基準点計測を必要としない
レーザースキャナデータの座標変換

1070544　宮崎　倫理
高木研究室

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。レーザースキャナは三次元座標を短時間で取得することができるが、見える範囲しかデータを取得できない。見えない場所のデータを取得するためには、レーザースキャナの設置場所を変えなければならない。また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、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としてプリズムを 4 台以上設置する必要がある。プリズムはレーザースキャナから放出された光波を大きい強度で反射させるものである。

基準点のデータを取得するためには、トータルステーションなどの機材を用いて高精度で計測するため、取得時間を大きく費やしてしまう。したがって、プリズムを用いなくても、座標変換できるしくみが求められている。昨年のプロジェクト研究においては、平面計測による座標変換の可能性が示された。したがって、この手法を確立する必要がある。

2.目的

本研究は、レーザースキャナの座標変換に使用する基準点をプリズムではなく、建物などの面から計算される基準点を用いた座標変換の可能性を検討する。計測された 3 つの平面データより、面の式を導くことで、仮想的な基準点が 4 つ生成できる。この基準点をもとに座標変換を試みる。

今回は地上座標に座標変換されたデータではなくレーザースキャナ同士の座標を統合するための座標変換を行った。

3.使用機材

・レーザースキャナ

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、一般的な短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

スキャニング	（縦方向）	（横方向）
スキャニング	5～52　line/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.座標変換手法

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、レーザースキャナの設置位置を原点とする座標変換式を計算することができる。その変換式は次式のとおりである。

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_4 & P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 & P_9 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \text{(式 4−1)}$$

X,Y,Z：地上基準点座標
P_1～P_{12}：地上座標パラメーター
x, y, z：画像基準点座標

今回基準点を取得するために 3 つの平行でない面から導くことのできる点を基準点とした。つまり、3 つの面の交点と、2 つの面の交線上の点を仮想的な基準点として利用する。その概念を図 4−1 に示す。

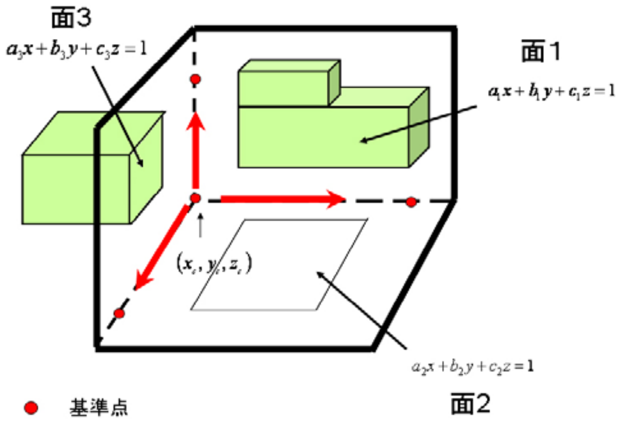

図 4-1 面を使った基準点の概念図

交点を求めるために、それぞれの面の式を求めなければならない。面の式は、$ax+by+cz=1$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を導く。

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum x_i \\ \sum y_i \\ \sum z_i \end{pmatrix} \quad \text{(式 4-2)}$$

(a, b, c)：法線ベクトル
(x_i, y_i, z_i)：レーザースキャナデータ

そして、その 3 つの面の式を使い交点を求め、一つめの基準点とする。次に面と面の交線上に 3 つの基準点を設けた。これにより 4 つの基準点を取得することができるので幾何変換が可能となる。

5.対象・位置

本研究では、高知工科大学のシンボルタワーを対象とした。図 5−1 はレーザースキャナを設置した場所を番号で示している。また、基準点を導くために利用した 3 つの面の位置も示した。

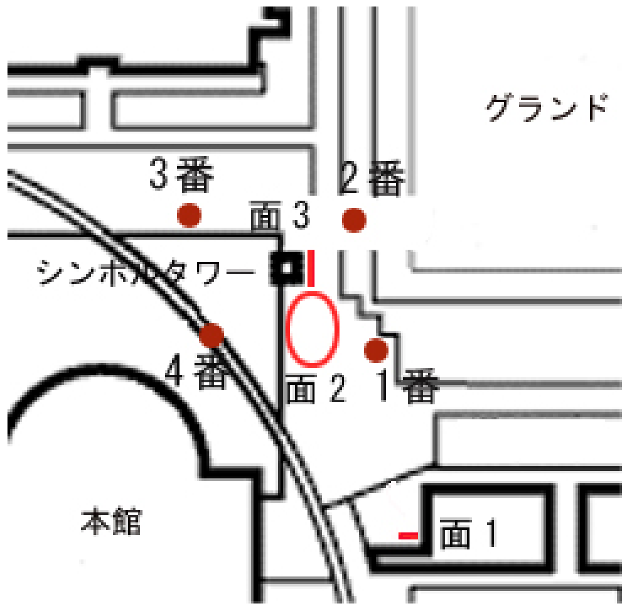

図 5-1 レーザースキャナ設置位置

6.座標変換結果

6-1. データの取得と座標変換

図 6-1 は、2 番から得られたレーザースキャナのデータを可視化したものであり、このデータから 3 つの面の式を求めた。同様に 1 番から得られたデータも同じ 3 つの面の式を求め、仮想的な基準点を設定した後、座標変換を行った。

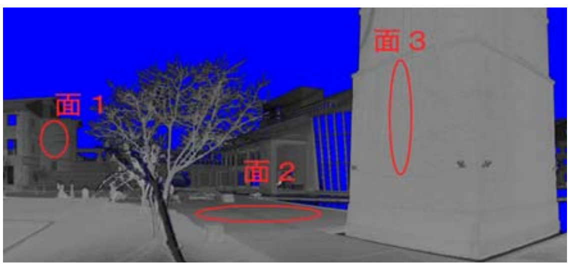

図 6-1 2 番から得られたデータ

6-2.座標変換誤差

統合させた 1 番と 2 番のレーザースキャナデータから同じ箇所の座標を抽出した。表 6-1 は、その残差を示したものである。

表 **6-1** 座標変換における残差**(m)**

No	xの残差	yの残差	zの残差
1	0.225	−0.009	0.045
2	0.234	−0.079	0.163
3	0.139	−0.107	−0.042
4	−0.001	0.278	0.145
5	0.06	0.003	−0.084
6	0.113	0.056	0.171
7	0.06	0.152	0.174
8	−0.119	0.011	−0.007
9	0.135	0.267	0.047
10	0.369	−0.096	−0.093
標準偏差	0.177	0.142	0.114

残差は、最大で 37cm 程度になり、レーザースキャナ自身の精度 2.5cm と比べて非常に大きなものとなった。

７.誤差伝播の法則による変換結果の評価

座標変換を行った結果の残差が許容範囲内であるかどうか調べるため、誤差伝播の法則から評価を行った。今回は、二次元平面において 1 番と 2 番の座標変換誤差が許容範囲内かどうかを検討する。使用した面は面 1 と 3 を使用した。

誤差伝播の法則とは $x_1, x_2 \cdots x_n$ のデータを使って、$X = f(x_1, x_2 \cdots x_n)$ により X を導いたときの X の誤差を求めるものである。この計算は、計測された $x_1, x_2 \cdots x_n$ のデータに含まれる誤差が $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \cdots \sigma_{x_n}$ のとき､それぞれの誤差が独立であれば、次式で表すことができる。

$$\sigma_X{}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}{}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}{}^2 \quad \text{（式 7-1）}$$

今回の二次元平面における座標変換の式は次式である。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i - u_0 \\ v_i - v_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \quad \text{(式 7-2)}$$

X, Y：座標変換後の座標

u_i, v_i：レーザースキャナデータ

u_0, v_0：レーザースキャナの交点座標

θ：回転角度

x_0, y_0：基準点座標

この変換式に含まれる誤差は、$u_i, v_i, u_0, v_0, \theta$ なので、各々の誤差を求めなければならない。

7-1.レーザースキャナデータの誤差

u_i, v_iに含まれる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で決まる。rとϕの誤差はカタログスペックにより決まっている。次式はu_i, v_iを導く式である。

$$u_i = r\cos\phi \quad \text{(式 7-3)}$$

$$v_i = r\sin\phi \quad \text{(式 7-4)}$$

これを誤差伝播の法則にしたがって解くとu_i, v_iの誤差を求めることができる。

7-2.二直線からなる交点の座標における誤差

二直線による交点（u_0, v_0）の誤差を求めるためには、面の式の誤差を求めなければならない。二次元平面での面の式は$v = au + b$となり、これを最小二乗法によって次式により係数a,bを求めることができる。

$$a = \frac{n[u_i v_i] - [u_i][v_i]}{n[u_i u_i] - [u_i][u_i]} \quad \text{(式 7-5)}$$

$$b = \frac{[u_i u_i][v_i] - [u_i][u_i v_i]}{n[u_i u_i] - [u_i][u_i]} \quad \text{(式 7-6)}$$

n：データ数

各データに含まれる誤差(σ_u, σ_v)は前節で求めたので、誤差伝播の法則にしたがってa,bの誤差σ_a, σ_bが求まる。

次に、二直線の式は次式で与えられるものとする。

$$v = a_1 u + b_1 \quad \text{(式 7-7)}$$

$$v = a_2 u + b_2 \qquad \text{(式 7-8)}$$

この二つの式を連立させて交点(u_0,v_0)を求める。(u_0,v_0)は次式から計算できる。

$$u_0 = \frac{b_1 - b_2}{a_2 - a_1} \qquad \text{(式 7-9)}$$

$$v_0 = \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_2 - a_1} \qquad \text{(式 7-10)}$$

a_1, b_1, a_2, b_2の誤差は式 7-7,8 より求めることができるので、誤差伝播の法則にしたがって解くとσ_{u0}, σ_{v0}求めることができる。

7-3.回転角度 θ の誤差

次式は回転角度 θ を求める式ものである。

$$\theta = \tan^{-1} a_2 - \tan^{-1} a_1 \qquad \text{(式 7-11)}$$

a_1, a_2の誤差は既に前節で求まっているので、この式を誤差伝播の法則にしたがって解くとσ_θを求めることができる。

求めた誤差を式 7-2 の座標変換の式を用いて誤差伝播の法則により、X,Y の誤差を求めることができる。

7-4.誤差分布図による評価

次にレーザースキャナの位置を原点とし、(-100,-100)から(100,100)までの範囲を 10m刻みでデータを取得した時の(u_i,v_i)の誤差を可視化するためにプログラムを作成した。プログラムで得られた誤差分布図を図 7-1 に示す。

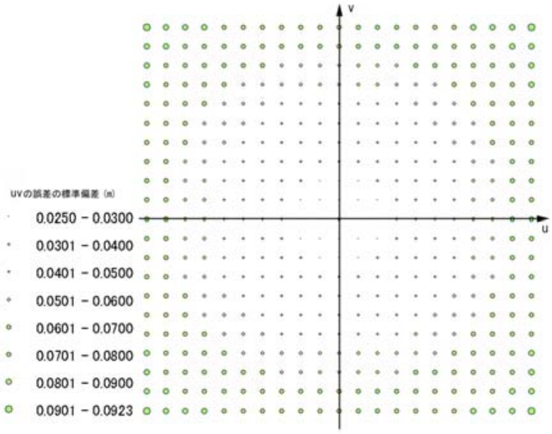

図 7-1　u_i,v_iの誤差分布図

図 7-1 より、原点から遠くなるにつれ、誤差が大きくなっていることがわかるが、最大でも 10cm 未満である。次に座標変換を行った(X,Y)の誤差と実際に座標変換を行ったレーザースキャナのデータから座標を抽出した残差の分布を図 7-2 に示す。多くの誤差を含んだデータにより座標変換を行っているため、誤差は 10cm～1m と非常に拡大されている。

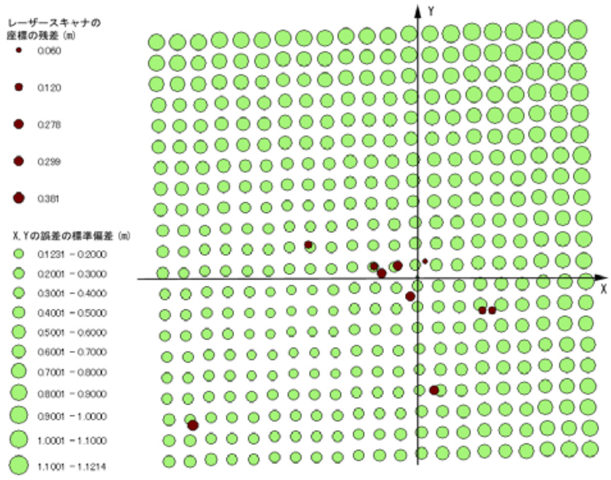

図 7-2 *X,Y* の誤差分布図と実測による残差

図 7-2 より、レーザースキャナのデータから抽出した残差が誤差伝播の法則で求めた誤差の許容範囲内に入っているが、誤差伝播の結果のほうが大きい傾向がみられた。

８.考察

本研究より、プリズムを基準点に使わず、建物の面から計算される基準点を使ったレーザースキャナの座標変換は可能であることがわかった。

しかし、統合させたデータ同士の座標の残差が、レーザースキャナ自身の精度よりも非常に大きくなることが問題である。誤差伝播の結果と実際のレーザースキャナのデータ結果を比べると、妥当な値であったが、今後、さらに高精度座標変換の手法を考えなければならない。

参考文献

1）上野　太郎：2005 年度プロジェクト研究成果報告書