2 台の CCD カメラを用いた物体の三次元空間位置測定*

堤 博貴** 久曾神 煌*** 長屋正孝† 軒原和明††

High Precision 3D Coordinate Measuring by the Two CCD Cameras System

Hirota TSUTSUMI, Akira KYUSOJIN, Masataka NAGAYA and Kazuaki NOKIHARA

Recently, a flexible three-dimensional measuring system is required to analyze and evaluate the motion accuracy of a moving object such as robot manipulator hands. This study deals with the measuring method which can measure precisely an object position in a 3D spatial range. Measuring method was based on the triangulation, and a spherical lamp target with high roundness and two cameras were used. The target edge detection based on the straight line approximation was presented. That is possible to acquire the target center of gravity with high precision. Lens distortion was corrected by the databases composed of distortion position data and ideal position data. As a result, 100 μ m measuring precision was obtained in 100×200×200 mm spacious range with 700mm distance from target to cameras.

Key words : CCD camera, 3D position measurement, stereo measurement method, theory of triangulation

1. は じ め に

近年、製品の高精度化に伴い、工作機械の高精度化、ひいては工作機械位置決めの高精度化が求められている。産業用ロボットに代表される多自由度位置決め装置では、各関節部の摩擦や各要素の変形などの定量的には予測しがたい誤差要素が存在するため、ロボット関節の回転角とリンク長の幾何学的関係をもとにアーム先端位置を求めた場合、運動速度により計算値と実際の位置に誤差を生じてしまう。これを打開するため、近年種々の動的非接触三次元位置計測法が検討され、超音波方式¹⁾、レーザ方式²⁾と並びステレオ法(カメラ方式)³⁾が注目されるようになった。ステレオ法は物体形状の三次元的再構成を扱うような視覚認識の分野で発達し、現在では SEM 画像から航空写真に至る立体画像解析の分野で幅広く応用されている。前述の2方式と比べ、気温や空気の揺らぎなど雰囲気の影響を受け難く、簡単かつ低コストにシステムを構成できるなどの長所がある。その一方で、フレーム解像度の制約により広範囲の測定において高精度を維持できない、照明条件に影響されやすいなどいくつかの問題点が指摘されている。現在では 1 m³ の測定領域において数 mm 程度の測定精度が得られているが³⁾、汎用溶接ロボットの位置決め精度が 1 m³ の測定空間内において 0.2mm であることを考えれば実用には程遠い。

本論文では、物体の非接触三次元位置測定法としてステレオ法を取り上げ、画像処理技術を駆使してシステムの高精度化を試みた。三次元測定器によりターゲットの正確な位置決めと取得座標データの精度検証を行い、重心計算法、エッジ位置計算法、評定法などを一つの測定システムとして体系化した。重心位置算出の精度を向上させるためにターゲットのエッジ検出に対し画素間輝度の内挿⁷⁾を応用し直線近似する方法を用い

た。あらかじめ取得した画面上の収差分布をもとに画像を補正する手法⁴⁾により、レンズ収差の影響を軽減したので報告する。

2. 基 本 原 理

2.1 三次元空間位置測定原理

測定座標系モデルを図1に示す。測定座標系はワールド座標系とカメラ座標系で構成され、前者はXYZ軸からなるグローバルな測定空間を表し、後者はレンズ中心を原点とし各撮像面方向を UW 軸、光軸を V 軸とする座標系である。カメラレンズの投影モデルを透視変換とピンホールモデル⁸⁾により簡便化した。画像平面に投影されたターゲットのスクリーン座標値を用いて、ワールド座標系におけるターゲット座標 $T(X_T, Y_T, Z_T)$ を求める。ターゲット座標 T は回転行列 R ⁵⁾ とカメラの位置ベクトル F によりカメラ座標系に変換される。

$$\begin{pmatrix} U_T \\ V_T \\ W_T \end{pmatrix} = R_x R_y R_z (T - F) = R(T - F) = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_T - X_F \\ Y_T - Y_F \\ Z_T - Z_F \end{pmatrix} \quad (1)$$

Fig1 Measurement coordinate system

* 原稿受付 平成10年1月13日

** 正 会 員 東京工業高等専門学校 (八王子市桐田町 1220-2)

*** 正 会 員 長岡技術科学大学 (長岡市上富岡町 1603-1)

† 正 会 員 新日本製鉄 (株) (東京都千代田区大手町 2-6-3)

†† 隆祥産業 (株) (香川県香川郡香南町池内 958)

ここで (U_T, V_T, W_T) はカメラ座標系におけるターゲット座標値、 $a_1 \sim c_3$ は各回転要素である。ターゲットの空間座標位置と撮像面上の投影位置の関係から次式が得られる。

$$\begin{aligned} U_S &= f \frac{U_T}{V_T} = f \frac{a_1 X_{T-F} + a_2 Y_{T-F} + a_3 Z_{T-F}}{b_1 X_{T-F} + b_2 Y_{T-F} + b_3 Z_{T-F}} \\ W_S &= f \frac{W_T}{V_T} = f \frac{c_1 X_{T-F} + c_2 Y_{T-F} + c_3 Z_{T-F}}{b_1 X_{T-F} + b_2 Y_{T-F} + b_3 Z_{T-F}} \end{aligned} \quad (2)$$

さらに、式(1)よりターゲット座標は以下で表される。

$$\begin{aligned} X_T &= Y_{T-F} \frac{a_1 U_S + c_1 W_S + f b_1}{a_2 U_S + c_2 W_S + f b_2} + X_F \\ Z_T &= Y_{T-F} \frac{a_3 U_S + c_3 W_S + f b_3}{a_2 U_S + c_2 W_S + f b_2} + Z_F \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $X_{T-F} = X_T - X_F$ 、 $Y_{T-F} = Y_T - Y_F$ 、 $Z_{T-F} = Z_T - Z_F$ である。左右カメラ上のターゲットワールド座標値をそれぞれ (X_{TL}, Z_{TL}) 、 (X_{TR}, Z_{TR}) とし、次のような目的関数 $G = X_{TL} + Z_{TL} + X_{TR} + Z_{TR}$ を定義する。そして測定を n 回するものとし、この目的関数の左辺と右辺の差の 2 乗和 $\sum_{i=1}^n \{(X_T - X_{TL})^2 + (Z_T - Z_{TL})^2 + (X_T - X_{TR})^2 + (Z_T - Z_{TR})^2\}$ が最小になるターゲットの空間座標位置 $T(X_T, Y_T, Z_T)$ を求める。

2.2 カメラ位置、姿勢の評定

ターゲットの座標位置を測定する前段階として、ワールド座標上でのカメラ座標系原点位置 $F(X_F, Y_F, Z_F)$ と、カメラ姿勢を決める α, β, γ の値を決定する必要がある。この作業は評定とよばれ、いくつかの既知のターゲット座標を参照し、これらとその像が投影された UW 座標値と原点とからなる幾何学的な関係式を用いて導出する。

式導出の便宜上参照ターゲットは同一 Y 座標上に置くものとし、この条件のもと式(3)の分子分母を $f b_2$ で除して整理することから式(4)を得る。

$$\begin{aligned} X_T &= \frac{(Y_{T-F} a_1 + X_F a_2) U_S + (Y_{T-F} c_1 + X_F c_2) W_S + Y_{T-F} f b_1 + X_F f b_2}{a_2 U_S + c_2 W_S + f b_2} \\ &= \frac{e_1 U_S + e_2 W_S + e_3}{e_4 U_S + e_5 W_S + 1} \\ Z_T &= \frac{(Y_{T-F} a_3 + Z_F a_2) U_S + (Y_{T-F} c_3 + Z_F c_2) W_S + Y_{T-F} f b_3 + Z_F f b_2}{a_2 U_S + c_2 W_S + f b_2} \\ &= \frac{e_6 U_S + e_7 W_S + e_8}{e_4 U_S + e_5 W_S + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $e_1 \sim e_8$ は未知係数とする。また以下のような残差 δX_T 、 δZ_T の式を得る。

$$\begin{aligned} \delta X_T &= e_1 U_S + e_2 W_S + e_3 - X_T e_4 U_S - X_T e_5 W_S - X_T \\ \delta Z_T &= e_6 U_S + e_7 W_S + e_8 - Z_T e_4 U_S - Z_T e_5 W_S - Z_T \end{aligned} \quad (5)$$

そして、目的関数 $E = \sum (\delta X_{T_i}^2 + \delta Z_{T_i}^2)$ が最小となるような $e_1 \sim e_8$ の解を求める。式(3)、(4)が等しいことから $a_1 \sim c_3$ は $e_1 \sim e_8$ の関数として表すことができ、さらに初期近似値 $X_{F0}, Y_{F0}, Z_{F0}, \alpha_{F0}, \beta_{F0}, \gamma_{F0}$ は次式で定義できる。

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \tan^{-1}(-f e_1) \\ \alpha_0 &= \tan^{-1}(f e_2 \cos \gamma_0) \\ \beta_0 &= -\tan^{-1} \left\{ \frac{(e_4 \tan \alpha_0 + e_5 \sin \gamma_0) \sin \alpha_0 - (e_1 \tan \alpha_0 + e_2 \sin \gamma_0) \tan \gamma_0}{(e_4 \tan \alpha_0 + e_5 \sin \gamma_0) \tan \gamma_0 + (e_1 \tan \alpha_0 + e_2 \sin \gamma_0) \sin \alpha_0} \right\} \\ Y_{F0} &= Y_T - f \frac{(e_1 + e_4) \sin \alpha_0 + (e_2 + e_5) \cos \alpha_0 \sin \gamma_0}{\sin \alpha_0 \cos \gamma_0 (\cos \beta_0 + \sin \beta_0) + \sin \gamma_0 (\cos \beta_0 - \sin \beta_0)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{F0} &= e_3 - (Y_T - Y_{F0}) \frac{\cos \beta_0 \sin \gamma_0 + \sin \alpha_0 \sin \beta_0 \cos \gamma_0}{\cos \alpha_0 \cos \gamma_0} \\ Z_{F0} &= e_8 - (Y_T - Y_{F0}) \frac{\sin \beta_0 \sin \gamma_0 - \sin \alpha_0 \sin \beta_0 \cos \gamma_0}{\cos \alpha_0 \cos \gamma_0} \end{aligned} \quad (6)$$

式(2)の左辺から右辺を引くことにより以下の式を得る。

$$\begin{aligned} P_X(X_F, Y_F, Z_F, \alpha, \beta, \gamma) &= f \frac{a_1 X_{T-F} + a_2 Y_{T-F} + a_3 Z_{T-F}}{b_1 X_{T-F} + b_2 Y_{T-F} + b_3 Z_{T-F}} - U_S \\ P_Z(X_F, Y_F, Z_F, \alpha, \beta, \gamma) &= f \frac{c_1 X_{T-F} + c_2 Y_{T-F} + c_3 Z_{T-F}}{b_1 X_{T-F} + b_2 Y_{T-F} + b_3 Z_{T-F}} + U_S \end{aligned} \quad (7)$$

さらに、変数 $(X_F, Y_F, Z_F, \alpha, \beta, \gamma)$ を $(X_{F0} + \Delta X_{F0}, Y_{F0} + \Delta Y_{F0}, \dots)$ とし、式(7)に代入してテーラー展開し次式を得る。

$$\begin{aligned} P_X &= P_X(X_{F0}, Y_{F0}, Z_{F0}, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \\ &+ \left(\frac{\partial P_X}{\partial X_F} \right)_0 \Delta X_F + \left(\frac{\partial P_X}{\partial Y_F} \right)_0 \Delta Y_F + \left(\frac{\partial P_X}{\partial Z_F} \right)_0 \Delta Z_F \\ &+ \left(\frac{\partial P_X}{\partial \alpha} \right)_0 \Delta \alpha + \left(\frac{\partial P_X}{\partial \beta} \right)_0 \Delta \beta + \left(\frac{\partial P_X}{\partial \gamma} \right)_0 \Delta \gamma \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_Z &= P_Z(X_{F0}, Y_{F0}, Z_{F0}, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \\ &+ \left(\frac{\partial P_Z}{\partial X_F} \right)_0 \Delta X_F + \left(\frac{\partial P_Z}{\partial Y_F} \right)_0 \Delta Y_F + \left(\frac{\partial P_Z}{\partial Z_F} \right)_0 \Delta Z_F \\ &+ \left(\frac{\partial P_Z}{\partial \alpha} \right)_0 \Delta \alpha + \left(\frac{\partial P_Z}{\partial \beta} \right)_0 \Delta \beta + \left(\frac{\partial P_Z}{\partial \gamma} \right)_0 \Delta \gamma \end{aligned} \quad (9)$$

そして、目的関数 $E = \sum (P_{X_i}^2 + P_{Z_i}^2)$ が最小となるように $(\Delta X_F, \Delta Y_F, \Delta Z_F, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)$ を決定する。以上の数値計算を 2 台のカメラそれぞれについて行う。

2.3 焦点距離の評定

図 2 に焦点距離の求め方を示した。カメラの光軸に平行で距離 r をおいた線上でターゲットを移動させ、任意に測定点 A 、 B を定める。これら 2 点をカメラスクリーンに投影した点を A' 、 B' とする。これらカメラ座標値を $(X_A, 0)$ 、 $(X_B, 0)$ とし、 $A-B$ 間の距離を b 、焦点から A までの距離を L とすると、焦点距離 f は次式で求められる。

$$f = \frac{b \cdot X_B \cdot X_A}{r(X_A - X_B)} \quad (10)$$

3. 実験装置

実験装置の基本構成を図 3 に示す。2 台の CCD カメラ（東芝製 IK-C40MF、有効画素数：768H×494V、解像度：570H×400V）をターゲットから約 900mm 離れた位置に約 380mm の間隔で設置し、レンズ収差の少ない焦点距離 25mm の望遠レンズ（キャノン製、レンズ収差 < 0.17%）を用いて撮影した。実験的に検討をした結果、発光むらの影響を受けにくく複数回測定時の再現性が良好であることから、電子シャッタースピードを 1ms とした。

Fig.2 Calibration for focal length

2台のカメラ画像はビデオセレクトによって制御され、各々の画像を交互にパソコン(PC-98RA, CPU386SX, 20MHz)内部のフレームメモリ(フォトリソ製, FRM2-512, 512 pixel×512 pixel×8 bit×2 frame)に取り込んだ。パソコンが画像取得から重心計算までに要した時間は0.78s/frameであった。

ターゲットとしては球形部分の直径 30mm, 真球度 30 μ m, 出力 60W の発光電球を用い、大容量コンデンサと抵抗で安定化された直流電源を用いて発光させた。発光電球を用いた理由は以下のとおりである。(1)ターゲット自身が光源であるため、画像上でのターゲット画像と背景画像の輝度差を大きくし、ターゲット画像の抽出を容易にする。(2)自身の発光により蛍光灯の影響を受け難くすることができる。(3)球形であるため視点によるターゲット形状の変化が少ない。

三次元測定器(ミットヨ製, FN503, 測定精度 0.5 μ m)はターゲットを正確に位置決めするとともに、得られた座標データの精度を検証する。三次元測定器のXYZ座標は前節で述べたワールド座標系に相当する。

4. 画像処理システム

4.1 画像処理の流れ

画像処理の流れを図4に示す。ターゲット画像の取得 → 二値化処理 → エッジ処理 → 重心位置 → 画像ひずみ補正の順で処理される。この処理を左右カメラについて行い、左右のターゲット重心から前述の理論に基づいて三次元空間位置を得る。

二値化のためのしきい値決定法としては適応しきい値法⁹⁾を用いた。本手法はしきい値を変化させながら実際に二値化してみ、その結果を何らかの判断基準をもとに評価することで、適切なしきい値を決定する手法である。本研究における二値化処理はターゲットの背景からの抽出であるので、二値化の良否の判断基準を画像のまとまり具合とした。一般に、ターゲット画像中に含まれる画素のうち、背景との境界をなす画素の比率

Fig.3 System component

Fig.4 Flow of image processing

が低く、内部である画素の割合が高い形状、すなわちノイズが少なくターゲット画像の周囲でギザギザした成分が少ないものほどまとまりがよいと考えられる。ここでは3×3のオペレータでターゲット画像と背景画像の隣接状態を調べ、それをもとにしきい値を定めた。

4.2 画像ひずみの補正

通常のCCDカメラによる測定ではレンズ収差やCCD素子のミスマライメントなどによって像がゆがめられる。特にレンズ収差の中では歪曲収差の影響が著しく、その結果画像は樽型や糸巻き型にゆがめられ測定誤差の要因となる。画像上で生ずる歪曲収差はレンズ中心からの距離の1, 3, 5次関数で表すことができる。したがってこの関数を用いることで近似補正が可能となるが、レンズ中心位置が既知でない場合には良好な補正を行うことが難しい。そこで、本研究ではあらかじめ取得した画面上の収差分布をもとに画像を補正する手法を採用した⁴⁾。

画像の全域で格子状に取得した測定データと、ひずみの少ない光軸中心付近をもとにして作られた理想値データとを一組としたデータベースを作成し、測定値とデータベースを比較し、差分法によって、理想値データを当てはめるものである。図5のモデルを用いてその原理を説明する。後方の格子は理想値データ平面、前方の格子は測定データ平面であり、前後の各点がそれぞれ対応している。例えば点A(U_A, W_A)にターゲットの測定値があったとすると、この補正值は、理想値平面に投影された点A'である。まず、この点に最も近い距離にある格子点Oをデータベースより検索する。次に点Oから点A'の方向にあるU, W軸の次の格子点P, Qを検索する。理想値平面上の $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は以下の式で表される。

$$\varepsilon_1 = \frac{OU_A}{OP} \times \overline{OP'}, \quad \varepsilon_2 = \frac{OW_A}{OQ} \times \overline{O'Q'} \quad (11)$$

O'点の座標は既知であり、これを U_0, W_0 とすると、点A'は、($U_0 - \varepsilon_1, W_0 - \varepsilon_2$)となり補正值が求められる。

図6(a), (b)にそれぞれ補正前後における画像ひずみの分布

Fig.5 Principle of database correcting

(a) Non-correcting (b) Correcting
Fig.6 Comparison of correcting and non-correcting

を示す。目盛線の交点は理想値を示し、誤差を 30 倍に拡大表示した。理想値マトリクスは、ひずみの少ない光軸付近の 5 点をもとに作成した。図 5 (b) はマトリクスの光軸付近を取り出したもので、点 O と点 P, Q, R, S の平均値を一边とする格子を画面全域に作成位置関係から求めた。表 1 に補正後の最大誤差を示す。比較のため、1, 3, 5 次関数で近似補正した結果も記した。無補正のものに比べ誤差が 1/4 程度に減少したほか、1, 3, 5 次関数によるものよりも良好な結果が得られた。

4.3 サブピクセル級エッジ処理法

同一ターゲット位置を複数回測定したときの測定値のばらつきは測定系の精度を保証し得る。この測定値のばらつきはターゲット画素が画像中に占める画素データ数の平方根に反比例し、ターゲットの撮影面積を大きくとるほど測定精度向上が期待できる。その反面、画面上でのターゲットの移動範囲が狭くなるなどの欠点もあり、したがって広範囲の撮影領域を維持しつつ高精度測定を行うには重心計算法に工夫を加える必要がある。

ここでは輝度値の内挿法⁷⁾を応用した直線近似エッジ検出により高精度に重心位置を求めた。図 7 は重心計算法を示したもので、(a) エッジ検出精度が 1 pixel のもの、(b) 直線近似エッジ検出をしたものである。直線近似エッジ検出は、図 7 に示すようにしきい値をはさみ隣り合った画素の間を直線で近似し、その直線がしきい値と交わる位置までをターゲットとみなす方法である。表 2 は重心位置計算の安定性を評価する目的で、静止ターゲットの重心位置 (U, W) のばらつきを連続 100 フレームの測定から調べたものである。画像水平方向で 1.8×10^{-3}

pixel ($7.65 \mu\text{m}$)、垂直方向で 2.6×10^{-3} pixel ($5.29 \mu\text{m}$) となり、大幅な精度向上が達成された。横方向より縦方向の精度が良いのは、CCD 素子の縦横比の関係により縦方向分解能が向上したことによる。エッジ処理を含む 1 回の画像取得に要

した時間は 1.15 s で、未処理の場合 0.78 s と比較して処理時間は増加するものの実用範囲内といえる。

5. 三次元座標計測

5.1 焦点距離の評定

図 2 に示す原理に基づき、式 (10) を用いて焦点距離を定めた。光軸を Y 軸とし、光軸に直交してカメラの縦、横軸に平行な X, Z 軸座標系を三次元測定器上で構築し、図 2 の A, B 点へのターゲット位置決めを正確に行った。実際には A, B の 2 点のみならず 25 個の測定点から最小二乗法にて焦点距離を求めた。

表 3 は焦点距離の測定結果を示した。焦点距離は左右カメラでそれぞれ、26.06mm, 26.20mm となった。レンズの規格焦点距離 25mm に近い値であることから比較的良好な結果が得られたと考えられる。

5.2 カメラレイアウト

図 8 にカメラ位置および姿勢の評定と三次元空間位置測定で用いたカメラレイアウトを示す。2 台の CCD カメラをターゲットから約 900mm 離れた位置に約 380 mm の間隔で設置し、100×200×100mm の空間を一度に撮影した。ターゲット電球の形状や指向性の影響を考慮し、両カメラの撮影条件を均一にする目的で、カメラターゲットの配置は鋭角 (約 20°) 頂点をもつ二等辺三角形とした。

5.3 カメラの空間位置、姿勢の評定

測定のためのカメラ位置、姿勢評定には、図 8 に示す B 面上で既知のターゲット基準位置を参照した。補正用マトリクスデータは、 B 面とカメラ光軸の交点を含みカメラスクリーンに平行な面上、すなわち左カメラは E 面上で、右カメラは D 面上でそれぞれデータを取得した。取得するマトリクスデータの個数は撮影範囲等の条件によって異なるが、40 点/frame 程度である。三次元位置計測は A, B, C の距離が異なる 3 つの空間平面上で行った。当然のことながら、 B 面上で評定位置と三次元計測位置が一致しないよう配慮しつつデータ取得した。

表 4 に評定で得られた左右カメラのワールド座標位置と姿勢を示す。実際の測定においては B 面上での結果のみを用いるが、参考までに A, B, C 3 つの空間平面上で既知データを参照した結果を示した。2 台のカメラは X 座標値で 380mm, y 角で 22° の違いがあり、ターゲットを頂点とした二等辺三角形形状に配置されていることがわかる。異なる参照面に対する再現性は座標

Fig.7 Edge detecting method with straight line approximation

Fig.8 Camera layout

Table 2 Standard deviation of center of gravity pixel (mm)

Edge detection method	U direction	W direction
One pixel	0.0096 (28.24)	0.0065 (19.11)
Straight line approximation	0.0026 (7.65)	0.0018 (5.29)

Table 3 Focal length mm

Left camera	Right camera
26.06	26.20

位置、姿勢角いずれの場合も 3σ 値/測定値において $3 \sim 4\%$ であった。なお、誤差のある評定データを用いて三次元測定を行った場合、評定誤差と測定誤差は累積されずむしろ打ち消し合う傾向にあることから、評定時の誤差がそのまま座標測定誤差に反映されるわけではないことを付け加えておく。

5.4 空間座標測定結果

図 9 は A , B , C 面上での三次元位置測定の結果を誤差ベクトルで表現したものである。誤差ベクトルは 500 倍に拡大表示している。(a) は側方に視点を置いており、水平および垂直方向への誤差分布を見やすくした。一方、(b) は上方に視点を置いており、水平および奥行き方向への誤差分布を見やすくした。本実験では B 面上において評定データを、 B 面に近い D , E 面上において画像補正用マトリクスデータの取得したため、測定精度は B 面上で向上し $20\mu\text{m}$ の高精度を得た。 B 面上では中心（光軸交点）から XY 方向へいくにつれ放射状に誤差が拡大しており、個々のカメラ測定で生じた種々の誤差が対応のずれによって肥大したものと考えられる。主な誤差要因としては、(1) 補正しきれなかったレンズ収差、(2) ターゲット球の視点による形状変化、(3) 三次元測定器の駆動に伴う浮き沈み、(4) 近似計算誤差、などが挙げられるが、どの誤差要素がどのように影響しているかについて定量的に特定するには至らなかった。

A 面、 C 面では B 面に比べて XYZ のあらゆる方向で精度が低下し、 A , B , C 全体を通じての精度は $100\mu\text{m}$ であった。カメラから最も遠いため、 Y 方向で測定精度が低下するはずの C 面での精度は A 面より高くなっており、上記の誤差要素が距離分解能以上に影響したものと推察される。同じ非接触測定法である超音波法¹⁾では $300 \times 400 \times 400\text{mm}$ の空間領域で $300\mu\text{m}$ であり、これと比較しても良好な結果が得られたといえる。

なお、室内蛍光灯点灯時、非点灯時で再現性を調べたところ、誤差は各軸方向へ $10\mu\text{m}$ 以下であり、本システムが周囲の照明環境に影響されにくいことがわかる。

6. ま と め

2 台の CCD カメラを用いて高精度三次元位置測定を試み、以下の結論を得た。

- (1) データベース補正法によりレンズ収差の影響を大幅に除去した。誤差は無補正のものに比べ $1/4$ 程度に減少した。
- (2) 直線近似エッジ検出法を用いてターゲット重心位置計算の再現性向上を図った。静止ターゲットの画像上の重心位置 (U , W) の複数回測定時の再現性は、画像水平方向で 1.8×10^{-3} pixel ($7.65\mu\text{m}$)、垂直方向で 2.6×10^{-3} pixel ($5.29\mu\text{m}$) となり、大幅な精度向上が達成された。
- (3) 2 台の CCD カメラを用いて静的三次元位置測定を行った。カメラから $800 \sim 1000\text{mm}$ の距離にある $100 \times 200 \times 100\text{mm}$ 空間内の測定精度は $100\mu\text{m}$ であった。また、ターゲット移動を 1 平面上 (図 8 の B 面) に限定した場合での測定精度は $100 \times 100\text{mm}$ において $20\mu\text{m}$ であった。

謝 辞

実験を遂行するに当たり、三次元測定機をお貸しくいただきました (株) ミットヨに心から感謝いたします。

Table 4 Calibration result

Camera	Plane	X mm	Y mm	Z mm	α °	β °	γ °
Left	A	32.004	-747.879	218.674	0.016	-0.016	0.238
	B	30.906	-746.931	221.678	0.020	-0.017	0.239
	C	34.496	-747.559	220.382	0.018	-0.017	0.235
Right	A	411.605	-756.175	261.073	0.077	0.020	-0.168
	B	410.369	-756.177	261.609	0.077	0.020	-0.166
	C	419.162	-753.372	258.045	0.073	0.019	-0.178

Fig.9 Result of 3D position measurement (Error : $\times 500$)

参 考 文 献

- 1) 青柳誠司, 神谷好承, 岡部佐規一, 佐々木 健, 高野正治: 超音波によるロボットの三次元位置・姿勢計測, 精密工学会誌 61, 7 (1995) 964.
- 2) 金森哉史, 梶谷 誠, 益田 正: レーザ光平面による位置計測法 (第 1 報), 精密工学会誌, 60, 12 (1994) 1766.
- 3) 富田文明, 高橋裕信: ステレオカメラのセルフキャリブレーション, 情報処理, 31, 5 (1990) 650.
- 4) たとえば, 画像処理ハンドブック編集委員会: 画像処理ハンドブック, 昭晃堂, (1989) 273.
- 5) たとえば, 上野郁夫, 小林和夫: ポケコンプログラムによる測量計算法, 山海堂, (1994) 137~177.
- 6) 金谷健一: カメラキャリブレーションの数理, 数理科学, 364, 10 (1994) 56.
- 7) たとえば, 高木幹男, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, (1991) 411.
- 8) 大津展之: 判別および最小二乗基準に基づく自動しきい値選定法, 電子情報通信学会論文誌(D), J63-D, 4 (1980) 349.
- 9) 笹川耕一: 平均隣接数に着目したしきい値決定法, 電子情報通信学会論文誌(D-II), J73-D-II, 3 (1990) 360.