2台のカメラとレーザスリット光投光器を用いた レンジファインダの試作とそのキャリブレーション

非会員 岡 田 伸 廣 (九州大)

正 員 長 田 正 (九州大)

A Range Finder with Two Cameras and a Laser Slit Marker and its Calibration
Nobuhiro OKADA, Non-member, Tadashi NAGATA, Member (Kyushu University)

We constructed a range finder that has two cameras and a laser slit marker. The range finder is a binocular stereo vision system that resolves the stereo matching problem in stereo vision illuminating a target by the laser slit.

In binocular stereo systems, the geometrical relation between two cameras affects the precision so that a precise calibration is needed. In addition, the calibration should be easy and require only simple operations. We propose an accurate and easy binocular stereo calibration method.

キーワード: レンジファインダ, ステレオビジョン, センサ, キャリブレーション

1. まえがき

産業界では人に代わって作業を行う産業用ロボットの導入が盛んである。現在のところ実用化されているものは設定された作業を繰り返し行うものが殆どである。これらは少品種大量生産の現場において、単純作業から人間を解放するのに大いに役立ってきた。しかしながら今日の多品種少量生産の状況においては、作業環境の変化への対応力のなさや、その教示作業の煩雑さから、これらの導入は1つの壁に行き当たっていると言える。今後は、作業環境や作業対象の変化にも柔軟に対応できるものがより望まれるようになるであろう。その際にはロボットが自分自身で環境や対象に関する3次元的な情報を得る機能を備えなければならない。また、予めロボットが対象に関する3次元的なモデルを自分自身の中に持つ場合もあり、その際にも3次元的な測定を行う必要が生じる。

このような3次元的な測定を行えるセンサとしては、その用いる手法や構成において様々なものが提案され、開発されてきている。その中でも画像を用いたものは、非接触で比較的高速に測定を行える等の特徴を持つ。これまでに、画像を用い、光切断法や空間コード化法に基づいて高速に距離測定を行うレンジファインダの製作が報告されている。これらは、特殊な受光素子⁽¹⁾、対象にパターン光を照射するためのプロジェクタ⁽²⁾や、レーザ投

光器と同期がとられた高精度な回転ミラー⁽³⁾等の特別なハードウェアを使用していた。我々はこれまでに、2台のカメラによる画像を用いて3次元距離測定を行うレンジファインダの試作を行った⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本装置は一般に市販されている部品のみを用いて構成されている。

本レンジファインダは比較的高速に3次元距離測定を行うことができるが、高精度な測定を行うには精確なキャリブレーションが必要である。一般に、カメラを用いたレンジファインダのキャリブレーションには、位置が既知である点やパターンをカメラで測定した結果からシステムのパラメータを求める方法が採られる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかしながら本レンジファインダでこの方法を探ると、2台のカメラの位置と向きを個別にキャリブレーションすることとなり、全体での誤差が大きくなる。また使用する点やパターン数が少ないとノイズ等の影響が残る。さらに、点やパターンの位置をキャリブレーション用の3次元測定器等で正確にトレースしなければならず、作業が困難である。本論文では、レンジファインダのキャリブレーションを容易且つ高精度に行うための手法、および実験によってその有効性を確認した結果を述べる。

2. 試作したレンジファインダの概要

以下で、試作したレンジファインダの構成と性能、一般的に用いられているステレオカメラのモデル、および

図 1 レンジファインダの概要

Fig. 1. The outline of the range finder

図 2 1 台のカメラを用いたレンジファインダ

Fig. 2. A range finder with one camera

そこで用いる近似による影響の考察について述べる。

〈2・1〉 試作したレンジファインダの構成と性能
試作したレンジファインダは、その概要を図 1 に示すように、ステレオカメラ、レーザスリット投光器とそれを走査させる回転ステージ、および距離計算を行うレンジファインダユニットから成る。他のレンジファインダ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾と異なり、特別な部品等は使用していない。本レンジファインダは基本的に両眼立体視法に基づく距離測定装置である。対象にレーザスリット光を照射し、画像中でその照射されている領域を探し出すことにより、両眼立体視における対応点探索問題を解決する。

一般的な光切断法に基づくレンジファインダは、図 2 に示すように、1 台のカメラとスリット投光器から構成される。しかしながらこのような構成を用いた場合、スリット光の投射方向の精度が測定の精度に直接影響を及ぼす。さらに、スリット光のスリット面も、その投射方向回りの回転等が十分に調整されていなければならない(図 3)。それに対して我々のレンジファインダでは、2 台のカメラ間の幾何学的な構成が正確に分かっていれば、それらスリット投光器の機械的精度は距離データの測定に何ら影響を与えない。

レンジファインダユニット内部の構成を、図 4 に示す。2 台のカメラからの画像信号は、AD 変換器によってデジタル信号へと変換される。スリット検出器が、2 台のカメラによる画像中で、各走査線毎に最も輝度の高い画素、すなわちスリット光が照射されている点を写して

図 3 スリット面の回転

Fig. 3. Rotation of the laser slit plane

図 4 レンジファインダユニット

Fig. 4. The range finder unit

いる画素を探しだし、その画像中での位置を出力する。MPU(Micro Processing Unit) が、それらの出力からその点の 3 次元空間中での位置を計算し、その結果を距離メモリに格納する。ホスト計算機はインターフェイスを介してその中の距離データを得る。

本レンジファインダはカメラ画像を 512×512 画素に量子化する。また 2 台のカメラは 400mm 離して置かれ、約 1500mm 先の幅約 200mm の範囲を測定するとき、奥行き方向に関して約 1.5mm の分解能を持つ。

レンジファインダユニット内のスリット検出器は各走査線毎にスリット光を照射されている点の像を探しだし、MPU も各走査線毎にその点の位置を計算する。従って、レンジファインダに使用されているカメラが 1 枚の画像を取り込む時間 (33.3msec) 内に、スリット光を照射されている全ての領域に関する距離データが得られる。スリット光を回転ステージで走査することにより、シーン全体の距離データを得る。また、この回転ステージを駆動するステッピングモータは、ホスト計算機によってその回転方向、速度および回転角度が制御される。

〈2・2〉 ステレオカメラのモデル 一般的なステレオカメラのモデルを図 5 に示す。カメラは平行投影モデルを仮定され、それぞれのカメラ座標系の中で (x_c, y_c, z_c) にある点は、画像平面中の点 $(u, v) = (x_c k_u, y_c k_v)$ に写像される。ここで k_u および k_v はカメラ系の倍率 (pixel/mm) であり、それぞれの値は 2 台のカメラ間で等しいものとする。2 台のカメラはその光軸および画像座標の u 軸が同一平面内に存在するように配置される。レンジ

図 5 ステレオカメラのモデル
Fig. 5. Model of Stereo Camera

ファインダの座標原点は 2 台のカメラの中間に置かれる。また、図中の θ_L および θ_R は左右のカメラそれぞれの光軸がレンジファインダ座標系の x 軸と成すカメラ角である。

このようなモデルでは、空間中の任意の点の、それぞれのカメラ画像中での像 (u_L, v_L) および (u_R, v_R) の間には、 $v_L = v_R$ なる関係が成り立つ。すなわち、一方のカメラ画像中のある点に対応する視線像 (epipolar 拘束線) が、もう一方のカメラ画像中で同じ高さにある走査線となる。よって、対応点探索の処理が簡易且つ、ハードウェアで容易に実現できるものになる。

このとき、それぞれのカメラ画像中で (u_L, v) および (u_R, v) に像を持つ点の 3 次元空間中での位置は、

$$x = \frac{u_L \cos \theta_R + u_R \cos \theta_L}{k_u \sin (\theta_L + \theta_R)} - l \frac{\sin (\theta_L - \theta_R)}{\sin (\theta_L + \theta_R)} \cdots (1)$$

$$y = \frac{v}{k_v} \cdots (2)$$

$$z = \frac{-u_L \sin \theta_R + u_R \sin \theta_L}{k_u \sin (\theta_L + \theta_R)} + 2l \frac{\sin \theta_L \sin \theta_R}{\sin (\theta_L + \theta_R)} \cdots (3)$$

となる。

しかしながら現実のカメラ系は平行投影モデルよりも心射投影モデルに近いものである。そのため画像周辺部で真の epipolar 拘束線とカメラの走査線がずれを生じる。正確な測定を行うためには、画像中でこのずれが 1pixel 以下になる範囲のみを使用するようにしなければならない。次節でその範囲がどのようになるかを考察する。

〈2.3〉 カメラ系の平行投影モデルからのずれによる影響 レンジファインダのステレオカメラ部が図 6 に示すように心射投影モデルでモデル化されるカメラ系で構成されているとする。そしてその心射投影モデルでの焦点距離を $f(\text{pixel})$ とする。また、ここでは平行投影モデルで近似を行うことの影響を大まかに知ることが目的なので、カメラ角は $\theta_L = \theta_R = \theta$ とおいた。左カメラ画像中の点 (u_L, v_L) に対応する視線は、左カメラ系で

$$fx_L/u_L = fy_L/v_L = z_L$$

であり、この直線上の点 $(u_L z_L/f, v_L z_L/f, z_L)$ の右カメラ座標系での位置は、左カメラの座標系から右カメラの

図 6 心射投影モデルによるステレオカメラ
Fig. 6. A perspective stereo camera model

座標系への座標変換行列 T を用いて

$$(x_R, y_R, z_R, 1)^t = T(u_L z_L/f, v_L z_L/f, z_L, 1)^t$$

と表される。よってその点の右カメラ画像中での v の値は

$$v_R = \frac{fy_R}{z_R} = \frac{v_L f z_L}{-u_L z_L \sin 2\theta - f z_L \cos 2\theta + 2fl \cos \theta}$$

となる。図 6 から $z_L \simeq l/\cos \theta$ と近似すると

$$v_R - v_L \simeq \frac{u_L v_L \sin 2\theta}{f - u_L \sin 2\theta} \cdots (4)$$

を得る。これを用いて $|v_L| \gg 1$ の下で $|v_R - v_L| < 1$ となる条件を求めると、

$$|u_L v_L| < f/\sin 2\theta$$

と書ける。従って、平行投影モデルで近似を行う、すなわち垂直方向のずれを 1pixel 以下に抑えるためには、画像中で

$$|u| < \sqrt{f/\sin 2\theta}, \quad |v| < \sqrt{f/\sin 2\theta} \cdots (5)$$

の範囲のみを使用するようにしなければならない ((5) 式において単位が正しくないように見えるが、式中で f の値は $f(\text{pixel}) \times 1(\text{pixel})$ である)。この条件は垂直方向のずれを生じないための条件であり、水平方向のずれも生じないようにするためには、(5) 式は、

$$|u| < \sqrt{f/2 \sin 2\theta}, \quad |v| < \sqrt{f/2 \sin 2\theta} \cdots (6)$$

となる。

上記の式では、その導出過程において近似を用いているため、正確な値とはなっていない。しかしながら、測定を行なう際に画像中で使用できる範囲を知るには十分であると考えられる。カメラを心射投影モデルでモデル化しておけば、現実のカメラ系との差は小さくなり、このような範囲を考慮する必要も殆どなくなる。しかしながらその場合、対応点探索を行うための epipolar 拘束線の計算が複雑になり、またその拘束線もカメラの走査線とは異なるので、ハードウェアによって実時間で対応点探索を行うことは困難となる。

3. ステレオカメラモデルの提案とそのキャリブレーション法

3次元空間中での位置が既知である点やパターンをカメラで測定した結果から本レンジファインダのキャリブレーションを行おうとすると、幾つかの不都合な点が生じる。すなわち、2台のカメラの位置と向きを個別に求めることによる誤差の蓄積、使用する点やパターンの数が少ない場合の精度に対するノイズの影響や、点やパターンの位置を3次元測定器等で正確にトレースする作業の困難さ等である。ここでは、より正確かつ容易なキャリブレーションを行うために、新たなステレオカメラのモデルとそのキャリブレーション法を提案する。

(3.1) ステレオカメラモデルの提案 (2.2)節に示したモデルにおいて、3次元空間中での点の位置を求める式を見ると、特に z の値((3)式)においてステレオカメラのカメラ角 θ_L 、 θ_R およびカメラ間の距離 l が測定精度に強い影響を与えていることが分かる。

また、種々の応用において、ワールド座標系の座標原点は作業対象の近傍に置かれることが多いと考えられる。上のモデルではレンジファインダの座標原点は2台のカメラの中央に置かれているため、双方の原点間の距離が大きくなる。そのために、双方の座標系の間の座標変換を求める際にも、比較的大きな誤差が入り込むことが起こり得る。

そこで今回、図7に示す新しいステレオカメラのモデルを提案する。ここでは、レンジファインダの座標系の原点は2台のカメラの光軸の交点に置かれる。epipolar拘束線がカメラの走査線と同一となるよう、各カメラはその光軸の交点付近において平行投影モデルを用いた際の倍率 k_u および k_v が等しく設定されなければならないが、各カメラからその交点までの距離は任意である。 x 軸および z 軸はともに2台のカメラの光軸を含む平面内にあり、 z 軸はその2本の光軸が成す角を2等分する方向に、 x 軸は z 軸に直角となるようにとられる。このとき、それぞれのカメラ画像中で (u_L, v) および (u_R, v) に像を持つ点の3次元空間中での位置は、

$$x = \frac{u_L + u_R}{2k_u \sin \theta} \dots \dots \dots (7)$$

$$y = \frac{v}{k_v} \dots \dots \dots (8)$$

$$z = \frac{-u_L + u_R}{2k_u \cos \theta} \dots \dots \dots (9)$$

となる。これは、(1)~(3)式において、 $\theta_L = \theta_R$ および $l=0$ とおいたのと等価である。

このとき、(7)~(9)式中には l が現れないので、その誤差も結果に影響しない。また、レンジファインダの座標の原点とワールド座標系の原点との距離も小さくなると考えられる。

(3.2) カメラ角 θ の測定 上で述べたモデルに基づいて、そのカメラ角 θ を決定する手法を提案する。

図7 新しいステレオカメラのモデル

Fig. 7. A new stereo camera model

実際のカメラ角 θ に対して誤差を含んだカメラ角 θ' を用いて測定を行うと、(7)~(9)式より、空間中の点 (x, y, z) の座標を $(e_x x, y, e_z z)$ と誤って出力してしまう。ここで

$$e_x = \sin \theta / \sin \theta' \quad , \quad e_z = \cos \theta / \cos \theta'$$

である。

今、レンジファインダに平面上の点を測定させてその法線ベクトルを計算し、正規化を行うと、

$$\vec{n}' = (x'_n, y'_n, z'_n) = (e_x x_n, e_x e_z y_n, e_x z_n)$$

となる。ここで、

$$e = 1 / \sqrt{(e_x x_n)^2 + (e_x e_z y_n)^2 + (e_x z_n)^2} \dots \dots \dots (10)$$

である。2枚の異なる平面に対してこのような測定を行った結果の $\vec{n}'$ および e をそれぞれ $\vec{n}'_1 = (x'_{n1}, y'_{n1}, z'_{n1})$ 、 $\vec{n}'_2 = (x'_{n2}, y'_{n2}, z'_{n2})$ および e_1, e_2 とし、他の3次元測定器等を用いて実際にそれらの面が成す角 α を求めると、

$$\cos \alpha = \frac{x'_{n1} x'_{n2}}{e_1 e_2 e_x^2} + \frac{y'_{n1} y'_{n2}}{e_1 e_2 e_x^2 e_z^2} + \frac{z'_{n1} z'_{n2}}{e_1 e_2 e_x^2}$$

を得る。よって、

$$\frac{\cos^2 \theta' x'_{n1} x'_{n2}}{\cos^2 \theta} + \frac{\cos^2 \theta' \sin^2 \theta' y'_{n1} y'_{n2}}{\cos^2 \theta \sin^2 \theta} + \frac{\sin^2 \theta' z'_{n1} z'_{n2}}{\sin^2 \theta} - e_1 e_2 \cos \alpha = 0 \dots \dots \dots (11)$$

を満たす θ を求めることで、真のカメラ角が得られる。ここで

$$a = x'_{n1} x'_{n2} \cos^2 \theta'$$

$$b = y'_{n1} y'_{n2} \cos^2 \theta' \sin^2 \theta'$$

$$c = z'_{n1} z'_{n2} \sin^2 \theta'$$

$$d = -e_1 e_2 \cos \alpha \dots \dots \dots (12)$$

とすると、(11)式は

$$a \sin^2 \theta + b + c \cos^2 \theta + d \sin^2 \theta \cos^2 \theta = 0 \dots \dots (13)$$

となる。さらに x_{n1} と x_{n2} とが逆符号となり、 y_{n1} と y_{n2} とがともに十分に小さくなるよう定めたとすると、(11)式は

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{-(a+2b+c+d) - \sqrt{(a+2b+c+d)^2 - 4(a+b)(b+c)}}{2(a+b)}} \quad (14)$$

となる。

しかしながら、(12) 式中の e_1 および e_2 を予め知ることはできない。そこで、 $\theta' \simeq \theta$ および $\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2} = 1$ を用いて $e_1 = e_2 = 1$ と近似して計算を行う。(12) 式より、この近似の影響を小さくするには $\alpha = \pi/2$ とすることが望ましい。従ってここで用いる 2 平面は、それらの法線ベクトルの成す角が $\pi/2$ に近くなるようにおく。このとき (14) 式において $(a+2b+c+d)^2 - 4(a+b)(b+c) > 0$ となるには、 $b \simeq 0$ 、すなわち $y'_{n1}y'_{n2} \simeq 0$ であればよい。以上より、ステレオカメラのカメラ角のキャリブレーションに用いる 2 つの平面としては、そのレンジファインダの座標系の中での法線ベクトルがそれぞれ、 $(1/\sqrt{2}, 0, -1/\sqrt{2})$ および $(-1/\sqrt{2}, 0, -1/\sqrt{2})$ に近いものを用いる。また (7)~(9) 式および (14) 式より、 $y'_{n1}y'_{n2} \simeq 0$ とすることは、 θ の測定に対するカメラ系の倍率 k_u および k_v の値の誤差の影響を減らす上でも有効である。

このような平面を用いれば、 $e_1 = e_2 = 1$ という近似による影響は、実際の誤差 $|\theta - \theta'|$ よりも小さくなる。こうして得られたカメラ角を新たな θ' として再び上記の方法を用いると、さらに真の値 θ に近い値が得られる。このようにして複数回測定を繰り返すことで、 θ に十分近い値を得ることができる。

以上のように、カメラ角 θ' を仮に定めてレンジファインダに 2 枚の異なる平面の法線ベクトルを測定させ、同時にそれらを他の 3 次元測定器等で測定することで、真のカメラ角 θ を求めることができる。レンジファインダで測定する際には、平面上の多数の点の位置を測定させて最小 2 乗法等で法線ベクトルを推定させることにより、精度良くかつノイズに強い測定を行わせることができる。また、3 次元測定器では、レンジファインダと同一の点の位置を測定するのではなく、同一面の法線ベクトルを求めればよいので、作業も容易となる。さらに、 θ を得る際、平面の実際の法線ベクトルを測定する 3 次元測定器と、レンジファインダとの間の位置関係は不必要なので、その誤差が結果に影響することもない。

〈3.3〉 ワールド座標系からレンジファインダ座標系への座標変換 レンジファインダを、マニピュレータ等の他の作業システムのセンサとして用いる場合には、他の座標系とレンジファインダ座標系との間の座標変換行列を明らかにしておく必要がある。

ワールド座標系からレンジファインダ座標系への座標変換行列 T を、次のように定義する。

$$T = R_x R_y R_z P \dots \dots \dots (15)$$

R_x 、 R_y および R_z はそれぞれ x 、 y および z 軸廻りの回転行列である。また P は平行移動行列である。

今、レンジファインダに平面を見せてその法線ベクトルを測定させた結果を (v_{xR}, v_{yR}, v_{zR}) 、同じ法線ベクトルをワールド座標系中で測定した結果を (v_{xW}, v_{yW}, v_{zW}) と

すると、両者の間には

$$(v_{xR}, v_{yR}, v_{zR}, 1)^t = R_x R_y R_z (v_{xW}, v_{yW}, v_{zW}, 1)^t \dots \dots \dots (16)$$

なる関係がある。

$$R_x R_y R_z = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (17)$$

とにおいて、異なる法線ベクトルを持つ 3 つの平面に対して測定を行い、それぞれに対して (16) 式を用いて関係式を作ると合計 9 つの式ができ、それらを解くことによって $a_{11} \sim a_{33}$ を得る。これらの値を用いて (17) 式を解くことによって θ_x 、 θ_y および θ_z を求めることができる。但し、ここで $a_{11} \sim a_{33}$ は測定によって得られた値なので、(17) 式の一部を用いて解いた値を初期値とし、最急勾配法等を用いて θ_x 、 θ_y および θ_z を決定する。

$a_{11} \sim a_{33}$ を求める際、3 つの法線ベクトルの互いに成す角がほぼ $\pi/2$ であることが望ましい。従って、このとき用いる 3 つの平面としては、それらの法線ベクトルが互いにほぼ $\pi/2$ となるものを用いる。

平行移動行列 P は、回転行列 R を求めた後では簡単に求めることができる。ある点の位置をレンジファインダで測定し、またワールド座標系中で 3 次元測定器等を用いて測定した結果をそれぞれ (p_{xR}, p_{yR}, p_{zR}) および (p_{xW}, p_{yW}, p_{zW}) とすると、両者の間には

$$(p_{xW}, p_{yW}, p_{zW}, 1)^t = P^{-1} R_z^{-1} R_y^{-1} R_x^{-1} (p_{xR}, p_{yR}, p_{zR}, 1)^t$$

なる関係がある。よって

$$(p'_{xW}, p'_{yW}, p'_{zW}, 1)^t = R_z^{-1} R_y^{-1} R_x^{-1} (p_{xR}, p_{yR}, p_{zR}, 1)^t$$

とおくと、

$$(p_x, p_y, p_z)^t = (p_{xW} - p'_{xW}, p_{yW} - p'_{yW}, p_{zW} - p'_{zW})^t \dots \dots (18)$$

として、平行移動の各成分が得られる。

この際には、先ほど求めた 3 つの平面の式からその交点を求め、この交点の位置を使用する。それによって、点の位置をレンジファインダと 3 次元測定器双方で測定する困難を省き、またレンジファインダの分解能による誤差を小さくすることができる。3 つの面は、その交点がレンジファインダの座標原点の近傍になるように置き、また 3 次元測定器もその交点を中心とする点群の位置を測定するようにする。

これら座標変換行列の測定の際には、ステレオカメラのカメラ角の測定と同様に、平面の式をレンジファインダと 3 次元測定器とで求めることで測定を行なっている。従って、カメラ角を求める際と同じ長所を持つ。

図 8 レンジファインダのステレオカメラ部
Fig. 8. The stereo camera of the range finder

4. 実験

上で述べた手法を用いて行ったレンジファインダのキャリブレーション結果を以下に述べる。レンジファインダのステレオカメラ部を図 8 に示す。2 台のカメラが約 400mm 離して置いてあり、その中央にレーザスリット光投光器を載せた回転ステージがある。カメラレンズには、レーザスリット光のみが明るく写るよう、赤色光のみを通すフィルタが取り付けられている。

レーザスリット光の幅は実測で約 0.7mm で、カメラ系の倍率が $k_u \approx 2.5\text{pixel/mm}$ のとき、画像中ではほぼ 2pixel 分の幅があった。このスリット光の幅は、対応点検出の際に誤対応を生じる原因となり得る。このような誤対応を生じているかは、以下のようにして確認した。レンジファインダで平面上の多数の点の位置を測定し、得られた点を最小 2 乗法で平面に当てはめる。誤対応を生じていなければ、測定の際の分解能を $a\text{mm}$ とすると各点の位置は得られた平面から $a/2\text{mm}$ 以内にあるはずである。7700 点程度の点を測定した際、約 6800 点がこの範囲に収まった。また、平面から $a\text{mm}$ 以上離れた点は 2 点のみであった。従って、対応点検出の際に誤対応を生じる頻度は全体の約 10% であり、誤対応を生じた際も、そのずれは 1pixel 程度であったと考えられる。

まず、ステレオカメラのカメラ角の測定に先だって、カメラの倍率 k_u および k_v の測定がなされる。今回はスクリーン上の 2 点にレーザ光を照射し、そのスクリーン上での位置を 3 次元測定器で、画像中でのそれらの像の位置を画像処理装置で測定することによって求めた。なお、本論文の実験では 3 次元測定器としてミットヨ製 C-604 を用いた。

次に、本論文で述べた方法に基づいて行なったステレオカメラのカメラ角の測定について述べる。その際に対象として用いられる平面には図 9 に示されるものを用いた。この平面を異なる法線ベクトルを持つような 2 つの状態に置いた際の平面上の各点の位置をレンジファインダおよび 3 次元測定器でそれぞれ測定し、最小 2 乗法で平面に当てはめることでその法線ベクトルを計算した。その際、レンジファインダにおいてはカメラ角を適当に定め、(7)～(9) 式を用いて測定を行なった。適当に定め

図 9 対象として用いた平面
Fig. 9. The plane used as a target

表 1 ステレオカメラ角 θ の計算
Table 1. Calculation of θ

	$\theta(\text{deg})$
初期値	80.000
最終値	82.204

たカメラ角の値は 80.000deg であった。(3.2) 節で述べた手法を用いて測定を繰り返すことで得られたステレオカメラ角 θ の値を表 1 に示す。 θ の値は 5 回程度の繰り返しで収束し、その結果は $\theta = 82.20\text{deg}$ であった。

上の方法でカメラ角 θ を求めた後、それを用いて 3 次元測定器の座標系とレンジファインダ座標系との間の座標変換行列 T を、(3.3) 節で述べた方法で求めた。

まず、3 次元測定器座標系からレンジファインダ座標系への座標変換行列 T の回転成分 R を求めた。その際にも、図 9 に示した平面を用いた。この平面を 3 つの異なる法線ベクトルを持つような状態に置いたときの平面上の点をレンジファインダおよび 3 次元測定器でそれぞれ測定し、各平面の法線ベクトルをそれぞれ計算した。レンジファインダおよび 3 次元測定器によって得られた各平面の法線ベクトルを表 2 に示す。表中には、測定された平面上の点の数も示されている。これらの法線ベクトルの値を用いて (17) 式の一部を解いて回転行列の各軸回りの成分 θ_x 、 θ_y および θ_z を求め、さらにこれらの値を初期値として、 θ_x 、 θ_y および θ_z を最急勾配法を用いて求めた結果を、表 3 に示す。今回は最急勾配法での収束条件を、 θ_x 、 θ_y および θ_z の全てが $|\theta_{[i]} - \theta_{[i+1]}| < 0.0002(\text{rad})$ を満たす場合とした。実験においては、繰り返しの回数 3 回で収束した。

最後に 3 次元測定器座標系からレンジファインダ座標系への座標変換行列 T の平行移動成分 P を求めた。先ほどレンジファインダおよび 3 次元測定器で測定した 3 つの面の交点を、それぞれの座標系中で計算し、(18) 式を用いて平行移動の各成分 p_x 、 p_y および p_z を求めた結果

表 2 3 面の法線ベクトル

Table 2. Normal vectors of 3 planes

	レンジファインダ	3次元測定器
平面 1 n_x	0.557	0.546
n_y	0.527	0.563
n_z	-0.642	-0.621
点の数	7266	4
平面 2 n_x	-0.540	-0.504
n_y	0.512	0.565
n_z	-0.668	-0.653
点の数	7023	4
平面 3 n_x	-0.043	-0.035
n_y	-0.250	-0.288
n_z	-0.967	-0.957
点の数	8131	4

表 3 回転量 θ_x , θ_y および θ_z Table 3. Rotation θ_x , θ_y and θ_z

	θ_x	θ_y	θ_z
(rad)	0.0014	-0.0082	-0.0139
(deg)	0.08	-0.47	-0.80

表 4 平行移動量 p_x , p_y および p_z Table 4. p_x , p_y and p_z

p_x (mm)	p_y (mm)	p_z (mm)
0.30	-6.05	-9.18

を表 4 に示す。

以上、全ての実験において、レンジファインダによる測定時間は 1 回当たり数秒程度であった。また 3 次元測定器による測定も、平面上の任意の点の位置を数点測定すればよいので、容易且つ短時間に測定を行うことができた。但し以上の実験においては、カメラ系を平行投影モデルでモデル化していることによる影響を受けないようにするため、画像中の(2.3)節で求めた範囲内の点のみを使用した。

5. 評価

本キャリブレーション法に関して以下のように評価を行なう。まず、3 次元測定器およびレンジファインダによる平面の法線ベクトルの測定がどの程度の精度を持つかを明らかにする。その値を基に、本キャリブレーション手法で得られると思われるステレオカメラのカメラ角 θ の精度を評価する。

3 次元測定器によって同じ平面を 10 回測定した際の法線ベクトルを、表 5 に示す。法線ベクトルの標準偏差は

表 5 3 次元測定器による法線ベクトル

Table 5. Vectors by the 3-D measuring machine

	x	y	z
1	-0.02812	0.13604	-0.99031
2	-0.02790	0.13600	-0.99032
3	-0.02788	0.13608	-0.99031
4	-0.02787	0.13598	-0.99032
5	-0.02797	0.13599	-0.99032
6	-0.02790	0.13590	-0.99033
7	-0.02793	0.13598	-0.99032
8	-0.02796	0.13597	-0.99032
9	-0.02783	0.13590	-0.99033
10	-0.02791	0.13597	-0.99032
average	-0.02793	0.13598	-0.99032

表 6 レンジファインダによる法線ベクトル

Table 6. Vectors by the range finder

(number of points)	x	y	z
1 (9938)	0.7243	0.1417	-0.6748
2 (9790)	0.7244	0.1420	-0.6746
3 (9996)	0.7242	0.1418	-0.6748
4 (9810)	0.7244	0.1421	-0.6746
5 (9944)	0.7244	0.1417	-0.6747
6 (9811)	0.7239	0.1419	-0.6752
7 (9952)	0.7239	0.1419	-0.6751
8 (9747)	0.7239	0.1418	-0.6752
9 (9939)	0.7243	0.1419	-0.6747
10 (9701)	0.7239	0.1418	-0.6752
average	0.7242	0.1419	-0.6749

約 0.005deg であった。但し、これらの測定の際には平面上の 4 点の位置を測定し、最小 2 乗法で平面の式に当てはめることでこれを行なった。誤差範囲として 3σ をとると、繰り返し測定誤差 E_{3D} は、約 0.015deg となる。

レンジファインダによって同一の平面に対して 10 回測定を行なった際の法線ベクトルを表 6 に示す。法線ベクトルの標準偏差は約 0.020deg であった。表中には、レンジファインダによって測定された点の数も示している。よって繰り返し測定誤差 E_{RF} は、約 0.060deg となる。

この繰り返し測定誤差によるステレオカメラのカメラ角 θ の誤差 E_θ は、2 つの面を用いているので、

$$E_\theta = \sqrt{2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial v_{3D}} E_{3D} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial v_{RF}} E_{RF} \right)^2} \cdots (19)$$

で与えられる。ここで、 $\partial \theta / \partial v_{3D}$ および $\partial \theta / \partial v_{RF}$ は、それぞれ θ の 3 次元測定器およびレンジファインダで測定した法線ベクトルに対する微分係数である。

$\partial \theta / \partial v_{3D}$ に関しては、まず (13) 式より、 $\theta \simeq \pi/2$ および $b \simeq 0$ としたことを用いて

$$\partial\theta/\partial d \simeq -\cos^3\theta/2a\sin\theta$$

を得る。さらに、 $\theta \simeq \theta'$ および $x'_{n1}x'_{n2} \simeq -1/2$ としたことを用いると、 $\partial\theta/\partial d \simeq 1/\tan\theta$ となる。また、 $e_1e_2 \simeq 1$ および $\alpha \simeq \pi/2$ を用い、さらに $\partial\alpha/\partial v_{3D} \simeq 1$ とすると、 $\partial d/\partial v_{3D} = e_1e_2 \sin\alpha (\partial\alpha/\partial v_{3D}) \simeq 1$ である。よって、

$$\partial\theta/\partial v_{3D} \simeq 1/\tan\theta \dots\dots\dots (20)$$

を得る。 $\partial\theta/\partial v_{RF}$ に関しては、(13) 式より、

$$(\partial a/\partial\theta)\sin^2\theta + (\partial b/\partial\theta) + (\partial c/\partial\theta)\cos^2\theta + \sin 2\theta(a - c + d\cos 2\theta) = 0$$

を得る。ここで、 $\partial x'_{n1}/\partial v_{RF} = \partial z'_{n1}/\partial v_{RF} = 1/\sqrt{2}$ および $\partial y'_{n1}/\partial v_{RF} = 0$ であったとすると、 $\partial a/\partial v_{RF} = x'_{n2}\cos^2\theta'/\sqrt{2}$ 、 $\partial b/\partial v_{RF} = 0$ および $\partial c/\partial v_{RF} = z'_{n2}\sin^2\theta'/\sqrt{2}$ となり、さらに $x'_{n2} \simeq 1/\sqrt{2}$ 、 $x'_{n1}x'_{n2} \simeq -1/2$ 、 $z'_{n2} \simeq 1/\sqrt{2}$ 、 $z'_{n1}z'_{n2} \simeq 1/2$ 、 $\theta \simeq \theta'$ および $\alpha \simeq \pi/2$ としたことを用いると、

$$\partial\theta/\partial v_{RF} \simeq \sin\theta\cos\theta \dots\dots\dots (21)$$

を得る。

上の実験においては、 $\theta = 82.20(\text{deg})$ より、 $\partial\theta/\partial v_{3D} \simeq 0.14$ および $\partial\theta/\partial v_{RF} \simeq 0.13$ となる。従って (19) 式より、 $E_\theta = 0.01(\text{deg})$ であった。これは (9) 式より、レンジファインダが、奥行き方向の距離に関して約 0.1% の誤差を持つことを表す。

以上、本測定法における誤差の値の評価を行った。本測定法では、 $\partial\theta/\partial v_{3D} \ll 1$ および $\partial\theta/\partial v_{RF} \ll 1$ となることから、ステレオカメラのカメラ角 θ の測定が、面の法線ベクトルの測定の際の誤差の影響を受けにくいことが分かる。またレンジファインダによる面の測定時間が 1 つの面当たり数秒程度であり、3 次元測定器による面の測定も容易であることから、測定回数および測定点数を増やすことによってさらに精度を向上させることができる。

6. 結論

ステレオカメラとレーザスリット光を用いたレンジファインダのためのキャリブレーション手法を提案した。その際には、ステレオカメラのモデル化を工夫することにより、カメラ間の距離の誤差の影響を受けないモデルを構築した。本手法はレンジファインダによって非常に多数の点を測定した結果を用いるので、ノイズに強く、正確なキャリブレーションが行なえる。その測定も、レンジファインダが実時間で距離測定を行うので、1 回当たり数秒程度で行うことができる。また、キャリブレーションに用いる 3 次元測定器は、レンジファインダのカメラが捉えた点と同一の点をトレースする必要がなく、平面上の任意の点の位置を測定すればよいので、作業が容易である。

本レンジファインダのように 2 台のカメラを用い、各カメラの走査線を epipolar 拘束線として用いる装置にお

いては、2 台のカメラの回転ステージの回転軸が平行で、各カメラの z 軸方向の高さも同じでなければならず、またカメラ系の倍率も双方のカメラで同一になっていなければならない。従って、これらの調整を精確且つ容易に行なう手法の開発も必要である。

(平成 7 年 4 月 14 日受付, 同 7 年 11 月 6 日再受付)

文 献

- (1) 荒木和男・田中伸宣・藤野智浩・佐藤幸男：「高速 3 次元形状計測装置の試作」, 信学論 D, **J71-D**, 10, 2059-2068 (1988)
- (2) 佐藤宏介・井口征士：「液晶レンジファインダ-液晶シャッタによる高速距離画像計測システム」, 信学論 D, **J71-D**, 7, 1249-1257 (1988)
- (3) Yukio Sato, Kazuyuki Hattori and Masaki Otsuki, "Real-Time Handy Rangefinder Cubicscope," *Proc. of the 3rd. International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision (ICARCV '94)*, **2**, 1148-1152 (1994)
- (4) 岡田伸廣・長田正・柳田篤志・深水三敏：「レーザスリット光を任意に制御するレーザレンジファインダシステム」, 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, **2**, 645-646 (1992)
- (5) Nobuhiro Okada and Tadashi Nagata : "A Range Finder System with a Controllable Laser Slit Marker," *Proc. of Asian Conference on Computer Vision '93*, 145-148 (1993)
- (6) 井口征士・佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- (7) Roger Y. Tsai : "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **RA-3**, 4, 323-344 (1987)

岡田 伸 廣 (非会員) 1963 年 12 月 24 日生。1988 年, 九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年, (株) ヤマハ入社。1990 年, 九州大学工学部助手, 現在に至る。ステレオビジョン, 画像を用いた 3 次元計測とその応用の研究に従事。計測自動制御学会, 日本ロボット学会の会員。

長 田 正 (正員) 1932 年 10 月 15 日生。1959 年, 九州大学大学院工学研究科博士課程中退。同年, 工業技術院電気試験所(現電子技術総合研究所)入所。1980 年, 九州大学工学部教授, 現在に至る。知能ロボットの研究に従事。工学博士。情報処理学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会等の会員。