補間による MMS 計測点群のレジストレーション法を開発した。本報では、計測システムの特性と計測された対象の違いを考慮した、レジストレーション誤差の評価法に関する検討結果を報告する。

1. はじめに

近年、自動車にレーザスキャナや GPS, IMU (慣性計測装置) などの各種計測機器を搭載し、走行しながら市街地の 3 次元環境情報を収集する MMS (Mobile Mapping System) が普及しつつある。この MMS により市街地環境を計測した点群 (MMS 計測点群) の取得が容易になってきた。同一エリアを複数回計測した場合の MMS 計測点群間には、計測走行時の GPS 衛星の捕捉状態や IMU ドリフトに起因したずれが生じる場合がある。現状では、この点群間のずれの修正に多大な労力が必要となっており、この修正を自動化できる高精度かつ効率的な MMS 計測点群のレジストレーション手法が必要となっている。前報[1]では、走行軌跡からの軌跡ずれ修正箇所の自動抽出、MMS 計測点群向けの ICP アルゴリズム、回転を考慮した軌跡に基づく点群修正を導入した、高精度なレジストレーションアルゴリズムの開発を行った。しかしながら、前報[1]で使用したレジストレーション精度の評価法では、形状間のずれ量を正しく評価出来ない、走行軌跡全域に渡るずれ量の評価が困難である、ずれの詳細な分析が行えないという問題点が存在した。そこで本報では、MMS 計測点群に開発アルゴリズムを適用した場合のレジストレーション誤差の評価法に関する検討を行う。

2. 入力データとレジストレーション手法概要

本研究で使用する MMS 計測点群は、3 次元座標値、取得時刻の情報を持つ点の集合であり、走行軌跡は、3 次元座標値、取得時刻ならびに MMS の姿勢情報を持つ点 (軌跡点) の集合である。

本研究で開発したレジストレーションアルゴリズムの概要を以下の①-④に示す (図 1)。

① 走行軌跡からのずれ修正点の抽出

走行軌跡上からずれ修正が必要と予測される箇所の軌跡点 (ずれ修正点) を MMS の加速度、角速度の算出ならびに走行軌跡の交差判定により自動的に抽出する。

② MMS 計測点群向けの ICP によるずれ量導出

点群が重複している領域に存在するずれ修正点周辺の点群に対して、MMS 計測点群向けの ICP アルゴリズムである CCICP (Classification and Combined ICP) を適用し、点群間のずれ量の導出を行う。この CCICP は、主成分分析による点分類に基づく不適対応の除去と、点一点間、点一平面間距離の同時最小化を用いることにより、MMS 計測点群のずれ量を高精度に導出することを可能にしている。

③ 点群修正のための座標変換パラメータ導出

①で抽出した抽出されたすべてのずれ修正点と、②で求められたずれ量を用いて、各ずれ修正点における点群修正のための並進・回転パラメータを絶対位置、相対位置、レジストレーション制約に対する最小二乗解として求める[1]。

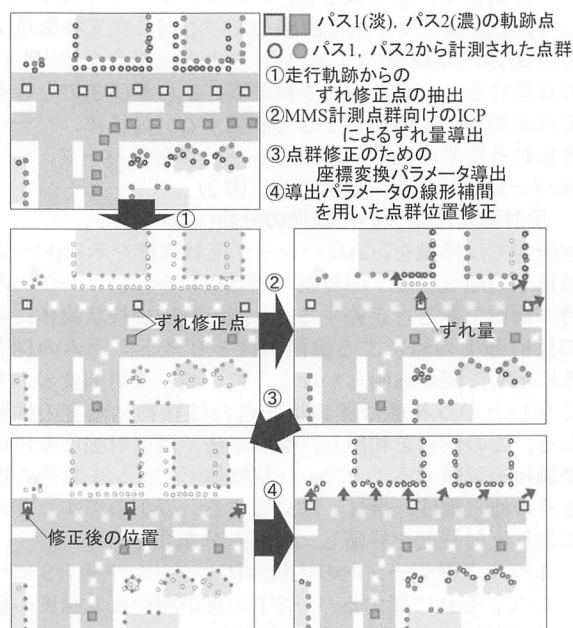


図 1 開発手法概要

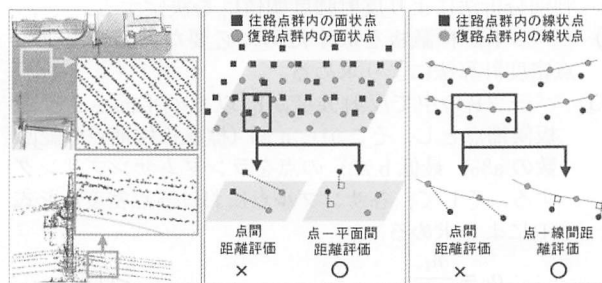


図 2 スキャンラインと点一平面、点一線間距離評価

④ 導出パラメータの線形補間を用いた点群位置修正

時刻に基づくずれ修正パラメータの補間により点群の位置を修正する。

3. レジストレーション誤差評価法

前報[1]では、レジストレーション前後の点群の視覚的評価と、最近点対間の点間距離を誤差量として、誤差量に応じた色付けを用いた評価を行った。しかしながら、これらの手法には、図 2(a)に示したようなスキャンラインの影響で、スキャンライン間の距離の半分程度が誤差として認識され、点群の形状間の誤差が正しく評価出来ないという問題 (問題 1) や、長距離を計測した MMS 計測点群の場合、走行軌跡全域に渡る評価が困難であるという問題 (問題 2) ならびに、誤差の詳細な分析 (任意方向の誤差量評価など) が行えないという問題 (問題 3) が

存在する。本報では、これらの問題を解決するために、以下の Step1-4 で構成されるレジストレーション誤差評価法を提案する。なお以降では、往復の計測で得られた、往路点群と復路点群が存在するという前提で説明を行う。

Step1：誤差評価箇所と評価用点群切り出し

MMS の経路に沿って等間隔に誤差を評価するために、点群重複領域に存在する軌跡点の端点を始点として、一定間隔ごとに誤差評価を実施する軌跡点を選択する。そして、往路点群、復路点群内それぞれから、選択された軌跡点から半径 d_r [m] 以内に存在する点を抽出し、得られた点集合を S_k, T_k とする。

Step2：誤差評価方向の導出

誤差評価方向を決定するために、選択された軌跡点と、これに隣接する軌跡点の位置の差分から MMS の進行方向のベクトル \mathbf{u} を求め、世界座標系の z 軸に沿ったベクトル \mathbf{w} との外積から、進行方向に垂直なベクトル \mathbf{v} を求め、これらを誤差評価方向 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ とする。

Step3：主成分分析を用いた点分類

S_k, T_k 内の各点 i に対して Demantke ら [2] の手法を用いた、主成分分析による点分類を行う。各点 i の周辺点群の分布状態の推定から、 i を線状点、平面状点、立体状点の 3 種類に分類する。さらに平面状点では、最小固有値に対応する単位固有ベクトルである法線ベクトル \mathbf{n}_i を保存し、線状点では、最大固有値に対応する単位固有ベクトルである線状点の接線ベクトル \mathbf{a}_i を保存する。

Step4：点-平面ならびに点-線間距離評価

問題 1 を解決するために点-平面ならびに点-線間距離の評価を行う。 S_k 内の平面状点、線状点の各点 i において T_k 内に存在する、同じ分類結果の最近点を見つけ、これを i' とする。得られた平面状点对、線状点对を用いて、点-平面間距離 D_{PL} は式(1)で、点-線間距離 D_{LI} は式(2)で計算される。

$$D_{PL} = |(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i'}) \cdot \mathbf{n}_{i'}| \tag{1}$$

$$D_{LI} = \|\mathbf{d}_{Li}\| = \|(\mathbf{p}_{i'} - \mathbf{p}_i) - \{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i'}) \cdot \mathbf{a}_{i'}\} \mathbf{a}_{i'}\| \tag{2}$$

ここで、 \mathbf{p}_i は点 i の位置である。また、問題 3 を解決するために $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 各方向の点-平面間距離を、 $D_{PL} \mathbf{n}_{i'}$ と各单位方向ベクトルとの内積計算により求め、点-線間距離を \mathbf{d}_{Li} と各单位方向ベクトルとの内積計算により求める。

問題 2 を解決するために、各誤差評価箇所における点-線間、点-平面間距離の平均値（誤差量）と標準偏差の計算による、グラフとしての表示、 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 各方向における誤差の最大箇所、最小箇所の誤差量ならびに全体の平均値の評価を行う。

4. 結果

図 3 に選択された全 15 箇所の誤差評価箇所と、No10 付近に存在した標識の点群のレジストレーション結果を示す。また、図 4 に点-平面間距離 (D_{PL})、点-線間距離 (D_{LI}) の平均値と標準偏差のグラフを示す。図 4 からは、 D_{PL}, D_{LI} の平均値がいずれも 0.05m、標準偏差が 0.03m 以下になり、高精度なレジストレーションが行われたことが分かる。また、図 5 にレジストレーション後の D_{PL}, D_{LI} ならびに、これらを求めるために用いた平面状点、立体状点の対応点对の点-点間距離の平均値、標準偏差のグラフを示す。 D_{PL} の平均値と標準偏差は、同じ対応点对を用いて求めた点-点間距離の平均値と標準偏差よりも小さくなっているが、 D_{LI} の平均値と標準偏差は、同じ対応点对を用いて求めた点-点間距離の平均値と標準偏差よりも大きくなっている。これは、主成分分析によって求められた線状点の接線ベクトルが不均一なことが原因で

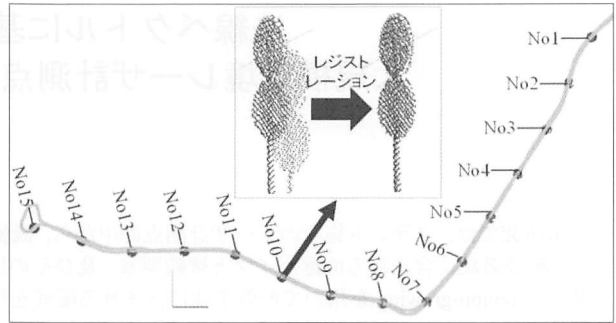


図 3 誤差評価箇所とレジストレーション結果

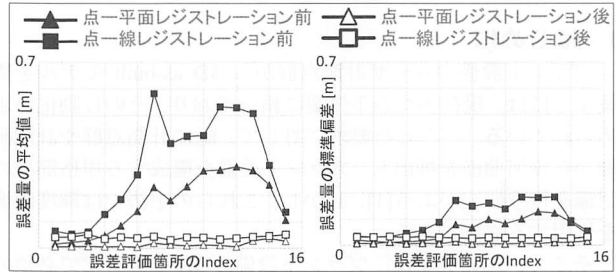


図 4 レジストレーション前後の誤差量の平均と標準偏差

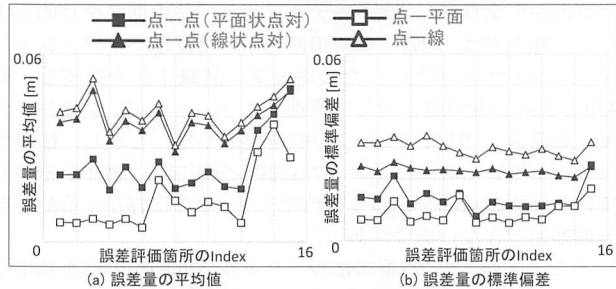


図 5 点間距離と点-平面間、点-線間距離の比較

表 1 誤差量の最大、最小、平均値比較

		レジストレーション前			レジストレーション後		
		a[m]	b[m]	c[m]	a[m]	b[m]	c[m]
点-平面	u方向	0.0361	0.0013	0.0153	0.0035	0.0006	0.0020
	v方向	0.1100	0.0052	0.0297	0.0078	0.0014	0.0035
	w方向	0.2797	0.0033	0.1402	0.0341	0.0028	0.0102
点-線	u方向	0.4045	0.0257	0.1228	0.0318	0.0175	0.0237
	v方向	0.2947	0.0345	0.0915	0.0258	0.0161	0.0207
	w方向	0.5065	0.0193	0.2301	0.0279	0.0119	0.0195

a: 15箇所中、誤差量が最大となった箇所の値
 b: 15箇所中、誤差量が最小となった箇所の値
 c: 全15箇所の平均値

ある可能性が考えられる。表 1 に $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 方向の D_{PL}, D_{LI} の最大箇所、最小箇所の誤差量と全 15 箇所の平均値を示す。この表の点-平面のレジストレーション後の結果から、鉛直方向への誤差量が他の方向への誤差量よりも大きいことが分かる。

5. 結論

本報では、点群の形状間の誤差の正確な評価、誤差の方向の分析ならびに、走行軌跡全域に渡る誤差の評価が可能な手法を提案し、MMS 計測点群と走行軌跡へ適用を行い、レジストレーション誤差の詳細な評価を行った。その結果、レジストレーション後の誤差量は平均で 0.01m 程度であり、鉛直方向の誤差量が最も大きいことが分かった。

参考文献

[1] 高井俊吾 他, 走行軌跡を用いた市街地 MMS 計測点群の高精度レジストレーション, 精密工学会 2012 秋季大会講演論文集, (2012)
 [2] Jerome Demantke, et al., Dimensionality based scale selection in 3D LiDAR Point Cloud, ISPRS Workshop, Laser Scanning, vol. XXXVIII, (2011)