

位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョンを用いた 投影画像の幾何補正

高橋 徹^{†a)} 三浦 衛[†] 伊藤 康一[†] 青木 孝文[†]

Geometric Correction for Projected Images Using High-Accuracy Stereo Vision
Based on Phase-Only Correlation

Toru TAKAHASHI^{†a)}, Mamoru MIURA[†], Koichi ITO[†], and Takafumi AOKI[†]

あらまし 本論文では、位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョンを用いた投影画像の幾何補正手法を提案する。実世界の様々な場所にプロジェクタで画像を投影する場合、投影面の形状やプロジェクタと投影面との位置関係などの影響により、プロジェクタの投影像が幾何学的にひずむという問題が発生する。この問題を解決するために、本論文では、ステレオカメラによる三次元計測を利用した投影像の幾何補正アルゴリズムを提案する。提案手法では、位相限定相関法に基づくステレオ画像対応付け手法を用いることで、視聴用のコンテンツを投影中に投影面の三次元形状を高精度かつ高密度に計測し、その結果を用いて投影像の幾何学的ひずみを補正する。一連の実験を通して、提案手法を用いることでパターン光投影法による幾何補正と同等の精度で幾何補正できることを実証する。また、提案手法の実装として、画像対応付け手法を GPU で処理することにより、投影画像の幾何補正を高速に実現できることを示す。

キーワード プロジェクタ・カメラシステム、ステレオビジョン、幾何補正、位相限定相関法、SIFT

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もつ。具体的には、投影面の形状やプロジェクタと投影面との位置関係によって投影画像が幾何学的にひずむ場合や、投影面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) に基づく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）を変換することで投影画像の補正を行う。投影面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るので、プロジェクタの利便性の向上が見込める。現在までに、投影面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 [2] ~ [4] や投影面が任意形状の場合の幾何補正手法 [5] ~ [7] が報告されている。また、テクスチャのある投影面の場合、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 [7] ~ [9] も報告されている。本論文では、投影画像の幾何学的ひずみの補正、特に非線形なひずみを有する投影画像の幾何学的ひずみの補正手法を検討する。

プロジェクタ・カメラシステムに基づく投影画像の幾何補正では、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）との対応を求める必要がある。この対応関係を求める

[†] 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

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

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 [10] 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。このため、プロジェクタやカメラの移動、投影面の変化などにより、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・撮影を再度複数回にわたり行わなければならない。これは、環境変化に即応してプロジェクタの投影画像を補正することが望まれるアプリケーションにおいて問題となる。

環境変化へのリアルタイム対応を目的として、投影中の映像シーケンスの中にパターン光を挿入し、それをカメラで撮影することで投影画像の補正を行う手法も提案されている [11]。これは、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実現することが難しい。パターン光の代わりに投影画像の特徴点を利用し、投影画像の幾何補正を行う試みも報告されている [12], [13]。この手法では、投影面の形状が平面であることを仮定しており、非線形なひずみを有する複雑な形状には対応していない。また、パターン光投影を行わずに、非平面スクリーンへの最適な映像投影を実現する手法も報告されている [14]。この手法では、プロジェクタ-カメラ間に成立するエピポーラ幾何に基づく DP (Dynamic Programming) マッチングを用いることで、プロジェクタ-カメラ画像間の対応関係を求めている。プロジェクタ-カメラ間の位置関係が既知であることを前提としているので、プロジェクタとカメラの位置関係が未知の場合については利用することができない。

これに対して、本論文では、投影面が複雑な自由形状の場合を対象とし、ステレオカメラとプロジェクタを組み合わせることで、パターン光を用いず、一般的な画像コンテンツを投影・撮影することにより投影画像の幾何学的ひずみを補正する手法を提案する。筆者らのグループで開発してきた位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) に基づく高精度かつロバストなステレオビジョンを用いることで、(i) 環境変化に即応可能であり、(ii) 未校正のプロジェクタに適用可能な幾何補正手法を目指す。具体的には、(i) は、投影面の形状が動的に変化する場合を想定し、リアルタイムに幾何補正を行うことを目的としている。また、(ii) は、現実的なプロジェクタの利用環境を想定し、プロジェクタのズームやフォーカスを自由に調節可能にするこ

とを目的としている。更に、提案手法は、文献 [14] の手法とは異なり、カメラとプロジェクタの位置関係が未知の場合についても幾何補正を実現する手法である。提案手法では、プロジェクタで視聴用の画像コンテンツを投影中にステレオカメラで投影面の三次元形状を高精度に計測すると同時にプロジェクタの透視投影行列を求める。そして、得られた投影面の三次元情報及びプロジェクタの透視投影行列を用いて投影面の幾何学的ひずみを補正する。ステレオカメラによる三次元計測を行う際に、位相限定相関法に基づく対応点探索を用いることで、投影面の三次元形状を高精度かつ高密度に復元する。いくつかの標準動画像を用いた性能評価実験を通して、提案手法が高精度かつ高速に投影画像を補正できることを示す。更に、提案手法において、その計算時間が支配的となる画像対応付けの処理を GPU (Graphics Processing Unit) に計算させることで、高速な幾何補正を実現できることを実証する。

2. 位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョン

投影画像の幾何補正を実現するためには、投影対象を高精度かつ高密度に三次元計測することが重要になる。筆者らは、これまでに、位相限定相関法と呼ばれる高精度画像マッチング手法を用いた受動型ステレオビジョンシステムを構築してきた [15], [16]。平行化されたステレオ画像ペアのように、画像ブロック間の移動ベクトルが一次元方向に制限されている場合は、一次元の POC 関数を利用することが可能となり、大幅に計算量を削減することができる [17]。

2.1 ステレオビジョンに基づく三次元計測

ステレオビジョンに基づく三次元計測では、複数のカメラの視線が交わる点として物体の三次元位置を求める。左カメラで撮影された画像上の点 $m_1 = (u_1, v_1)$ について、右カメラで撮影された画像上の点 $m_2 = (u_2, v_2)$ が対応するとき、三次元空間における点 $X = (X, Y, Z)$ との関係は以下の式で表現される。

$$\tilde{m}_1 \sim P_1 \tilde{X}, \tilde{m}_2 \sim P_2 \tilde{X} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{\cdot}$ は同次座標を表し、 \sim はその両辺が定数倍の違いを許して等しいことを意味する。また、 P_1, P_2 はそれぞれのカメラに対する透視投影行列であり、 3×4 の行列である。キャリブレーションにより透視投影行列 P_1, P_2 を求め、ステレオ画像の対応付けにより

m_1, m_2 が得られれば、式 (1) は、 (X, Y, Z) を未知数とする連立方程式となり、最小二乗法により求められる。ステレオビジョンを用いて高精度な三次元計測を行うためには、ステレオ画像間の対応付け精度が重要になる。本論文では、ステレオカメラから得られた画像を平行化 [18] し、一次元位相限定相関法に基づく対応点探索 [17] を用いることで高精度なステレオ画像対応付けを実現する。次節でその詳細を述べる。

2.2 一次元位相限定相関法に基づく高精度ステレオ画像対応付け

本節では、一次元位相限定相関法に基づく高精度ステレオ画像対応付け手法について述べる。以下では、まず、一次元位相限定相関法について概説した後、本論文で用いたステレオ画像対応付け手法について説明する。

2.2.1 一次元位相限定相関関数

N 点の二つの一次元画像信号 $f(n)$ 及び $g(n)$ が与えられたとする。ここで、一次元画像信号の離散時間インデックス (整数) を、便宜上、 $n = -M, \dots, M$ とする。ただし、 M は正の整数であり、 $N = 2M + 1$ である。

一次元画像信号 $f(n)$ 及び $g(n)$ の一次元離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform : DFT) を $F(k)$ 及び $G(k)$ とする。ここで、 $k = -M, \dots, M$ である。このとき、 $F(k)$ と $G(k)$ の正規化相互パワースペクトルを次式で与える。

$$R(k) = \frac{F(k)\overline{G(k)}}{|F(k)\overline{G(k)}|} \quad (2)$$

ここで、 $\overline{G(k)}$ は $G(k)$ の複素共役を表す。

一次元 POC 関数 $r(n)$ を、正規化相互パワースペクトルの一次元逆離散フーリエ変換 (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT) として定義する。

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_k R(k)W_N^{-kn} \quad (3)$$

ここで、 $\sum_k = \sum_{k=-M}^M$ 、 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ である。二つの信号が類似している場合、POC 関数は、デルタ関数に近い極めて鋭いピークを有する。この相関ピークの高さは二つの信号の位相差スペクトルが周波数に対して線形であれば、相関ピークの高さは 1 となる。この相関ピークの高さは信号の類似度の尺度として有用であり、「画像照合」の用途で用いられる。一方、相関ピークの座標は二つの信号の相対的な位置ずれに対

応し、主として「画像レジストレーション」の応用で重要になる。

以下では、一次元画像信号 $g(n)$ が一次元画像信号 $f(n)$ を δ だけ微小に平行移動させた一次元画像信号である場合を考える。ここで、 δ は n 方向のサブピクセルレベルの移動量を表している。このとき、 $f(n)$ と $g(n)$ の POC 関数は次式で与えられる。

$$r(n) \approx \frac{\alpha \sin(\pi(n + \delta))}{N \sin(\frac{\pi}{N}(n + \delta))} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha = 1$ である。上式は、一次元画像信号が δ だけ微小に平行移動した場合の POC 関数の一般形を表している。 α は、相関ピークの高さを表現するために導入されたパラメータである。画像に対して、無相関なノイズが加わると α の値が減少するため、実際には $\alpha \leq 1$ となる。この相関ピークのモデルに基づく関数フィッティングにより、パラメータ α, δ を推定することで、信号の類似度 (位相差スペクトルの線形性) とサブピクセル精度の移動量を求めることができる。

一次元 POC 関数を用いて、高精度に平行移動量の推定を行うためには、(A) 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、(B) 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重み付け、(C) 相関ピークモデルのフィッティング、(D) 複数の一次元信号の利用が重要となる [17]。

2.2.2 ステレオ画像のサブピクセル対応点探索

前述した一次元 POC 関数を用いた高精度平行移動量推定手法を局所的な画像ブロックマッチングに適用し、画像ピラミッドによる粗密探索と組み合わせることにより、平行化されたステレオ画像の対応点をサブピクセル精度で検出できる [17]。この手法は、画質や輝度値の変化に対してロバストであり、ステレオ画像のサブピクセル対応付けに有効である。表 1 に、本論文で用いたステレオ画像の対応付けのパラメータを示す。

表 1 対応点探索のパラメータ

Table 1 Parameters for POC-based correspondence search.

一次元画像信号長	32 pixels
一次元画像信号数	15 lines
窓関数	ハニング窓
スペクトル重み付け	ガウシアン ($\sigma = \sqrt{0.5}$)
フィッティング手法	ピーク評価式
階層数	3

3. 高精度ステレオビジョンを用いた 投影画像の幾何補正

本章では、高精度ステレオビジョンを用いた投影画像の幾何補正手法について述べる。以下では、投影面の三次元計測に基づく投影画像の幾何補正手法について概説した後、幾何補正手法の各ステップについて詳細に述べる。

3.1 三次元計測を用いた投影画像の幾何補正

図1に示すように、三次元点 $X = (X, Y, Z)$ に対応する左カメラ、右カメラ及びプロジェクタ画像上の点をそれぞれ $m_1 = (u_1, v_1)$, $m_2 = (u_2, v_2)$, $m_3 = (u_3, v_3)$ とする。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。

$$\tilde{m}_1 \sim P_1 \tilde{X}, \tilde{m}_2 \sim P_2 \tilde{X}, \tilde{m}_3 \sim P_3 \tilde{X} \quad (5)$$

ここで、 P_1 , P_2 及び P_3 は、それぞれ左カメラ、右カメラ及びプロジェクタの透視投影行列である。ステレオカメラが校正済みで P_1 及び P_2 が得られているとすると、左カメラと右カメラの対応点 m_1 , m_2 から投影面の三次元計測が可能になる。また、式(5)を用いてステレオカメラにより計測した三次元点をプロジェクタ画像上に投影し、その画像上の位置を求めることができる。

ステレオカメラとプロジェクタの幾何学的な関係を利用し、計測した投影面の形状に合わせて原画像を変形してプロジェクタに入力することで、投影画像の幾何補正を実現する。まず、ステレオカメラを用いて計

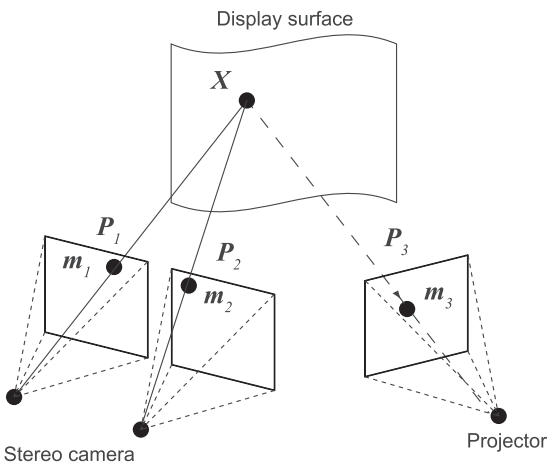


図1 幾何学的関係

Fig. 1 Geometric relationship.

測した三次元点群を、プロジェクタの透視投影行列 P_3 によってプロジェクタ画像上に投影する。次に、プロジェクタ画像上に投影された点群からメッシュを作る。図2に示すように、メッシュによって分割された小領域ごとに射影変換行列を求め、変形を行う。高精度かつ高密度な投影面の三次元計測を行うことで、任意形状の投影面における投影画像の幾何学的ひずみに対応する。投影面が自由形状である場合は、ある視点に対して幾何学的ひずみのないように補正される。このとき、別の視点から投影画像を観測すると、幾何学的ひずみを知覚することになる。投影面の形状が複雑であれば、知覚する幾何学的ひずみも大きくなるが、本論文の実験で用いたカーテンのような緩やかな形状であれば、実用上問題にはならないことを確認している。なお、本論文では、ステレオカメラの片方(左カメラ)をユーザの視点とみなし補正を行う。提案手法では、投影面の三次元形状が得られているので、ユーザの位置情報が得られれば、その位置においてひずみのない画像を観測するように補正することが可能である。これについては、今後の課題として取り組む予定である。

3.2 プロジェクタの透視投影行列の推定

プロジェクタの透視投影行列 P_3 は、自由度11の 3×4 の行列であり、三次元点とそれに対応するプロジェクタ画像上の点が6点以上得られれば、式(5)の拘束から線形的に求めることができる。事前に形状が既知の物体を用いてキャリブレーションを行えば P_3 を推定することが可能である[10]。しかし、プロジェクタの透視投影行列を事前に推定する場合、以下の問題が生じる。

- プロジェクタのズームやフォーカスなどの変更に伴いプロジェクタの内部パラメータが変化するため、これらを固定して利用しなければならない。
- ステレオカメラとプロジェクタの位置関係の変更

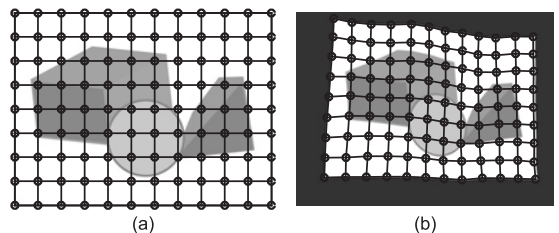


図2 メッシュベースの変形：(a) 原画像 (b) 変形後

Fig. 2 Mesh-based image transformation: (a) original image, and (b) transformed image.

に伴いプロジェクタの外部パラメータが変化するため、これらの位置関係を固定しなければならない。

これらの問題に対して、本論文では、プロジェクタ-カメラ画像間の対応付けに SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [19]、ステレオカメラ画像間の対応付けに位相限定相関法 [17] を用いることで、ユーザが映像コンテンツを視聴中にプロジェクタの透視投影行列を推定する手法を提案する。更に、ユーザが映像を視聴中に高精度かつ高密度な投影面の三次元計測を行い、投影画像の幾何学的ひずみを適切に補正し、プロジェクタ・カメラシステムの更なる利便性向上を狙う。以下に具体的な手順を示す。

まず、図 3 に示すように、左カメラ画像とプロジェクタ画像間の対応点を、SIFT [19] に基づく特徴ベースの画像マッチングにより取得する。このとき、カメラ

画像は投影面の形状により幾何学的にひずんでいるため、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。プロジェクタの透視投影行列 P_3 を精度良く安定に求めるために、誤対応を除去する必要がある。本論文では、RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [20] を用いて、誤対応の除去を行う。プロジェクタとカメラの間には、カメラ 2 台の場合と同様のエピポーラ幾何が成り立つ。プロジェクタとカメラの間の基礎行列を F とすると、プロジェクタ画像上の点 m_3 とこれに対応する左カメラ画像上の点 m_1 との間には、以下の関係が成り立つ。

$$\tilde{m}_1^T F \tilde{m}_3 = 0 \quad (6)$$

この関係を利用し、RANSAC による誤対応除去を行う。SIFT と RANSAC を用いることで、最終的に図 3 (c) 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できる。

次に、位相限定相関法に基づく対応点探索を用いて、もう一方のカメラ画像上の対応点を推定する。このとき、SIFT によって検出された特徴点を基準点として対応点探索を行い、図 3 (d) に示すように、三つの画像間における対応点を取得する。ステレオ画像上の対応点と式 (1) から特徴点の三次元座標を計算することができ、これによってプロジェクタ画像の二次元座標と三次元座標を対応づけることができる。得られた対応関係から最小二乗法により、線形的にプロジェクタの透視投影行列を推定する。更に、高精度な透視投影行列の推定を目的としてバンドルアジャストメント [21], [22] を行う。具体的には、下記の式で表現される再投影誤差 C を最小化する。

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (\|u_j^i - \hat{u}_j^i\|^2 + \|v_j^i - \hat{v}_j^i\|^2) \quad (7)$$

ここで、 (u_j^i, v_j^i) は画像の i 番目の対応点であり、 $(\hat{u}_j^i, \hat{v}_j^i)$ は、 i 番目の三次元座標をそれぞれのカメラ及びプロジェクタのパラメータで再投影した座標である。 j は画像のインデックスであり、左カメラ画像、右カメラ画像、プロジェクタ画像の順に $j = 1, 2, 3$ としている。また、 n は対応点の総数である。投影面が平面である場合、提案手法では、二次元-三次元の対応関係から透視投影行列 P_3 を不定性なく推定することができない [23]。この場合、投影面の三次元座標とプロジェクタ画像上の点の関係は、射影変換行列で表される。そこで、透視投影行列ではなく射影変換行列

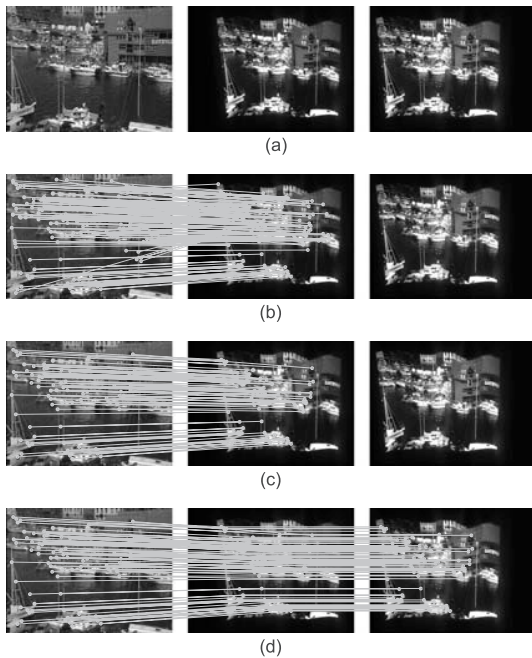


図 3 プロジェクタ画像とステレオ画像との対応点の取得: (a) プロジェクタ画像 (左) とステレオ画像 (右), (b) SIFT を用いて対応点を取得した結果, (c) RANSAC を用いて誤対応を除去した結果, (d) POC を用いてステレオ画像間の対応点を取得した結果

Fig. 3 Correspondence search among projector and stereo images: (a) projector image (left) and stereo image (right), (b) result of the SIFT-based feature point matching, (c) result of the outlier removal using RANSAC, and (d) result of the POC-based correspondence search.

を推定することで、投影面が平面であっても対応することができる。

3.3 投影面の三次元計測

視聴用のコンテンツを投影中に投影画像の幾何補正を行うために、位相限定相関法に基づくステレオビジョンにより、投影面の高精度かつ高密度な三次元計測を行う。

まず、事前のステレオカメラのキャリブレーション結果から、ステレオ画像の平行化を行う(図4(a))。次に、左カメラ画像上において、図2に示すメッシュベースの画像変形に必要な格子点を配置する。配置した全ての格子点について、右カメラ画像上の対応点を一次元位相限定相関法に基づく対応点探索を用いて取得する。視聴用の一般的な画像コンテンツの場合、テクスチャが乏し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付けが極

めて困難であり、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、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を利用し、ピーク値がしきい値以下の点を誤対応と判定する。これにより、図4(b)に示すような対応点が得られる。

誤対応と判定した点は、周囲にある信頼性の高い対応点を用いて近似的に座標を求める。具体的には、誤対応とした点の8近傍に着目し、その中で信頼性の高い対応点について視差を求める。そして、求めた視差の平均を格子点の座標に加えることで再推定後の対応点座標とする。この処理により、図4(b)では、ピーク値がしきい値以下のために求められなかった対応点が、図4(c)に示すように取得できる。得られた対応点から式(1)を用いて三次元座標を計算し、投影面の形状を計測する。

3.4 GPUを用いた高速処理

提案手法で使用するSIFT及び位相限定相関法は、計算コストが高く、処理時間が問題になる。そこで、本論文では、SIFT及び位相限定相関法に基づく対応点探索手法をGPU上に実装することで、高速な処理を実現する。SIFTに基づく特徴ベースの画像対応付けでは、文献[24]による実装を用いる。また、一次元位相限定相関法に基づく画像対応付け手法については、CUDA(Compute Unified Device Architecture)[25]を用いて実装する。基準点ごとにスレッドを割り当て並列処理を行い、高速化を実現する。

4. 実験・考察

本章では、提案した幾何補正手法を実装し、評価した結果について述べる。実験環境を図5に示す。使用したカメラはPointGrey Research社のSCOR-14SOC(モノクロ)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。また、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5に示した白色カーテンを使用した。ステレオカメラの基線長は約10cmであり、プロジェクタから投影対象までの距離は約80cm、ステレオカメラから投影対象までの距離は約115cmである。使用した計算機の構成は表2に示すとおりである。

ステレオカメラのキャリブレーションは、チェッカー

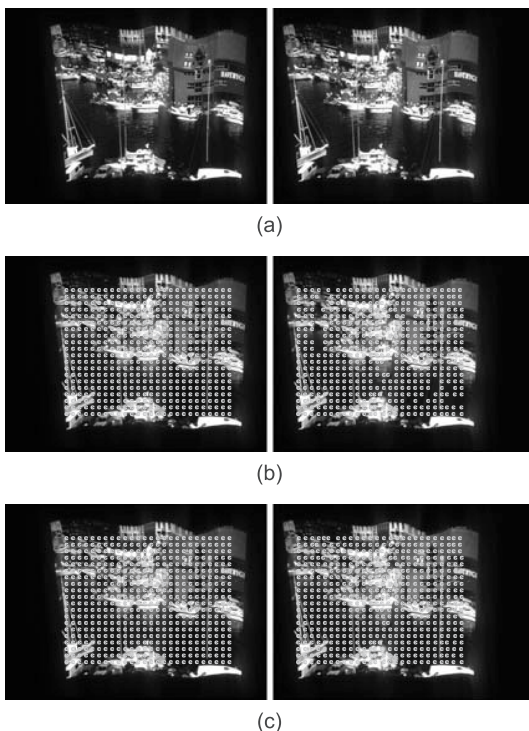


図4 ステレオ画像の対応点探索：(a) ステレオ画像(平行化後)、(b) POCに基づくステレオ画像の対応点探索結果、(c) 対応点の再推定結果

Fig. 4 Correspondence search between stereo images: (a) stereo camera images after rectification, (b) corresponding points obtained by the POC-based correspondence search, and (c) corresponding points after re-estimation.

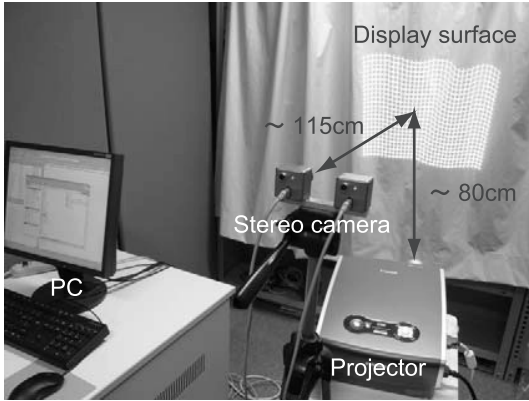


図5 実験環境
Fig. 5 Experimental setup.

表2 実験に用いた計算機の構成
Table 2 Specification of the PC.

CPU	Intel Pentium 4 (3.0 GHz)
Memory	DDR2-SDRAM 2 GB
GPU	Geforce 9800 GT
OS	Windows XP 32 bit

パターンの平板を用いて行った。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 mm × 25 mm であり、MATLAB の Camera Calibration Toolbox [26] を使用した。実験では、評価用標準動画像である *Church*, *Harbor Scene*, *Buddhist Images* 及び *Flamingoes* を用いた。

提案手法を評価するため、グレイコードパターン光投影法により対応点を取得し、投影画像の幾何補正を行った場合と比較した。実験では、左カメラ画像上で、点 (290, 157), (290, 776), (1117, 157), (1117, 776) を頂点とする方形領域に幾何学的ひずみのない画像を投影するように補正した。グレイコードパターン光投影法では、プロジェクタごとにグレイコードパターン画像を 24 枚及び点群を求めるためのラインパターンを 4 枚、合計 28 枚の投影・撮影を行った。提案手法では、上記の方形領域内に水平方向に 65 点、垂直方向に 49 点を等間隔に配置し、幾何補正を行った。投影面の形状に応じて配置する点の数を適切に設定する必要があるが、配置する点の数が増加すると処理速度が遅くなる。本実験では、処理のリアルタイム性と幾何補正の精度の両面を考慮して、本実験では、 $65 \times 49 = 3185$ 点とした。

まず、標準動画像 *Church* を用いたときの投影面の三次元計測結果を図 6 に示す。図 6 より、位相限定相

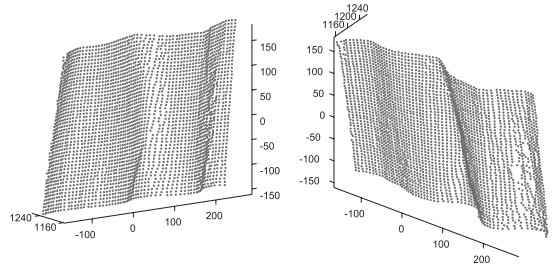


図6 投影面の三次元復元結果
Fig. 6 3D reconstruction result of the display surface.

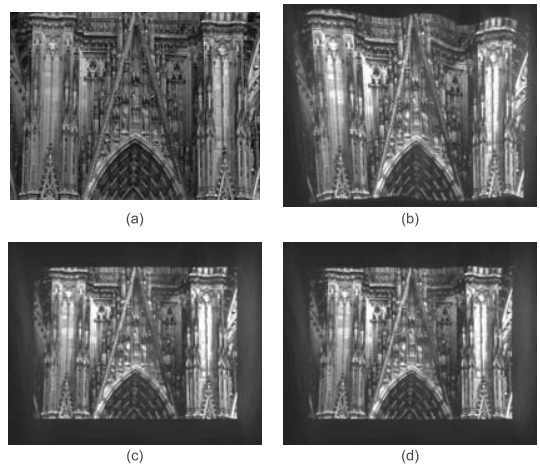


図7 投影画像の幾何補正結果 (*Church*): (a) 原画像, (b) 幾何補正なし, (c) 幾何補正結果 (パターン光投影法), (d) 幾何補正結果 (提案手法)

Fig. 7 Geomtric correction result: (a) original image, (b) projected image without geomtric correction, (c) projected image after geometric correction using structured light patterns, and (d) projected image after geometric correction using proposed method.

関法に基づくステレオビジョンを用いることで、投影面の形状を高精度かつ高密度に計測できていることが分かる。

次に、投影画像の幾何補正結果を図 7 に示す。幾何補正を行わない場合、図 7 (a) に示す原画像を投影すると、図 7 (b) に示すように、カーテンの形状の影響により幾何学的にひずんだ投影画像が観測される。これに対して、グレイコードパターン光投影法を用いて幾何補正を行った結果が図 7 (c)、提案手法を用いて幾何補正を行った結果が図 7 (d) である。幾何補正を行うことで幾何学的ひずみが解消され、スクリーンに投影した場合と同様な投影画像を観測できている。また、

図 7(c) と図 7(d) は、視覚的に大きな差は見受けられず、提案手法を用いることでパターン光投影を行った場合と同様の補正結果が得られていることが分かる。このとき得られた幾何補正用の画像変形パラメータを用いて図 8(a) に示すチェッカーパターンを変形し、投影した結果を図 8(c) と図 8(d) に示す。これより、自由形状の投影面に対して投影画像の幾何補正を実現できているといえる。更に、図 8(c) と図 8(d) のチェッカーパターンのコーナーの座標を求め、幾何補正の定量的な性能評価を行った。具体的には、理想的に幾何補正が実現している場合のコーナーの座標を真値とし、幾何補正後にカメラで観測される投影画像のコーナーの座標との距離を誤差とした。コーナーの座標は、MATLAB の Camera Calibration Toolbox [26] を使用して求めた。表 3 に結果を示す。表 3 より、提案手法が、グレイコードパターン光投影法を用いた場合と同程度の精度の幾何補正を実現できることが分かる。

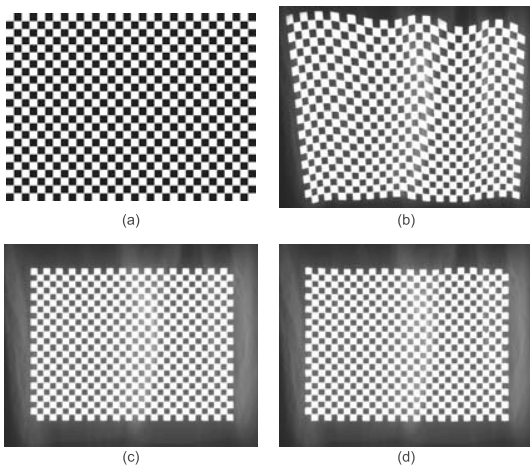


図 8 投影画像の幾何補正結果 (Church を投影時に推定した変形パラメータを使用): (a) 原画像, (b) 幾何補正なし, (c) 幾何補正結果 (パターン光投影法), (d) 幾何補正結果 (提案手法)

Fig. 8 Geometric correction result (projection of the checker pattern): (a) original image, (b) projected image without geomtric correction, (c) projected image after geometric correction using structured light patterns, and (d) projected image after geometric correction using proposed method.

表 3 幾何補正後のコーナー座標の誤差 [pixel]

Table 3 Error of the corner position after geometric correction.

	パターン光投影法	提案手法
RMS Error	1.48	1.86

1 回のステレオカメラによる撮影から幾何補正を完了するまでの処理時間を表 4 に示す。プロジェクタの透視投影行列の推定は約 2 秒である。また、投影面の三次元形状を計測し投影画像を補正するのに約 0.7 秒であり、投影面の形状変化に対して約 0.7 秒で追従できる幾何補正を実現できている。本論文では、原画像の変形を行う処理を CPU 上で計算している。この処理も GPU で行うことで、より高速に幾何補正を実現できる。また、GPU を用いた画像対応付けについても改良の余地があり、より高速な幾何補正を達成できると考えられる。特に、プロジェクタの透視投影行列推定の処理については、SURF (Speeded-Up Robust Features) [27] などの高速な特徴ベースマッチングの利用や高速なソフトウェア実装により高速化が可能である。リアルタイムで透視投影行列の推定ができれば、プロジェクタやカメラの移動に対しても即応可能な幾何補正を実現でき、利便性向上が見込める。このことについては、今後の課題として検討する予定である。

プロジェクタとカメラが完全に固定されたシステムの場合、プロジェクタの透視投影行列の推定はプロジェクタを設置した後に 1 回だけ行えばよく、リアルタイム性がそれほど求められない。この場合、パターン光を用いて推定することも可能である。しかし、プロジェクタのズームやフォーカスなどの設定を変更したときに、透視投影行列を再推定するために、パターン光投影が必要となる。これに対して、提案手法は、視聴目的の画像を投影中にバックグラウンド処理により透視投影行列を推定することができる。プロジェクタの設定の変更に追従する形で投影画像を補正するため、ユーザにとってプロジェクタの調節を自然に行うことができ、利便性の面で優れている。

その他の標準動画画像を用いた場合の幾何補正結果を図 9 に示す。図 9 より、異なる画像に対しても提案手

表 4 提案手法の処理時間内訳 [s]

Table 4 Processing time of the proposed method [s].

プロジェクタの透視投影行列推定	
SIFT に基づく特徴点のマッチング	0.988
透視投影行列推定	0.614
再投影誤差の最小化	0.516
合計	2.118
投影画像の幾何補正	
POC に基づく対応点探索	0.419
投影面の三次元復元	0.029
原画像の変形	0.256
合計	0.704

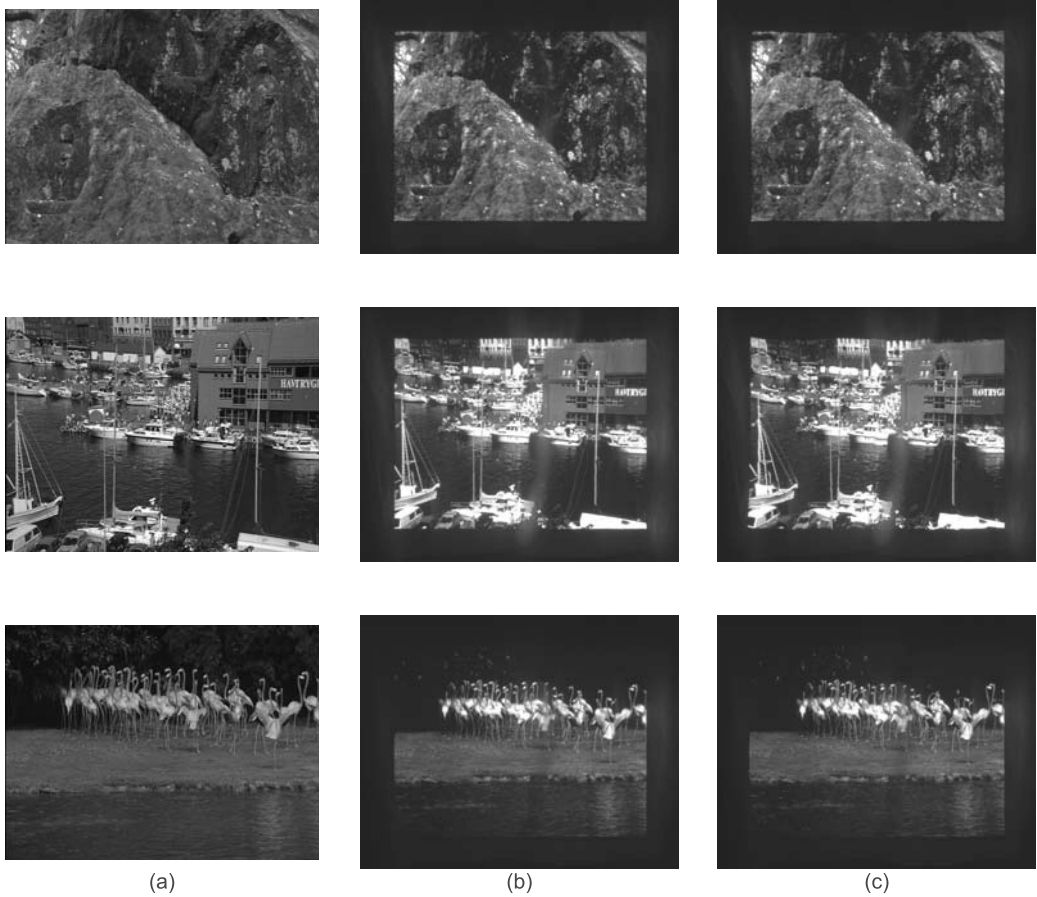


図9 投影画像の幾何補正結果 (上から順に *Buddhist Images*, *Harbor Scene*, *Flamingoes*): (a) 原画像, (b) 幾何補正結果 (パターン光), (c) 幾何補正結果 (提案手法)
 Fig.9 Geometric correction result (top: *Buddhist Images*, middle: *Harbor Scene*, and bottom: *Flamingoes*): (a) original image, (b) projected image after geometric correction using structured light patterns, and (c) projected image after geometric correction using proposed method.

法を用いて効果的に幾何補正を実現できていることが分かる。視聴用のコンテンツによっては、テクスチャが乏しい領域があり、提案手法を用いてこの部分を正確に補正することは難しい。この問題は、動画像のシーケンスに対して処理を繰り返すことで解決できると考えられる。

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ひず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。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、実用性が高いといえる。また、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。更に、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く、プロジェクタとカメラを用いた広範な応用に適応できる。

5. む す び

本論文では、位相限定相関法に基づく高精度ステレオビジョンを用いた投影画像の幾何補正手法を提案した。本論文で提案した幾何補正手法は、パターン光を用いず、映像コンテンツを視聴中に投影画像の幾何学

的ひずみを補正する。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、利便性が高い。実験を通して、提案手法を用いて投影画像の幾何学的ひずみを高精度かつ高速に補正できることを確認した。今後は、動画のシーケンスに対して処理を繰り返すことにより、より高精度な幾何学的ひずみの補正を実現する予定である。

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," Int'l Conf. Computer Vision, vol.1, pp.245-253, 2001.
- [3] R. Raskar and P. Beardsley, "A self-correcting projector," IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.504-508, 2001.
- [4] T. Okatani and K. Deguchi, "Autocalibration of projector-camera system," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.27, no.12, pp.1845-1855, 2005.
- [5] 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.
- [6] M. Brown, A. Majumder, and R. Yang, "Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.11, no.2, pp.193-206, 2005.
- [7] O. Bimber, A. Emmerling, and T. Klemmer, "Embedded entertainment with smart projectors," Computer, vol.38, no.1, pp.48-55, 2005.
- [8] S. Nayar, H. Peri, M. Grossberg, and P. Belhumeur, "A projection system with radiometric compensation for screen imperfections," Proc. ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS), 2003.
- [9] マーク アシュダウン, 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, "人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正," 信学論(D), vol.J90-D, no.8, pp.2115-2125, Aug. 2007.
- [10] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [11] S. Zollmann and O. Bimber, "Imperceptible calibration for radiometric compensation," Proc. Eurographics, pp.61-64, 2007.
- [12] 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.
- [13] T. Takahashi, T. Kawano, K. Ito, T. Aoki, and S. Kondo, "Performance evaluation of a geometric correction method for multi-projector display using SIFT and phase-only correlation," Proc. Int'l Conf. Image Processing, pp.1189-1192, 2010.
- [14] 山中崇嗣, 坂上文彦, 佐藤 淳, "プロジェクタカメラシステムを用いた非平面スクリーンへの最適映像投影; 画像の認識・理解シンポジウム予稿集, IS1-77, pp.570-577, 2010.
- [15] 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.
- [16] M.A. Muquit, T. Shibahara, and T. Aoki, "A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.3, pp.686-697, March 2006.
- [17] 柴原琢磨, 沼 徳仁, 長嶋 聖, 青木孝文, 中島 寛, 小林孝次, "一次元相限定相関法に基づくステレオ画像の高精度サブピクセル対応付け手法," 信学論(D), vol.J91-D, no.9, pp.2343-2356, Sept. 2008.
- [18] 徐 剛, 辻 三郎, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- [19] D. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," Int. J. Comput. Vis., vol.60, pp.91-110, 2004.
- [20] 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.
- [21] 岡谷貴之, "バンドルアジャストメント," 情処学研報, 2009-CVIM-167, no.37, pp.1-16, 2009.
- [22] M.A. Lourakis and A. Argyros, "SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment," ACM Trans. Math. Softw., vol.36, no.1, pp.1-30, 2009.
- [23] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry, Cambridge University Press, 2004.
- [24] "SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT)," <http://www.cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu/>
- [25] "CUDA ZONE," http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html
- [26] "Camera calibration toolbox for MATLAB," http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [27] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Gool, "Sufepeded-up robust features (SURF)," Computer Vision and Image Understanding, vol.110, pp.346-359, 2008.

(平成 22 年 10 月 18 日受付, 23 年 2 月 22 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。



三浦 衛

2010 東北大・工・情報卒．現在，同大大学院修士課程在学中．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パ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）．