

複数形状間の誤差最小化による アクティブステレオのパラメータおよび形状補正

榎 本 和 史^{†1} 猪 瀬 健 二^{†1}
川 崎 洋^{†1} 古 川 亮^{†2}

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や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、完全に誤差な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を最小化するように、プロジェクタ・カメラの内部パラメータ（焦点距離）、プロジェクタ・カメラ間の相対位置姿勢である外部パラメータ、複数のプロジェクタ・カメラセット間の剛体変換パラメータおよび点群の 3 次元座標を推定する。これはカメラのみにおけるバンドル調整法をプロジェクタ・カメラシステムに応用したものと考えることができる。提案手法により、3 次元計測の精度向上および、それによる正確な形状統合が実現できることを示す。

Error Correction of Parameters and Measured Shapes for Active Stereo by Minimizing Errors between Multiple Scans

KAZUFUMI ENOMOTO,^{†1} KENJI INOSE,^{†1}
HIROSHI KAWASAKI^{†1} and RYO FURUKAWA^{†2}

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 ad-

vance. 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 and the focal length of the camera 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.

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ーン投影によるアクティブ方式の計測システムは、効率良く 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・カメラの焦点距離などの内部パラメータや、相対位置姿勢である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、特に計測対象と校正儀（キャリブレーションボックスなど）との大きさが異なり、カメラで撮影した画像上における校正儀のサイズが非常に小さくなる場合には、カメラの内部・外部パラメータの精度は低いものになってしまう。

一方で、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 1 度に計測することはできない。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・カメラの内部パラメータや外部パラメータに誤差がある場合、復元された形状が歪んでしまい（図 1）、詳細な位置合わせをしても、それらを正確に合わせることはできないという状況が生じる（図 2）。このため、複数の計測結果を用いて、ずれのな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の推定に加えて、プロジェクタ・カメラの内部・外部パラメータも同時に推定し、補正する必要がある。

^{†1} 埼玉大学
Saitama University

^{†2} 広島市立大学
Hiroshima City University

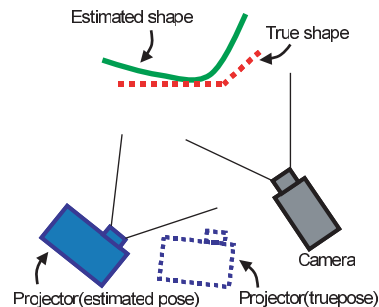


図 1 プロジェクタ・カメラのパラメータによる形状復元

Fig. 1 Shape reconstruction from the parameter of a projector-camera.

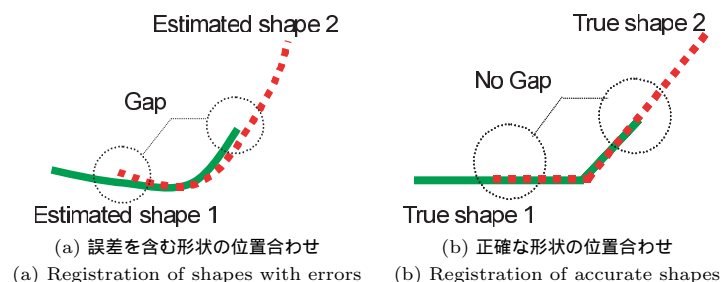


図 2 形状誤差による位置合わせのずれ

Fig. 2 A gap of registration by a shape error.

そこで、本論文では、計測結果の形状間の誤差を最小化するように、プロジェクタ・カメラの内部・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。本手法は、形状間にある程度の重なりがあればよく、プロジェクタ・カメラの内部・外部パラメータの初期値の精度が高くなくても適用可能である。このため、特に同じサイズの校正儀を用意しにくい大きな対象の計測時や、校正儀が準備できず、ノイズなどの影響を受けやすい自己校正に頼らざるをえないような場面において、高い効果が期待できる。

2. 関連研究

3次元形状計測として、これまでにさまざまな手法が提案されているが、特に、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ムが広く利用されている^{1)~5)}。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。このため、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、1度の計測では計測対象の全周をすべ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) がよく知られている。ICP アルゴリズムは、2つの形状データがある程度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⁶⁾。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^{7),8)}。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^{9),10)}。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。しかし、これら位置合わせ手法は、正確な形状の取得を前提としているため、市販のプロジェクタ・カメラを用いる空間コード化法などのように、必ずしも高い精度で3次元形状を獲得できないような場合には、アルゴリズムの適用が難しくなる。

一方で、プロジェクタ・カメラを用いる空間コード化法は、カメラどうしのステレオ手法において、片方のカメラをプロジェクタに置き換えたものと考えられる。そのため、プロジェクタ・カメラを動かしながら複数回計測を行い、形状の復元と同時にそれらの位置合わせや、カメラ・プロジェクタの内部や外部パラメータを求めることは、カメラのみを用いたバンドル調整法^{11),12)}に理論的に近いと考えられる(プロジェクタとカメラが光学的に同等であることを考えると、「位置合わせ」処理は、カメラやプロジェクタ間の外部パラメータの推定処理と本質的には変わらないため)。以下ではこの知見に基づき、バンドル調整法をプロジェクタ・カメラシステムに適用し、精度向上を実現する具体的なアルゴリズムについて述べる。

3. 提案手法

本手法のアルゴリズムの概要を図3に示す。まず初期形状として、プロジェクタ・カメラシステムによるアクティブステレオ方式による3次元形状復元を複数回を行い、複数の形

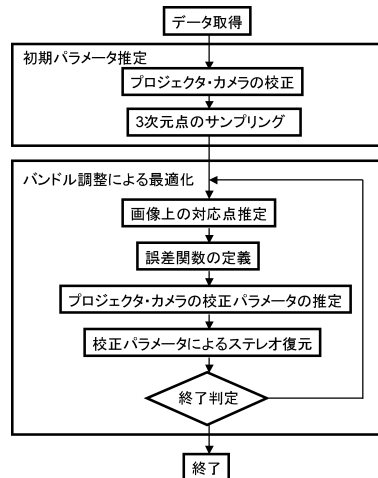


図 3 処理の流れ

Fig. 3 The flow of processing.

状を獲得する．その後、最初に、それら複数形状に対して同時位置合わせ処理を行い、複数形状間の剛体変換パラメータの初期値を得て、さらに、各形状の重なり合う領域について、形状の頂点を複数サンプリングし、その3次元座標を初期位置とする．次に、サンプリングした3次元点を各プロジェクタ・カメラ画像上へ投影し、画面上での対応点との距離誤差の自乗和を最小化するように、プロジェクタ・カメラの校正パラメータや3次元座標を同時最適化する．このような2段階処理となっている理由は、提案手法が非常に多くのパラメータを同時に最適化する手法のため、ある程度精度の高い初期値が必要であり、そのため個々のパラメータに関しては最初に個別で最適化し、少しでも高い精度にしておくことが有効なためである．以下にそれぞれのステップの詳細について述べる．

3.1 システム構成およびデータの取得

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空間コード化法によ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)．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、エピソード拘束によって対応点を探索するが、本手法においては、最適化に際して、プロジェクタとカメラ間の対応関係を用いてバンドル調整を行うため、縦パターンに加え横パターンを投影し、

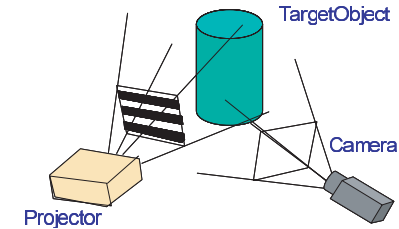


図 4 プロジェクタ・カメラによる3次元計測システム

Fig. 4 A projector-camera system for 3D acquisition.

このパターンをデコードすることでピクセル単位での対応点を求めるものとした．これに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および対応点の集合を獲得する．また、このように密な対応点からは自己校正手法により、校正儀を用いることなく3次元形状を復元することもできる^{13),14)}．

3.2 推定するパラメータ

提案手法で推定するパラメータは、(a) プロジェクタ・カメラの内部パラメータ(焦点距離)、(b) プロジェクタ・カメラ間の相対位置姿勢である外部パラメータ、(c) 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および、(d) 形状頂点の3次元座標である．プロジェクタとカメラの相対位置姿勢はすべての計測を通して固定されるものとする．また、焦点距離以外の内部パラメータに関しては、既存の校正手法で比較的高い精度で推定可能であることや、パラメータが少ないことによる処理の安定性、処理時間の短縮を優先し、今回これらは既知とした．

ところで、プロジェクタ・カメラの内部・外部パラメータを用いればステレオ復元可能なため、上記の3次元座標を推定パラメータに入れることは冗長であるとも考えられる．しかし、バンドル調整を行うためにはすべてのカメラ・プロジェクタに共通の3次元点が必要であり、複数のプロジェクタ・カメラから復元される3次元点どうしの対応問題を解決しなければならない．この問題は、対応点探索の計算量だけでなく、3次元点の密度差や量子化誤差の影響など、本質的に解決が容易ではない問題も含むため、本論文では、3次元座標を推定パラメータに加えることで、最適化処理を行うものとした．また、バンドル調整は非線形最適化のため、推定パラメータが増えると処理時間や不安定性が急激に増大することから、推定する3次元座標の数はサンプリングにより多くなりすぎないようにした．サンプリングの詳細については、3.3.2項で述べる．

3.3 初期パラメータの推定

3.3.1 剛体変換パラメータの初期値推定

本手法は 3.2 節で述べたように、非常に多くのパラメータを非線形最適化により同時推定する手法のため、パラメータの初期値が必要となる。プロジェクタ・カメラの内部・外部パラメータの初期値としては、校正儀を用いて得られる推定値や、あるいは校正儀がない場合には、自己校正により求めた値を初期値とすることができる。

また、各プロジェクタ・カメラペアにより復元された形状どうしの剛体変換パラメータについては、ICP アルゴリズムをベースとした複数同時位置合わせ手法により初期値を求める^{9),10)}。ICP アルゴリズムも前提として、ある程度最初に位置合わせされている必要性があるため、ICP を適用せずに、その初期値を直接本手法で用いることも考えられる。しかし、ICP で推定するパラメータが剛体変換パラメータのみであり、あまり正確ではない初期値からでも収束可能なのに対し、本手法は非常に多くのパラメータを同時推定するため、より精度の高い初期値が必要である。このため、最初に ICP アルゴリズムを用いて精度の良い初期値を得て、その後、全パラメータを同時に最適化する手法とした。ICP アルゴリズムにおける、プロジェクタ・カメラペア間の対応点は、形状の点が疎な場合でも大きな誤差が発生しにくい point-to-plane で探索を行う。複数同時位置合わせ処理の手順を次に示す。

- (1) ICP アルゴリズムは、あまり精度の高くない初期値からでも収束可能なため、本論文では GUI を用いて手動で与える。
 - (2) 形状が互いに重なり合う領域について、形状どうしの対応点探索を行う。
 - (3) 得られた対応点間の誤差の総和を計算し、その誤差を最小化する剛体変換パラメータを Neugebauer らの方法⁹⁾を用いて算出する。
 - (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。
- この処理により推定した結果を、剛体変換パラメータの初期値とする。

3.3.2 3 次元座標の初期値推定

本手法は、ICP と異なり、3 次元点位置も最適化のパラメータとして加えているため、少し点数が増えるだけで、計算量や安定性に大きな影響を与えることになる。このため、サンプリングを行い処理の効率化をはかる。3 次元座標の初期値として、3 次元頂点を複数サンプリングする。この処理は、全体を通して 1 度だけ行われ、サンプリングされた 3 次元頂点は以降のすべての処理を通じて固定される。ただし、後述する実験では、バンドル調整処理の過程で、対応点が見つからなくなったものは除外する処理としたため、最終的に 3 次元点数が減少することもある。

サンプリング方法としては、三次元座標の測定値からランダムにサンプリングする方法、各カメラからの距離画像からグリッド状にサンプリングする方法など複数の方法が考えられる。これに関して、本論文では、シミュレーションデータを使って、上記の 2 種類の方法についての予備実験を行った。シミュレーションデータは、ウサギの形状のデータからレンダリングによって作成された対応点データである。このデータについて、プロジェクタ・カメラ間の相対位置に、小さな誤差を加えた初期状態から、正しい初期状態の周辺に解が復元されるかどうかを、それぞれのサンプリング方法で確かめた。サンプル数はどちらも 200 とした。その結果、どちらもほぼ同じ解に収束したため、後述する実験では、サンプル数を固定しやすいランダムサンプリングを適用した。

良い収束を得るために必要となる最小限のサンプリング点数は、形状の複雑さや、初期位置の良さ、サンプリング方法などに依存する。これに関して、本論文では、シミュレーションデータを使って、上記の 2 種類の方法についての予備実験を行った。上記のシミュレーションデータで、ランダムサンプリングを行う場合に、サンプル数を変化させながら、正解周辺への復元が見られるかどうかを確認した。その結果、50 点のデータでも、正解への復元が見られた。ただし、初期位置の誤差を大きくしていくと、さらに多くのサンプル数が必要になった。

実際の問題を解く場合には、計算時間が許す範囲で、できるだけ多くのサンプルを利用することが望ましい。本手法では、次節で述べるように、ガウス・ニュートン法による非線形最適化を用いるが、100 点のサンプルの場合には 1 度の繰返し計算にかかる時間が 0.13 秒程度であるのに対し、200 点で 0.45 秒、300 点で 1.2 秒、500 点では 6.8 秒と、サンプル数の増大によって計算量が急激に増大する。後述する実験では、計算量を考慮して、200 点のサンプリングで処理を行った。

3.4 バンドル調整による最適化処理

3.4.1 3 次元頂点の画像上における対応点の決定

本手法で最小化する残差とは、サンプリングした頂点をすべてのプロジェクタ・カメラ画像上に投影し、画像上における対応点との距離誤差の総和として計算される。個々の距離誤差の計算のためには、サンプリングした頂点の、画像上における対応点を知る必要がある。カメラのみにおけるバンドル調整においては、このような対応関係はそれぞれの画像上における特徴点として最初から求まっているものの、プロジェクタ・カメラシステムにおいては、プロジェクタ・カメラペア間の対応関係が陽には得られないため、何らかの手法で推定する必要がある。本論文では、各視点においてプロジェクタ・カメラペアから得られる距離

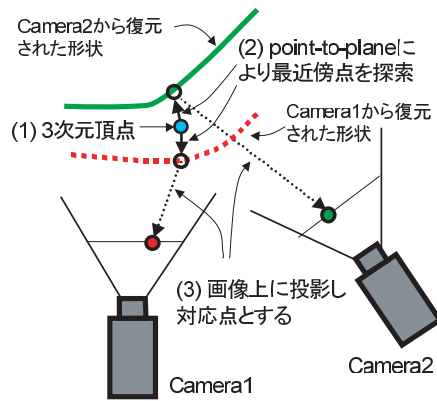


図 5 対応点の決定
Fig. 5 Estimation of corresponding point.

画像が、形状を局部的に平面近似できる程度密となるように計測が行われるものと仮定し、それぞれ異なる視点から復元された 3 次元点が最も近い点どうしを対応点とした。しかしながら、この場合の対応関係は正しいものとは限らないため、繰返し処理によりこの対応関係を更新するものとする。詳細なアルゴリズムについて図 5 を用いて以下に述べる。

- (1) サンプリングされた頂点から 1 点を選択する。
- (2) 選択した頂点と、その他のプロジェクタ・カメラペアから復元された形状との対応点を、point-to-plane による最近傍探索⁹⁾により推定する。
- (3) (2)で推定した対応点をカメラ画像上へ投影し、得られた点を、サンプリングされた 3 次元頂点の画像上における対応点とする。また、プロジェクタ・カメラ間の対応関係は縦横パターンのデコードにより 1 対 1 で求まっているため、プロジェクタ上の対応点も自動的に定まる。

上記 (1), (2), (3) の処理をすべてのサンプリング点に関して繰り返し行う。またこの一連の処理は、次項以降で述べる誤差関数の計算および最適化処理により新しいパラメータが求まるたびに、再計算されることになる。

3.4.2 誤差関数の定義

サンプリングした 3 次元頂点を各プロジェクタ・カメラ画像上へ投影した点と、前節で得られた対応点との画像上での距離を最小化すべき誤差とする (図 6)。

サンプリングした頂点集合の i 番目の点を、物体座標系の三次元座標 P_i で表すとする、

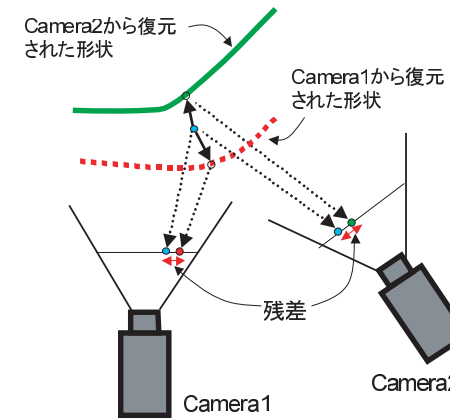


図 6 残差
Fig. 6 Residual error.

この点を各カメラへ投影した点は、2 次元ベクトル

$$u_{icj}(x) = Proj_{cj}(R_{cj}P_i + t_{cj}) \quad (1)$$

で表される。ただし、 R_{cj} , t_{cj} は、物体座標系をカメラ j の座標系へ変換する剛体変換であり、 $Proj_{cj}$ はカメラ j における投影である。また、 x は推定するすべてのパラメータをまとめたベクトルであり、カメラおよびプロジェクタの内部パラメータ (実験の実装ではカメラの焦点距離とプロジェクタの焦点距離)、物体座標系からカメラ 1 以外の各カメラ座標系への剛体変換を表すパラメータ ($R_{c2}, \dots, R_{cK}$, $t_{c2}, \dots, t_{cK}$)、カメラとプロジェクタの相対位置 (R_o , t_o)、各サンプル点の三次元位置 ($P_1, \dots, P_L$) を含む。ただし、 K は観測を行ったプロジェクタ・カメラの対の数、 L はサンプル点の数である。物体座標系の選択には任意性があるため、物体座標系とカメラ 1 の座標系との変換パラメータ R_{c1} , t_{c1} は固定とし、推定パラメータには含めない。また、これらのパラメータを実際に数ベクトルとして表現する際には、回転は単位四元数やオイラー角などを利用して 3 個のパラメータによって表現する。

同様に、 P_i をプロジェクタ j へ投影した点は、

$$v_{ipj}(x) = Proj_{pj}(R_o(R_{cj}P_i + t_{cj}) + t_o) \quad (2)$$

となる。

これらの表現を利用して、誤差ベクトル関数 $f(x)$ および誤差関数 $E(x)$ を以下のように

定義する．

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) := \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{icj}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{v}_{ipj}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{icjB} \\ \mathbf{v}_{ipjB} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E(\mathbf{x}) := |\mathbf{f}(\mathbf{x})|^2 \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{u}_{icjB}$ 、 $\mathbf{v}_{ipjB}$ は $\mathbf{u}_{icj}$ 、 $\mathbf{v}_{ipj}$ に対応する画面上の座標である．

3.4.3 非線形最小化によるプロジェクタ・カメラ校正パラメータ推定

式 (4) の誤差関数を、ガウス・ニュートン法による非線形最適化により $\mathbf{x}$ に関して最小化することで、 $\mathbf{x}$ の推定値を求める． $\mathbf{x}$ はプロジェクタ・カメラ間の校正パラメータやカメラ・プロジェクタの焦点距離を含む．

誤差ベクトル関数 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ の i 番目の要素を $f_i(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{x}$ の j 番目の要素を x_j と表記する．このとき、 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ の Jacobian 行列 $\mathbf{J}_f(\mathbf{x})$ は、

$$\mathbf{J}_f(\mathbf{x}) := \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N}(\mathbf{x}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_M}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_M}{\partial x_N}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

と定義される．ただし N は $\mathbf{x}$ の次元数、 M は $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ の次元数である．十分な数の点がサンプリングされていれば、 $M > N$ となる．実際には、3.3.2 項で述べたように、200 点用いた．

このとき、ガウス・ニュートン法による非線形最適化は、

$$\delta \mathbf{x} = -(\mathbf{J}_f^T(\mathbf{x}) \mathbf{J}_f(\mathbf{x}))^{-1} \mathbf{J}_f^T(\mathbf{x}) \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (6)$$

によって $\delta \mathbf{x}$ を計算する処理と、

$$\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x} + \delta \mathbf{x} \quad (7)$$

によって $\mathbf{x}$ を更新する処理を、 $\mathbf{x}$ が変化しなくなるまで繰り返すことで実現できる．Jacobian 行列 $\mathbf{J}_f(\mathbf{x})$ の計算には、偏微分が必要となるので、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_N)$ における偏微分 $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\mathbf{x})$ を、微小量 Δ を利用して、差分近似 $\frac{f_i(x_1, \dots, x_j + \Delta, \dots, x_N) - f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_N)}{\Delta}$ によって求める．これにより、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータ、カメラ・プロジェクタの焦点距離、各形状の剛体変換パラメータの推定値を得ることができる．

3.4.4 推定パラメータによるステレオ復元

推定した 3 次元座標は、サンプリングされた一部の点のみであるため、バンドル調整によって推定された校正パラメータを用いて、形状のステレオ復元を行う．これによりプロジェクタ・カメラペア間の対応関係が変化するため、3 次元頂点と画像上の対応点も変化する．

この一連の処理を、誤差の総和が変化しなくなるまで繰り返し行うことで、最終的な解を得ることができる．

4. 実験

提案手法の効果を検証するために、シミュレーションデータによる実験および実データによる実験を行い、評価を行った．

4.1 シミュレーションデータによる実験 1 (平面形状)

平面を 3 つそれぞれ直角になるよう配置した箱状の形状データから、プロジェクタ・カメラの校正パラメータを表 3 の「真値」に設定して、図 7 のようにプロジェクタ・カメラを配置した場合の計測データを生成した．このとき 2 回目の計測のときには、プロジェクタ・カメラを固定したステレオペアごと図 7 のように上下反転させて計測したものとデータを生成した．したがってプロジェクタ・カメラの外部パラメータは 2 回の計測を通じて同一である．このシミュレーションデータに対し、カメラの焦点距離パラメータに 5% の誤差を付与し、自己校正により外部パラメータを推定した．自己校正としたのはシミュレーションによって生成したデータのため、校正儀による校正のシミュレーションをすることが困難なためである．このときの校正パラメータを表 3 の「最適化前」に示す．また、計測した形状データを、GUI を用いて手動で位置合わせし、ICP アルゴリズムにより位置合わせした結果を図 8 (a)、図 9 (a) に示す．焦点距離に 5% の誤差を与えたことから形状が歪んでしまい、正しく位置合わせできていないことが分かる．

このデータに対し、提案手法を適用した結果を、表 1 の「誤差 (最適化)」の欄、表 3 の

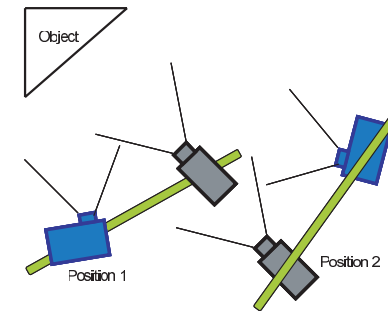


図 7 シミュレーションによる実験 1: プロジェクタとカメラの配置
Fig. 7 Experiment 1 with simulation data: Position of projector and camera.

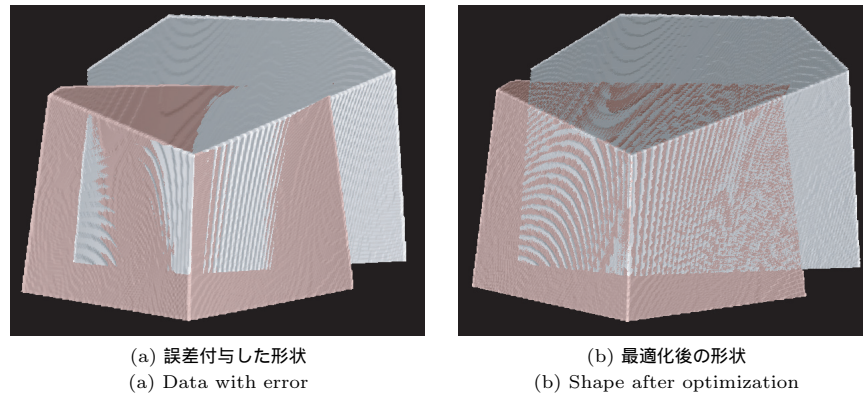


図 8 シミュレーションによる実験 1: 最適化の結果 (視点 1)

Fig.8 Experiment 1 with simulation data: The result of optimization (view 1).

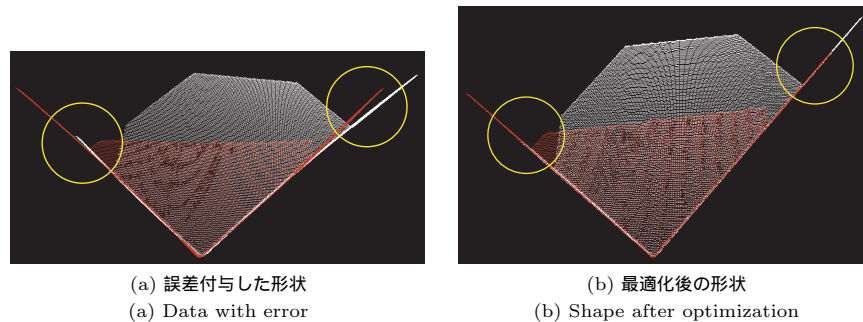


図 9 シミュレーションによる実験 1: 最適化の結果 (視点 2)

Fig.9 Experiment 1 with simulation data: The result of optimization (view 2).

「最適化後」の欄および図 8(b), 図 9(b) に示す. これらの値は, シミュレーションデータで単位がないため, 参考のためカメラと対象物体重心までの距離を計算したところ, 1.312 であった. また, サンプリング点数は 200 点とした. 提案手法により, パラメータが真値に近づき, 形状間の残差が減少したことが分かる. 図 10 は形状間の誤差を可視化したものである. 黒いほど誤差が大きく, 特に誤差が大きいは赤で表示している. 赤色の閾値は 0.04 である. この図からも形状間の誤差が減少していることが確認できる. また, 提案手法は, 通常のカメラどうしのバンドル調整法と本質的に原理が同じであるため, 今回の

表 1 シミュレーションによる実験 1: 形状間全点の残差
Table 1 Experiment 1 with simulation data: Residual errors between shapes.

	誤差総和	1 点あたりの平均誤差
誤差 (初期値)	24.33	3.416×10^{-4}
誤差 (最適化)	1.115	1.530×10^{-5}

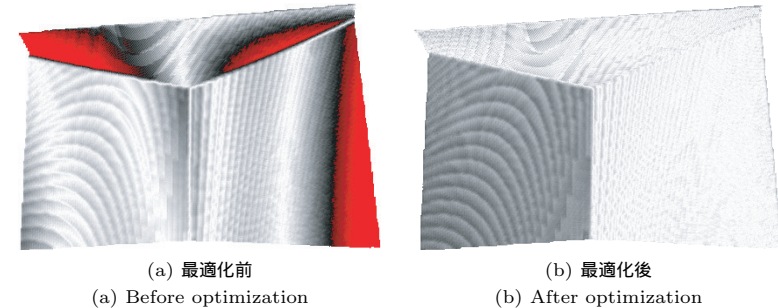


図 10 シミュレーションによる実験 1: 位置合わせ誤差

Fig.10 Experiment 1 with simulation data: Registration errors.

表 2 シミュレーションによる実験 1: 平面あてはめとの偏差
Table 2 Experiment 1 with simulation data: Standard deviation from fitted planes.

	側面	上平面	なす角 (90 度)
最適化前	0.012	0.009	86.0
最適化後	0.006	0.004	89.1

ように特殊ではない条件においては, 平面は平面に収束すると考えられる. そこで, 最適化の前後において平面あてはめし, その平面からの偏差, および平面のなす角を表 2 に示す. 特に, 付与した誤差の影響によって, 平面が歪んで平らではなくなっている部分が, 適用後では平面になっており, その結果, 正確な位置合わせができたことが分かる.

4.2 シミュレーションデータによる実験 2 (複雑な形状)

複雑な形状として, ウサギの形をしたポリゴンを用いて, プロジェクタ・カメラの校正パラメータを表 5 の「真値」に設定して, 計測データを生成した. この実験においてもプロジェクタ・カメラの外部パラメータは 2 回の計測を通じて同一である. このシミュレーションデータに対し, カメラの焦点距離パラメータに 10% の誤差を付与し, 自己校正により外部パラメータを推定した. このときの校正パラメータを表 5 の「最適化前」に示す. また,

19 複数形状間の誤差最小化によるアクティブステレオのパラメータおよび形状補正

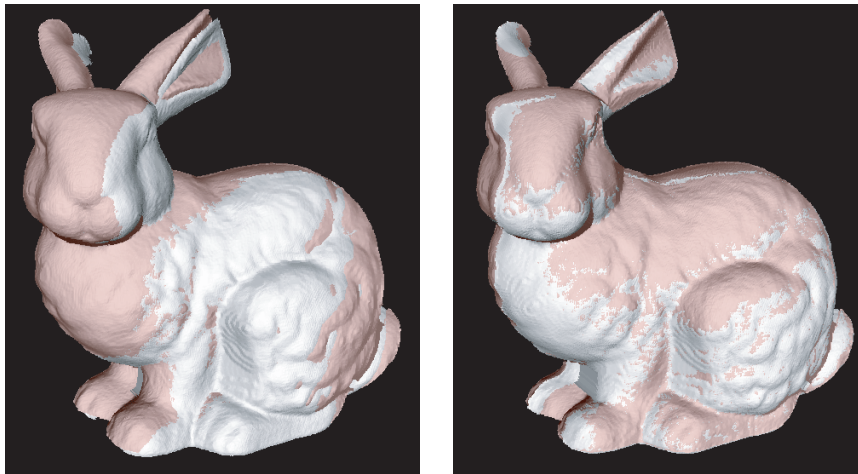
表 3 シミュレーションによる実験 1：パラメータ推定結果

Table 3 Experiment 1 with simulation data: Estimated parameters.

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ	Cam. focus
真値	-0.9765	-0.09158	0.1950	-5.880	-7.944	1.124	0.01000
最適化前	-0.9618	-0.06920	-0.2649	-5.962	-8.563	1.016	0.01050
最適化後	-0.9730	-0.09598	0.2097	-5.841	-8.109	1.100	0.00998

(t_x, t_y, t_z) はカメラとプロジェクタ相対位置姿勢の (x, y, z) 方向の平行移動成分, α, β, γ はオイラー角 (度).

(t_x, t_y, t_z) are translations of x, y, z direction between camera and projector, α, β, γ are Euler angles (degree).



(a) 誤差付与した形状
(a) Data with error

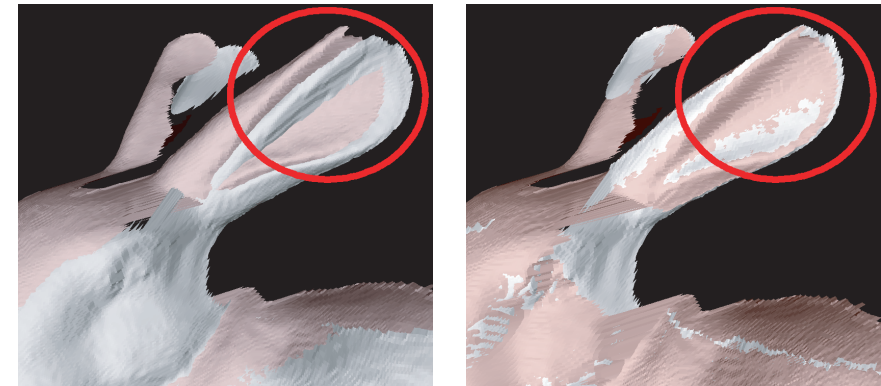
(b) 最適化後の形状
(b) Shape after optimization

図 11 シミュレーションによる実験 2：最適化の結果

Fig. 11 Experiment 2 with simulation data: The result of optimization.

計測した形状データを, GUI を用いて手動で位置合わせし, ICP アルゴリズムにより位置合わせした結果を図 11 (a), 図 12 (a) に示す. 焦点距離に 10% の誤差を与えたことから形状が歪んでしまい, 正しく位置合わせできていないことが分かる.

このデータに対し, 提案手法を適用した結果を, 表 4 の「誤差 (最適化)」の欄, 表 5 の「最適化後」の欄および図 11 (b), 図 12 (b) に示す. これらの値は, シミュレーションデータ



(a) 誤差付与した形状

(a) Data with error

(b) 最適化後の形状

(b) Shape after optimization

図 12 シミュレーションによる実験 2：最適化の結果 (拡大)

Fig. 12 Experiment 2 with simulation data: The result of optimization (closeup view).

表 4 シミュレーションによる実験 2：形状間全点の残差

Table 4 Experiment 2 with simulation data: Residual errors between shapes.

	誤差総和	1 点あたりの平均誤差
誤差 (初期値)	3.45×10^{-1}	3.28×10^{-6}
誤差 (最適化)	0.11×10^{-1}	1.05×10^{-7}

表 5 シミュレーションによる実験 2：パラメータ推定結果

Table 5 Experiment 2 with simulation data: Estimated parameters.

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ	Cam. focus
真値	-0.800	-0.0400	0.650	-4.000	-33.000	-11.000	0.01000
最適化前	-0.783	-0.0425	0.620	-3.784	-34.718	-11.056	0.00900
最適化後	-0.774	-0.0389	0.631	-3.969	-33.111	-11.108	0.00991

(t_x, t_y, t_z) はカメラとプロジェクタ相対位置姿勢の (x, y, z) 方向の平行移動成分, α, β, γ はオイラー角 (度).

(t_x, t_y, t_z) are translations of x, y, z direction between camera and projector, α, β, γ are Euler angles (degree).

で単位がないため, 参考のためカメラと対象物体重心までの距離を計算したところ, 0.955 であった. また, サンプリング点数は 200 点とした. 提案手法により, パラメータが真値に近づき, 形状間の残差が減少したことが分かる. 図 13 は形状間の誤差を可視化したもので

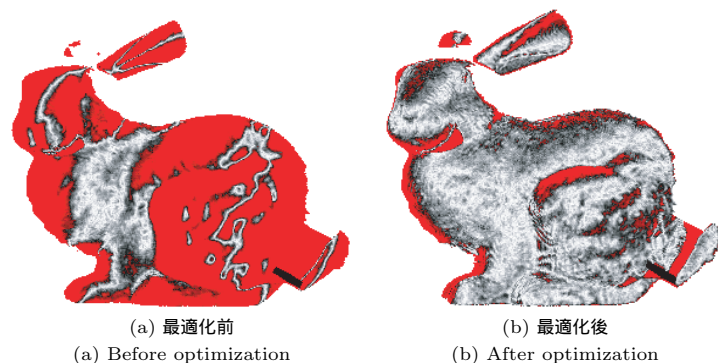


図 13 シミュレーションによる実験 2：位置合わせ誤差
Fig. 13 Experiment 2 with simulation data: Registration errors.

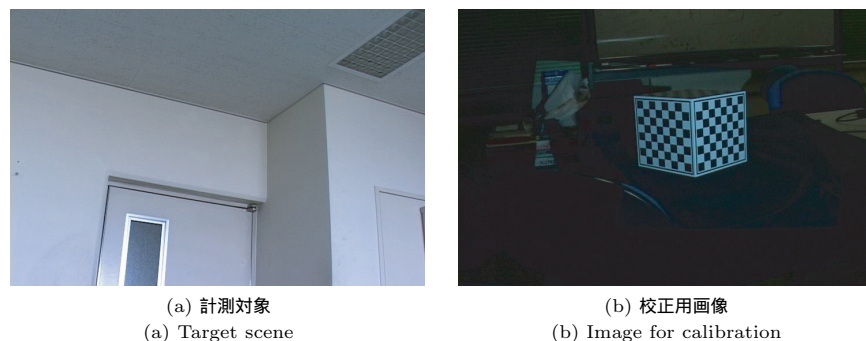


図 14 実データによる実験 1：計測対象と校正用画像
Fig. 14 Experiment 1 with real data: The target scene and the captured calibration box.

ある．黒いほど誤差が大きく，特に誤差が大きいところは赤で表示している．赤色の閾値は 0.0005 である．この図からも形状間の誤差が減少し，その結果，正確な位置合わせができたことが分かる．

4.3 実データによる実験 1（校正儀によりプロジェクタ・カメラ間の初期外部パラメータを推定）

図 14 (a) の計測対象（部屋の角，2 m × 2 m 程度）を 2 方向から計測したデータを用い

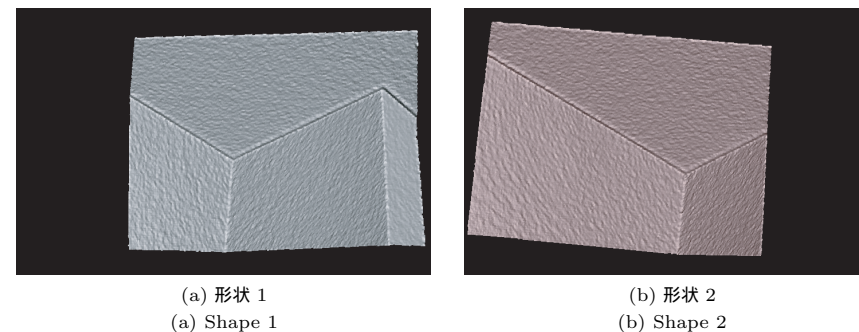


図 15 実データによる実験 1：取得した 3 次元計測データ
Fig. 15 Experiment 1 with real data: Acquired 3D data.

て実験を行った．計測にはパターンコード化法によるアクティブステレオ方式を用い，プロジェクタ・カメラ間の位置関係が変わらないように固定したプロジェクタ・カメラのセットを動かしながら 2 回計測を行った．したがって，プロジェクタ・カメラの外部パラメータは 2 回の計測を通じて同一である．また，ベースラインは約 1 m 程度とし，精密なプロジェクタ・カメラ間の外部パラメータを，キャリブレーションボックスを用いて推定した．このとき，キャリブレーションボックスは 20 cm × 20 cm × 20 cm のサイズのものを用いた．また，この実験ではカメラの焦点距離を推定パラメータとした．実際に計測に用いたプロジェクタ・カメラシステムで撮影した画像を図 14 (b) に示す．部屋の大きさに対して校正儀がかなり小さいため，画像上においても小さく撮影されており，推定されるパラメータの精度は低いものになってしまう．

計測によって得られた形状を図 15 に示す．(a)，(b) は各視点それぞれにおける形状である．また，図 16 は，それらを位置合わせしたものである．校正儀のサイズが計測対象と大きく異なっていることなどから，形状が大きく歪んでしまい，正しく位置合わせできていないことが分かる．

このデータに対し，提案手法を適用した結果を表 6，表 7 および図 17 に示す．サンプリング点数は 200 点である．また，提案手法によるパラメータ補正の前後において，形状の重なり合った部分を拡大した画像を図 18 に示す．誤差を含む外部パラメータにより，本来平面であるはずの部分がめくれていたものが，提案手法により平面に近づき，形状のずれが減少していることが確認できる．図 19 は形状間の誤差を可視化したものである．黒いほど

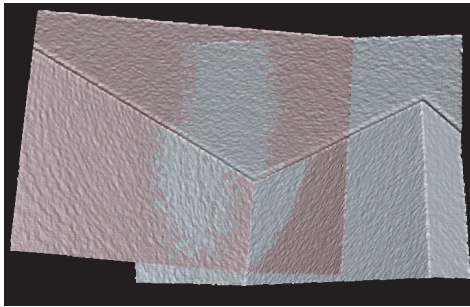


図 16 実データによる実験 1：最適化前に位置合わせされた全形状
Fig.16 Experiment 1 with real data: Registration result of captured data.

表 6 実データによる実験 1：形状間全点の残差 (数字の単位は m^2)

Table 6 Experiment 1 with real data: Residual errors between shapes (Unit of figures is m^2).

	誤差総和	1 点あたりの平均誤差
最適化前	2.265	3.360×10^{-5}
最適化後	0.952	1.412×10^{-5}

表 7 実データによる実験 1：パラメータ推定結果

Table 7 Experiment 1 with real data: Estimated parameters.

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ	Cam. focus
最適化前	0.9517	-0.1182	0.2835	-6.8590	6.3519	-1.0978	0.0140
最適化後	0.8915	-0.0814	0.4456	-7.3724	6.0171	-0.8477	0.0137

(t_x, t_y, t_z) はカメラとプロジェクタ相対位置姿勢の (x, y, z) 方向の平行移動成分 (m), α, β, γ はオイラー角 (度).

(t_x, t_y, t_z) are translations of x, y, z direction between camera and projector (m), α, β, γ are Euler angles (degree).

誤差が大きく、特に誤差が大きいところは赤で表示している．赤色の閾値は 0.025 m である．これらの図からも形状間の誤差が減少し、歪みが解消されていることが確認できる．

4.4 実データによる実験 2 (自己校正によりプロジェクタ・カメラ間の初期外部パラメータを推定)

次に、図 20 の計測対象 (部屋の角 $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 程度) を 3 方向から計測したデータを用いて実験を行った．計測には前節と同様に、パターンコード化法によるアクティブステレオ方式を用い、プロジェクタ・カメラ間の相対位置姿勢が変わらないように固定したプロジェ

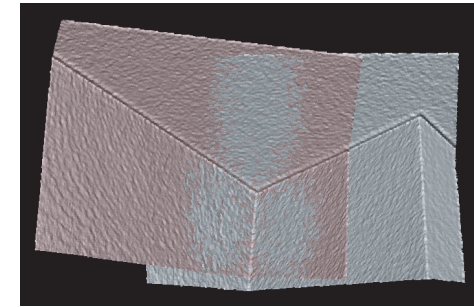
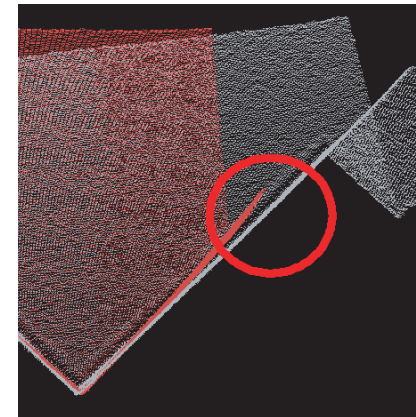
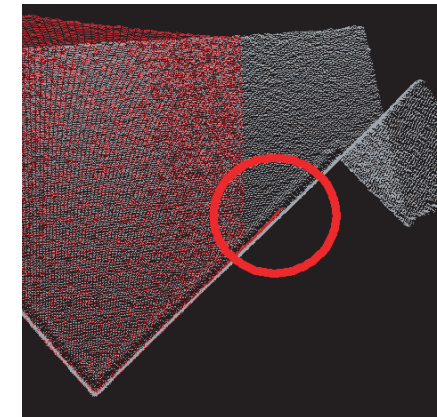


図 17 実データによる実験 1：最適化後の位置合わせ結果
Fig.17 Experiment 1 with real data: Registration result after optimization.



(a) 補正前
(a) Before optimization



(b) 補正後
(b) After optimization

図 18 実データによる実験 1：位置合わせ結果 (拡大図)

Fig.18 Experiment 1 with real data: Registration result (closeup view).

クタ・カメラのセットを動かしながら複数回計測を行った．したがって、プロジェクタ・カメラの外部パラメータは 3 回の計測を通じて同一である．ベースラインは約 1 m 程度とし、今回は校正儀を用いずに自己校正により外部パラメータの初期値を推定した．また、この実験ではカメラの焦点距離を推定パラメータとした．

22 複数形状間の誤差最小化によるアクティブステレオのパラメータおよび形状補正

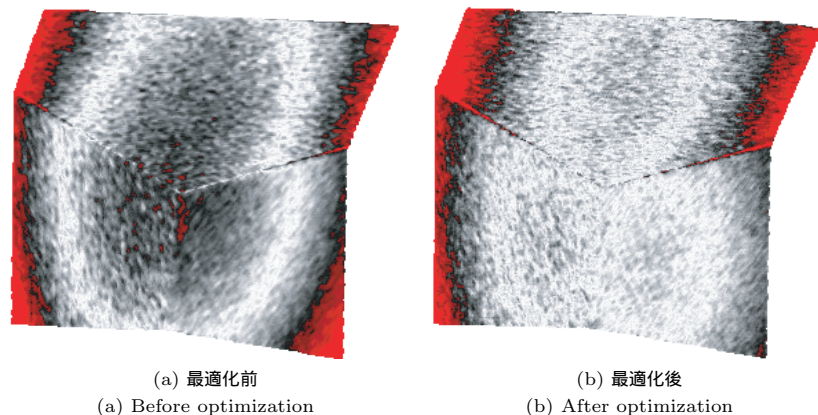


図 19 実データによる実験 1：位置合わせ誤差
Fig. 19 Experiment 1 with real data: Registration error.



図 20 実データによる実験 2：対象シーン
Fig. 20 Experiment 2 with real data: The target scene.

計測によって得られた形状を図 21 に示す。(a) はすべての形状を位置合わせしたものであり、(b)、(c)、(d) は各視点におけるそれぞれの形状である。校正儀を用いた実験と異なり、校正と復元におけるサイズのずれが大きくないことから、平面のめくりあがり方が小さいなど歪みは比較的小さいものの、複数形状を位置合わせしようとする外部パラメータや内部パラメータの推定誤差により、やはり正しく位置合わせできていないことが分かる(図 22(a))。

このデータに対し、提案手法を適用した結果を表 8、表 9 および図 23、図 24 に示す。

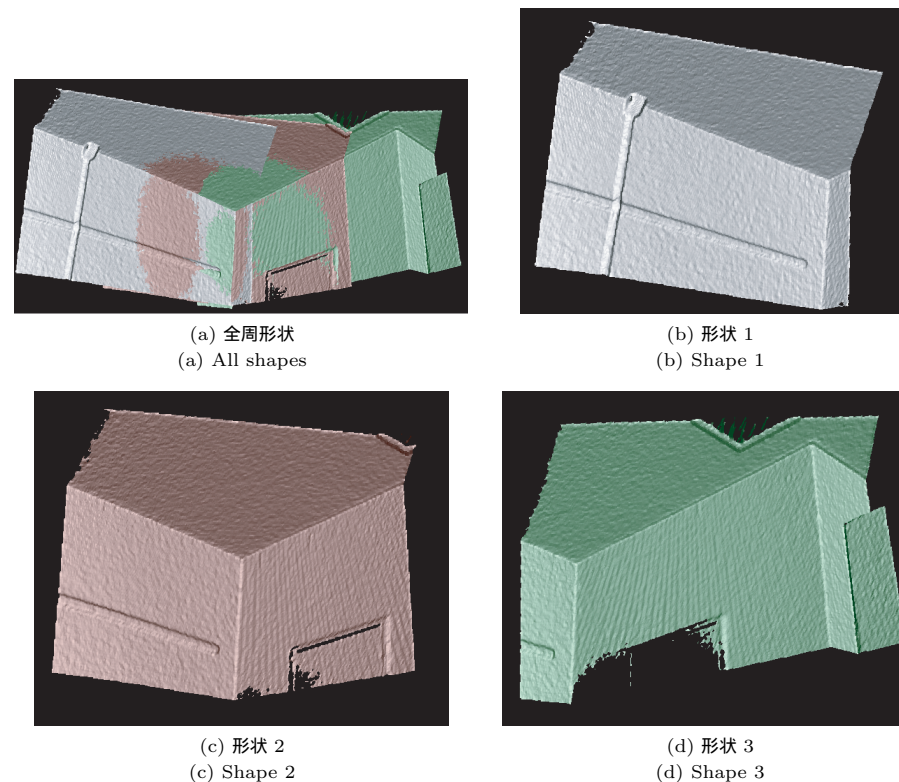
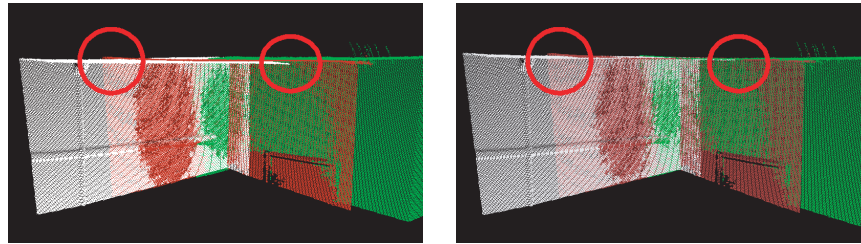


図 21 実データによる実験 2：取得した 3 次元計測データ
Fig. 21 Experiment 2 with real data: Acquired 3D data.

サンプリング点数は 200 点とした。また、提案手法によるパラメータ補正後において、形状の重なり合った部分を拡大した画像を図 22(b) に示す。提案手法により、位置合わせの際のずれが減少していることが分かる。図 25、図 26 は形状間の誤差を可視化したものである。黒いほど誤差が大きく、特に誤差が大きいところは赤で表示している。赤色の閾値は 0.04 m である。これらの図からも形状間の誤差が減少し、歪みが解消されていることが確認できる。

23 複数形状間の誤差最小化によるアクティブステレオのパラメータおよび形状補正



(a) 補正前
(a) Before optimization
(b) 補正後
(b) After optimization

図 22 実データによる実験 2：位置合わせ結果（拡大図）

Fig. 22 Experiment 2 with real data: Registration result (closeup view).

表 8 実データによる実験 2：形状間全点の残差（数字の単位は m^2 ）

Table 8 Experiment 2 with real data: Residual errors between shapes (Unit of figures is m^2).

	誤差総和	1 点あたりの平均誤差
最適化前	5.807	3.944×10^{-5}
最適化後	4.014	2.710×10^{-5}

表 9 実データによる実験 2：パラメータ推定結果

Table 9 Experiment 2 with real data: Estimated parameters.

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ	Cam. focus
最適化前	0.9644	-0.0521	0.2594	-7.0974	9.5334	-1.7275	0.0140
最適化後	0.9278	-0.0526	0.3693	-7.0834	9.5023	-1.7020	0.0137

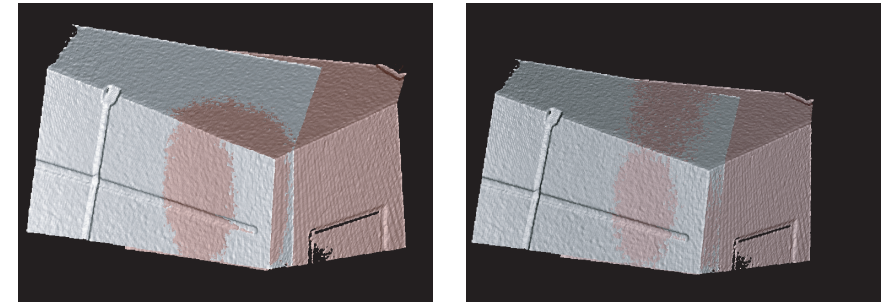
(t_x, t_y, t_z) はカメラとプロジェクタ相対位置姿勢の (x, y, z) 方向の平行移動成分 (m), α, β, γ はオイラー角 (度).

(t_x, t_y, t_z) are translations of x, y, z direction between camera and projector (m), α, β, γ are Euler angles (degree).

4.5 実データによる実験 3（複雑な形状）

複雑な形状として、図 27 のようなシーンで対象物（ソファ、そり、円筒の発泡スチロール）を 3 方向から計測したデータを用いて実験を行った。計測にはパターンコード化法によるアクティブステレオ方式を用い、プロジェクタ・カメラ間の位置関係が変わらないように固定し計測を行った。したがって、プロジェクタ・カメラの外部パラメータは計測を通じて同一である。また、プロジェクタ・カメラ間のベースラインは約 30 cm 程度とし、プロジェクタ・カメラ間の初期外部パラメータは、20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 20 cm のキャリブレーションボックスを用いて推定した。また、この実験ではプロジェクタ・カメラそれぞれの焦点距離を計測時に少し動かし、それぞれを推定パラメータとした。実際に計測に用いたプロジェクタ・カメラシステムで撮影した校正用の画像を図 28 に示す。部屋の大きさに対して校正儀が小さいため、画像上においても小さく撮影されており、推定される外部パラメータの精度も低くなる。

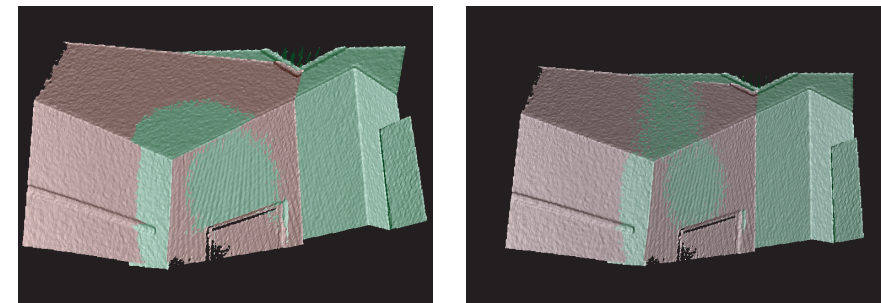
計測によって得られた形状を図 29 に示す。(a) はすべての形状を位置合わせし、テクスチャマップしたものであり、(b) は各形状ごとに色分けして陰影表示したものである。精度



(a) 最適化前
(a) Before optimization
(b) 最適化後
(b) After optimization

図 23 実データによる実験 2：最適化後の位置合わせ結果（セット 1）

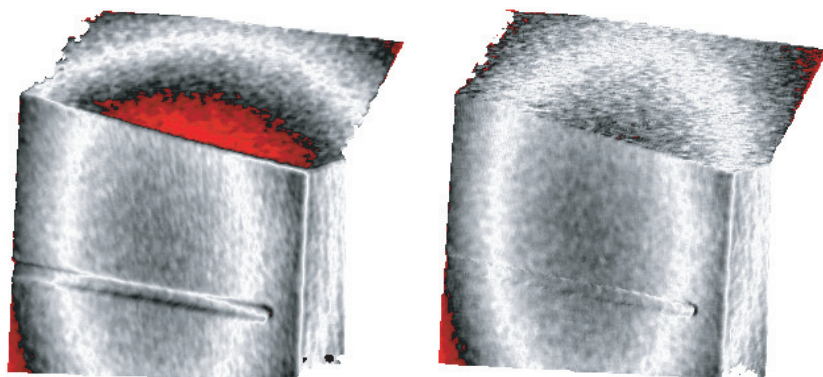
Fig. 23 Experiment 2 with real data: Registration result of proposed method (set 1).



(a) 最適化前
(a) Before optimization
(b) 最適化後
(b) After optimization

図 24 実データによる実験 2：最適化後の位置合わせ結果（セット 2）

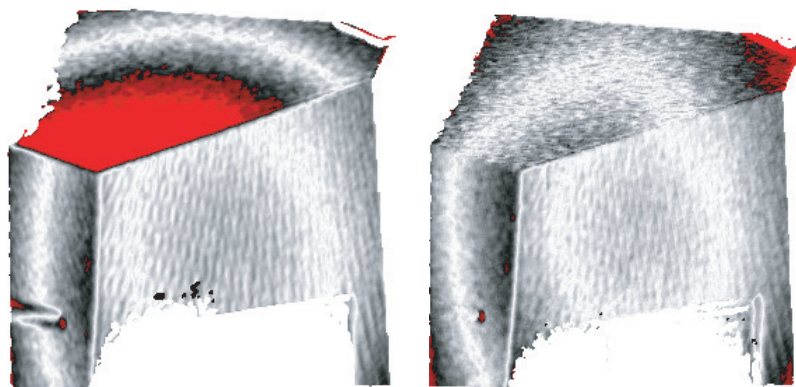
Fig. 24 Experiment 2 with real data: Registration result of proposed method (set 2).



(a) 最適化前 (b) 最適化後
(a) Before optimization (b) After optimization

図 25 実データによる実験 2 : 位置合わせ誤差 (セット 1)

Fig. 25 Experiment 2 with real data: Registration error (set 1).



(a) 最適化前 (b) 最適化後
(a) Before optimization (b) After optimization

図 26 実データによる実験 2 : 位置合わせ誤差 (セット 2)

Fig. 26 Experiment 2 with real data: Registration error (set 2).

の低いプロジェクタ・カメラのパラメータにより、各視点それぞれにおける形状が歪み、正しく位置合わせできていないことが分かる。

このデータに対し、提案手法を適用した結果を表 10、表 11 および図 30 に示す。サン



図 27 実データによる実験 3 : 計測シーン

Fig. 27 Experiment 3 with real data: The target scene.

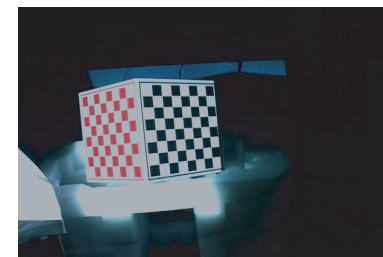


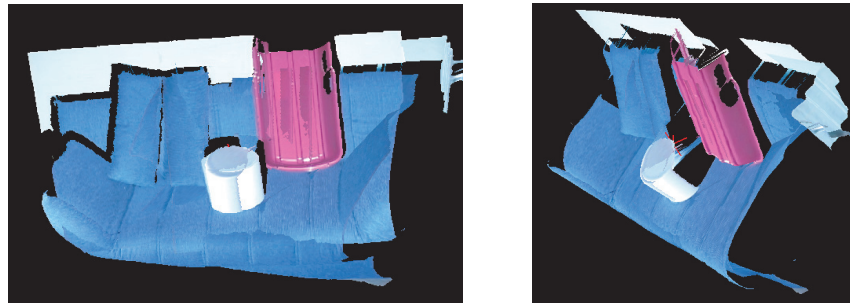
図 28 実データによる実験 3 : 校正用画像

Fig. 28 Experiment 3 with real data: Image for calibration.

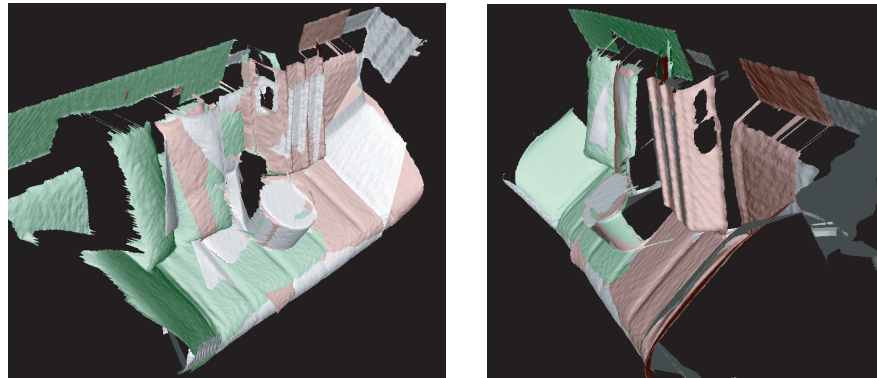
プリング点数は 200 点である。誤差を含む内部・外部パラメータにより、最初は位置合わせしてもずれていた部分が、提案手法により形状のずれが減少したことが確認できる。図 31、図 32 は形状間の誤差を可視化したものである。黒いほど誤差が大きく、特に誤差が大きいところは赤で表示している。赤色の閾値は 0.02m である。これらの図からも形状間の誤差が減少し、歪みが解消されたことが分かる。

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、カメラ・



(a) テクスチャつき全形状
(a) All shapes with texture



(b) 陰影つき全形状
(b) All shapes with shading

図 29 実データによる実験 3：取得した 3 次元計測データ
Fig. 29 Experiment 3 with real data: Acquired 3D data.

プロジェクタの焦点距離などの内部パラメータおよび、プロジェクタ・カメラの外部パラメータの精度を向上させる手法を提案した。提案手法により、形状の統合をより正確に行うことが可能となり、物体の全周形状を歪みなく統合することができるようになった。提案手法は、計測物と校正儀の大きさに差があり、精度良く校正ができない場合や、自己校正による形状復元時などに特に有効であると考えられる。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。

表 10 実データによる実験 3：形状間全点の残差（数字の単位は m^2 ）

Table 10 Experiment 3 with real data: Residual errors between shapes (Unit of figures is m^2).

	誤差総和	1 点あたりの平均誤差
最適化前	24.54	3.22×10^{-4}
最適化後	12.25	1.99×10^{-4}

表 11 実データによる実験 3：パラメータ推定結果

Table 11 Experiment 3 with real data: Estimated parameters.

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ	Proj. focus	Cam. focus
最適化前	-0.269	-0.0310	0.070	-7.544	-5.593	2.000	0.118	0.0140
最適化後	-0.283	-0.0271	0.173	-10.125	-5.912	1.401	0.154	0.0175

(t_x, t_y, t_z) はカメラとプロジェクタ相対位置姿勢の (x, y, z) 方向の平行移動成分 (m), α, β, γ はオイラー角 (度)。

(t_x, t_y, t_z) are translations of x, y, z direction between camera and projector (m), α, β, γ are Euler angles (degree).

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) 若手 ICT 研究者育成型研究開発 (072103013) および科研費 (19700098, 19700157) の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Batlle, J., Mouaddib, E. and Salvi, J.: Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey, *Pattern Recognition*, Vol.31, No.7, pp.963–982 (1998).
- 2) Caspi, D., Kiryati, N. and Shamir, J.: Range imaging with adaptive color structured light, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.5, pp.470–480 (1998).
- 3) Boyer, K.L. and Kak, A.C.: Color-encoded structured light for rapid active ranging, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.9, No.1, pp.14–28 (1987).
- 4) Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range imaging system for 3-D object recognition, *International Conference on Pattern Recognition*, pp.806–808 (1984).
- 5) Hall-Holt, O. and Rusinkiewicz, S.: Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects, *International Conference on Computer Vision*, Vol.2, pp.359–366 (2001).
- 6) Besl, P. and McKay, N.: A method for registration of 3-d shapes, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1992, Vol.14, No.2, pp.239–256 (1992).

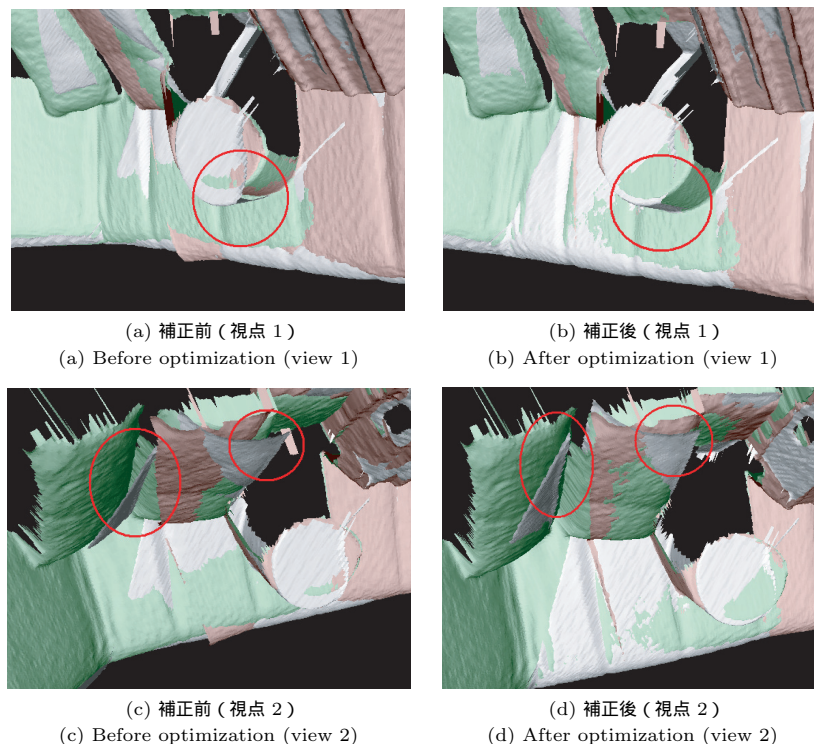


図 30 実データによる実験 3 : 位置合わせ結果 (拡大図)

Fig.30 Experiment 3 with real data: Registration result (closeup view).

- 7) Chen, Y. and Medioni, G.: Object modeling by registration of multiple range images, *Image and Vision Computing*, Vol.10, No.3, pp.145–155 (1992).
- 8) Wheeler, M., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images, *International Conference on Computer Vision 1998* (1998).
- 9) Neugebauer, P.J.: Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range images, *Shape Modeling and Application*, pp.130–139 (1997).
- 10) Miyazaki, D., Oishi, T., Nishikawa, T., Sagawa, R., Nishino, K., Tomomatsu, T., Takase, Y. and Ikeuchi, K.: The great buddha project: Modeling cultural her-

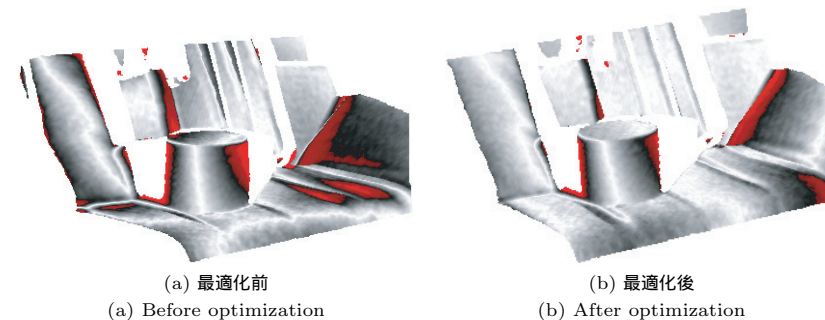


図 31 実データによる実験 3 : 位置合わせ誤差 (セット 1)

Fig.31 Experiment 3 with real data: Registration error (set 1).

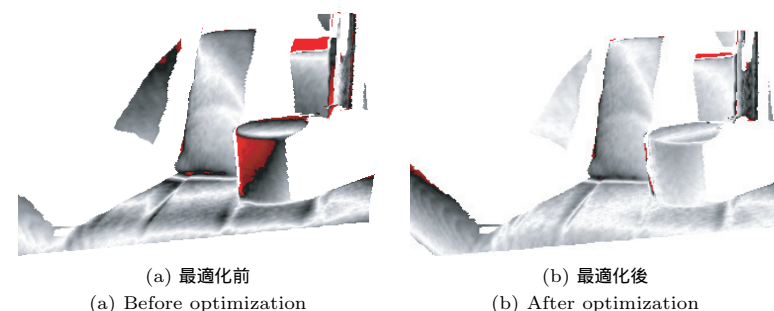


図 32 実データによる実験 3 : 位置合わせ誤差 (セット 2)

Fig.32 Experiment 3 with real data: Registration error (set 2).

- itage through observation, *6th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia*, pp.138–145 (2000).
- 11) 池田友彦, 杉本晃宏: 局所的バンドル調整を用いた自己運動推定における累積誤差の軽減, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG10(CVIM 15), pp.72–82 (2006).
- 12) Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R. and Fitzgibbon, A.: Bundle Adjustment — A Modern Synthesis, *Vision Algorithms: Theory and Practice*, Triggs, W., Zisserman, A. and Szeliski, R. (Eds.), LNCS, pp.298–375, Springer Verlag (2000).
- 13) 川崎 洋, 大澤 裕, 古川 亮, 中村泰明: 空間コード化法を用いた末校正ステレオシステムによる密な 3 次元形状復元, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG10(CVIM 15), pp.59–71 (2006).

- 14) Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning, *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp.302–309 (2005).

(平成 20 年 1 月 15 日受付)

(平成 20 年 7 月 30 日採録)

(担当編集委員 増田 健)



榎本 和史

2005 年埼玉大学工学部情報システム工学科卒業．2007 年埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程修了．現在，日立製作所勤務．



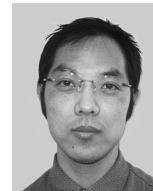
猪瀬 健二

2006 年埼玉大学工学部情報システム工学科卒業．現在，埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程．



川崎 洋 (正会員)

1994 年京都大学工学部電気電子工学科卒業．2003 年東京大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士課程修了．博士 (工学)．現在，埼玉大学工学部情報システム工学科准教授．主としてコンピュータ・ビジョン，コンピュータ・グラフィックス，ITS に関する研究に従事．



古川 亮 (正会員)

1993 年京都大学工学部電気電子工学科卒業．1997 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了．広島市立大学情報科学部助手を経て，現在，広島市立大学大学院情報科学研究科講師．コンピュータ・ビジョン，コンピュータ・グラフィックスに関する研究に従事．博士 (工学)．