

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^{††}

[†] 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: [†]{kawasaki,ohsawa}@mm.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 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、計測装置が大掛かりになる傾向があった。もし、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であれば、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。提案手法は一对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出来る。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次元点復元が実現出来る。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、スケーリングのそろった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。

キーワード 3次元形状復元, アクティブステレオ, 未校正カメラ, 自己校正, パターンコード化法

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

Hiroshi KAWASAKI[†], Yutaka OHSAWA[†], 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: [†]{kawasaki,ohsawa}@mm.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract 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 (e.x. planer object) or camera models (e.x. 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.

Key words 3D reconstruction, active stereo system, uncalibrated camera system, self-calibration, coded structured light

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つに分けることが出来る。

前者は、複数枚の画像さえあれば形状を復元できるため、特殊な装置などが必要無く手軽に計測を行うことが出来、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ー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、レーザーのスキャ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挙げられる。例えば、レーザー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光構造投影装置など、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。中でも、以下にあげる幾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で得ることができる。
- 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出来る。

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挙げられる。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は計測装置を移動する度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無くなれば、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。この方式は、カメラ同士のパッシブステレオペアにおける自己校正方式における一方のカメラをプロジェクタに置き換えたものと同等と考えることが出来る。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、本手法では非常に密な対応点を得られることにある。そのため、本手法では、密な対応点により安定した自己校正が実現でき、また密な3次元復元が実現出来る。さらに、3次元精度向上のため、繰り返し幾度が計測したすべてのデータを同時に用いることで、よりロバストかつ高精度に3次元復元する手法についても提案する。同時に、未校正の3次元形状の再構築において

は決定できないスケールを簡易な装置で決定する手法についても提案する。

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。高い精度で、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ー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は、モータの精密な制御が必要であり、大掛かりかつ、高価な機器となってしまうことが一般的であった。そのため、モータ等の必要ない構造化光を用いたアクティブステレオシステムが最近広く用いられている。ところが、計測前の事前校正が必要なことが、構造化光を用いたシステムの利便性をこれまで大きく損なっていた。

そこで、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提案されている[1]~[6]。例えば高塚[4]や古川[6]など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ている。これらは、毎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取得出来るという利点がある。しかし、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付け、それを毎フレーム撮影し校正を行う手法のため、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[7]。しかし、提案手法は、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、実用的なシステムではなかった。

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。プロジェクタには1つのレーザーポイントが固定してある。このレーザーポイントは、スケールを実スケールに合わせるために用いられる。スケールの一貫性が必要ない場合、このレーザーポイントは不要である。

計測時には、対象物体にプロジェクタとカメラを向け、計測を始める。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、特に制限は無い。
- プロジェクタ及びカメラの位置を変えても、校正をやり直す必要が無い。
- 計測は全て自動であり、人手を介す必要が無い。
- 密な距離画像が、スケールリングの曖昧性無く求められる。

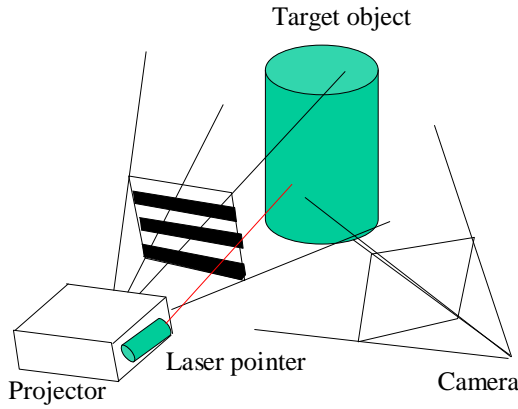


図1 提案する3次元計測システムの構成
Fig.1 Components of the 3D measurement system.

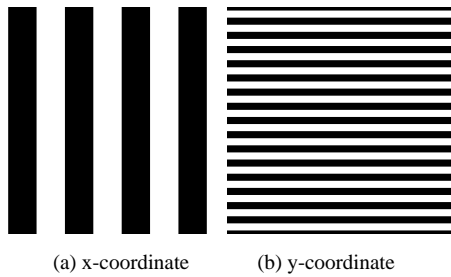


図2 構造化光のパターン例
Fig.2 Example of binary patterns for coded structured light.

3.1 パターンコード化法による対応点探索

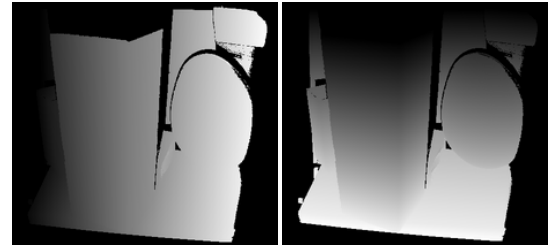
アクティブステレオ方式においては、構造化光を用いた3角測量により、3次元獲得することが良く行われる。その際、効率良く対応点を得る手法として、パターンコード化法がこれまで多く提案されて来ている[8]~[12]。これは、コード化したパターンを対象物体に投影し、撮影された画像上のパターンをデコードすることで、光の照射された位置の識別を実現する方式である。

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点を得ることとする。用いたパターンは、井口ら[11]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出来る。

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を得るには、既存の多くの手法から比較的簡易に精度良く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



(a) x-coordinate (b) y-coordinate
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.

は、それ程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。従って、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、ガウス・ニュートン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[13]。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ー:以下、本段落では、プロジェクターに関する記述を、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(プロジェクター座標系)と呼び、この座標系で表された座標をカメラ座標(プロジェクター座標)と呼ぶ。カメラ座標系(プロジェクター座標系)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(プロジェクター座標系)におけるz軸の負の方向が、カメラ(プロジェクター)の前方となる。また、カメラ座標系(プロジェクター座標系)のx軸及びy軸方向は、その画像平面の水平及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。

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 R_p と平行移動ベクトル t_p であらわす。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 $R_p(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$ と表記する。平行移動ベクトル $\|t_p\|$ のノルムは、対応点のみからは決定できない。よって、 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 t_p を $t_p(\rho_p, \phi_p)$ 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．

エビポーラ拘束が成り立つとすると，カメラ及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，エビポーラ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，

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

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) の推定を偏り無く行うには，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．エビポーラ拘束を仮定して，カメラとプロジェクタから参照点への距離は次のようになる．

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

この距離を用いれば，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

$$\begin{aligned} w_i(\theta, \tau, f_p) &:= \{\epsilon_c D_{ci}(\theta, \tau, f_p) + \epsilon_p D_{pi}(\theta, \tau, f_p)/f_p\}^{-1}, \\ \tilde{E}_i(\theta, \tau, f_p) &:= w_i(\theta, \tau, f_p) E_i(\theta, \tau, f_p) \end{aligned} \quad (8)$$

と表される．ここで ϵ_c と ϵ_p は，カメラおよびプロジェクタに固有の誤差を，正規化された画像平面における距離として表したものとす．本論文の実験では，正規化された画像平面における画素の大きさを，これらの値として用いた．

非線形最適化によって最小化する関数 $f(\theta, \tau, f_p)$ は，以下のよう記述できる．

$$f(\theta, \tau, f_p) := \sum_{i=1}^K \{\tilde{E}_i(\theta, \tau, f_p)\}^2. \quad (9)$$

K は参照点の数を表す．

上記の関数の最小化を，ニュートン法によって次のように行うことができる． j 回目の繰り返し処理における解を $(\theta_j, \tau_j, f_{p,j})$

とする．このとき，連立線型方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \alpha_p} \Delta \alpha + \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \beta_p} \Delta \beta + \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \gamma_p} \Delta \gamma + \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \rho_p} \Delta \rho \\ + \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \phi_p} \Delta \phi + \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial f_p} \Delta f = -\tilde{E}_i(\theta_j, \tau_j, f_{p,j}), \\ i = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (10)$$

の解 $\Delta \alpha, \dots, \Delta f$ により， $(\theta_j, \tau_j, f_{p,j})$ の値を改良していく．

ただし，偏微分 $\frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \alpha_p}, \dots, \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial f_p}$ は， $\theta = \theta_j, \tau = \tau_j, f_p = f_{p,j}$ $(\theta_j, \tau_j, f_{p,j})$ における値をとる． $N > 6$ (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 $\Delta \alpha, \dots, \Delta f$ 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．

$$\begin{aligned} \theta_{j+1} &= \theta_j + (\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma), \\ \tau_{j+1} &= \tau_j + (\Delta \rho, \Delta \phi), \\ f_{p,j+1} &= f_{p,j} + \Delta f. \end{aligned} \quad (11)$$

\mathbf{q}_{ci} が α_p に依存し， \mathbf{t}_p が α_p に依存しないので， $\frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \alpha_p}$ は，

$$\frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \alpha_p} = w_i(\theta, f_p) \mathbf{t}_p \cdot \left\{ \frac{(\mathbf{p}_{ci} \times \frac{\partial \mathbf{q}_{ci}}{\partial \alpha_p})_{\perp(\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci})}}{\|\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci}\|} \right\} \quad (12)$$

の式により求められる．ただし， $\mathbf{x}_{\perp \mathbf{y}}$ は，ベクトル \mathbf{x} において， \mathbf{y} に垂直な成分を表す (つまり， $\mathbf{x}_{\perp \mathbf{y}} := \mathbf{x} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{y})\mathbf{y}/\|\mathbf{y}\|^2$)． $\frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \beta_p}, \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \gamma_p}, \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial f_p}$ も同様に求められる．

$\frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \rho_p}$ は， \mathbf{t}_p が ρ_p に依存し， \mathbf{q}_{ci} が ρ_p に依存しないので，

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \rho_p} &= \frac{\partial w_i}{\partial \rho_p} E_i \\ &+ w_i(\theta, f_p) \left(\frac{\partial \mathbf{t}_p}{\partial \rho_p} \right) \cdot N(\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci}). \end{aligned} \quad (13)$$

の式により求めることができる． $\frac{\partial \tilde{E}_i}{\partial \phi_p}$ も同様である．

式 (10) から成る連立方程式の係数行列を， $N \times 6$ 行列 M とする．連立方程式の安定性を， M の最大特異値 λ_{max} と及び最小特異値 λ_{min} の比 $\lambda_{min}/\lambda_{max}$ で評価することができる．この値は， M の 6 個の列ベクトルの「線形独立性の強さ」の評価値でもある．

式 (13) より，エビポーラ平面の法線ベクトル $N(\mathbf{p}_{ci} \times \mathbf{q}_{ci})$ の分散が小さいと， M の列ベクトルの線形独立性が弱くなり，解の安定性が悪くなる．これは，プロジェクターをカメラの横に置く場合，カメラあるいはプロジェクターに対するシーンの上下の画角が小さい場合に相当する．

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，直接 3 次元形状の復元が可能となる．

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挙げられる。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。一つ目は、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ことであり、二つ目はプロジェクト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、一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ト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ト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挙げられる。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出来る。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挙げられる。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。例えば、カメラおよびプロジェクト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。よって、投影が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。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、焦点深度が小さ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[14]など)。

本節では、カメラあるいはプロジェクトの一方を固定し、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ト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トの片方を固定して、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、プロジェクトを固定し、カメラを移動しながら撮影する場合について説明する。プロジェクト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、全てのカメラと、プロジェクト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、全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(プロジェクト座標系)の、プロジェクトからみ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通りである。

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

Step 2 参照点の初期値を、一つのカメラとプロジェクト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 全てのカメラ番号 $j = 1, 2, \dots, N_c$ 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トからの深さの、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 $\theta_j := \alpha_{c,j}, \beta_{c,j}, \gamma_{c,j}, t_{c,j}$ によってプロジェクト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。

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

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、ニュートン法などを用いて行うことができる。

参照点のプロジェクト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。プロジェクト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元に参照点位置を再構成し、プロジェクト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 $d_k = \sum_{j=1}^{N_c} d_{k,j} / N_c$ 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リングが異なる。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リングを一致させることができるが、実際のスケーリング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、スケーリング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を照射しながら複数回計測する。これにより、光線上の複数の点をプロジェクト座標で表し、それらを通る直線の式を算出することが出来る。この作業は、プロジェクトにレーザポイントを取り付けたときに1度だけ実行すれば良い。

計測対象物体のスケーリングを決定するには、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、スケーリング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、スケーリングの大きさを λ とし、 $\lambda(x_{pm} \ y_{pm} \ z_{pm})^t$ と表される。 λ を媒介変数とみなすと、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 を確定することが出来る。

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.

	By calibration	From data
f_p	0.0338[m]	0.0329[m]
$(\alpha_p, \beta_p, \gamma_p)$	(-9.3°, -31.6°, -13.0°)	(-8.2°, -30.9°, -12.7°)
$t_p / \ t_p\ $	(-0.610, 0.446, -0.655)	(-0.581, 0.441, -0.684)

4. 実験

4.1 精度評価

本論文の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20cm四方の立方体を用いた。図4(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、マーカー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トの位置を固定して、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回の計測データ全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。個別復元の際には、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・プロジェクト間の自己校正はプロジェクトの焦点を固定する・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、前述のマーカー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、プロジェクト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。プロジェクトの焦点は固定とし、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4(d)-(f)に示す。また、図4(c)に示す3平面(A,B,C)に平面当てはめを行った。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、平面当てはめの残差の平均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出来ているかの目安であり、また、平面当てはめの残差は、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出来る。

実験結果より、立方体形状がすべての状況下において正確に3次元復元されていることがわかる。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、平面当てはめの残差、いずれにおいても、結果が改善

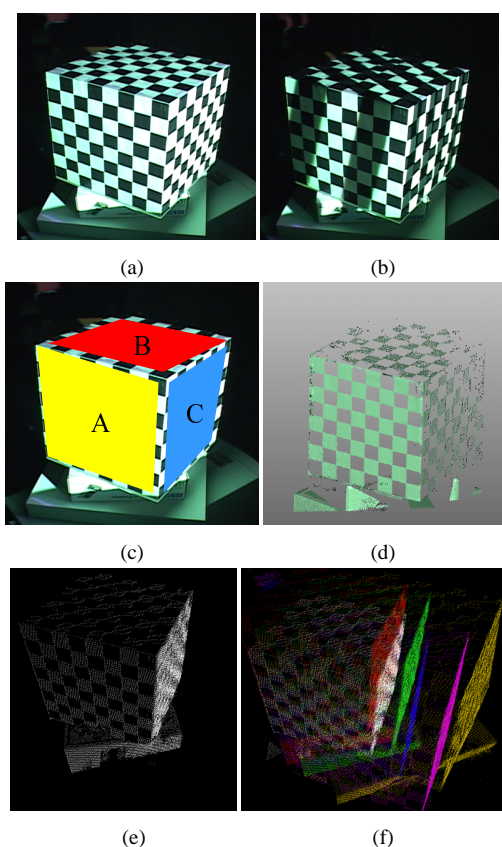


図4 立方体の計測実験: (a) 計測対象, (b) 構造化光を照射, (c) 推定に用いる3平面, (d) 3次元再構成例, (e) 同時3次元再構成手法により復元した3次元点, (f) 個別に再構成し得られた3次元点

Fig. 4 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.

しており, 同時3次元再構成手法の有用性が確認できた. また, プロジェクタ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, プロジェクタ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.

4.2 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リングの曖昧性を解消することが出来るため, 例えば, 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, スケーリ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5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, スケーリングのばらつきのない全周形状取得が実現出来ていることが分かる.

4.3 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,

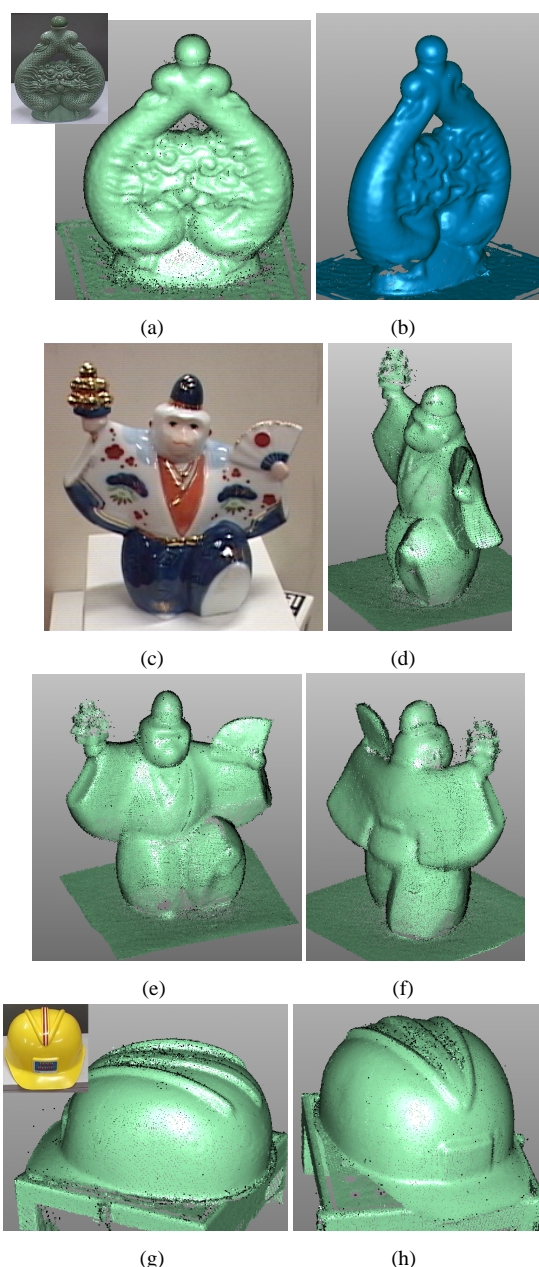


図5 計測対象と計測結果:(a)(b) 装飾つぼ, (c)(d)(e)(f) 陶器の人形, (g)(h) ヘルメット

Fig. 5 Examples of the scanned objects:(a)(b) an ornamental bottle, (c)(d)(e)(f) a china figurine, (g)(h) a helmet.

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出来る. さらに, この時, 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出来る. 計測結果を図6に示す. この実験ではカメラ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, 一貫したスケーリング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.

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

表 2 各平面間の角度推定

Table 2 Results of angles between estimated planes.

	Actual value	Single Input		Simultaneous method	
		Fixed	Self-calibrated	Fixed	Self-calibrated
Projector focus					
Angle between A-C	90.00°	89.95°	90.23°	90.17°	90.06°
Angle between B-C	90.00°	89.87°	90.99°	89.88°	90.56°
Angle between A-B	90.00	90.39°	92.09°	90.07°	91.33°

表 3 3次元再構成の完成結果

Table 3 Summary of 3D reconstruction.

Projector focus	Single Input		Simultaneous method	
	Fixed	Self-calibrated	Fixed	Self-calibrated
Averages of signed errors of angles from 90°	0.02°	2.65°	-0.01°	-0.52°
RMS errors of angles from 90°	0.10 °	3.78°	0.07°	1.79°
RMS errors of 3D points from fitted plane C	0.72 mm	0.77 mm	0.62 mm	0.65 mm

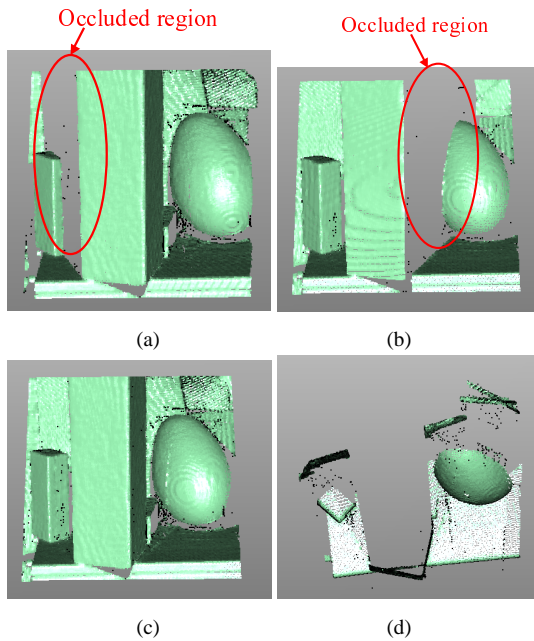


図 6 カメラを動かした計測実験: (a) カメラを初期位置に設置し復元した 3 次元点データ, (b) カメラの位置を変更し復元した 3 次元点データ, (c) 統合結果 (位置あわせ処理は特に行っていない) (d) 上からの視点での統合した 3 次元データ

Fig. 6 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.

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一切なく, 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よ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

ケーリングの一貫性を保った 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, 及び本手法の有効性を示すことができた.

文 献

- [1] J. Y. Bouguet and P. Perona: "3D photography on your desk", Int. Conf. Computer Vision, pp. 129–149 (1998).
- [2] R. B. Fisher, A. P. Ashbrook, C. Robertson and N. Werghi: "A low-cost range finder using a visually located, structured light source", Second Int. Conf. on 3DIM, pp. 24–33 (1999).
- [3] C. W. Chu, S. Hwang and S. K. Jung: "Calibration-free approach to 3D reconstruction using light stripe projections on a cube frame", Third Int. Conf. on 3DIM, pp. 13–19 (2001).
- [4] T. Masahiro, G. A. West, S. Venkatesh and T. M. Caelli: "Low-cost interactive active monocular range finder", CVPR99, Vol. 1, pp. 444–449 (1999).
- [5] J. Davis and X. Chen: "A laser range scanner designed for minimum calibration complexity", Third Int. Conf. on 3DIM, pp. 91–98 (2001).
- [6] K. H. Furukawa Ryo: "Interactive shape acquisition using marker attached laser projector", Int. Conf. on 3DIM2003, pp. 491–498 (2003).
- [7] D. Fofi, J. Salvi and E. M. Mouaddib: "Uncalibrated vision based on structured light", ICRA, pp. 3548–3553 (2001).
- [8] J. Battle, E. Mouaddib and J. Salvi: "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey", Pattern Recognition, **31**, 7, pp. 963–982 (1998).
- [9] D. Caspi, N. Kiryati and J. Shamir: "Range imaging with adaptive color structured light", IEEE Trans. on Patt. Anal. Machine Intell., **20**, 5, pp. 470–480 (1998).
- [10] K. L. Boyer and A. C. Kak: "Color-encoded structured light for rapid active ranging", IEEE Trans. on Patt. Anal. Machine Intell., **9**, 1, pp. 14–28 (1987).
- [11] S. Inokuchi, K. Sato and F. Matsuda: "Range imaging system for 3-D object recognition", ICPR, pp. 806–808 (1984).
- [12] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz: "Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects", Int. Conf. Computer Vision, Vol. 2, pp. 359–366 (2001).
- [13] A. Amano, T. Migita and N. Asada: "Stable recovery of shape and motion from partially tracked feature points with fast nonlinear optimization", 15th Vision Interface, pp. 244–251 (2002).
- [14] C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and motion from image stream under orthography: A factorization method", Int.J.of Computer Vision, **9**, pp. 137–189 (1992).