

空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる 密な3次元形状復元

川崎 洋[†] 大沢 裕[†]
古川 亮^{††} 中村 泰明^{††}

本論文では、事前の校正を必要としない新しいアクティブビジョンステレオシステムを提案する。通常、アクティブビジョンシステムでは計測機器が事前に精密に校正され、さらにカメラと光源が固定されている必要がある。そのため、これまでのアクティブビジョンシステムは、事前の準備に時間がかかったり、計測装置が大がかりになる傾向があった。アクティブビジョンシステムにおいてカメラと光源間の校正が不要となれば、カメラと光源を配置した後そのまま計測を始めることが可能となり、利便性が大幅に向上する。そこで、本論文では以上のことを実現するための自己校正手法を提案する。提案手法は一対のカメラからなるパッシブステレオシステムにおける自己校正手法を、アクティブステレオシステムに拡張した手法と考えることができる。主な相違点としては、通常のカメラペアによるパッシブステレオにおいては、得られる対応点が疎であるのに対して、本手法では密で正確な対応点を得られる点にある。本手法を用いれば、正確な対応点により安定した自己校正が実現でき、密な3次元点復元が実現できる。また、繰り返し計測することで得られる複数のデータを同時に用いることで、スケージングのそろった3次元復元を頑健かつ高精度に行うことのできる手法を提案する。

Dense 3D Reconstruction with an Uncalibrated Stereo System Using Coded Structured Light

HIROSHI KAWASAKI,[†] YUTAKA OHSAWA,[†] RYO FURUKAWA^{††}
and YASUAKI NAKAMURA^{††}

In this paper, we describe a new active stereo vision system using coded structured light. Generally, a 3D measurement system based on coded structured light consists of a camera and a projector, and both intrinsic and extrinsic parameters of these devices should be precalibrated. Self-calibration capability of camera-projector system will eliminate the precalibration process and greatly improve its convenience and practicality. To achieve this, we propose an original self-calibration method, which can be understood as a camera-to-camera self-calibration method with one camera replaced by a projector. The proposed method is based on epipolar constraints, and there is no limitations for shapes of objects (ex., planar object) or camera models (ex., affine camera). 3D shapes can be directly recovered in Euclidean space. We also propose a simultaneous 3D reconstruction method which utilizes all captured stereo pairs to increase the accuracy of 3D estimation. Further, we propose a simple solution to remove ambiguity of scaling by attaching a laser pointer to the projector, which is important for the practical use of 3D reconstructions.

1. はじめに

3次元計測は、一般に大きくパッシブステレオ方式とアクティブステレオ方式の2つに分けることができる。

前者は、複数枚の画像さえあれば形状を復元できる

ため、特殊な装置などが不要なく、手軽に計測を行うことができ、利便性が高い。ところが、対応点探索時の誤差を解消することは通常困難であり、また、対応点の候補は画像上の特徴点に限られるため、密な形状データを得るためには特徴点間を補間する必要があり、特徴点以外におけるデータの信頼性が低い。

一方でアクティブステレオ方式はプロジェクタまたはレーザなどを利用するため、対応点問題がなく、精度の良い3次元計測が可能である。また、レーザのスクリーンやパターン光投影法などにより、容易に密な形状データを得ることができる。このため、複雑な形状

[†] 埼玉大学工学部

Faculty of Engineering, Saitama University

^{††} 広島市立大学情報科学部

Faculty of Information Science, Hiroshima City University

を持った物体の形状計測など、実用上ではアクティブ 3 次元計測装置が用いられることが多い。

アクティブ 3 次元計測装置の欠点として、専用の装置が必要であることがあげられる。これらは、たとえば、レーザのスキャンを行うサーボ機構装置や、パターン光を投光する装置などであり、いずれも複雑な精密機器である。近年、安価な PC 用のプロジェクタが普及してきており、このようなデバイスを用いることで、実用的なアクティブ方式の計測装置が手軽に実現可能となってきた。なかでも、以下にあげるいくつかの利点から、パターン光投影法によるシステムが広く利用されている。

- 計測にかかる時間が短く、密な 3 次元点を比較的短時間に得ることができる。
- 計測のためのサーボモータなど特殊な機器を用意することなく市販のビデオプロジェクタを使用することができる。

また、アクティブステレオ方式の別な問題点として、システムの状態を変えるたびにカメラとプロジェクタ間の校正が必要な点があげられる。特に投光機と受光機が分離したパターン光投影法のようなシステムの場合、計測装置を移動するたびに外部校正が必要となりシステムの利便性を大きく損なうこととなる。

アクティブステレオ方式でありながら事前の外部校正が必要なくなれば、装置も簡略化でき、これまでのアクティブ系の大きな欠点が解消され、より実用的なシステムになると期待される。

そこで、本論文では未校正なアクティブステレオシステムから 3 次元復元する手法を提案する。提案する手法による筆者らの貢献は以下のとおりである。

- 外部パラメータと、片方の焦点距離が未知であるようなアクティブステレオシステムによって 3 次元復元を行う手法を提案した (3.3 節)。提案手法は、縦および横方向の縞によるグレーコードパターンを対象に照射することで、カメラ-プロジェクタ間の密な対応点を得、非線形最適化によって未知パラメータを推定するものである。従来のカメラペアによるパッシブステレオにおいては、得られる対応点が疎であるのに対して、本手法では密な対応点を得られるため、多くの対応点を自己校正に利用できることによる精度向上と、密な 3 次元復元の実現という利点がある。
- カメラおよびプロジェクタを固定して、対象物体を複数の方向から計測した場合に、複数のデータを同時に入力して最適化することで、3 次元復元の精度を向上させ、一貫したスケールリングで結果

を得る方法を提案した (3.4 節)。

- カメラあるいはプロジェクタの一方を固定して、もう一方を移動しながら計測することで、自己校正の結果を補正し、広い範囲において、より精度の高い再構成を行う方法を提案した (3.5 節)。
- 外部パラメータの自己校正による 3 次元再構築においては通常決定できないスケールリングを、レーザポインタを用いた簡易な装置で決定する手法について提案した (3.6 節)。

2. 関連研究

アクティブステレオ方式の計測手法としてこれまで多くの手法が提案されてきている。精度が高く、効率の良い計測装置として、サーボアクチュエータによりレーザ照射機器の制御を行うものがある。しかしそのようなシステムでは、モータを精密に制御する必要性があり、システムが大がかりかつ高価になることが多い。これに対して、構造化光を用いたアクティブステレオシステムは、精密な機械制御を行う必要がないという利点を持ち、近年広く用いられている¹⁾。ところが、このような計測装置において、分離したカメラとプロジェクタを利用するシステムのほとんどで計測前の事前校正が必要とされ、このことがシステムの利便性を大きく損なっていた。

上記のような事前校正の問題を回避するために、未校正アクティブステレオ方式がこれまでに提案されている²⁾⁻⁷⁾。たとえば Takatsuka ら⁵⁾ や Furukawa ら⁷⁾ はオンライン校正手法によるアクティブステレオ 3 次元計測機を提案した。これらは、フレームごとにオンラインで校正が行われるため、構成が簡易になり、リアルタイムに形状を取得できるという利点がある。しかし、これらの手法では、オンライン校正を実現するために、プロジェクタにマーカを取りつけそれを毎フレーム撮影し校正を行う必要があり、精度や計測効率の面で問題があった。

これに対して、パッシブステレオにおける自己校正手法を、カメラの一方をプロジェクタに置き換えることでアクティブステレオシステムに適用する研究も試みられている^{8),9)}。しかし、これらの研究は、射影空間内での再構築手法を提案したものであり、アフィンカメラの仮定や、画像内に平面が必要であるなどの点で実用性に欠点があった。

Sukthankar ら¹⁰⁾ は、プロジェクタ、平面スクリーン、カメラからなる系 (以下、プロジェクタ-スクリーン-カメラ系) において、カメラ座標とプロジェクタ座標間の Homography 変換を求め、投影される映像の

歪み補正や、ヒューマンインタラクションに利用する研究を行った。Sukthankar らはスクリーン上にマーカを配置したが、Raskar ら¹¹⁾は、プロジェクタとカメラを固定したシステムを利用して、マーカなしで映像の歪み補正を行った。Okatani ら¹²⁾は、プロジェクタ-スクリーン-カメラ系の自己キャリブレーション手法を提案した。これらの校正手法においては、プロジェクタで照射されるシーンに平面があり、画像中でのその領域が既知であるという仮定がある。よって、計測対象シーンとは別に平面をキャリブレーション物体として計測するか、シーン中の平面位置を検出する必要がある。

これに対して本論文で提案する手法では、カメラモデルの制約や形状による制限がなく、任意にカメラとプロジェクタを配置し、そのまま 3 次元計測を行うことが可能である。

3. 原理とシステム

本論文の 3 次元計測システムの構成を述べる。このシステムは、プロジェクタと、カメラから構成される(図 1)。プロジェクタには 1 つのレーザポインタが固定されている。このレーザポインタは、スケーリングを実スケールに合わせるために用いられる。スケーリングの一貫性が不要な場合、このレーザポインタは不要である。

計測時には、対象物体にプロジェクタとカメラを向け、以下に述べる手順により計測を始める。まず、対象物体に複数のパターンを投影しながら、撮影を行う。このパターンから、密な対応点が求められる。これらの対応点から、未校正ステレオ法により形状の復元が行われる。

本計測システムには、以下の特徴がある。

- プロジェクタとカメラの設置方法は任意である。
- 計測シーンに、特に制限はない。

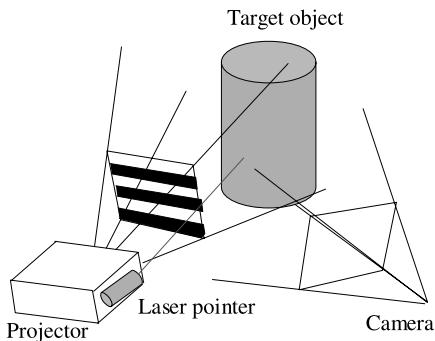


図 1 3 次元計測システムの構成

Fig. 1 Components of the 3D measurement system.

- プロジェクタおよびカメラの位置を変えても、校正をやり直す必要がない。
- 計測はすべて自動であり、人手を介する必要がない。
- 密な距離画像が、スケーリングの曖昧性なく求められる。

3.1 パターンコード化法による対応点探索

アクティブステレオ方式においては、構造化光を用いた 3 角測量により、3 次元獲得することがよく行われる。その際、効率良く対応点を得る手法として、パターンコード化法がこれまで多く提案されてきている^{1),13)~16)}。これは、コード化したパターンを対象物体に投影し、撮影された画像上のパターンをデコードすることで、光の照射された位置の識別を実現する方式である。

本論文では、密な形状を得るために多くの対応点が必要であるため、このパターンコード化法により、画像とプロジェクタの対応を得ることにする。用いたパターンは、Inokuchi ら¹⁶⁾により提案されたグレイコード(図 2)を用い、これを縦、横、2 回スキャンすることで 1 点 1 点の識別を実現する(図 3)。

これにより、撮影した画像上のピクセル点 (u, v) と、パターン上の座標 (x, y) に関する非常に多くの対応関係を求めることができる。

3.2 推定されるパラメータ

本論文では、自由にカメラとプロジェクタを動かし

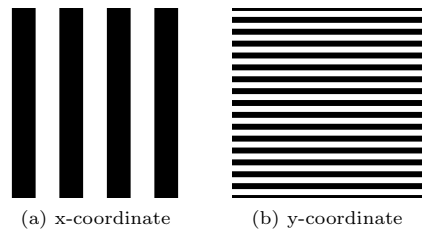


図 2 構造化光のパターン例

Fig. 2 Example of binary patterns for coded structured light.

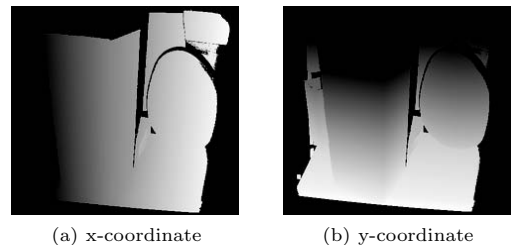


図 3 構造化光を用いて空間コード化された画像

Fig. 3 Coded images by structured light.

ても、校正をやり直す必要のないアクティブステレオシステムを構築する．そのため、計測データからカメラパラメータ、特に外部パラメータの自己校正が必要となる．本研究では、カメラの内部パラメータを既知とし、プロジェクタの内部パラメータのうち焦点距離を未知としている．これは、カメラの内部パラメータが、既存の多くの手法により比較的簡易かつ高精度に求められるのに対し、プロジェクタの内部パラメータを得る手法はそれほど一般的ではないためである．また、計測の際に、プロジェクタの焦点距離を動かす機会がカメラのそれよりも多いという、実用上の理由にもよる．したがって、本論文で自己校正により推定するパラメータは、外部パラメータとプロジェクタの焦点距離 f_p である．

3.3 自己校正と3次元復元

本論文では、Levenberg-Marquardt 法（以下 LM 法）による非線形最適化により、各パラメータの自己校正を行う．近年、計算機の計算能力が向上し、非線形最適化による計算量の増大が問題にならなくなってきたことから、最初から非線形最適化で3次元形状復元を行うことが研究されている¹⁷⁾．本論文でも、カメラモデルにおいて、推定を行うパラメータを選択する際の自由度の大きさなどから、このアプローチを利用する．

カメラ（あるいはプロジェクタ：以下、本段落では、プロジェクタに関する記述を、括弧の中に書く）に対して固定された座標系をカメラ座標系（プロジェクタ座標系）と呼び、この座標系で表された座標をカメラ座標（プロジェクタ座標）と呼ぶ．カメラ座標系（プロジェクタ座標系）の原点は、それぞれの機器の光学的中心点である．カメラ座標系（プロジェクタ座標系）における z 軸の負の方向が、カメラ（プロジェクタ）の前方となる．また、カメラ座標系（プロジェクタ座標系）の x 軸および y 軸方向は、その画像平面の水平および垂直軸に平行である．

プロジェクタの焦点距離を f_p とし、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、

$$(u_{pi}, v_{pi}, -f_p)^t \quad (1)$$

とする．ただし、右肩の t は転置を表す．

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 で表す．回転行列をオイラー角 $\alpha_p, \beta_p, \gamma_p$ で表し、対応する回転行列を $\mathbf{R}_p(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$ と表記する．平行移動ベクトル \mathbf{t}_p のノルムは、対応点のみからは決定できない．よって、 \mathbf{t}_p は単位ベクトルであると仮定し、これを極座標の2個の座標値 (ρ_p, ϕ_p) によって表現す

る．極座標の座標値で表現された \mathbf{t}_p を $\mathbf{t}_p(\rho_p, \phi_p)$ と表記する．

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、

$$(u_{ci}, v_{ci}, -1)^t \quad (2)$$

で表す．

エピソード拘束が成り立つとすると、カメラおよびプロジェクタから対応点方向に向けられた視線が交差する．プロジェクタから対応点に向かう直線をカメラ座標で表すと、

$$r\{\mathbf{R}_p(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)\}(u_{pi}/f_p, v_{pi}/f_p, -1)^t + \mathbf{t}_p(\rho_p, \phi_p) \quad (3)$$

である．ただし、 r は媒介変数である．カメラから対応点に向かう直線は

$$s(u_{ci}, v_{ci}, -1)^t \quad (4)$$

である． s は媒介変数である．

上記の2直線 (3) および (4) の3次元空間中での距離を最小化することで、エピソード拘束を成立させるようなパラメータを推定する．2直線の方向ベクトルを、

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{ci} &:= N(u_{ci}, v_{ci}, -1)^t, \\ \mathbf{q}_{ci}(\theta, f_p) &:= N\{\mathbf{R}_p(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)\}(u_{pi}/f_p, v_{pi}/f_p, -1)^t \quad (5) \end{aligned}$$

とする．ここで、 N はベクトルを正規化する演算子（つまり、 $N\mathbf{x} := \mathbf{x}/\|\mathbf{x}\|$ ）とし、 $\theta := (\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$ はプロジェクタの外部パラメータをまとめたものである．このとき、2直線の距離の式は

$$E_i(\theta, \tau, f_p) := \mathbf{t}_p(\tau) \cdot N(\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci}(\theta, f_p)) \quad (6)$$

となる．“ \cdot ” は内積を、 $\tau := (\rho_p, \phi_p)$ は平行移動パラメータを表す．

$E_i(\theta, \tau, f_p)$ は、推定パラメータ (θ, τ, f_p) や参照点番号 i に依存する系統的な誤差を含む．パラメータ (θ, τ, f_p) の推定を偏りなく行うには、予想される誤差の分散に関して、 $E_i(\theta, \tau, f_p)$ を正規化する必要がある．正規化された誤差を与えるために、いくつかの式を定義する．エピソード拘束を仮定して、カメラおよびプロジェクタから参照点への距離を D_{ci}, D_{pi} と表記する．これらの式は次のようになる．

$$\begin{aligned} D_{ci}(\theta, \tau, f_p) &:= \frac{\|\mathbf{t}_p(\tau) \times \mathbf{q}_{ci}(\theta, f_p)\|}{\|\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci}(\theta, f_p)\|}, \\ D_{pi}(\theta, \tau, f_p) &:= \frac{\|\mathbf{t}_p(\tau) \times \mathbf{p}_{ci}\|}{\|\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci}(\theta, f_p)\|}. \quad (7) \end{aligned}$$

また、カメラおよびプロジェクタから参照点への直線と、それぞれの機器の光軸方向とがなす角度をそれぞれ ψ_c, ψ_p とする．このとき、 $\zeta_c := \cos \psi_c$ 、

$\zeta_p := \cos \psi_p$ と定義すると,

$$\begin{aligned}\zeta_c &= \{N(u_{ci}, v_{ci}, -1)^t\}(0, 0, -1), \\ \zeta_p &= \{N(u_{pi}/f_p, v_{pi}/f_p, -1)^t\}(0, 0, -1) \quad (8)\end{aligned}$$

である.

ここで, カメラ上で観測された対応点位置の座標値 u_{ci} および v_{ci} には, 平均値 0, 標準偏差 ϵ_c の微小な加法的雑音加わると仮定する. 同様に, u_{pi}, v_{pi} には, 平均値 0, 標準偏差 ϵ_p の微小な雑音加わると仮定する. これにより $E_i(\theta, \tau, f_p)$ を確率変数と見なし, その標準偏差を $\epsilon_{E_i}(\theta, \tau, f_p)$ とすると,

$$\begin{aligned}\epsilon_{E_i}(\theta, \tau, f_p) \\ = \epsilon_c \zeta_c D_{ci}(\theta, \tau, f_p) + \epsilon_p \zeta_p D_{pi}(\theta, \tau, f_p)/f_p \quad (9)\end{aligned}$$

である. ϵ_{E_i} を用いると, 誤差に関して正規化された 2 直線の距離 $\tilde{E}_i(\theta, \tau, f_p)$ は

$$\tilde{E}_i(\theta, \tau, f_p) := E_i(\theta, \tau, f_p)/\epsilon_{E_i}(\theta, \tau, f_p) \quad (10)$$

と表される. この式を実際に誤差関数として用いる場合, 正規化座標の誤差の標準偏差 ϵ_c, ϵ_p を指定する必要がある. これらを決定する 1 つの方法としては, 正規化された画像平面における画素の大きさを ϵ_c, ϵ_p とすることがあげられる.

実際の観測データから自己校正を行う場合, データ中に存在するはずれ値への対処は重要である. 特に, 誤差の自乗和をそのまま目的関数にして最適化を行うと, はずれ値の影響を受けやすい場合が多い. 推定の頑健性を改善するための手法として, まず誤差を一定の区間 (たとえば区間 $(-1, 1)$) にまるめるような写像を行い, 写像された値の自乗和を目的関数にすることがよく知られている. 本論文では, 以下の関数で誤差を変換する.

$$S(x, c) := c(\exp(2x/c) - 1)/(\exp(2x/c) + 1) \quad (11)$$

この関数は, 区間 $(-\infty, \infty)$ から $(-c, c)$ への単調増加かつ滑らかな写像であり, $x = 0$ の近傍では $S(x) \approx x$ となる. 非線形最適化によって最小化する目的関数 $f(\theta, \tau, f_p)$ を以下のように定義する.

$$f(\theta, \tau, f_p) := \sum_{i=1}^K \{S(\tilde{E}_i(\theta, \tau, f_p), c)\}^2. \quad (12)$$

K は参照点の数を表す. c ははずれ値の閾値であり, 想定するはずれ値でない誤差の最大値に近い値を設定する.

上記の関数の最小化を LM 法によって行う. LM 法では, $S(\tilde{E}_i(\theta, \tau, f_p), c)$ についての Jacobian 行列が必要である. 本論文では, Jacobian 行列を数値差分によって求めた.

最適化によって推定されたパラメータ t_p と R_p を

ステレオ手法に適應することにより, 3 次元形状の復元が可能となる. 射影空間での 3 次元復元においては, Hartley ら¹⁸⁾ が指摘したように, 射影変換に不変な量に基づいて復元を行うことが望ましい. しかし, 本研究での 3 次元復元は相似変換の不定性を除いたユークリッド復元であるので, 3 次元点の位置は, ユークリッド距離に基づいて算出しても, 大きな問題とはならない. また, 本論文においては, 密な 3 次元データの表現形式として一般によく用いられる, 距離画像を想定しているため, 3 次元点はカメラの視点と各画素とを結び視線にあると仮定される. そこで, 本論文では, 各対応点について, カメラからの視線上にあり, プロジェクタからの視線とのユークリッド距離が最短になる点を 3 次元復元点とした.

3.4 複数シーンの同時 3 次元再構成

未校正ステレオ法ではスケーリングの値が決められないため, 実際の使用時には多くの問題がある. その 1 つに, 計測対象の全周形状を獲得するために全方向から計測を行ったとき, それぞれの計測ごとにスケーリングパラメータが異なることがあげられる. 本論文では, この問題に関して 2 つの解決手法を提案する. 1 つ目は, 複数の計測結果から同時にカメラパラメータの推定を行い, スケーリングの一貫性を保つ方法であり, 2 つ目はプロジェクタにレーザポイントを取り付けることで, 計測結果の実際のスケーリングを決定する方法である. まず本節では, 1 つ目の手法について述べる.

複数の計測結果から同時にカメラパラメータの推定を行い, 再構成を行うことを, 本論文では同時 3 次元再構成と呼ぶ. この処理は以下の手順で行われる. 前提として, 計測対象は移動可能であると仮定する. まず, カメラとプロジェクタの位置を固定したままで, 計測対象を動かしながら複数回の計測を行う. これらの計測データは, カメラとプロジェクタの内部および外部パラメータを共有する. よって, これらの計測で得られた対応点を, 同時に入力とすることにより, 3.3 節のアルゴリズムを用いて, これらの計測データの共通パラメータを推定することができる. 推定された共通パラメータを用いて, それぞれの計測データの 3 次元再構成を行う.

複数の計測データの同時再構成を行うことによる利点として, 各計測結果のスケーリングの一貫性を保つことができることがあげられる. これは, すべての計測結果が, 同じパラメータを利用して再構成されることによる. スケーリングの一貫性は, 単一物体を複数の方向から計測して, 結果を統合する場合には, 特に重要となる.

また別の利点として、解の安定性を改善することが期待できる。一般に、未校正 3 次元再構成を行う際に、解の安定性を悪化させる要因として、焦点距離の変化による観測値（この場合は q_{ci} ）の変化と、シーンとカメラとの距離の変化による観測値の変化が見分けにくいことがあげられる。異なる深さ値を持つ、複数のシーンの対応部分を利用すれば、これらの変化の差が容易に観測でき、解の安定性を改善することができると考えられる。特に、計測対象物体が平面に近い場合には、1 度の計測では不安定な解となるが、対象物体を動かして何度か計測し、同時再構成を行えば、安定化の効果が大きい。

3.5 複数の再構成結果の簡易的なバンドル調整

3.3 節で述べた自己校正およびステレオ法による 3 次元再構成では、対応点の数を増しても精度が上がりにくい場合がある。たとえば、カメラおよびプロジェクタから目標物体への距離が、シーンまでの深さの変化に比べて比較的大きく、デバイスへの投影が、擬似中心投影に近い場合などである。擬似中心投影を仮定した場合、2 枚の画像の対応点からは自己校正の解を求めることができない。また、投影が正射影投影や擬似中心投影に近い場合も、対応点の数にかかわらず解が不安定になる。このような現象の例を、後の 4.1 節の実験で示す。3.4 節で述べた同時 3 次元再構成によりシーンまでの深さの変化を大きくできる場合には、この問題を解決できる場合があるが、焦点深度が浅い場合などこの手法を利用しにくい場合もある。このような場合、3 枚以上の画像を利用することにより、解の不安定性を軽減することができる。3 枚以上の画像があれば、擬似中心投影の条件下でも、3 次元再構成を行うことが可能である（因子分解法¹⁹⁾ など）。

本節では、カメラあるいはプロジェクタの一方を固定し、もう一方の機器を動かしながら求めた対応点の集合から、簡易的なバンドル調整によって外部パラメータの自己校正結果の改良を行う手法を述べる。これにより、カメラとプロジェクタを固定して自己校正を行った場合よりも、精度を高めることができる。

バンドル調整を行うためには、カメラあるいはプロジェクタの片方を固定して、もう一方を動かしながら複数回の計測を行う。以下、本節では、プロジェクタを固定し、カメラを移動しながら撮影する場合について説明する。プロジェクタを移動する場合でも、処理はまったく同じである。

バンドル調整のために、すべてのカメラと、プロジェクタに共通の参照点を選び出す。これらの参照点の 3 次元座標と、すべてのカメラの外部パラメータと

を推定する。 i 番目の参照点の 3 次元座標（プロジェクタ座標系）の、プロジェクタから見たときの深さの推定値を d_i ($i = 1, 2, \dots, N_r$)、(N_r は参照点の数である) で、カメラ j の外部パラメータを θ_j で表す。これらの値の初期値としては、3.3 節で述べた自己校正および 3 次元再構成による結果を利用する。

バンドル調整のアルゴリズムは以下のとおりである。

Step 1 サンプリングによって、すべてのカメラとプロジェクタから観測可能な 3 次元点を、参照点として選ぶ。

Step 2 参照点の初期値を、1 つのカメラとプロジェクタに関する自己校正および 3 次元再構成によって求める。

Step 3 以下の手順を、 θ_j の変化が十分小さくなるまで繰り返す。

Step 3.1 すべてのカメラ番号 $j = 1, 2, \dots, N_c$ について、以下の手順を繰り返す。

Step 3.1.1 参照点のプロジェクタからの深さの、現在の推定値 d_i ($i = 1, 2, \dots, N_r$) から、カメラ j のカメラパラメータ θ_j を更新する。

Step 3.2 現在の θ_j から、 d_i ($i = 1, 2, \dots, N_r$) を更新する。

カメラパラメータ θ_j の更新は、以下のように行う。カメラ座標系で表された 3 次元点 \mathbf{x} を、 j 番目のカメラの外部パラメータ $\theta_j := \alpha_{c,j}, \beta_{c,j}, \gamma_{c,j}, \mathbf{t}_{c,j}$ によってプロジェクタ座標系へ変換した座標を、 $Trans(\theta_j, \mathbf{x})$ とする。標準カメラにおける射影を表す写像を $Proj$ と書く。

$$Q(\theta_j) := \sum_{i=1}^{N_r} \|Proj(Trans(\theta_j, (u_{pi}d_i/f_p, v_{pi}d_i/f_p, -d_{pi})^t)) - (u_{ci,j}, v_{ci,j})^t\|^2 \quad (13)$$

を θ_j について最小化することで、 j 番目のカメラの位置と方向を推定することができる。この最小化の処理は、LM 法などを用いて行うことができる。

参照点のプロジェクタからの深さの推定値 d_i ($i = 1, 2, \dots, N_r$) の更新は、以下のように行う。プロジェクタと各カメラの対応点から、その時点での外部パラメータの推定値をもとに参照点位置を再構成し、プロジェクタと参照点位置の距離を計算する。この距離の、各カメラに関する平均をとることで、新しい参照点を算出する。この処理は、以下のように行う。

Step 1 以下の処理を、カメラ番号 $j = 1, 2, \dots, N_c$ について繰り返す。

Step 1.1 各参照点とプロジェクトとの距離を、プロジェクトと j 番目のカメラとの対応点および外部パラメータ θ_j から求める。出力は、 k 番目の参照点のプロジェクトからの深さ $d_{k,j}$ とする。

Step 2 各参照点とプロジェクトとの距離の平均を

$$d_k = \sum_{j=1}^{N_c} d_{k,j} / N_c \text{ で求める。}$$

3.6 スケーリングパラメータの推定

求められた形状データは、実際の形状とスケールが異なる。前節で述べた同時再構成を用いると、複数の計測結果のスケールを一致させることができるが、実際のスケールを決定することはできない。これを決定する方法としては、

- (1) 計測対象の特定の点の距離を実測する、
- (2) 形状既知の物体をあらかじめ計測し、その後プロジェクトとカメラの位置を変えずに計測する、
- (3) 形状既知の物体を、計測対象と同時に計測する、という方法がある。しかしどの手法も計測の手間を増やし、手順を完全に自動化することは困難である。

本論文では、プロジェクトにレーザポイントを固定し、そのレーザの照射位置を計測時に測定することで、スケールの決定を行う方法を提案する。レーザポイントは、プロジェクト座標に対して固定された直線上に光を投射する。投射した光の直線の式はあらかじめ求めておく必要があるため、事前に、既知形状を持つ物体をレーザポイントで照射しながら複数回計測する。以下、例として、既知のサイズの立方体を利用する場合を仮定する。まず、レーザが立方体を照射するよう配置し、プロジェクトと立方体との距離を変えながら立方体の形状を提案手法により計測する。その際、複数の計測についてスケールを一致させ精度を高めるため、同時再構成 (3.4 節) による再構成を行う。これにより、スケールの一致した立方体の辺の長さが得られるが、スケールの自由度は残ったままである。そこで、この辺の長さが実スケールと一致するよう、原点を中心に相似変換することでスケールを決定する。これにより、レーザの照射する複数の点を実スケールのプロジェクト座標で表すことができる。こうして得られた複数の点を通る直線の式が求める光線の式である。レーザポイントをプロジェクトに対して固定しておけば、光線が通過する直線の式は不変のため、この手順はレーザポイントを取り付けるときに 1 度だけ実行すればよい。

計測対象物体のスケールを決定するには、計測時にレーザポイントで光を照射し、その照射位置をカメラで検出する。検出された点の、スケールを除

いて測定された 3 次元位置を、プロジェクト座標系で $(x_{pm} \ y_{pm} \ z_{pm})^t$ とする。実際の 3 次元位置は、スケールの大きさを λ とし、 $\lambda(x_{pm} \ y_{pm} \ z_{pm})^t$ と表される。 λ を媒介変数と見なすと、これらの点はプロジェクト座標の原点と、 $(x_{pm} \ y_{pm} \ z_{pm})^t$ とを結ぶ直線を表す。実際の 3 次元位置には、レーザポイントの光線も通過するので、直線 $\lambda(x_{pm} \ y_{pm} \ z_{pm})^t$ とあらかじめ求められたレーザポイントの光線との交点を求めることで、未定の λ を確定することができる。一般には、これらの直線はねじれの位置にあるので、それぞれの直線上の点が最も近くなる点の λ を求める。 $(x_{pm} \ y_{pm} \ z_{pm})^t$ を正規化したベクトルを d_{pm} 、レーザポイントの光線の単位方向ベクトルを d_{pl} 、レーザポイントの光線が通過する任意の点の位置ベクトルを t_{pl} とすると、このような λ は以下の式で求められる。

$$\lambda = \frac{(d_{pm} \cdot t_{pl}) - (d_{pl} \cdot t_{pl})(d_{pm} \cdot d_{pl})}{1 - (d_{pm} \cdot d_{pl})^2} \quad (14)$$

4. 実 験

4.1 シミュレーションによる精度評価

本論文で述べた自己校正手法の有効性を評価するため、シミュレーションによる精度評価を行った。シミュレーションで想定した形状は、2 枚の平面をカメラの正面近くに並べたものである。想定した形状と、カメラおよびプロジェクトの位置を、図 4(a) に示す。平面の大きさは、0.18 (横) \times 0.36 (縦) とした。これは、実際に計測に使用したカメラの 1 つを想定し、そのカメラに近い方の平面が、画面の縦方向の大きさ (480 画素) のうち、約 280 画素分を占めることを想定して決定した。また、カメラに対するプロジェクトの位置は、 $(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p) = (18.0^\circ, 28.0^\circ, 2.00^\circ)$ $t_p / \|t_p\| = (0.750, 0.600, 0.178)$ とし、 $f_p = 0.07$ とした。これは、実際の計測において現れたプロジェクト位置および焦点距離を参考にして決定した。

上記の想定条件で、平面上の点の位置を、カメラおよびプロジェクトから観測される画像座標 (正規化カメラ座標) に変換し、その座標にノイズとして、区間 $(-0.001, 0.001)$ の範囲の一樣乱数を加えた。一樣乱数の大きさは、想定した実カメラにおいて、正規化カメラ座標で表した約 1 画素分の大きさが約 0.0011 であることから決定した。異なる乱数列から、上記の座標値の組を作成することで、10 個のテストデータを作成した。それぞれのテストデータから、5000 個の点をランダムに抽出し、これらを入力として本論文の手法による 3 次元再構成を行った。このとき、パラメー

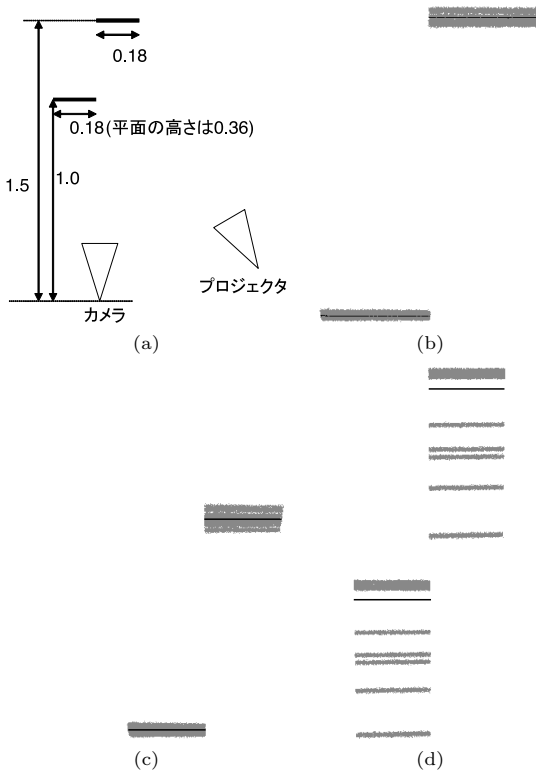


図 4 シミュレーションによる精度評価: (a) 物体および機器の配置, (b) 通常の結果 (黒: 真の位置, 灰色: 再構成結果), (c) サンプル数を 1/4 に減らした場合の結果, (d) カメラおよびプロジェクタの投影が正射影に近い場合の結果

Fig. 4 Estimation of precision by simulation: (a) Locations of the targets and equipments, (b) the result of the normal case (black: true positions, gray: reconstructed points), (c) the case when the number of correspondance points was reduced by 1/4, (d) the case when the projections of the camera and the projector were nearly orthographic.

タの初期値をそれぞれ, $\alpha_p = 0^\circ$, $\beta_p = 20^\circ$, $\gamma_p = 0^\circ$, $t_p = (1, 0, 0)$, $f_p = 0.05$ とした. 以後, この実験条件を, 条件 A と表記する.

すべてのテストデータからの再構成結果と, 点群の真の位置を重ね合わせ, y 軸方向から見たときの様子を図 4 (b) に示す. また, 各テストデータの再構成結果について, カメラに近い方の平面の z 座標の平均値を求めた. この値の真の値は -1.0 である. 求められた 10 個の値の, 平均値と標準偏差は, それぞれ -1.00146 および 0.00442 であった. これらの結果から, 本論文の 3 次元再構成は正しく動作しており, 精度良く結果が得られているといえる.

自己校正に用いる点の数の, 計測結果への影響を調べるため, 入力する点の数を 1,250 個 (条件 A の場合の 1/4) および 312 個 (条件 A の場合の約 1/16) に減

らして実験を行った. 1,250 個の場合の結果を図 4 (c) に示す. 統計学上, 結果の分布の広がり, は, 入力される点数の 2 乗に反比例するとされるため, 標準偏差は 1,250 個の場合に 2 倍, 312 個の入力の場合 4 倍程度が期待されるが, 実際に得られた結果は, カメラに近い方の平面位置において, 1,250 個の入力の場合で 0.00713 (条件 A の場合の 1.61 倍), 312 個の入力の場合で 0.0115 (条件 A の場合の 2.59 倍) であった. このように, 得られた結果は理論値より若干良い精度を示したものの, 理論値と類似した傾向を持つことが分かる. このことは, 自己校正において, できるだけ多くの点を入力として用いることの重要性を示している. 提案手法で, 密な点を入力として用いることができることは, 精度向上のために大きな利点を持つ.

3.5 節で, 投影が正射影投影や疑似中心投影に近い場合に, 自己校正が不安定になると述べた. この例を示すため, 投影が正射影に近い場合を想定し, 再構成の実験を行った. このために, 条件 A に対して, カメラおよびプロジェクタの焦点距離を 10 倍にした条件を設定した. さらに, シーンの重心から, カメラおよびプロジェクタまでの距離を, 比例変換によって 10 倍にした. これは, シーンからの距離を 10 倍にし, 同時にカメラおよびプロジェクタの画像を 10 倍にズームしたことに相当する. その他の条件は, 条件 A と同様にした. 再構成の結果を図 4 (d) に示す. この図より, 再構成結果の精度が, 条件 A の場合と比べて大きく悪化していることが分かる. これは, カメラおよびプロジェクタの焦点距離が長くなったことにより, 投影が正射影に近くなり, 自己校正のための情報が得にくくなったためと考えられる.

3.3 節で, (θ, τ, f_p) の推定を偏りなく行うための誤差の正規化について述べた. 誤差の正規化の効果を示すため, 正規化を行わない場合の自乗和 $\sum_{i=1}^K \{S(E_i(\theta, \tau, f_p), c)\}^2$ を目的関数として採用した場合と, 式 (12) を採用した場合との再構成結果を比較した. テストデータは, 上記の実験と同じ条件で作成した. ただし, ノイズとして使用する乱数は, 区間 $(-0.0005, 0.0005)$ の一様乱数とした. これは, 区間 $(-0.001, 0.001)$ の乱数では, 正規化を行わない場合に, 結果が大きく異なり, 比較が困難になったためである. 図 5 に結果を示す. 図から, 正規化された誤差を利用しない場合, 結果に大きな偏りが生じていることが確認できる.

4.2 実データによる精度評価

実データから再構成を行った場合の, 本システムの精度を確かめるため, 既知の形状を持った物体を計測

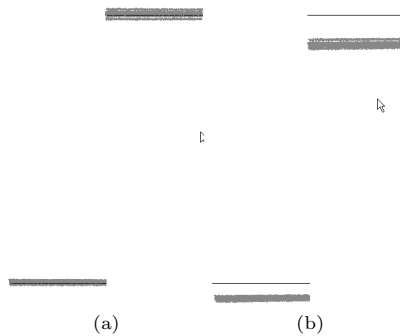


図 5 誤差の正規化の効果：(a) 正規化あり，(b) 正規化なし
Fig. 5 Effect of normalization of errors: (a) with normalization, (b) without normalization.

し，求められた点群と実際の形状との比較，および自己校正の精度評価を行った．既知の物体としては 20 cm 四方の立方体を用いた．図 6 (a)–(c) に計測する対象を示す．

本実験では，同時 3 次元再構成手法による効果を確かめるために，同じシーンに対して，同時 3 次元再構成手法と，個別での再構成手法（以下，同時再構成と対比して，個別再構成）とを適用し，結果の比較を行った．また，自己校正についての評価を行うために，マーカを用いて陽に外部パラメータの校正を行ったデータとの比較も行った．

実験の手順としては，カメラとプロジェクタの位置を固定して，立方体形状の位置を変えながら 5 回計測を行った．同時 3 次元再構成手法の際には，この 5 回の計測データすべてを同時に用いて自己校正を行い，外部パラメータを求め，そのパラメータを用いてステレオ復元により，5 回計測したそれぞれの 3 次元形状復元を行った．個別再構成の際には，1 回ごとに自己校正および 3 次元形状復元を行っている．また，カメラ・プロジェクタ間の自己校正はプロジェクタの焦点を固定する・しないの 2 つの条件下で行った．固定する場合の f 値としては，前述のマーカを用いて外部校正により求めた値を用いた．

自己校正の精度評価実験においては，プロジェクタとカメラ間の位置を表す各パラメータの初期値をそれぞれ， $\alpha_p = 0^\circ$ ， $\beta_p = 20^\circ$ ， $\gamma_p = 0^\circ$ ， $t_p = (1, 0, 0)$ ， $f_p = 0.05$ とし，最適化を行った．はずれ値の閾値 c は 0.005 とした．プロジェクタの焦点は固定とし，1 回だけの計測を評価の対象とした．結果を表 1 に示す．提案手法により，パラメータが高い精度で推定できていることが確認できる．

次に，3 次元復元した結果を図 6 (d)–(f) に示す．また，図 6 (c) に示す 3 平面 (A, B, C) に平面あては

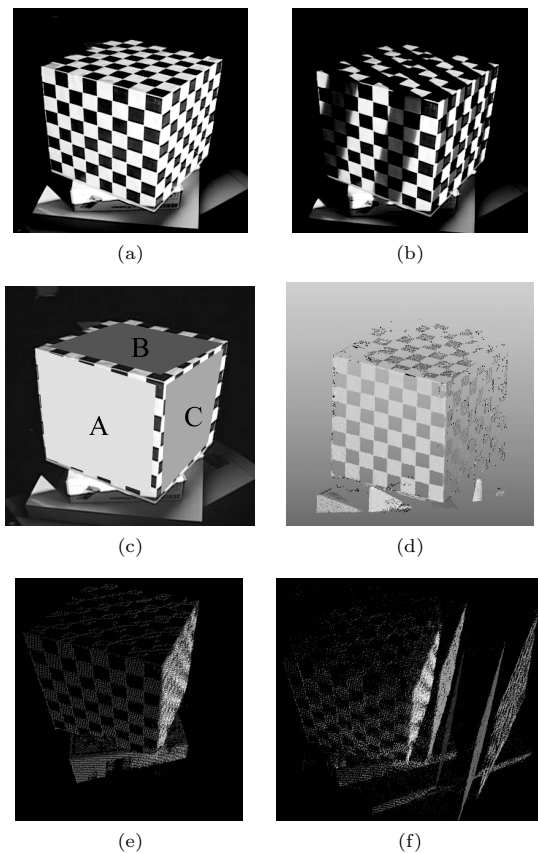


図 6 立方体の計測実験：(a) 計測対象，(b) 構造化光を照射，(c) 推定に用いる 3 平面，(d) 3 次元再構成例，(e) 同時 3 次元再構成手法により復元した 3 次元点，(f) 個別に再構成し得られた 3 次元点

Fig. 6 Scanning of a cube with known size: (a) the scanned scene, (b) the scene lit by structured light, (c) 3 faces used for accuracy estimations, (d) reconstructed 3D points (single-scene reconstruction, self-calibrated focal length), (e) 3D point set acquired by single-scene reconstruction, and (f) 3D point set acquired by simultaneous reconstruction.

表 1 カメラの自己校正によるパラメータ推定

Table 1 Parameters estimated by calibration and from data.

	外部校正	自己校正
f_p	0.0338 [m]	0.0329 [m]
$(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$	$(-9.3^\circ, -31.6^\circ, -13.0^\circ)$	$(-8.2^\circ, -30.9^\circ, -12.7^\circ)$
$t_p / \ t_p\ $	$(-0.610, 0.446, -0.655)$	$(-0.581, 0.441, -0.684)$

めを行った．これは，各平面を構成する点の集合に対して主成分分析を適用することで行った．推定した平面を表すパラメータを用いて，平面間の角度を計算した．5 回行った実験データのうち 1 つの結果を例として表 2 に示す．また，5 回の計測データを集計し，実際の角度 (90°) からのずれと，平面あてはめの残差

表 2 平面間の角度推定結果の例

Table 2 An example of estimated angles between planes.

f_p	個別再構成		同時再構成	
	固定	自己校正	固定	自己校正
AC 間角度	89.95°	90.23°	90.17°	90.06°
BC 間角度	89.87°	90.99°	89.88°	90.56°
AB 間角度	90.39°	92.09°	90.07°	91.33°

表 3 平面の推定結果の統計情報

Table 3 Statistical information of estimations of planes.

f_p	個別再構成		同時再構成	
	固定	自己校正	固定	自己校正
90 からの 変位の平均	0.02°	2.65°	-0.01°	-0.52°
90 からの RMS 誤差	0.10°	3.78°	0.07°	1.79°
平面あてはめの RMS 誤差 (mm)	0.72	0.77	0.62	0.65

の平均 2 乗誤差 (RMS errors) のそれぞれを表 3 に示す。ここで、平面と平面のなす角度は、ユークリッド復元が正しくできているかの目安であり、また、平面あてはめの残差は、システムにおける雑音や量子化誤差の影響の目安と考えることができる。

実験結果より、各状況下において立方体形状が正確に 3 次元復元されていることが分かる。同時 3 次元再構成手法と個別再構成手法との結果を比較すると、平面と平面のなす角度、および、平面あてはめの残差、いずれにおいても、結果が改善されており、同時 3 次元再構成手法の有用性が確認できた。また、プロジェクトの焦点を固定しなかった場合においても、マーカを用いた従来の外部校正とほぼ同程度の結果が得られており、プロジェクトのズームを自由に動かして計測可能であることが分かる。

次に、本手法による 3 次元復元の結果を、既存の 3 次元デジタイザ (ミノルタ社製 Vivid910) による計測結果と比較する実験を行った。測定対象は、高さ約 0.15 m のプラスチック容器を用いた。対象を、本手法および Vivid910 で 1 方向から計測し、ICP^{20),21)} の手法を用いて位置あわせを行った。測定対象の外観と、位置あわせの結果を図 7 に示す。図の右中段、右下段の断面図から、これらの形状がよく一致していることが分かる。さらに、両形状の定量的な差を求めた。差の基準としては、本手法によって求められた各点と、Vivid910 で生成されたメッシュとの、計測方向から見た深さの差の距離の自乗和の平方根を求めた。求められた値は、 4.3×10^{-4} m であった。これは、十分に小さい値であり、提案手法が複雑な形状計測に利用可能であることが分かる。

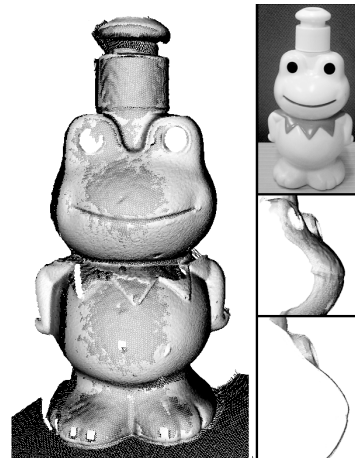


図 7 既存 3 次元デジタイザの復元結果との比較：(左)位置あわせされた復元結果。明るい色のメッシュは既存デジタイザの結果を、暗い色のメッシュは本手法の結果を表す。(右上段)測定対象外観。(右中段、右下段)位置あわせされた復元結果の、顔の部分の断面

Fig.7 Comparisons between results of the proposed method and a conventional 3D digitizer: (Left) The registered 3D meshes. The brighter mesh is the result of the conventional 3D digitizer and the darker mesh is the result of the proposed method. (Upper right) An appearance of the target object. (Middle right, Lower right) Cross sections of the face part of the registered 3D meshes.

4.3 同時 3 次元再構築手法による全周形状復元

同時 3 次元再構成手法により、複数の計測に対してスケージングの曖昧性を解消することができるため、たとえば、対象物体を回転させながら計測し、それらを同時 3 次元再構成すれば、スケージングずれのない形状統合が実現できる。実験の手順として、回転テーブル上に対象物体を置き、45° 間隔で 8 回計測を行った。同時 3 次元再構成手法により 3 次元形状を復元し、最後に位置あわせを行った。図 8 に計測物体と復元例を示す。提案手法により、未校正アクティブステレオシステムにおいて、スケージングのばらつきのない全周形状取得が実現できていることが分かる。

4.4 カメラ (プロジェクタ) を動かしての計測・統合

最後に、カメラ (プロジェクタ) を動かしながら、対象物体を計測する。本論文で提案する手法は、外部校正が必要ないため、カメラ (プロジェクタ) を動かしながら連続的に計測することができる。さらに、このとき、カメラかプロジェクタかいずれかを固定しておけば、広い範囲を位置あわせ処理することなく、最初から位置あわせのされた状態で形状復元することができる。計測結果を図 9 に示す。この実験ではカメラ

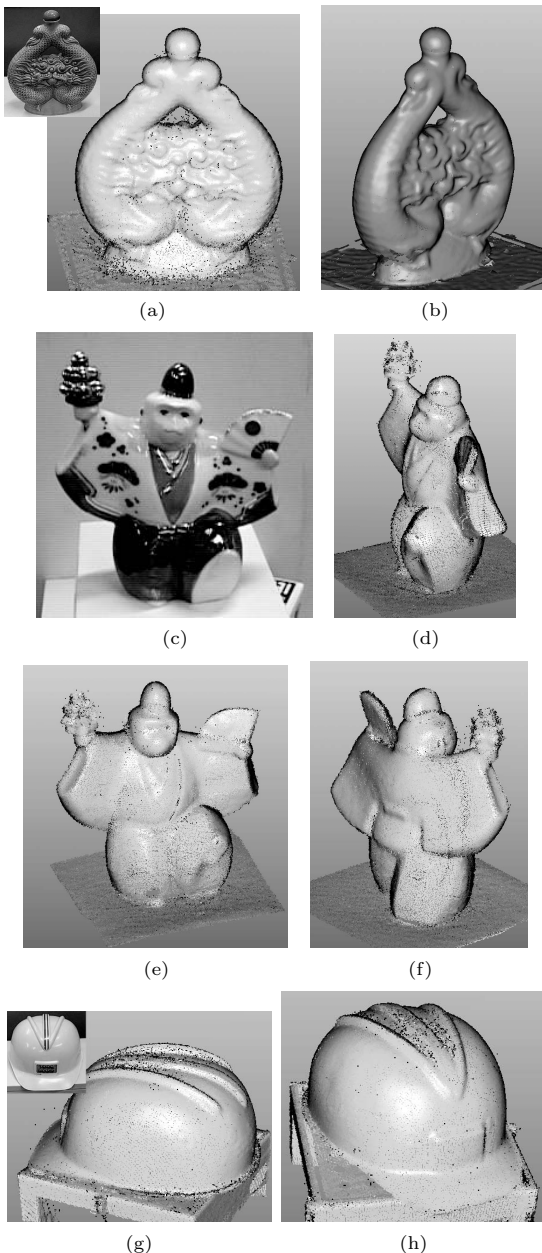


図 8 計測対象と計測結果：(a)(b) 装飾つぼ，(c)(d)(e)(f) 陶器の人形，(g)(h) ヘルメット

Fig. 8 Examples of the scanned objects: (a)(b) an ornamental bottle, (c)(d)(e)(f) a china figurine, (g)(h) a helmet.

を動かして計測を行っている．複数の形状が正しい位置に，一貫したスケールで計測できていることが分かる．また，1 回の計測に比べて，広い範囲が計測できていることも分かる．

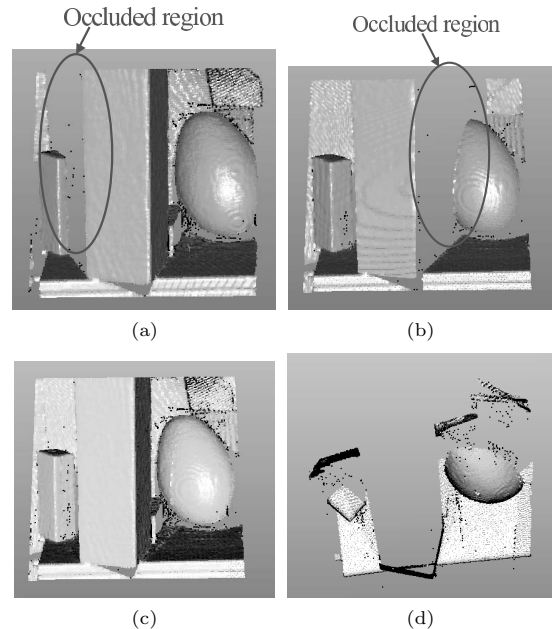


図 9 カメラを動かした計測実験：(a) カメラを初期位置に設置し復元した 3 次元点データ，(b) カメラの位置を変更し復元した 3 次元点データ，(c) 統合結果（位置あわせ処理は特に行っていない），(d) 上からの視点での統合した 3 次元データ

Fig. 9 Scanning an intricate scene from various view directions: (a) the scanned point set with the first camera position, (b) the scanned point set with the second camera position, (c) the integrated point set, and (d) the integrated point set shown from the top.

5. ま と め

本論文では，事前にカメラ校正を必要としない，アクティブステレオ方式による 3 次元計測手法を提案した．提案した手法では，事前のカメラ・プロジェクタ間の外部校正が不要であり，また，特殊な専用の装置を用意する必要がまったくなく，かつ一度のスキャンで密な 3 次元形状復元が可能である．

提案した手法を用いれば，自由にプロジェクタとカメラを設置し，事前校正という手順を踏むことなく即座に密な形状を取得することができる．また，これにより，プロジェクタを自由に移動しながら連続的に計測することができ，広い範囲を正確に効率良く計測することが可能である．

さらに，繰り返し計測したすべてのデータを用いて，カメラとプロジェクタ間の自己校正を同時に行うことで，頑健かつスケールの一貫性を保った 3 次元復元が実現可能な手法を提案した．

実験で示した評価や計測例から，提案手法により高い精度で密な 3 次元復元を行うことができること，および本手法の有効性を示すことができた．

参 考 文 献

- 1) Hall-Holt, O. and Rusinkiewicz, S.: Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects, *Int. Conf. Computer Vision*, Vol.2, pp.359–366 (2001).
- 2) Bouguet, J.Y. and Perona, P.: 3D Photography on Your Desk, *Int. Conf. Computer Vision*, pp.129–149 (1998).
- 3) Fisher, R.B., Ashbrook, A.P., Robertson, C. and Werghe, N.: A Low-Cost Range Finder using a Visually Located, Structured Light Source, *2nd Int. Conf. on 3DIM*, pp.24–33 (1999).
- 4) Chu, C.W., Hwang, S. and Jung, S.K.: Calibration-free Approach to 3D Reconstruction Using Light Stripe Projections on a Cube Frame, *3rd Int. Conf. on 3DIM*, pp.13–19 (2001).
- 5) Tatsuka, M., West, G.A.W., Venkatesh, S. and Caelli, T.M.: Low-cost Interactive Active Monocular Range Finder, *CVPR99*, Vol.1, pp.444–449 (1999).
- 6) Davis, J. and Chen, X.: A Laser Range Scanner Designed for Minimum Calibration Complexity, *3rd Int. Conf. on 3DIM*, pp.91–98 (2001).
- 7) Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Interactive Shape Acquisition using Marker Attached Laser Projector, *Int. Conf. on 3DIM2003*, pp.491–498 (2003).
- 8) Fofi, D., Salvi, J. and Mouaddib, E.M.: Uncalibrated Vision based on Structured Light, *ICRA*, pp.3548–3553 (2001).
- 9) Chen, S.Y. and Li, Y.F.: Self-recalibration of a colour-encoded light system for automated three-dimensional measurements, *Measurement Science and Technology*, Vol.14, pp.33–40 (2002).
- 10) Sukthankar, R., Stockton, R. and Mullin, M.: Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems, *Proc. International Conference on Computer Vision* (2001).
- 11) Raskar, R. and Beardsley, P.A.: A Self-Correcting Projector, *CVPR (2)*, pp.504–508 (2001).
- 12) Okatani, T. and Deguchi, K.: Autocalibration of a projector-camera system, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, Vol.27, No.12, pp.1845–1855 (2005).
- 13) 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).
- 14) Caspi, D., Kiryati, N. and Shamir, J.: Range imaging with adaptive color structured light, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, Vol.20, No.5, pp.470–480 (1998).
- 15) Boyer, K.L. and Kak, A.C.: Color-encoded structured light for rapid active ranging, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, Vol.9, No.1, pp.14–28 (1987).
- 16) Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range imaging system for 3-D object recognition, *ICPR*, pp.806–808 (1984).
- 17) Amano, A., Migita, T. and Asada, N.: Stable Recovery of Shape and Motion from Partially Tracked Feature Points with Fast Non-linear Optimization, *15th Vision Interface*, pp.244–251 (2002).
- 18) Hartley, R.I. and Sturm, P.: Triangulation, *Computer Vision and Image Understanding: CVIU*, Vol.68, No.2, pp.146–157 (1997).
- 19) Tomasi, C. and Kanade, T.: Shape and motion from image stream under orthography: A factorization method, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.9, pp.137–189 (1992).
- 20) Chen, Y. and Medioni, G.: Object modeling by registration of multiple range images (1992).
- 21) Nishino, K. and Ikeuchi, K.: Robust simultaneous registration of multiple range images (2002).

(平成 17 年 9 月 20 日受付)

(平成 18 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 八木 康史)



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系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助教授。主としてコンピュータ・ビジョン、コンピュータ・グラフィックに関する研究に従事。



大沢 裕 (正会員)

1976 年信州大学工学部電子工学科卒業。1978 年信州大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。東京大学生産技術研究所助手、埼玉大学工学部助手、助教授等を経て、1998 年より、埼玉大学工学部情報システム工学科教授。工学博士。地理情報システム、時空間情報システムの研究に従事。信学会論文賞受賞。映像情報メディア学会、地理情報システム学会、ACM 各会員。



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。同年広島市立大学情報科学部助手。コンピュータ・ビジョン、コンピュータ・グラフィックに関する研究に従事。工学博士。



中村 泰明 (正会員)

1979 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻前期課程修了。同年三菱電機株式会社入社。中央研究所勤務。画像処理、パターン認識、空間データ構造、バーチャルリアリティ技術等の研究開発に従事。1994 年広島市立大学情報科学部教授、現在に至る。工学博士。