ターゲット計測によるレーザスキャナのキャリブレーション

Calibration Method of Laser Scanner by Target Measurement

平岡 透*

Toru HIRAOKA

Abstract: There are several kinds of laser scanners available for two-dimensional and three-dimensional measurement of object shapes, and there are some methods for setting the measurement devices in those laser scanners. Among those methods, calibration techniques are important for their practical use. I propose, in this technical report, some calibration methods of a laser scanner by measuring a target object with simple geometric shapes without using special machineries.

Keywords: レーザスキャナ, キャリブレーション, ターゲット計測, 最小二乗法

1. はじめに

レーザスキャナは、レーザを対象物に照射することによって対象物との距離を高精度に且つ即時に計測することができる機器である。このため、車両や台車等の移動可能な装置（以下、計測装置）にレーザスキャナを搭載して、周辺環境の状況を計測するということが現在良く行われている（趙ら, 2002; Zhao et al., 2003; 平岡ら, 2007）。このとき、レーザスキャナと計測装置に搭載されている GPS やカメラ等の各種機器との相対的な位置関係が必要となる場合がある。例えば、レーザスキャナより取得した点群データを GPS より取得した軌跡データ上にマッピングする場合や、レーザスキャナより取得した点群データから作成されたポリゴンデータにカメラより取得した画像を自動でテクスチャマッピングする場合等である。

レーザスキャナと各種機器間の相対的な位置関係を求めるためには、レーザスキャナの位置や方向を求めるキャリブレーションが必要となる。レーザスキャナには 2 次元的な計測が可能なもの（以下、2 次元レー

ザスキャナ）と 3 次元的な計測が可能なもの（以下、3 次元レーザスキャナ）があり、またレーザスキャナを計測装置に設置する場合にも多数の仕方があるため、レーザスキャナのキャリブレーションにも多数の方法が存在することとなる（平岡, 2008）。そこで、本技術報告では特に、2 次元レーザスキャナの計測可能な平面が計測装置の進行方向と平行になるように計測装置の前方に設置して、2 次元レーザスキャナの平面位置（ XY ）と Z 軸に対する回転の方向を求めるキャリブレーション（以下、キャリブレーション（I））の方法を提案し、実験を通してその有効性を示す。また、理論のみであるが、3 次元レーザスキャナの位置（ XYZ ）と XYZ 軸それぞれに対する回転の方向を求めるキャリブレーション（以下、キャリブレーション（II））の方法も提案する。

関連研究として、レーザスキャナのキャリブレーションには、トータルステーションを用いて直接レーザスキャナの位置を観測する方法、不可視のレーザを直接見ることのできる IR スコープを用いる方法、レーザが当たるとビープ音を発する Cobit を用いる方法（2004, 長井ら）、4 点以上の基準点に設置した反射シートを用いる方法（2005, 氏家）等が提案されている。本提案法は、トータルステーション、IR スコープ、Cobit、反射シート等の特別な機器を使用せず、幾何学的に単純なターゲットを計測することによってキャリ

*株式会社ゼンリン

〒804-0003 福岡県北九州市戸畑区中原新町3-1
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 47, NO. 4, 2008

ブレーションを行うものである。

2. 方 法

以下に、キャリブレーション(I)とキャリブレーション(II)の方法をそれぞれ示す。

2.1 キャリブレーション(I)の方法

まず、平らな地面に計測装置を置き、水準器を用いて2次元レーザスキャナが地面と平行となるように設置する。また、2次元レーザスキャナの計測原点の高さは、2次元レーザスキャナの内部構造が設計図で分っているため、2次元レーザスキャナの底部から計測原点までの高さに、2次元レーザスキャナの底部までを金尺で計測した高さを加えることで求めることができる。

次に、平らな地面に置いた横幅の長さ r が一定の面を持つターゲット(I) (図1 参照) を2次元レーザスキャナで計測する。取得された点群データからターゲット(I)の凸部の角と考えられる両端の点 P_A, P_B と2次元レーザスキャナの計測原点 P_o との距離 l_A, l_B 、点 P_A と計測原点 P_o を結ぶ直線と点 P_B と計測原点 P_o を結ぶ直線のなす角度 θ を取得する (図2 参照)。点 P_A, P_B はユーザが手動で選択する。点 P_A, P_B は、計測距離及び計測角度が離散的であるために生じる量子化誤差によって、必ずしもターゲット(I)の角となる保証はない。ここでは、以下の計算を単純にするため、ターゲット(I)の角である理想的な点 P_A, P_B の座標値をそれぞれ $(0, 0), (r, 0)$ とする。計測された点 P_A, P_B の座標値をそれぞれ $(x_A, y_A), (x_B, y_B)$ 、ターゲット(I)の凸部の点 P_A と点 P_B の間の点 $P_i (i=1, 2, \dots, m)$ の座標値を (x_i, y_i) 、計測原点 P_o の座標値を (x_o, y_o) とする。ターゲット(I)の凸部で計測された点 P_i も、計測距離が離散的であるために量子化誤差が生じ、必ずしもターゲット(I)の表面上の点となる保証はない。そこで、点 P_A, P_B, P_i を平行移動及び回転させて、点 $P_A, P_{A'}$ 間の距離、点 $P_B, P_{B'}$ 間の距離、点 P_i を X 軸に下ろした垂線の長さの和が最小となるように平行移動量 $(\Delta x, \Delta y)$ 及び回転量 $\Delta \theta$ を決定する (図3 及び式(1)参照)。

図1 ターゲット(I)

図2 ターゲット(I)の計測データ

図3 点 P_A, P_B, P_i の位置の推定

$$\begin{aligned}
 \min_{\Delta x, \Delta y, \Delta \theta} \sum_{i=1}^m & (x_i \sin \Delta \theta + y_i \cos \Delta \theta + \Delta y)^2 \\
 & + (x_A \cos \Delta \theta - y_A \sin \Delta \theta + \Delta x)^2 \\
 & + (x_A \sin \Delta \theta + y_A \cos \Delta \theta + \Delta y)^2 \\
 & + ((x_B \cos \Delta \theta - y_B \sin \Delta \theta + \Delta x) - r)^2 \\
 & + (x_B \sin \Delta \theta + y_B \cos \Delta \theta + \Delta y)^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)を $\Delta a = \cos \Delta \theta$, $\Delta b = \sin \Delta \theta$ として式(2)のように変換する。

$$\begin{aligned} \min_{\Delta x, \Delta y, \Delta a, \Delta b} & \sum_{i=1}^m (\Delta b x_i + \Delta a y_i + \Delta y)^2 \\ & + (\Delta a x_A - \Delta b y_A + \Delta x)^2 + (\Delta b x_A + \Delta a y_A + \Delta y)^2 \\ & + ((\Delta a x_B - \Delta b y_B + \Delta x) - r)^2 + (\Delta b x_B + \Delta a y_B + \Delta y)^2 \\ \text{Subject to } & \Delta a^2 + \Delta b^2 = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)の解は式(3)の反復解法で求める。式(3)は式(2)を $\Delta x, \Delta y, \Delta a, \Delta b$ で偏微分した結果をイコール 0 として整理することで求まる。

$$\begin{aligned} \Delta x^{(s+1)} &= -(\Delta a^{(s)} x_A - \Delta b^{(s)} y_A + \Delta a^{(s)} x_B - \Delta b^{(s)} y_B - r) / 2 \\ \Delta y^{(s+1)} &= -\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta b^{(s)} x_i + \Delta a^{(s)} y_i) + \Delta b^{(s)} x_A + \Delta a^{(s)} y_A + \Delta b^{(s)} x_B + \Delta a^{(s)} y_B}{m+2} \\ \Delta a^{(s+1)} &= -\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta b^{(s)} x_i y_i + \Delta y^{(s)} y_i) + \Delta x^{(s)} x_A + \Delta y^{(s)} y_A + \Delta x^{(s)} x_B + \Delta y^{(s)} y_B - r x_B}{\sum_{i=1}^m y_i^2 + x_A^2 + y_A^2 + x_B^2 + y_B^2} \\ \Delta b^{(s+1)} &= -\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta a^{(s)} x_i y_i + \Delta y^{(s)} x_i) + \Delta y^{(s)} x_A - \Delta x^{(s)} y_A + \Delta y^{(s)} x_B - \Delta x^{(s)} y_B + r y_B}{\sum_{i=1}^m x_i^2 + x_A^2 + y_A^2 + x_B^2 + y_B^2} \\ \Delta a^{(s+1)} &= \Delta a^{(s+1)} / \sqrt{\Delta a^{(s+1)2} + \Delta b^{(s+1)2}} \\ \Delta b^{(s+1)} &= \Delta b^{(s+1)} / \sqrt{\Delta a^{(s+1)2} + \Delta b^{(s+1)2}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 s は反復回数であり、初期値を $\Delta x^{(0)} = 0, \Delta y^{(0)} = 0, \Delta a^{(0)} = 1, \Delta b^{(0)} = 0$ として、収束するまで繰り返す。反復解法で局所的な解に収束しないように、点 P_A, P_B, P_i の平行移動及び回転前の座標値は、点 P_A, P_B が X 軸上に、且つ点 $P_A, P_{A'}$ 間の距離と点 $P_B, P_{B'}$ 間の距離が等しくなるように配置する (図 4 参照)。

最後に、求めた平行移動量 $(\Delta x, \Delta y)$ 及び回転量 $\Delta a, \Delta b$ より、平行移動及び回転後の計測原点 P'_o の座標値 (x'_o, y'_o) を求め、視点の位置とする。

$$\begin{aligned} x'_o &= \Delta a x_o - \Delta b y_o + \Delta x \\ y'_o &= \Delta b x_o - \Delta a y_o + \Delta y \end{aligned} \quad (4)$$

同様に、注視点 P'_g の座標値 (x'_g, y'_g) を求める。注視点 P'_g は、2次元レーザスキャナの構造上、順次得られた

図 4 点 P_A, P_B, P_i の平行移動及び回転前の座標値の設定条件

総計測点数の真ん中の点である。つまり、2次元レーザスキャナの平面位置 (XY) とは視点 P'_o の位置であり、 Z 軸に対する回転の方向とは視点 P'_o と注視点 P'_g とを結ぶ直線と X 軸のなす角である。

キャリブレーションを行う上での計測装置とターゲット (I) との最適な位置関係等について考える。誤差要因として、計測距離及び計測角度が離散的であり、このために量子化誤差が生じる。また、2次元レーザスキャナとターゲット (I) との距離が大きい程、2次元レーザスキャナで計測される点間距離が大きくなり、2次元レーザスキャナのキャリブレーションの精度が低下する。その他の誤差要因として、レーザ光のスポット径やレーザ光の対象物への入射角、対象物の反射率等がある。レーザ光のスポット径は、距離と共に広がり、またレーザ光が斜めに対象物に入射すると細長い楕円となるため、誤差が大きくなる。それから、対象物の反射率が大きいと計測距離が短くなることが一般に知られている。これらの誤差要因の影響を少なくするためには、2次元レーザスキャナとターゲット (I) の距離を短くすること、ターゲット (I) へのレーザ光の入射角を小さくすること、ターゲット (I) の反射率は均一で鏡や金属等のような反射率の大きいものは使用しないことが望ましい。

2.2 キャリブレーション(II)の方法

まず、3次元レーザスキャナを計測装置に設置する。次に、横幅の長さ r 、縦幅の長さ s の長方形の面を持つターゲット (II) (図 5 参照) を 3次元レーザスキャナで計測する。取得された点群データからターゲット (II) の凸部の長方形の面の角と考えられる四隅の点 P_A, P_B, P_C, P_D の座標値をそれぞれ $(x_A, y_A, z_A), (x_B, y_B, z_B), (x_C, y_C, z_C), (x_D, y_D, z_D)$ 、四隅の点 P_A, P_B, P_C, P_D 以外のターゲット (II) の凸部の点 $P_i (i=1, 2, \dots, m)$ の座標値を (x_i, y_i) とする (図 6 参照)。ここでは、以下の説明を簡単にするため、ターゲット (II) の凸部の長方形の面の四隅の理想的な角の点 $P_{A'}, P_{B'}, P_{C'}, P_{D'}$ の座標値をそれぞれ $(0, 0, 0), (0, 0, s), (r, 0, s), (r, 0, 0)$ とする。

点 P_A, P_B, P_C, P_D, P_i を平行移動及び回転させて、点 $P_A, P_{A'}$ 間の距離、点 $P_B, P_{B'}$ 間の距離、点 $P_C, P_{C'}$ 間の距離、点 $P_D, P_{D'}$ 間の距離、点 P_i を XZ 平面上に下ろした垂線の長さの和が最小となるように平行移動量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 及び回転量 $(\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa)$ を決定する。3

図5 ターゲット(II)

図6 ターゲット(II)の計測データ

次元空間における座標の回転にはオイラー角を用いる。点 P_A, P_B, P_C, P_D, P_i の平行移動及び回転後の点 $P'_A, P'_B, P'_C, P'_D, P'_i$ の座標値をそれぞれ $(x'_A, y'_A, z'_A), (x'_B, y'_B, z'_B), (x'_C, y'_C, z'_C), (x'_D, y'_D, z'_D), (x'_i, y'_i, z'_i)$ として、式(5)が成り立つ平行移動量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 及び回転量 $(\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa)$ を求める。式(5)の解は、式(3)と同様な反復解法で求めることができる。

$$\begin{aligned} \min_{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa} & \sum_{i=1}^m y_i'^2 + (x_A'^2 + y_A'^2 + z_A'^2) \\ & + (x_B'^2 + y_B'^2 + (z_B' - s)^2) \\ & + ((x_C' - r)^2 + y_C'^2 + (z_C' - s)^2) \\ & + ((x_D' - r)^2 + y_D'^2 + z_D'^2) \end{aligned} \quad (5)$$

最後に、求めた平行移動量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 及び回転量 $(\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa)$ より、平行移動及び回転後の計測原点の座標値を求め、視点の位置とする。同様に、注視点の座標値を求める。注視点は、3次元レーザスキャナの構造上、順次得られた総計測点数の真ん中の点である。つまり、3次元レーザスキャナの位置(XYZ)とは視点の位置であり、X軸に対する回転の方向とは視点と注視点を結ぶ直線（以下、直線 VG）を YZ 平面に投

影後の直線と Z 軸のなす角であり、Y 軸に対する回転の方向とは直線 VG を ZX 平面に投影後の直線と X 軸のなす角であり、Z 軸に対する回転の方向とは直線 VG を XY 平面に投影後の直線と Y 軸のなす角である。

3. 実験

キャリブレーション(I)について実験を行う。実験で使用した2次元レーザスキャナはSICK社製 LMS200(計測可能角度180度, 角分解能0.5度, 距離分解能0.01m, システム誤差 ± 0.04 m)であり, 水準器(タジマツール社製 POK3-23)を用いて地面と平行となるように計測装置に設置した。SICK社製 LMS200のシステム誤差とは, 距離測定範囲と反射率において考えられる全ての誤差の合計値である (LMS200付属の技術資料参照)。図7のように計測装置にはDVカメラ(Canon社製 DM-IXY DV M; 画面サイズ640×480 pixel)も取り付けた。DVカメラを計測装置に搭載した理由は, 2次元レーザスキャナとDVカメラを同時にキャリブレーションの操作を行い, 2次元レーザスキャナとDVカメラの相対的な位置関係を複数の位置で求めることによって, 2次元レーザスキャナのキャリブレーションの性能を評価するためである。DVカメラのキャリブレーションには, 内部標定及び外部標定を同時に行える高精度な井本ら(2003)の方法を用いた。ターゲット(I)として, 図8に示す凸部

図7 実験で使用了計測装置

図8 実験で使したターゲット(I)

の横幅の長さが0.586mで反射率がそれ程大きくないものを用いた。図8の位置1の図の丸印で囲まれた15点は、DVカメラのキャリブレーションで使した標定点である。これらの標定点の画像上の位置は、手動で取得した。

2次元レーザスキャナのキャリブレーションの性能を向上されるためには、2次元レーザスキャナとターゲット(I)の距離を短くすること、ターゲット(I)へのレーザ光の入射角を小さくすることが必要である。また、DVカメラのキャリブレーションの性能を向上されるためには、取得した画像に標定点が全体に且つ均一に映っている方が良い。これらのことを考慮して、図9のようにターゲット(I)から約2.0m離れた3つ

図9 ターゲット(I)を計測した位置(上面図)

の位置に計測装置を置いて実験を行った。図9の位置1で取得した画像が図8の位置1の画像である。同様に、図9の位置2と図8の位置2、図9の位置3と図

図10 各位置から計測したターゲット(I)の点群データ

表 1 DV カメラのキャリブレーションの誤差

位置	誤差の種類	X 方向 (m)	Z 方向 (m)	距離 (m)
位置 1	平均誤差	0.003	0.003	0.005
	最大誤差	0.011	0.011	0.016
位置 2	平均誤差	0.006	0.003	0.006
	最大誤差	0.016	0.012	0.020
位置 3	平均誤差	0.005	0.004	0.006
	最大誤差	0.013	0.013	0.019

表 2 2 次元レーザスキャナと DV カメラの相対的な位置関係

	X 方向 (m)	Y 方向 (m)	回転方向 (度)
位置 1	0.021	-0.193	-19.609
位置 2	0.016	-0.199	-19.608
位置 3	0.024	-0.208	-19.711
最大較差	0.008	0.015	0.103

8 位置 3 が対応する。

まず、DV カメラの画像をターゲット (I) のモデルにテクスチャマッピングして得られた標定点の位置と実空間上での標定点の位置との差の絶対値を求めることで、DV カメラのキャリブレーションの性能を評価した。この結果を表 1 に示す。図 9 に示す全ての位置で距離の平均誤差が 0.006m 以内、最大誤差が 0.020m 以内となり、2 次元レーザスキャナのキャリブレーションの性能を評価する基準として使用する上で十分有効な DV カメラのキャリブレーションが行えたと判断した。

次に、実験で得られた 2 次元レーザスキャナと DV カメラの相対的な位置関係 (平面位置 (XY)、Z 軸に対する回転の方向) の結果を表 2 に示す。3 つの位置の組合せの中での最大較差は、X 方向で 0.008m、Y 方向で 0.015m、回転方向で 0.103 度であり、良好な結果が得られたと考えられる。参考のため、図 10 に実際に図 9 の各位置からターゲット (I) を計測した点群データを示す。図 10 の円内の点がターゲット (I) の凸部の角として選択した点である。

4. 結 論

本技術報告では、幾何学的に単純なターゲットを計

測することによって、レーザスキャナのキャリブレーションを行う新しい方法を提案した。キャリブレーション (I) については、実験を通してその有効性を示した。レーザスキャナより取得した点群データから作成されたポリゴンデータにカメラより取得した画像を自動でテクスチャマッピングすることで、地下街や駅構内等の屋内のリアルな地図を作成すること等を検討中であるため、本提案法の実利用での有効性を検証することが今後の課題である。また、キャリブレーション (II) についてもキャリブレーション (I) と同様な実験を行ない、その有効性を検証することも今後の課題である。

(受付日 2008.4.1, 受理日 2008.7.15)

参考文献

- 趙 卉菁, 柴崎亮介, 2002. 車両搭載型レーザレンジセンサによる 3 次元都市空間モデルの自動構築, 第 8 回画像センシングシンポジウム, pp.121-126.
- H. Zhao and R. Shibasaki, 2003. A Vehicle-borne Urban 3D Acquisition System using Single-row Laser Range Scanners, IEEE Trans. SMC Part B: Cybernetics, vol. 33, no. 4.
- 平岡 透, 若松浩二, 2007. 屋内地図作成のための 3 次元地図点群データからの 2 次元地図ベクトルデータの作成, 写真測量とリモートセンシング, vol. 46, no. 4, pp.66-70.
- 平岡 透, 2008. レーザスキャナのキャリブレーション装置及びキャリブレーション方法, 特許出願, 特願 2008-003737.
- 長井正彦, 柴崎亮介, マナング・ディネッシュ, 2004. “Cobit” によるレーザスキャナのキャリブレーション手法に関する研究, 日本写真測量学会平成 16 年度年次講演会発表論文集, pp. 1-4.
- 氏家康二, 2005. レーザスキャナを用いたオブジェクトマッチングによる地すべり変位追跡, 高知工科大学平成 16 年度修士論文.
- 井本治孝, 服部 進, 秋本圭一, 2003. 2 次元ターゲット場によるカメラキャリブレーション, 日本写真測量学会平成 15 年度年次学術講演会論文集, pp.37-40.
- 秋本圭一, 服部 進, 井本治孝, 2001. デジタル画像計測法を用いた精密工業計測, 電子情報通信学会誌, vol. J84-D-II, No. 7, pp.1299-1309.