

特徴点を用いた投影画像の幾何補正手法の性能評価

Performance Evaluation of a Feature-Based Geometric Correction Method for Projected Images

高橋 徹†

Toru Takahashi

沼 徳仁†

Norihiro Numa

青木 孝文†

Takafumi Aoki

近藤 敏志†

Satoshi Kondo

1. まえがき

プロジェクタは、小型で携帯性を有し、表示サイズを変更できる柔軟な表示デバイスである。一方、プロジェクタは、提示する画像（投影画像）が使用環境の影響を受けやすいという欠点を持つ。具体的には、投影対象の形状やプロジェクタと投影対象との位置関係によって投影画像が幾何学的に歪む場合や、投影対象の光の反射特性により、投影画像の色調が損なわれる場合がある。プロジェクタの機能性を高めるには、使用環境に対応した投影画像の補正（幾何補正、光学的補正）が必要になる。

この問題に対して、プロジェクタとカメラを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステム (Projector-Camera systems: ProCams) を用いた補正手法が提案されている [1]。プロジェクタ・カメラシステムを用いた投影画像の補正手法では、プロジェクタに入力する画像（プロジェクタ画像）とカメラで撮影した画像（カメラ画像）との対応関係が必要である。通常、事前にパターン光の投影・撮影を行い、これらの対応関係を求める。したがって、使用中にプロジェクタの位置が変化する場合、使用を中断し、パターン光の投影・撮影を再度行わなければならない。これに対して、本論文では、パターン光を用いずに、一般的な画像の特徴点を利用してプロジェクタ画像とカメラ画像との対応関係を求め、投影画像の幾何補正を行う手法を提案する。さらに、実際にプロジェクタとカメラを用いて実験を行い、パターン光の投影・撮影を用いた幾何補正手法と提案手法とを比較し、提案手法を評価する。実験を通して、提案手法により、映像を投影しながら、パターン光の投影・撮影を用いた場合と同様に投影画像の幾何補正が可能であることを示す。

2. 投影画像の幾何補正

投影画像の幾何補正を行うためには、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応関係を求める必要がある。本論文では、投影対象の形状がスクリーンのような単一平面であると仮定する。この場合、投影画像の変形モデルは射影変形であり、原画像を射影変形したものがカメラで観測される。画像間の対応関係を図1に示す。プロジェクタ画像上の点を $m_p = (x_p, y_p)$ とし、これに対応するカメラ画像上の点を $m_c = (x_c, y_c)$ とすると、これらの関係は射影変換によって以下のように記述される。

$$\tilde{m}_p \sim H_{cp} \tilde{m}_c \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{m}_p = [x_p, y_p, 1]^T$ 、 $\tilde{m}_c = [x_c, y_c, 1]^T$ であり、 \sim は、同値関係を表す。また、 H_{cp} はカメラ画像から

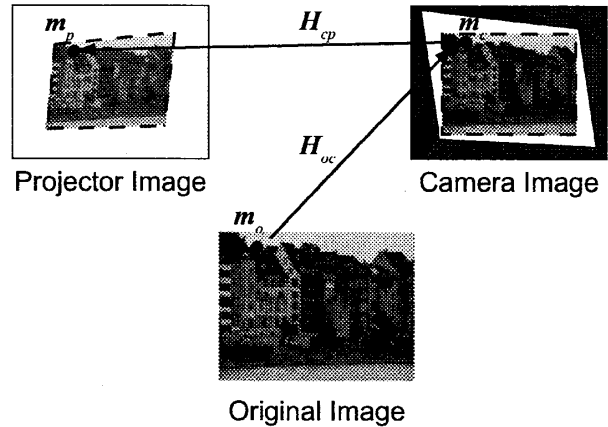


図1: 画像間の対応関係

プロジェクタ画像への射影変換行列である。

プロジェクタ画像とカメラ画像との対応関係が求まれば、投影画像の幾何補正を行うことができる。まず、カメラ画像上で、幾何学的に歪みのない投影画像が得られていると仮定する。カメラ画像上で得られる幾何補正後の投影画像は、原画像をスケール変換および平行移動したものと捉えることができる。原画像上の点を $m_o = (x_o, y_o)$ とし、これに対応する幾何補正後の投影画像上の点を m_c とすると、これらの関係は以下のようなになる。

$$\tilde{m}_c = H_{oc} \tilde{m}_o \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{m}_o = [x_o, y_o, 1]^T$ である。また、 H_{oc} は、スケール変換と平行移動を行う行列である。

m_p と原画像上の点 m_o との対応関係は、式 (1), (2) から、以下の式で与えられる

$$\tilde{m}_p \sim H_{cp} H_{oc} \tilde{m}_o \quad (3)$$

上式で示される対応関係を用いて原画像を変形し、これをプロジェクタで投影することにより、スクリーン上で幾何学的に歪みのない投影画像を観測できる。

3. 特徴点を用いた射影変換行列の推定

特徴点を用いた射影変換行列の推定手法について述べる。本論文で提案する幾何補正手法では、パターン光の投影・撮影を行わず、プロジェクタに入力する原画像と投影画像を撮影したカメラ画像を用いて、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を取得する。2つの画像間の対応点を取得する手法として、特徴点ベースで行う手法と領域ベースで行う手法がある。カメラで撮影される投影画像は、プロジェクタに入力する原画像

†東北大学大学院情報科学研究科

†松下電器産業株式会社

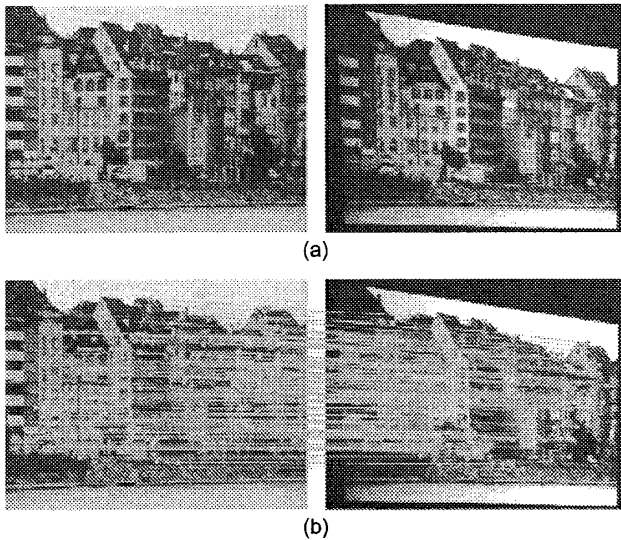


図2: 特徴点の抽出とマッチング: (a) プロジェクタに入力した原画像 (左) と投影画像を撮影したカメラ画像 (右), (b) 特徴点のマッチング結果

を射影的に歪ませたものであり, 明るさも異なる. そのため, 原画像とカメラ画像との対応点を領域ベースで取得するのは困難である. そこで, 本論文では, SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [2] を用いて特徴点を抽出し, 一致する特徴点を検出する. このとき得られる特徴点, すなわちプロジェクタ画像とカメラ画像との対応点には, 誤対応を含むことがある. そこで, RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [3] により誤対応を除去し, プロジェクタ画像とカメラ画像間の射影変換行列を推定する. SIFT と RANSAC を用いることで, 図2に示すようにプロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を取得し, 射影変換行列をロバストに推定する. 推定した射影変換行列をもとに原画像を変形し, 投影画像の幾何補正を行う.

4. 実験・考察

提案手法を実装し, プロジェクタとカメラを用いて実験を行った結果を示す. 提案手法とパターン光の投影・撮影を用いた場合を比較した結果について述べる. 図3に示すように, プロジェクタとカメラを適当に配置し, 平面に対して画像の投影・撮影を行う. このとき, プロジェクタに入力した原画像と撮影により得られたカメラ画像に対して提案手法を適用し, カメラ画像とプロジェクタ画像間の射影変換行列 H_{cp} を推定する. また, その際にパターン光の投影・撮影も同時に行い, 得られた対応点からカメラ画像とプロジェクタ画像との射影変換行列を推定する. このとき推定した射影変換行列を H'_{cp} とする. 図4に示すように, 各射影変換行列 H_{cp}, H'_{cp} を用いてカメラ画像上の点 m_c をプロジェクタ画像上の点 m_p, m'_p に変換し, m_p, m'_p 間の距離 d を求めて評価する.

本論文では, プロジェクタとカメラの配置を20回変更し, 各配置において, 射影変換行列の推定を行った. カメラ画像上の全ての点に対して射影変換を行い, 上

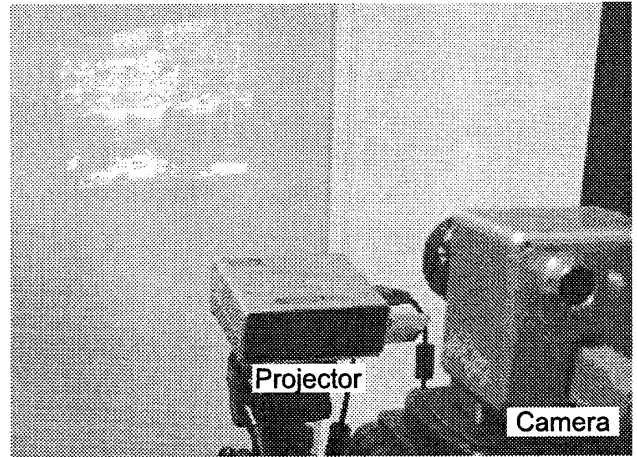


図3: 実験環境

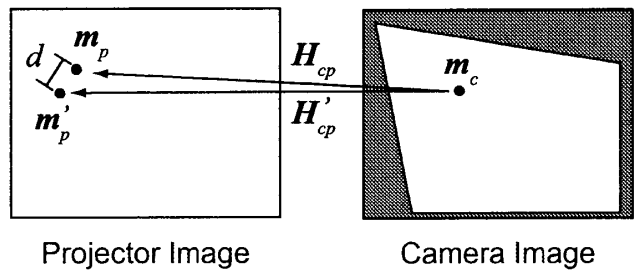


図4: 推定した射影変換行列の評価法

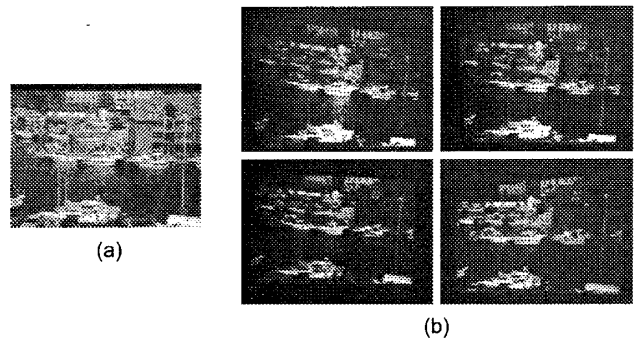


図5: 実験に用いた画像: (a) 原画像, (b) プロジェクタとカメラを配置した際に得られたカメラ画像の例

述した距離 d の RMS (Root Mean Square) 値で評価した. 実験に使用した原画像および各配置で得られたカメラ画像は, 図5に示すとおりである. 使用したプロジェクタは MITSUBISHI LVP-PK20 であり, 使用したカメラは PointGrey SCOR-14SOM である. 解像度はそれぞれ 800×600 ピクセル, 640×480 ピクセルとした. 提案手法において, SIFT を用いた特徴点の抽出およびマッチングでは, 原画像およびカメラ画像を 320×240 ピクセルに縮小し, 対応点を取得した. SIFT および RANSAC は [4], [5] を使用した. パターン光の投影・撮影では, グレイコードパターン光とスリット光を用いており, 対応点は, プロジェクタ画像上で縦・

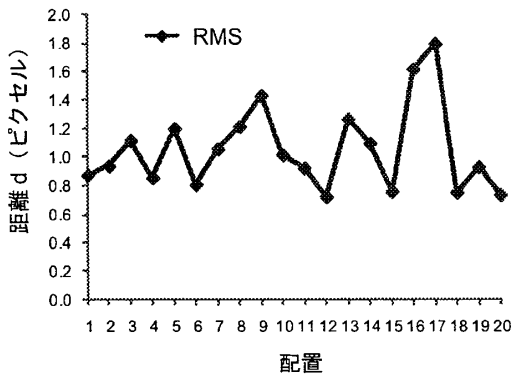


図 6: 各配置において推定した射影変換行列の評価

横それぞれ 16 ピクセルおきに取得した。

実験結果を図 6 に示す。図 6 より、提案手法の場合とパターン光を投影・撮影を行った場合を比べると、射影変換後の点の差が RMS 値で 1 ~ 2 ピクセル程度であることがわかる。さらに、提案手法を用いて射影的に歪んだ投影画像を幾何補正した結果を図 7 に示す。図 7 より、提案手法により射影的に歪んだ投影画像が補正され、正しく投影できていることが確認できる。提案手法を用いた結果は、パターン光の投影・撮影を用いた幾何補正を行った結果と比べ、視覚的に大きな違いは確認できない。数値上、パターン光を用いた場合の結果と完全に一致はしていないが、実用上問題がないことがわかる。

提案手法は画像上の特徴点を用いるため、プロジェクタから映像を投影している間に投影画像の幾何補正を行うことができる。プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を事前にパターン光の投影・撮影によって取得する手法では、投影している映像を中断しなければならないのに対して、提案手法は有利であると考えられる。

5. むすび

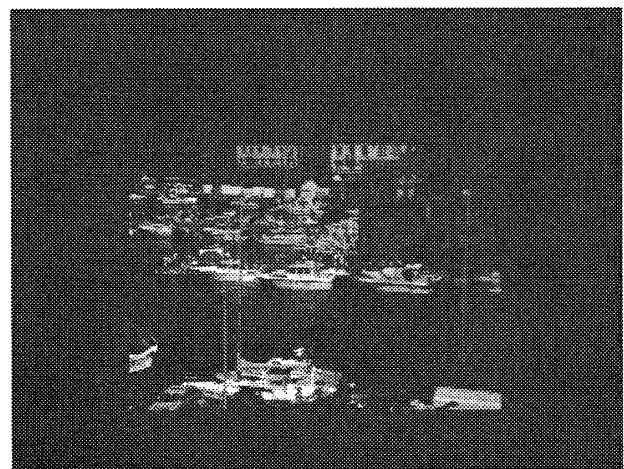
本論文では、特徴点を利用した投影画像の幾何補正手法を提案した。実験を通して、投影画像を撮影するだけで射影的に歪んだ投影画像の幾何補正ができることを示した。今後は、より複雑な幾何形状を持つ投影対象について、パターン光を使用しない幾何補正手法について検討していく予定である。

参考文献

- [1] O. Bimber, A. Emmerling, and T. Klemmer. Embedded entertainment with smart projectors. *IEEE Computer*, Vol. 38, No. 1, pp. 48–55, January 2005.
- [2] D.G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, pp. 91–110, Nov 2004.
- [3] M.A. Fishler and R.C. Boles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [4] An open implementation of SIFT. <http://vision.ucla.edu/~vedaldi/code/sift/sift.html>.



(a)



(b)



(c)

図 7: 投影画像の幾何補正結果: (a) 幾何補正なし, (b) パターン光の投影・撮影を用いた幾何補正結果, (c) 提案手法を用いた幾何補正結果

- [5] MATLAB and Octave functions for computer vision and image processing. <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>.