

# プロジェクタの幾何補正システムの開発

## Development of Geometric Correction System for Projector

今井 倫太郎  
Rintaro Imai

加藤 嗣十  
Tsukasa Kato

田口 亮十  
Ryo Taguchi

保黒 政大†  
Masahiro Hoguro

梅崎 太造†  
Taizo Umezaki

### 1. はじめに

近年の大画面かつ高精細なディスプレイへのニーズの高まりを背景に、小型化や低価格化の進んだプロジェクタを用いてオフィスや居間のカーテンや壁に画像を投影する技術が注目されている。しかし専用スクリーンではない投影面に対するプロジェクタの表示は次の二つの問題が起きる。一つ目は、投影面の表面形状や位置関係に起因して投影画像が歪んで見える幾何学的問題である。次に投影面が異なる反射特性を有していないために、明るさや色合いが異なるように見える光学的問題である。これらの解決法としてプロジェクタ-カメラシステムを用いて幾何的問題を解決する補正[1][2]や光学的問題を解決する補正[3][4]を実現する手法が多く提案されている。このシステムでは、カメラを視聴者とみなし、カメラで観察された画像(観察画像)を基にプロジェクタに入力する画像(入力画像)を変換する。例えば、[1]の手法ではスリット状のパターンをプロジェクタから投影してカメラで撮影する方法で幾何的に補正して

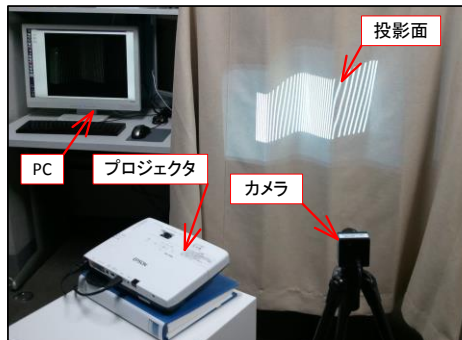


Fig. 1 実験装置外観



Fig. 2 使用するグレイコードパターンの例

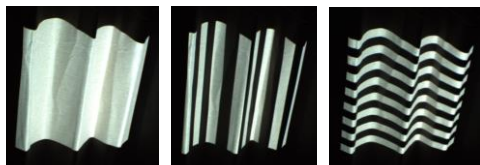


Fig. 3 観察されたパターンの例

いる。幾何的補正は光学的補正に先んじて行われるため、システム全体の補正精度を保つ上で非常に重要である。しかしながら反射特性が一律でない、例えば模様や柄のあるような投影面を用いた際の幾何的補正への影響は論文中には評価されていない。本稿では、グレイコードパターン[5]のみを用いた投影パターン数が少なく、演算が簡便な幾何的補正手法を提案し、模様のある投影面に対する幾何的補正の誤差がスリットパターンを用いる従来手法と比較して軽減されることを示す。

### 2. 実験装置

本研究で用いるプロジェクタ-カメラシステムは、補正パターンおよび補正後の画像を投影するプロジェクタ 1 台、投影画像を観察するカメラ 1 台、画像処理演算用のコンピュータ、および投影面で構成される。装置の外観を Fig. 1 に示す。装置が使用される環境の条件として、室内であること、各構成部品は静止していること、および投影面の表面形状はなめらかな曲面を呈していることを仮定する。今回の実験では IMAGING SOURCE 社の USB カラー CMOS カメラ DFK 61CU02.H (使用解像度  $2560 \times 1536$ [pixel]) と EPSON 社の液晶プロジェクタ EB-1770W (使用解像度  $1280 \times 720$ [pixel]) を用いた。また、プロジェクタ解像度のうち補正に使用する範囲は  $640 \times 384$ [pixel] である。

### 3. 幾何補正手法

#### 3.1 グレイコードパターンと重心

カメラを視聴者とみなし、歪みのない画像が観察できるようにするためには、観察画像と入力画像間に座標の対応付けを行う必要がある。そこで提案手法では、効率性とコード化誤りの低減が期待できる相補的なグレイコードパターンを用いる[5]。グレイコードパターンの例を Fig. 2 に示す。水平方向と垂直方向それぞれのパターンをプロジェクタから 1 回ずつスクリーンに投影し、スクリーン上でのパターンの変化をカメラで撮影する (Fig. 3)。得られた画像からコードを復号することで、観察画像および入力画像上に 2 次元コードを割り付けることができる。ただし、1 コードあたりのピクセル幅やビット深さは設定に応じて変更される。そして観察画像上、入力画像上における 2 次元コード  $(i, j)$  が割り当てられた領域の重心  $G_{i,j}$ ,  $S_{i,j}$  をそれぞれ式(1), (2)により求める。ここで、 $A(i, j)$  は観察画像上で 2 次元コード  $(i, j)$  が割り当てられた領域、 $B(i, j)$  は入力画像上のそれである。これら  $G_{i,j}$  と  $S_{i,j}$  が同一視できると仮定すると、二画像間で対応付けられた点群が得られる。

$$G_{i,j} = \frac{1}{|A(i,j)|} \sum_{(x,y) \in A(i,j)} (x,y) \quad (1)$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{|B(i,j)|} \sum_{(x,y) \in B(i,j)} (x,y) \quad (2)$$

† 名古屋工業大学 大学院工学研究科 情報工学専攻,  
Department of Computer Science and Engineering, Nagoya  
Institute of Technology,  
imai@ume.mta.nitech.ac.jp

‡ 中部大学 工学部 電子情報工学科,  
Department of Electronics and Information Engineering, Chubu  
University

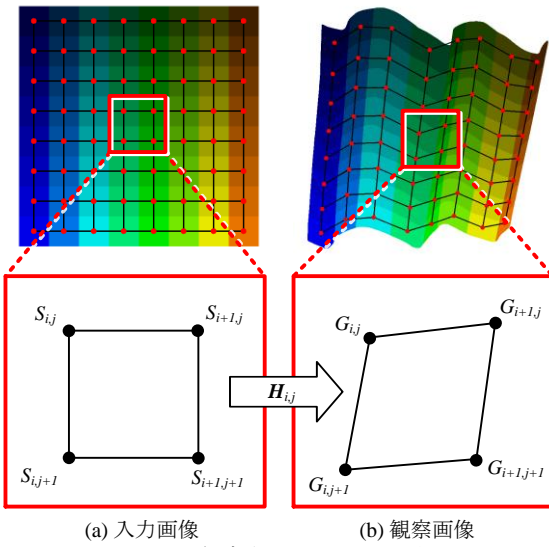


Fig. 4 観察されたパターンの例

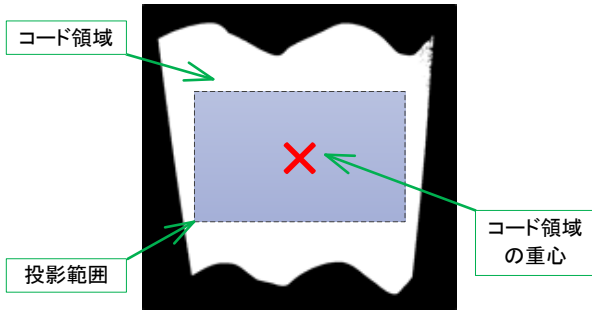


Fig. 5 投影領域の決定

### 3.2 メッシュの対応付け

前節のグレイコードパターンで得られる対応点を用いてメッシュを生成すれば、二画像間でメッシュを透視投影変換により対応付けできる。  $G = (x, y)$  を観察画像上の点、  $S = (X, Y)$  を入力画像上の点とすると、これらの間の透視投影変換は式(3)、(4)のように表せる。

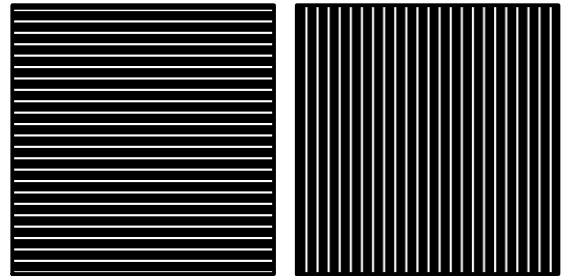
$$X = \frac{h_1x + h_2y + h_3}{h_7x + h_8y + 1} \quad (3)$$

$$Y = \frac{h_4x + h_5y + h_6}{h_7x + h_8y + 1} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -xX & -yX \\ 0 & 0 & 0 & X & Y & 1 & -xY & -yY \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_8 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$H_{i,j} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで  $h_1, \dots, h_8$  は透視投影変換パラメタである。また 2 点  $G, S$  の対応関係から式(5)の拘束が得られる。この式の自由度は 6 であることから、最低 4 組の 2 点間対応があれば透視投影変換パラメタを決定できる。そこで Fig. 4 のように隣接する 4 個の二次元コードの重心を頂点を持つような四角形  $G_{i,j}G_{i,j+1}G_{i+1,j+1}G_{i+1,j}$  を四角形  $S_{i,j}S_{i,j+1}S_{i+1,j+1}S_{i+1,j}$  に写す透視投影変換  $H_{i,j}$  を求めることができる。こうしてメッシュごとに得られる局所的な座標



(a) 水平方向 (b) 垂直方向  
Fig. 6 スリットパターン

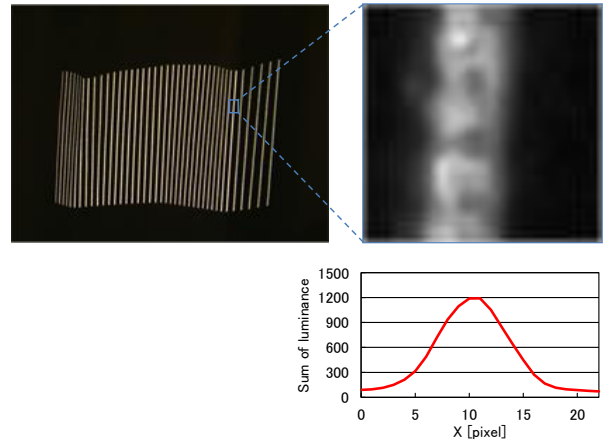


Fig. 7 垂直方向のスリットと輝度投影

変換を全体に結合することで、入力画像から観察画像への補正テーブルが構成できる。このテーブルを基に原画像を幾何学的変換すれば歪みのない画像がカメラから観察できる。

### 3.3 投影範囲の決定

観察画像上のどの範囲に補正画像が映るようになるか決定する必要がある。まず相補的なグレイコードパターンの差分を取り、適切なしきい値で二値化することで投影面のマスク画像を作成する。マスク画像の重心を中心として、原画像のアスペクト比を保つような矩形範囲のうち面積が最大で、なおかつマスク領域に収まるような範囲を補正画像の投影範囲とする (Fig. 5)。

### 3.4 スリットパターン投影法

従来手法であるスリットパターン投影法について説明する。スリットパターンは水平垂直方向に一定間隔で並んだ白線からなり、このパターンを 1[pixel]ずつシフトさせた画像を投影・撮影し、スリットの交点を算出する。入力画像の各点に対して観察画像の座標を対応付けることで補正テーブルを作成する。スリットパターンの例を Fig. 6 に示す。投影画像内のスリットの各交点は次の方法で算出する。まずスリットのおおまかな位置を把握するため、コードあたりの幅をスリット間隔とするグレイコードパターンを投影・撮影し、2次元コードを割り当てる。そして隣接するコード重心の位置から各スリットの輝度投影範囲を決定する。垂直方向のスリットの場合、範囲上で Y 方向に投影処理を行い輝度総和を求める。この輝度総和の最大ピークがスリットの交点の X 座標となる。ただしピークは、移動平均した投影分布を 2 次多項式で曲線フィッティングし、その極大座標をサブピクセルで求める (Fig. 7)。

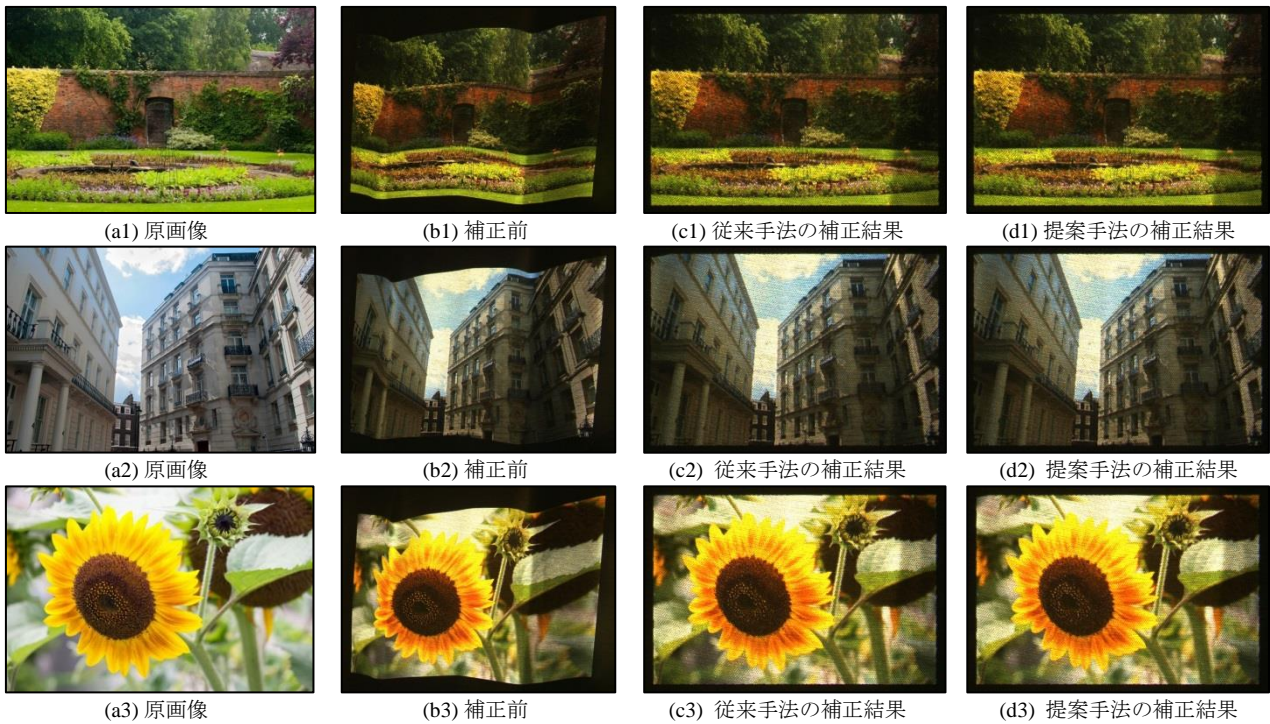


Fig. 9 幾何的補正の結果

#### 4. 幾何的補正の実験

前章で説明した提案手法と従来手法について幾何的補正を実施した。実験にあたり、投影面には Fig. 8 に示す無地のカーテンを使用する。提案手法のグレイコードパターンは 1 コードあたりの幅を 4[pixel]とし、相補パターンを合わせて 36 枚を使用した。一方、従来手法のスリットパターンは水平垂直方向に 3[pixel]幅の白線が 16[pixel]の間隔で並んだパターンを使用した。加えて交点を安定して取得するためのコード幅が 16[pixel]のグレイコードパターンを用いた。したがって、投影・撮影するパターンは合わせて 60 枚である。実験の例を Fig. 9 に示す。幾何的補正を行わない場合、カーテンの折り曲がりに伴う画像の変形やデバイスの位置関係による傾きが発生しているが、従来手法と提案手法の補正結果では歪みは解消されており、いずれの手法も有効であることがわかる。また、2 手法による補正結果から目立つ差異は確認できず、同程度の補正が行われていると推測される。次章で評価実験を行い 2 手法の相違を確認する。

次に、補正にかかる処理時間について説明する。本実験では、パターンをプロジェクタから投影しカメラで撮影するまでの時間を 350[ms]に設定し、演算用のコンピュータは CPU に Core i7 3.40GHz を使用した。従来手法では 60 枚のパターン投影・撮影に 21.2[sec]を、スリットの交点を求め補正テーブルを算出するまでに 35.1[sec]を要した。したがって、全ての処理時間は 56.3[sec]である。一方、提案手法では、36 枚のパターン投影・撮影に 12.5[sec]を、メッシュの生成から補正テーブルの算出までに 520[ms]を要した。したがって全ての処理時間は 13.1[sec]と、従来手法と比較して大幅に処理時間を短縮することができた。ただしグレイコードの復号処理は投影・撮影中にバックグラウンド実行されている。提案手法で処理時間が短縮された理由は、投影するパターン枚数が少ないことに加えて、従来手法では

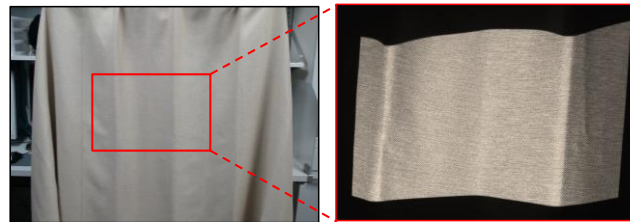


Fig. 8 実験に使用するカーテン

Fig. 7 で示したような水平・垂直方向の輝度投影とフィッティング処理を入力画像上の各点で行う必要があり、提案手法に比べて計算量や画素アクセスの総数が増大するためである。補正にかかる時間をさらに短縮するためには、GPU 上で並列処理させること、高速度カメラを用いること、カメラとプロジェクタをトリガ同期させることが挙げられる。これらについては今後の予定として検討する。

#### 5. 評価実験と考察

##### 5.1 模様のない投影面に対する精度評価

模様のない投影面に対して、従来手法と提案手法の相違を評価し、二手法が同程度の補正精度を持っていることを示す。実験では前章と同様の無地のカーテン (Fig. 8) を投影面とし、従来手法を用いた場合の補正テーブルを真値として仮定し、提案手法を用いて得られる補正テーブルとの誤差で評価する。この誤差は Euclid 距離で求める。すなわち評価は観察画像ではなく入力画像の座標で行われる。例として提案手法で得られた補正テーブルを基にして、入力画像の座標に変換した無地のカーテンの観察画像を Fig. 10 に示す。提案手法のグレイコードパターンの 1 コードあたりの幅は 32, 16, 8, 4[pixel]の各値に設定し、それぞれについて評価を行う。濃淡で表現した 2 次元の誤差分布を Fig. 11 に示し、平均二乗誤差の推移を Fig. 12 に示す。Fig. 11 より、コードあたりの幅が 32[pixel]のときカーテンの折

れ曲がりの周辺で誤差が大きく、コードの幅が小さくなるに従い誤差が解消されていることがわかる。これはコードの幅が大きいとメッシュが粗くなり、投影面の急な形状変化に対応できないためと考えられる。また、平均二乗誤差を表した Fig. 12 より、コードあたりの幅が 16[pixel]以降から急峻に誤差が減少し、最も改善した 4[pixel]の場合には誤差が 0.45[pixel]であることを確認した。以上より模様のない投影面の場合、従来手法と提案手法は同程度の補正精度であると言える。

### 5.2 模様のある投影面に対する補正精度への影響

投影面の模様が及ぼす幾何的補正への影響を評価する。評価実験にあたり、投影面にはカラーの矩形が描画された平板を使用する(Fig. 13)。矩形の色は上列左から赤色、青色、黄色、緑色、下例左から薄い灰色、紫色、桜色、濃い灰色である。この実験では平板の模様に関係なく補正テーブルを得るために、Fig.13 の観察画像から投影面の 4 点のコーナーを検出し入力画像から観察画像への透視投影変換を求める。このテーブルを基に入力画像の座標に変換した平板の観察画像を Fig. 14 に示す。そしてこの変換から求まる補正テーブルを真値として仮定し、従来手法および提案手法を用いて得られる補正テーブルとの誤差で評価する。この誤差は Euclid 距離で求める。本実験で使用するパター



Fig. 10 入力画像の座標に変換された無地カーテンの観察画像

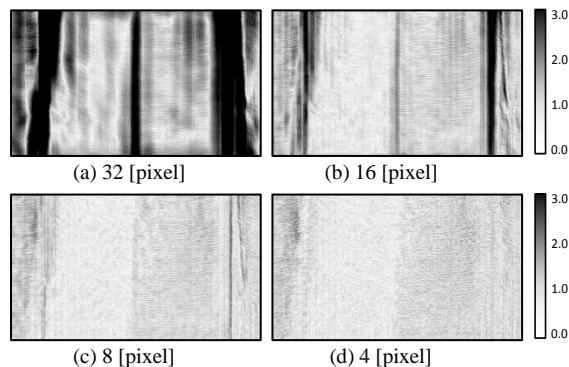


Fig. 11 コードあたりの幅と補正誤差分布

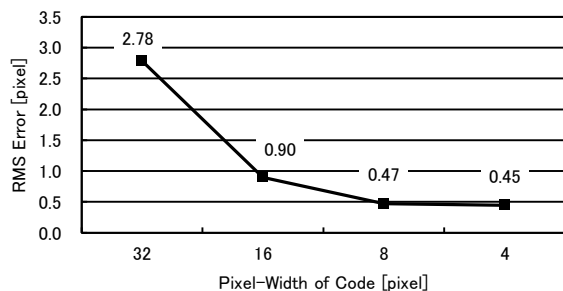


Fig. 12 コードあたりの幅と補正誤差

ンは 4 章の補正実験と同じものとする。Fig. 15 では、従来手法および提案手法について、濃淡で表した 2 次元の誤差分布および X=380, 520 における誤差分布のグラフを示している。X=520 において従来手法では模様の境界付近で誤差が最大 3.48[pixel]となる一方、提案手法では最大 1.45[pixel]となり誤差が 42%に減少し、提案手法が投影面の模様に対して強健であると言える。しかし提案手法の 2 次元誤差分布からわかるようにモアレ状の周期的な誤差が発生している。X=360 における誤差分布から従来手法では誤差がゆるやかに変化するのにに対し、提案手法では高周波の振動を伴い変化していることがわかる。これは 2 次元コードの重心で生成されるメッシュの近似により、もともと存在するカメラ分解能とプロジェクタ分解能の空間周波数の違いから発生するうなり現象が顕著に現れたものと考えられる。Table 1 は二手法に関する補正テーブル全体での平均二乗誤差を表している。これより提案手法でやや誤差の改善が見られるため、うなり現象が全体に与える影響は少ないものと推測される。この現象に関する補正精度への局所的な影響の分析と改善は今後の課題である。

従来手法を用いた際に模様の境界付近で大きな誤差が発生する理由として、スリットが模様境界と交叉した場合、スリットの投影輝度分布が歪になり極大ピーク座標がずれるためと考えられる。模様境界および内部におけるスリットの投影輝度分布の例を Fig. 16 に示す。Fig. 16 では、模



Fig. 13 平板の観察画像



Fig. 14 入力画像の座標に変換された平板の観察画像

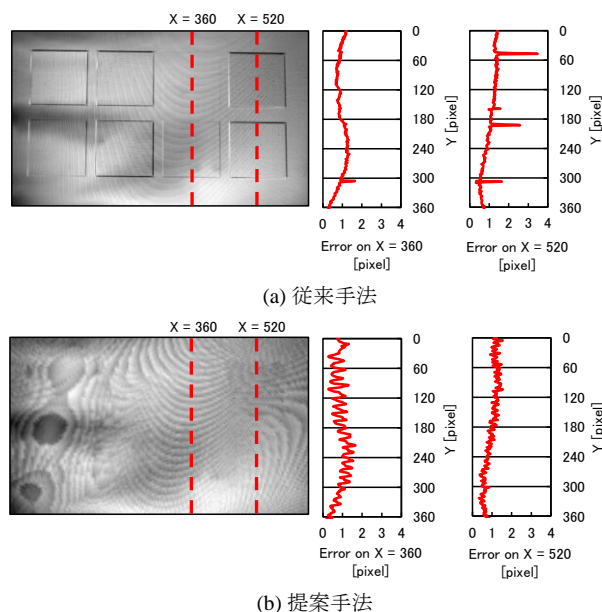
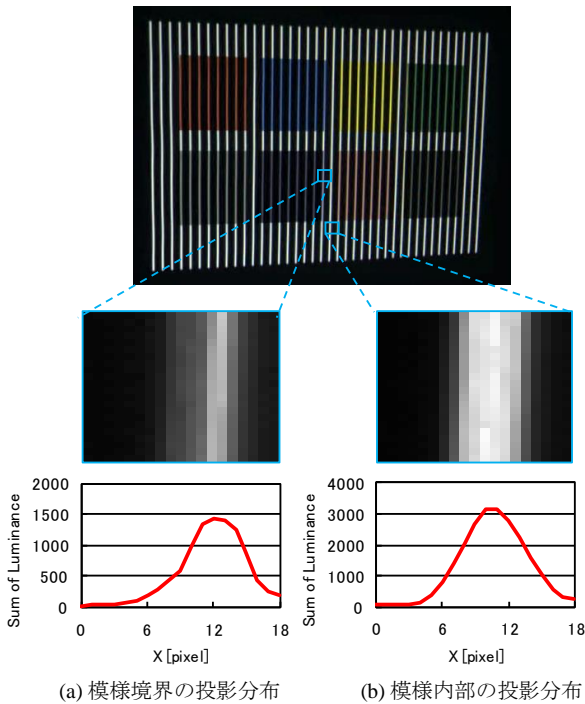


Fig. 15 平板に対する幾何的補正の誤差分布

Table 1 幾何的補正の誤差 [pixel]

	従来手法	提案手法
RMS Error	1.10	1.06



(a) 模様境界の投影分布 (b) 模様内部の投影分布  
Fig. 16 模様の投影分布に対する影響



Fig. 17 実験で用いた模様付きカーテンと観察画像

様内部の(b)の分布が対称な形を呈しているのに対して、模様境界の(a)の分布は白の模様側にずれこんでおり非対称な形を呈している。結果的に(a)の極大ピーク座標は X 座標が正方向へずれることになる。一方、提案手法でこのような模様境界での誤差が顕著でない理由は、相補的なグレイコードパターンにより模様の変化に対する影響が低減されたためと考えられる。

次に、Fig. 17 に示す模様付きのカーテンに対して従来手法と提案手法の相違を評価する。本実験は 5.1 節と同様に従来手法で得られた補正テーブルを真値として仮定し、提案手法の対応点座標との誤差で評価する。この誤差は Euclid 距離で求める。本実験で使用するパターンは 4 章の補正実験と同じものとする。濃淡で表した誤差分布と Y=192 における誤差分布のグラフを Fig. 19 に示す。誤差分布から模様の境界で誤差が発生していることが確認できる。また、Y=192 において誤差は最大 1.30[pixel]であることを確認した。次に、どちらの手法が模様の影響を受けているかを判断するため、それぞれの補正テーブルを微分してその勾配を調べる。実験で用いたカーテンは滑らかな表面形状を呈しているため、模様の影響を受けていなければ模様境界においても補正テーブルの勾配は滑らかに分布するはずである。そこで、補正テーブルの点(x,y)におけるスカラー量の勾配を  $k = (s + t)/2$  で定める。ただし s, t はそれぞれ X, Y 方向の勾配ベクトルの長さ



Fig.18 入力画像の座標に変換された無地カーテンの観察画像

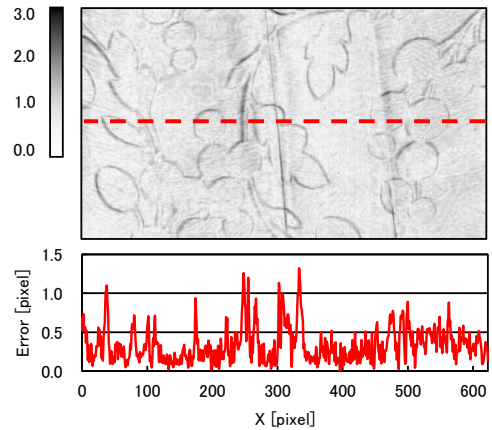
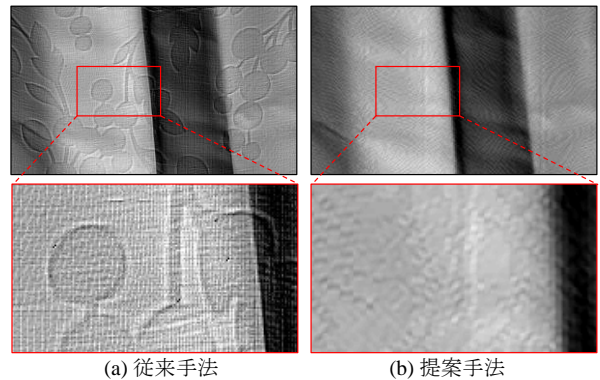


Fig. 19 幾何的補正の誤差分布



(a) 従来手法 (b) 提案手法

Fig. 20 補正テーブルの勾配

$$s(x,y) = \|R(x+1,y) - R(x,y)\|$$

$$t(x,y) = \|R(x,y+1) - R(x,y)\|$$

で定義される。ここで  $R(x,y)$  は補正テーブル上の点(x,y)に対応する観察画像上の点、 $\|\cdot\|$  は線型実平面上の Euclid 距離が定めるノルムである。従来手法および提案手法の補正テーブルの勾配を濃淡で表現した図とその拡大図を Fig. 20 に示す。(a)の従来手法では模様の境界で補正テーブルの勾配が変化していることが確認できる。一方で(b)の提案手法では境界で勾配の変化は確認できず、勾配が滑らかに分布していることがわかる。以上より平板に対する実験結果と同様に、カーテンのような滑らかな投影面についても従来手法と比較して提案手法は模様の変化に対して強健であると言える。

## 6. 輝度補正精度への影響

最後に、簡易的なグレースケールの輝度補正を行い補正精度が提案手法で改善することを確認する。輝度補正は、原画像と観察画像の差異から入力画像の輝度値を微調整し、再び投影するフィードバック方式で行う。具体的には以下の手順で補正する。まず初期値として原画像を入力画像の座標に変換し投影・撮影する。次に入力画像の座標に変換された原画像と観察画像の各画素について輝度値の比較を行い、観察画像の方が明るい場合、対応する座標の入力画像の輝度値を1下げる。反対に観察画像の方が暗い場合、入力画像の輝度値を1上げる。こうして輝度値を微調整した入力画像を投影し、その観察画像と原画像の比較を繰り返す。

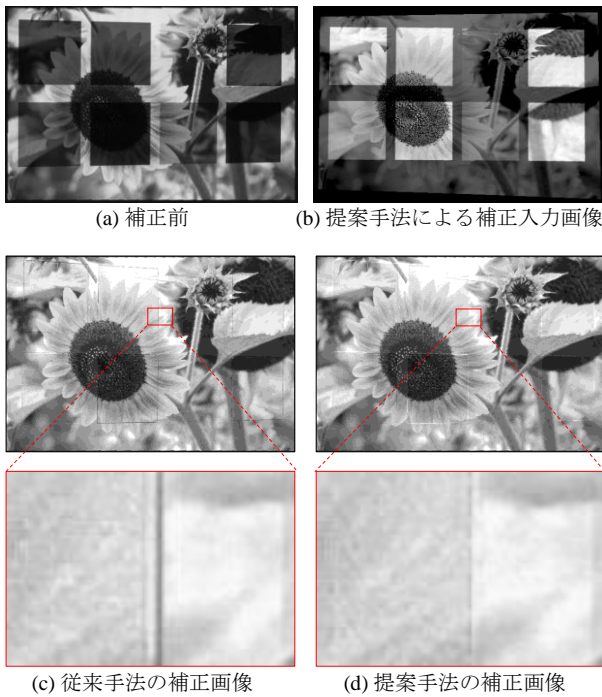


Fig. 21 輝度補正画像

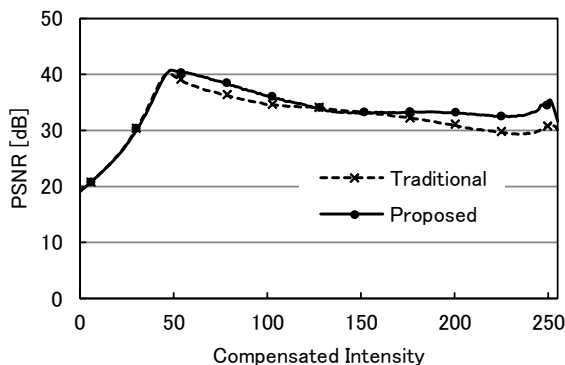


Fig. 22 均一な輝度補正と PSNR

Table 2 均一な輝度補正と PSNR [dB]

補正輝度値	従来手法	提案手法
50	39.7	40.7
100	34.5	36.2
150	33.3	33.0

返す。ただし入力画像の輝度値は 0 を下限とし、255 を上限とする。精度評価は、投影面を均一な輝度値に補正した際の観察画像と一様輝度の画像との PSNR (ピーク信号対雑音比) を求めることで行う。評価実験では 5 章で用いた平板を投影面とした。従来手法と提案手法それぞれから得られる幾何補正テーブルを基にして輝度補正した結果を Fig. 21 に、各均一な輝度値で補正した際の投影面全体の PSNR を Fig. 22 および Table 2 に示す。Fig. 21 (c) の従来手法では矩形の境界で輝度が低下していることが確認できる。この理由として、5.2 節で解説したように輝度投影のピークが明るい方へずれ込み、投影された画像では矩形が見かけ上小さくなる。したがって修正輝度値は負方向に発散し、結果的に暗い部分が現れるためである。一方(d)の提案手法では境界での輝度ブレは従来手法に対して緩和していることがわかる。Fig. 22 に示す補正輝度値と PSNR の関係は、補正輝度値が環境光の観察輝度値と一致した際に PSNR が最大となり、以降は補正輝度値が大きくなるに連れて PSNR がゆるやかに減少、つまり補正精度が悪化していくが、輝度値 100 や 200 周辺では提案手法が優位であることがわかる。しかしながら、Table 1 で示したように幾何的補正の誤差は提案手法に於いても 1[pixel] を超えているため、フィードバックが発散した座標がいくつか確認された。したがって光学的補正の精度をさらに向上させるためには、幾何・光学的補正情報を独立して扱うのではなく、互いを協調させる手法が有効であると考えられる。

## 7. むすび

本稿では、グレイコードパターンを用いた高速で演算が簡便な幾何的補正手法を提案するとともに、評価実験を通して提案手法が投影面の模様で補正に影響を及ぼさないことを示した。本研究により、幾何的補正の後に行われる光学的補正や、最終的な投影画像の補正システムの全体の精度向上が可能になると考えられる。今後は、周期性のある補正誤差の改善法を検討するとともに、模様が及ぼす幾何的補正への影響をさらに分析し、それらの情報を利用した光学的補正を検討する予定である。

## 参考文献

- [1] Oliver Bimber, Andreas Emmerling, Thomas Klemmer: Embedded Entertainment with Start Projectors, IEEE Computer, vol.38, no.1: pp.48-55, 2005.
- [2] 高橋徹, 三浦衛, 伊藤康一, 青木孝文: 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, 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J94-D, no.8: pp.1387-1397, 2011.
- [3] Michael D. Grossberg, Harish Peri, Shree K. Nayar, Peter N. Belhumeur: Making one object look like another: controlling appearance using a projector-camera system, In Proceedings of CVPR 2004: pp.452-459, 2004.
- [4] マーク アッシュダウン, 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, 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J90-D, no.8: pp.2115-2125, 2007.
- [5] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.