

プロジェクタの幾何補正のための高精度画像対応付け手法の実験的検討

An Experimental Study of a Correspondence Search Technique
for Geometric Correction of Projector川野 達也[†]
Tatsuya Kawano高橋 徹[†]
Toru Takahashi青木 孝文[†]
Takafumi Aoki近藤 敏志[‡]
Satoshi Kondo

1. まえがき

近年、大画面かつ高精細な映像コンテンツの普及に伴い、その表示デバイスに対する要求が高まってきている。その中でもプロジェクタは、画面サイズを任意に変更可能であり、他のデバイスに比べて安価かつ容易に大画面を表示できるという特徴を持ったデバイスである。一方、プロジェクタは、提示する画像（投影画像）が、投影対象の形状やプロジェクタの配置によって幾何学的に歪んでしまうという欠点を持つ。そのため、所望の画像を表示させるためには、使用環境に応じて投影画像の歪みを幾何学的に補正（幾何補正）する必要がある。

この問題に対し、カメラで観測された画像（カメラ画像）に基づき、プロジェクタに入力する画像（プロジェクタ画像）を適切に変形させることで、投影画像の幾何補正を行う手法が提案されている。投影対象の形状やプロジェクタの配置に関係なく、ユーザにとって望ましい画像を表示できるため、大幅な利便性の向上が期待できる。現在までに、投影対象が単一平面の場合についての投影画像の台形補正手法 [1, 2]、投影対象が任意形状の場合の幾何補正手法 [3, 4] などが報告されている。

カメラを用いた投影画像の補正手法では、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応関係を求めることが重要となる。通常、この対応関係を求めるために、プロジェクタで対象にパターン光を投影し、それをカメラで撮影する。代表的な手法として、井口ら [5] 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。パターン光を用いる場合、基本的に、複数枚のパターン光の投影・撮影が必要である。したがって、プロジェクタ画像とカメラ画像の対応関係が変化した場合、システムの利用を中断してパターン光の投影・撮影を再度行わなければならない。携帯して利用するシステムを考えた場合、環境変化に即応し、投影中に補正できることが望まれる。画像の特徴点を用いることで、パターン光の投影を行わずに幾何補正を実現する方法も報告されているが [6]、投影対象が平面であることを想定しており、複雑な形状を持つ投影対象には対応できない。

これに対して、本稿では、汎用カメラによる1回の撮影により、プロジェクタ-カメラ画像間を高精度に対応付ける手法を提案する。提案手法では、パターン光の投影・撮影を必要とせず、一般的な画像コンテンツを用いて画像間の高精度な対応付けを実現する。さらに、提案手法は、投影対象の形状が平面の場合のみでなく、ゆるやかな曲面を持つ場合においても対応付けが可能である。このため、利用者にとっての大幅な

利便性向上が期待できる。実際に数種類の画像コンテンツに対して提案した高精度画像対応付け手法を適用して幾何補正を行い、本手法の有効性を示す。

2. カメラを用いたプロジェクタの幾何補正

本節では、カメラを用いたプロジェクタの投影画像の幾何補正について概要を述べる。本稿では、次のような使用条件を仮定する。

- 投影対象の形状は平面またはゆるやかな曲面
- カメラの視点とユーザの視点は一致

以下では、幾何補正全体について概説し、投影画像の歪みを解消する手法について述べる。

幾何補正は、(i) プロジェクタ画像とカメラ画像間の幾何変換パラメータの推定、(ii) 投影領域の決定、(iii) プロジェクタ画像と原画像間の補正パラメータの算出の3つのステップで行われる。ここで、(ii)の「投影領域」は、カメラ画像上においてコンテンツを表示させたい領域であり、任意に定めることができる。また、(iii)の「補正パラメータ」は、投影領域に対して、目標とする画像が投影されるように、プロジェクタ画像を補正する変形パラメータである。以下では、各処理について概説する。

投影対象の形状やプロジェクタの配置の影響で幾何学的に歪んだ投影画像を補正するためには、プロジェクタ画像を適切に変形させる必要がある。本稿では、投影対象は平面だけでなく、ゆるやかな曲面であることも仮定していたため、プロジェクタ画像とカメラ画像間の変形を単一の射影変換パラメータで表現することはできない。そこで、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を格子点上に求め、図1に示すようにメッシュを形成する。各画像間に対応する領域ごとに、射影変換パラメータで近似して対応付けを行うことにより、画像全体の幾何変換パラメータを求める。対応点をできるだけ密に求め、個々のメッシュのサイズを小さくすることで、非平面な投影対象における対応付けを実現する。対応点の取得には、一般的にパターン光を用いた方法が用いられるが、本稿では、一般的な画像コンテンツを撮影することで対応点の取得を行う。本手法の詳細については次節で述べる。

プロジェクタ画像とカメラ画像との対応付けが正確に行われているならば、投影領域は容易に求めることができる。本稿では、投影領域は、カメラ画像上のプロジェクタによって投影可能な領域において、原画像のアスペクト比を保ったまま表示できる最大の領域として決定する。この投影領域に表示される投影画像と原画像との関係は、スケール変化と平行移動を合わせた変換パラメータで記述できる。この変換パラメータと、プロジェクタ画像とカメラ画像間の幾何変換パラメータを掛け合わせ、プロジェクタ画像と原画像間の

[†] 東北大学大学院情報科学研究科[‡] パナソニック株式会社

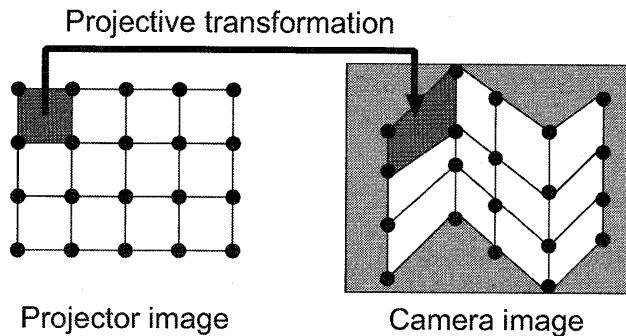


図1: メッシュベースの画像間対応付け

補正パラメータを算出する。得られた補正パラメータを用いてプロジェクタ画像を変形し、それを投影することで幾何補正が実現できる。

3. プロジェクタの幾何補正のための高精度画像対応付け手法

本節では、プロジェクタ画像とカメラ画像間の幾何変換パラメータを、一般的な画像コンテンツを用いて高精度に推定する手法について述べる。まず、本稿で用いる2種類の高精度画像対応付け手法について概説し、次に、プロジェクタ-カメラ画像間の幾何変換パラメータを高精度に推定する手順について述べる。

3.1 高精度画像対応付け手法

提案手法では、高精度画像対応付け手法として、(i) SIFTに基づく特徴点のマッチングおよび(ii)位相限定相関法に基づく領域ベースの画像マッチングの2つを用いる。以下では、それぞれについて概説する。

SIFTに基づく特徴点のマッチング

Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) は、画像のスケール・回転・輝度変化にロバストな特徴点検出・特徴量記述アルゴリズムである。検出された各特徴点に対して定義された特徴ベクトル間のユークリッド距離を比較することにより、異なる2枚の画像間の特徴点を対応付けることができる。特徴ベクトルの算出時に画像のスケールと回転が正規化されるため、画像間で拡大・縮小や回転が生じていてもロバストに対応付けを行うことが可能である。このため、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を取得するのに有効であると考えられる。本手法の詳細については、文献[7]を参考にされたい。

位相限定相関法に基づく領域ベースの画像マッチング

位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) は、画像を2次元離散フーリエ変換して得られる位相成分のみを用いて、サブピクセルレベルの高精度な画像マッチングを行う手法である。画像の濃淡情報が保存されている振幅成分を正規化するため、輝度変化やノイズに対してロバストな対応付けが可能である。位相限定相関法では、高精度に画像間の対応点を推定するために、(i) 局所ブロック画像のブロックマッチングと(ii) 画像ピラミッドによる粗密探索を用いている。Takitaらの精度評価実験によると、 32×32 ピクセルの画像ブロックに対して、0.05ピクセルの精度で対応点間の移

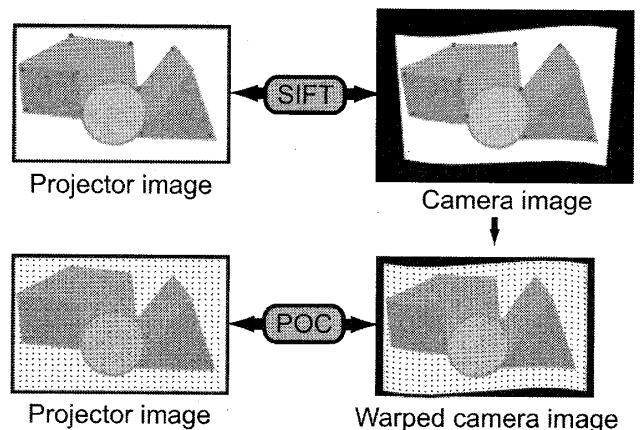


図2: メッシュベースの画像間対応付け

動量を求めることが可能である[8]。本手法の詳細については、文献[8]を参考にされたい。

3.2 幾何変換パラメータの推定手順

2節で述べたプロジェクタ-カメラ画像間の幾何変換パラメータの推定を、上述の2つのマッチング手法を組み合わせることで高精度に行う手法について述べる。手法の流れを図2に示す。

一般に、プロジェクタ画像とカメラ画像間の輝度レベルは大きく異なる。したがって、それぞれの画像を対応付けるためには、画像の輝度変化に対してロバストな対応付け手法が不可欠である。本稿で使用するSIFTおよび位相限定相関法は、いずれも輝度変化にロバストな性質を持つため、この条件を満たす。また、カメラで撮影される投影画像は、プロジェクタ画像が歪み、さらにスケール変化を生じているものである。そのため、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を、領域ベースのマッチング手法で取得するのは困難である。そこで、まず、特徴ベースのマッチング手法であるSIFTを用いて対応点を検出し、画像全体の大域的な射影変換パラメータを推定する。投影対象が平面でない場合、SIFTを用いて得られた射影変換パラメータのみでは画像間の変形を記述できない。そこで、SIFTで得られた射影変換パラメータでカメラ画像を変形させ、大まかな歪みやスケールの違いを解消する。その後、位相限定相関法に基づく領域ベースの画像マッチング手法を用いて対応点を取得する。この時、対応点探索に用いる基準点をプロジェクタ画像上で格子状に配置することで、プロジェクタ画像とカメラ画像間でメッシュベースの対応付けを行うことができる。

4. 実験・考察

本節では、提案手法を用いて、実際にプロジェクタの幾何補正を行い、従来手法を用いた場合との比較を行う。図3に示すような実験環境を構築した。実験では、パターン光を用いた場合のカメラ画像上の対応点座標を真値と仮定し、提案手法を用いて得られる対応点座標との誤差の平均値で評価する。パターン光を用いる手法では、図4に示すような6ビットまでのグレイコードパターン24枚および点群を求めるためのドット

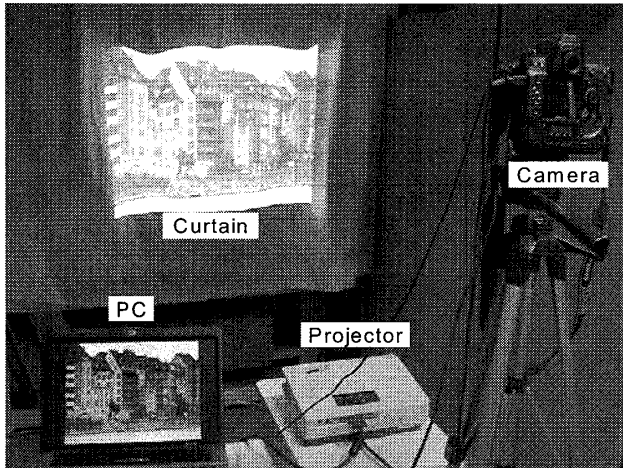


図 3: 実験環境

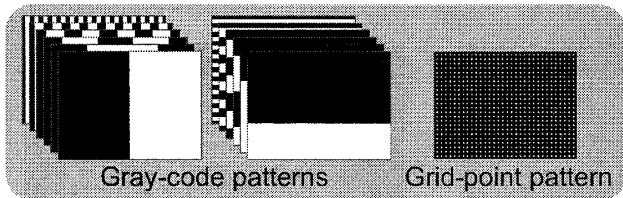


図 4: グレイコードパターン (6ビット) およびドットパターン

パターン1枚, 合計25枚の投影・撮影を行った。各点における誤差は, パターン光を用いて得られた対応点座標と提案手法で得られた対応点座標間のユークリッド距離とする。投影対象は, 白色平板および白色カーテンである。位相限定相関法を適用した場合の効果を確認するため, SIFTのみを用いた場合についても同様の環境下において実験・評価を行う。ただし, この場合は, 検出する座標が固定されないため, SIFTで得られる対応点から推定した射影変換パラメータから, カメラ画像上の対応点座標を算出する。使用する画像は, NHK標準動画像である *Buildings along the canal*, *Character Pattern*, *Church* の3つのシーケンスから, 30フレームおきに30枚ずつ用いた。各シーケンスについて, 全フレームの誤差の平均値を求める。

全フレームにおける誤差の平均値を, 表1に示す。表1より, 平板, カーテンいずれを用いた場合においても, カメラ画像の座標系上で平均1ピクセル程度の誤差に抑えられていることが確認できる。この結果から, 位相限定相関法を適用することで, 対応点の検出位置の精度が向上していることがわかる。

次に, カーテンを用いた場合について, それぞれのシーケンスにおいて誤差の大きかったフレームについて幾何補正結果を図5に示す。各シーケンスにおいても, ほとんどの歪みが解消され, 所望の画像を表示できていることが確認できる。しかし, *Buildings along the canal*, *Character Pattern* に着目してみると, 画像上端部において幾何補正が失敗している領域が存在す

る。これは, SIFTを用いて求めた射影変換パラメータからカメラ画像を変換した際に, 対応する画像領域がプロジェクタ画像の領域外に多少はみだしてしまったことが原因として考えられる。また, 失敗したコンテンツの上端部は, いずれもテクスチャの少ない領域であり, 位相限定相関法による対応点探索の際に, 対応が正しく求められなかったと考えられる。前者の場合, カメラ画像を変形する際に, プロジェクタ画像の外周にある程度マージンをとって画像を変形することで対処が可能である。また, 後者の場合, 得られた対応点座標について, 周囲の対応点との関係をチェックするような処理を適用することである程度対応可能であると考えられる。例えば, 周囲の対応点座標との距離が明らかに離れている点については, 周囲の対応点座標から算出した中央値と置き換えるだけでも, 大きな誤差は抑えることが可能であると考えられる。

5. まとめ

本稿では, SIFTに基づく特徴ベースマッチング手法と, 位相限定相関法に基づく領域ベースマッチング手法を組み合わせ, 高精度に画像対応付けを行う手法を検討した。従来, 幾何補正に必要となる対応点の取得には, 複数回のパターン光の投影・撮影が必要であったが, 提案手法では, 一般的な画像コンテンツを1回撮影するだけで対応点の取得が可能であることを示した。また, 投影対象の形状が平面の場合のみでなく, ゆるやかな曲面形状を持っている場合でも対応付けが可能であり, 高い利便性を持ったシステムを構築できることが期待できる。今後は, 本手法をマルチプロジェクタディスプレイの構築に適用する方法の検討や, 動画像を利用した対応点取得精度の向上・安定化の検討などを行う予定である。

参考文献

- [1] T. Okatani and K. Deguchi: "Autocalibration of projector-camera system", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **27**, 12, pp. 1845-1855 (2005).
- [2] R. Sukthankar, R. Stockton and M. Mullin: "Smarter presentations: Exploiting homography in camera-projector systems", *Proc. of the International Conference on Computer Vision* (2001).
- [3] R. Raskar, M. Brown, R. Yang, W. Chen, G. Welch, H. Towles, B. Seales and H. Fuchs: "Multi-projector displays using camera-based registration", *IEEE Visualization*, pp. 161-168 (1999).
- [4] O. Bimber, A. Emmerling and T. Klemmer: "Embedded entertainment with smart projectors", *IEEE Computer*, **38**, 1, pp. 48-55 (2005).
- [5] 井口征士, 佐藤宏介: "三次元画像計測", 昭晃堂 (1990).
- [6] 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 (PRO-CAMS2008)*, pp. 1-2 (2008).
- [7] D. G. Lowe: "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *International Journal of Computer Vision*, **60**, pp. 91-110 (2004).
- [8] 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).

表 1: 実験結果: カメラ画像の座標系上での平均誤差 [pixel]

Display surface	Flat plate		Curtain	
Sequence name	SIFT	SIFT&POC	SIFT	SIFT&POC
<i>Buildings along the Canal</i>	1.78	0.49	13.84	1.15
<i>Character Pattern</i>	2.05	0.86	16.56	1.90
<i>Church</i>	1.69	0.39	13.87	0.72

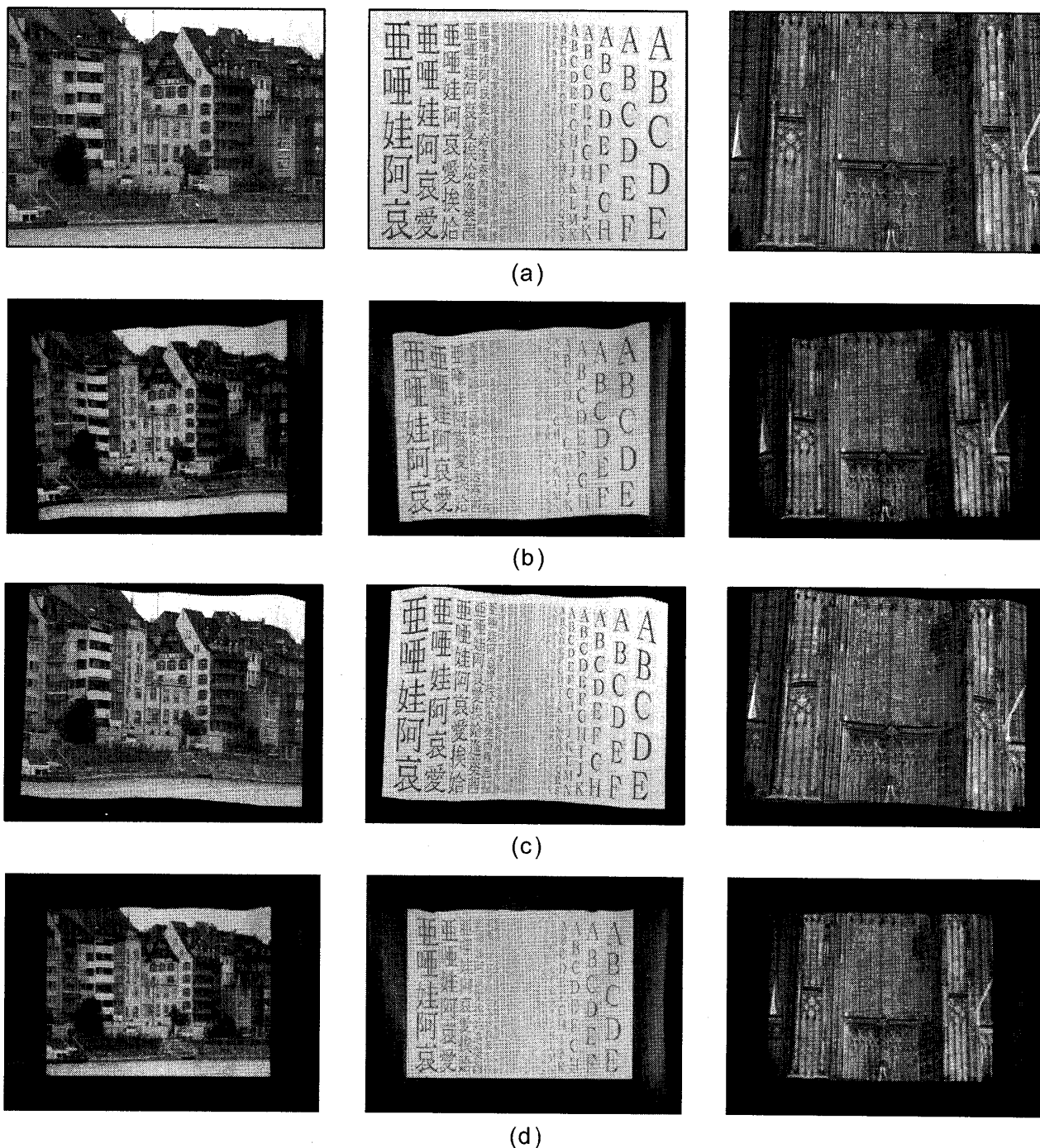


図 5: 実験結果: (a) 実験に用いたコンテンツ (原画像), (b) 補正前のカメラ画像, (c) 補正後のプロジェクタ画像, (d) 補正後のカメラ画像