

TLS 点群の誤差楕円体の推定精度向上と点群位置合わせ処理への応用

北海道大学 ○横森壮喜 伊達宏昭 金井理
産機エンジニアリング株式会社 森部義規

要旨

本研究では、3次元モデル生成に必要な点群処理の精度向上を目的とし、地上設置型レーザースキャナ(TLS)で取得した点群の測距誤差およびレーザ照射角度誤差を表現できる誤差楕円体の推定法と、その点群処理への応用法を確立する。本報告では、誤差楕円体推定の精度向上および推定した誤差楕円体を点-平面間二乗距離を最小化する点群位置合わせ処理に導入する手法を提案し、その効果の検証を行う。

1. はじめに

近年、3次元レーザ計測技術が普及し、現況を反映した3次元モデルが生成可能となっている。しかし3次元モデル生成に必要な位置合わせや曲面抽出などの点群処理において、計測誤差の影響で処理精度が低下するという問題がある。点群からの高精度な3次元モデル生成のためには、計測点群の様々な誤差要因を考慮した点群処理が必要である。前報¹⁾では、計測距離、レーザ入射角、反射強度に基づく測距誤差、ならびにスキャナの機械特性に基づくレーザ照射角度誤差を用いた地上設置型レーザースキャナ(TLS)で取得した点群の誤差楕円体の推定法を提案し、推定した誤差楕円体を対応点間二乗距離の最小化に基づくICPアルゴリズムに重みづけとして導入した。本報告では、誤差楕円体推定に必要な測距誤差の推定精度向上のための誤差モデルの提案と、誤差楕円体を点-平面間二乗距離を最小化するICPアルゴリズムに導入する手法を提案し、点群位置合わせの精度向上の効果を検証する。

2. TLS 点群の誤差楕円体推定

2.1 誤差楕円体

TLS 点群の誤差楕円体は、TLS 点群の各点の計測誤差の大きさ(偶然誤差の標準偏差)と方向を表す立体で、計測した点の測距距離、仰角、方位角それぞれの偶然誤差の標準偏差を用いて算出できる²⁾。各点*i*における誤差楕円体の推定では、まず、式(1)の点*i*の分散共分散行列 Σ_i を求める。

$$\Sigma_i = J_i \begin{bmatrix} \sigma_{\rho,i}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\alpha}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta}^2 \end{bmatrix} J_i^T \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{\rho,i}, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\theta}$ は、測距距離(ρ)、仰角(α)、方位角(θ)の偶然誤差の標準偏差、 J_i は、極座標系のヤコビ行列である。次に、得られた分散共分散行列 Σ_i の固有値解析を行う。得られた固有値の平方根が誤差楕円体の各半軸の長さ、対応する固有ベクトルが各軸の方向を表す。よって、分散共分散行列および誤差楕円体の推定には $\sigma_{\rho,i}, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\theta}$ が必要である。前報¹⁾ではレーダ距離方程式に基づく計測距離、レーザ入射角、反射強度を考慮した測距誤差モデル $\sigma_{\rho,i}$ を提案したが、特定の条件下で実計測誤差との傾向の差異が見られた。本報告では、測距誤差をより適切に推定可能とするモデルを検討する。また、レーザ照射角度誤差 $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\theta}$ については前報¹⁾の結果を採用する。

2.2 測距誤差 $\sigma_{\rho,i}$ の推定

レーザ計測における測距誤差は、反射レーザの減衰と強い相関があることが知られている³⁾。反射レーザの減衰(SNR)は、レーダ距離方程式から式(2)で得られる。

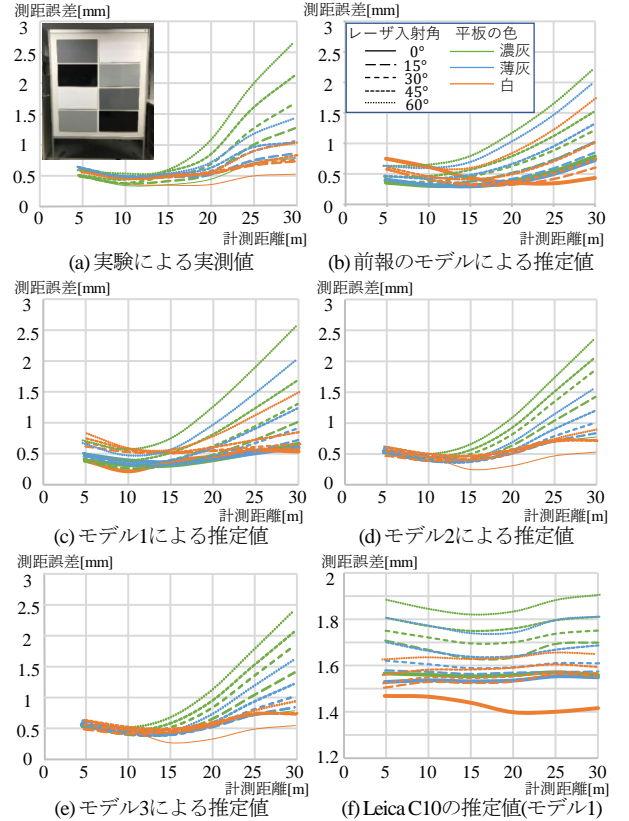


図1 測距誤差の実測値とモデル推定結果

表1 各スキャナ、モデルにおける推定誤差と実測誤差のRMSE

単位:[mm]	モデル1	モデル2	モデル3
Z+F 5010	1.6×10^{-2}	8.6×10^{-3}	7.9×10^{-3}
Z+F 5016	1.2×10^{-2}	5.7×10^{-3}	5.4×10^{-3}
Leica C10	3.4×10^{-2}	7.3×10^{-3}	6.1×10^{-3}

$$SNR = \frac{\cos \alpha}{\rho^2} \pi \gamma \eta_{sys} \eta_{atm} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha[\text{rad}]$ はレーザ入射角、 $\rho[\text{m}]$ は計測距離、 γ は反射特性値、 η_{sys} はシステム損失、 η_{atm} は大気損失である。本研究では、式(2)における計測距離 ρ 、レーザ入射角 α 、反射特性値 γ を測距誤差の要因として考慮し、前報¹⁾ではSNRの逆数の近似として、式(3)の誤差モデルを提案した。

$$\sigma_{\rho,i} = \frac{f(\rho_i, I_i)}{g(\theta_i)} \quad (3)$$

ここで、 $f(\rho_i, I_i)$ は計測距離 ρ_i 、反射強度 I_i の2次式、 $g(\theta_i) = \cos \theta_i$ である。2次式の各項の係数は、図1(a)に示すパネルに対し、異なる計測距離、レーザ入射角の条件下で取得した実計測点群から算出した測距誤差を用いた最小二

乗法で決定した。

提案モデルは、図 1(b)に示すように、図 1(a)の実測誤差(スキャナは Z+F Imager 5010 を使用)の傾向を概ね良好に再現できているものの、反射強度や、レーザ入射角変化に対する測距誤差の傾向を十分に表現できていない箇所があった。そこで、計測距離と反射強度の関係をより妥当に表現できるように $f(\rho_i, I_i)$ は ρ_i と I_i についてより高次な式(本報では 4 次式)を導入し、レーザ入射角に関して、以下の 3 つの形式を検討し推定誤差の値を確認した。

- ・モデル 1: $g = \cos\theta$ (前報と同じ)
 - ・モデル 2: $g = 1$ (入射角変化は反射強度に含むと仮定)
 - ・モデル 3: $g = \cos\theta + p$ (入射角に対する変化を緩和)
- 4 次式の係数は前報¹⁾と同様に、実計測データから算出した誤差を用いた最小二乗法により算出した。

本研究では、Z+F Imager 5010, Z+F Imager 5016, Leica C10 の 3 種類のスキャナを用いて上記のモデルを推定した。図 1(c)から(e)に Z+F Imager 5010 の計測点群における測距誤差の各モデルの推定値、表 1 に各スキャナ、各モデルにおける測距誤差の実測値と推定値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を示す。図 1(c)から(e)より、モデル 2 と 3 は実測値の傾向をよく表現できていることが確認できる。また、表 1 より、いずれのスキャナもモデル 3 において RMSE は最小となった。また、図 1(f)に Leica C10 (TOF 方式)の推定誤差(モデル 3)の結果を示す。測距方式の違いにより誤差変化の傾向が Z+F Imager 5010 と大きく異なるが、提案モデルにより測距誤差をよく近似できることが確認できた。

3. 誤差楕円体の位置合わせへの応用

3.1 誤差楕円体を考慮した点群位置合わせ手法

本報では、点-平面間二乗距離を最小化する ICP アルゴリズム⁴⁾へ誤差楕円体を重みづけとして導入し、点群位置合わせの精度向上の効果を検証する。この手法では、2 つの点群間において、最近点を対応点とする対応点抽出と式(4)に示す点-平面間二乗距離総和の最小化を反復する。

$$E = \sum_{(i,j) \in C} w_{ij} \| \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{p}_j^T - (\mathbf{R}\mathbf{q}_i^S + \mathbf{t})) \|^2 \quad (4)$$

ここで、 w_{ij} は対応点ペアの重み、 C は対応点ペアの集合、 \mathbf{p}_j^T , \mathbf{q}_i^S はそれぞれターゲット点群内の点 j 、ソース点群内の点 i の位置、 \mathbf{n}_j はターゲット点 j の法線ベクトル、 \mathbf{R} は回転行列、 \mathbf{t} は並進ベクトルである。重みは前報と同様に、対応点対に対するマハラノビス距離を利用する。点平面距離評価においては、ターゲット点と法線で定義される平面 f 上の点のドリフトの影響を無視できるように、図 2 に示すように、ソース点 \mathbf{q}_i^S に最も近い f 上の点 \mathbf{r}_j^T がターゲット点 \mathbf{p}_j^T と同様の誤差楕円体を持つものと仮定し、式(5)に示すマハラノビス距離に基づく重み算出に利用した。

$$w_{ij} = \sqrt{(\mathbf{r}_j^T - \mathbf{q}_i^S)(\boldsymbol{\Sigma}_i + \boldsymbol{\Sigma}_j)^{-1}(\mathbf{r}_j^T - \mathbf{q}_i^S)^T} \quad (5)$$

ここで、 $\boldsymbol{\Sigma}_i$, $\boldsymbol{\Sigma}_j$ はそれぞれソース点 \mathbf{q}_i^S 、ターゲット点 \mathbf{p}_j^T の誤差楕円体の分散共分散行列である。マハラノビス距離は、データの相関関係を考慮した距離であり、対応点の誤差楕円体の長軸方向が差分ベクトルの方向に近くなるほど点の信頼度が低くなり、重みは小さくなる。ここで、誤差がほとんど 0 に近い場合、重みが非常に大きな値となり、適切な重みづけによる位置合わせ処理が行われないことが考えられる。そのため、前報と同様に、重みがある値 a を超える場合は、指定した最大値を超えないように重みを $w'_{ij} =$



図2 重み計算に利用する点 図3 使用した屋外、屋内環境の点群

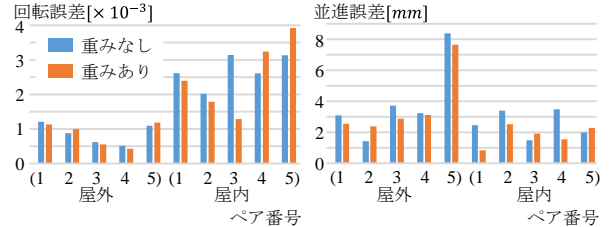


図4 位置合わせ誤差(左:回転誤差, 右:並進誤差)

$a + b(w_{ij} - a) / (w_{max} - a)$ とした(実験では $a = 1, b = 20$ に設定、 w_{max} は点群内の w_{ij} の最大値)。以上で述べた重みを用いて、位置合わせの精度向上の効果を検証する。

3.2 実験結果

実計測点群の位置合わせ処理に提案法を適用し、その効果を検証した。位置合わせ処理の真値(座標変換行列)はトータルステーションとターゲットを使用して取得した。位置合わせ誤差は回転誤差と並進誤差に分け、式(6), (7)のように定義した。

$$e_R = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |r_{ij} - \hat{r}_{ij}| \quad (6)$$

$$e_t = \|\mathbf{t} - \hat{\mathbf{t}}\| \quad (7)$$

ここで、 $\langle \mathbf{R} = [r_{ij}], \mathbf{t} \rangle$ は位置合わせ結果の座標変換行列、 $\langle \hat{\mathbf{R}} = [\hat{r}_{ij}], \hat{\mathbf{t}} \rangle$ はトータルステーションとターゲットから取得した理想位置合わせ結果の座標変換行列である。実験対象として、図 3 のような屋外、屋内環境を複数箇所から計測した点群(セルサイズ 1cm でボクセルサンプリング適用)を用い、それぞれ 5 つの点群ペアに対して重みあり、重みなし ($w_{ij} = 1$) の位置合わせを適用し、上記の回転誤差、並進誤差を算出した。回転誤差を図 4 左、並進誤差を図 4 右に示す。図より、屋外環境では、回転誤差は 5 ペア中 3 ペア、並進誤差は 5 ペア中 4 ペアで減少し、減少率の平均はそれぞれ 0.2%, 6.3%であった。屋内環境では、回転誤差、並進誤差ともに 5 ペア中 3 ペアで減少し、減少率の平均はそれぞれ 5.8%, 20.7%であった。

4. おわりに

本研究では、TLS 点群の誤差楕円体における測距誤差の推定精度の向上と、誤差楕円体を点-平面間二乗距離を最小化する ICP アルゴリズムに導入する手法の提案と効果の検証を行い、誤差楕円体が点群位置合わせ精度向上に有効であることを確認した。今後の課題としては、誤差楕円体を他の点群処理に応用する手法の提案が挙げられる。

参考文献

- 1)横森他, TLS 点群に対する誤差楕円体推定と複数点群位置合わせ処理への応用. 2022 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 138-139 (2022)
- 2)Mustafa, O. et al., A generic point error model for TLS derived point clouds. In: Proc. Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV, SPIE Vol. 10332, paper No. 103320J. 1-16 (2017)
- 3)Soudarissanane, S., et al., Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79, 240-251 (2011)
- 4)Szymon Rusinkiewicz and Marc Levoy. Efficient Variants of the ICP Algorithm, Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 145-152 (2001)