

基礎行列の分解を利用したプロジェクタカメラシステムの同時自己校正

山崎俊太郎[†] 持丸正明[†] 金出武雄^{†,††}

[†] 独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン工学研究センター

〒 135-0064 東京都江東区青海 2-3-26

^{††} The Robotics Institute, Carnegie Mellon University

5000 Forbes ave. Pittsburgh, PA 15213

E-mail: [†]{shun-yamazaki,m-mochimaru}@aist.go.jp, ^{††}tk@cs.cmu.edu

あらまし プロジェクタとカメラで構成されるアクティブステレオシステムを自校正する手法を提案する。グレイコードと正弦波コードを組み合わせた構造化光を用いて、プロジェクタとカメラの輝度応答関数を推定し、画像間の密な点对応を取得する。レンズ歪みのある画像間の対応点が満たす幾何的な拘束を、一般化された歪み基礎行列を用いて記述し、レンズの歪みとエピソード幾何を同時に復元する方法を示す。レンズの歪み中心と光軸中心が一致することを仮定し、光軸中心の初期値を用いた正規化によって、歪み基礎行列の分解の曖昧性を解消する方法を提案する。基礎行列の分解によって、プロジェクタとカメラの内部射影パラメータ、レンズ歪み、相対姿勢を推定し、対応点から計測対象の 3 次元点群を復元する。提案法は従来法と異なり、プロジェクタだけでなくカメラが未校正の場合にも自校正ができる。そのため、光学機器の事前校正を全く必要としない、利便性の高い計測システムを実現できる。

キーワード プロジェクタカメラシステム, 構造化光, 自校正, 幾何校正, 基礎行列, 歪み基礎行列, レンズ歪み

1. はじめに

プロジェクタとカメラで構成されるアクティブビジョンシステムは、計測状況に応じてシステムの構成を変更することが容易である。しかしその反面、変更のたびに幾何校正が必要となり、計測を行う際の障害となっている。計測対象を限定しないビジョンシステムでは、光源の状況や対象物の形状に応じて、装置の設置位置や方向、画角を調整する必要があり、計測途中であってもシステムの状態を変更することが多い。システムの状態を自由に變更でき、システムの構成要素以外の装置を用いずに幾何校正する方法があれば、プロジェクタカメラシステムの利便性は大きく向上する。これは、小型プロジェクタを利用したモバイルビジョンシステムなど、装置の移動を前提としたシステムでは特に有効であろう。

これまでに、カメラを幾何校正する手法としては、校正物体を使う手法 [1], [2]、計測画像の特徴点を元に自己校正する手法 [3] ~ [6] など様々な方法が提案されてきた。また OpenCV [7] や Bundler [8] など、実用的なソフトウェアの入手が比較的容易である。プロジェクタとカメラは、光線の入力と出力という方向の違いをのぞくと、幾何光学的には同じ構造をしているため、プロジェクタも同様の手法で幾何校正することができる。実際に、OpenCV のカメラ校正アルゴリズムをプロジェクタに応用する手法 [9], [10] が提案されている。

しかし、カメラの校正手法をプロジェクタに適用する方法には、次の 2 つの問題がある。第 1 に、プロジェクタの校正には、別途校正済みのカメラが必要である。こ

のため、理論的にはカメラの校正誤差の伝播、実用的には校正手順の煩雑化という問題が生じる。第 2 に、投影対象物の形状が既知である必要がある。投影像を介してプロジェクタの歪みを観測するため、投影対象物に未知の歪みがあると、両者を分離できない。我々は、プロジェクタカメラシステムに適した自校正の手法を提案し、上記の問題を解決する。また本手法は、カメラだけを用いるビジョンシステムの自校正と比べて、高精度かつ外乱に対して頑健である。

本論文では、プロジェクタによる構造化光投影を用いて、プロジェクタとカメラを幾何校正する手法を述べる。具体的には、プロジェクタとカメラの焦点距離およびレンズの樽型歪み、両者の相対姿勢を自校正によって推定する。本手法の校正アルゴリズムは、プロジェクタとカメラの画像座標間の対応点情報から得られる基礎行列を、内部パラメータと外部パラメータに分解する方法に基づいている。基礎行列の分解は、対応点の誤差の影響を強く受けるため、カメラの校正に用いるには追加の拘束が必要である [5], [11], [12]。我々は、プロジェクタカメラシステムでは、構造化光投影によって高精度かつ密な対応点を安定的に得られること、得られた対応点からエピソード幾何を安定的に復元できることを示す。

2. 関連研究

2.1 構造化光投影

本手法では、構造化光投影を用いて取得した、プロジェクタとカメラの画像座標間の対応点を利用して幾何校正を行う。対応点を得るために用いる構造化光は、Salvi ら

によって網羅的に体系化されている [13] .

時間コード化光は、異なるパターンを複数回に分けて投影することで、投影座標を一意にコード化する手法である。投影効率と頑健性のため、2進コードを改良したグレイコードが広く用いられている [14] ~ [16] . 2進コードの精度は画素サイズのため、さらに高精度での対応を得るために、コード境界で画像輝度を補間する方法 [14] や位相シフト法との組み合わせ [17], [18] が提案されている。

空間コード化光は、局所的な識別性の高い投影パターンを用いて、一回の投影で画像間の対応点を計算する方法である。投影像の色と濃淡パターンで擬似乱数を表現するため、計測対象の色や形状によって誤対応が発生する。この問題を避けるためには、動的計画法 [19] , 確率伝搬法 [20] , 共面性を利用した線形解法 [21] などの数値最適化を用いる必要がある。

我々の校正アルゴリズムは基礎行列の分解を利用しており、対応点の取得に用いる構造化光の選択とは独立している。したがって理論的にはどの構造化光を用いても良い。ただし実際には基礎行列を安定に求めるために高精度の対応点が必要であるため、既存の空間コード化法を元に、精度を高めた手法を提案する。

2.2 プロジェクタカメラシステムの自校正

プロジェクタカメラシステムは、アクティビジョンの他、複数プロジェクタを用いた大画面ディスプレイ、透視投影歪みの自動補正に用いられており、それぞれ自校正の方法が研究されている。古川と川崎 [16] は校正済みのカメラを用いて、構造化光投影によってプロジェクタを幾何校正する方法を提案している。この手法は、対応点とエピポラ拘束から導出される目的関数を最小化することで、プロジェクタの焦点距離と相対姿勢を推定する。関数の最小化に非線形解法を用いるため、推定精度は初期値に依存する。またプロジェクタのレンズ歪みは考慮しない。岡谷と出口 [22] は、校正済みのプロジェクタとカメラを用いて、複数の角度から固定平面上の投影された像から、カメラと平面の間の射影変換を推定する方法を提案している。Raskar と Beardsley [23] は、プロジェクタとカメラの相対姿勢を固定することで、平面上の投影像からプロジェクタの焦点距離と投影中心を推定する方法を提案している。

これらの方法は、すべてカメラの内部変数が校正済みであること仮定している。実際にプロジェクタカメラシステムを用いて計測する場合には、計測状況に応じてカメラの画角を調整する必要があるため、システムの利便性を大きく損なっている。我々の方法は、計測時に変更される可能性のある変数を全て自校正によって推定できるという利点がある。またこれまでの手法では無視されていた、プロジェクタとカメラのレンズ歪みも補正する。

- (1) プロジェクタとカメラの姿勢と投影角度を調整
- (2) 構造化光を用いて計測
- (3) プロジェクタとカメラ間の画像対応を復元
- (4) 基礎行列とレンズ歪み、光軸中心の復元
- (5) 内部パラメータの復元
- (6) 外部パラメータの復元
- (7) 距離画像の復元 (optional)

図 1 校正手順の概要

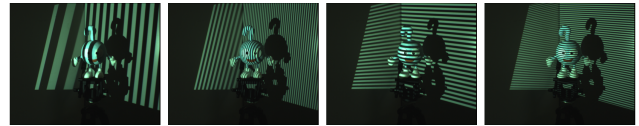


図 2 撮影画像の一部

3. プロジェクタ・カメラ・システム

本論文では、1組のプロジェクタとカメラで構成される、最小限のアクティビジョンシステムを扱う。我々のシステムは、計測対象の距離画像を取得することを目的としている。計測の手順は以下の通りである。まず、プロジェクタの画像座標をコード化した構造化光を、計測対象に投影し、カメラで撮影する。次に、撮影画像をデコードして、プロジェクタとカメラの画像間の点対応を計算する。得られた点対応から、歪み基礎行列を求め、レンズ歪みと基礎行列を計算する。基礎行列を分解し、プロジェクタとカメラの内部および外部変数を取得する。最後に、三角測量の原理によって、計測対象の3次元座標を計算する。図 1 に構成手順の概要を示す。

4. 構造化光を利用した対応点計算

我々の自校正アルゴリズムは、投影像の画素座標 (プロジェクタ画像座標) とカメラ画像座標の対応点を利用する。対応点の取得には、グレイコードと正弦波コードの位相シフトを組み合わせた時間コード化光 [17] を用いる。水平・垂直の2方向にパターン光を投影し、2次元の画像座標を一意にコード化する (図 2)。以下に述べる構造化光は、対応点の精度を最大化することを目指して設計されている。ただし校正アルゴリズムは具体的な対応点の取得方法とは独立であり、校正のための計測速度を優先する場合には、計測対象の連続性を仮定した最適化や、空間コードを用いることで [21] , より少ない計測回数で校正を行うことが可能である。

グレイコードとして、白と黒の2色で表現された画像列を投影する。グレイコードは二進コードの一種であり、サイズ N のプロジェクタ座標を最低 $\lceil \log(N) \rceil$ 枚の画像でコード化できる。我々は、白黒を反転した画像の組を投影し、両者の差分のゼロ交差を検出することによって、パターン境界の検出精度を向上している。また、両者の差が一定以下の場合には、投影光が届いていない、あるいは極端に反射率の低い領域とみなし、対応点計算の対

象外としている。

二進コードは座標の整数値をコード化するため、デコードして得られる対応点は量子化誤差を含んでいる(図 3(a))。そこで、正弦波コードを用いた位相シフト法によって、画素サイズ以下の精度で対応点を取得する。正弦波コードとして、8 ビットのモノクロ画像で表現された画像列を投影する。位相差が δ の正弦波を投影したときの、カメラの計測輝度 I は、以下の式で表現される。

$$I = A \sin(\theta + \delta) + m \quad (1)$$

$$= (\sin \delta, \cos \delta, 1) \cdot (A \cos \theta, A \sin \theta, m)^T \quad (2)$$

計測対象物体の表面上で、入射光と反射光の輝度は線形表現できるものとした。式 (2) の未知数は、観測画像中の正弦波の振幅 A 、距離に対応する位相差 θ 、環境光に対応する直流成分 m である。したがって、最低 3 つの異なる δ の正弦波コードを投影することで、線形解を得られる。ところが、プロジェクタとカメラの輝度の非線形性により、正弦波コードのデコード結果は、正弦波の周期単位の系統的な誤差を含んでいる(図 3(b))。そこで、プロジェクタとカメラの入力輝度 I に対する出力輝度をそれぞれ I^α, I^β と表現すると、次の関係式を得る。

$$I = \left(\tilde{A} \sin^\alpha(\tilde{\theta} + \delta) + \tilde{m} \right)^\beta \quad (3)$$

式 (3) の未知数は、正弦波のパラメータ $\tilde{A}, \tilde{\theta}, \tilde{m}$ と非線形応答を表す指数 α, β である。 α と β は画素間で共通と考えられるため、すべての画素を用いて同時最適化することにより、安定して求めることができる。実験では、 $\alpha = \beta = 1$ と固定して線形解法で式 (2) を解き、得られた解を式 (3) の初期解として、Levenberg-Marquardt 法で全ての未知数を決定した。 α, β の初期値として 0.5 から 2.0 の間の適当な数値を用いたが、収束性に大きな差は見られなかった。図 3(c) が示すとおり、非線形応答関数の推定を行うことで、非常に精度良く対応点を得られる。

プロジェクタの解像度を $M \times N$ とすると、投影するグレイコード画像は水平・垂直に合計 $\lceil \log(M) \rceil + \lceil \log(N) \rceil$ 種類を、白黒反転させた 2 組用いる。正弦波コード画像は、輝度応答の非線形性を考慮すると、水平・垂直方向にそれぞれ 4 つ以上の位相パターンが必要である。ただし、正弦波コードは周期内での位相を一意に確定できるため、周期が画素サイズ以上の場合には冗長性が生じる。したがって、正弦波コードの周期を 2^n とすると、グレイコード画像を水平・垂直方向にそれぞれ n ずつ減らしても対応点を一意に決定できる。これに対して、我々は投影回数を変えずに、冗長性を利用して対応点の精度を向上している。具体的には、グレイコードから得られる対応点を正弦波コードの結果と比較して、両者の差が $2^{(n-2)}$ 未満の違いはグレイコードを補正し、それ以上の場合には信頼できない点として、対応点の計算対象から除外した。

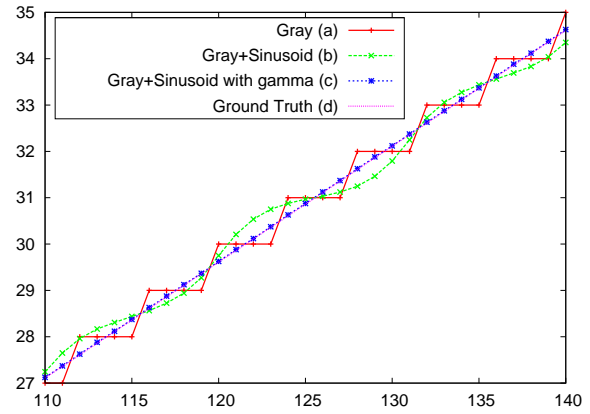


図 3 グレイコードと正弦波コードのデコード結果。(a) グレイコードのみ。(b) グレイコードと正弦波コードの組み合わせ。(c) 非線形応答関数の補正後。(d) 真の対応点。

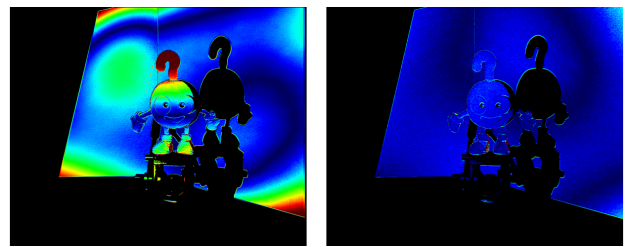


図 4 基礎行列の再投影誤差の比較。(左) 通常的基础行列 F 。(右) レンズ歪みを考慮した基礎行列 R 。対応点とエピポーラ線の距離を色で表している。青い部分ほど誤差が小さく、赤い部分ほど大きい。

5. レンズ歪みを考慮したエピポーラ拘束

構造化光投影で得られた対応点を元に、プロジェクタとカメラのエピポーラ幾何を復元し、基礎行列の分解によって幾何パラメータを復元する。

まず、プロジェクタとカメラの射影モデルが、ピンホールモデルに従うと仮定する。このとき、プロジェクタ画像座標 (u', v') とカメラ画像座標 (x', y') の対応点は、 3×3 の基礎行列 (fundamental matrix) F で記述される以下の関係を満たす。

$$(u', v', 1)F(x', y', 1)^T = 0 \quad (4)$$

実際は、プロジェクタとカメラにはレンズ歪みがあり、対応点の座標が非線形変換されているため、一般にこの式は成立しない(図 4 左)。プロジェクタとカメラのレンズの歪み中心をそれぞれ $(a_p, b_p), (a_c, b_c)$ とし、レンズの樽型歪みを 1 次の除算モデルで表現すると、歪みを除去したプロジェクタ画像座標 (u', v') 、カメラ画像座標 (x', y') は以下の式で表される [24]。

$$(u', v')^T = \frac{1}{1 + d_p |r_p|^2} r_p + (a_p, b_p)^T \quad (5)$$

$$(x', y')^T = \frac{1}{1 + d_c |r_c|^2} r_c + (a_c, b_c)^T \quad (6)$$

ただし $r_p = (u - a_p, v - b_p)^T$, $r_c = (x - a_c, y - b_c)^T$, d_p と d_c はそれぞれプロジェクタとカメラのレンズの歪みパラメータである．ここで，各画像座標 (u, v) を， $(u^2 + v^2, u, v)$ と非線形項を加えた拡張座標 (lifted coordinate) で表現すると，レンズ歪みを線形表現できる．

$$(u', v', 1)^T \approx D(d_p, a_p, b_p) \cdot (u^2 + v^2, u, v, 1)^T \quad (7)$$

ただし

$$D(d, a, b) = \begin{pmatrix} da & 1 - 2da^2 & -2dab & da(a^2 + b^2) \\ db & -2da & 1 - 2db^2 & db(a^2 + b^2) \\ d & -2da & -2db & 1 + d(a^2 + b^2) \end{pmatrix} \quad (8)$$

\approx はスケールの違いを無視した等号である．カメラ画像座標に関しても (x, y) と (x', y') の間に同様の関係が成立する．

式 (4) と式 (7) より，次の式を得る．

$$(u^2 + v^2, u, v, 1)R(x^2 + y^2, x, y, 1)^T = 0 \quad (9)$$

ただし

$$R = D(d_p, a_p, b_p)^T F D(d_c, a_c, b_c) \quad (10)$$

R はレンズ歪みを考慮したエピポーラ拘束を表現する， 4×4 の歪み基礎行列 (radial fundamental matrix) である． R は 4×4 行列であり，最小 15 個の対応点から線形解法によって求めることができる．図 4 に，通常の基礎行列と歪み基礎行列の違いを示す．なお式 (9) は Barreto と Daniilidis によって提案された行列表現の一般型になっている [25]．

式 (10) において， F の rank は 2， D の rank は 3 であるため， R の rank は 2 である．すなわち R は 2 次元の零空間を持つ．一方で， $\mathfrak{N} = (a^2 + b^2 - d^{-1}, a, b, 1)^T$ は $D(d, a, b)$ の右零ベクトルである．従って，レンズの歪み中心が既知の場合， R の右側と左側の零空間で \mathfrak{N} を求めることにより，レンズの歪みパラメータを計算できる．レンズの歪み中心と歪みパラメータが分かると， D の擬似逆行列を R の両辺から掛けることにより，基礎行列 F を求めることができる．

しかし，歪み中心が未知の場合，この分解は一意ではない (付録 A)．本論文では，レンズの歪み中心が画像の光軸中心 (principal point) と一致すると仮定し，基礎行列と同時に光軸中心を推定することによって，この曖昧性を解消する．次節では，基礎行列の推定方法を述べる．

6. 歪み基礎行列の推定

プロジェクタとカメラの射影はピンホールモデルに従い，画素のアスペクト比が 1，skew が 0 だとする．このとき，内部パラメータは，焦点距離 f の 1 自由度と，画像の光軸中心 p の 2 自由度を持つ．

いま仮に，プロジェクタとカメラの光軸中心がそれぞれ p_p, p_c で，与えられているとする．このとき，基礎行列 F の分解によって，プロジェクタとカメラの内部パラメータ，および両者の相対姿勢を求めることができる．まず，プロジェクタとカメラの焦点距離 f_p, f_c は以下の式で計算できる [5]．

$$f_p^2 = -\frac{p_c^T [e_c] \times \hat{I}_3 F^T p_p p_c^T F p_c}{p_c^T [e_c] \times \hat{I}_3 F^T \hat{I}_3 F p_c} \quad (11)$$

$$f_c^2 = -\frac{p_p^T [e_p] \times \hat{I}_3 F p_c p_p^T F^T p_p}{p_p^T [e_p] \times \hat{I}_3 F \hat{I}_3 F^T p_p}$$

ただし e_p, e_c はそれぞれ F の左右零ベクトル， $[\cdot] \times$ は外積演算を表す交代行列， $\hat{I}_3 = \text{diag}(1, 1, 0)$ である．ベクトルは同時座標で表現されているものとする．ここで得られた焦点距離と光軸中心から，プロジェクタとカメラの内部行列をそれぞれ K_p, K_c と表現すると，基本行列 (essential matrix) E を求めることができる．

$$E = K_p^{-T} F K_c^{-1} \quad (12)$$

$$= [t] \times \Theta \quad (13)$$

ここで t と Θ それぞれプロジェクタの相対姿勢を表す平行移動ベクトルと回転行列である． E を特異値分解することによって， t と Θ を求めることができる [26]．

しかし実際には，式 (11) の計算は，基礎行列の推定精度に大きく影響されることが知られている．特に，点対応が僅かな誤差を含む場合でも，式 (11) の右辺が負になり，解を得ることができないことがある [26]．この問題を解決するために，Kanatani らは解が存在しない基礎行列を生成する対応点を選択的に取り除く方法を提案している [12]．また，Hartley と Silpa-Anan は解が存在しない基礎行列にペナルティを与える目的関数を最小化する方法を提案している [11]．後者は，事前知識を用いることで，画像の光軸中心を推定することができる．第 5 節の最後で述べたとおり，歪み基礎行列の分解にはレンズの歪み中心の推定が必要である．そこで我々は，レンズの歪み中心と画像の光軸中心が一致すると仮定し，Hartley と Silpa-Anan の応用して，歪み基礎行列と画像の光軸中心を同時に求める．

歪み基礎行列の推定は，以下の最小化問題として定式化できる．

$$\underset{F, p_p, p_c, d_p, d_c}{\text{argmin}} C_R(F, d_p, d_c) + C_f(F, p_p, p_c) + C_p(p_p, p_c) \quad (14)$$

C_R は，画像間の対応点が満たす歪み基礎行列の誤差項である．本手法では，幾何的誤差の Sampson 近似 [26] を用いて，以下の式を利用した．

$$C_R(F, d_p, d_c) = \sum_i \frac{u_i^T R x_i}{|\hat{I}_4 R^T u_i|^2 + |\hat{I}_4 R x_i|^2} \quad (15)$$

表 1 内部パラメータ推定の安定性

	f_p	f_c	d_p	d_c	p_p	p_c
1	1798.2	2127.3	-8.0×10^{-8}	-1.4×10^{-8}	(511.5, 636.6)	(511.1, 384.1)
2	1808.3	2138.7	-7.9×10^{-8}	-1.2×10^{-8}	(513.2, 631.9)	(512.9, 383.8)
3	1780.9	2056.2	-8.1×10^{-8}	-1.2×10^{-8}	(512.9, 637.4)	(518.3, 384.8)
4	1799.5	2094.9	-8.0×10^{-8}	-1.1×10^{-8}	(516.1, 627.1)	(511.9, 383.9)
Ground truth [10]	1869.3	2196.9	—	—	(512.7, 683.1)	(518.1, 398.8)

ただし $u_i = (u_i^2 + v_i^2, u_i, v_i, 1)^T$, $x_i = (x_i^2 + y_i^2, x_i, y_i, 1)^T$ は対応点の拡張座標の同時座標表現, $\hat{I}_4 = \text{diag}(1, 1, 1, 0)$ である. R は式 (10) を用いて計算する.

C_f は, 式 (11) の右辺が負になる基礎行列にペナルティを与える項であり, 以下の式を用いることができる.

$$C_f(\mathbf{F}, \mathbf{p}_p, \mathbf{p}_c) = w_{fp}(f_{min}^2 - f_p^2) + w_{fc}(f_{min}^2 - f_c^2) \quad (16)$$

右辺の f_p^2, f_c^2 は式 (11) から求める. なお, ここで求めた f_p^2, f_c^2 は負の値を取ることもありえることに注意. 式 (16) の $f_{min}^2 (> 0)$ は想定される最小の焦点距離の二乗であり, w_{fp}, w_{fc} は求めた f_p^2, f_c^2 が f_{min}^2 以下の場合に正, それ以外の場合は 0 となる重みである. 実際には, $f_{min}^2 = 0$ としてよく, w_{fp}, w_{fc} の正の値としては非常に小さい値を用いれば十分である.

C_p は, 画像の光軸中心の事前知識を反映する項である. 本研究では, 以下の式を用いた.

$$C_p(\mathbf{p}_p, \mathbf{p}_c) = w_{pp}|\mathbf{p}_p - \bar{\mathbf{p}}_p|^2 + w_{pc}|\mathbf{p}_c - \bar{\mathbf{p}}_c|^2 \quad (17)$$

ここで, $\bar{\mathbf{p}}_p, \bar{\mathbf{p}}_c$ はそれぞれプロジェクタとカメラの想定される光軸中心の座標であり, w_{pp}, w_{pc} は重みである. 多くの場合, カメラの光軸中心は画像中心の近くにある. また, プロジェクタの光軸中心は, 画像中心から垂直方向に下に位置する. また多くのプロジェクタは, おおよその光軸中心が設置マニュアルに記載されているため, これを用いることができる.

式 (14) は非線形最小化問題であり, Levenberg-Marquardt 法で解くことができる. ただし, 初期解において $C_f = 0$ を保証するため, 基礎行列 F の初期解は以下の手順で求めた. まず, 線形解法によって歪み基礎行列 R を求める. レンズの歪み中心の初期値を, 想定される光軸中心 \bar{p}_p, \bar{p}_c とし, R を分解してレンズ歪みパラメータ d_p, d_c の初期値と, 基礎行列 F を求める. 次に, プロジェクタとカメラのそれぞれに関して, 画像の対角線の長さを焦点距離の初期推定値とする. この焦点距離と, 想定される光軸中心を初期値として, プロジェクタとカメラの内部行列を求める. 内部行列の逆行列を F の左右から掛けることにより, 基礎行列 E の候補を求めることができる. これを特異値分解し, 最小特異値が 0, 残りの 2 特異値を 1 に置き換えて正規化する. 最後に, 正規化された基礎行列の左右から内部行列を掛けて, 基礎行列の初期値を取得する.

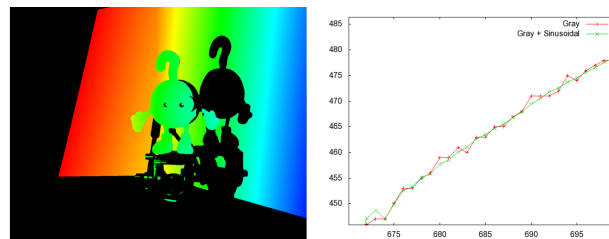


図 5 プロジェクタとカメラの点対応. (左) カメラ画像座標からプロジェクタ画像座標への水平方向の対応を色で表している. (右) グレイコードだけを用いた場合と正弦波コードを併用した場合の点対応の精度の比較. 縦軸と横軸はそれぞれプロジェクタとカメラの画像座標を示す.

7. 実データを用いた実験結果

2 種類の PC 用データプロジェクタ (EPSON EMP-765, 解像度 1024×768 , および EB-1735W, 解像度 1280×800) と USB カメラ (Artray ARTCAM 300MI, 最大解像度 2048×1536) を用いて, 実物体の計測実験を行った. プロジェクタとカメラの位置とズームは未校正であり, プロジェクタの光軸中心はカタログ値を利用, カメラの光軸中心は画像中心とした. 計測画像の一部を図 2 に示す.

計測画像のうち, グレイコードの計測画像をデコードすることで, カメラ画像座標からプロジェクタ画像座標への対応を得られる. これは画素サイズ (整数座標) の対応であり, 最大 1 画素の量子化誤差を含んでいる. そこで, 正弦波コードの計測画像をデコードしてグレイコードの点対応を改善することで, サブピクセル精度 (小数座標) での正確な対応を得られることが分かる (図 5).

同一のプロジェクタとカメラを用いて, 異なる物体を計測して自校正した際の, 内部パラメータの推定結果を表 1 に示す. 4 回の実験を通じて, パラメータを安定して推定できていることが分かる. また, 自校正によって得られたパラメータを元に対象の 3 次元形状を復元した結果を図 6 に示す. 異なるプロジェクタやカメラ, 計測対象の組み合わせでも実験を行い, 自校正の結果を真値と比較したところ, プロジェクタとカメラの焦点距離の推定誤差は最大 10% 程度であった. これは理論的に予想される精度であり [5], 復元される 3 次元形状の精度は, 1m 離れた場所で誤差 1mm 以下であった. なお, 計測した 3 次元座標のスケールに関する 1 自由度の曖昧性は, 校正物体を用いて後処理で決定した.

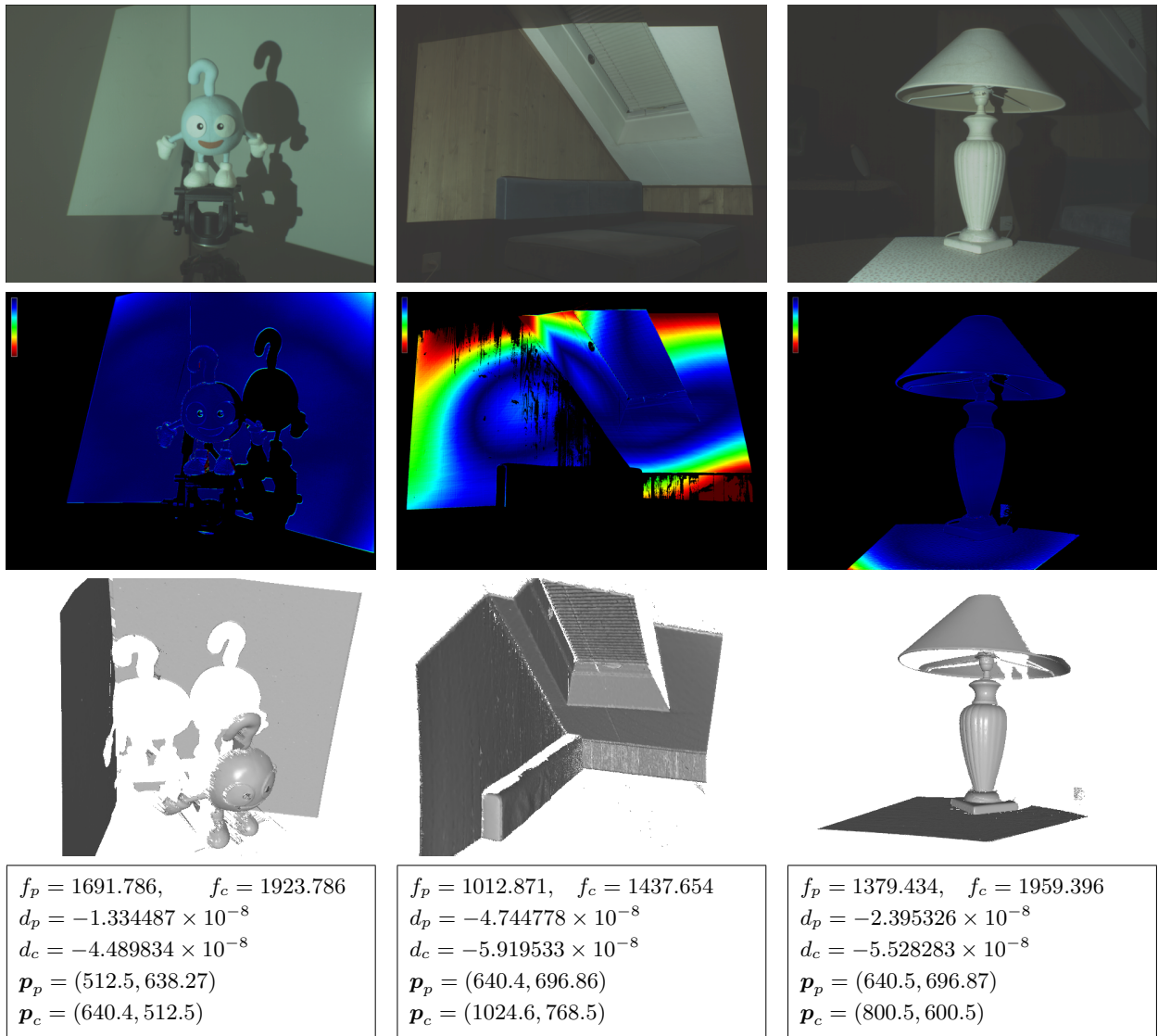


図 6 プロジェクタとカメラの自校正と 3D 復元の結果．上から順に，白色光源下での計測画像，エピソード復元の再投影誤差，3D 復元結果，推定された内部パラメータを示す．再投影誤差として，歪みを除去した画像中で，エピソード線と対応点の距離を左右で平均したものをを用いた．最も濃い赤の部分で 1 ピクセルの誤差に対応している．

8. おわりに

パッシブステレオシステムにおける未校正ステレオは古くから研究されており，また近年ではこうした技術をプロジェクタ・カメラ・システムに適用する試みもなされている [16]．これらの手法と比較したときに，我々の方法は以下に挙げるような特長を持つ．

第 1 に，プロジェクタとカメラの内部状態に関して一切の知識を必要とせずに 3 次元計測ができる．例えば，購入直後のプロジェクタとカメラを，一切校正せずに PC に繋ぎ，すぐに計測できる．従来のプロジェクタ・カメラ・システム [16] では，カメラが校正済みであることを仮定しており，本システムによって大きく利便性が向上する．

第 2 に，グレイコードと正弦波コードを組み合わせる

ことによって，自校正の精度と安定性を劇的に向上している．プロジェクタとカメラの輝度応答の非線形関数を推定することにより，サブピクセル精度での点对応を取得できる．

第 3 に，自校正の過程でプロジェクタとカメラのレンズの歪みを補正できる．多くのカメラのレンズは歪んでおり 3 次元復元に大きな影響をあたえる一方で，歪みの校正には事前校正が不可欠であった．提案法では，エピソード拘束の復元とレンズ歪みの補正を同時に行う．

提案システムの欠点として，計測物体の全体のスケールを決定できない点がある．スケールの決定に，実寸が既知の校正物体を用いる必要があり，この作業の簡略化が課題である．また，計測物体が平面または平面に近い場合，基礎行列が退化するため本手法を用いることができない．現在は，計測対象や計測システムの状態が変

わったときに，以前の校正データを再利用することで全体の校正精度を向上する手法を開発中である．

文 献

- [1] R. Y. Tsai: “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses”, IEEE Journal of Robotics and Automation, **3**, 4, pp. 323–344 (1987).
- [2] Z. Zhang: “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 11, pp. 1330–1334 (2000).
- [3] M. Pollefeys and L. V. Gool: “A stratified approach to metric self-calibration”, Proc. International Conference on Computer Vision, pp. 407–412 (1997).
- [4] B. Triggs: “Autocalibration and the absolute quadric”, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 609–614 (1997).
- [5] S. Bougnoux: “From projective to euclidean space under any practical situation”, Proc. International Conference on Computer Vision, pp. 790–798 (1998).
- [6] K. Kanatani and C. Matsunaga: “Closed-form expression for focal lengths from the fundamental matrix”, Proc. Asian Conference on Computer Vision, pp. 128–133 (2000).
- [7] G. Bradski: “The OpenCV Library”, Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, pp. 120–126 (2000).
- [8] N. Snavely, S. M. Seitz and R. Szeliski: “Modeling the world from internet photo collections”, International Journal of Computer Vision, **80**, 2, pp. 189–210 (2008).
- [9] G. Falcao, N. Hurtos, J. Massich and D. Fofi: “Projector-Camera Calibration Toolbox” (2009). <http://code.google.com/p/procamcalib>.
- [10] S. Audet and M. Okutomi: “A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems”, Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems, pp. 47–54 (2009).
- [11] R. Hartley and C. Silpa-Anan: “Reconstruction from two views using approximate calibration”, Proc. Asian Conference on Computer Vision, pp. 338–343 (2002).
- [12] K. Kanatani, A. Nakatsuji and Y. Sugaya: “Stabilizing the focal length computation for 3-d reconstruction from two uncalibrated views”, International Journal of Computer Vision, **66**, 2, pp. 109–122 (2006).
- [13] J. Salvi, J. Pages and J. Batlle: “Pattern codification strategies in structured light systems”, Pattern Recognition, **37**, 4, pp. 827–849 (2004).
- [14] K. Sato and S. Inokuchi: “Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask”, Proc. Int. Conf. on Computer Vision, pp. 657–661 (1987).
- [15] R. Sagawa, M. Takatsuji, T. Echigo and Y. Yagi: “Calibration of lens distortion by structured-light scanning”, Proc. International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1349–1354 (2005).
- [16] R. Furukawa and H. Kawasaki: “Dense 3D reconstruction with an uncalibrated stereo system using coded structured light”, Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems, pp. 107–116 (2005).
- [17] D. Bergmann: “New approach for automatic surface reconstruction with coded light”, Proc. Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes, Vol. 2572, pp. 2–9 (1995).
- [18] S. Tariq, A. Gardner, I. Llamas, A. Jones, P. Debevec

and G. Turk: “Efficient estimation of spatially varying subsurface scattering parameters for relighting”, International Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization, pp. 1–9 (2006).

- [19] L. Zhang, B. Curless and S. M. Seitz: “Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming”, Proc. the 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pp. 24–36 (2002).
- [20] A. O. Ulusoy, F. Calakli and G. Taubin: “Robust one-shot 3d scanning using loopy belief propagation”, Proc. CVPR Workshop on Applications of Computer Vision in Archaeology, pp. 15–22 (2010).
- [21] R. Furukawa, H. Q. H. Viet, H. Kawasaki, R. Sagawa and Y. Yagi: “One-shot range scanner using coplanarity constraints”, Proc. International Conference on Image Processing, pp. 1524–1527 (2008).
- [22] T. Okatani and K. Deguchi: “Autocalibration of a projector-camera system”, IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, **27**, pp. 1845–1855 (2005).
- [23] R. Raskar and P. A. Beardsley: “A self-correcting projector.”, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 504–508 (2001).
- [24] A. W. Fitzgibbon: “Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion”, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 125–132 (2001).
- [25] J. P. Barreto and K. Daniilidis: “Fundamental matrix for cameras with radial distortion”, Proc. International Conference on Computer Vision, pp. 625–632 (2005).
- [26] R. Hartley and A. Zisserman: “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press, 2nd edition (2004).

付 録

A 歪み基礎行列の分解の曖昧性

任意の実数 d, a, b と d', a', b' の組に関して，以下の 3×3 行列 H を考える．

$$H = I_3 + d' \begin{pmatrix} a' \\ b' \\ 1 \end{pmatrix} (2(a - a'), 2(b - b'), -(a^2 + b^2 - a'^2 - b'^2))$$

ただし I_3 は 3×3 の単位行列．このとき式 (8) で定義されるレンズ歪み行列 D に関して以下が成立．

$$H \cdot D(d, a, b) = D(d', a', b)$$

両辺に左から任意の基礎行列 F をかけ，以下を得る．

$$FH \cdot D(d, a, b) = F \cdot D(d', a', b')$$

H の rank は 3 である．したがって FH は基礎行列である．これは，基礎行列とレンズ歪み行列の積の分解は曖昧であることを示している．分解が一意になるのは，レンズ歪みがない場合 ($d = 0$) か，レンズの歪み中心 (a, b) が既知の場合である．