

プロジェクタ・カメラを用いた 3 次元計測システムにおける 複数形状計測時の誤差最小化による精度向上手法

榎本 和史[†] 川崎 洋[†] 古川 亮^{††}

[†] 埼玉大学工学部情報システム工学科 〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
^{††} 広島市立大学情報科学部情報メディア工学科 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東三丁目 4 番 1 号
E-mail: [†]{enomoto,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本論文では、ビデオカメラとプロジェクタを用いた 3 次元計測システムにおいて、複数形状を計測し、それらの位置合わせ後に残る形状間の「ずれ」を最小化することで、計測精度を向上させる手法を提案する。プロジェクタ・カメラによる 3 次元計測では、最初に校正を行い、その後、その校正パラメータを用いて、計測を行う。校正の際、ノイズやレンズの歪み、量子化誤差などの影響により、校正パラメータに誤差が発生すると、復元される形状が歪むことになる。一般に、完全に誤差無く校正を行うことは困難であり、同じ物体を複数方向から計測し、精密に位置合わせしても、各形状間には位置合わせ誤差が残る。そこで本論文では、この位置合わせ誤差及びエピポーラ拘束による誤差を最小化するようにプロジェクタ・カメラ間の外部パラメータを再推定する。これにより、3 次元計測の精度を向上させ、正確な形状統合のための剛体変換パラメータの推定を行う。

キーワード 3 次元計測, 複数同時位置合わせ, アクティブステレオ法, プロジェクタ・カメラ, 校正

A method of accuracy improvement of shapes measured by projector-camera 3D acquisition system by minimizing errors between multiple scans

Kazufumi ENOMOTO[†], Hiroshi KAWASAKI[†], and Ryo FURUKAWA^{††}

[†] Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Saitama University,
Shimo-Okubo 255, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

^{††} Department of Computer Science, Hiroshima City University, Ozuka-higashi 3-4-1, Asaminami-ku,
Hiroshima, 731-3194 Japan

E-mail: [†]{enomoto,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract In this paper, we propose a new method to improve precisions of multiple 3D shapes acquired by a projector-camera active stereo system. The improvement of precision of the shapes is achieved by minimizing "gaps" between overlapping shapes that remains after registration algorithms are performed. To use projector-camera system for 3D acquisition, we must calibrate the system in advance. Then, we can measure 3D shapes using the calibrated parameters. Noise, lens distortions, or quantization errors can cause calibration errors, which often causes distortions of the reconstructed shapes. In general, error-free calibration is very difficult. So, even if we capture multiple shape data from an object and register all the shapes, there still remains errors between the shapes. In this paper, we re-estimate the extrinsic parameters between the camera and the projector by minimizing the registration errors at the overlapping area of multiple shapes and the errors of epipolar constraints. The process improves the accuracies of the 3D measurement and corrects the rigid transformation parameters of the registrations of the shapes.

Key words 3D shape acquisition, Simultaneous registration, Active stereo method, Projector-camera system, calibration

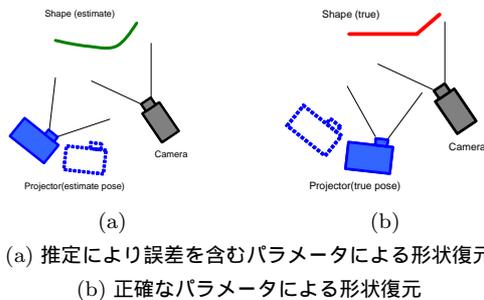


図 1 プロジェクタ・カメラのパラメータによる形状復元



図 2 形状誤差による位置合わせのずれ

1. はじめに

近年、さまざまな 3 次元計測システムが提案・実用化されている。特に、プロジェクタを用いたパタン投影によるアクティブ方式の計測システムは、効率よく 3 次元計測を行えるため、利便性が高く広く利用されている。この方式では、ステレオに基づき 3 次元計測を行うため、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータの校正が必須である。これには事前に校正を行っておく方法や、計測データから自己校正により推定を行う方法などがある。しかし、ノイズや量子化誤差などにより、厳密に校正を行うことは一般に難しく、求めたパラメータには誤差が含まれる。

また、ステレオで獲得できる 3 次元形状は、プロジェクタ・カメラから見える視点方向のみであり、物体の全周を一度に計測することは出来ない。そのため、全周形状を獲得するためには、対象物を複数回計測し、それらの形状を統合する必要がある。ところが、プロジェクタ・カメラ間に外部パラメータの誤差がある場合、復元された形状が歪んでしまい(図 1)、どんなに位置合わせをしても、それらを正確に合わせることは出来ない、という状況が生じる(図 2)。このため、複数の計測結果の間の「ずれ」が無い全周形状を生成するためには、位置合わせの剛体変換パラメータに加えて、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータも同時に再推定する必要がある。

そこで、本論文では、計測結果の間の誤差を最小化するように、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータを再推定することで、3 次元形状の精度向上、および複数形状の正確な統合を実現する手法を提案する。

2. 関連研究

3 次元形状計測として、これまでに様々な手法が提案されている。

中でも、計測時間が短い、特殊な機器を必要としないという利点から、パターン光を投影する空間コード化法によるシステ

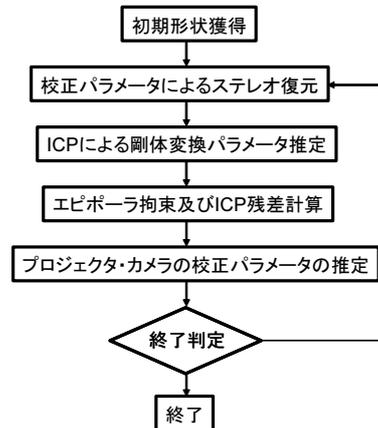


図 3 処理の流れ

ムが広く利用されている [1], [2]。この手法は、コード化されたパターンをプロジェクタにより計測対象物体に投影することで計測が行われる。しかし、この方式ではプロジェクタ・カメラ系の校正が必要であり、その精度が直接 3 次元形状の復元精度に影響を与える。

また、一度の計測では計測対象の全周を全てカバーできないため、計測機器を動かしながら複数回計測し、取得した形状を統合することがよく行われている。形状の統合のために、複数の形状を位置合わせするアルゴリズムとして、ICP(Iterative Closest Point) が良く知られている。ICP アルゴリズムは、2 つの形状データがだまかに位置合わせされていることを初期状態とし、形状データの各点間の対応付けと、その対応付けに基づく変換の推定を反復計算することで距離を最小化することにより位置合わせを行う [3]。対応点取得方法を、point-to-point から point-to-plane で行う手法も提案されている [4], [5]。また、2 つの形状からではなく、複数の形状を同時に位置合わせする手法も提案されている [6]。複数の形状を同時に位置合わせする場合、2 形状間を順に位置合わせする手法に比べ、蓄積誤差が発生しないというメリットがある。

3. 提案手法

本手法の概要を図 3 に示す。まず初期形状として、通常のアクティブステレオスキャン方式により 3 次元形状復元を行うことで複数の形状を獲得し、それらの形状に対して複数同時位置合わせ処理を行う。その後、位置合わせの結果から、各形状の重なり合う領域について、サンプリングされた頂点の距離誤差を算出し、その距離誤差の自乗和を最小化するように、プロジェクタ・カメラ間の校正パラメータの推定を行う。

3.1 システム概要及び初期形状の獲得

本論文では 3 次元計測システムとして、プロジェクタとカメラ各 1 台ずつで構成されるアクティブステレオ方式の計測システムを用いる(図 4)。プロジェクタ・カメラ間の校正パラメータは校正儀(キャリブレーションボックス)を用いるなどして、事前に求めておく。計測時には、対象物体にプロジェクタとカメラを向け、対象物体に複数のパターンを投影しながら、撮影を行う。通常の空間コード化法においては、縦パターンのみを投影し、エピポーラ拘束によって対応点を探索するが、本手法

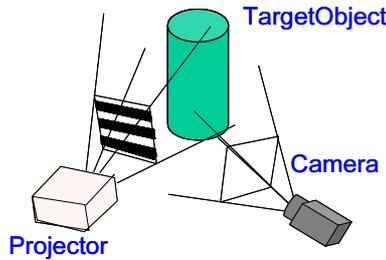


図4 プロジェクタ・カメラによる3次元計測システム

においては、エピポーラ拘束によってプロジェクタ・カメラ間の外部パラメータを求める時に点対応が必要となるため、1対1の対応点を求める必要がある。そこで縦パターンに加え横パターンを投影し、このパターンをデコードし、対応点を求めることで、3次元形状の復元が行われる。これを対象物体を動かしながら、複数回繰り返すことで、お互いに重なり合うような複数の形状を獲得する。

3.2 推定するパラメータ

推定するパラメータは、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータと、各視点ごとの形状を位置合わせするための剛体変換パラメータである。カメラ及びプロジェクタの内部パラメータは既知であるとする。これは内部パラメータの精密な校正はさほど困難でないのに対して、外部校正は、カメラとプロジェクタの位置関係の自由度の高さから、原理的にも容易ではないためである。また、各視点ごとの形状は、あらかじめある程度位置合わせされていることを前提とする。

3.3 エピポーラ拘束に基づく残差

提案手法では、同時位置合わせする際の形状間のずれ（誤差）を最小化すると同時に、形状の再構成に用いられるアクティブステレオ法についてのエピポーラ拘束に関する誤差も最小化することでパラメータを推定する。本節では、エピポーラ拘束に関する誤差の計算方法について述べる。

カメラおよびプロジェクタについて、光軸に平行で後ろ方向にz軸を、画像面横方向にx軸を、画像面縦方向にy軸をとり、プロジェクタ座標系、カメラ座標系とする。

プロジェクタ座標による、 i 番目の対応点の方向ベクトルを $(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T$ とする。また、プロジェクタ座標からカメラ座標への剛体変換を、回転行列 \mathbf{R}_p と平行移動ベクトル \mathbf{t}_p であらわす。平行移動ベクトルのノルム $\|\mathbf{t}_p\|$ 不定性を避けるため、常に1に正規化されているものとする。 i 番目の対応点をカメラから観測したときの座標を、レンズの歪曲による影響を補正した後正規化カメラ座標に変換し、 $(u_{ci}, v_{ci}, -1)^T$ で表す。

プロジェクタの外部パラメータをまとめて、 $\theta := (\mathbf{R}_p, \mathbf{t}_p)$ と表記する。このとき、カメラ画像面上における、参照点 $(u_{ci}, v_{ci}, -1)^T$ と、プロジェクタにおける対応点 $(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T$ のエピポーラ線との符号付距離を、外部パラメータを引数とした関数 $E_{ci}(\theta)$ として表すと、

$$E_{ci}(\theta) = \frac{(u_{ci}, v_{ci}, -1)^T \cdot [\mathbf{t}_p \times \{\mathbf{R}_p(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T\}]}{\|(0, 0, 1)^T \times [\mathbf{t}_p \times \{\mathbf{R}_p(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T\}]\|} \quad (1)$$

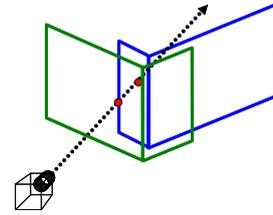


図5 対応点探索

となることが知られている。同様に、プロジェクタ画像面上での、参照点 $(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T$ と、カメラにおける対応点 $(u_{ci}, v_{ci}, -1)^T$ のエピポーラ線との符号付距離 $E_{pi}(\theta)$ は、

$$E_{pi}(\theta) = \frac{(u_{ci}, v_{ci}, -1)^T \cdot [\mathbf{t}_p \times \{\mathbf{R}_p(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T\}]}{\|(u_{pi}, v_{pi}, -1)^T \times [\mathbf{t}_p \times \{\mathbf{R}_p(0, 0, 1)^T\}]\|} \quad (2)$$

従って、外部パラメータ θ についてのエピポーラ拘束に関する誤差は、 K 点をサンプリングして用いるとして、以下のように記述できる。

$$\sum_{i=1}^K E_{ci}(\theta)^2 + \sum_{i=1}^K E_{pi}(\theta)^2 \quad (3)$$

3.4 複数形状同時位置合わせにおける誤差

本節では複数形状同時位置合わせ手法及びその誤差について説明する。位置合わせ手法はICPアルゴリズムをベースとしており、複数形状を入力とし、一度に全ての形状の位置推定を行う。また、各形状はある程度位置合わせされているという前提のもとで処理を行う。処理の手順を次に示す。

(1) 複数の形状をおおまかに位置合わせする。

(2) 形状が互いに重なり合う領域について、形状同士の対応点探索を行う。

(3) 得られた対応点から誤差を計算し、誤差を最小化する剛体変換パラメータを算出する

(4) 誤差の総和が変化しない、もしくは一定値以下になるまで(2),(3)を繰り返す

3.4.1 対応点探索

複数形状のうちから対応点を探索する側の形状を1つ選択し、それをモデル形状とし、探索される側の形状をシーン形状とする。ICPアルゴリズムでは対応点探索はpoint-to-pointで行われるが、本手法ではpoint-to-planeで行う。これは、

- シーン形状の点が疎な場合でも大きな誤差が発生しにくい

- GPUによる処理の高速化が容易であるなどのメリットが存在するためである。

点と面の対応点は、まず、モデル形状の頂点からカメラ視線方向へ直線を伸ばし、その直線とシーン形状の面との交点として求める(図5)。このとき、視線方向に対して、面が裏側を向いている場合や対応点間の距離が大きい場合は除外する。

3.4.2 剛体変換パラメータによる誤差最小化

モデル形状の頂点を \mathbf{u} 、対応するシーン形状の面上の点を \mathbf{v} とし、 \mathbf{l} をモデル形状の座標系での単位視線方向ベクトルとす

ると、

$$\epsilon^2 = \min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}} \sum_{i \neq j, k} (\mathbf{R}_M \mathbf{l}_{ik}) \cdot \{(\mathbf{R}_S \mathbf{v}_{ijk} + \mathbf{t}_S) - (\mathbf{R}_M \mathbf{u}_{ik} + \mathbf{t}_M)\}^2 \quad (4)$$

これを全ての形状間の組み合わせの全頂点 (i, j) に対して計算し、二乗誤差 ϵ^2 が最小となるような剛体変換パラメータを求める。ここで、 \mathbf{R} は形状の回転、 \mathbf{t} は平行移動を表す。 M, S はそれぞれモデル形状、シーン形状であり、 $\mathbf{R}_M, \mathbf{t}_M$ がモデル形状の剛体変換、 $\mathbf{R}_S, \mathbf{t}_S$ がシーン形状の剛体変換である。

式 (4) は非線形最小化を行う計算である。そのため計算を簡単化するために式を線形化する。求める回転角度を微小であると仮定すると、回転行列 \mathbf{R} は、

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 1 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

と表せる。また、平行移動 \mathbf{t} を、

$$\mathbf{t} = (t_x t_y t_z)^T \quad (6)$$

としたとき、線形化した式は以下のように表せる。

$$\epsilon^2 = \min_{\delta} \sum_{i \neq j, k} \|\mathbf{A}_{ijk} \delta - \mathbf{s}_{ijk}\|^2 \quad (7)$$

$$\mathbf{s}_{ijk} = \mathbf{n}_{ijk} \cdot (\mathbf{u}_{ik} - \mathbf{v}_{ijk}) \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_{ijk} = \begin{pmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{6 \times 1} \underbrace{\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-i-1) \times 1} \\ \underbrace{0 \dots 0}_{6 \times 1} \underbrace{-\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-j-1) \times 1} \end{pmatrix} + \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_{ijk} = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_{ik} \times \mathbf{v}_{ijk} \\ -\mathbf{n}_{ik} \end{pmatrix}^T \quad (10)$$

$$\delta = (\mathbf{m}_0 \dots \mathbf{m}_{n-1})^T \quad (11)$$

$$\mathbf{m}_i = (c_{1i} c_{2i} c_{3i} t_{xi} t_{yi} t_{zi})^T \quad (12)$$

ここで、形状の総数は n であり、添え字 k は頂点のインデックスを表す。この線形化した式 (7) から最小自乗法により δ を最小化することで、複数形状の剛体変換パラメータを推定することができ、形状間の誤差が最小化される。

3.4.3 位置合わせ後の誤差

位置合わせ処理によって、全ての形状 M_n に対する剛体変換パラメータ $\mathbf{R}_{M_n}, \mathbf{t}_{M_n}$ が求められた。このパラメータを用いて、位置合わせ後に残る各形状間の誤差を表す。

まず、形状 M_n に含まれる全ての頂点に対し、3.4.1 節と同様の処理で対応点探索を行い、全点の対応点を獲得する。対応点がない点を除き、対応点があるものはその 2 点間の距離

$$dist := (\mathbf{R}_M \mathbf{l}) \cdot \{(\mathbf{R}_S \mathbf{u} + \mathbf{t}_S) - (\mathbf{R}_M \mathbf{v} + \mathbf{t}_M)\} \quad (13)$$

を距離誤差とする。これを全ての点に対して計算することで、

各頂点ごとに距離誤差が算出される。また、このとき用いる点 $\mathbf{u} \in S, \mathbf{v} \in M$ は、パラメータ θ によって再構成されるため、 θ の関数である。 L 点をサンプリングして用いるとき、最小化すべき誤差は θ を変数として以下のように記述される。

$$\sum_{l=0}^L F_l(\theta)^2 \quad (14)$$

$$F_l(\theta) = (\mathbf{R}_M \mathbf{l}_l) \cdot \{(\mathbf{R}_S \mathbf{u}_l(\theta) + \mathbf{t}_S) - (\mathbf{R}_M \mathbf{v}_l(\theta) + \mathbf{t}_M)\} \quad (15)$$

3.5 残差最小化によるプロジェクタ・カメラ外部パラメータ推定

式 (3) で求めたエビポーラ拘束に関する誤差及び式 (14) で計算される複数形状同時位置合わせに関する誤差を、ガウス・ニュートン法による非線形最適化により最小化するようにパラメータ推定を行う。最小化する関数は以下のように記述できる。

$$f(\theta) := \sum_{i=1}^K E_{ci}(\theta)^2 + \sum_{i=1}^K E_{pi}(\theta)^2 + \sum_{l=1}^L F_l(\theta)^2 \quad (16)$$

関数 $f(\theta)$ の最小化を、次のように行う。まず、 j 回目の繰り返し処理における解を θ_j とする。このとき、連立線型方程式

$$\frac{\partial E_{ci}}{\partial \alpha_p} \Delta \alpha + \frac{\partial E_{ci}}{\partial \beta_p} \Delta \beta + \frac{\partial E_{ci}}{\partial \gamma_p} \Delta \gamma + \frac{\partial E_{ci}}{\partial \rho_p} \Delta \rho + \frac{\partial E_{ci}}{\partial \phi_p} \Delta \phi = -E_{ci}(\theta_j)$$

$$\frac{\partial E_{pi}}{\partial \alpha_p} \Delta \alpha + \frac{\partial E_{pi}}{\partial \beta_p} \Delta \beta + \frac{\partial E_{pi}}{\partial \gamma_p} \Delta \gamma + \frac{\partial E_{pi}}{\partial \rho_p} \Delta \rho + \frac{\partial E_{pi}}{\partial \phi_p} \Delta \phi = -E_{pi}(\theta_j)$$

$$\frac{\partial F_l}{\partial \alpha_p} \Delta \alpha + \frac{\partial F_l}{\partial \beta_p} \Delta \beta + \frac{\partial F_l}{\partial \gamma_p} \Delta \gamma + \frac{\partial F_l}{\partial \rho_p} \Delta \rho + \frac{\partial F_l}{\partial \phi_p} \Delta \phi = -F_l(\theta_j)$$

$$i = 1, 2, \dots, K, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (17)$$

の解 $\Delta \alpha, \dots, \Delta f$ により、 θ_j の値を改良していく。ただし、偏微分 $\frac{\partial E_{ci}}{\partial \alpha_p}, \dots, \frac{\partial E_{ci}}{\partial \phi_p}$ は、 $\theta = \theta_j$ における値を差分近似によって計算する。同様に、3 次元点 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ が θ_j に依存することから、 θ_j の各成分に微小な変化を加えて $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ を計算し、これによる $F_l(\theta)$ の変化を計算することで、偏微分 $\frac{\partial F_l}{\partial \alpha_p}, \dots, \frac{\partial F_l}{\partial \phi_p}$ の近似値を求める。

$N > 6$ (つまり、変数の数が制約式より多い) より、この方程式には一般に解が無いが、一般化逆行列を利用すると等式の両辺の誤差の二乗和を最小化する $\Delta \alpha, \dots, \Delta \phi$ を求めることができる。この値を用いて、推定値を以下の式にしたがって繰り返し更新することで、評価関数の最小化を行うことができる。

$$\theta_{j+1} = \theta_j + (\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma, \Delta \rho, \Delta \phi) \quad (18)$$

この計算による推定値の更新は、ガウス・ニュートン法による式 (16) の最小化と等価である。これにより、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータと、各形状剛体変換パラメータを推定することができる。

4. 実験

一般に 3 次元計測は、小型の物体を外側から計測する場合 (以下では OUT-IN と記述) と、逆に内側から広い空間を計測

表 1 プロジェクタ・カメラ外部パラメータ推定結果

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ
従来手法	-0.7587	-0.04242	0.6559	-3.886	-32.85	-10.73
提案手法	-0.7531	-0.04419	0.6564	-3.776	-32.80	-10.74

表 2 処理後の誤差

	誤差総和	一点あたりの平均誤差
従来手法	1.094×10^{-3}	5.748×10^{-8}
提案手法	2.859×10^{-4}	6.780×10^{-9}

表 3 誤差の比較

	誤差総和	一点あたりの平均誤差
誤差の減少割合	$9.9963 \times 10^{-2}\%$	$5.07 \times 10^{-6}\%$

する場合 (以下では IN-OUT と記述) とに分けられる。ステレオシステムにおける外部校正においては、対象物と同じくらい大きさの校正器具を用いると精度の面で安定するため、対象物が比較的小さい OUT-IN においては、校正器具を容易に準備でき高い精度での計測が実現できる。一方、IN-OUT においては、計測対象が巨大なことが多く、校正器具の準備が難しく、その結果、精密な外部校正および 3 次元計測が出来ないことも多い。以下では、それぞれのケースについて実験・評価を行った。

4.1 OUT-IN データによる実験

図 6 の物体を用いて実験を行った。6 方向から計測して、複数同時位置合わせにより全周形状を得たものが、図 7 である。この計測データを用いて実験を行った。プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータの変化を表 1 に示す。従来手法と表されているのは、外部校正による推定結果である。図 8 に、実際の形状を示す (2 形状を選択して表示)。複数の形状の重なり部分における誤差を確認しやすいように、図 9 に、位置合わせ後の誤差を可視化して示した。黒い程誤差が大きく、白に近づくにつれ誤差が小さいものとなっている。特に誤差が大きいものは、赤色で示している。これらの図より、本手法により、形状間の誤差が減少しずれが小さくなっていることが分かる。外部校正および本手法による誤差を表 2,3 にまとめた。ここでパラメータ $t(t_x, t_y, t_z)$ はノルムが 1 に正規化されている。数値的にも、誤差の総和及び一点あたりの平均誤差が減少していることが確認できる。

ただし、本実験の OUT-IN データの場合、初期プロジェクタ・カメラ外部パラメータの校正を、対象物 (15cm 程度の置き物) と同程度の大きさの立方体状の校正儀 (20cm x 20cm x 20cm) を用いて行ったため、最初の外部パラメータおよび獲得形状の精度が高く、提案手法による精度向上余地は限られていた。これ以上の高精度化には、量子化誤差や内部パラメータなどその他の要因も勘案する必要があると思われる。

4.2 IN-OUT データによる実験

次に図 10 に示される部屋の一角を計測し、実験を行った。3 次元形状計測し、位置合わせした結果の形状を図 11 に示す。この計測データを用いて実験を行った。

プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータの変化を表 4 に示す。従来手法と表されているのは、外部校正による推定結果で



図 6 計測物体

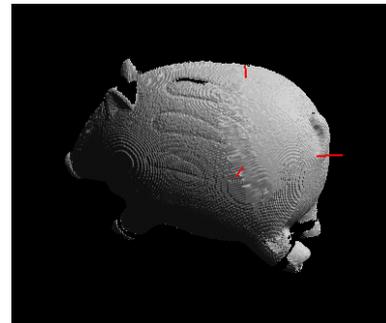
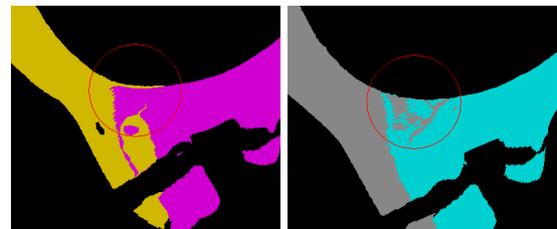


図 7 獲得形状



(a) 従来手法におけるずれ (b) 提案手法におけるずれ

図 8 精度向上結果



(a) 位置合わせ誤差 (従来手法) (b) 位置合わせ誤差 (提案手法)

図 9 位置合わせ誤差

ある。また、図 12 に、実際の形状の変化を、図 13 に、位置合わせ後の誤差を示す。黒い程誤差が大きく、白に近づくにつれ誤差が小さいものとなっている。特に誤差が大きいものは、赤色で示している。これらの図より、本手法により、形状間の誤差が減少し、ずれが小さくなっていることが確認できる。しかしながら、計測形状の縁の部分に収束後にも歪みが残りに、形状がぴったりとは一致していないことが観察される。これは、今回実験にあたりレンズ歪みモデルとして 1 パラメータモデルを利用したため、カメラとプロジェクタそれぞれの周辺部分にあたる付近にレンズ歪による誤差が残ったためと考えられる。

また、外部校正および本手法による誤差を表 5,6 にまとめた。誤差の総和及び一点あたりの平均誤差が減少していることが数値的にも確認できる。

表 4 プロジェクタ・カメラ外部パラメータ推定結果

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ
従来手法	0.9433	-0.08740	0.3201	-7.349	6.144	-1.009
提案手法	0.9716	-0.06875	0.2263	-5.358	6.227	0.6067

表 5 処理後の誤差

	誤差総和	一点あたりの平均誤差
従来手法	74.91	1.133×10^{-2}
提案手法	72.35	1.085×10^{-3}

表 6 誤差の比較

	誤差総和	一点あたりの平均誤差
誤差の減少割合	$2.562 \times 10^2\%$	$4.819 \times 10^{-3}\%$



図 10 計測物体

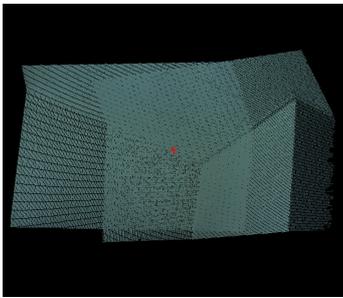


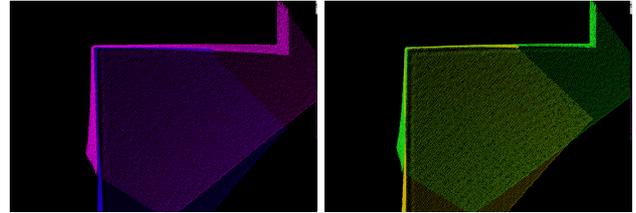
図 11 獲得形状

この IN-OUT データの外部校正に用いた画像例を図 14 に示す。校正儀 (20cm x 20cm x 20cm) と対象物 (2~3m 程度) との間に大きさに差があるため、カメラとプロジェクタそれぞれから見える位置に焦点を合わせて置くと図のように、ボックスが画角に対して小さく撮影されてしまう。このため、初期のプロジェクタ・カメラ外部パラメータ精度が低くなってしまふ。このような状況では提案手法がうまく働き、精度向上の効果が大きくなる。

前節及び本節の実験では、外部パラメータの真の値が不明であったため、外部パラメータの推定結果 (表 1, 表 4) の評価を行うことが出来なかった。現在、数値シミュレーションによって入力データを合成し、そのデータに提案手法を適用することによって、外部パラメータの補正効果を確認する実験を準備中である。

5. まとめ

本論文では、複数回計測した複数形状間の位置合わせ誤差を最小化することで、プロジェクタ・カメラの外部パラメータ校正の精度を向上させることができ、その結果、形状の統合をより正確に行うことが可能となった。これにより、物体の全周形状を歪みなく統合することが出来るようになった。提案手法は、



(a) 従来手法における誤差 (b) 提案手法における誤差

図 12 精度向上結果



(a) 位置合わせ誤差 (初期) (b) 位置合わせ誤差 (収束時)

図 13 位置合わせ誤差

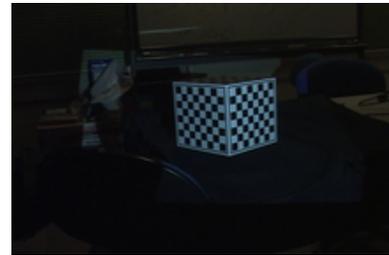


図 14 今回の実験で外部校正に用いた画像例

特に計測物と校正器具の大きさに差があり、精度良く校正が出来ない場合などに有効である。今後は、処理の高速化や量子化誤差の検討、ノイズによる影響を小さくすることなどを行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、平成 19 年度 SCOPE (戦略的情報通信研究開発推進制度) における「パーベイシブ 3 D Web コンテンツ実現のための研究開発」による。

文献

- [1] S.Inokuchi, K.Sato and F.Matsuda: "Range imaging system for 3-d object recognition", ICPR, pp. 806-808 (1984).
- [2] R. Furukawa and H. Kawasaki: "Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning", Proceedings of IEEE International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 302-309 (2005).
- [3] P. Besl and N. Mckay: "A method for registration of 3-d shapes", Vol. 14, pp. 239-256 (1992).
- [4] Y. Chen and G. Medioni: "Object modeling by registration of multiple range images", Image and Vision Computing, vol.10, pp. 145-155 (1992).
- [5] M. Wheeler, Y. Sato and K. Ikeuchi: "Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images", Proc. 6th Int. Conf. Comp. Vision, pp. 917-924 (1998).
- [6] P.J.Neugebauer: "Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range image", Proc. of the 1997 Int. Conf. on Shape Modeling and Application(SMA '97), pp. 130-139 (1997).