

# 一般カメラモデルに基づく 超短焦点プロジェクタの投影像幾何補正

原崇之<sup>†1</sup> 長谷川史裕<sup>†1</sup>

超短焦点プロジェクタの投影像のプロジェクタ・カメラシステムによる三次元計測を用いた幾何補正法を提案する。自由曲面ミラーを利用して至近投影を行なう超短焦点プロジェクタの光学系は、従来のピンホールカメラモデルから乖離している。そこで、画素位置に三次元空間中の光線を直接対応付けてモデル化する一般カメラモデルを用いる。超短焦点プロジェクタに一般カメラモデルを適用するために、平面物体と校正済みカメラを用いて校正を行なう。また、カメラの撮影位置に自由度を持たせるため、超短焦点プロジェクタとカメラ間の相対位置・姿勢の自己校正を行なう。実験により、提案手法で校正されたプロジェクタ・カメラシステムによる投影面の三次元計測に基づき、超短焦点プロジェクタの投影像を効果的に補正されることを示す。また、一般カメラモデルを使用することで、従来のピンホールカメラモデルを使用する場合に対して、高い幾何補正精度を実現できることを検証する。

## Geometric Correction for Projected Images of Ultra Short Focus Projector Using General Camera Model

TAKAYUKI HARA<sup>†1</sup> FUMIHIRO HASEGAWA<sup>†1</sup>

This paper presents a geometric correction method for projected images of an ultra-short focus projector (USF Projector), through 3D reconstruction using the projector-camera system. The USF Projector with free form mirrors to achieve close-range projection has camera model properties distinct from the ones of the conventional pinhole camera model. We employ a general camera model which maps a pixel position in the image to a straight line in a 3D space, and apply the model to the USF Projector to calibrate its parameters by using a planar object and a calibrated camera. Moreover, to achieve the high flexibility in the camera position, the self calibration method which estimates the relative position and posture is proposed. Experiments show that the proposed method corrects the projected images of the USF Projector effectively through 3D reconstruction of the projection surface using the calibrated projector-camera system with the general camera model, and achieves higher-accuracy correction than the conventional pinhole camera model.

### 1. はじめに

プロジェクタは大画面表示可能な小型デバイスとして、企業、教育機関、商業施設、公共施設、などで利用されている。近年は、スクリーンの至近から投影可能な超短焦点プロジェクタが開発されている。これは、プロジェクタの設置スペースを小さくし、話者や視聴者が眩しくなく、影が入るといった問題が低減される。しかしながら、投影光の投影面（スクリーン）に対する入射角が大きいため、投影面の表面形状の影響を受けて投影像に歪みが生じやすい。平面度の高い専用のスクリーンを使用することで歪みのない投影像を得られるが、一般的なスクリーンや壁にも歪みなく投影することができれば利便性が向上する。そこで、投影面の形状に応じて投影像の幾何補正を行なう技術が必要とされている。

プロジェクタの投影像幾何補正法として、プロジェクタにカメラを組み合わせたプロジェクタ・カメラシステムを用いた方法が提案されている[1]。この手法では、プロジェクタから校正パターンを投影面に投影し、その投影像をカメラで撮影して投影面の表面形状を三角測量に基づき計測し、投影面の三次元形状に合わせて投影像の幾何補正を行

なうものである。ここで三角測量を行なう際に、プロジェクタとカメラにピンホールカメラモデル[2]を仮定している。しかし、超短焦点プロジェクタの中には、至近投影を実現するために自由曲面ミラーを利用し、ピンホールカメラモデルから乖離した投影光学系を持つものが存在する[3]。このような超短焦点プロジェクタに対して、従来の投影像幾何補正法では高精度な補正が難しい。

本稿では、ピンホールカメラモデルの代わりに一般カメラモデル(General Camera Model)を用いて超短焦点プロジェクタをモデル化し、投影面の三次元形状計測を行なう手法を提案する。得られた投影面の三次元形状に合わせて投影像を幾何補正することで、効果的に歪みが低減されることを実験により検証する。

### 2. 一般カメラモデル

本章では、従来提案された一般カメラモデルについて説明し、超短焦点プロジェクタに適用する際の課題を明らかにする。

#### 2.1 モデルの表現

ピンホールカメラモデルは光線が特定の一点で交差する条件に基づくモデルである。これに対して一般カメラモデ

<sup>†1</sup>(株)リコー  
Ricoh Co., Ltd.  
E-mail: {takayuki.hara, fumihiro.hasegawa}@nts.ricoh.co.jp

ルは、撮像面の個々の画素に対して、三次元空間中の光線に対応付けるモデルである(図1)。光線間に特定の条件を課さないため、広範のカメラに適用することが可能である。プロジェクトとカメラは、光線の進行方向を除いて幾何光学的には同じ構造である。プロジェクトについても、投影画像の画素位置に対して投影光線に対応付けるという形で、同モデルを適用することができる。

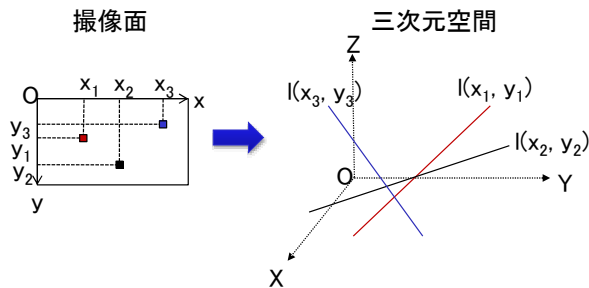


図1 一般カメラモデル  
 Figure 1 General Camera Model.

## 2.2 三次元計測法

三次元空間中の同一点を多視点から撮影することにより、各撮影画像中の撮影点の座標から三次元空間位置を推定することができる。このような三次元計測法の一つとして、光線からの距離の二乗和を最小化するように三次元位置を推定する中点法がある。

$K$  個のカメラで三次元空間中の同一点を撮影し、撮影点の撮影画像上での位置を抽出する。ここで、 $k$  番目のカメラにおける撮影点の撮影画像上の位置を  $m_k (\in R^2)$  とする。校正済みのカメラであれば(校正法は次節で述べる)、撮像面座標  $m_k$  から三次元空間中で対応する光線の単位方向ベクトル  $e_k (\in R^3)$  と、光線上の一点  $p_k (\in R^3)$  が得られる。この時、 $K$  個の光線からの距離の二乗和が最小となる三次元位置  $\hat{M} (\in R^3)$  は次式で与えられる。

$$\hat{M} = \left\{ \sum_{k=1}^K (I - e_k e_k^T) \right\}^{-1} \sum_{k=1}^K (I - e_k e_k^T) p_k \quad (1)$$

これが一般カメラモデルにおける中点法による三次元位置の算出式である。

## 2.3 校正法

上述の三次元計測法を適用するためには、カメラの撮影点の座標  $m_k$  に対して、光線の方向  $e_k$  と、光線上の点  $p_k$  が対応付けられている必要がある。この対応関係を求めることが、一般カメラモデルにおける「校正」である。

Grossberg らは、構造が既知(特徴点の座標が既知)の校正平面を相対位置・姿勢が既知の2つの位置で撮影し、一般カメラモデルを校正する方法を示している[4][5]。これは、

カメラ撮影面上の同じ画素に当たる2つの校正平面上の点の三次元座標を求め、その座標を通る直線として画素に対応する光線を割り当てるものである。

Grossberg らの方法では、校正平面の相対位置が既知であることが必要であるが、これに対して Ramalingam らは、3つ以上の未知の位置の校正平面(構造は既知)を撮影することで一般カメラモデルを校正する方法を示している[6][7]。Ramalingam らはさらに、空間中における光線と点の距離の二乗和を最小化することで校正を行う方法を提案している[8]。

一般カメラモデルの全画素に光線を割り当てると、パラメータ数が膨大となる。また、サブピクセルに対応する光線を得ることができない。これらの問題を解決するために、代表画素に対して光線を割り当て、代表画素間の画素を補間により生成する方法が採られている。Miraldo らは、補間カーネルのパラメータの導出をカメラの校正に含めた方法を提案している[9]。Miraldo らの方法では、撮像面上で近隣の画素に対応する光線の差異は小さい(画素位置に対して光線が滑らかに変化する)という仮定を置き、補間カーネルに RBF(Radial Basis Function)カーネルを用いて校正する。

以上述べたいずれかの校正法を、相対位置・姿勢を固定した2つ以上のカメラに適用することで、2.2節で述べた三次元計測が可能なカメラ系を構築することができる。しかしこのアプローチは、校正後にカメラの相対位置・姿勢が変化する場合や、一つのカメラを使って多視点で撮影する場合には適用できない。この問題の解決策のひとつは、構造が既知の物体を撮影して各カメラの相対位置・姿勢推定する方法である。もうひとつは、構造が既知の物体を使用せずに、自己校正を行う方法である。

二視点における一般カメラモデルの自己校正法として、同一点に当たる光線をブリュッカー座標[10]で表現した際に成り立つ拘束条件を満たす  $6 \times 6$  の行列を導出し、その行列の分解から2つのカメラの相対位置・姿勢を推定する方法が提案されている[11]。これはピンホールカメラモデルのステレオ系における基本行列[2]を、一般カメラモデルのステレオ系に拡張したものと見ることができる。

この一般化された基本行列の分解に基づく自己校正法では、最小化する誤差要素が代数計算上の都合で選ばれており、実際の誤差の発生プロセスに沿ったものではない。そこで Ramalingam らは、一般カメラモデルを複数のピンホールカメラモデルに分解し、再投影誤差の最小化により自己校正を行う方法を提案している[8]。ただし、計算手順が複雑となる問題がある。

## 2.4 超短焦点プロジェクトへの適用課題

超短焦点プロジェクトを一般カメラモデルで扱うために、まず校正方法を確立する必要がある。従来提案された

一般カメラモデルの校正法はカメラに対するものである。プロジェクタは当然のことながら三次元空間中の物体の撮影をすることができないので、補助的にカメラを用いて校正をすることとなる。このように、プロジェクタに対する一般カメラモデルの校正法の確立が、本研究における第一の課題である。

また、カメラでの撮影位置・姿勢に自由度を持たせるためには、投影像の幾何補正時にプロジェクタとカメラの相対位置・姿勢を推定することが必要である。ユーザが幾何補正を行う際に構造が既知の物体を用意するのは利用シーンを限定するため、構造既知の物体が不要な自己校正が望まれる。一般カメラモデルにおける一般化された基本行列の分解による自己校正は、誤差の発生プロセスを考慮していないため精度面で課題が残る。また、ピンホールカメラモデル分解による再投影誤差最小化による自己校正では、計算手順が複雑であり処理時間が増大する問題がある。そこで、プロジェクタの投影像をカメラで撮影する際の誤差を考慮した、簡便で精度の高い自己校正法を確立することを第二の課題とする。

### 3. 超短焦点プロジェクタの校正

本章では、超短焦点プロジェクタの一般カメラモデルを用いた校正法を示す。校正の基本原則として、プロジェクタの同一画素に当たる投影点は三次元空間中で同一直線上に存在する、という制約条件を用いる。そこには「特定の一点で光線が交差する」という条件は含まれず、一般カメラモデルとして校正することが可能である。

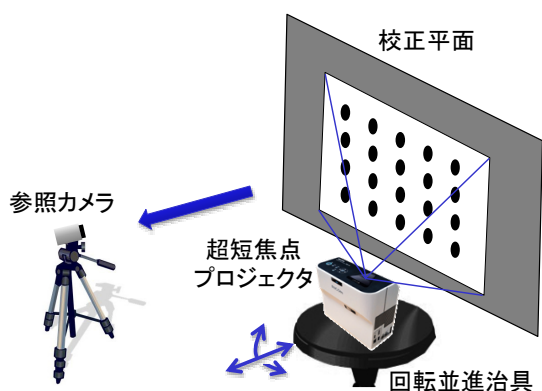


図 2 校正システム

Figure 2 System architecture for calibration.

#### 3.1 システム構成

図 2 に超短焦点プロジェクタの校正システムの構成を示す。校正システムは、超短焦点プロジェクタ、回転並進治具、校正平面、参照カメラから成る。回転並進治具は超短焦点プロジェクタを載せ、校正平面に対して超短焦点プロジェクタを回転・並進させることができる。校正平面は平

面度の高い投影面であり、平面上の特定の 4 点の世界座標が既知であるとする。参照カメラには中心投影型のカメラ（ピンホールカメラモデル）を用いる。参照カメラの内部パラメータ、外部パラメータは未知で良いが、レンズ歪みパラメータは校正されており、レンズ歪みのない画像が撮影できるものとする。

#### 3.2 校正手順

校正は以下の手順で行う。

- (a. 1): 超短焦点プロジェクタから校正平面に向けて校正パターンを投影する。
- (a. 2): 参照カメラで校正平面に投影された校正パターンを撮影する。
- (a. 3): N 回撮影が終われば次ステップへ。そうでなければ、校正平面の位置・姿勢を変えて(a. 1)へ戻る。
- (a. 4): N 枚の撮影画像を校正プログラムに入力し、校正結果を得る (3.3 節で詳述)。

校正パターンは、座標が既知の L 個の特徴点を有した画像である。たとえば、チェッカーパターンや正方格子状に円を並べたパターンを用いることができる。

#### 3.3 校正アルゴリズム

前記撮影した画像から、超短焦点プロジェクタの校正結果を得るまでのアルゴリズムのフローを図 3 に示す。このアルゴリズムを実行する前に、カメラ撮影面の座標から、校正平面の座標への射影変換行列  $H$  を事前に求めておく必要がある。射影変換行列  $H$  は、校正平面の既知の 4 点（校正平面の端点）のカメラ撮影面の座標から求めることができる。以上の事前準備のもと、以下では校正アルゴリズムの各ステップの内容を説明する。

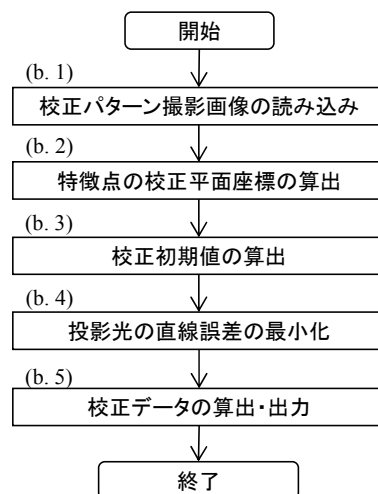


図 3 校正の処理フロー

Figure 3 Flow chart for calibration.

### 3.3.1 校正パターン撮影画像の読み込み(b. 1)

3.2節の手順で生成した校正パターン撮影画像をN枚読み込む。

### 3.3.2 校正パターンの校正平面座標の算出(b. 2)

校正パターン撮影画像から、L個の特徴点の座標を算出する。この特徴点位置を事前準備で求めた射影変換行列Hで校正平面座標に変換する。これにより、N枚の校正平面で、それぞれL個の特徴点の校正平面上の位置が求まる。 $n$ 枚目の校正平面の $l$ 番目の特徴点の校正平面座標値を $\mathbf{m}_l^{(n)} = (m_{l,x}^{(n)}, m_{l,y}^{(n)}, 0)^T$ と記述する。校正平面座標は原点を平面上、第3軸を平面法線方向に設定し、3次元ベクトルで表現する。

### 3.3.3 校正初期値の算出(b. 3)

一般カメラモデルで校正するためのパラメータの初期値を得るため、まずはピンホールカメラモデルの校正法を用いる。具体的には、N枚の校正平面の、L個の特徴点の校正平面上の位置に対して、Zhangの校正法[12]を適用する。これにより、1番目の校正平面に対する $n$ 番目の校正平面の回転行列 $\mathbf{R}^{(n)}$ 、並進行列 $\mathbf{t}^{(n)}$ が求まる。なお、1番目の校正平面上の座標を基準座標とするので、 $\mathbf{R}^{(1)}$ は単位行列、 $\mathbf{t}^{(1)}$ は零ベクトルに値を固定する。

### 3.3.4 投影光の直線誤差の最小化(b. 4)

(b. 3)で求めた回転行列 $\mathbf{R}^{(n)}$ 、並進行列 $\mathbf{t}^{(n)}$ を初期値として、同一投影光線に当たる校正平面上の特徴点の世界座標値について、直線からの誤差の二乗和を最小化するように $\mathbf{R}^{(n)}$ 及び $\mathbf{t}^{(n)}$ を最適化する( $n=1$ は基準座標であるため最適化対象から除く)。定式化すると次の通りである。 $l$ 番目の特徴点に当たる投影光線の単位方向を $\mathbf{e}_l$ 、光線上の一点を $\mathbf{p}_l$ とする。このとき、最小化対象となる評価関数Jは次式となる。

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \|\mathbf{R}^{(n)} \mathbf{m}_l^{(n)} + \mathbf{t}^{(n)} - \mathbf{p}_l\|_{\mathbf{I} - \mathbf{e}_l \mathbf{e}_l^T}^2 \quad (2)$$

ここで、記号 $\|\mathbf{x}\|_Q^2$ は以下の二次形式で定義される。

$$\|\mathbf{x}\|_Q^2 \equiv \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} \quad (3)$$

評価関数Jを、 $\mathbf{R}^{(n)}$ 、 $\mathbf{t}^{(n)}$ 、 $\mathbf{e}_l$ 、 $\mathbf{p}_l$ を変数として最小化する。 $\mathbf{t}^{(n)}$ 、 $\mathbf{e}_l$ 、 $\mathbf{p}_l$ は変数ごとのJに対する極値条件から値を更新する。 $\mathbf{R}^{(n)}$ に関しては非線形の最適化問題となるので、非線形計画法により求解する。

具体的な最適化アルゴリズムは次の通りである。

#### (b. 4-1): 特徴点の世界座標値の算出

各校正平面( $n=2, 3, \dots, N$ )の各特徴点 ( $l=1, 2, \dots, L$ ) の世界

座標値 $\mathbf{M}_l^{(n)}$ を算出する。

$$\mathbf{M}_l^{(n)} \leftarrow \mathbf{R}^{(n)} \mathbf{m}_l^{(n)} + \mathbf{t}^{(n)} \quad (4)$$

#### (b. 4-2): 光線通過位置の更新

各特徴点 ( $l=1, 2, \dots, L$ ) に対して、次式で $\mathbf{p}_l$ を更新する。

$$\mathbf{p}_l \leftarrow \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{M}_l^{(n)} \quad (5)$$

#### (b. 4-3): 光線方向の更新

各特徴点 ( $l=1, 2, \dots, L$ ) に対して次の変動行列を計算する。

$$\mathbf{S}_l \leftarrow \sum_{n=1}^N (\mathbf{M}_l^{(n)} - \mathbf{p}_l)(\mathbf{M}_l^{(n)} - \mathbf{p}_l)^T \quad (6)$$

$\mathbf{S}_l$ を固有値分解し、最大固有値に対応する固有ベクトルを $\mathbf{e}_l$ とする。

#### (b. 4-4): 並進ベクトルの算出

各校正平面( $n=2, 3, \dots, N$ )に対して、次式で $\mathbf{t}^{(n)}$ を更新する。

$$\mathbf{t}^{(n)} \leftarrow - \left\{ \sum_{l=1}^L (\mathbf{I} - \mathbf{e}_l \mathbf{e}_l^T) \right\}^{-1} \sum_{l=1}^L (\mathbf{I} - \mathbf{e}_l \mathbf{e}_l^T) (\mathbf{R}^{(n)} \mathbf{m}_l^{(n)} - \mathbf{p}_l) \quad (7)$$

#### (b. 4-5): 回転行列の算出

上記求めた $\mathbf{e}_l$ 、 $\mathbf{p}_l$ 、 $\mathbf{t}^{(n)}$ を固定し、 $\mathbf{R}^{(n)}$  ( $n=2, 3, \dots, N$ )を変数として、Levenberg-Marquardt法[13]により評価関数Jを最小化する。

#### (b. 4-6): 終了判定

特定回数繰り返せば終了。そうでなければ、B. 4-1に戻る。

### 3.3.5 校正データの算出・出力(B. 5)

(b. 4)で得られた $\mathbf{R}^{(n)}$ 、 $\mathbf{t}^{(n)}$ に対して、(b. 4-1)、(b. 4-2)と同手順で $\mathbf{e}_l$ 、 $\mathbf{p}_l$ を更新し、 $l$ 番目の特徴点に対応する投影光線のパラメータとして出力する。

## 4. プロジェクタ・カメラシステムの自己校正

本章では、超短焦点プロジェクタとカメラの系において、未知構造の物体への校正パターンの投影・撮影により、プロジェクタ-カメラ間の相対位置・姿勢を推定する自己校正法を述べる。

### 4.1 アプローチ

三次元計測のプロセスを考慮すると三次元計測誤差の要因として、超短焦点プロジェクタの校正誤差、カメラの校正誤差、カメラの撮影画像からの特徴点位置の抽出誤差、

が挙げられる。校正は複数の画像を用いることで誤差低減が可能であるが、特徴点抽出は一枚の画像から行う。したがって、校正誤差に対して特徴点位置抽出誤差は相対的に大きいと考えられる。

本研究では、幾何補正に利用するカメラはピンホールカメラモデルで良好に表現できるものを扱う。したがって、カメラに関しては透視投影を扱うことができる。そこで、プロジェクタの光線をカメラの撮像面に投影し、投影された光線と対応する特徴点の抽出位置との距離（特徴点位置抽出誤差）を最小化するようにプロジェクタ-カメラ間の相対位置・姿勢を推定する。

#### 4.2 問題設定

図 4 に示すように、校正パターン上の  $l$  番目の特徴点に対応する光線の単位方向を  $e_l$ （世界座標）、光線上の一点を  $p_l$ （世界座標）、スクリーン上に投影される点の位置を  $M_l$ （世界座標）、その投影点のカメラ画像上の位置を  $m_l$ （カメラ座標）とする。また、世界座標に対するカメラ座標の回転を表す行列を  $R$ 、並進を表すベクトルを  $t$ 、カメラの内部パラメータを  $K$ 、透視投影行列を  $P = K[R | t]$  とする。

一枚の撮像画像中の  $L$  個の特徴点の撮影位置  $\{m_l\}_{l=1}^L$  から  $R$  と  $t$  を推定すること、が扱う問題である。

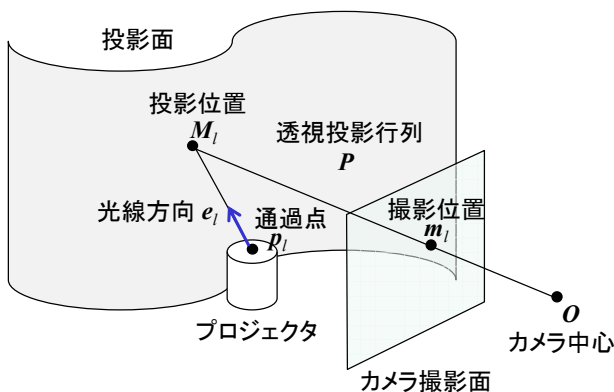


図 4 プロジェクタ，投影面，カメラの位置関係  
 Figure 4 The configuration of the projector, the projection surface and the camera.

#### 4.3 外部パラメータ推定

プロジェクタの投影光線とカメラの撮像点をカメラの撮像面に射影し、カメラの撮像面上で両者の距離（再投影誤差）を最小化するように外部パラメータ  $R, t$  を求める(図 5)。

$p_l$  を通る  $e_l$  方向の直線は、カメラの撮像面において次の直線  $\tilde{m}_l(s)$ （同時座標表現）に変換される。

$$\begin{aligned} \tilde{m}_l(s) &\equiv K[R | t] \begin{pmatrix} e_l^T s + p_l \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= KR e_l s + KR p_l + Kt \end{aligned} \quad (8)$$

これは図 6 に示すように、方向が  $KR e_l$  で点  $KR p_l + Kt$  を通過する直線を示している。この直線（投影光線）とカメラの投影中心  $O$  を通る平面と、撮像面が交差する直線が、投影光線を撮像面へ射影した直線である。投影光線とカメラの投影中心  $O$  を通る平面の法線方向  $n_l$  は、投影光線の方向と通過点の外積として、次のように求まる。

$$n_l = \begin{pmatrix} n_{l,1} \\ n_{l,2} \\ n_{l,3} \end{pmatrix} = (KR e_l) \times (KR p_l + Kt) \quad (9)$$

投影光線を撮像面に射影した直線上の点の（同時）座標を  $\tilde{m} = (x \ y \ z)^T$  とすると、 $n_l$  と直交することから、

$$n_l^T \tilde{m} = 0 \quad (10)$$

である。したがって、 $p_l$  を通る  $e_l$  方向の投影光線の撮像面上( $z=1$ )での  $m_l$  との二乗距離  $d_l^2$  は、

$$d_l^2 = \frac{(n_l^T \tilde{m}_l)^2}{n_{l,1}^2 + n_{l,2}^2} \quad (11)$$

と表せる。ここで、 $\tilde{m}_l = (m_l^T \ 1)^T$  である。この二乗距離の  $L$  個の撮像点  $\{m_l\}_{l=1}^L$  に対する和を評価関数  $J(R, t)$  とする。

$$J(R, t) = \sum_{l=1}^L \frac{(n_l^T \tilde{m}_l)^2}{n_{l,1}^2 + n_{l,2}^2} \quad (12)$$

評価関数  $J(R, t)$  を最小化するように  $R, t$  を求める。評価関数  $J(R, t)$  は  $R, t$  に対して非線形であるため、最適化は非線形計画法により行う。具体的には、 $R$  を三軸の回転角の 3 変数で表現し、 $t$  と合わせて 6 変数とし、Levenberg-Marquardt 法[13]により最適化を行う。

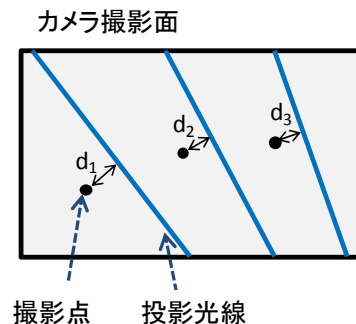


図 5 プロジェクタ投影光と撮像点のカメラ撮像面上における距離誤差

Figure 5 Errors corresponding to the distances between projection rays and captured points in an image plane.

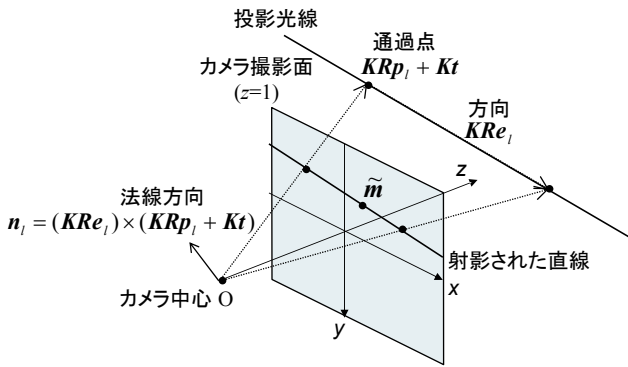


図 6 カメラ撮影面へのプロジェクタ投影光線の射影  
 Figure 6 The projection ray projected to an image plane.

## 5. 投影像幾何補正

本章では、ユーザがプロジェクタの投影像を撮影し、投影像の幾何補正を行うまでのフロー(図 7)を説明する。図 8 に示すよう、超短焦点プロジェクタの投影像を幾何補正用カメラで撮影し、投影面正面に想定する視聴者位置での歪みが低減されるように幾何補正を行う。ここで、幾何補正用カメラの撮影位置と視聴者位置は一致している必要はなく、また超短焦点プロジェクタと幾何補正用カメラの相対位置・姿勢は未知で良い。超短焦点プロジェクタは3章の一般カメラモデルの校正法で、ユーザのカメラはピンホールカメラモデルの校正法[12]で事前に校正されているものとする。以下、各処理ステップを説明する。

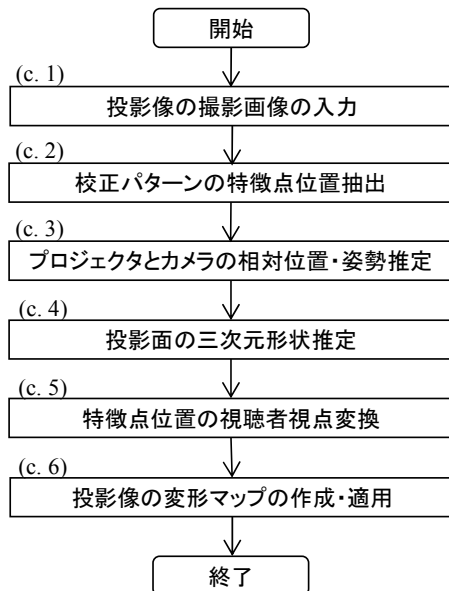


図 7 投影像幾何補正の処理フロー  
 Figure 7 Flow chart for geometric correction.

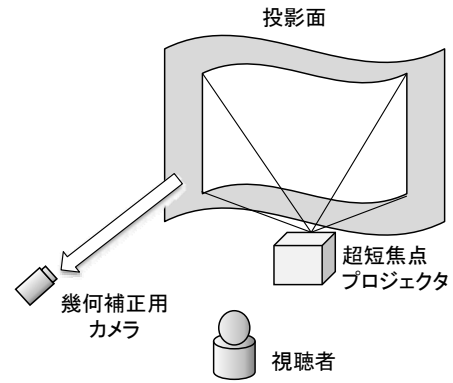


図 8 投影像幾何補正における配置  
 Figure 8 The configuration for geometric correction.

### 5.1 投影像の撮影画像の入力

校正パターンをプロジェクタから投影面に投影し、その投影像をユーザが幾何補正用カメラで撮影する。撮影した画像を幾何補正のシステムに入力する。

### 5.2 校正パターンの特徴点位置抽出

校正パターンから  $L$  個の特徴点の位置  $\{m_i\}_{i=1}^L$  を抽出する。

### 5.3 プロジェクタとカメラの相対位置・姿勢推定

抽出された特徴点位置  $\{m_i\}_{i=1}^L$  から、4章のプロジェクタ・カメラシステムの自己校正法により、プロジェクタとカメラの相対位置・姿勢を推定する。

### 5.4 投影面の三次元形状推定

抽出された特徴点の位置  $\{m_i\}_{i=1}^L$ 、及び推定されたプロジェクタとカメラの相対位置・姿勢を用いて、中点法(2.2節)により投影面上の特徴点の三次元位置  $\{M_i\}_{i=1}^L$  を求める。

### 5.5 特徴点位置の視聴者視点変換

前章まで得られた投影面上の  $L$  個の特徴点の三次元位置  $\{M_i\}_{i=1}^L$  から、視聴者視点での座標値  $\{m_i^{(user)}\}_{i=1}^L$  を求める。まず、 $\{M_i\}_{i=1}^L$  に平面を最小二乗法でフィッティングし、その法線方向に視聴者視点方向を設定する。視聴者の視覚系にピンホールカメラモデルを仮定し、透視投影変換により、特徴点の三次元位置  $\{M_i\}_{i=1}^L$  から視聴者視点での座標値  $\{m_i^{(user)}\}_{i=1}^L$  を求める。

### 5.6 投影像の変形マップの作成・適用

視聴者視点での座標値  $\{m_i^{(user)}\}_{i=1}^L$  からメッシュを構成し、メッシュが正方形になるようにメッシュごとの幾何変形マップを算出する。これは文献[1]における二次元的な対応関係を用いた幾何補正と同様の手順となる。生成した幾何変形マップを投影像に適用し、幾何補正を行う。



図 9 幾何補正例

Figure 9 A sample of geometric correction.

## 6. 幾何補正の評価実験

本章では、提案手法による超短焦点プロジェクタの投影像の幾何補正の実験結果を示す。

### 6.1 実験条件

超短焦点プロジェクタとして Ricoh IPSiO PJ WX4130 (解像度  $1280 \times 800$ ), 校正時の参照カメラに Ricoh GR Digital II (解像度  $3648 \times 2736$ ), 幾何補正用カメラに Apple iPhone4 (解像度  $2592 \times 1936$ ) を用いる。プロジェクタは参照カメラを用いて3章の方法で校正する。校正パターンとして図10の正方格子状に円が並んだパターンを使用し,  $L=63 \times 39$  個の各円の中心を特徴点位置とする。校正ではプロジェクタと参照カメラの相対位置・姿勢を  $N=15$  回変えて校正パターンの投影・撮影を行なった。幾何補正用カメラは, Zhang の校正法[12]により校正を行った。

建物の内壁に対して 60inch でフォーカスの合う設置で超短焦点プロジェクタから校正パターンを投影し, 幾何補正用カメラで撮影して提案手法により幾何補正を行なう。投影面に対する超短焦点プロジェクタの位置・姿勢を 4 回変え, さらに幾何補正用カメラの位置・姿勢を 3 回ずつ変えて, 計 12 試行の幾何補正を行った。

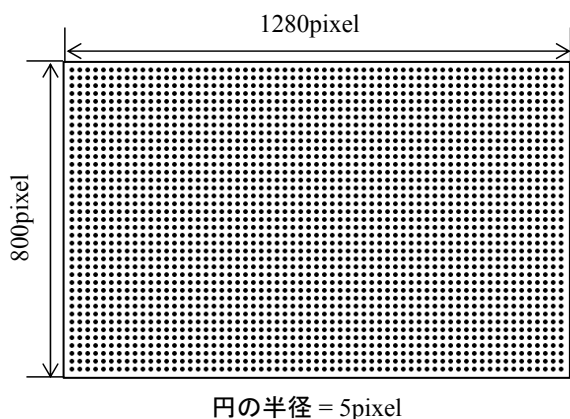


図 10 校正パターン

Figure 10 Calibration pattern.

### 6.2 実験結果・考察

図 9 に校正パターンの投影像を幾何補正用カメラで撮影した画像と, その画像に基づく幾何補正前後の投影像を視聴者位置に設置したカメラで撮影した画像を示す。図より, 補正前は投影像に歪みが存在するが, 補正後では矩形状に補正されていることが視認できる。斜めから撮影した校正パターンから, 正面方向から見た場合の幾何補正ができており, 超短焦点プロジェクタとカメラの相対位置を推定する自己校正法が効果的に働いていることが分かる。従来手法[1]のようにプロジェクタとカメラの位置を固定する必要がなく, ユーザのカメラによる撮影位置の自由度が高く, 利便性が高い。

次に幾何補正精度の定量評価を行なう。図 10 の校正パターンを投影して, 視聴者視点に設置したカメラで撮影し, 円の中心位置を抽出し, 正方格子位置に対する二乗平均平方根誤差(RMSE: Root Mean Square Error)を算出する。抽出位置と正方格子位置は二次元空間におけるスケール変倍, 回転, 並進を補正[14]し, 正方格子の 1 辺の長さを 1 として正規化した上で, RMSE を算出する。また比較のため, ピンホールカメラモデルに基づき Zhang の校正法[12]で超短焦点プロジェクタを校正して幾何補正した場合の RMSE を算出する。ピンホールカメラモデルの自己校正は, 一般カメラモデルによる自己校正結果を初期値として, 並進ベクトルの L2 ノルムを固定した上で式(12)を最小化する。

12 試行に対する RMSE を表 1 に示す。いずれも幾何補正前に比べて幾何補正後では RMSE が小さくなっており, 幾何補正により投影像の歪みが低減されることが分かる。一般カメラモデルを用いることで, いずれの試行でもピンホールカメラモデルに対して幾何補正精度を高めることができる。平均的には, 一般カメラモデルはピンホールカメラモデルに対して RMSE が 17.2%低減されている。この幾何補正精度の差は例えば図 11 (試行 2 の投影像の左下部分) に示すような歪みの差で現れる。投影光線が一点で交差しない超短焦点プロジェクタでも, 一般カメラモデルでモデル化することで, 高精度の幾何補正を実現できる。

表 1 正方格子に対する位置誤差(RMSE)

Table 1 Position Error (RMSE) for square lattice.

試行	補正前	一般 カメラモデル	ピンホール カメラモデル
1	0.547	0.092	0.115
2		0.136	0.146
3		0.089	0.108
4	0.858	0.093	0.117
5		0.096	0.119
6		0.091	0.108
7	0.293	0.099	0.124
8		0.112	0.128
9		0.086	0.102
10	0.873	0.185	0.221
11		0.115	0.139
12		0.078	0.111
平均	0.643	0.106	0.128

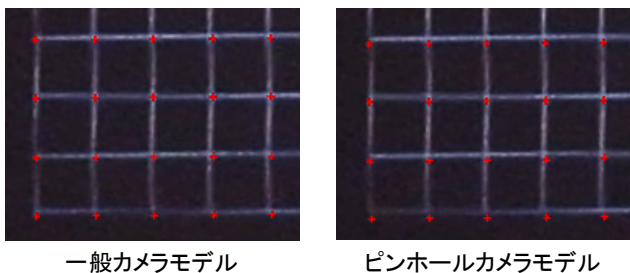


図 11 カメラモデルに対する幾何補正比較. 赤い点が格子点の正解位置.

Figure 11 Comparison of camera models. Red dots are grand truth grid points.

## 7. おわりに

本論文では、超短焦点プロジェクタの投影像をカメラで撮影して投影面の三次元形状を計測し、投影像の幾何補正を行なう手法を提案した。超短焦点プロジェクタを一般カメラモデルでモデル化することで、投影光線が一点で交差しない投影光学系においても投影像の高精度な幾何補正が可能であることを示した。

超短焦点プロジェクタに一般カメラモデルを適用する際の課題として、プロジェクタに対する一般カメラモデルの校正法の確立、自己校正法の高精度・簡便化があった。前者に対しては参照カメラと校正平面を用いて投影光線の直線からの二乗誤差を最小化する方法を用いた。後者については、投影光線をカメラ撮像面に射影した直線と撮像点の距離を最小化することで、解決を図った。

実験により、提案手法は超短焦点プロジェクタの投影像

を効果的に幾何補正できることを示した。また一般カメラモデルはピンホールカメラモデルに対して高精度の補正が可能であることを検証した。

今後の課題として、自己校正時に外部パラメータのみではなく、プロジェクタ及びカメラの内部パラメータも推定することが挙げられる。ユーザの持つ未校正のカメラで幾何補正ができれば利便性が高い。また、超短焦点プロジェクタは投影像のフォーカスは可変であり、その光学系の変化を推定することが必要である。

**謝辞** 有益な討論をいただいた東北大学の青木孝文教授、伊藤康一助教、酒井修二氏、山中佑人氏、川島直揮氏に、謹んで感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] 高橋徹, 沼徳仁, 青木孝文, 近藤敏志: 投影画像の幾何補正に関する実験的検討, 計測自動制御学会東北支部 第 235 回研究集会, No. 235-5, (2007).
- [2] R.I. Hartley and A. Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, Cambridge, (2000).
- [3] 高橋達也, 藤田和弘, 安部一成: 超至近投影光学系の開発, Ricoh Technical Report, No. 38, pp. 15-21, (2012).
- [4] M.D. Grossberg and S.K. Nayar: A General Imaging Model and a Method for Finding Its Parameters, Proc. Eighth IEEE Int'l Conf. Computer Vision, (2001).
- [5] M.D. Grossberg and S.K. Nayar: The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration, Int'l J. Computer Vision, No. 61, pp. 119-137, (2005).
- [6] P. Sturm and S. Ramalingam: A Generic Concept for Camera Calibration, Proc. Eighth European Conf. Computer Vision, (2004).
- [7] S. Ramalingam, P. Sturm, and S.K. Lodha: Towards Complete Generic Camera Calibration, Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, (2005).
- [8] S. Ramalingam, S.K. Lodha, and P. Sturm: A generic structure-from-motion framework, Computer Vision and Image Understanding, No. 103, pp. 218-228, (2006).
- [9] P. Miraldo and H. Araujo: Calibration of Smooth Camera Models, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 35, No. 9, pp. 2091-2103, (2013).
- [10] H. Pottmann and J. Wallner: Computational Line Geometry, Springer, (2001).
- [11] P. Sturm: Multiview geometry for general camera models, Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, USA, pp. 206-212, (2005).
- [12] Z. Zhang: A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, (2000).
- [13] 今野浩, 山下浩: 非線形計画法, 日科技連, (1978).
- [14] B.K.P. Horn, H.M. Hilden, and S. Negahdaripour: Closed-form solution of absolute orientation using orthogonal matrices, Journal of the Optical Society A, Vol. 45 No. 7, pp. 1127-1135, (1988).