

## 論文

## 三次元部分形状結合のための位置姿勢計測法

董 嘉挺<sup>†</sup> 石井 郁夫<sup>††</sup> 牧野 秀夫<sup>†</sup>

Position and Posture Measurement of 3D Partial Shapes for Their Combination

Jiating DONG<sup>†</sup>, Ikuo ISHII<sup>††</sup>, and Hideo MAKINO<sup>†</sup>

あらまし 文化財の電子化保存などにおいて、実物体から詳細な部分形状を取得し、それらを結合して全体構造を復元するために、仮想マーカ位置姿勢計測法と呼ぶ高精度部分形状位置姿勢計測法を提案する。本方式は、高精度アクティブステレオ方式可搬型三次元形状計測装置で取得した部分形状の位置姿勢を形状取得と同時に計測して結合する。これは、交差レーザスリット投射器から被計測空間内の任意物体上に投射した複数のスリット交点座標を形状計測装置の機能により計測し、スリット交点と形状計測装置座標原点で構成される複数の三角形を交差レーザスリット投射器の投影ベクトルに当てはめて透視3点問題を解くことにより位置姿勢を求める方式である。形状計測装置に位置姿勢計測用マーカなどを取り付けた従来の計測法に比べて、形状と姿勢が可変の大型三角形による位置姿勢推定ができるので、計測精度と形状計測装置の設置自由度が向上し、広範囲の空間における部分形状の高精度結合が可能になる。

キーワード 三次元形状計測, 交差レーザスリット, 透視3点問題, コニック, 部分形状結合

## 1. ま え が き

文化財の電子化保存などでは、微細な構造まで再現できるような仮想オブジェクトの高現実感表現が望まれる。詳細な部分形状を取得し、それらを結合して全体構造を復元する研究[1]~[10]や、膨大なデータを階層化して効率良く表示する研究[11], [12]などが進められている。高精度なアクティブステレオ方式可搬型三次元形状計測装置（以下、単に形状計測装置と呼ぶ）が実用化され、詳細な形状と同時にテクスチャも取得できるようになった。この装置はレーザスリット走査機構とカメラを一つの筐体に収容したもので、製造時のキャリブレーションのみで高精度形状計測ができる。任意の位置に簡単に移動して計測できるので高分解能の部分形状取得に適している。このような装置を利用して、異なる位置から取得した部分形状を結合して全体形状を再構成するために、自由な位置から計測できることや、取得した部分形状データを高精度に結合で

きることが求められる。

部分形状の位置合せ法はマッチング方式と位置姿勢計測による方式に大別できる。マッチング方式は形状や同時に取得したテクスチャの特徴などにより重複領域の対応点間の距離を最小化する方式である。この方式に関して、Beslらは繰り返し計算によって対応点間の距離を最小化して座標変換行列を求めるICPアルゴリズムを提案した[1]。更に、対応点の探索精度や処理時間改善の手法[2], [3]、距離画像とテクスチャ画像を統合して再構成する手法[4]~[6]、大規模距離画像位置合せにおける精度や処理時間を改善する手法[7], [8]など多くの報告がある。しかし、相対的な位置合せ方式であるため、多数の部分形状を結合する場合には真の形状との誤差距離をオブジェクト全体にわたって均一に最小化できる保証がないという問題がある。

位置姿勢計測による方式は、センサ方式と投影幾何学的方式に分類できる。センサ方式には回転台、リニアスライダ、ロボットアームなどを用いて回転角や移動距離の制御量を利用する機械的方法[9], [10]、電磁界を用いる方法（例えばPolhemus社FASTRAK）などがある。機械的方法は装置の設置自由度に対する制約が大きいこと、電磁界を利用する方法は精度が十分でないなどの問題がある。投影幾何学的方式では、形

<sup>†</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050 Igarashi 2-nocho, Niigata-shi, 950-2181 Japan

<sup>††</sup> 埼玉医科大学保健医療学部, 日南市

Saitama Medical University, Hidaka-shi, 350-1241 Japan

形状計測装置の筐体に取り付けた三角形や長方形のマーカーをその投影ベクトルに当てはめる方法 [13]～[15] などにより位置姿勢を推定する．設置自由度，汎用性，計測精度，規模の点で他の方式より優れる．しかし，マーカー投影像の見掛けの大きさが小さくなるほど計測誤差が増加するので，必要な精度を得るためには測定範囲の広さに対応したマーカーの大きさが必要になる．

本論文では，投影幾何学的方式の欠点を改善するために，形状計測装置の形状計測機能と取得画像を活用した仮想マーカー位置姿勢計測法と呼ぶ方式を提案する．これは従来の透視 3 点問題の解法 [16] (以下，P3P 位置姿勢推定法と呼ぶ) を利用した形状固定型マーカーによる位置姿勢推定法と異なり，被計測空間中の 2 点と形状計測装置を結ぶ大型仮想三角形を用いた P3P 位置姿勢推定法により高精度化を図る点を特長とする．

## 2. 仮想マーカー位置姿勢計測法

### 2.1 交差レーザスリット投射器

部分形状は形状計測装置 D の固有の座標系 (D 座標系,  $O_d-X_dY_dZ_d$ ) で計測される．図 1 のように交差レーザスリット投射器 W を被計測物体 O と D の移動領域全体に投射できる位置に設置し，その座標系をワールド座標系 (W 座標系,  $O_w-X_wY_wZ_w$ ) とする．図 2 に W の構造を示す． $X_w$  軸を回転軸とする X ミラーで X レーザスリット投射器からのスリット光を走査する．同様に  $Y_w$  軸を回転軸とする Y ミラーで Y レーザスリット投射器からのスリット光を走査する． $X_w$  軸と  $Y_w$  軸が  $O_w$  で直交するように配置し，両回転軸に直交する座標軸を  $Z_w$  軸とする．各スリット面を  $\psi_x$  スリット面， $\psi_y$  スリット面と呼び，それぞれ  $X_w$  軸， $Y_w$  軸上でスリット面が反射するように各ミラー面の位置を調節する．

図 3 のように  $O_w$  からオブジェクト上に投射したスリット交点  $p$  に向かうベクトル  $V_p$  は，二つのスリット面の交線ベクトルである． $\psi_x$  と  $X_wZ_w$  面， $\psi_y$  と  $Y_wZ_w$  面のなす角をスリットの走査角と呼び，それぞれ  $\theta_x$ ， $\theta_y$  とすると，

$$V_p // (\tan \theta_y, \tan \theta_x, 1) \quad (1)$$

である．走査制御値と  $\theta_x$ ， $\theta_y$  の関係がキャリブレーションされていれば，走査制御値を読取って W 座標系原点  $O_w$  からオブジェクト上の任意の点に向かう単位ベクトルを求めることができる．

高精度化のために，レーザスリット面のひずみの補

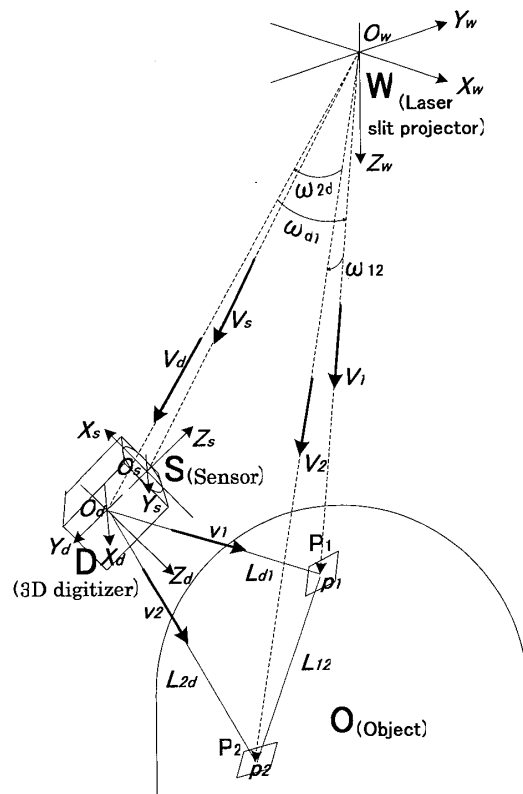


図 1 座標系と計測法

Fig. 1 The coordinate systems and measuring method.

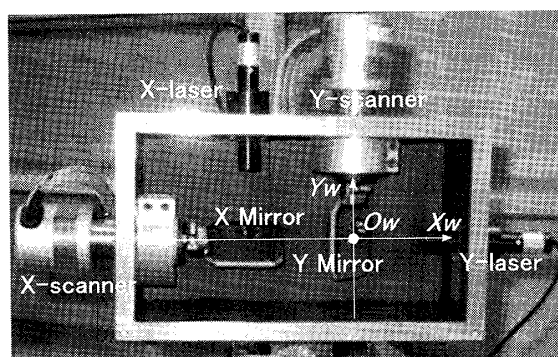


図 2 交差レーザスリット投射器の構造

Fig. 2 Structure of crossed laser slit projector.

正並びに各ミラーのレーザスリット反射面と回転軸のずれの影響の補正のために，走査制御値と  $\theta_x$ ， $\theta_y$  の関係のキャリブレーションを行う．それには，一定間隔の直交格子を描いた床面上空に交差スリット投射器を設置し， $X_wY_w$  面が床面に平行になるように調整し， $Z_w$  軸と床面との交点を求め床面座標原点  $O_G$  を定める．更に， $O_G$  を原点とする各格子交点の床面座標値を求め， $O_w-O_G$  間の距離を実測する．その結果  $\psi_x$ ， $\psi_y$  各スリットを各格子交点に投射したときの走査制御値と投射角  $\theta_x$ ， $\theta_y$  の関係が得られるので，そ

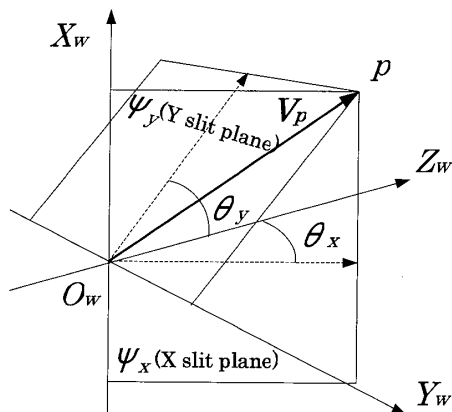


図3 スリット面の走査角  
Fig. 3 Scanning angle of each slit-plane.

これらの対応テーブルを作成する．任意の走査制御値に対する補正後の各スリットの投射角はこのテーブルのバイリニア補間で求める (4. 参照)．

## 2.2 仮想マーカ位置姿勢計測法の原理

形状計測装置 D の位置姿勢を計測する方法として，既知形状のマーカやセンサを D に取り付け，それらの位置姿勢を求める方法がある．マーカ方式の場合は，マーカを撮影した画像から透視 n 点問題 [16] や長方形あてはめ法 [13]～[15] を用いてカメラとの相対的な位置姿勢を求める．画素による標本化誤差の影響を低減するために，画像からマーカの頂点を直接抽出するのではなく，マーカの辺を抽出しその交点として頂点を求める．センサ方式の場合は，既知形状の頂点などに受光素子を取り付け，レーザスリット投射器から各受光素子への投射ベクトルを式 (1) により求め，投射ベクトルに形状を当てはめて位置姿勢を求める．一定の画素数のカメラで広い視野角をカバーするマーカ方式と，一定の角度分解能でレーザスリット投射ベクトルを視野角全体にわたって走査可能なセンサ方式を比較すると，後者が高分解能である．

センサ方式による基本的な部分形状位置姿勢計測法として，三角形頂点に受光素子を配置したセンサを形状計測装置 D に取り付け，P3P 位置姿勢推定法により D の位置姿勢を求める方法について検討する．計測手順は，受光素子の受光電流を監視しながら W を走査し，電流が最大となる各受光素子の  $\psi_x$ ,  $\psi_y$  各スリット走査角を計測し， $O_w$  から各受光素子へ向かう単位ベクトルを式 (1) により求め，P3P 位置姿勢推定法により三角形センサの位置姿勢を求める．D 座標系と三角形センサ間の位置姿勢関係をキャリブレーションしておくことにより，D 座標系で取得した部分形状

の W 座標系における位置姿勢が得られる．しかし，このような 3 点計測方式では，レーザスリットの走査制御，走査制御値の読取，受光電流の読取などにおけるスリット交点投射ベクトルの誤差が計測される位置姿勢に直接影響を与えるという欠点がある．W からの見掛けのセンサの大きさが小さくなるほど位置姿勢誤差が増大するので，遠距離広範囲で必要な精度を得るには大型のセンサが必要になるが，D の筐体外形を大きく突出するような大型センサは被計測オブジェクトとの干渉やセンサの設置精度の維持に問題を生じる．

本方式では，図 1 のように被計測オブジェクト O の被計測部分が計測視野に入るように形状計測装置 D を設置し，被計測範囲を隠さない計測視野のできるだけ離れた位置に小型拡散反射平板  $P_1$ ,  $P_2$  を設置する．レーザスリット投射器 W から平板それぞれの任意の位置にスリット交点  $p_1$ ,  $p_2$  を投射すると， $O_w$  から各スリット交点に向かう単位ベクトル  $V_1$ ,  $V_2$  を  $\psi_x$ ,  $\psi_y$  各走査角から求めることができる．更に  $O_w$  から  $O_d$  に向かう単位ベクトル  $V_d$  を求めることができれば (2.3 に記載)， $V_d$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  の相互になす角  $\omega_{d1}$ ,  $\omega_{12}$ ,  $\omega_{2d}$  が得られる．

一方，形状計測装置 D では被計測部分とこれらの平板の形状を同時に取得するとともに，平板に投射されたスリット交点画像も取得する．それら交点を D で取得した形状に逆投影すると  $p_1$ ,  $p_2$  の D 座標値が得られ， $O_d-p_1$ ,  $p_1-p_2$ ,  $O_d-p_2$  の距離  $L_{d1}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{2d}$  が分かる (図 1)． $p_1$ ,  $p_2$  は平板上の任意の投影点であるが，D で計測することにより形状の分かった  $\triangle O_d p_1 p_2$  が得られる．そこで視点 3 点問題の解法を適用して [16]， $O_w-O_d$ ,  $O_w-p_1$ ,  $O_w-p_2$  間の距離をそれぞれ未知数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  とする連立方程式を立てる．

$$\begin{cases} L_{d1}^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \omega_{d1} \\ L_{12}^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \omega_{12} \\ L_{2d}^2 = c^2 + a^2 - 2ca \cos \omega_{2d} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) の解が得られると W 座標系における  $\triangle O_d p_1 p_2$  の 3 頂点の座標が定まるので，D 座標系から W 座標系への座標変換行列  $M_{DW}$  が得られ，D で取得した形状を W 座標系に配置することができる．部分形状の配置には，計測誤差の低減のため各平板それぞれの異なる位置に  $n$  個のスリット交点を投射して  $n$  個の三角形の P3P 位置姿勢推定を行い，得られた  $n$  個の D 座標系の位置姿勢を平均化して得た  $M_{DW}$  を用いる．なお， $p_1$ ,  $p_2$  にレーザのスリットではなく

スポット光を投射する方法もあるが、画像上の  $p_1, p_2$  像抽出の際に画素による標本化誤差の影響を受けやすい。本方式ではスリット交点像を投影することにより、平板に投射された  $\Psi_x, \Psi_y$  各スリット投射線の骨格点列を求め、それらの交点の画像座標を求める方法で、サブピクセル単位の座標値を得ている。

この方式は形状計測装置 D と被計測空間にまたがる大型の仮想三角形  $\triangle O_d p_1 p_2$  をレーザスリット投射ベクトルに当てはめて位置姿勢計測を行う方式であるため、仮想マーカー位置姿勢計測法 (VM 法: The Virtual Marker Method) と呼ぶ。三角形の形状を計測装置自身で計測することにより大型マーカーによる P3P 位置姿勢推定が可能になること、小型拡散反射平板の設置位置やスリット交点の投射位置が D の計測視野内であれば任意になるので計測誤差が少なくなる条件を選ぶことができること、計測装置の位置姿勢を変えることなく多数の三角形で推定された位置姿勢を平均化して計測誤差の影響の軽減ができることなど精度向上に有効な特長が得られる。なお、小型拡散反射平板を設けずに被計測オブジェクト面に直接スリット交点を投射しても VM 法による計測ができるが、オブジェクト面が投射に不適当な向きになる場合があること、平面に投射することによりスリット投射線の直線近似が可能になり計測精度が向上することなどの理由で小型拡散反射平板を用いる。

### 2.3 $V_d$ の計測法

VM法を実現するにあたって、 $O_d$ が形状計測装置Dの筐体内部の点でありレーザスリット交点を直接投射できないので、図1のようにDの筐体に小型の位置姿勢センサSを設置し、センサ座標系（S座標系、 $O_s-X_sY_sZ_s$ ）を定める。SとDの位置姿勢関係をキャリブレーションしておくことにより（後述）、Wからの交差レーザスリット投射によってSの位置姿勢を求め、 $O_d$ のW座標値を得て $V_d$ を求める。

小型のセンサで位置姿勢を求める方法として、三角形センサより高精度化が期待できるコニック法を適用した計測法を検討した。センサ  $S$  を円形とし、円周上に一定間隔で多数の受光素子を配列する (図 4)。 $W$  から  $\psi_x, \psi_y$  スリット面を独立に走査して円周上の各受光素子 ( $s_0, s_1, s_2, \dots$ ) の光電流がピークとなる二つのスリット面の走査角  $\theta_x, \theta_y$  を求め、式 (1) により  $O_w$  から各受光素子へ向かう単位ベクトルを求めて円の位置姿勢を推定する。それには、図 4(b) のように円の中心を  $O_s$ 、1 個の受光素子  $s_0$  を基準受光素子

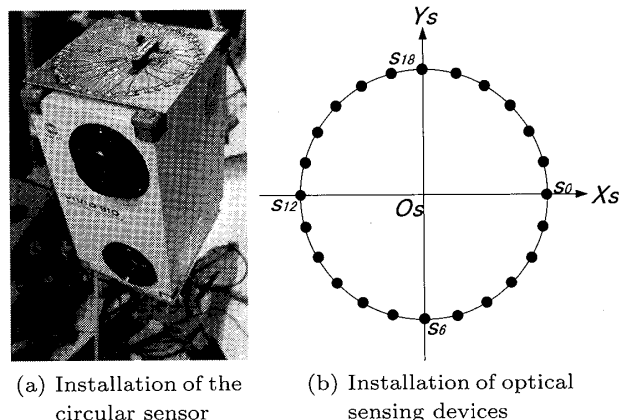


図 4 円形センサ S  
Fig. 4 Circular sensor S.

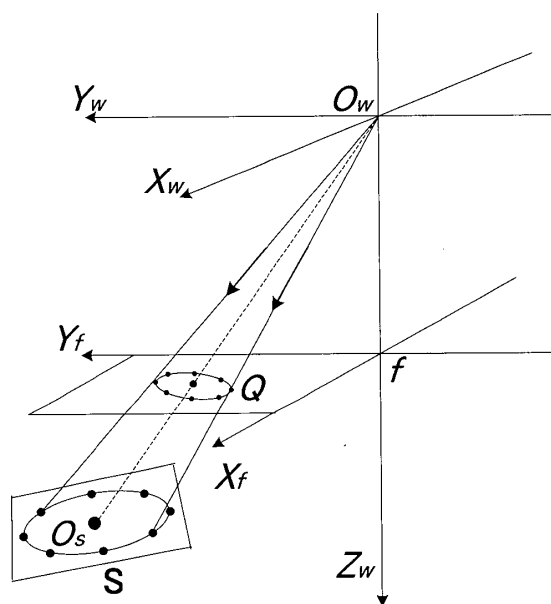


図 5 コニックによる位置と姿勢の推定  
Fig. 5 Estimation of position and posture by conic method.

に定めて  $O_s$  から基準受光素子に向かう軸を  $X_s$  軸とする。図 5 のように投影中心  $O_w$  から  $S$  の各受光素子へ向かうベクトル群と  $X_f Y_f$  平面との交点群は  $S$  の  $X_f Y_f$  への投影像  $Q$  上の点列になる。図 5 では円形センサの円周上に配置した受光センサのいくつかを黒い点で示している。 $f$  は投影中心と  $X_f Y_f$  平面との距離であり、焦点距離と呼ぶ。 $Q$  はコニックと呼ばれ、式 (3) で表される曲線である [17]。

$$AX_f^2 + 2BX_fY_f + CY_f^2 + 2(DX_f + EY_f) + F = 0 \quad (3)$$

行列  $Q$  とベクトル  $\mathbf{x}$  を式 (4) のように定義すると, 式 (3) を式 (5) のように  $\mathbf{x}$  と  $Q\mathbf{x}$  の内積で表すことがで

きる.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} X_f/f \\ Y_f/f \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} A & B & D/f \\ B & C & E/f \\ D/f & E/f & F/f^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$(\mathbf{x}, \mathbf{Q}\mathbf{x}) = 0 \quad (5)$$

平面上のコニック  $Q$  が空間中の半径  $r$  の円の投影である場合, 行列  $Q$  の固有値を  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ( $\lambda_3 < 0 < \lambda_1 < \lambda_2$ ) とし, 対応する単位固有ベクトルの作る正規直交系を  $\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3\}$  とすると, 空間中の円の単位法線ベクトル  $\mathbf{n}$ ,  $O_w$  から円の中心  $O_s$  までの距離  $d$ ,  $O_w$  から  $O_s$  へ向かう単位ベクトル  $\mathbf{V}_s$  はそれぞれ式 (6), (7), (8) となる. ただし,  $N[\cdot]$  は単位ベクトル化関数である.

$$\mathbf{n} = \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_3}} \mathbf{u}_2 \pm \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3}} \mathbf{u}_3 \quad (6)$$

$$d = \frac{\lambda_1^{3/2} r}{(\mathbf{n}, \mathbf{V}_s)} \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_s = N[\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{n}] \quad (8)$$

ここでは,  $W$  から  $S$  の各受光素子へ向かうベクトル群に三島らの最適コニック当てはめプログラム [18] を用いて,  $Z_s$  軸ベクトルと  $O_w-O_s$  間距離  $d$  を求める. コニック当てはめでは 2 個の姿勢解が得られるので正しい姿勢の選択と  $S$  の面内回転姿勢である  $X_s$  軸ベクトルの導出のためにコニック  $Q$  への投影ベクトルが各受光素子へ向かう離散的なベクトルであることを利用する. 二つの姿勢解の回転軸上にない  $S$  面上の 1 個の受光素子  $s_k$  は二つの姿勢解それぞれで異なる空間位置になるため,  $O_w$  から  $s_k$  へ向かうベクトルも二つの姿勢解によって異なる. そこで, コニック  $Q$  上に投影された点列がどちらの姿勢の点列かを判別するために, 計測された  $O_w$  から基準受光素子  $s_0$  へ向かう投射ベクトルの  $S$  面との交点を二つの姿勢解それぞれについて求める. 更に,  $O_s$  からその交点に向かうベクトルを求め, そのベクトルを基準として半径  $r$  の円周上に論理的に各受光素子位置を刻み, それらを  $s_i'$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) とする. また, 各受光素子へ向かうスリット交線ベクトルの  $S$  面との交点を  $s_i''$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) とする. 二つの姿勢の  $\sum (s_i' - s_i'')^2$

を比較し小さい方の姿勢を正しい姿勢として選択する. 次に選択した姿勢について,  $\sum (s_i' - s_i'')^2$  を最小にするように  $Z_s$  軸周りの回転補正を行い,  $O_s$  から補正後の基準受光素子位置  $s_0$  へ向かうベクトルを  $X_s$  軸ベクトルとする.  $s_0$ ,  $\mathbf{V}_s$ , 及び  $X_s$  軸ベクトルを得ることにより  $W$  座標系から  $S$  座標系への座標変換行列  $M_{WS}$  が得られる.

センサ  $S$  の位置姿勢計測によって  $\mathbf{V}_d$  を導くには,  $S$  を形状計測装置  $D$  に固定し,  $S$  座標系から  $D$  座標系への座標変換行列  $M_{SD}$  を求めなければならない. そのため, 図 6 のように床面  $G$  の上空に交差レーザスリット投射器  $W$  を  $Z_w$  軸を床面に向けて設置し床面に投射する. 床面形状が計測可能で, かつ円形センサ  $S$  が  $W$  の走査範囲に入るように  $D$  を設置する.  $D$  の計測視野内のできるだけ離れた床面上の 3 点に  $W$  から交差スリットを投射し,  $D$  で取得した床面形状とスリット投射画像から 3 点の  $D$  座標値を計測する. この 3 点を頂点とする三角形を  $O_w$  から 3 点に向かう投射ベクトルに当てはめる P3P 位置姿勢推定を行うことにより 3 点の  $W$  座標値が得られ,  $W$  座標系から  $D$  座標系への座標変換行列  $M_{WD}$  が得られる.  $M_{WD}$  の誤差を更に低減するため,  $W$  から投射する三角形の頂点座標を変えて多数の三角形を構成し, それぞれから得られる  $W$  座標系における  $D$  座標系の位置姿勢を平均化して得た座標変換行列を  $M_{WD}$  とする. このとき同時にコニック法で  $M_{WS}$  を計測する. その結果,  $S$

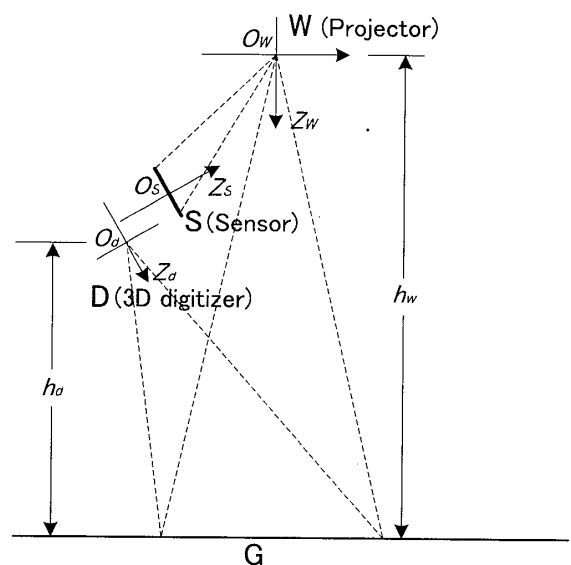


図 6 S 座標系と D 座標のキャリブレーション  
Fig. 6 A Calibration method between S and D coordinates.

座標系から D 座標系への変換行列  $M_{SD}$  が定まる．高精度化のために W-S 間距離をできるだけ短く設定し，S の位置姿勢誤差を抑制する．

計測時には，コニック法で  $M_{WS}$  を計測し，上述の方法で求めた  $M_{SD}$  を用いて  $M_{WD}$  を得る． $M_{WD}$  から D 座標系の原点の W 座標値を求めベクトル  $V_d$  を得る．この  $V_d$  を用いて 2.2 で述べた VM 法を適用して  $M_{DW}$  を得る．

$M_{SD}$  がキャリブレーションされていれば VM 法を適用しなくてもコニック法による  $M_{WS}$  の計測だけで  $M_{DW}$  を求めることができる．この計測法を円形センサ位置姿勢計測法（CS 法：The Circular Sensor Method）と呼ぶ．しかし，CS 法は W から見た S の見掛けの大きさが小さくなると計測誤差が増大する．それに対して，VM 法は S の計測で求めるのは  $V_d$  だけであり， $O_s$  と  $O_d$  の距離が小さい場合は S の計測誤差の  $V_d$  への影響が小さいことから，CS 法より高精度に D の位置姿勢を得ることができる．すなわち，VM 法は CS 法で得た D の位置姿勢を更に高精度に求め直す方法といえる．

### 3. シミュレーション

#### 3.1 条件

VM 法では多数の大型仮想三角形による P3P 位置姿勢推定により精度向上を図るが，仮想三角形の形状計測誤差の影響や VM 法と CS 法の誤差特性などを明らかにする必要がある．実験では空間中の円形センサ S やオブジェクトの位置姿勢などの真値の取得が困難なので，実験に使用した機材の仕様に示されたパラメータと個別に実測で得たパラメータを用いてシミュレーションにより誤差評価を行う．

実験に用いた交差レーザスリット投射器 W は，キコー技研 MLXH-D13 ラインレーザユニットを 2 個，走査機構に GSI Lumonics 社ガルバノメータスキャナ M3ST と表面ミラー各 2 個を用い，精度の維持と安定化のためアルミニウム削り出し筐体に図 2 の構造で組み立てた．シミュレーションでは，W の走査誤差として，ガルバノメータスキャナのジッタ，回転角センサの誤差，走査制御回路のドリフトなど各装置の仕様データに基づいて標準偏差  $\sigma = 0.001^\circ$  の正規分布ランダム誤差を与えた．

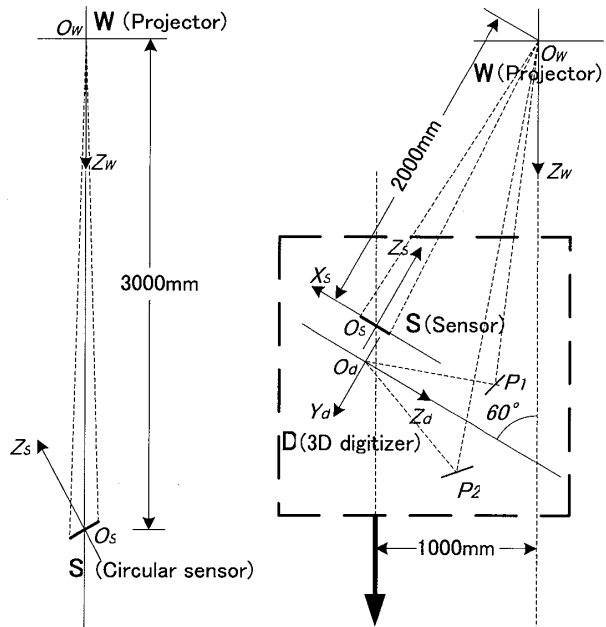
形状計測装置 D はコニカミノルタ社 Vivid910 で，Middle レンズ ( $f = 14\text{mm}$ ，計測視野角約  $14^\circ$ ) を装着した．仕様データを参考にして，形状計測誤差と

して  $X_d$ ,  $Y_d$ ,  $Z_d$  各軸方向それぞれ  $\sigma = 0.2, 0.15, 0.1\text{mm}$  の正規分布ランダム誤差を与えた．D の画像の画素数は  $640 \times 480$  である．実験では画像の標本化誤差を低減するために，レーザスリット投射前後の差画像からスリット投射線像を抽出し，スリット交点付近の  $\Psi_x$ ,  $\Psi_y$  各投射線の幅方向の輝度変化から骨格線点列を求めて直線近似し，骨格線交点の画像座標値を求める．シミュレーションではこの画像解析誤差として画像の縦横各座標軸方向に  $\sigma = \pm 0.25$  画素の正規分布ランダム誤差を与えた．図 4 のように D の筐体上面に S を取り付ける．S の大きさは筐体寸法を考慮して直径  $200\text{mm}$  とした．実験では S の円周上に 24 個の受光素子（浜松ホトニクス社製 S7184）を等間隔に配置したが，シミュレーションでは受光素子数を変化させて特性を調べた．各受光素子の電流変化から求めた走査制御角検出誤差として，実測データより  $\sigma = 0.003^\circ$  の正規分布ランダム誤差を  $\Psi_x$ ,  $\Psi_y$  各走査角に与えた．以下に示す位置及び姿勢誤差は，計測点ごとに 300 回のシミュレーションを行って得た真値とのずれの絶対値を平均化した値である．位置誤差は計測された位置と真値との誤差距離，姿勢誤差は  $Z_s$  軸ベクトルの真値に対する誤差角である．

#### 3.2 CS 法の位置姿勢誤差

図 7(a) のように， $Z_w$  軸上  $Z_w = 3000\text{mm}$  に  $O_s$  を置き，受光素子数及び円形センサ S の傾きを変化させて CS 法による S の位置姿勢計測誤差を求めた．図 8(a) は受光素子数と S の位置姿勢誤差の関係を示す．受光素子数 3 におけるプロット a, b は同一半径の外接円をもつ単一正三角形の P3P 位置姿勢推定法における値を示した．CS 法では受光素子数の増加に伴って位置誤差，姿勢誤差共に減少し，実験で用いた受光素子数 24 個の場合には，単一正三角形 P3P 位置姿勢推定法に比べて位置誤差が 43.8% に，姿勢誤差が 52.3% に低下する．図 8(b) は受光素子数 24 個の CS 法における S の傾きに対する位置姿勢誤差を示す．横軸は  $Z_w$  軸と  $Z_s$  軸のなす角である． $75^\circ$  以上で位置誤差が， $15^\circ$  以下で姿勢誤差が増大する．

図 9 は  $O_w$ - $O_s$  間距離に対する S の位置姿勢誤差を受光素子数 24 個の CS 法と単一正三角形 P3P 位置姿勢推定について比較した．CS 法は距離の増加に対する位置及び姿勢誤差の増加が小さく，遠距離の位置姿勢計測に効果が現れる．図 9 では平均値のみを示したが， $O_s$  の位置の空間分布では方向により大きな偏りがある．受光素子数 24 個の CS 法で  $O_w$ - $O_s$  間距



(a) Arrangement of devices in simulation of Fig. 10 (b) Arrangement of devices in simulation of Fig. 8

図7 シミュレーションの設定

Fig. 7 Arrangement of devices in simulations of Figs. 8 and 10.

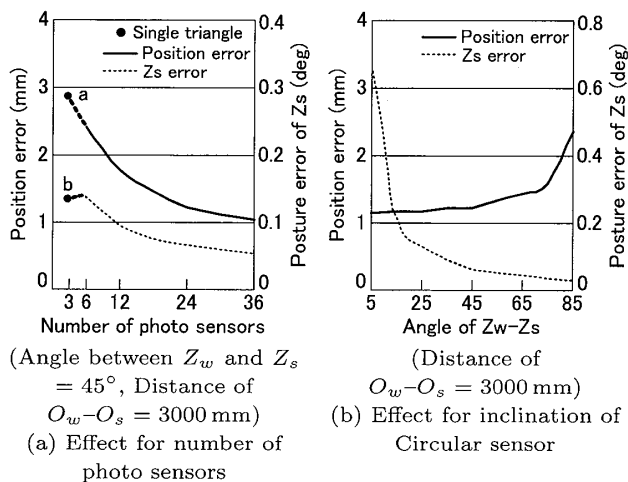


図8 受光センサ数とセンサ面の傾きによる位置姿勢誤差

Fig. 8 Position and posture error vs. number of photo sensors and inclination of circular sensor.

離 3000 mm の場合,  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$  各軸方向についてそれぞれ  $\sigma = 0.047, 0.057, 2.87$  mm であった.  $Z_w$  軸方向に大きな誤差が発生するが, VM 法では S や D の位置姿勢ではなく  $V_d$  のみが必要であり, 図 1 のように  $V_s$  と  $V_d$  のベクトルが接近した状態で計測が行われるので,  $Z_w$  軸方向の位置誤差は  $V_d$  にほとんど反映されない.

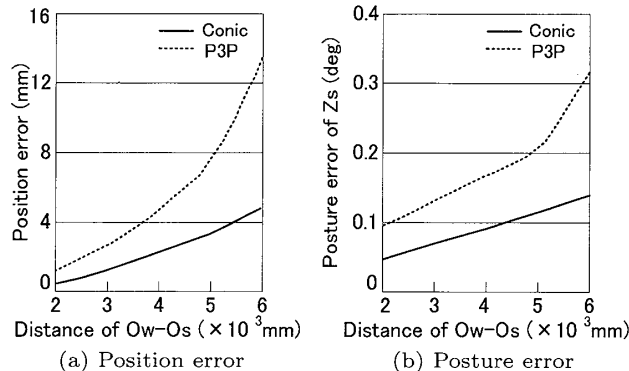


図9  $O_w-O_s$  間の距離による位置姿勢誤差

Fig. 9 Position and posture error vs. distance of  $O_w-O_s$  (Angle of  $Z_w-Z_s = 45^\circ$ , number of photo sensors = 24).

### 3.3 S-D 座標系間キャリブレーション

S 座標系と D 座標系の位置関係のキャリブレーション誤差をシミュレーションにより求めた. 交差レーザスリット投射器 W, 円形センサ S, 形状計測装置 D を図 6 のように配置する.  $O_w$ ,  $O_s$ ,  $O_d$  が  $Z_w$  軸を含む平面内にあり,  $h_w = 1150$  mm,  $h_d = 600$  mm,  $O_w-O_s$  間距離を約 200 mm と仮定し, 2.2 で述べたキャリブレーション法をシミュレーションする. 三角形の頂点座標を変えて 20 個の三角形で得られる D の位置姿勢の平均値を計測値とした. この設定では 1 辺約 175 mm の大きさの三角形になる. 300 回のシミュレーションの結果,  $O_d$  の位置誤差の平均値は 0.13 mm,  $Z_d$  軸及び  $X_d$  軸の誤差角の平均値はそれぞれ  $0.095^\circ$ ,  $0.078^\circ$  であった.

### 3.4 D 座標系の位置姿勢計測誤差

図 7(b) のように形状計測装置 D の上面に円形センサ S を  $X_s//Z_d$ ,  $Y_s//X_d$ ,  $Z_s//Y_d$  の姿勢で設置する. D は  $Z_d$  が  $Z_w$  と  $60^\circ$  で交差し,  $X_d$  軸が  $X_wY_w$  面と平行になる姿勢に設定する.  $O_s$  と  $Z_w$  軸間の距離を 1000 mm とする. 図 7(b) は  $O_w-O_s$  間距離 2000 mm の場合を示す. VM 法では仮想マーカを構成するために大きさ約 8 cm  $\times$  8 cm 小型拡散反射平板  $P_1$ ,  $P_2$  を配置する.  $O_s$  から  $P_1$ ,  $P_2$  までの距離はそれぞれ約 820 mm,  $P_1$ ,  $P_2$  間の距離は約 270 mm である. 太い点線枠内の配置状態を保って  $O_w-O_s$  間距離を 6000 mm まで太い矢印のように  $Z_w$  軸と平行に移動しながら  $O_w-O_s$  間距離に対する D の位置姿勢誤差を求める. 各測定点ごとに小型拡散反射平板上にそれぞれ 20 個ずつのスリット交点を投射し 20 個の三角形の P3P 位置姿勢推定を行い平均化した値を測定

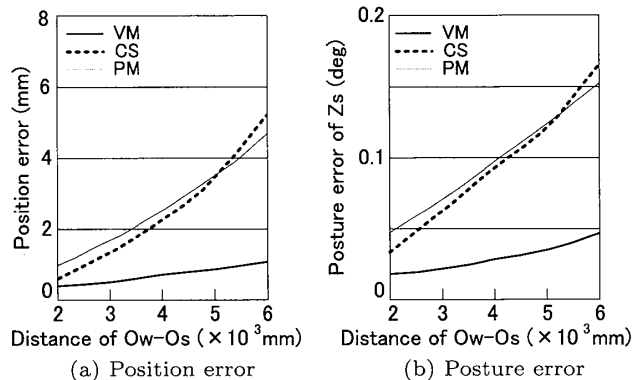
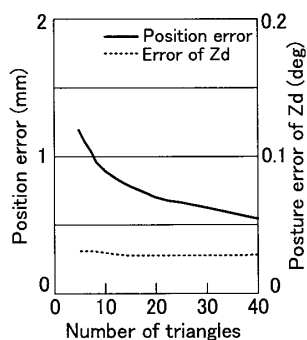
図 10  $D$  座標系の位置姿勢誤差Fig. 10 Position and posture error of  $D$  coordinate.

図 11 仮想三角形数による位置姿勢誤差

Fig. 11 Position and posture error for number of virtual triangle.

値とした。

2.2 で述べたように、被計測空間中に 3 点を投射する方法により VM 法を用いなくても  $D$  の位置姿勢計測が可能であるので、この位置姿勢計測法を PM 法 (Projected Marker Method) と呼ぶ。PM 法は VM 法のように  $V_d$  の計測を必要としない。VM 法、CS 法及び PM 法による  $D$  の位置姿勢誤差を比較する。PM 法ではスリット交点投射による三角形は 1 辺 210~240 mm で、三角形数は 20 個である。

図 10 に  $O_w-O_s$  間距離を 2000~6000 mm の間で変化させて、各測定点ごとに 300 回のシミュレーションで得た  $D$  座標系の位置姿勢誤差の平均値の変化を示す。VM 法が CS 法より  $O_w-O_s$  間距離の増大による誤差増加率が低く、距離 6000 mm で平均位置誤差 0.92 mm 程度、平均姿勢誤差 0.05° 程度の精度で  $D$  座標系の位置姿勢が計測できる。図 11 は VM 法の三角形の数  $n$  を変化させた場合の位置姿勢誤差の変化を示す。 $n$  の増加に伴い位置誤差は減少するが、姿勢誤差はほとんど変化しない。

PM 法は CS 法と同程度の精度しか得られない。PM

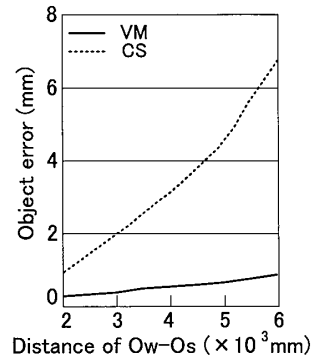


図 12 オブジェクト上のマーク点の位置誤差

Fig. 12 Position error of the marking points on object surface.

法では P3P 位置姿勢推定に用いる三角形に  $D$  で取得する形状誤差と画像解析誤差の影響が反映され、精度が低下する。VM 法でも同様に  $D$  で取得する形状誤差と画像解析誤差の影響が反映されるが、 $V_d$  が高精度であることにより  $O_d$  の存在範囲が高精度に限定されること、三角形のうち  $O_d$  と他の 2 頂点間の距離が大きいことにより  $O_d$  を中心とする姿勢回転精度がよいことの二つの特徴が有効に働き高精度特性を得ている。

図 10 と同じ条件で  $O_w-O_s$  間距離を変化させたときの被計測物体上にマークした点に生じる位置誤差の平均値を図 12 に示す。これも CS 法に比べて VM 法が小さく、 $O_w-O_s$  間距離が大きくなるほど VM 法の優位性が強くなる。したがって、VM 法は  $D$  の計測可能領域より極めて大きな物体を多数の部分形状に分割して計測し、高精度に接合して再構成する場合に適切な位置姿勢計測法であるといえる。

#### 4. 実験

シミュレーションでは量子化誤差の影響を評価したが、実際の計測では量子化誤差以外の誤差も加わるので、総合的な評価を行う目的で実験を行った。

計測実験に先立ってキャリブレーションを実施した。2.2 で述べた交差レーザスリット投射器  $W$  の走査制御値と投射角  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  の関係のキャリブレーションでは、床の上空 2100 mm に  $W$  を設置し、床面に 250 mm 間隔で描いた正方格子交点にスリット交点を照射して  $\psi_x$ ,  $\psi_y$  各スリットの走査制御値と走査角の対応テーブルを求めた。このテーブルは投射器の内部パラメータに相当するので、任意の位置姿勢に設置した投光器に対して適用できる。

円形センサ  $S$  の円周上に配置する受光素子には設計



位置からのずれが生じていることが考えられる。そこで、2.4で述べた方法で推定されたセンサ面に各受光素子へ向かうスリット交線ベクトルを再投影し、推定面上の各受光素子座標を求める。センサの様々な位置姿勢でこの計測を繰り返すと、面上の受光素子推定点の分布が得られるので、計測で得られた各受光素子の平均座標と理論座標の差を補正した。

図4のように、形状計測装置Dの筐体上面に直径200mmの円形センサSを取り付け、S座標系とD座標系間のキャリブレーションを図6の設定で実施した。 $O_W$ の床面からの高さ $h_W = 1150$ mmとし、Dを $O_d$ の床面からの高さ $h_d$ が600mm前後の10箇所へ移動し、それぞれの位置で交差スリット投射により床面に頂点を描いた30個の三角形を用いて2.3で述べた方法により座標変換行列 $M_{SD}$ を求めた。

実測実験は、図13のように機材を配置して実施した。床の上空2100mmに交差レーザスリット投射器Wを設置し、高さ約200mmの台上に置いた高さ約600mmの胸像の部分形状を複数の計測位置から計測し、同時に計測した位置姿勢データによって統合し、部分形状間の重複部分のずれを計測した。CS法では円形センサSの位置姿勢推定によって得た形状計測装置Dの位置姿勢に基づいて部分形状を配置した。

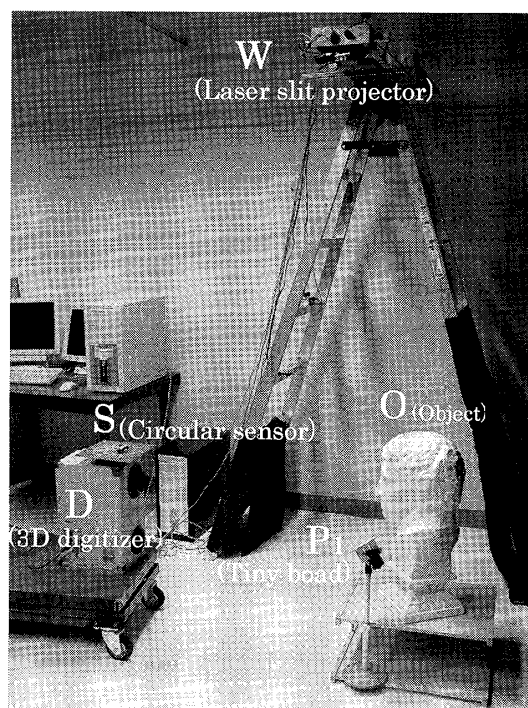


図13 実験における機器の配置

Fig. 13 Arrangement of the devices in the experiments.

VM法では、それぞれの計測点ごとに図1のように被計測空間の2箇所へ小型拡散反射平板を配置して交差スリットを投射し、Dで計測して得た $\Delta O_d p_1 p_2$ の三角形を平板への投射ベクトルとCS法で得た $V_d$ にP3P位置姿勢推定法で当てはめた。平板上の異なる位置10箇所ずつにスリット交点を投射し、10個の三角形のP3P推定で得たDの位置姿勢を平均化し、それに基づいて部分形状を配置した。

実際の計測においては形状や位置姿勢の真値の取得が困難であることから絶対誤差が得られないので、2箇所取得した同一部分をW座標に再配置したときに生じる重複部分のずれ量で評価した。ずれは同一部分の対応点間距離とすべきであるが、形状取得位置が異なると標本点の異なり対応点が特定できない場合が多いので、本実験ではW座標に再配置後の重複部分間に生じる空けきの最短距離（一方の形状の標本点から他方のポリゴン面までの最短距離）を評価指標とした。VM法やCS法はICPアルゴリズムのような重複領域は不要であり、実際の形状取得では部分形状の重複領域の小さい方が計測効率が良いが、実験ではできるだけ広範囲にずれ量を評価するために意図的に重複領域が大きくなるように設定した。

評価のために取得した部分形状①～④をそれぞれ図14(a)～(d)に示す。VM法で計測された位置姿勢で部分形状を結合した結果を図14(e)に示す。図14(f)～(i)に二つの部分形状の重複部分に生じた空けきの最短距離をグレースケールで示す。重複部分は図14(e)と同じ位置として示した。また、重複部分の空隙の最短距離の平均値をVM法とCS法の比較として表1に示す。VM法のずれが小さく、特に①②及び③④の重複部分のずれはCS法に比べて著しく小さい。この実験では、図1に示す $\Delta O_d p_1 p_2$ の各辺の長さは、 $L_{d1}$ 、 $L_{12}$ が920～990mm、 $L_{2d}$ が約350mmであった。

二つの部分形状の重複している部分を共通の面で切断し互いに結合したとき、切断面に生じる二つの表面形状間の空けきの大きさを図15～図18に示す。切断面は図14(e)の画像面にほぼ垂直に設定し、切断面と胸像表面の交線を図14(f)～(i)中に示した。グラフ上部に結合面における胸像の切断面形状の曲線を示す。図17、図18では、胸像の台座が床に接する面の中央を原点とし、図14(e)の上下方向をZ軸、左右方向をY軸、紙面に垂直な方向をX軸とした。a-a'、b-b'、c-c'、d-d'の記号は図14(f)～(i)と図15～図18の対応位置で示した。特に①②の結合（図15）及び

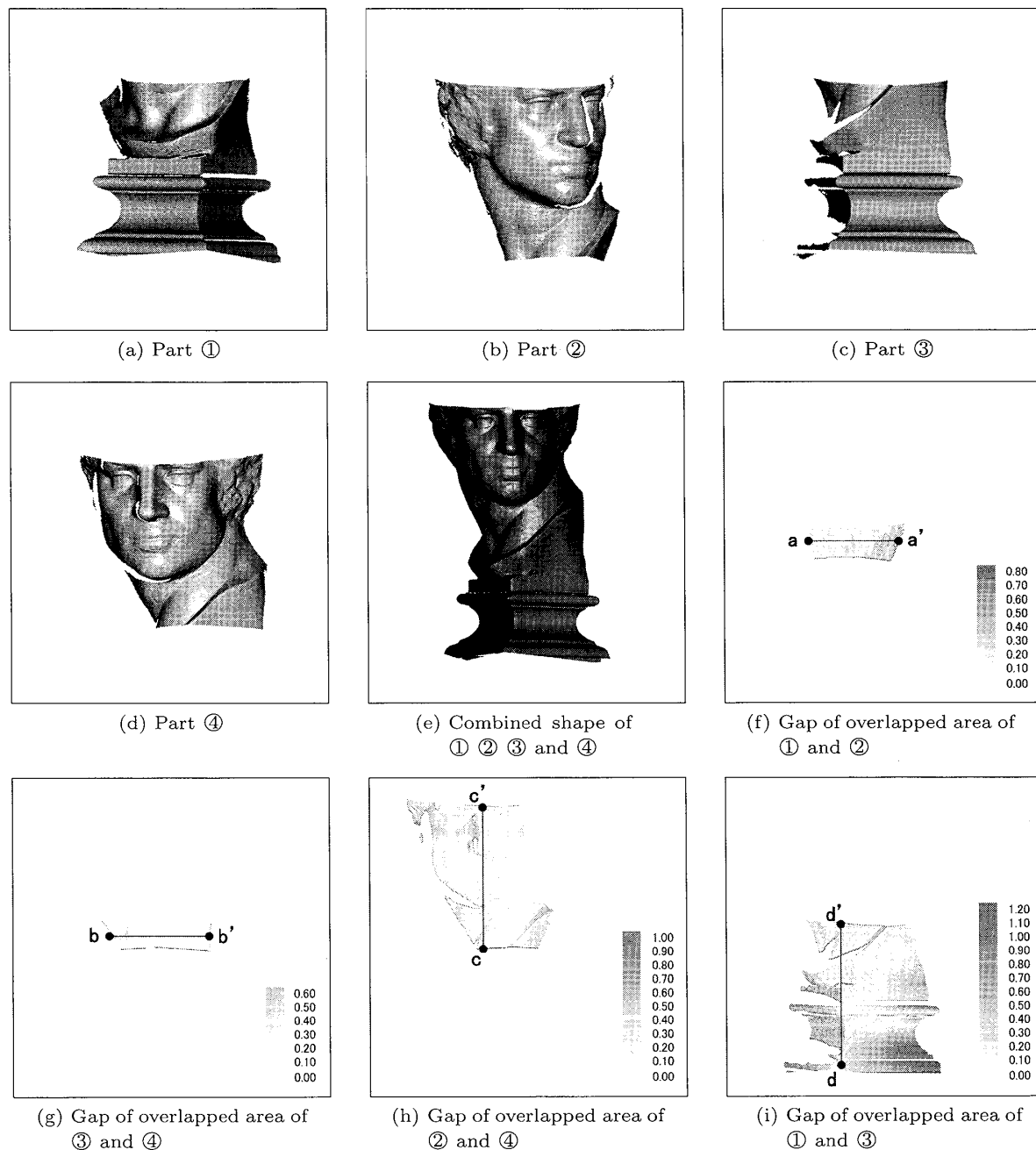


図 14 部分形状の重複部分の空げきの大きさ  
Fig. 14 Gap of overlapped area of partial shapes.

表 1 重複部分の gap の平均値  
Table 1 Mean width of gap of overlapped area.

	①②	③④	②④	①③
VM	0.08	0.06	0.28	0.12
CS	0.98	1.40	0.60	0.68

(mm)

③④ の結合 (図 16) の空げきは VM 法が CS 法に比べて著しく小さい。

VM 法は  $O_d$  と空間中の 2 点を結ぶ大きな三角形の

位置姿勢推定を基本としているので、P3P 位置姿勢推定誤差が小さく、CS 法より大幅に良好な結果が得られた。なお実際の結合においては、隣接部分形状間の重複部分を共通の切断面で切断して、切断面上で相互に結合する。切断面は部分形状に応じて平面の組合せや曲面などで任意に構成できる。結合面に生じた段差部分は平滑化手法を適用してポリゴンを生成する [19]。

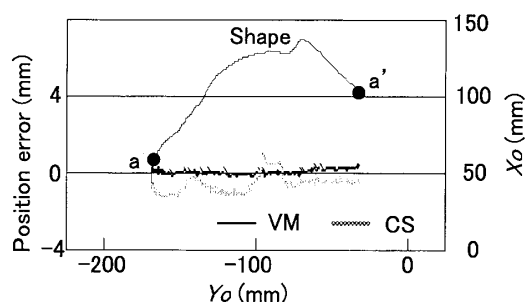


図 15 共通切断面  $aa'$  における ① と ② の表面形状間の空げきの大きさ

Fig. 15 Gap on the common cross section  $aa'$  of ① and ②.

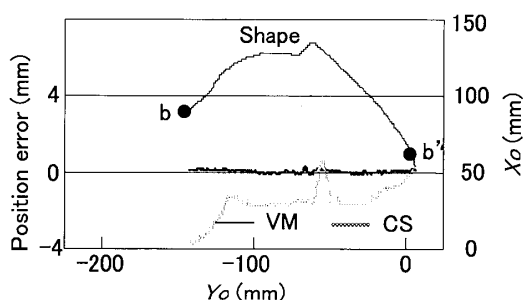


図 16 共通切断面  $bb'$  における ③ と ④ の表面形状間の空げきの大きさ

Fig. 16 Gap on the common cross section  $bb'$  of ③ and ④.

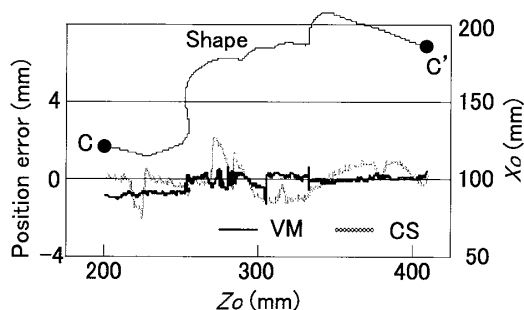


図 17 共通切断面  $cc'$  における ② と ④ の表面形状間の空げきの大きさ

Fig. 17 Gap on the common cross section  $cc'$  of ② and ④.

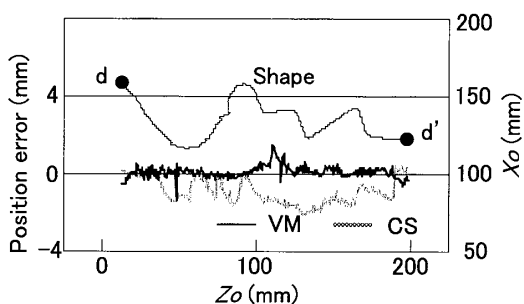


図 18 共通切断面  $dd'$  における ① と ③ の表面形状間の空げきの大きさ

Fig. 18 Gap on the common cross section  $dd'$  of ① and ③.

## 5. 考 察

### 5.1 装置の設置条件

各装置の設置条件について考察する．レーザスリット投射器  $W$  の走査制御値と  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  の関係がキャリブレーションにより求められていれば  $W$  を任意の位置姿勢に設定できる．そこで， $W$  のレーザスリット投射範囲が  $D$  の移動による  $S$  の移動範囲をカバーするように  $W$  を設置する．レーザスリット投射範囲はスリット面の放射角とミラーの走査角で制限されるが，ともに市販デバイスで  $120^\circ$  以上が確保できる．したがって，例えば図 1 のような配置でオブジェクト  $O$  の全周計測を行う場合は  $O$  の上空に  $Z_w$  を下向きに設置し， $O_w$  の高さによりカバー範囲を調節する． $O$  の計測したい部分が  $D$  の計測可能領域に入るように  $D$  の位置姿勢を調整する．円形センサ  $S$  について  $-V_s$  ベクトルと  $Z_s$  軸ベクトルがなす角が  $75^\circ$  以内であればレーザスリット面の走査角に対するセンサ受光電流のピーク値検出特性が良好に得られることが実測で確認できたので， $D$  及び  $S$  の設置姿勢の自由度は大きい．しかしこの範囲外の設定が必要になる場合は， $D$  に 2 面の円形センサを  $Z_s$  軸を互いに異なる向きになるように取り付けて設定範囲を拡大するなどの対策が必要になる．なお，図 8 (b) のように  $Z_s$  が  $O_w$  方向に向くと姿勢誤差が増大するので  $CS$  法ではその影響を受けるが，ベクトル  $V_d$  への影響がわずかであるため  $VM$  法では計測値への影響はほとんどない．

小型拡散反射平板  $P_1$ ,  $P_2$  は  $D$  の計測可能領域に自由に設置できるが， $P3P$  位置姿勢推定を高精度に行うために式 (3) の  $\omega_{d1}$ ,  $\omega_{12}$ ,  $\omega_{2d}$  ができるだけ大きくなるような位置を選ぶ．平板の姿勢に関しては，例えば図 1 の  $P_1$  では，計測される  $p_1$  の位置に対する  $V_1$  と  $v_1$  の誤差の影響を少なくするために， $P_1$  の法線ベクトルと  $-V_1$  及び  $-v_1$  のなす角ができるだけ小さくなるように  $P_1$  の位置姿勢を設定することが望ましい． $P_2$  についても同様である．

### 5.2 ICP アルゴリズムとの比較

現在，形状位置合せには ICP アルゴリズムなどのマッチング方式が用いられることが多い．マッチング方式では重複領域の大きさやそこに含まれる特徴によって結合精度が変化するので，本方式のような計測ベースの方式と結合精度について直接比較することは適切でないと考えられる．マッチング方式は相対誤差を最小化する方式であるため，多数の部分形状を結合

するときの誤差積算を軽減する多くの方法が提案されているが、形状全体にわたって絶対誤差が最小化されている保証は得られない。一方、計測ベースの方法は設定条件によって定まる一定の誤差範囲内で部分形状の配置ができるが、形状計測の他に位置姿勢計測のコストが増加する。VM 法は、高精度にキャリブレーションされた交差レーザスリット投射器 W と円形位置姿勢センサ S を用意すれば従来の計測ベースの方法より簡単で高精度に部分形状の位置姿勢を求めることができる。S による位置姿勢計測は自動化できるが、形状計測ごとに拡散反射平板を配置してレーザスリット交点画像を取得するコストが増加する。また、交差レーザスリット投射器 W と計測対象間の距離が大きくなるに従って誤差が増大する。結局、必要とする精度や計測コストを計測環境や対象ごとに評価して適否を判断することになる。計測ベースの方法で得られたデータをマッチング方式の初期値に利用すると、収束時間の短縮と結合精度の向上に有効である。そこで、多数の部分形状を結合する場合、マッチング方式の少数の部分形状を選んで位置姿勢計測し、同時位置合せに組み込むことにより処理コストの低減と結合結果の精度保証が可能になると考えられるので、今後このような方式の検証が必要と考えられる。

## 6. む す び

形状計測装置 D で取得した部分形状を高精度で結合して全体形状を再構成するために、D 自身の位置姿勢を高精度で計測する VM 法を提案した。被計測空間中の 2 点にスリット交点を投射し、それらと D 内の基準点  $O_d$  で構成する三角形を W からそれら 3 点に向かう交差スリット投射ベクトルに対する P3P 位置姿勢推定法により D の位置姿勢を求める。P3P 位置姿勢推定法は形状既知の三角形でなければ解が得られないが、D 自身の形状計測機能を用いてスリット交点の D 座標値を取得することにより、スリット交点を任意の位置に投射しても既知形状三角形を構成できることが本方式の特徴である。

$O_d$  が D 内部にあり W から  $O_d$  へ向かう投射ベクトル  $V_d$  の直接計測が困難であることから、D の筐体に円形センサ S を設置して S の位置姿勢を計測する CS 法により  $V_d$  を高精度に求めた。CS 法も単独で固定三角形 P3P 位置姿勢推定法より高精度の位置姿勢推定ができるが、CS 法で計測した  $V_d$  を用いて VM 法を適用した場合には CS 法より大幅に誤差が低下す

ることが証明された。特に  $O_w-O_s$  間距離が大きい場合に VM 法の優位性が示された。これは、広範囲に多数の部分形状を取得してそれらを結合する場合に VM 法の効果が現れることを示している。異なる位置で取得した部分形状の結合面のずれを求める実験でも VM 法の優位性が明らかになった。

VM 法が CS 法より優位である理由は、CS 法より大きな形状の仮想マークが利用できること、P3P 位置姿勢推定における一つの投射ベクトル  $V_d$  が高精度に求まること、仮想マークの被計測領域内の 2 点の位置が任意なので計測誤差の少ない条件に設定しやすいこと、その 2 点の組を多数投射することにより多数の仮想マークの P3P 位置姿勢推定が可能であり計測時に発生する計測誤差が低減できることなどである。

VM 法は計測対象空間全体にわたって D の位置  $V_d$  によってガイドする方式であるため、部分形状ごとに誤差が独立で誤差の積算がないので多くの部分形状の結合に適する。

今後は、更に広い空間に適用した場合の精度の改善、マッチング方式と組み合わせた同時位置合せなどに取り組みたい。

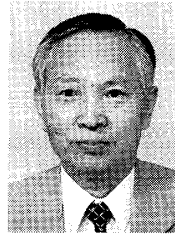
謝辞 本研究にあたって、長岡工業高等専門学校準教授高橋章氏並びに筑波技術大学助教若月大輔氏に多くの助言を頂いた。記して感謝の意を表す。

## 文 献

- [1] P.J. Besl and N.D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.14, no.2, pp.239-256, Feb. 1992.
- [2] 清水郁子, 出口光一郎, "計測誤差を考慮した距離画像からの精密な姿勢推定," 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.12, pp.2298-2306, Dec. 1999.
- [3] G. Blais and M.D. Levine, "Registering multiview range data to create 3D computer objects," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.17, no.8, pp.820-824, Aug. 1995.
- [4] F. Bernardini and I.M. Martin, "High-quality texture reconstruction from multiple scans," IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., vol.7, no.4, pp.318-332, Oct.-Dec. 2001.
- [5] 佐川立昌, 西野 恒, 池内克史, "光学的情報付き距離画像のロバストな適応的統合," 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.12, pp.1781-1790, Dec. 2002.
- [6] 梅田和昇, ギー ゴダン, マーク リュウ, "こう配拘束と距離濃淡画像を用いた距離画像とカラー画像のレジストレーション," 信学論 (D-II), vol.J88-D-II, no.8, pp.1469-1479, Aug. 2005.
- [7] 西野 恒, 池内克史, "大規模距離画像群の頑健な同時位置合せ," 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.9, pp.1413-1424, Sept. 2002.

- [8] 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤史, 倉爪 亮, 池内克史, “分散メモリシステムにおける大規模距離画像の並列同時位置あわせ手法,” 情処学論, vol.46, no.9, pp.2369–2378, Sept. 2005.
- [9] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk, “The digital michelangelo project: 3D scanning of large statues,” Proc. SIGGRAPH 2000, pp.131–144, July 2000.
- [10] 諸岡健一, 查 紅彬, 長谷川勉, “複数の距離画像の統合による 3 次元物体モデル生成のための視点計画,” 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.3, pp.371–381, March 1999.
- [11] S. Rusinkiewica and M. Levoy, “Qsplat: A multi-resolution point rendering system for large meshes,” Proc. SIGGRAPH 2000, pp.303–321, July 2000.
- [12] 若月大輔, 石井郁夫, 高橋 章, 今井博英, 牧野秀夫, “詳細構造を持つ VR オブジェクトに対する観察者の形状認識特性を考慮した高現実感描画法,” 信学論 (A), vol.J86-A, no.7, pp.780–791, July 2003.
- [13] 高橋 章, 石井郁夫, 牧野秀夫, 中静 真, “人工現実感インタフェースのための単眼画像からのマーカの位置と姿勢の計測,” 信学論 (A), vol.J79-A, no.3, pp.804–812, March 1996.
- [14] H. Kato and M. Billinghurst, “Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system,” Proc. International Workshop on Augmented Reality 1999, pp.85–94, Oct. 1999.
- [15] 加藤博一, M. Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎, “マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.4, no.4, pp.607–616, Dec. 1999.
- [16] 出口光一郎, 画像と空間, pp.128–142, 昭晃堂, 1991.
- [17] Y. Kanazawa and K. Kanatani, “Optimal conic fitting and reliability evaluation,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E79-D, no.9, pp.1323–1328, Sept. 1996.
- [18] 三島 等, 太田直哉, 金谷健一, “信頼性評価を備えた最適なコニック当てはめプログラム,” 情処学研報, 98-CVIM-1114, vol.1998, no.46, pp.25–32, May 1998.
- [19] H. Suzuki, S. Takeuchi, T. Kanai, and F. Kimura, “Subdivision surface fitting to a range of points,” Proc. IEEE Pacific Graphics 1999, pp.158–167, Oct. 1999.

(平成 19 年 5 月 17 日受付, 8 月 16 日再受付)



石井 郁夫 (正員)

1963 新潟大・工・電気卒。新潟大助手, 講師, 助教授を経て 1989 教授。2005 定年退職。新潟大学名誉教授。2006 埼玉医科大・保健医療学部・教授, 現在に至る。この間, 人工現実感, コンピュータビジョン, 画像処理などの研究に従事。日本 VR 学会

会員, 工博。



牧野 秀夫 (正員)

1976 新潟大・工・電子卒。1978 同大学院修士課程了。同年情報工学科勤務。1990 助教授。1995 教授, 現在に至る。この間, 1983 より 1 年間, 北大・応電研・生体制御部門において信号処理の研究に従事, 1989 より 1 年間, カナダ・トロント大学医学部において生体信号処理の研究に従事。福祉・医療情報機器の研究を行っている。工博。日本生体医工学会, 電気学会, IEEE 各会員, 日本不整脈学会評議員, 地理情報システム学会理事。



董 嘉挺 (正員)

1997 中国哈爾濱理工大・工業経済卒。2001 新潟大大学院自然科学研究科博士前期課程了。現在, 新潟大大学院自然科学研究科博士後期課程在学中。主としてコンピュータビジョンに関する研究に従事。