

SIFT と位相限定相関法を用いた高精度画像対応付けに基づく マルチプロジェクタディスプレイの校正手法

高橋 徹^{†a)} 川野 達也[†] 伊藤 康一[†] 青木 孝文[†]
近藤 敏志^{††}

A Calibration Technique for Multi-Projector Display Based on High-Accuracy
Image Correspondence Using SIFT and Phase-Only Correlation

Toru TAKAHASHI^{†a)}, Tatsuya KAWANO[†], Koichi ITO[†], Takafumi AOKI[†],
and Satoshi KONDO^{††}

あらまし 本論文では、高精度画像対応付けに基づくマルチプロジェクタディスプレイの幾何学的校正手法を提案する。カメラを用いてマルチプロジェクタディスプレイの校正を行う場合、各プロジェクタに入力する画像とカメラで撮影した画像を高精度に対応付ける必要がある。従来は、使用するプロジェクタごとにパターン光の投影・撮影を行うことで対応付けを行っており、プロジェクタの台数の増加に伴い、ユーザにとって複雑な作業となる。これに対して、提案手法では、視聴を目的とした一般的な画像を投影・撮影することで対応付けを行い、マルチプロジェクタディスプレイを校正する。具体的には、(i) SIFT による特徴ベースの画像マッチング手法と (ii) 位相限定相関法に基づく領域ベースのサブピクセル画像マッチング手法を組み合わせることにより、プロジェクタ-カメラ画像間の対応付けを高精度に行う。数種類の標準動画像を用いた実験により、提案手法を用いて簡単にマルチプロジェクタディスプレイを校正できることを示す。更に、提案手法を用いて、リアプロジェクション型立体ディスプレイシステムを構築し、その有効性を実証する。

キーワード マルチプロジェクタディスプレイ、立体ディスプレイ、プロジェクタ・カメラシステム、SIFT、位相限定相関法

1. ま え が き

プロジェクタは、小型で携帯性を有し、投影面との距離に応じて表示サイズを変更できる柔軟な表示デバイスである。近年では、複数台のプロジェクタを用いて、1枚の広視野・高精細画像を表示する技術（マルチプロジェクタディスプレイ）が盛んに研究されている [1] ~ [5]。例えば、複数台のプロジェクタの投影画像をタイル状に並べることにより、広視野角なディスプレイを構築することができる [1] ~ [3]。また、複数台の

プロジェクタの投影画像を重ねる重畳投影により、投影画像の解像度を向上させたり [4]、投影画像の濃淡や色の階調表現力を向上させたり [5] する応用も報告されている。更に、最近になって、三次元立体映像技術が注目されており、複数台のプロジェクタを用いた立体映像ディスプレイも検討されている。

マルチプロジェクタディスプレイを構築するためには、各プロジェクタに入力する画像（プロジェクタ画像）をそれぞれ変形し、精密に複数の投影画像をつなぎ合わせる、若しくは重畳する必要がある。カメラで投影画像を撮影し、目標とする投影画像が得られるように各プロジェクタ画像を変形することで、投影画像の幾何学的ひずみの補正を行うことができる。この実現には、各プロジェクタに入力するプロジェクタ画像とカメラで撮影したカメラ画像との間の精密な対応関係を求める必要があり、この対応関係の精度が最終的な投影画像の品質を決定する。通常、プロジェクタが

[†] 東北大学大学院情報科学研究科，仙台市

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, 6-6-05 Aramaki, Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, 980-8579 Japan

^{††} パナソニック株式会社，門真市

Panasonic Corporation, 1006 Kadoma, Kadoma-shi, 571-8501 Japan

a) E-mail: toru@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

ら投影面に対して特殊なパターン光を複数回投影し、それをカメラで撮影することで、プロジェクタ-カメラ座標系間の対応関係を求める。代表的な手法として、井口らにより考案されたグレイコードパターン光投影法 [6] などがある。グレイコードなどのパターン光を用いることにより、プロジェクタ-カメラ間の対応関係を高精度かつ安定に求めることが可能である。一方、各プロジェクタに対してパターン光の投影・撮影を行うため、使用するプロジェクタ台数の増加に伴い、ユーザにとって非常に複雑な作業になる。これは、製品化されている通常のプロジェクタを数台用意し、マルチプロジェクタディスプレイを手軽に実現する場合に、問題になることが多い。

これに対して、本論文では、汎用のプロジェクタとカメラを用いて、視聴用のコンテンツを投影中に、マルチプロジェクタディスプレイを簡便かつ高精度に校正する手法を提案する。これまでに筆者らは、パターン光投影を用いず、一般的な画像コンテンツに含まれる特徴点の検出・マッチングを行うことで、マルチプロジェクタディスプレイの校正を行う手法を提案した [7], [8]。この手法では、Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [9] を用いて、プロジェクタ画像とカメラ画像との間の特徴点マッチングを行い、各プロジェクタ-カメラ間の射影変換行列を求めることで、マルチプロジェクタディスプレイの校正を実現している。しかし、SIFT は特徴ベースの画像マッチング手法であるため、コンテンツ中に検出される特徴点の数が少ない、あるいは特徴点の検出位置に偏りが生じる場合があり、パターン光投影を用いた場合と比べ、マルチプロジェクタディスプレイ校正の精度が低いという問題があった。本論文では、この問題を SIFT [9] による大域的レジストレーションと位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) [10] ~ [12] によるサブピクセル精密レジストレーションを組み合わせることによって解決する。NHK 標準動画画像を用いた評価実験を通して、提案手法を用いることで投影画像の 1 回の撮影により、各プロジェクタ-カメラ座標系間の射影変換行列を高精度に推定し、広視野角ディスプレイを簡便に校正できることを示す。

更に、本論文では、提案手法の応用として、極めて簡便にマルチプロジェクタによる立体ディスプレイを構築する手法を提案する。近年、三次元立体映像技術が非常に注目を集めており、両眼視差を利用した立体映像による映画は多数製作されている。提案する立体

ディスプレイシステムは、既存のプロジェクタを用いて非常に少ない手間でシステムを構築できる。立体映像のコンテンツを用いた一連の実験を通して、提案する立体ディスプレイの有用性を示す。

2. マルチプロジェクタディスプレイの校正手法

本章では、カメラを用いてマルチプロジェクタディスプレイを校正する手法の概要を述べる。本論文では、ユーザの視点とカメラが一致していると仮定し、カメラ画像上で各投影画像を高精度につなぎ合わせる、あるいは、精密に重ね合わせることをマルチプロジェクタの校正と定義する。

以下では、画像の変形モデルについて説明した後、幾何学的に投影画像を変形し、一つのディスプレイを構成する手法について述べる。本論文では、各画像を以下のように定義する。

- プロジェクタ画像：プロジェクタに入力した画像
- カメラ画像：カメラで撮影した画像
- 投影画像：投影面上に表示された画像

プロジェクタの台数が 2 台の場合における各画像間の対応関係を図 1 に示す。複数台のプロジェクタから投影された画像をつなぎ合わせる、あるいは重ね合わせるためには、各プロジェクタ画像を適切に変形させる必要がある。本論文では、投影面が完全な平面であ

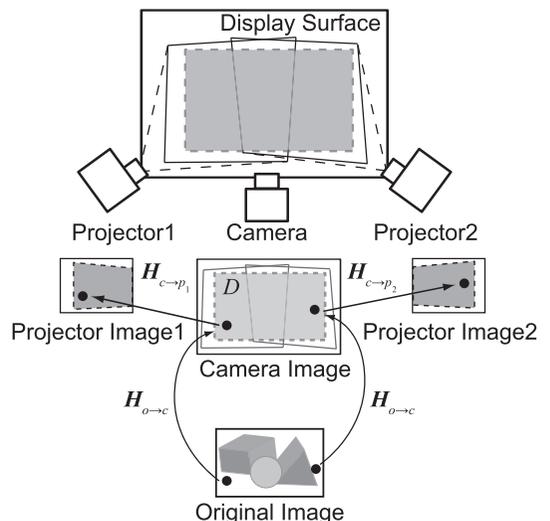


図 1 各画像間の対応関係の例

Fig. 1 Example of the correspondense among images.

り、プロジェクタのレンズによる投影画像の非線形なひずみが無視できるものと仮定する。このとき、各プロジェクタ画像の座標系とカメラ画像の座標系との対応関係は、射影変換行列によって記述できる。使用するプロジェクタの台数を N とし、 i 番目のプロジェクタ画像上の点を m_{p_i} とする ($i = 1, \dots, N$)。これに対応するカメラ画像上の点を m_c とすると、これらの関係は、同次座標表現を用いて以下の式で表すことができる。

$$\lambda \tilde{m}_{p_i} = H_{c \rightarrow p_i} \tilde{m}_c \quad (1)$$

ここで λ は、0 を除く任意の定数、 \tilde{m}_{p_i} 及び \tilde{m}_c は、 m_{p_i} と m_c の同次座標表現である。また、 $H_{c \rightarrow p_i}$ は、カメラ画像から i 番目のプロジェクタ画像への射影変換行列であり、 3×3 の自由度 8 の行列である。 $H_{c \rightarrow p_i}$ は、各プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点が最低 4 点あれば求めることができるが、一般的に、対応点を 5 点以上求め、最小二乗法を用いてパラメータ推定を行うことにより、推定精度を向上させる。各プロジェクタ画像について、カメラ画像との射影変換行列 $H_{c \rightarrow p_i}$ を求めることにより、カメラ画像上で各投影画像の精密なつなぎ合わせ、あるいは重ね合わせが可能となる。

次に、カメラ画像上でコンテンツを表示する領域 D を決定する。カメラで観測される幾何補正後の投影画像と原画像との関係は、スケール変化と平行移動で記述できる。この変換を $H_{o \rightarrow c}$ とし、原画像と各プロジェクタ画像間の変換行列を $H_{o \rightarrow p_i}$ とすると、以下の関係式が成り立つ。

$$H_{o \rightarrow p_i} = H_{c \rightarrow p_i} H_{o \rightarrow c} \quad (2)$$

この変換行列 $H_{o \rightarrow p_i}$ を用いて、各プロジェクタごとに原画像を变形して投影することで、複数台のプロジェクタによる投影画像をつなぎ合わせて、あるいは重ね合わせて表示することができる。

カメラで画像上の投影画像と原画像との関係を表す $H_{o \rightarrow c}$ は、カメラ画像上でユーザが領域 D を指定することで決定される。本論文では、カメラ画像上において、校正後の投影画像が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、領域 D を定義する。このとき、各プロジェクタで投影可能な領域をカメラ画像内で求める必要があるが、各プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応付けが行われていれば容易に推定可能である。

本論文では、ユーザとカメラの位置が一致しているとして仮定しており、カメラ画像上で各投影画像の幾何補正を実現することでマルチプロジェクタディスプレイを実現している。このため、投影面上で幾何学的ひずみのない投影画像を提示するためには、カメラをスクリーンに対して正対させる、若しくは別の校正が必要となる [2], [3]。これらの手法を用いてマルチプロジェクタディスプレイの校正を実現する場合も、各プロジェクタ-カメラ間の射影変換行列 $H_{c \rightarrow p_i}$ を高精度に求めることが重要になる。

3. 高精度画像対応付けに基づく射影変換行列の推定

本章では、プロジェクタ画像とカメラ画像との間の射影変換行列 $H_{c \rightarrow p_i}$ 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。プロジェクタ画像とカメラ画像との間の対応点を求めるには、通常、各プロジェクタから特殊なパターン光を複数回投影し、それをカメラで撮影する手法が一般的である。これに対して、本論文では、簡便かつ高精度にマルチプロジェクタディスプレイを校正するために、一般的な動画像コンテンツを視聴中にプロジェクタ-カメラ画像間の対応点を高精度に取得する手法を提案する。まず、本論文で用いる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-カメラ座標系間の射影変換行列を高精度に推定する手法について述べる。

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 に基づく特徴点ベースの画像マッチング及び (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二つを用いる。以下では、それぞれについて概説する。

[SIFT に基づく特徴点ベースの画像マッチング]

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。SIFT に基づく特徴点ベースの画像マッチング手法では、(i) 特徴点の検出、(ii) 特徴量の記述、(iii) 対応点探索の三つのステップで構成される。(i) の特徴点の検出では、Difference-of-Gaussian (DoG) 処理により特徴点の候補を求める。DoG 処理は、複数のスケール (分散) の異なるガウス関数と入力画像との畳込みによって得られた平滑化画像間の差分を求める処理である。このとき得られた画像 (DoG 画像) から極値を

検出し、特徴点候補とする。その後、各候補点について主曲率とコントラストに基づき、特徴点として有効な点を選定する。(ii) の特徴量の記述では、特徴点を中心とした局所ブロックの輝度の勾配情報を 128 次元のベクトルとして特徴量を求める。この際、この配方向のヒストグラムから、最も頻度の高い方向を検出し、回転を補正する。この処理を各特徴点に対して行うことで、回転に対して不変な特徴量を求められる。(i) 及び (ii) の処理をマッチングを行う二つの画像に対して適用する。(iii) の対応点探索のステップでは、検出された各特徴点に対して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づける。

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間の対応点を取得するのに有効である。本手法の詳細については、文献 [9] を参考にされたい。

SIFT に基づく特徴点ベースの画像マッチング手法では、入力画像によっては対応点が少なく、その位置に偏りが生じる場合がある。投影画像を高精度に重ね合わせるためには、密な対応点が必要になる。

[位相限定相関法に基づく領域ベースの画像マッチング]

位相限定相関法は、画像を二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画像マッチングが可能である。

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では、(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。局所ブロック画像のマッチングにおいて、位相限定相関法に基づく平行移動量推定を用いることで二つの画像の対応点をサブピクセル精度で検出することができる。位相限定相関法を用いて高精度に平行移動量を推定するためには、(i) 画像端での信号の不連続性を解消するための窓関数の適用、(ii) エイリアシングやノイズ、ぼけ、ひずみの影響を抑制するためのスペクトルの重み付け、(iii) 相関ピークモデルのフィッティングが重要となる [12]。本論文では、窓関数としてハニング窓を用いており、スペクトル重み付け関数としてガウ

ス関数を用いる。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動量を求めることが可能である [10]。本手法の詳細については、文献 [10], [12] を参考にされたい。

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。また、カメラで撮影される投影画像は、プロジェクタ画像を射影的にひずませたものである。したがって、プロジェクタ-カメラ画像間に対応づけるためには、画像の輝度変化及び射影的なひずみに対してロバストな対応付け手法が不可欠である。SIFT は輝度変化にロバストであり、射影的なひずみを持つ二つの画像間でも対応点を取得することができる。しかし、特徴点ベースのマッチング手法であるため、一般的に、得られる対応点の数が少なく、対応点の位置に偏りがある場合、推定される射影変換パラメータの精度が低くなる。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は、輝度変化にロバストであり、画像間の対応点を高精度かつ高密度に取得することが可能である。一方、画像間の射影的な幾何変形に対して弱く、射影的なひずみを持つ二つの画像間の対応点を取得することが困難である。

筆者らは、輝度レベルが大きく異なり、射影的なひずみをもつプロジェクタ-カメラ画像間の対応点を、高精度かつ高密度に求めるための理想的な画像マッチング手法を見出した。まず、SIFT に基づく特徴点ベースの画像マッチング手法を用いて画像間の対応付けを行う。得られた対応点から求めた近似的な射影変換行列でカメラ画像を変形させ、プロジェクタ画像とカメラ画像の解像度の違いや大域的な射影的なひずみを解消する。次に、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画像間の対応付けを行う。カメラ画像は、プロジェクタ及びカメラの光学的特性により、低周波成分に有用な情報が偏り、高周波成分は信頼性が低いと考えられる。位相限定相関法では、高精度化手法の (ii) スペクトル重み付けにおいて、低域型のスペクトル重み付け関数であるガウス関数を用いている。このため、信頼性の低い高周波成分の影響を抑制でき、高精度に対応点を取得することが可能となる。画像全体に基準点を配置し、高密度に対応点を取得する。本手法の適用にあたり、プロジェクタの解像度よりも大きい解像度のカメラを用いることで、高精度かつ安定な対応付けが可能である。

3.2 射影変換行列の推定手順

上述の二つの対応付け手法を組み合わせることで、各プロジェクタ-カメラ画像間の射影変換行列 $H_{c \rightarrow p_i}$ の推定を高精度に行う手法について述べる。

まず、SIFT を用いて各プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点を取得する。得られた対応点を用いて、カメラ画像上の点から各プロジェクタ画像の点への近似的な射影変換行列 $H_{c \rightarrow p'_i}$ を求める。このとき、誤対応による精度の低下を軽減するために、RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [13] を用いる。SIFT と RANSAC を用いることで、図 2 (a) に示すようにプロジェクタ-カメラ画像間の対応点を取得し、安定に射影変換行列を推定することができる。この $H_{c \rightarrow p'_i}$ を用いて、カメラ画像を変形させることにより、プロジェクタ画像とカメラ画像との間の大域的な射影ひずみを解消する。

次に、位相限定相関法に基づく対応点探索を用いて、射影変換行列を高精度に求める。図 2 (b) に示すように、射影ひずみをほぼ解消したカメラ画像とプロジェクタ画像との間の対応点探索を行う。得られた対応点を用いて、プロジェクタ画像と変換されたカメラ画像との間の射影変換行列 $H_{p'_i \rightarrow p_i}$ を求める。対応点探索に用いる基準点を画像全体に配置することができるため、SIFT のみを用いた場合に比べ、画像全体から密

に対応点を取得することが可能である。最終的に、プロジェクタ画像とカメラ画像間の射影変換行列 $H_{c \rightarrow p_i}$ は、SIFT を用いて得られた $H_{c \rightarrow p'_i}$ と、位相限定相関法を用いて得られた $H_{p'_i \rightarrow p_i}$ を用いて、以下のように表される。

$$H_{c \rightarrow p_i} = H_{p'_i \rightarrow p_i} H_{c \rightarrow p'_i} \quad (3)$$

得られた $H_{c \rightarrow p_i}$ を用いて、2. で述べた校正手法を実行することにより、映像コンテンツを視聴しながらに簡便かつ高精度な校正が可能となる。

4. タイル状投影による広視野角画像表示

本章では、本論文で提案する校正手法を用いてマルチプロジェクタディスプレイの校正を行い、広視野角画像表示を行った結果を示す。提案手法の評価を行うために、同様の実験環境下で従来手法であるグレイコードパターン光投影法 [6] 及び SIFT のみを用いた手法とを比較する。

4.1 実験条件

実験は、図 3 に示す環境で行った。使用機材は、白色平板、プロジェクタ 2 台 (Canon X700, 解像度 $1,024 \times 768$ pixel), デジタルカメラ 1 台 (Nikon D3, 解像度 $4,256 \times 2,832$ pixel), 及び PC 1 台である。まず、白色平板に対してプロジェクタ 2 台を適当に並べ、それらの投影画像がわずかに重畳するように設置する。各プロジェクタに対して原画像を入力し、その投影画像を 1 回撮影する。得られたカメラ画像を PC に転送し、提案手法を適用後、各プロジェクタへの入力を更新する。原画像に用いるコンテンツとして、NHK 標準動画画像である *Buddhist Images*, *Church*,

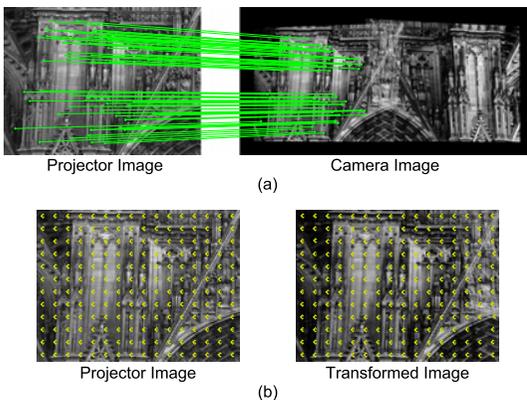


図 2 対応点取得の例 (a) SIFT と RANSAC で得られた対応点, (b) 位相限定相関法に基づく対応点探索で得られた対応点

Fig. 2 Example of corresponding point pairs between projector and camera images: (a) corresponding points pairs obtained by SIFT and RANSAC, and (b) corresponding point pairs obtained by POC-based correspondence search technique.

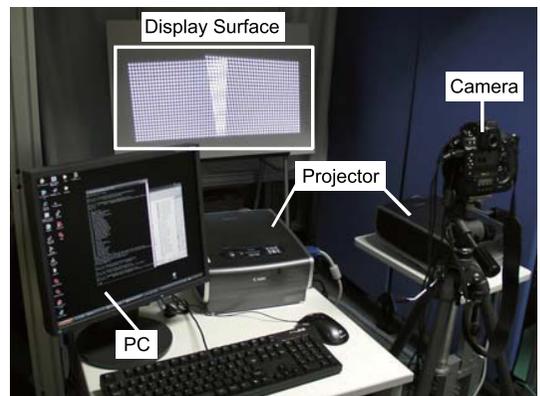


図 3 実験環境

Fig. 3 Experimental environment.

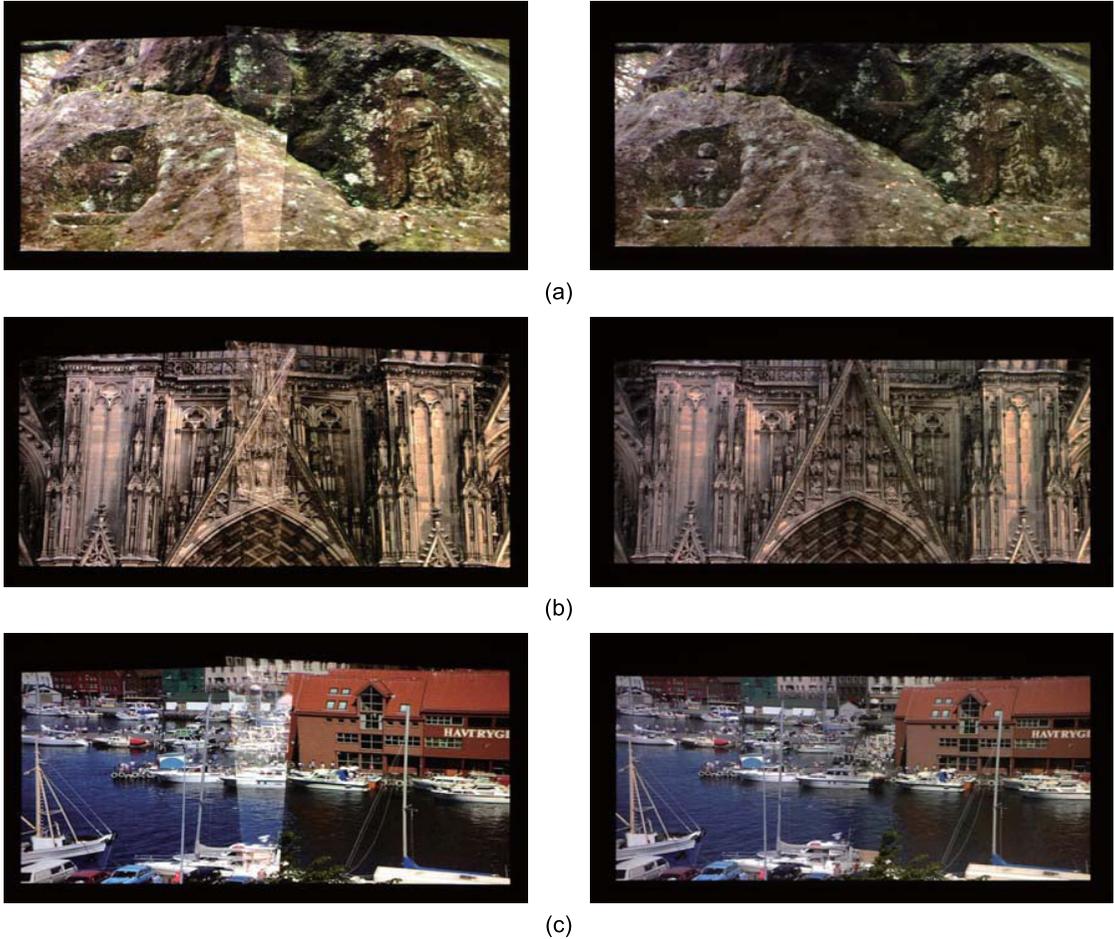


図 4 実験結果 (NHK 標準画像) (a) *Buddhist Images*, (b) *Church*, (c) *Harbor Scene* (左: 未校正時のカメラ画像, 右: 校正後のカメラ画像)

Fig. 4 Experimental results using standard video sequences (NHK): (a) *Buddhist Images*, (b) *Church*, and (c) *Harbor Scene* (left: the camera image before calibration, right: the camera image after calibration).

Harbor Scene の三つのシーケンスの 1 フレームを用いる。各画像の解像度は、 720×480 pixel である。

提案手法及び SIFT のみを用いた手法では、各画像を左右に等分し、それぞれをバイキュービック補間を用いて $1,024 \times 768$ pixel に補間拡大した後、各プロジェクタに入力する。その後カメラで 1 回撮影し、提案手法を用いてマルチプロジェクタディスプレイの校正を行った。従来手法であるグレイコードパターン光投影法では、各プロジェクタごとにグレイコードパターン画像を 20 枚及び点群を求めるためのラインパターンを 2 枚、合計 44 枚の投影・撮影を行った。また、マルチプロジェクタディスプレイを実現する上では、

各投影画像の幾何学的な補正のほかに、各投影画像の輝度を合わせる光学的な補正が必要となる。本論文では、事前にそれぞれのプロジェクタについて、白色平板に対して画素値が 0~255 に変化している画像を投影し、カメラで撮影することで、各プロジェクタとカメラの画素値の対応を求めておく。このとき得られたプロジェクタとカメラの画素値の関係を用いて、全体の輝度を一様にした。各投影画像が重なり合う領域については、アルファブレンディング処理を適用した。

4.2 実験結果・考察

提案手法を用いて各プロジェクタの射影変換行列 $H_{c \rightarrow p_i}$ を推定し、マルチプロジェクタディスプレイ

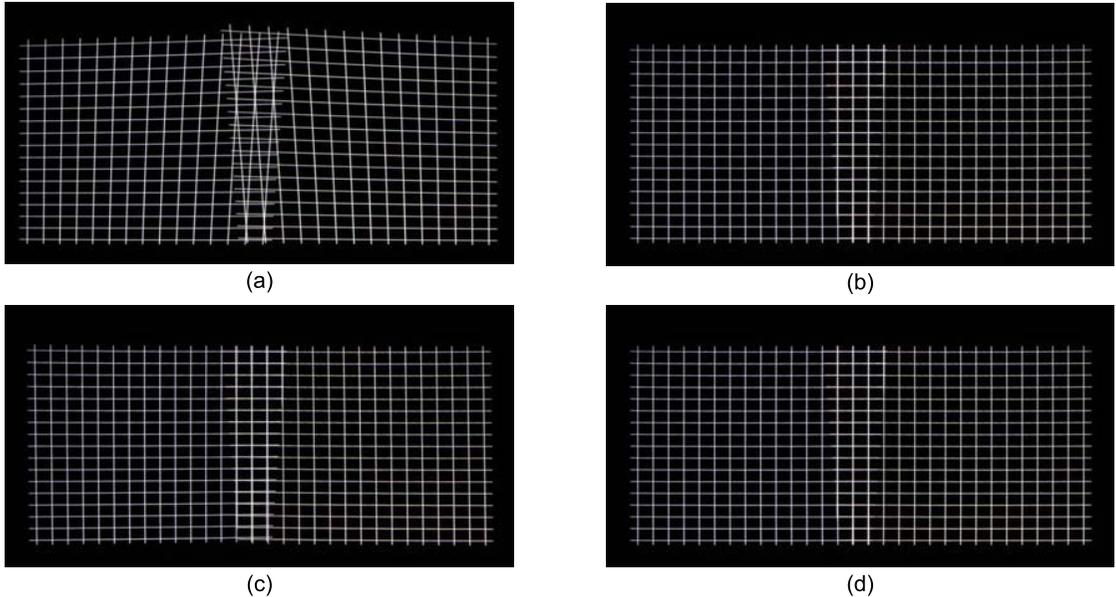


図 5 実験結果 (Church を撮影した結果から得られた射影変換行列を用いてグリッドパターンを変形して投影) (a) 未校正時のカメラ画像, (b) グレイコードパターン光投影法を用いて校正した際のカメラ画像, (c) SIFT のみを用いて校正した際のカメラ画像, (d) SIFT と POC を用いて校正した際のカメラ画像

Fig. 5 Experimental results (Projection of the grid pattern): (a) the camera image before calibration, (b) the camera image after calibration using the graycode patterns, (c) the camera image after calibration using only SIFT, and (d) the camera image after calibration using SIFT and POC.

表 1 対応点座標の誤差 [pixel]
Table 1 Errors of the corresponding points [pixel].

	SIFT を用いた対応付けのみを利用		SIFT と POC を用いた対応付けを利用	
	RMS Error	Max Error	RMS Error	Max Error
<i>Buddhist Images</i>	4.579	17.011	1.104	5.938
<i>Church</i>	3.423	13.020	0.940	4.867
<i>Harbor Scene</i>	6.480	26.355	0.998	5.178

を校正した後で、実際にコンテンツを表示させた結果を図 4 に示す。また、校正した結果の視認性を上げるため、各手法で推定した射影変換行列を用いてグリッドパターンを変形させて投影し、カメラで撮影した。SIFT のみを用いた場合及び提案手法を用いた場合については、動画 *Church* をカメラで撮影したときに推定した射影変換行列を用いた。このときの結果を図 5 に示す。図 4、図 5 より、SIFT と位相限定相関法を用いることで、パターン光を用いた場合とほぼ同程度の校正を実現できていることが視認できる。

更に、校正結果を定量的に評価するため、カメラ画像上における対応点座標を用いて提案手法と従来手法の比較を行った。具体的には、グレイコードパター

ン光投影法 [6] によって得られた対応点座標を真値と仮定し、提案手法によって得られた対応点座標との距離の平均二乗誤差 (RMS Error) 及び最大誤差 (Max Error) を求めた。比較のため、SIFT のみを用いた手法によって得られた対応点座標についても誤差を算出した。誤差の計算結果を表 1 に示す。表 1 より、SIFT のみを用いた場合に比べ、SIFT と位相限定相関法を組み合わせることで、パターン光投影法の場合の結果に近づいており、一般的な画像を用いて高精度な対応付けが実現できていることを数値的にも確認できる。

一般的なパターン光投影法では、数十回にも及ぶパターン光の投影・撮影を、各プロジェクタごとに個別

に作業を行う必要がある．そのため、ユーザにとって大きな手間であり、汎用のプロジェクタを複数台用いたマルチプロジェクタディスプレイの構築が容易ではなかった．これに対して、提案手法では、カメラで撮影可能な範囲においてプロジェクタの台数によらず 1 回の撮影で作業が完了するため、ユーザに対して負担をかけることなく、マルチプロジェクタディスプレイを校正することができる．

5. リアプロジェクション型簡易立体ディスプレイシステムへの応用

近年、映画を中心とするエンターテインメント分野が牽引する形で、三次元立体映像技術が注目を集めている．両眼視差を利用した立体映像による映画は多数製作されており、それを上映する映画館も増加している．豊富に出回る 3D コンテンツを家庭でも鑑賞できるように、3D に対応したテレビや DVD など市場に出始めている．また、デジタルサイネージの分野においても、立体映像技術が使われ始めている．立体映像を表示するディスプレイ技術は盛んに研究されており、今後、ユーザにとってより利便性の高い立体ディスプレイが求められる．

本論文では、提案したマルチプロジェクタの校正手法の応用として、極めて簡便に構築できる立体ディスプレイシステムを提案する．提案する立体ディスプレイシステムは、スクリーン後方に既存のプロジェクタを 2 台配置したリアプロジェクション型のディスプレイである．2 台のプロジェクタのレンズ正面に偏光フィルタを配置し、それぞれから異なる視差をもった左眼用の画像と右眼用の画像をスクリーンに対して投影する．このとき、スクリーンには、視差のついた 2 枚の画像が重畳されて投影されている．ユーザが偏光めがねを着用して見ることで、立体感を得ることができる．カメラを用いてマルチプロジェクタを校正し、二つの投影画像を精密に重ね合わせることで、所望の立体映像をスクリーン上に実現する．各プロジェクタにつき、視聴用の映像コンテンツを 1 回カメラで撮影することで校正できるため、プロジェクタやディスプレイの配置を厳密に設定する必要がなく、非常に簡単にシステムを構築できる．偏光には、互いに逆の回転方向をもつ円偏光を利用する．また、スクリーンには偏光情報を保存する拡散フィルタ [14] を貼ったアクリル板を用いる．ステレオカメラで撮影した映像をコンテンツとして直接利用でき、立体映像を手軽に鑑賞できる．

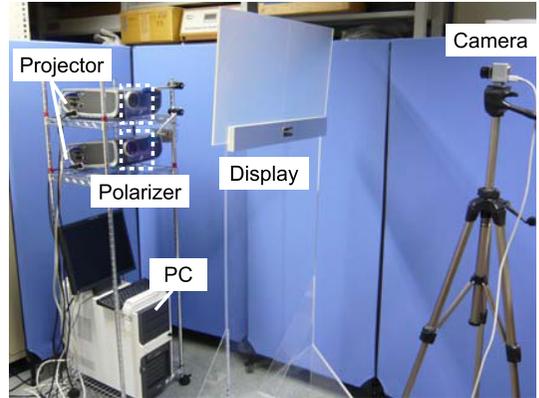


図 6 マルチプロジェクタを用いた立体ディスプレイシステム

Fig. 6 3D display system with multi-projector.

実験環境を図 6 に示す．使用機材は、偏光情報を保存する拡散フィルタ [14] を貼ったアクリル板、プロジェクタ 2 台 (Canon X700, 解像度 $1,024 \times 768$ pixel), IEEE1394 接続のカメラ (Point Grey Research SCOR-14SOM-CS, 解像度 $1,280 \times 960$ pixel) 及び PC 1 台である．アクリル板に対して、プロジェクタ 2 台を適当に配置し、それぞれの投影画像が大きく重なるようにする．その後、各プロジェクタに対して、視差のついた原画像を入力し、その投影画像を 1 台につき 1 回、交互に撮影する．このとき、一方のプロジェクタからの投影画像を撮影している間、もう一方のプロジェクタからは画像を投影しない．得られたカメラ画像を PC に転送し、提案手法による校正を行った後、各プロジェクタから補正された画像を投影し、これをカメラで観測した．原画像に用いる視聴用のコンテンツとして、実際に車に取り付けたステレオカメラで撮影した車載用動画と CT (Computed Tomography) より得られた医療用の三次元データを用いた．前章と同様に、グレイコードパターン光投影法による校正も行い、提案手法を用いた場合と結果を比較した．グリッドパターンについても同様である．

実験結果を図 7 に示す．動画コンテンツを補正した場合、左眼用及び右眼用の画像がそれぞれ補正され、視差を有した状態で重畳されている様子が分かる．更に、グリッドパターンを投影した結果より、二つの投影画像が精密に重ね合わされていることが確認できる．また、前節と同様に校正結果を定量的に評価した結果を表 2 に示す．表 2 より、提案手法を用いることで、一般的な画像の投影・撮影により、パターン光投影法

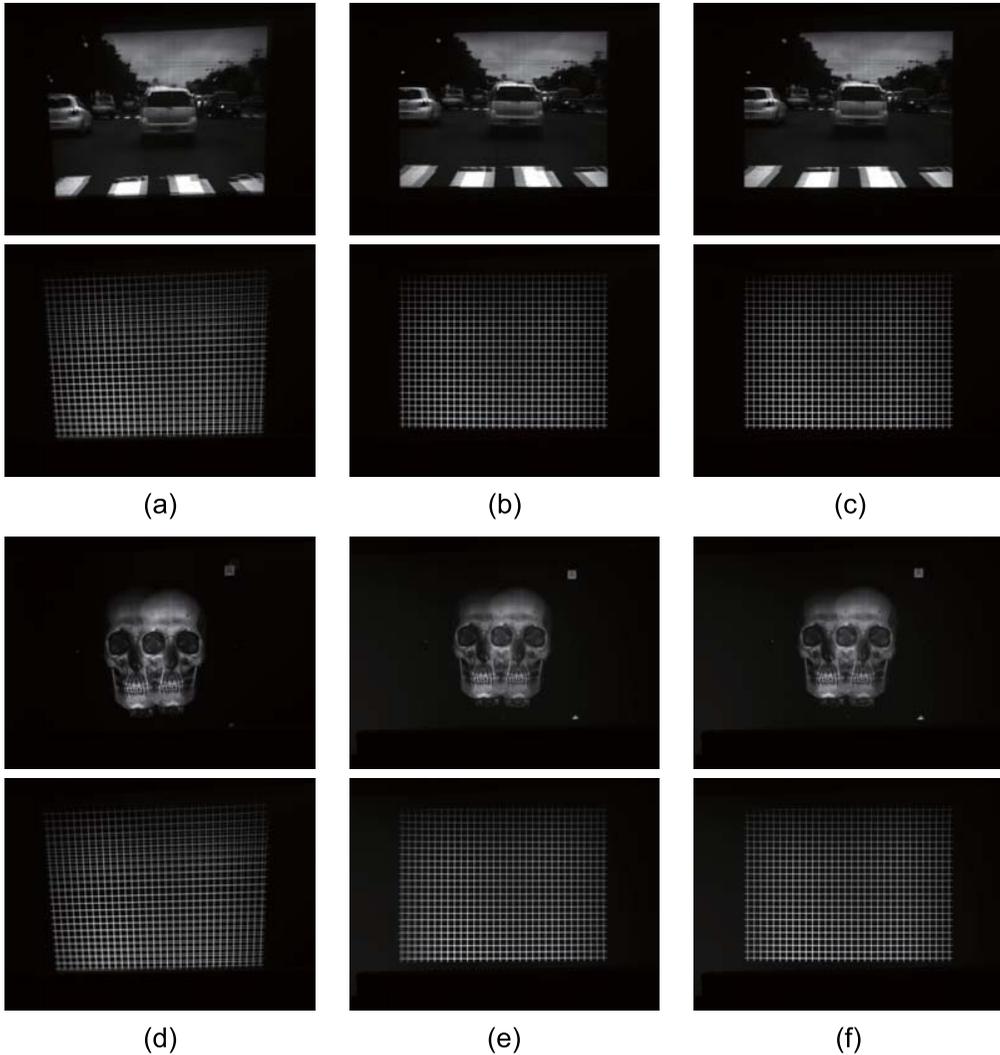


図 7 実験結果 (a) 未校正 (車載動画), (b) SIFT のみ (車載動画), (c) 提案手法 (車載動画), (d) 未校正 (医用画像), (e) SIFT のみ (医用画像), (f) 提案手法 (医用画像)

Fig. 7 Experimental results: (a) before calibration (video sequences of vehicles), (b) after calibration using SIFT (video sequences of vehicles), (c) after calibration using the proposed method (video sequences of vehicles), (d) before calibration (medical image), (e) after calibration using SIFT (medical image), and (f) after calibration using the proposed method (medical image).

と同程度の高精度な対応付けを実現していることが分かる。更に、カメラのレンズ部に偏光板を取り付けてディスプレイを撮影した結果を図 8 に示す。図 8 より、重畳された投影画像が十分に分離されて観測できていることが確認できる。実際に、偏光めがねを着用して観測したところ、未校正の際には両眼視差をもった映像から立体映像を観測することが難しいのに対し

て、提案手法を用いて校正を行うことで、立体感のある映像を観測できることを確認した。また、提案手法を用いた場合、SIFT のみを用いた校正に比べ、より鮮明な立体映像が得られることを確認した。

提案した立体ディスプレイシステムでは、各プロジェクタにつき、立体映像のコンテンツを 1 回カメラで撮影するのみで三次元映像を視聴することが可能

表 2 対応点座標の誤差 [pixel]
Table 2 Errors of the corresponding points [pixel].

コンテンツ	SIFT のみ		提案手法	
	RMS Error	Max Error	RMS Error	Max Error
車載動画画像	4.522	11.910	0.792	4.101
医用三次元画像	6.469	11.088	0.969	5.610

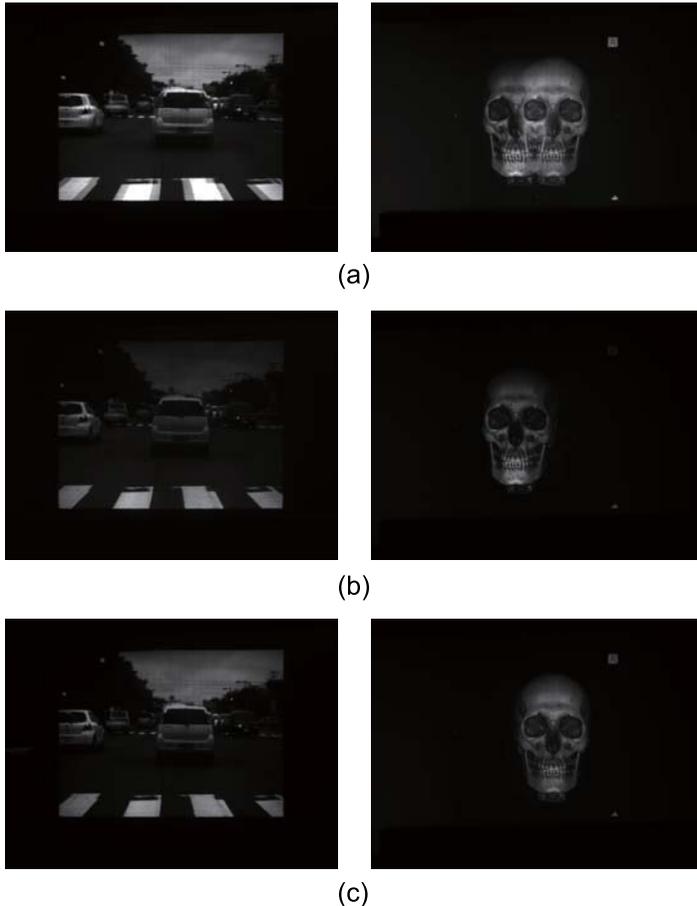


図 8 投影画像の分離結果 (a) 分離前の投影画像, (b) 分離した左眼用画像, (c) 分離した右眼用画像

Fig. 8 Projected images for 3D display: (a) the projected images, (b) the projected image for left eye, and (c) the projected image for right eye.

である。このため、システムに必要となる機材を搬入後、非常に少ない手間で立体ディスプレイを構築できる。展示会などにおける三次元映像を用いたデモンストレーションやショーウィンドウでの利用などの応用に有用である。

6. む す び

本論文では、従来パターン光の投影を必要としてい

たマルチプロジェクタディスプレイの校正を、一般的な動画コンテンツの1フレームを撮影するだけで行える手法を提案した。SIFTに基づく特徴ベースの画像マッチング手法と、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組み合わせた新たな画像対応付けにより、パターン光を用いる場合とほぼ同程度の精度で校正が可能であることを示した。更に、提案手法を用いて立体ディスプレイを構築した。本論

文中で提案する校正手法は、投影画像をカメラで1回撮影することで実現できるため、パターン光を用いる場合と比べ、ユーザにとって極めて利便性の高い手法といえる。今後は、非平面の形状をもった投影対象におけるマルチプロジェクタディスプレイの校正を実現し、実世界のあらゆる場所に対して簡便に広視野角映像や立体映像の提示を実現する予定である。

謝辞 本研究を行うにあたり、東北大学大学院工学研究科の内田龍男教授並びに内田研究室の皆様には、実験用機材のスクリーンを貸して頂くとともに、有益な御助言を頂きました。ここに改めて深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] 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.
- [2] M. Brown, A. Majumder, and R. Yang, "Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays," *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, vol.11, no.2, pp.193–206, 2005.
- [3] T. Okatani and K. Deguchi, "Easy calibration of a multi-projector display system," *Int'l. J. Comput. Vision*, vol.85, no.1, pp.1–18, 2009.
- [4] N.D. Venkata and N. Chang, "Realizing super-resolution with superimposed projection," *Proc. IEEE Int'l. Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2007)*, pp.1–8, 2007.
- [5] 青木洋一, 堀井千夏, 佐藤宏介, "投影面の反射特性とハイライト除去を考慮した複数プロジェクタによる重畳投影," *映像学誌*, vol.62, no.12, pp.2023–2030, 2008.
- [6] 井口征士, 佐藤宏介, *三次元画像計測*, 昭晃堂, 1990.
- [7] T. Takahashi, N. Numa, T. Aoki, and S. Kondo, "A geometric correction method for projected images using sift feature points," *Proc. ACM/IEEE Int'l. Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS)*, Posters, 2008.
- [8] T. Takahashi, N. Numa, T. Kawano, T. Aoki, and S. Kondo, "Image correction method for multi-projector display using sift features," *ACM SIGGRAPH Asia, Sketches*, 2008.
- [9] D. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Int'l. J. Comput. Vis.*, vol.60, pp.91–110, 2004.
- [10] K. Takita, M.A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E87-A, no.8, pp.1913–1923, Aug. 2004.
- [11] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E86-A, no.8, pp.1925–1934, Aug.

2003.

- [12] 青木孝文, 伊藤康一, 柴原琢磨, 長嶋 聖, "位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン—ピクセル分解能の壁を越える画像センシング技術を目指して," *IEICE Fundamentals Review*, vol.1, no.1, pp.30–40, 2007.
- [13] M. Fishler and R. Boles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Commun. ACM*, vol.24, no.6, pp.381–395, 1981.
- [14] B. Katagiri, T. Miyashita, T. Ishinabe, and T. Uchida, "Novel screen technology for high-contrast front-projection display by controlling ambient-light reflection," *J. Society for Information Display*, vol.11, no.3, pp.585–590, 2003.

(平成 22 年 5 月 10 日受付, 8 月 30 日再受付)



高橋 徹

2006 東北大・工・情報卒。2008 同大大学院情報科学研究科修士課程了。現在、同大学院博士課程在学中。画像・映像処理に関する研究に従事。IEEE 会員。



川野 達也

2008 東北大・工・情報卒。2010 同大大学院情報科学研究科修士課程了。画像・映像処理に関する研究に従事。



伊藤 康一 (正員)

2000 東北大・工・電子卒。2005 同大大学院情報科学研究科博士課程了。同年同大学院情報科学研究科助手, 2007 同助教。2004–2005 日本学術振興会特別研究員, 現在に至る。画像処理及びバイオメトリクスに関する研究に従事。IEEE, 情報処理学会, 映像情報メディア学会各会員。博士(情報科学)。



青木 孝文 (正員)

1988 東北大・工・電子卒．1992 同大大学院工学研究科博士課程了．同年同大学・工・助手，1994 同大学院情報科学研究科助手，1996 同助教授，2002 同教授，現在に至る．超高速デジタル計算の理論，画像センシング，映像信号処理，バイオメトリックス，VLSI 設計技術，分子コンピューティングに関する研究に従事．英国電気学会フレミング賞及びマウントバッテン賞ほかを受賞．IEEE，計測自動制御学会，情報処理学会，映像情報メディア学会各会員．博士（工学）．



近藤 敏志 (正員)

1990 阪府大・工卒．1992 同大大学院工学研究科修士課程了．同年松下電器産業(株)(現，パナソニック(株))に入社．動画像符号化及び動画像信号処理に関する研究開発に従事．IEEE 1394 Trade Association における AV/C コマンドセットや MPEG/VCEG における MPEG-4 Advanced Video Coding の国際標準化活動にも参画．工博．