

投影画像のためのステレオカメラを用いた3次元計測に基づく 幾何補正手法の検討

A Study of a Geometric Correction Method Based on 3D-Measurement Using Stereo Camera for Projected Images

高橋 徹[†]
Toru Takahashi

青木 孝文[†]
Takafumi Aoki

近藤 敏志[‡]
Satoshi Kondo

1. はじめに

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。使用環境に応じて投影画像を補正（幾何補正、光学的補正）することにより、プロジェクタの機能性を高め、より広範な用途に使用することが可能になる。

これまでに、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) を用いた投影画像の補正手法が提案されている [1]。プロジェクタ・カメラシステムでは、カメラで投影画像を撮影し、カメラ画像に応じてプロジェクタに入力する画像（プロジェクタ画像）を変換し、投影画像の補正を行う。したがって、投影対象の形状や色によらず、ユーザにとって望ましい画像に補正することができ、利便性の向上が見込める。現在までに、投影対象が単一平面の場合についてのプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手法や [2, 3] 投影対象が任意形状の場合の幾何補正手法 [4] が報告されている。また、テクスチャのある投影対象の場合、投影画像の色調が変化してしまうが、これを補正する光学的補正手法 [4, 5] も報告されている。

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、プロジェクタ画像の座標系（プロジェクタ座標系）とカメラ画像の座標系（カメラ座標系）との対応関係を求める必要がある。この対応関係を求めるために、通常、特殊なパターン光を用いる。代表的な手法として、井口ら [6] により提案されたグレイコードパターン光投影法などがあるが、基本的に、パターン光の投影・撮影を数回にわたり行う必要がある。したがって、プロジェクタ座標系とカメラ座標系の対応関係が変化すると、システムの利用を中断してパターン光の投影・撮影を再度数回にわたり行わなければならない。プロジェクタの利便性を活かすためには、環境変化に即応し、投影中に補正できることが望まれる。上述した手法を用いて環境変化に即応して補正を行う手法も提案されている [7] が、高速に動作可能な専用のプロジェクタやカメラを必要とし、汎用のプロジェクタやカメラを用いて補正を行うことは困難である。また、環境変化に即応することを目的として、ステレオカメラとプロジェクタを組み合わせ、ステレオカメラ

による1度の撮影により投影対象の形状を計測し、投影画像の幾何学的歪みを補正する手法も提案されている [8]。しかし、計測する際にランダムドットのパターン光を用いており、投影画像を再度補正する際には、利用を中断してパターン光の投影・撮影が必要になる。パターン光を用いず投影画像の幾何補正を行う試みも報告されている [9] が、これらの手法では、投影対象の形状が平面であることを仮定しており、投影対象が複雑な形状の場合については、対応できない。

これに対して、本論文では、パターン光を用いず、一般的な画像コンテンツを投影・撮影することで投影画像の幾何学的歪みを補正する手法を提案する。短基線長のステレオカメラとプロジェクタを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステムに着目し、汎用のプロジェクタとカメラを用いて環境変化に即応することを考慮している。プロジェクタで視聴用の画像コンテンツを投影中に投影対象の3次元形状を計測を行い、得られた投影対象の3次元情報を用いて、投影対象の幾何学的歪みの補正を行う。さらに、本論文では、汎用のプロジェクタとカメラを用いて実験を行い、提案手法で投影画像の幾何補正を行った結果を示す。数種類の動画コンテンツを用いた実験を通して、提案したプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手法の有効性を示す。

2. ステレオカメラを用いた投影画像の幾何補正手法

本節では、本論文で提案するステレオカメラによる3次元計測に基づく投影画像の幾何補正手法の詳細について述べる。以下では、まず、提案する幾何補正手法の流れを説明する。次に、各処理の詳細について述べる。

2.1 提案する幾何補正手法の流れ

提案する幾何補正手法では、ステレオカメラは校正済みであり、各カメラの透視投影行列は得られているものとし、プロジェクタは未校正であることを仮定している。提案手法では、まず、未校正のプロジェクタで視聴用のコンテンツを投影し、これを校正済みのステレオカメラで撮影する。そして、撮影した結果から投影対象の3次元形状を計測し、その計測結果に基づき投影画像の幾何学的歪みを補正する。

投影対象の3次元形状を計測し、投影画像の幾何学的歪みを適切に補正するためには、プロジェクタの校正を行い、プロジェクタの透視投影行列を求める必要がある。また、高精度に補正を行うためには、投影対象の形状を高精度かつ高密度に計測する必要がある。本論文では、(i) SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [10] に基づく特徴点マッチングと (ii) 位相限定相関法

[†]東北大学大学院情報科学研究科

[‡]パナソニック株式会社

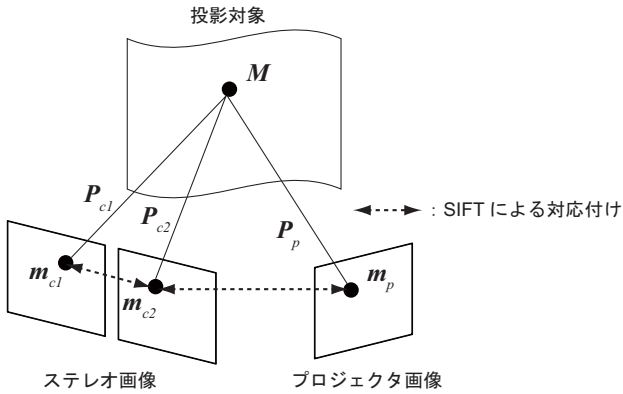


図 1: プロジェクタの透視投影行列の推定

に基づく対応点探索 [11] を用いることで、視聴用の画像コンテンツを投影中にこれらを実現する。

2.2 プロジェクタの透視投影行列の推定

ステレオカメラによる 3 次元計測結果を用いて投影画像の幾何補正を行うために、プロジェクタの透視投影行列を求める。透視投影行列は自由度 11 の 3×4 の行列であり、世界座標系とプロジェクタ座標系との対応点が 6 点以上求められれば、線形的に求めることができる。図 1 に示すように、プロジェクタ画像上の点を m_p とし、これに対応する各カメラ画像上の点を m_{c1} および m_{c2} とする。各カメラの透視投影行列 P_{c1} および P_{c2} は事前の校正によって求めているため、 m_{c1} 、 m_{c2} および m_p に対応する 3 次元点 M を算出できる。したがって、プロジェクタ画像および各カメラ画像との対応点を求めることにより、世界座標系とプロジェクタ座標系との対応点が得られ、プロジェクタの透視投影行列 P_p を推定できる。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を幾何学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の手法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) [10] を用いて特徴点を抽出し、一致する特徴点を検出する。以下では具体的な手順について述べる。

図 2 に示すように、まず、SIFT による特徴点のマッチングを行い、プロジェクタ画像とステレオ画像との対応点を取得する。このとき、カメラ画像は投影対象の形状により幾何学的に歪んでいるため、SIFT を用いた特徴点のマッチングにおいて、誤対応が発生することがある。そこで、本論文では、RANSAC (RANdom SAMple Consensus) [12] を用いて、誤対応の除去を行う。次に、誤対応を除去した対応点群を、ステレオカメラによって 3 次元座標を計算する。これにより、世界座標系とプロジェクタ座標系との対応点が求められたことになる。RANSAC を用いてプロジェクタとカメラの基礎行列を算出することで誤対応の除去を行っているが、完全に除去できない場合がある。そこで、プロジェクタの透視投影行列の推定を行う際においても

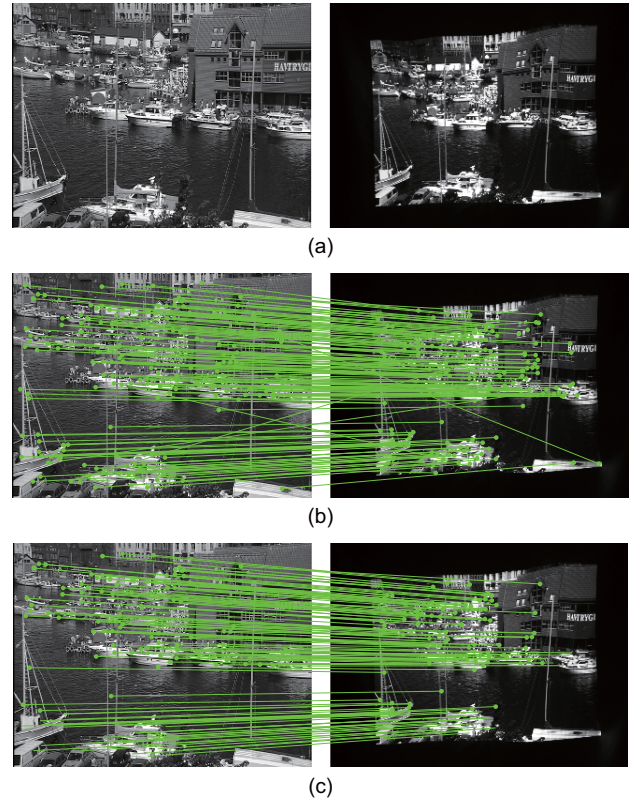


図 2: プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点の取得: (a) プロジェクタ画像 (左) とカメラ画像 (右), (b) SIFT を用いて対応点を取得した結果, (c) RANSAC を用いて誤対応を除去した結果

RANSAC を用いる。RANSAC によるロバスト推定により、プロジェクタの透視投影行列を安定に求める。

2.3 投影対象の 3 次元計測

プロジェクタにより投影された視聴用の画像コンテンツをステレオカメラで撮影し、このとき得られたステレオ画像間の対応点を求める。プロジェクタの投影画像の幾何学的歪みを高精度に補正するためには、投影対象の 3 次元形状を高精度かつ高密度に計測する必要がある。これを実現するために、位相限定相関法に基づく対応点探索 [11] を用いる。位相限定相関法に基づく対応点探索は、領域ベースの画像マッチング手法であり、高密度に対応点を取得することが可能である。また、サブピクセルレベルで対応付けを行うことができるため、基線長の短いステレオカメラでも高精度に 3 次元計測を行うことが可能である。

視聴用の一般的な画像コンテンツの場合、テクスチャがない領域が存在することがある。このような領域では、ステレオ画像間の対応点を求めることが困難であり、誤対応が発生することがある。このときの誤対応がプロジェクタに入力する原画像を変形する際に大きく影響するため、誤対応を適切に判定する必要がある。そこで、まず、得られた対応点の信頼性を判定する。信頼性の判定には、位相限定相関関数のピーク値およびカメラ間のエピポーラ拘束を利用し、信頼性の低い点を誤対応と判定する。次に、誤対応と判定した対応点

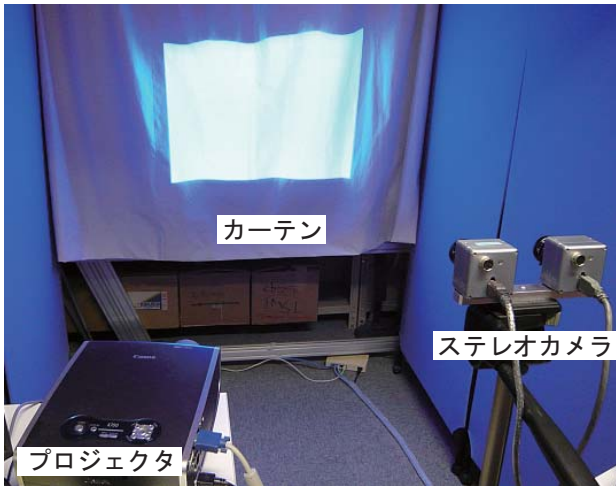


図 3: 実験環境

について、周囲にある信頼性の高い対応点を用いて再推定を行う。具体的には、誤対応とした点の8近傍に着目し、信頼性の高い対応点について、基準点に対する平行移動量をそれぞれ求める。このとき求めた平行移動量の平均を基準点に加え、その基準点に対する対応点とする。この処理を繰り返すことで、誤対応と判定された全ての点について対応点の再推定を行う。全ての基準点の対応点を推定後、各カメラの透視投影行列 P_{c1} および P_{c2} を用いて3次元座標を計算する。

2.4 原画像の変形

得られた3次元座標をプロジェクタの透視投影行列 P_p を用いてプロジェクタ画像上に投影し、プロジェクタ画像上に投影された点群からメッシュを形成する。形成したメッシュに基づきプロジェクタに入力する原画像を変形する。この変形した画像をプロジェクタに入力し、投影することで、幾何学的歪みのない投影画像が観測できる。

3. 実験・考察

本論文で提案した幾何補正手法を実験的に評価した結果について述べる。

実験で用いたカメラおよびプロジェクタを図3に示す。使用したカメラは Point Grey Research 社の SCOR-14SOC (カラー) であり、解像度は $1,280 \times 960$ ピクセルである。各カメラのレンズはミュートロン社の CCTV レンズ FV1022 (焦点距離 10mm) である。ステレオカメラのキャリブレーションは、チェッカーパターンの平板を用いて Zhang らが提案した手法 [13] によりキャリブレーションを行った。キャリブレーションに用いたチェッカーパターンの大きさは $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ である。使用したプロジェクタは、Canon 社の X700 であり、解像度は $1,024 \times 768$ ピクセルである。投影対象は、図3に示した白色カーテンを使用した。

使用した画像コンテンツとして、評価用標準動画画像である *Harbor Scene*, *Church*, *Flamingoes* を用いた。実験結果を図4に示す。図4より、各種動画画像に対して提案手法を適用することにより、投影画像の幾何学

的歪みを解消できることが視認できる。

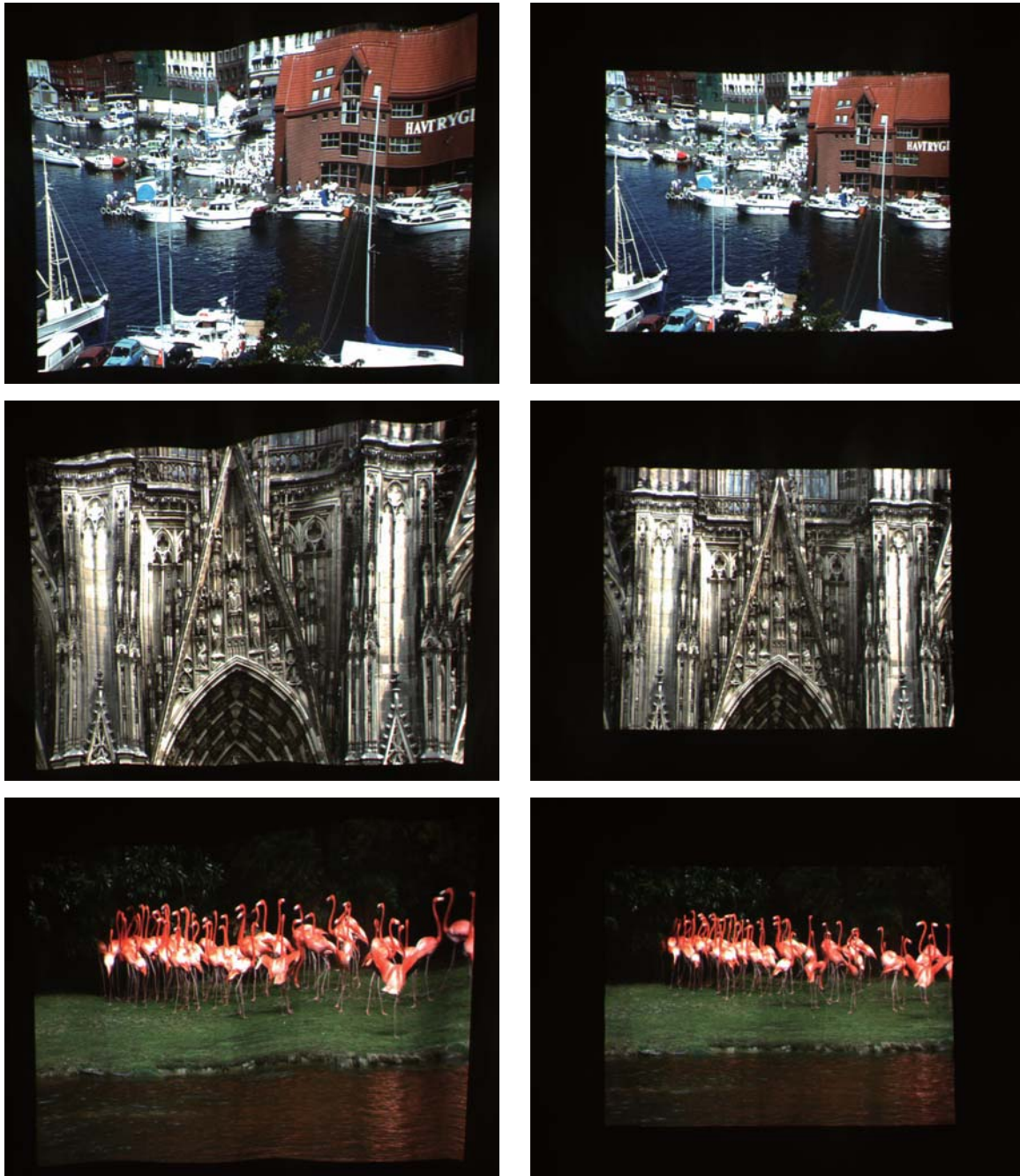
実験により、校正済みのステレオカメラで投影画像を撮影することで、パターン光を一切用いず、投影画像の幾何学的歪みを補正できることを確認した。本論文で述べた投影画像の幾何補正手法は、事前に必要となるキャリブレーションでは、ステレオカメラのみであり、プロジェクタの校正は不要である。このため、実際のプロジェクタの使用にあたり、プロジェクタのズームやフォーカスは自由に変更することができ、実用性が高いと言える。また、パターン光を使用せず、視聴用の画像コンテンツを投影中に補正することができるため、投影対象の形状が変化した場合にも利用を中断せずに対応することができると考えられる。さらに、提案した幾何補正手法は、一般的なプロジェクタとカメラで実現できるため、汎用性が高い。提案手法は、あらゆる場所に情報提示を行う携帯可能なプロジェクタ・カメラシステムを構築する場合に適していると考えられる。

4. まとめ

本論文では、ステレオカメラに基づく3次元計測を用いた投影画像の幾何補正手法を検討した。本論文で提案する幾何補正手法は、パターン光を用いず、投影画像の幾何学的歪みを補正するために必要な情報を取得する。このため、従来のプロジェクタ・カメラシステムによる投影画像の幾何補正手法に比べ、利便性の向上が見込める。実験を通して、ステレオカメラを用いることで、視聴を目的とした一般的な画像コンテンツを投影中に、投影画像の幾何学的歪みを補正できることを確認した。今後の課題として、動画画像のシーケンスに対して処理を繰り返すことにより、より高精度に幾何学的歪みを補正することを考えている。また、計算時間について考慮し、リアルタイムに投影画像の補正を実現することも視野にいれている。

参考文献

- [1] O. Bimber and R. Raskar: "Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds", A K Peters, Ltd. (2005).
- [2] R. Sukthankar, R. Stockton and M. Mullin: "Smarter presentations: Exploiting homography in camera-projector systems", Proceedings of the International Conference on Computer Vision (2001).
- [3] T. Okatani and K. Deguchi: "Autocalibration of projector-camera system", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., **27**, 12, pp. 1845-1855 (2005).
- [4] O. Bimber, A. Emmerling and T. Klemmer: "Embedded entertainment with smart projectors", IEEE Computer, **38**, 1, pp. 48-55 (2005).
- [5] S. Nayar, H. Peri, M. Grossberg and P. Belhumeur: "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections", ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS) (2003).
- [6] 井口征士, 佐藤宏介: "三次元画像計測", 昭晃堂 (1990).
- [7] S. Zollmann and O. Bimber: "Imperceptible calibration for radiometric compensation", In Proc. of Eurographics, pp. 61-64 (2007).
- [8] 高橋徹, 沼徳仁, 青木孝文, 近藤敏志: "短基線長ステレオカメラを用いた投影画像の幾何補正の検討", 第11回画像の理解・認識シンポジウム, pp. 822-827 (2008).



(a)

(b)

図 4: 各種動画像を用いた実験結果 (上から順に Harbor Scene, Church, Flamingoes) : (a) 幾何補正前, (b) 幾何補正後

- [9] T. Takahashi, N. Numa, T. Aoki and S. Kondo: "A geometric correction method for projected images using sift feature points", Proc. ACM/IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS), Posters (2008).
- [10] D. Lowe: "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", International Journal of Computer Vision, **60**, pp. 91-110 (2004).
- [11] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki and T. Higuchi: "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications", IEICE Trans. on Fundamentals, **E87-A**, 8, pp. 1913-1923 (2004).
- [12] M. Fishler and R. Boles: "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Communications of the ACM, **24**, 6, pp. 381-395 (1981).
- [13] Z. Zhang: "A flexible new technique for camera calibration", Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research (1998).