

投影画像の幾何補正に関する実験的検討

An Experimental Study on Geometric Correction for Projected Images

○高橋徹*, 沼徳仁*, 青木孝文*, 近藤敏志**

○Toru Takahashi*, Norihito Numa*, Takafumi Aoki*, Satoshi Kondo**

*東北大学大学院情報科学研究科, **松下電器産業株式会社

* Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

** Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

キーワード: プロジェクタ-カメラシステム (Projector-Camera systems), 幾何補正 (geometric correction), 射影変換 (projective transformation), 能動型 3 次元計測 (active 3D measurement)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 東北大学大学院情報科学研究科 青木研究室

高橋徹, Tel.: (022)795-7169, Fax.: (022)263-9308, E-mail: toru@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

1. まえがき

近年, マルチメディアの発達に伴い, 大画面表示デバイスが求められている. 大画面表示デバイスとして, プラズマディスプレイや液晶ディスプレイ, プロジェクタがあげられる. プロジェクタは, 他の表示デバイスに比べ, 大画面を低コストで提供できる. また, プロジェクタは, スクリーンに光を投影することで画像を提示するという特性上, 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, 投影画像の明るさや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, こ

れらの場合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.

現在商用化しているほとんどのプロジェクタは, 幾何補正機能を搭載している. これは一般的に台形補正と呼ばれ, 傾きセンサを用いてプロジェクタ自身の傾きを検知し, その情報をもとに台形型に歪んだ投影画像の補正を自動で行う. また, 傾きセンサによる情報のみでは補正できない部分に関しては, 手動で補正を行う. この補正機能により, プロジェクタと投影対象であるスクリーンとの位置関係をあまり留意することなく使用することができ, プロジェクタの利便性を向上させている. この補正機能は, 投影対象がスクリーンのような平面であることを前提としている. したがって, プロジェクタの使用にあたり, スクリーン, もしくはそれに代わる単一平面が必要であり, プロジェクタの使用環境には, 依然として制約が残る.

これに対して, 最近では, プロジェクタとカメラ

を組み合わせた投影システムであるプロジェクタ-カメラシステム (Projector-Camera systems: Pro-Cams) (図 1) を用いた補正手法が提案されている。プロジェクタ-カメラシステムでは、カメラにより投影画像を撮影し、このとき得られる画像からの情報を用いてプロジェクタに入力する画像を変換し、投影画像の補正を行う。このため、従来の傾きセンサを用いた場合と異なり、投影対象の形状によらず、投影画像の幾何補正が可能である^{1, 2, 3)}。また、色調の変化に関する情報も得られるので、投影画像の光学的補正も可能である^{3, 4)}。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。

本稿では、プロジェクタ-カメラシステムを用いた投影画像の幾何補正に焦点をあてる。現在報告されている幾何補正手法は、(i) 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 2 次元的な対応関係を用いた補正手法と、(ii) 投影対象を 3 次元計測し、得られた 3 次元情報を用いた補正手法がある。これら 2 つの幾何補正手法について、実験により比較し、その結果について報告する。

2. 2 次元的な画像間対応を用いた幾何補正手法

プロジェクタ-カメラシステムにおいて、カメラをユーザと見なし、カメラ画像上で幾何学的に歪みのない画像を得ることを目的とする。この場合、幾何補正を行うにあたり、プロジェクタ画像とカメラ画像との 2 次元的な対応関係を求める必要がある。この対応関係を求めれば、カメラ画像上で幾何学的歪みのない投影画像が得られていると仮定し、そのときに対応するプロジェクタ画像 (補正画像) を求められる。その後、原画像と補正画像との対応関係を求め、原画像を補正画像に直接

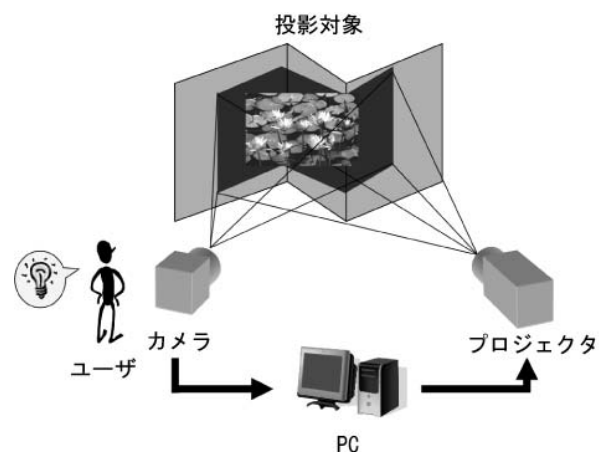


Fig. 1 プロジェクタ-カメラシステム

変換できるようにする。2.1 節において、プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点取得について述べたあと、2.2 節において、得られた対応点から、メッシュベースでプロジェクタ画像とカメラ画像との対応付けを行う手法について述べる。2.3 節では、得られた対応関係から補正画像を作成し、投影画像の幾何補正を行う手法について述べる。

2.1 パターンコード化法による対応点取得

プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点を取得する手法は、構造化光を用いた手法がよく用いられる。その際、効率良く対応点を取得する手法として、パターンコード化法がよく用いられている。これは、コード化したパターンを対象物体に数回にわけて投影・撮影し、撮影された画像上のパターンをデコードすることで、光の照射された位置の識別を行う方式である。

本稿では、投影対象として任意形状のものを想定しているため、プロジェクタ画像とカメラ画像間の密な対応点が必要となる。また、この対応点取得処理は、本システムを利用する前処理であり、できるだけ短時間で終了することが望まれる。このため、パターンコード化法により、プロジェク

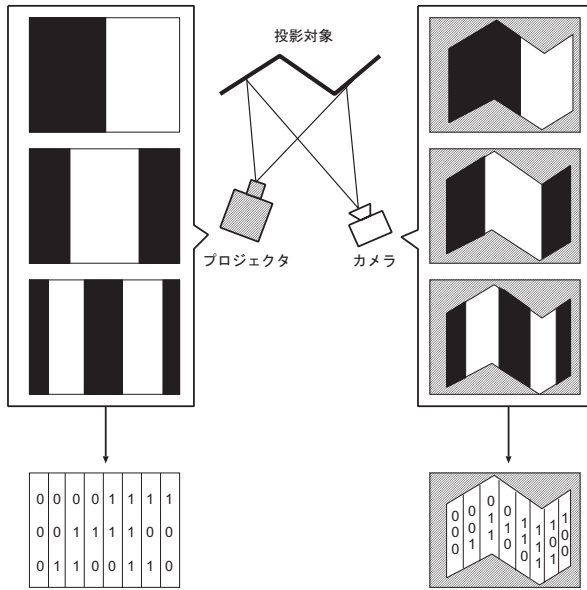


Fig. 2 グレイコードによる画像のコード化

タ画像とカメラ画像間の対応点を取得する。投影するパターンには、グレイコードを用いる⁵⁾。グレイコードパターンを用いてコード化する例を図2に示す。

さらに、より高精度かつ安定に対応点を取得するために、一定間隔のスリットパターンを投影する。1つのスリットは、プロジェクタ画像上で1ピクセル幅としており、このパターンをシフトさせて投影・撮影を行う。このとき得られた撮影画像を2値化し、グレイコードパターンの投影・撮影から得られた結果を組み合わせることで、コード化した領域をさらに絞りこむ。これらのパターンを縦・横に投影・撮影することで、プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点を取得する。

2.2 メッシュベースの対応付け

パターンコード化法により、プロジェクタ画像上の全ての点に対して、カメラ画像上の対応点を求められることが理想である。しかし、これは、使用するプロジェクタやカメラの解像度、プロジェクタから投影された光の広がりなどにより困難で

ある。そこで、プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点をできるだけ密に求め、図3に示すように求めた対応点からメッシュを形成し、各領域ごとに対応付けを行う。プロジェクタ画像の各四角形領域と、それに対応するカメラ画像の四角形領域の対応関係は、射影変換で記述できると仮定する。プロジェクタ画像上の点 $m_p = (x_p, y_p)$ 、カメラ画像上の点 $m_c = (x_c, y_c)$ とすると射影変換は以下のように記述される。

$$x_p = \frac{h_1 x_c + h_2 y_c + h_3}{h_7 x_c + h_8 y_c + 1} \quad (1)$$

$$y_p = \frac{h_4 x_c + h_5 y_c + h_6}{h_7 x_c + h_8 y_c + 1} \quad (2)$$

ここで、 h_1, h_2, \dots, h_8 は未知の射影変換パラメータである。また、同次座標を用いて次のように表現される。

$$\tilde{m}_p \cong \mathbf{H} \tilde{m}_c \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{m}_p = [x_p, y_p, 1]^T$ 、 $\tilde{m}_c = [x_c, y_c, 1]^T$ であり、 \cong は、スケールを除いて等しいことを示す。また、 \mathbf{H} は射影変換行列であり、

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

と記述される。プロジェクタ画像とカメラ画像との1つの対応点から以下の拘束が得られる。

$$\begin{pmatrix} x_c & y_c & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_c x_p & -y_c y_p \\ 0 & 0 & 0 & x_c & y_c & 1 & -x_c y_p & -y_c x_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} \quad (5)$$

上式により、8つの未知パラメータに対して2つの拘束が得られる。したがって、4つの対応点があれば、 \mathbf{H} の全ての要素を決定できる。各四角形領域において、対応点として求めた4頂点から、 \mathbf{H} の未知パラメータを求める。

全ての四角形領域に関して射影変換行列 \mathbf{H} をそれぞれ求めていくことで、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応付けを行う。

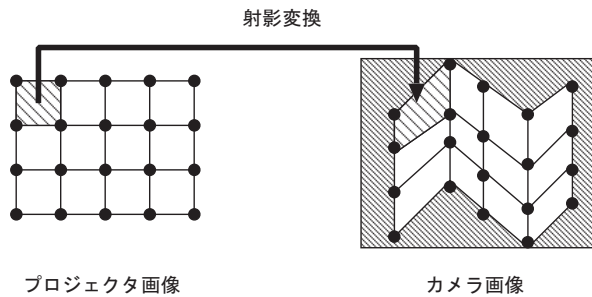


Fig. 3 メッシュベースの対応付け

2.3 幾何補正手法

投影画像の幾何補正は、プロジェクタに入力する画像をあらかじめ変形させた画像（補正画像）を投影することで行う。そのために、まず、補正画像を求める必要がある。そこで、カメラ画像上で幾何補正結果を表示する領域を定め、2.2節で求めた対応関係を利用し、その領域内の全ての点に対応するプロジェクタ画像上の点を求める。

次に、求めたプロジェクタ画像上の領域の各点が、原画像のどの点の画素値を参照するかを求める。カメラ上で定めた領域には、原画像を縮小（あるいは拡大）したものが表示される。したがって、図4に示すように、幾何補正結果を表示する領域上の点 (x_c, y_c) は原画像上の点 (x_p, y_p) の画素を参照する。よって、カメラ画像上の点 (x_c, y_c) に対応するプロジェクタ画像上の点 (x'_p, y'_p) は、原画像上の点 (x_p, y_p) の画素を参照すればよい。これらの関係をテーブルとして保存し、以後このテーブルを用いて原画像を変換し、補正画像をつくる。補正画像をプロジェクタに入力することで、幾何学的歪みのない投影画像が得られる。

プロジェクタ画像とカメラ画像との2次元的な対応関係を用いた幾何補正手順は以下ようになる。

幾何補正手順

Step 1: パターン光の投影・撮影を行い、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を求める。

Step 2: 得られた対応点からメッシュを形成し、各

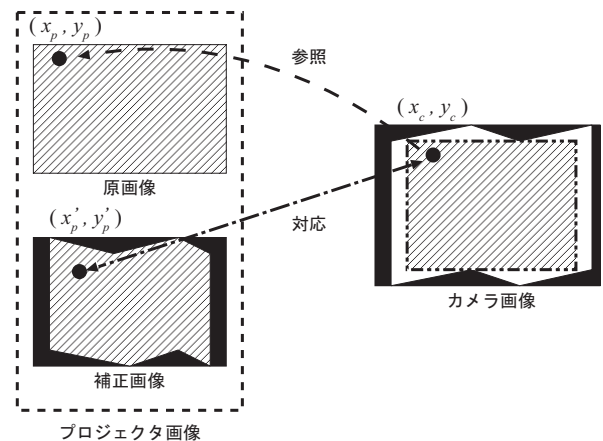


Fig. 4 画像間の関係

四角形領域の4頂点を用いて射影変換行列を求める。全ての四角形領域に対する射影変換行列を求め、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応付けを行う。

Step 3: カメラ画像上で、補正結果を表示する領域を決定する。

Step 4: Step 3で決定した領域内の全ての点を、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応関係を用いて、プロジェクタ画像上の点に変換する。変換した点と原画像上の点との関係をテーブルとして保存する。

Step 5: Step 4で得られたテーブルを用いて、原画像を変換し、補正画像を得る。得られた補正画像をプロジェクタに入力し、補正結果を得る。

3. 投影対象の3次元情報を用いた幾何補正手法

プロジェクタ画像とカメラ画像の2次元的な対応関係を用いた幾何補正手法では、ユーザがカメラの位置にいることが前提である。このため、ユーザの位置を固定しなければならない、ユーザの位置にカメラを設置しなければならない、などといった問題が発生する。これらの問題を解決するために、投影対象の3次元計測を行い、得られた3次

元情報を用いた幾何補正手法が提案されている。投影対象の3次元計測は、プロジェクタとカメラを用いることで可能である。3.1節において、プロジェクタとカメラを用いた3次元計測手法について述べ、3.2節において、投影対象の3次元情報を用いた幾何補正手法について述べる。

3.1 投影対象の3次元計測

3次元計測を行う原理として、プロジェクタとカメラによるステレオ法を用いる。カメラが3次元空間中の点 (X, Y, Z) を撮影するとき、その点が写る画像上の座標 (u, v) との関係は以下のように記述される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \cong \mathbf{P} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{P} は透視投影行列と呼ばれる 3×4 行列である。透視投影行列は、カメラ固有のパラメータである内部パラメータ \mathbf{A} (3×3 行列) と、回転行列 \mathbf{R} (3×3 行列) と並進ベクトル \mathbf{t} によって表される外部パラメータと以下の関係にある。

$$\mathbf{P} = \mathbf{A} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \quad (7)$$

内部パラメータと外部パラメータをキャリブレーションによって求めることで、式(7)により透視投影行列を計算できる。この関係はプロジェクタの光学系についても成り立ち、プロジェクタ画像上の点 (u, v) とその3次元空間中の点 (X, Y, Z) についても式(6)で記述される。したがって、プロジェクタとカメラの透視投影行列をそれぞれ \mathbf{P}_p , \mathbf{P}_c とおき、3次元空間上の点 $\mathbf{M} = (X, Y, Z)$ とそれに対応するプロジェクタ画像上の点およびカメラ画像上の点をそれぞれ $\mathbf{m}_p = (x_p, y_p)$, $\mathbf{m}_c = (x_c, y_c)$ とすると、同次座標表現を用いて以下の式で表現される。

$$\tilde{\mathbf{m}}_p \cong \mathbf{P}_p \tilde{\mathbf{M}} \quad (8)$$

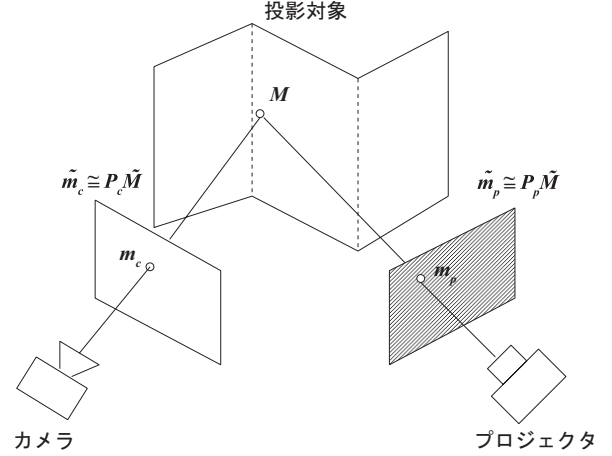


Fig. 5 3次元点と画像上の点の関係

$$\tilde{\mathbf{m}}_c \cong \mathbf{P}_c \tilde{\mathbf{M}} \quad (9)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{m}}_p = [x_p, y_p, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{m}}_c = [x_c, y_c, 1]^T$ である。プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点が求まれば、式(8), (9)により十分な拘束が得られ、3次元点 \mathbf{M} を求めることができる。プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点は、2.1節で述べたコード化パターン光の投影・撮影により得られる。

カメラおよびプロジェクタのキャリブレーション手法は、既知の3次元形状の物体を用いた手法^{5, 6)}やセルフキャリブレーション^{6, 7)}などが提案されている。本稿では、カメラのキャリブレーションは、チェッカーパターンを用いて Zhang⁸⁾ の手法により行う。プロジェクタのキャリブレーションは、キャリブレーション済みのカメラとチェッカーパターンを用いて行う。チェッカーパターンの平面上に対して、2.1節で述べたコード化パターン光の投影・撮影により、プロジェクタ画像とカメラ画像間の対応点を取得する。既にカメラ側のキャリブレーションを行っているため、式(9)を用いて、カメラ画像上の点に対応する3次元空間上の座標を求めることができる。したがって、プロジェクタ画像上の点と3次元空間中の点との対応が得られ、カメラの場合と同様にしてキャリブレーション

ンを行うことができる。

3.2 幾何補正手法

投影対象の3次元点は、式(6)により透視投影行列を用いてカメラ、プロジェクタ画像上の点に変換される。異なる視点から投影対象を見る場合も、その視点における透視投影行列がわかれば、その位置で得られる画像上の点を計算により求めることができる。このため、プロジェクタ画像とカメラ画像との2次元的な対応関係を用いた場合とは異なり、カメラを仮想的に動かし、その位置で補正結果を得られるように幾何補正を行うことが可能になる。カメラを仮想的に動かしたときの位置関係は、回転行列 R と並進ベクトル t で表現可能である。式(7)において、カメラを仮想的に動かしたときの R と t に更新することで、本来の位置と異なる位置にカメラがある場合の透視投影行列を作ることが可能である。

図6に示すように、カメラを仮想的に動かしたときの透視投影行列を P'_c とすると、3次元点 M と仮想カメラ上の点 m'_c との関係は、式(8)、(9)と同様に次式で示される。

$$\tilde{m}'_c \cong P'_c \tilde{M} \quad (10)$$

投影対象の3次元計測によって得られた3次元点全てを、式(10)に従い、仮想カメラ画像上の点に変換し、変換した点群からメッシュを形成する。以後、2.2、2.3節で述べた手法と同様に処理を行い、原画像を変換する。理想的には、カメラとは異なる位置においても、その位置にカメラを置いてプロジェクタ画像とカメラ画像との2次元的な対応関係を用いた幾何補正を行った場合と同じ結果が得られることになる。

以下にプロジェクタとカメラを用いて投影対象の3次元計測を行い、得られた3次元情報を用いる場合の幾何補正手順を示す。

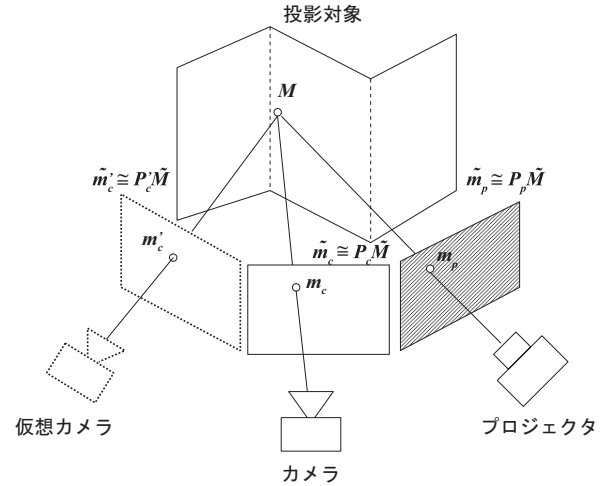


Fig. 6 3次元情報の利用

幾何補正手順

- Step 1:** キャリブレーションを行い、プロジェクタとカメラの内部パラメータおよび外部パラメータを求める。
- Step 2:** パターン光の投影・撮影を行い、プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点を求める。
- Step 3:** 得られた対応点について、式(8)、(9)により、3次元座標を計算する。
- Step 4:** カメラの位置を仮想的に動かしたときの透視投影行列を使い、各3次元点を仮想カメラ画像上の点に変換する。
- Step 5:** Step 4で得られた点群に対して、2次元的な対応関係を用いた幾何補正のStep 2以下と同様の操作を行い、補正結果を得る。

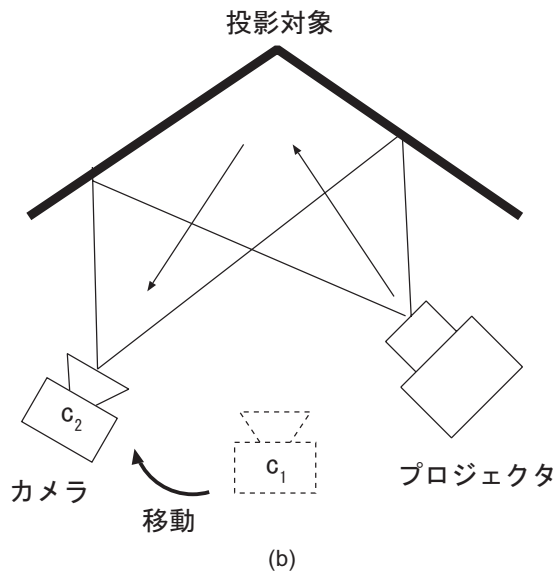
4. 実験結果・考察

プロジェクタ-カメラシステムにおいて、プロジェクタ画像とカメラ画像との2次元的な対応関係を用いた幾何補正と、投影対象の3次元計測を行い、その3次元情報を利用した幾何補正を実装し、実験した結果とその考察について述べる。

図7(a)に、構築したプロジェクタ-カメラシステムおよび実験に用いた投影対象を、(b)にプロ



(a)



(b)

Fig. 7 実験環境：(a) 実験の様子，(b) 実験時の位置関係

ジェクタとカメラの位置関係を示す。最初にカメラを c_1 の位置に置き、プロジェクタとカメラを用いて投影対象の 3 次元計測を行った後に、カメラを c_2 の位置に移動する。このとき、 c_2 の位置にあるカメラを用いて 2 次元的な幾何補正を行った結果と、 c_1 の位置で得られた 3 次元情報を利用して、 c_2 の位置で補正結果が得られるように幾何補正した結果との比較を行った。 c_1 、 c_2 それぞれの位置におけるカメラの透視投影行列は、チェッカーパターンの平板を投影対象の正面におき、それを用いてキャリブレーションを行うことで求められている。

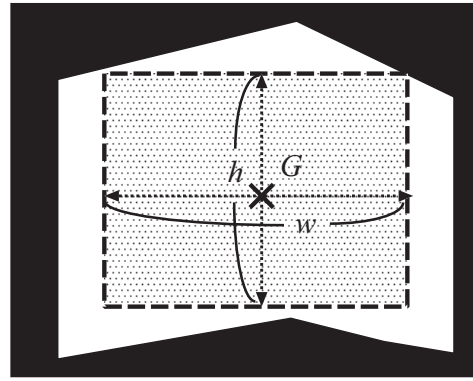


Fig. 8 幾何補正結果を表示する領域の決定

また、幾何補正結果を表示する領域の決定については、カメラを c_2 の位置に置き投影画像を撮影した結果を利用した。 c_2 の位置に置いたカメラで、プロジェクタから白色画像を投影したものを撮影し、このとき得られた画像を 2 値化する。2 値化画像を用いて、プロジェクタが投影可能な領域についての重心 G を求め、これを中心にして補正領域を拡大させていく。図 8 に示すように、プロジェクタが投影可能な領域内において、面積が最大となる長方形を探す。この長方形領域のアスペクト比 (図 8 における w と h の比) は 4 : 3 とした。これを幾何補正結果を表示する領域とした。

プロジェクタ画像とカメラ画像との対応点の数は、縦に 48 点、横に 64 点であり、対応点の間隔は、縦・横ともにプロジェクタ画像上で 16 ピクセルとした。使用したカメラは、PointGrey SCOR-14SOM-KT、使用したプロジェクタは、EPSON EMP-1715 である。解像度はそれぞれ、 1280×960 、 1024×768 とした。

それぞれの手法で幾何補正を行った結果を図 9 に示す。図 9 において、(a) の原画像をそのままプロジェクタに入力し、投影したものをカメラで撮影すると (b) のように歪んだ投影画像が得られる。これに対して、プロジェクタ画像とカメラ画像の 2 次元的な対応関係を用いた幾何補正手法の結果である (c)、および 3 次元計測を行い、その 3 次



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 幾何補正結果 (画像) : (a) 原画像, (b) 投影画像, (c) 補正結果 (2次元的な幾何補正), (d) 補正結果 (3次元情報を利用した幾何補正)

元情報を用いた幾何補正結果である (d) では、歪みがなく正しく投影画像を表示できていることがわかる。また、図 10 にメッシュパターンを投影した結果を示す。図 10 においても、メッシュパターンをそのまま投影した場合に生じる投影画像の歪みが、各幾何補正手法によって補正されていることを確認できる。各ラインが直線になっており、幾何補正の効果が明確にわかる。これらの結果から、プロジェクタ-カメラシステムによる幾何補正が非常に効果的であると言える。

2次元的な対応関係を用いた幾何補正手法の結果と3次元情報を用いた幾何補正手法の結果は、ほぼ同じように見える。図 11 に、それぞれの手

法による幾何補正結果を拡大したものを示す。図 11 (a) に示す2次元的な対応関係を用いた手法では、ラインがほぼ直線に投影されているのに対して、図 11 (b) に示す3次元情報を利用した幾何補正手法では、ラインが少し歪んでおり、補正しきれていない。

理想的には、3次元情報を利用した幾何補正は、2次元的な対応関係を用いた幾何補正の結果と一致する。しかし、3次元情報を利用した幾何補正では、2次元的な対応関係を用いた補正に比べ結果に歪みが残っており、各手法による結果は一致しなかった。この理由として、3次元復元精度があげられる。今回実験に用いたプロジェクタは、焦

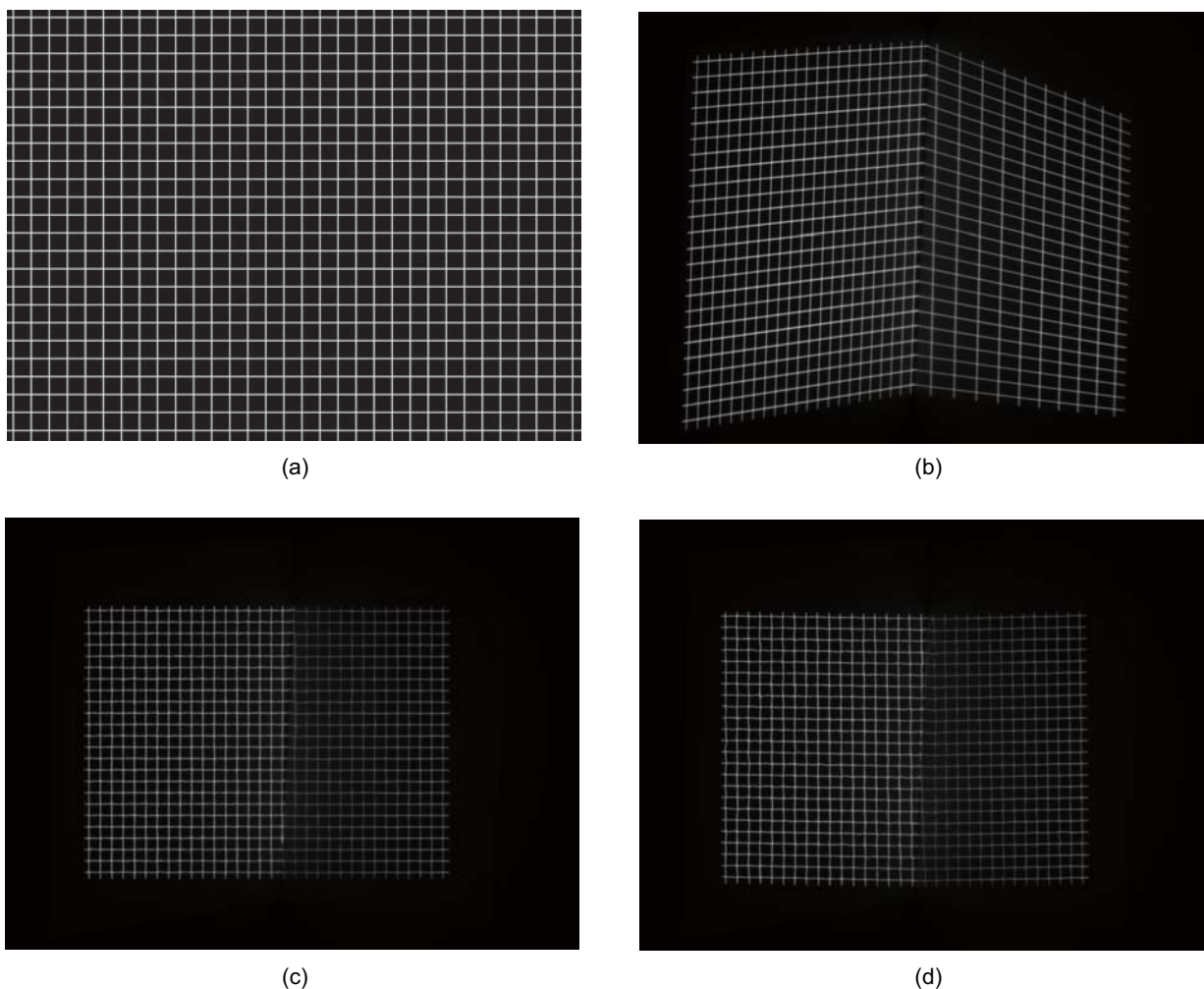


Fig. 10 幾何補正結果（メッシュパターン）：(a) 原画像，(b) 投影画像，(c) 補正結果（2次元的な幾何補正），(d) 補正結果（3次元情報を利用した幾何補正）

点の合う範囲がカメラより狭く，プロジェクタから投影したパターン光がぼやけてしまう．このため，パターン光を撮影した画像上において，精度良く対応点を求めることができず，3次元復元精度が低下してしまったと考えられる．また，本実験において，キャリブレーションによって，移動後のカメラの位置を求めたが，その求めた位置の精度による問題も考えられる．投影対象の3次元情報を用いて幾何補正を行う手法において，計測時に得られる投影対象の3次元計測精度と，別の視点における位置情報を非常に高精度に求めなければならないことがわかる．

5. まとめ

本論文では，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を実験的に検討した．実験を通じて，プロジェクタ-カメラシステムによる幾何補正が有効であることを示した．また，3次元計測を行い，これを利用して幾何補正をする場合，投影対象の3次元計測の精度，および別の視点における位置情報の精度が問題になることを明らかにした．今後の課題として，プロジェクタとカメラを用いた3次元計測をより高精度に行うことがあげられる．また，今回は，カメラを仮想的に動かしたときの位置情報は，キャリブレーション

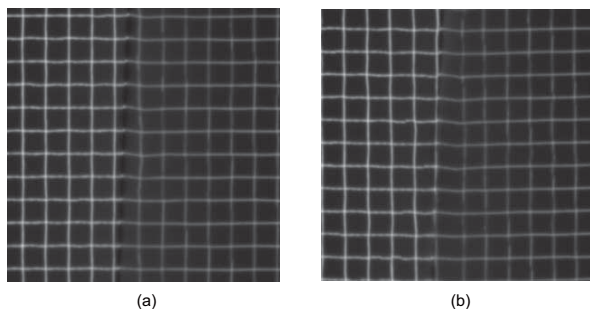


Fig. 11 幾何補正結果の拡大図: (a) 2次元的な幾何補正, (b) 3次元情報を利用した幾何補正

ンを行うことで与えたが, 将来的には, ユーザに対して補正結果を与えるために, ユーザの位置情報を取得する手法が必要になる. 高精度にユーザの位置情報を取得する手法の開発も課題としてあげられる.

参考文献

- 1) R. Raskar, M. S. Brown, R. Yang, W. Chen, G. Welch, H. Towles, B. Seales, and H. Fuchs, "Multi-projector Displays Using Camera-Based Registration," *Proc. IEEE Visualization 1999*, pp. 161-168, October, 1999.
- 2) M. Brown, A. Majumder, and R. Yang, "Camera-Based Calibration Techniques for Seamless Multi-projector Displays," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 11, No. 2, pp.193-206, 2005.
- 3) O. Bimber, A. Emmerling, and T. Klemmer, "Embedded Entertainment with Smart Projectors," *IEEE Computer (cover feature)*, pp.48-55, January issue 2005.
- 4) S.K. Nayar and H. Peri, M.D. Grossberg, and P.N. Belhumeur, "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections," *ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS)* October, 2003.
- 5) 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 6) 徐剛, 写真から作る3次元CG イメージ・ベースド・モデリング & レンダリング, 近代科学社, 2001.
- 7) 田中文武, 出口光一郎, 岡谷貴之, "汎用プロジェクトアを用いる高精度レンジファインダのためのキャリブレーション," 計測自動制御学会東北支部 第226回研究集会, 226-9, December 2005.
- 8) Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research*, December 1998.