レーザスキャナ 3 次元計測における誤差補正と 多方向データの統合

正会員 田 村 進 一[†], 久 保 学^{††},
浅 川 哲 治^{††}, 正会員 金 應 珪[†],
佐 藤 嘉 伸[†], 郡 司 隆 充^{††},
稲 林 昌 二^{††}, 中 川 東 一 郎^{††}

Error Correction and Integration of Multidirectional Data in Laser Scanner 3D Measurement

Shinichi Tamura[†], Manabu Kubo^{††}, Tetsuji Asakawa^{††}, Eung-kyeu Kim[†],
Yoshinobu Sato[†], Takamitsu Gunji^{††}, Shoji Inabayashi^{††} and Toichiro Nakagawa^{††}

Abstract When objects are scanned spatially by a laser-beam and mechanical mirror scanners in order to obtain three-dimensional data, measurement errors are often a significant problem. This paper presents a systematic error model for a two-dimensional mirror scanner system. Parameter values are modified to reduce the difference between measured and calculated values. This correction shows that it is possible to compose a three-dimensional measurement system with enough precision for practical use. Furthermore, complete object data can be obtained without occlusion by combining scanner data from multiple directions.

1. ま え が き

- 3次元計測を非接触で行う手法としては、
- (1) スリット光や空間コードパターンを投影する光投影方式^{1)~3)}
 - (2) 多眼画像や動画画像の対応点探索等に基づく方式⁴⁾
 - (3) 単眼画像においてシーンに関する知識を利用

する方式⁵⁾

などがある。これらのうち(2)、(3)は研究段階であるが、(1)の光投影方式は実用に供されているシステムがいくつか存在し、高精度に3次元物体形状を入力することが可能になりつつある。しかしながら、これらのシステムは室内において比較的小さな物体を入力できるとどまっており、屋外太陽光のもとでは投影光を画像計測するのに十分な S/N を確保すること

キーワード：コンピュータビジョン、3次元計測、レーザスキャナ、データ統合、誤差補正

1992年7月17日、1992年「画像の認識・理解(MIRU'92)」シンポジウムで発表

1992年8月10日受付、1992年10月5日再受付

[†] 大阪大学 医学部機能画像診断学研究部 (〒565 吹田市山田丘2-2, TEL 06-875-7350)

^{††} システム総合開発株式会社 (〒113 東京都文京区本郷1-28-23, TEL 03-3816-0646)

[†] Osaka University Medical School (2-2 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565, Japan)

^{††} System Sogo Kaihatsu Co., Ltd. (1-28-23 Hongou, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan)

が困難である。

これに対して本稿では、屋外太陽光のもとでも計測可能な S/N を確保するため、スリット光や空間コードパターンでなく、レーザビームそのものを対象物体に投影し、それを機械的に2次元走査することにより空間的情報を得ることを試みる。すなわち、 $X \cdot Y$ 軸ミラースキャナを用いてレーザ光により対象物を空間的に走査し、それをテレビカメラで撮影する。光投影方式は基本的には三角測量の原理に基づくが、その際、重要なことはカメラと光投影器間の相対的關係やカメラパラメータ等をあらかじめ正確に求めておかねばならないということである。これらのパラメータ測定(キャリブレーション)は3次元測定精度に重大な影響を及ぼすので、そのための方法がいくつか開発されてきた⁶⁾⁷⁾。

本稿では、従来の方法と異なり、光投影を機械的な2次元走査により行うので、通常のカメラパラメータに加え、ミラースキャナパラメータ(機械式走査系)の誤差を考慮に入れてキャリブレーションを行う方法を提案する。機械式走査の不正確さを表すシステムティックな誤差のモデルを用いることにより、高精度な3次元計測が可能になると期待できる。さらに、対象物体の隠れ部分や背後も計測できるよう複数のスキャナ

系を用いるときのデータ統合について、その方式を示す。

以下では2章において、まず投影系およびカメラの座標系の設定について述べる。3章ではミラースキャナの誤差のモデル化を行い、4章ではキャリブレーションの方法を述べる。さらに、5章で複数方向データの統合について述べ、6章では実験結果を示す。

2. 座 標 系

図1に本論文で用いる座標系を示す。

カメラレンズの中心はワールド座標 ($O_w; X_w, Y_w, Z_w$) の中心 (O_w) におく。カメラの光軸 (Z_e) は Z_w 軸を X_w 軸のまわりに俯角 α だけ回転したものとする。ここで、回転は右ネジの方向を正の向きとする。以下、同じである。

ワールド座標の原点 O_w から f の距離にある Z_e に垂直な画像平面 (U, V) の V 軸は $Y_w - Z_w$ 面内に、また U 軸はそれに垂直に設定する。一方、スキャナ基準座標系 ($O_s'; X_s', Y_s', Z_s'$) はワールド座標から (T_x, T_y, T_z) だけ平行移動し、さらに Y_s' 軸まわりに θ だけ回転しているものとする。さらに、実際のレーザビームの方向を定めるスキャナ座標系 ($O_s; X_s, Y_s, Z_s$) は、スキャナ基準座標系を X_s' 軸のまわりに俯角 η

図1 座標系
Coordinate system.

だけ回転したものとす。

なお、 Z_s 軸は両ガルバノメータの中立位置におけるレーザビーム方向とする。ただし、実際のレーザビームはガルバノメータの設定誤差により、横走査を表す X_g 軸は Z_s 軸のまわりに微小量 ξ だけ X_s 軸を、また縦走査を表す Y_g 軸は同じく Z_s 軸のまわりに微小量 ε だけ Y_s 軸を回転させたものとする。したがって、いまの場合 ($O_g; X_g, Y_g, Z_g$) は必ずしも直交座標系とはなっていない。レーザビームは、 X, Y , 2 個のガルバノメータの回転にしたがって、 $Z_g (=Z_s)$ 軸から X_g 方向に角度 δ 、 Y_g 方向に角度 β の偏向をうけ、距離 l だけ飛行して物体に当たる。対象物体を表現する物体座標 ($O_o; X_o, Y_o, Z_o$) は、スキャナ基準座標系 ($O_s'; X_s', Y_s', Z_s'$) から (T_{xo}, T_{yo}, T_{zo}) だけ平行移動したところに設定する。

座標変換

物体上レーザスポットのスキャナ座標系における座標値 (x_s, y_s, z_s) から、それが投影される画像座標値 (U, V) を求める変換は次の (1) 式で与えられる⁹⁾。

$$i = L \cdot T_{ss'} \cdot T_{s'w} \cdot T_{we} \cdot P \quad (1)$$

ここに、

$i = (u, v, t)$: 画像平面同次座標

$(U, V) = (u/t, v/t)$: 画像平面座標

$L = (x_s, y_s, z_s, 1)$

: 物体上のビームスポット位置(投光点)のスキャナ同次座標値

$$T_{ss'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \eta & \sin \eta & 0 \\ 0 & -\sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

: スキャナ座標→スキャナ基準座標の変換
(X_s 軸まわり俯角 $= -\eta$ (仰角 $= \eta$))

$$T_{s'w} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix}$$

: スキャナ基準座標→ワールド座標の変換
(Y_s' 軸まわり $-\theta$ 回転, および
($-T_x, -T_y, -T_z$) 平行移動)

$$T_{we} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

: ワールド座標→カメラ座標の変換
(X_w 軸まわりに俯角 α だけ回転)

$$P = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & S \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

: 透視変換 (U 軸反転, S はスケールパラメータ)

3. ガルバノメータの設定誤差

図 2(a) に示すように、レーザビームを X, Y 方向

図 2(a) 機械式 2 次元ミラースキャナ
Mechanical two-dimensional mirror scanner.

図 2(b) ガルバノメータ設定誤差を含めたミラー
スキャナ系レーザビーム走査モデル
Laser-beam scanning model using mirror scanner
system including galvanometer error minimization.

に振らせるため市販の2次元ミラースキャナには2個のガルバノメータがほぼ直角に取り付けられているが、それらの回転面を完全に直交させることは不可能に近い。また、2個のガルバノメータの回転中心はずれており、とくに近距離走査を行う場合、その補正を行う必要がある。そこで、ビーム走査の精密なモデルを図2(b)のように設定しなおす。すなわち、レーザビームは第1のX軸走査ミラーにO₁点で入射し、X軸方向に沿う偏向を受けて第2のY軸走査ミラーにO₂点で入射する。そこでさらにY軸方向に沿う偏向を受けて目標物体へ投射される。

X方向のビーム走査の中心はO₁(0, 0, -d)であり、走査面(以下X走査面と呼ぶ)はZ_s軸まわりにX_s-Z_s面から微小量εだけ傾いている。なお、実際のX軸走査ミラーの高さ(Y座標値)は必ずしも0ではないが、X-Z平面への投影を考えればO₁のY座標値を0としてもよい。Y方向のビーム走査の中心はO₂(a, 0, 0)であり、走査面(以下Y走査面と呼ぶ)は直線O₁-O₂のまわりにY軸から微小量ξだけ傾いている。実際のY方向のビーム走査の中心はO₂よりεに比例した量だけ上下に少しずれるが、εが微小であり、ずれ量も微小であるためO₂はX_s軸上にあるとする。

X_s, Y_s, Z_s軸の正の方向に向かう単位ベクトルをそれぞれN_{x0}, N_{y0}, N_{z0}とし、N_{y0}がZ_s軸まわりにεだけ傾いた単位ベクトルをN_{y1}とする。このとき、N_{y1}はY走査面の法線ベクトルとなる。また、N_{z0}はX方向のビーム走査によりO₁を通る単位ベクトルN_{y1}のまわりにδだけ振られてN_{z1}になるとする。このとき、同様にN_{x0}はN_{x1}になる。さらに、Y走査面の法線ベクトルをN_{x2}とするとN_{x2}はN_{x1}を単位ベクトルN_{z1}のまわりにξだけ回転したものになっている。また、Y方向走査によりN_{z1}はO₂を通る単位ベクトルN_{x2}のまわりに-βだけ回転してN_{z2}とな

表1 誤差を考慮した2次元走査ガルバノメータによる単位ベクトルの変化

Change of unit vectors resulting from consideration of errors in the two-dimensional scanning galvanometer measurements.

順序	回転前単位ベクトル	回転軸単位ベクトル	回転角	回転後単位ベクトル
1	N _{y0}	N _{z0}	ε	N _{y1}
2	N _{z0}	N _{y1}	δ	N _{z1}
3	N _{x0}	N _{y1}	δ	N _{x1}
4	N _{x1}	N _{z1}	ξ	N _{x2}
5	N _{z1}	N _{x2}	-β	N _{z2}

る。これらの回転による単位ベクトルの変化を表1に示す。

任意軸まわりの点の回転

原点を通る単位ベクトルN=(p, q, r)のまわりに点を右ネジの方向に角度φだけ回転させる変換は、

$$[x^*, y^*, z^*, 1] = [x, y, z, 1]R(p, q, r; \phi) \quad (2)$$

で与えられる⁸⁾。ここに、[x, y, z, 1] および [x*, y*, z*, 1] はそれぞれ、変換前、および変換後の点の同次座標である。また、R(p, q, r; φ) は

$$R = \begin{bmatrix} p^2 + (1-p^2)\cos\phi & pq(1-\cos\phi) - r\sin\phi & pr(1-\cos\phi) + q\sin\phi & 0 \\ pq(1-\cos\phi) + r\sin\phi & q^2 + (1-q^2)\cos\phi & qr(1-\cos\phi) - p\sin\phi & 0 \\ pr(1-\cos\phi) - q\sin\phi & qr(1-\cos\phi) + p\sin\phi & r^2 + (1-r^2)\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

既知初期単位ベクトルN_{x0}=(1, 0, 0), N_{y0}=(0, 1, 0), N_{z0}=(0, 0, 1)から出発して表1の各回転変換を(2)式を用いて実行していくと、O₂からのビームの方向を示す単位ベクトルN_{z2}が求められる。このとき、スキャナの出口O₂から物体上ビームスポットまでの距離をlとすると、スキャナ座標における物体上ビームスポット位置(投光点)の同次座標値は

$$L = (l \cdot N_{z2}, 1) + (d \tan \delta, 0, 0, 0) \quad (3)$$

で与えられる。

変換

$$i = L \cdot T_{ss'} \cdot T_{sw'} \cdot T_{we} \cdot P$$

の変換行列部分を

$$T = T_{ss'} \cdot T_{sw'} \cdot T_{we} \cdot P$$

$$= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} \end{bmatrix} \quad (4)$$

とおく。また、N_{z2}=(x₂, y₂, z₂)とおく。このとき、

$$i = [u, v, t] \\ = [l \cdot x_2 + a, l \cdot y_2, l \cdot z_2, 1] \cdot T \quad (5)$$

である。ここにa=d tan δである。

この式より

$$\begin{aligned} u &= l \cdot D_1 + D_4 \\ v &= l \cdot D_2 + D_5 \\ t &= l \cdot D_3 + D_6 \end{aligned} \quad (6)$$

ここに

$$\begin{aligned} D_1 &= x_2 T_{11} + y_2 T_{21} + z_2 T_{31} \\ D_2 &= x_2 T_{12} + y_2 T_{22} + z_2 T_{32} \\ D_3 &= x_2 T_{13} + y_2 T_{23} + z_2 T_{33} \\ D_4 &= a T_{11} + T_{41} \\ D_5 &= a T_{12} + T_{42} \\ D_6 &= a T_{13} + T_{43} \end{aligned}$$

また,

$$u = Ut, \quad v = Vt$$

であるから,

$$l \cdot D_1 + D_4 = U(l \cdot D_3 + D_6) \quad (7)$$

$$l \cdot D_2 + D_5 = V(l \cdot D_3 + D_6) \quad (8)$$

これらより, 投光点までの距離 l は

$$l = \frac{(D_6 U - D_4)}{(D_1 - D_3 U)} \quad (9)$$

または

$$l = \frac{(D_6 V - D_5)}{(D_2 - D_3 V)} \quad (10)$$

で与えられる. これら(9), (10)式は当初同じ値にならなかったが, スキャナの角度誤差 ϵ, ξ を導入し, 次節のキャリブレーションを行うと, ほぼ同じ値を与えるようになった.

4. キャリブレーション

図3に示すように, 壁面のいろいろなところにサンプル点としていくつかのレーザスポット(実験では14点)を投光し, それをテレビカメラで撮影する. その像を自動2値化して得られた各スポット領域の外接長方形の中心 (U, V) をスポット位置とする. そのときのガルバノメータ駆動電流値から, その振れ角 β および δ は直読で求め, さらに N_{22} 等を経て(9), (10)式より l が算出される. このとき, スキャナ出口からスポット点までの距離 l' を実測しておく. l の算出のため, 大まかな $\eta, \epsilon, \xi, \theta, T_x, T_y, T_z, S$ の値を初期パラメータ値として与えておく. α はワールド座標の水平面 (X_w - Z_w 面) を決定するパラメータであり, 本稿では計測値そのままを使用することにしておく. ワールド座標があらかじめ決まっている場合もあるが, その時は α など決定すべき未知パラメータが増える. なお, 実験でキャリブレーション用投光面は平らな壁面を用いたが, 平面である必要はまったくない.

評価関数は, l の誤差のサンプル点 i についての2

図3 キャリブレーション用投光点
Projected spots for calibration.

乗和

$$\begin{aligned} E(\eta, \epsilon, \xi, \theta, T_x, T_y, T_z, S) \\ = \sum_{i=1}^{\text{サンプル点数}} (l_i - l'_i)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

を用いる. この E を最小にするパラメータ値を以下に示す順次探索により求める. このとき, 1%単位の粗探索をまず行い, 0.2%単位の精探索をその次に行うことにより, 処理の高速化を図る. なお, 代表的な3次元計測システムにおける計測誤差は, 本稿のような点ごとの計測を行うもので, その平均値が2~3%を越える場合が生じ⁶⁾, 面パラメータなどを多点計測で行うものでも1%を越える場合が生じる²⁾ことから, われわれはパラメータに関しては最終的に0.2%単位の探索を行った.

E の最小化法:

(a) 粗探索

- ① η につき, 初期値の $\pm 5\%$ の範囲内で1%刻みに変化させ, E の最小値を与えるパラメータ値を探索する.
- ② 次に ϵ につき, 同様の探索を行う.
- ③ 以下, 同様に $\xi, \dots, S$ の探索を行う.
- ④ ①~③を E の減少がなくなるまで繰り返す.

(b) 精探索

上の(a)で得られたパラメータ値を初期値とし, この $\pm 1\%$ の範囲内を0.2%単位で(a)と同様に, できるだけ小さな E を与えるパラメータ値を探索する. 図3のキャリブレーション用サンプル点を用いたときのパラメータ値および誤差結果を表2に示す.

ここで, l と l' の差はおよそ2%以内に納まって($\sigma = 1.32\%$) いることがわかる. これらはトレーニング

表 2 パラメータ探索値およびサンプル点に対する計測誤差
resultant parameters and measurement error of sampled points.

(a) Result of parameter search, (b) Result of measurement error minimization procedure.

(a) 各パラメータの探索結果

($\alpha = 30^\circ$)

	$\theta(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$	$\varepsilon(^{\circ})$	$\xi(^{\circ})$	$T_x(\text{mm})$	$T_y(\text{mm})$	$T_z(\text{mm})$	S
初期値	-25.5	26.90	-1.00	-2.00	-426.20	-134.62	263.40	0.000500
探索値	-26.3	25.30	-0.94	-1.88	-400.84	-126.61	248.30	0.000479

(b) 計測誤差結果

サンプル点	画像メモリ座標		スキャナ振れ角		計算値 $l(\text{mm})$	実測値 $l'(\text{mm})$	誤差 (%)
	U	V	$\delta(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$			
1	196	-156	-1.56	-5.94	854.8	840.0	1.76
2	-9	-176	5.00	-4.53	886.6	873.0	1.56
3	-154	-157	8.57	-2.81	930.6	913.0	1.93
4	68	-75	0.00	-2.58	933.5	921.0	1.36
5	229	15	-7.56	-1.64	975.4	970.0	0.56
6	-84	-87	4.77	-1.64	959.2	942.0	1.83
7	-242	14	6.35	2.04	1081.9	1074.0	0.74
8	-68	69	0.01	2.12	1084.0	1081.0	0.28
9	50	90	-4.06	1.82	1075.0	1079.0	-0.38
10	-99	120	-0.49	3.60	1142.9	1146.0	-0.27
11	115	173	-8.40	3.34	1148.1	1167.0	-1.62
12	-17	202	-5.14	5.02	1212.3	1238.0	-2.08
13	-203	186	0.66	5.87	1248.4	1262.0	-1.08
14	4	-6	0.00	0.00	1011.0	1004.0	0.70

データに対する値ではあるが、実測値 l' 自身にも誤差を含むため、差引実際の誤差値もこれに近いのではないかと思われる。

以上のように、3次元的な位置データではなく、スキャナからの距離という巻尺・物差等で測り易いデータをもとにカメラ・スキャナ系の校正を行う点が本稿の手法の特長である。

5. データ統合

5.1 複数視点の座標整合

物体全体の形状を計測する場合、上に述べたスキャナ1台では物体裏面等の隠れが生じる。その対策としては、(1)スキャナを複数台使う、(2)物体を回転させる、などが考えられる。本稿では(2)の方法を用いることとし、回転ステージ上に物体を置き、複数方向から物体を撮影する。

回転ステージ上で物体を回転させることは、物体を固定しておき、カメラ・スキャナ系を物体回転軸のまわりに回転させることと等価である。このようにする

と、カメラ・スキャナ系は1台ですみ、そのキャリブレーションパラメータも1台分でよい。この際、回転ステージの回転軸とワールド座標の Y_w 軸が平行でない場合、計測した2つの計測データ間に傾きの違いを生じる。

この物体回転軸の傾き誤差は本質的には2つの自由度をもつ。また、その位置も2つの自由度をもつ。そこで、ワールド座標 ($O_w; X_w, Y_w, Z_w$) 表現において、物体回転軸はスキャナ基準座標の原点 O_s' から (T_{x0}, T_{y0}, T_{z0}) シフトした点 O_0 を通り、かつ単位ベクトル $N_R = (p_R, q_R, r_R)$ の方向をもつとする。簡単化のため、 O_0 を物体座標の原点とする。逆にいえば、物体座標の原点を O_0 に設定する。

物体を回転させたときの計測データをこの軸のまわりに逆回転して戻せば、複数方向からの計測データがうまく接続される。

なお、スキャナ同次座標 $[X_s, Y_s, Z_s, 1]$ は次のように物体同次座標に変換される。

$$[X_o, Y_o, Z_o, 1] = [X_s, Y_s, Z_s, 1] T_{so} \quad (12)$$

ここに

$$T_{so} = T_{ss'} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -T_{xo} & -T_{yo} & -T_{zo} & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

初期位置から ϕ だけ物体を回転して計測を行った場合には、この物体座標上で原点を通る単位ベクトル N_R のまわりに $-\phi$ だけ計測データを回転させれば、初期物体位置における計測データとなる。物体座標への移動量 (T_{xo} , T_{yo} , T_{zo})、および物体回転軸の傾きを表す単位ベクトル N_R はそれぞれ自由度 2 をもつが、これらは表示画面上で複数方向からの統合画像が視覚的に最もよく接続されるように定めた。

また、物体回転角 ϕ は精密回転ステージの読みをそのまま用いたが、支障はなかった。

5.2 統合のための格子座標

レーザスポットの走査は X , Y 各ガルバノメータ入力をそれぞれ階段状に変化させて行う。したがって、物体座標系では一般に格子状に物体高さが計測されておらず、とくに複数方向データを統合させるときには、それらのデータ点を一致させておく必要がある。そのため、次項に示す再標本化を行う。さらに、まばらにしか計測されていないデータは物体面とレーザビームが平行に近く、計測誤差が大きいと考えられる。したがって、これを統合の際の重みづけに反映させる

図 4 データ点と再標本化格子点
Data points and resampling lattice points.

ことが有効と思われるが、本稿では簡単化のため、オーバーラップして計測されている領域は、信頼性の最も高いと思われる方向データを選択的に採用した。

また、本来ならば 3 次元的なデータ点の密度を考慮すべきであるが、これも簡単化のため 2 次元的なデータ密度から信頼性を定義した。

5.3 格子座標による再標本化

物体座標系において、図 4 に示すような格子間隔 d の離散値で表現された格子座標を考える。

計測点 $P_1 \sim P_4$ で囲まれた領域内の格子点 $P(x, z)$ における高さ H を計測点の高さデータ $H(P_1) \sim H(P_4)$ から補間により求めることを考える。ここでは次の補間式を用いる。

$$H(x, z) = \frac{|P-P_2||P-P_3||P-P_4|H(P_1) + |P-P_3||P-P_4||P-P_1|H(P_2) + \dots}{|P-P_2||P-P_3||P-P_4| + |P-P_3||P-P_4||P-P_1| + \dots}$$

ここに、

$$|P-P_k| = \sqrt{(x-(x_k/d))^2 + (z-(z_k/d))^2}$$

(x_k, z_k) は計測された点 P_k の座標

5.4 信頼性を考慮したデータ統合

計測点 $P_1 \sim P_4$ で囲まれた四角形内のデータの信頼性は、この四角形の 2 つの対角線の長さの和の逆数とする。これの代わりにこの四角形の面積の逆数を使うことも考えられるが、こうすると 4 つの計測点のうち 2 つずつがともに接近して非常に細い長方形になったとき、他が離れていても面積が零に近づくため、その点の信頼性が非常に高いという誤った評価を行ってしまう。そこで、上のような方式で信頼性を評価した。

複数方向からの高さ計測データがあるとき、回転ステージの軸の傾き補正值 N_R と軸位置 (T_{xo} , T_{yo} , T_{zo}) はさきに述べたように、視覚的に最もよく合う値を選んだ。この後、各格子点における統合高さは信頼性の一番高い方向データを各格子点ごとに選択した。

6. 実験結果

図 5 は 147 mm × 80 mm × 43 mm の直方体の箱を、スキャナからおおよそ 70 cm の回転ステージに載せて 120° 異なる 2 方向から計測したものである。

この図は回転軸の N_R 補正前のものである。そのため、矢印に示す場所で床面に段差が生じている。 N_R 補正後の体積計測結果は長さ実測による体積計測値に対して、本システムによる計測値は -1.40% と算出された。

図 6 は直径 180 mm の半球をスキャナからおおよそ 1 m の回転ステージに載せて正面、および ±120° 異なる

図 5 直方体の N_R 補正前の計測統合値
Integrated measurement value of rectangular parallelepiped before N_R correction.

図 6 半球の N_R 補正後の計測統合値
Integrated measurement value of hemisphere after N_R correction.

る 3 方向から計測したものである。

この図は N_R 補正後のものである。体積は理想的な半球と仮定した計算値に対して本システムによる計測値は -1.60% と算出された。なお、これらの値は最適化を充分行っていない方式⁹⁾の $3\sim 50\%$ とくらべて小さいといえる。本方式における計測誤差の主要な原因としては、光スポットの位置計測誤差、カメラの画像ひずみ等が考えられる。

これらは屋内における各方向の単一フレーム画像による実験であり、投光源としては $3\text{ mW}\cdot 670\text{ nm}$ 半導体パルスレーザを用いた。同一レーザによる夏期直射太陽光下での実験では、受光部に狭帯域干渉フィルタを用い、数十回の差分値加算法により、通常数 m、ものによっては 30 m の距離で距離計測が可能であった。

7. む す び

レーザスキャナとテレビカメラによる 3 次元計測システムについて、計測誤差を最小化する手法について述べた。すなわち、カメラの設定誤差、スキャナの構造的誤差および設定誤差を摂動パラメータとし、計測容易なスキャナから対象物までの直線距離を評価対象とした。さらに、それを利用し、複数方向からの 3 次元計測結果を統合する手法について述べた。統合は各方向からの計測データの信頼性を考慮して行った。

本実験ではカメラ・スキャナ系は 1 組のみを使用し、物体を回転させることにより全周データを得た。複数のカメラ・スキャナ系を使用するときには誤差補正パラメータ数が増え、それを求めるのに時間がかかるようになると思われるが、それは最初に一度だけであり、このこと自体は大きな障害とはならないであろう。本実験ではまた、屋外大型対象物の計測等の便宜のため、キャリブレーション用データとしてスキャナから投光点までの距離を用いたが、これ以外の方式、たとえばいまの場合、大型になることもあるが、よく用いられるキャリブレーション用パターンの利用なども考えられ、検討に値するであろう。

レンジセンサ自体は一体型の高精度のものが開発されているが、対象物のサイズや凹凸形状により、基線長やカメラ・スキャナ等の配置、カメラとスキャナの組合せ数(たとえばカメラ 2 台とスキャナ 3 台)等を状況に応じて自由に設定し、全体として整合のとれたシステム構成と、それによる全周データ採取を行う、あるいは屋外において大規模構造物の計測等を行うためには、本稿のような解析とデータ統合法が必要になってこよう。また、本稿では機械式 2 次元ミラースキャナでレーザ光を 2 次元的に振らせる方式を用いた。これはスリット光を 1 次元的に走査する光切断法に比べ、高輝度投光点が得られ、外乱光に対して強く、このような意味においても屋外環境等に適応しやすいと考えている。

【参 考 文 献】

- 1) Y. Shirai: "Recognition of Polyhedrons with a Range Finder", Pattern Recognition, 4, pp. 243-250 (1972)
- 2) C. Tseng and Z. Chen: "Computing Location and Orientation of Polyhedral Surfaces using a Laser-based Vision System", IEEE Trans. Robotics Automat., 7, 6, pp. 842-848 (1991)
- 3) 佐藤, 井口: "空間コード化による距離画像入力", 信学論, J68-D, 3, pp. 369-375 (1985)
- 4) 北村, 来海, 谷内田: "エッジの連続性と画面の局所的性質を利用した三眼視", 信学論, J70-D, 9, pp. 1757-1764 (1987)
- 5) 光本, 岡崎, 田村, 梶見, 副井: "面対称性に基づく単眼視からの 3 次元復元", 信学論, J71-D, 10, pp. 2032-2040 (1988)
- 6) Min-Hong Han and Sangyong Rhee: "Camera Calibration for Three-dimensional Measurement", Pattern Recognition, 25, 2, pp. 155-164 (1992)
- 7) R. K. Lenz and R. Y. Tsai: "Technique for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology", IEEE Trans. Pattern Anal. Intell. 10, 5, pp. 713-720 (Sep. 1988)
- 8) 山口富士男: "コンピュータディスプレイによる図形処理工学", 日刊工業新聞社 (1981)
- 9) 石川, 原田, 吉永, 加藤: "視覚センシングによる粉体体積の非接触測定", 計測自動制御学会論文集, 26, 11, pp. 1238-1243 (1990)

たむら しんいち
田村 進一 昭和46年、大阪大学大学院博士課程修了。同年、同大基礎工学部助手、現在、同大医学部教授。コンピュータビジョン、画像処理、神経回路網などの研究に従事。工学博士。正会員。

くぼ まさひこ
久保 学 昭和61年、日本工学院専門学校情報技術科卒業。同年、システム総合開発(株)に入社。各種工程管理モニタリングシステムの開発、画像処理応用システムの開発に従事。

あさかわ てつじ
浅川 哲治 昭和52年、埼玉県立浦和工業高等学校電気科卒業。三洋電機東京サービス(株)を経て、昭和57年、システム総合開発(株)に入社。現在、同社生産技術部係長。マイクロコンピュータ応用システムの開発、画像処理応用システムの開発に従事。

きむ ろん きゆう
金 應 珪 昭和53年、韓国忠南大大学院工業教育科電気専攻修士課程修了。昭和57～62年、同大助手。平成1～4年、大阪大学医学部機能画像診断学教室研究生・助手、現在、同教室研究生。画像処理、画像認識装置開発の研究に従事。正会員。

きとう よしのぶ
佐藤 嘉伸 昭和63年、大阪大学大学院博士課程修了。NTTヒューマンインタフェース研究所を経て、現在、大阪大学医学部助手。コンピュータビジョン、画像処理などの研究に従事。工学博士。

ぐんじ たかみつ
郡司 隆充 昭和46年、岩手大学工学部卒業。同年、秩父セメント(株)に入社。昭和55年、システム総合開発(株)に出向。統計的データ処理、画像処理、ニューラルネットワークの研究とその応用商品の開発に従事。

いなばやし しろうじ
稲林 昌二 昭和44年、早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年、秩父セメント(株)に入社。工場電気部、中央研究所、システム部を経て、昭和55年、システム総合開発(株)システム部長代理。昭和57年、商品企画室長。システム商品の企画開発に従事。現在、同社取締役商品企画部長兼新技術室長。

なかがわとういちろう
中川東一郎 昭和26年、東京大学工学部計測工学科卒業。同年、秩父セメント(株)に入社。昭和55年、システム総合開発(株)代表取締役社長。現在、同社取締役会長。工学博士。