

面計測を利用したレーザースキャナデータの座標変換

高知工科大学 ○宮崎 倫理, 木下 和, 高木 方隆

1 背景

レーザースキャナは、主に地すべりや遺跡などの調査に利用されている。いくつかの点において、レーザースキャナで取得されたデータは、レーザースキャナ自身の座標であるため、それぞれ地上座標への座標変換を行い、設置場所ごとのデータを統合しなければならない。そのためには、基準点を3ヶ所以上設置する必要がある。基準点は、一般にプリズムが利用されている。

プリズムの地上座標は、トータルステーション等の機材を用いて高精度で計測することができる。しかし、プリズムのレーザー座標は、視準装置がないため高精度で取得することができないため、高精度での座標変換は期待できない。そのためレーザースキャナデータの高精度座標変換手法の開発が求められる。

2 目的

本研究は、レーザースキャナを用いて平面計測することにより高精度で基準点座標を取得し、取得した基準点を使った座標変換を検討した。平行でない3つの平面を計測し、それぞれ面の式を導くことができる。その3つの平面からできるひとつの交点は、仮想的な基準点として利用することができる。その基準点を使って座標変換を行えば、高精度での変換が可能と考えた。

3 使用機材

使用したレーザースキャナは、地上において使用することを目的としたスキャナタイプのレーザーセンサであり、ノンプリズムタイプの光波測距儀の一種である。レーザースキャナは、写真を撮るように、一般的な単点タイプの光波測距儀よりも、高速高密度に位置情報を取得可能である。得られるデータは、対象物までの距離、角度、対象物の反射強度、カラ

ー情報である。レーザースキャナの測距精度は±2.5cm(標準偏差)である。表3-1にスキャニング性能を示す。

表3-1 レーザーのスキャニング性能

	縦方向	横方向
スキャニング速度	5~521line/s	1°/s~15°/s
角度ステップ	0.24°	0.24°
角度分解能	0.036°	0.018°

4 座標変換式

今回、座標変換には、三次元の線形変換を適用した。その変換式は次式のとおりである。

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_4 & P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 & P_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

X, Y, Z : 地上座標

$P_1 \sim P_{12}$: パラメーター

x, y, z : レーザー座標

この式を用いる場合、レーザースキャナのデータは、4つ以上の基準点を設けることにより、最小二乗法を用いてレーザースキャナの設置位置を原点とする変換係数を計算することができる。

5 基準点取得法

今回基準点を取得するために3つの平行でない面を計測する。その概念を図5-1に示す。そして求められる交点を仮想的な基準点として利用する。

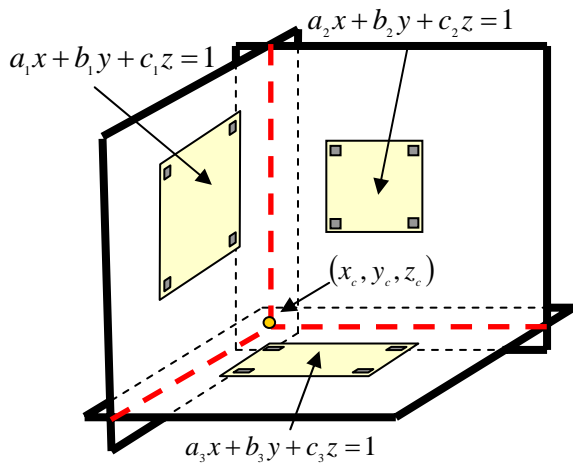


図 5-1 面を使った基準点の概念図

室内実験を高知工科大学の体育館で行った。計測したボードを図 5-2 に示す。このボードを体育館の四隅の 4 つのブロックに 3 枚ずつ設置した。レーザースキャナをブロック 2 とブロック 3 の間に設置し (図 5-3)、同じ状況で 8 回のスキャニングを行った。なお、検証点としてプリズムは、ボードの近くに設置した。



図 5-2 設置した基準点取得用ボード

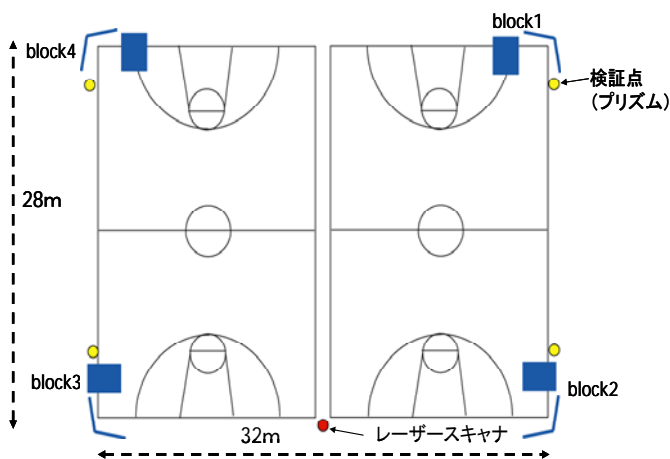


図 5-2 レーザースキャナとボードの設置位置

3 つの面の交点を求めるためには、それぞれの面の式を求めなければならない。面の式は、係数を a_j, b_j, c_j とすると $a_j x + b_j y + c_j z = 1$ で表すことができる。面を計測した多数のレーザースキャナデータから、最小二乗法を用いて次式により面の式の係数が導かれる。

$$\begin{pmatrix} a_j \\ b_j \\ c_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum x_i \\ \sum y_i \\ \sum z_i \end{pmatrix}$$

(a_j, b_j, c_j) : 面の式の係数

(x_i, y_i, z_i) : レーザースキャナデータ

i : レーザースキャナのデータ番号

j : 面番号

3 つの面からできる交点は式を連立させることにより求めることができ、次式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

(a_1, b_1, c_1) : ボード 1 の係数

(a_2, b_2, c_2) : ボード 2 の係数

(a_3, b_3, c_3) : ボード 3 の係数

(x_c, y_c, z_c) : 交点座標

6 誤差伝播の法則による基準点の誤差推算

誤差伝播の法則により実験における誤差を推算した。今回、誤差伝播の法則を用いて三次元での誤差を推算することが、非常に複雑で、困難だったため、二次元 (X, Y 平面) での誤差を推算した。

6.1 レーザースキャナデータの誤差

レーザースキャナで取得した座標 (x_i, y_i) の誤差は、レーザースキャナと対象物との距離 r と水平角度 ϕ 、極角度 λ の精度で決まる。次式は x_i, y_i を求める式である。

$$\begin{cases} x_i = r \sin \lambda \cos \phi \\ y_i = r \sin \lambda \sin \phi \end{cases}$$

この式に含まれる誤差 r と ϕ, λ はカタログスペック

より決まっている。本研究では角度の誤差の値は、レーザースキャナの角度分解能の 1/10 の値を使用した。それぞれの誤差 (標準偏差) を $\sigma_r, \sigma_\lambda, \sigma_\phi$ とし、誤差伝播の法則に従うと x_i, y_i の誤差 σ_{x_i} と σ_{y_i} は、次式により、計算できる。

$$\sigma_{x_i}^2 = \left(\frac{\partial x_i}{\partial r}\right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{\partial x_i}{\partial \lambda}\right)^2 \sigma_\lambda^2 + \left(\frac{\partial x_i}{\partial \phi}\right)^2 \sigma_\phi^2$$

$$\sigma_{y_i}^2 = \left(\frac{\partial y_i}{\partial r}\right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial \phi}\right)^2 \sigma_\phi^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial \lambda}\right)^2 \sigma_\lambda^2$$

6.2 直線の式に含まれる誤差

二次元における基準点は、二直線の交点 (x_c, y_c) が基準点となる。二直線の式は $y = a_1x + b_1, y = a_2x + b_2$ とおく。

多数のレーザースキャナデータから最小二乗法を用いて直線の式 $y = a_jx + b_j$ を計算すると、次式により、係数 a_j, b_j を求めることができる。

$$a_j = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i x_i - \sum x_i \sum x_i}$$

$$b_j = \frac{\sum x_i x_i \sum x_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i x_i - \sum x_i \sum x_i}$$

i : データ番号

n : データ数

j : 直線番号

係数 a_j と b_j の誤差 $\sigma_{a_j}, \sigma_{b_j}$ は、 x_i, y_i の誤差 $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}$ が求まっているので、誤差伝播の法則より、次式で表すことができる。

$$\sigma_{a_j}^2 = \Sigma \left\{ \left(\frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right\} + \Sigma \left\{ \left(\frac{\partial a_j}{\partial y_i} \right)^2 \sigma_{y_i}^2 \right\}$$

$$\sigma_{b_j}^2 = \Sigma \left\{ \left(\frac{\partial b_j}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right\} + \Sigma \left\{ \left(\frac{\partial b_j}{\partial y_i} \right)^2 \sigma_{y_i}^2 \right\}$$

6.3 交点の誤差

二つの直線の交点は、二つの直線の式を連立させて求めることができる。交点 (x_c, y_c) は次式から計算できる。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & -1 \\ a_2 & -1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -b_1 \\ -b_2 \end{pmatrix}$$

係数 x_c と y_c の誤差 $\sigma_{x_c}, \sigma_{y_c}$ は、 a_j と b_j の誤差 $\sigma_{a_j}, \sigma_{b_j}$ が求まっているので、誤差伝播の法則より、次式で表すことができる。

$$\sigma_{x_c}^2 = \left(\frac{\partial x_c}{\partial a_1}\right)^2 \sigma_{a_1}^2 + \left(\frac{\partial x_c}{\partial a_2}\right)^2 \sigma_{a_2}^2 + \left(\frac{\partial x_c}{\partial b_1}\right)^2 \sigma_{b_1}^2 + \left(\frac{\partial x_c}{\partial b_2}\right)^2 \sigma_{b_2}^2$$

$$\sigma_{y_c}^2 = \left(\frac{\partial y_c}{\partial a_1}\right)^2 \sigma_{a_1}^2 + \left(\frac{\partial y_c}{\partial a_2}\right)^2 \sigma_{a_2}^2 + \left(\frac{\partial y_c}{\partial b_1}\right)^2 \sigma_{b_1}^2 + \left(\frac{\partial y_c}{\partial b_2}\right)^2 \sigma_{b_2}^2$$

これら一連の計算により、最終的に、基準点の誤差 σ_{x_c} と σ_{y_c} が求まる。この計算には、多大な時間を要した。

7 結果

今回、四箇所を設置したボードからそれぞれ基準点を取得した。表 7-1 は、8 回分のスキャニングデータから取得したボードの基準点座標の標準偏差を表したものである。

表 7-1 ボードから取得した基準点座標の標準偏差

	x_c (m)	y_c (m)	z_c (m)
ブロック1	4.40E-03	6.18E-03	1.15E-02
ブロック2	4.08E-03	1.97E-03	5.73E-03
ブロック3	4.04E-03	1.43E-03	2.67E-03
ブロック4	3.93E-03	7.97E-03	1.80E-02

従来のプリズムを使った基準点の取得方法では大きいときで 10cm 程度の誤差があったものが、今回の手法を用いることによって最大でも 2cm となった。

表 7-2 は二次元において誤差伝播の法則より求めた基準点 (x_c, y_c) の値の標準偏差と、実験結果から求めた値の標準偏差を表に表したものである。

表 7-2 基準点座標における推算された誤差と実験による標準偏差 (m)

	誤差伝播の法則による誤差		実験結果による標準偏差	
	x_c	y_c	x_c	y_c
block1	4.87E-02	4.93E-02	4.92E-03	7.00E-03
block2	7.21E-03	4.44E-03	3.87E-03	1.83E-03
block3	6.99E-03	3.61E-03	4.50E-03	1.55E-03
block4	7.87E-02	9.74E-02	5.74E-03	9.43E-03

参考文献

- (1) Tomoya SAKAI・Jong Hyeok JEONG Masataka TAKAGI, Laser Scanner Measurement for Monitoring Landslide Displacement, Proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing, Hanoi VIETNAM, pp.LID2-2, 2005
- (2) Jaan-Rong Tsay・Shu-yi Lee, Corner Features for Unifying Coordinate Systems of Multiple LIDAR Stations, Proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing, Hanoi VIETNAM, pp.LID1-5, 2005
- (3) RIEGAL Japan. Ltd., "LMS-Z210 owner's manual"

実験結果は、すべて誤差伝播の法則により推算した値よりも小さい値を示した。特に、レーザースキャナからの距離の大きいブロック 1 と 4 については顕著であった。現在、誤差伝播の法則による結果に問題がないか、検討中である。

次に、面の交点より求めた基準点と、従来手法のプリズムを基準点として用いた場合で、それぞれ座標変換を行った。表 7-3 は座標変換を行った後、検証点における平均二乗誤差の値を表したものである。検証には、トータルステーションより取得した 4 つのプリズムの座標を真値とした。なお、8 回分のスキヤニングにおける平均二乗誤差を表している。

表 7-3 座標変換における検証点の
平均二乗誤差 (m)

	プリズム	ボードの交点
スキヤニング1	2.64E-02	7.48E-03
スキヤニング2	1.36E-01	8.85E-03
スキヤニング3	5.61E-02	8.39E-03
スキヤニング4	9.75E-02	7.70E-03
スキヤニング5	5.61E-02	1.11E-02
スキヤニング6	1.01E-01	7.96E-03
スキヤニング7	8.42E-02	7.28E-03
スキヤニング8	1.31E-01	9.17E-03

表 7-3 より最も平均二乗誤差の大きいスキヤニング 5 をみると、プリズムを使った座標変換とボードの基準点を使った座標変換の誤差は、1/4 にまで小さくすることができる。

このことから面を利用して取得した基準点を使った座標変換は有効であると言える。

8 考察

本研究より、3 つの平行でない面を使った高精度の基準点の取得は、可能であることが解った。また、取得した基準点を使った座標変換はプリズムを使った座標変換よりも高精度で行うことができる。

今回、室内での実験では、28m×32m の範囲で行った。今後、野外で広範囲の実験を行い、同じような結果が出せるのかを検討していく必要がある。ただし、誤差伝播の法則による結果と異なるので、今後、シュミレーションデータを用いた検討を行う予定である。