

# 大規模空間におけるプロカムシステムの位置合わせの自動化

謝 淳<sup>†</sup> 亀田 能成<sup>§</sup> 鈴木 健嗣<sup>‡</sup> 北原 格<sup>§</sup>

<sup>†</sup> 筑波大学 大学院システム情報工学研究科

<sup>‡</sup> 筑波大学 システム情報系

<sup>§</sup> 筑波大学 計算科学研究センター

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> <sup>§</sup> 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: <sup>†</sup> s1520843@u.tsukuba.ac.jp, <sup>‡</sup> {kameda, kenji, kitahara}@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし 我々は、プロジェクションマッピングとしてイベント、展示会、エンターテイメントなどへの導入が進む映像投影を学校の体育館に導入し、教育活動の支援を目的とした研究に取り組んでいる。大規模空間への投影では、複数台のプロジェクタの画面をつなぎ合わせることで一つの大画面を実現しているが、プロジェクタと投影面の距離が遠いため、レンズ歪みの影響が大きくなり画面の位置合わせの精度が低下するという問題が存在する。従来の映像投影システムでは、手作業位置合わせ作業によりズレを解消しているが、本発表では、プロカムシステムを用いることにより、大規模空間投影システムのレンズ歪みを解消し、位置合わせの自動化を実現する手法を提案する。

キーワード プロカムシステム、位置合わせ、レンズ歪み、大規模空間、体育館

## 1. はじめに

大規模空間における映像投影システムは、大規模投影型拡張現実の基盤となる技術である。大規模投影型拡張現実は、東京駅の“TOKYO STATION VISION”，ミラノ万博日本館の“HARMONY”，リオ五輪の閉会式での“東京大会プレゼンテーション”など様々な場面に導入されている。また、イベントやエンターテイメントの場面に限らず、人間情報学に関するソーシャル・イメージングプロジェクト[1]では、“ミライの体育館”として、映像情報提示手段として用いられている[2]。

大規模空間における映像投影システムの構築の課題の一つが、複数台のプロジェクタで投影される映像を一つの画面に統合することである。理論的には、各プロジェクタ画面に適切な形状補正を施し、投影面の指定領域に投影することで画面統合の実現が可能である。この形状補正は、プロジェクタ平面と投影面との角度による台形歪みと、プロジェクタのレンズによるレンズ歪み両方に起因して発生する。小規模投影では、プロジェクタのレンズ歪みの影響が少ないため無視されるが、大規模投影では、プロジェクタと投影面の距離が遠くなるに伴いレンズ歪みの影響が大きくなるため、映像投影結果の品質が低下する。

従来の大規模空間における投影システムの形状補正では、ユーザが投影結果を確認しながら手動でパラメータを調整する場合がほとんどであるが、作業コストが高いという問題が存在する。本研究では、映像投影用のプロジェクタと投影シーンを観察するカメラを

組み合わせたプロジェクタ・カメラシステム（以下：プロカムシステム）により、投影結果を撮影・解析することで形状補正のパラメータを自動的に求める位置合わせ方法を提案する。

## 2. 関連研究

カメラとプロジェクタの光学系には共にレンズ歪みが存在する。本手法では、まずカメラのレンズ歪みを補正し、続いてプロジェクタのレンズ歪みを補正する。

カメラのレンズ歪みパラメータの推定手法は、大まかに二種類に分類できる。一つ目は Zhang[3]の手法である、この手法は複数の視点から撮影したチェッカーボード画像を用いて簡易に内部パラメータとレンズ歪みパラメータを同時に推定可能であるため、キャリブレーションに多用されるが、チェッカーボード画像を多様な角度から撮影するためにカメラもしくはチェッカーボードを移動させながらの撮影が必要であり、手間を要する。二つ目は Straight lines have to be straight [4]の方法論を用いた手法である。その中で我々は Alvarezら[5]の提案手法を採用する。この手法では、現実世界で直線状の物体を画像中で直線として観測されるためのレンズ歪みパラメータを推定するため、撮影シーンに直線状の物体が存在してさえいれば、歪みパラメータを推定することができる。

プロジェクタのレンズ歪み補正法として、カメラの逆投影モデルを用いて Zhang[3]の手法から派生した方

法が多く提案されている[6][7][8]. しかし, それらの多くでは, カメラのレンズ歪み補正と同様に, プロジェクタもしくはチェッカーボードを動かしながら撮影する必要がある. そこで我々は, プロジェクタレンズ歪みパラメータの推定が自動で行えるようにするため, “Straight lines have to be straight” を活用した補正手法を提案する.

### 3. 大規模空間におけるプロカムシステムの位置合わせ

本節では, 大規模空間における投影システムの位置合わせ作業の軽減を目的とした手法について述べる. 最初に Alvarez ら[5]の方法を用いてカメラのレンズ歪みを補正した後, カメラ歪みのない状態を仮定してプロジェクタの投影像を撮影・分析することによってプロジェクタのレンズ歪みパラメータを推定し補正をする. 最後に, カメラとプロジェクタ両方にレンジ歪みのない状態で, 我々がこれまでに提案した方法[2]を用いて, 投影像の台形歪み補正及び位置合わせを行う.

#### 3.1. カメラのレンズ歪み補正

本節では, Alvarez ら[5]の手法と, それを体育館の天井に設置したカメラに適用する方法について述べる.

カメラレンズ歪みのモデルは式1で表される.  $(x, y)$  は補正前の座標であり,  $(\hat{x}, \hat{y})$  は補正後の座標である.  $r$  は点  $(x, y)$  と歪み中心  $(x_c, y_c)$  との距離を表しており,  $(x_c, y_c)$  はカメラで撮影した画像面の中心に位置する.  $k_1, k_2$  は歪みパラメータである.

$$\begin{cases} (\hat{x} - x_c) = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)(x - x_c) \\ (\hat{y} - y_c) = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)(y - y_c) \end{cases} \quad (1)$$

実世界にある直線  $l$  がカメラ画面への写像に沿って並ぶ一連の点を  $\{(x_{l,i}, y_{l,i})\}$  とし, それを補正した結果を  $\{(\hat{x}_{l,i}, \hat{y}_{l,i})\}$  とする.  $\{(\hat{x}_{l,i}, \hat{y}_{l,i})\}$  の分散共分散行列は式2で表される. ここで,  $\bar{\hat{x}}_{l,i}, \bar{\hat{y}}_{l,i}$  はそれぞれ  $\{\hat{x}_{l,i}\}$  と  $\{\hat{y}_{l,i}\}$  の平均値を表す.

$$\begin{aligned} \hat{S}^l(\mathbf{k}) &= \begin{pmatrix} \hat{S}_{xx}^l & \hat{S}_{xy}^l \\ \hat{S}_{xy}^l & \hat{S}_{yy}^l \end{pmatrix} \\ &\equiv \frac{1}{N_l} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N_l} (\hat{x}_{l,i} - \bar{\hat{x}}_{l,i})^2 & \sum_{i=1}^{N_l} (\hat{x}_{l,i} - \bar{\hat{x}}_{l,i})(\hat{y}_{l,i} - \bar{\hat{y}}_{l,i}) \\ \sum_{i=1}^{N_l} (\hat{x}_{l,i} - \bar{\hat{x}}_{l,i})(\hat{y}_{l,i} - \bar{\hat{y}}_{l,i}) & \sum_{i=1}^{N_l} (\hat{y}_{l,i} - \bar{\hat{y}}_{l,i})^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

Cauchy-Schwarz 不等式によって, 以下の式3が成立することが証明できる. ここで, 全ての  $(\hat{x}_{l,i}, \hat{y}_{l,i})$  が同じ直線上に並んでいる際のみ等号が成り立つ.

$$(\hat{S}_{xy}^l)^2 \leq \hat{S}_{xx}^l \hat{S}_{yy}^l \quad (3)$$

直線  $l$  が画面中に  $N$  本存在する場合, 画面のレンズ歪みの程度は, 式4のエネルギー関数で表される.

$$\hat{E}(k_1, k_2) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (\hat{S}_{xx}^l \hat{S}_{yy}^l - (\hat{S}_{xy}^l)^2) \quad (4)$$

$\hat{E}(k_1, k_2)$  の値はレンズ歪みの程度が小さいほど減少し, 歪みのない場合に0になる. Alvarez ら[3]が提案した代数アプローチを用いて  $\hat{E}(k_1, k_2)$  の最小化問題を解決することによって, 最適な  $k_1, k_2$  を推定することができる.

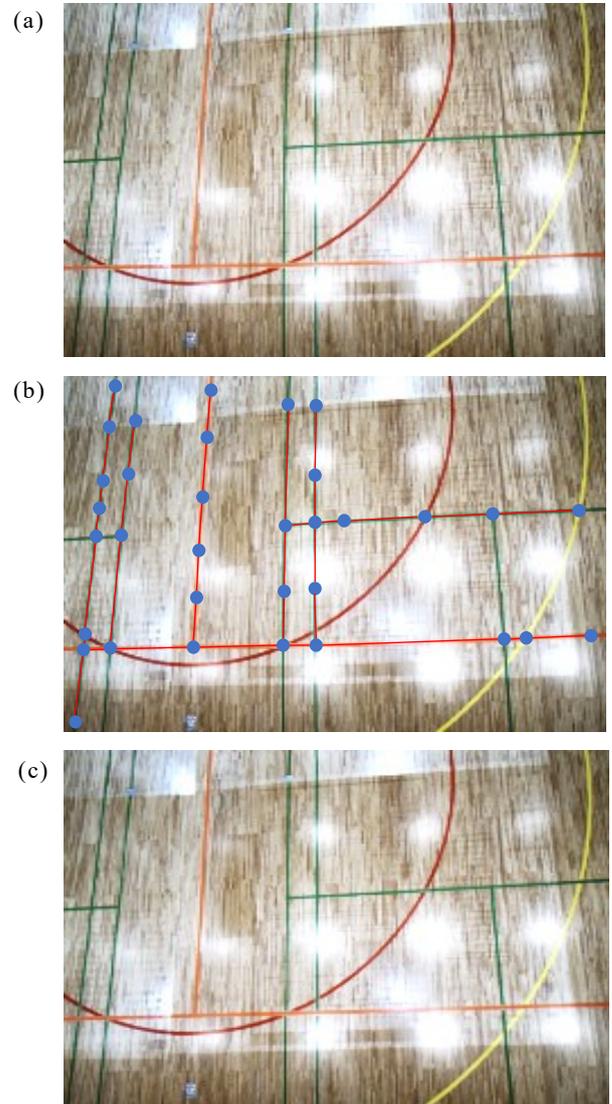


図1 カメラのレンズ歪み補正. (a):体育館の床を撮影した元画像. (b):直線のコートラインに沿って入力したサンプル点 (青). (c):補正結果

体育館において実用化する際に、カメラは天井から床に向けて撮影するため、図 1 (a)のように画面中に床で引かれているコートラインが複数存在する。図 1 (b)のように画面において各直線のラインを沿ってマウスを使って幾つかの点をサンプルとして入力するだけで歪みパラメータが推定可能である。推定した歪みパラメータを用いて補正を行った結果は図 1(c)に示すとおりである。

床にコートラインなどが無い場合、又は更に手間を省きたい場合には、ラインレーザーを用いて床に線を提示しながらカメラで床面を撮影し、画像処理によって線の自動検出とサンプル点の獲得処理を行うことも可能である。

### 3.2. プロジェクタのレンズ歪み補正

本節では、レンジ歪み補正済みのカメラを用い、プロジェクタのレンズ歪みパラメータを推定する手法について述べる。

プロジェクタの光学系は、カメラの逆投影モデルと見なすことが可能であり、レンズ歪みモデルも、式 1 によってカメラと同様に考えることができる。投影面においてレンズ歪みの無い画面を獲得するためには、図 2 に示すように、事前に元画像をレンズ歪みと逆になるような歪みを与えれば良い (pre-warp)。ここでは、この逆歪みのパラメータ  $k_1, k_2$  の推定手法について述べる。

#### 3.2.1. レンズ歪み中心の推定

大規模空間に映像を投影するプロジェクタは、レンズシフト機能によってレンズ歪み中心が投影画面の中心座標と一致しないケースがあるため、まずはプロジェクタの歪み中心  $(x_c, y_c)$  を推定する必要がある。

レンズ歪みモデルから、歪み中心を通過する横線は縦方向に歪まず、同様に歪み中心を通過する縦線は横方向に歪まないことが分かる。即ち、歪み中心を通過する横線、縦線の投影結果は、カメラから観測しても直線となる。図 3 にこの性質を利用した歪み中心の推定手法を示す。まずは縦線を一本だけ投影し、画面の左から右へ移動させながらカメラで撮影する。その際、カメラ画面において線の上のサンプル点の分散共分散行列

$$S^l = \begin{pmatrix} S_{xx}^l & S_{xy}^l \\ S_{xy}^l & S_{yy}^l \end{pmatrix}$$

から計算したエネルギー関数

$$E_l = S_{xx}^l S_{yy}^l - (S_{xy}^l)^2$$

の値が最小値を取るときの線の  $x$  座標を  $x_c$  とし、同様に横線を投影することで  $y_c$  を推定する。ただし、この手法は歪み中心がプロジェクタ画面の内部に位置することを前提としている。

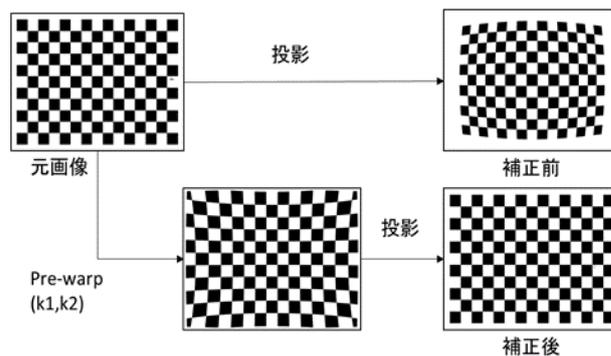


図 2 逆のレンズ歪みを加えた映像を投影・撮影することでカメラのレンズ歪みを補正

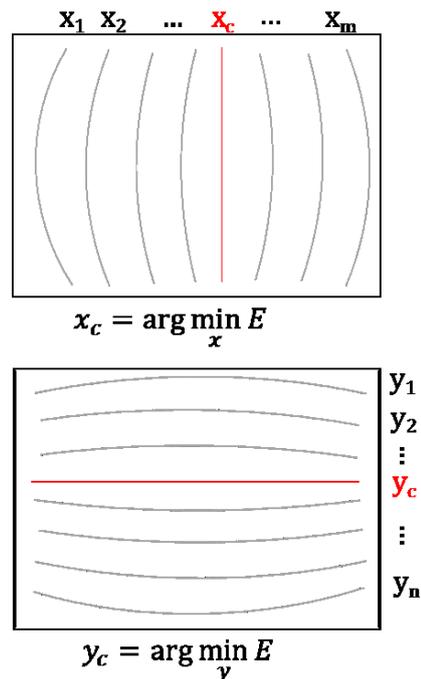


図 3 レンズ歪み中心位置の推定。最も直線的に観測された横線と縦線の交点位置をレンズ歪み中心とする

#### 3.2.2. レンズ歪みパラメータの推定

プロジェクタで直線を含んでいるパターン画像を投影し、キャリブレーション済みのカメラを用いて投影像を撮影する。カメラで撮影した画像からパターン中の直線を検出し、カメラの場合と同じく式 3 で表さ

れるエネルギー関数を用いて検出した線の歪み算出し、それらを最小化する値として $k_1, k_2$ を求める。

プロジェクタの光軸と投影結果を撮影するカメラの光軸が一致しないため、観測パターンは2次元射影変換が施され、エネルギー関数のパラメータが10個に増加してしまう。Alvarezら[5]が使用している代数アプローチは2変数以上の場合に適用不可であるため、我々は、焼きなまし法[9]を用いて $\hat{E}$ の値を最小にする $k_1, k_2$ の値を探索する。

s

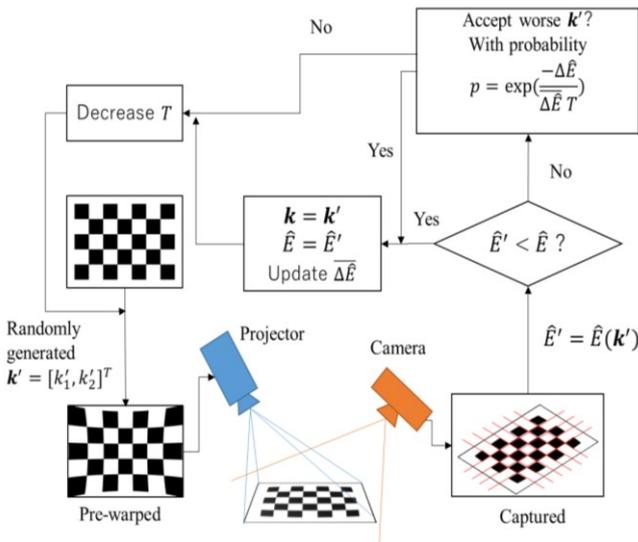


図4 焼きなまし法を用いたプロジェクタレンズ歪みパラメータの最適化

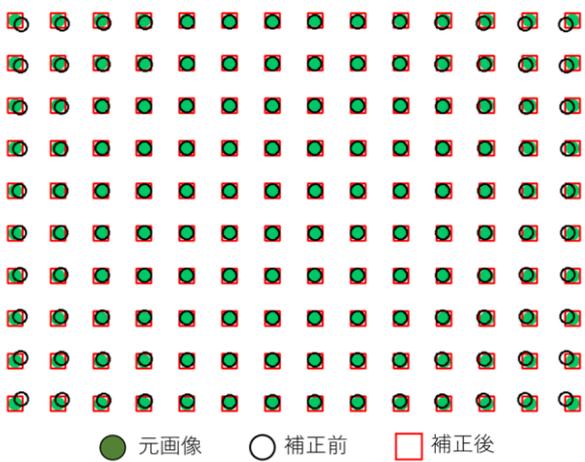


図5 レンズ歪み補正の結果

具体的な処理手順を図4に示す。まず、ランダムに生成した状態 $k'$ を用いてチェッカーボード画像を歪ませ、歪ませた画像の投影像をカメラで撮影する。カメラ画像においてチェッカーボードのコーナーピクセルを検出し、同じ直線上に並ぶコーナーピクセル座標

を式3に適用しエネルギー $\hat{E}'$ を計算する。 $\hat{E}'$ が現状のエネルギーより低下する場合には状態 $k'$ に遷移し、そうでない場合には確率 $p = \exp(-\Delta\hat{E}/\Delta\hat{E} T)$ で $k'$ に遷移する。最後に $T$ を減少させ、収束するまでループを繰り返す。焼きなまし法を使用することで、検出誤差によって生じる局所解に陥ることが回避できる。図5に、元画像、補正前画像と補正後画像のコーナーピクセル位置を重ねて表示したシミュレーション実験の結果を示す。

### 3.3. 台形歪み補正

一般的な大規模投影システムでは、プロジェクタが投影面と正対していないため、投影像は台形に歪む。本節では、我々が提案した体育館の床面投影システムで採用した歪み補正処理[2]について述べる。

台形歪み補正は、プロジェクタ平面から投影面(床面)への射影変換の逆変換を予めプロジェクタバッファに掛けることによって行われる。その際、プロジェクタ平面と投影面との間のホモグラフィ行列 $H_{pf}$ が必要となる。図6に示されるように、 $H_{pf}$ はプロジェクタとカメラの間のホモグラフィ行列 $H_{pc}$ と、カメラと投影面との間のホモグラフィ行列 $H_{cf}$ の積によって求まる。

図7は、体育館現場においてキャリブレーションする際に使用する画像の一例を示す。図7(a)はプロカムシステムのカメラで撮影した床面の様子である。床面にあるコートラインの交差部分の投影面座標は事前に計測することで決定される。これらの投影面座標とそれぞれがカメラ画面中で観察された座標の対応関係が4組以上あれば、 $H_{cf}$ が計算可能である。図7(b)は同じカメラで撮影した同システムのプロジェクタで投影したチェッカーボードパターンである。チェッカーボードのコーナーピクセルの投影画像上の座標とそれらがカメラ画面中で検出された座標の対応関係から、 $H_{pc}$ を計算することが可能である。

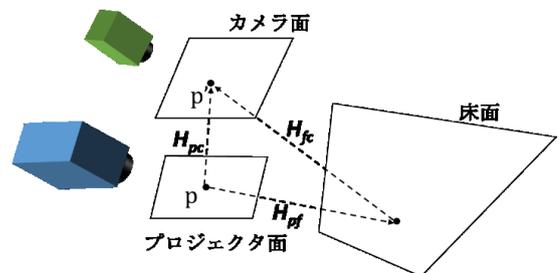


図6 投影面を介したホモグラフィ変換行列 $H_{pf}$ の推定

我々が構築した体育館投影システムではプロカムシステムを4セット使用している。投影面座標系は各プロカムシステムにとって共通するため、各プロジェ

クタの投影領域に応じて適切に投影パツファを分割し、対応プロカムシステムのホモグラフィ  $H_{pr}$  の逆変換を施すことで、床面上で一つの大画面を構成する。図 8 は、体育館投影システムの投影結果を示す。

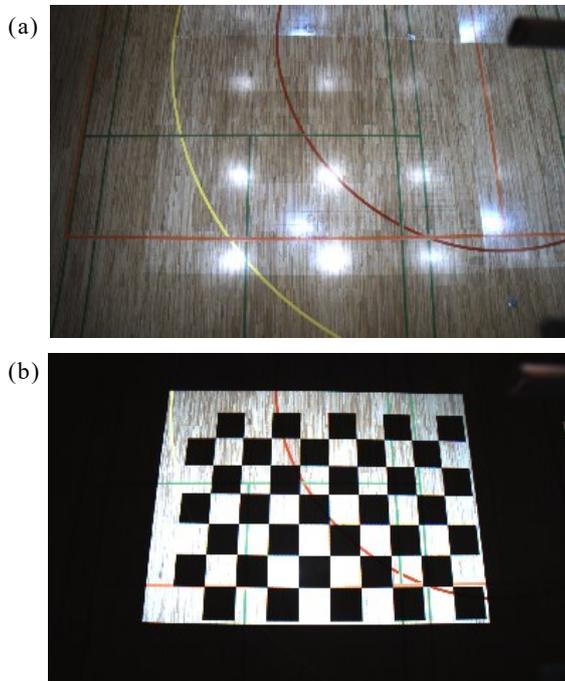


図 7 (a):プロカムシステムで撮影した床面の様子. (b):同システムで撮影したチェッカーボード画像の投影

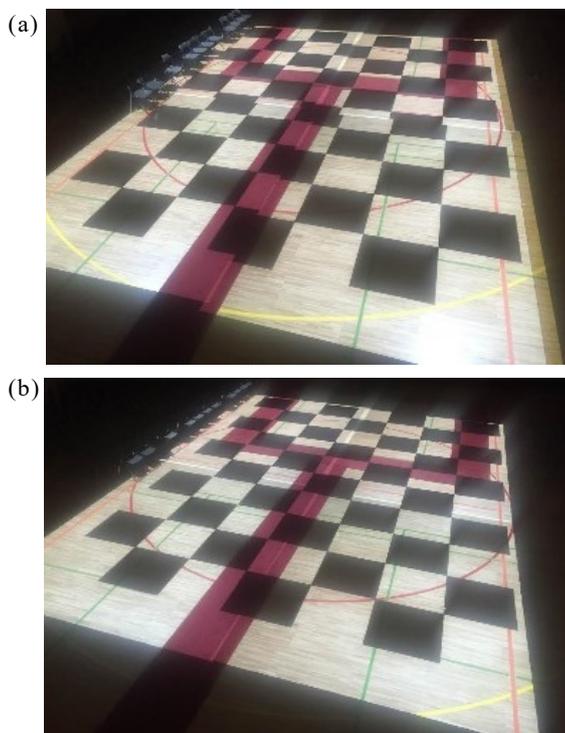


図 8 体育館投影システムの投影結果. (a):台形歪み補正前. (b):台形歪み補正後.

#### 4. まとめ

大規模空間における投影システムの一合わせ手法を提案した。“Straight lines have to be straight”を活用することで、手作業を省くことに成功した。

本研究は、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST)における研究領域「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」の研究課題「ソーシャル・イメージング：創造的活動促進と社会性形成支援」により行ったものである。

#### 文 献

- [1] 鈴木健嗣, 北原格, “社会性形成を支援するソーシャルイメージング技術,” 信学技報, vol.114, no.351, pp.23-26, Nov. 2014.
- [2] 謝淳, 亀田能成, 北原格, 大田友一, 鈴木健嗣, “大規模空間における Interactive Projection Mapping システム,” 電子情報通信学会 HCG シンポジウム論文集, pp.283-286, Dec. 2015.
- [3] Zhang, Zhengyou. "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.22, no.11, pp.1330-1334, Nov. 2000.
- [4] Devernay F, Faugeras O. “Straight lines have to be straight,” Machine vision and applications, vol.13, no.1, pp.14-24. Aug, 2001.
- [5] Alvarez L, Gómez L, Sendra J R. “An algebraic approach to lens distortion by line rectification”. Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol.35, no.1, pp.36-50, Sep. 2009.
- [6] Martynov I, Kamarainen J K, Lensu L. “Projector calibration by ‘inverse camera calibration,’” Scandinavian Conference on Image Analysis. Springer Berlin Heidelberg, vol.6688, pp.536-544. 2011.
- [7] Legarda-Sa R, Bothe T, Ju W P. “Accurate procedure for the calibration of a structured light system,” Optical Engineering, vol.43, no.2, pp.464-471, Feb. 2004.
- [8] Fu X, Wang Z, Kawasaki H, et al. “Calibration of Projector with Fixed Pattern and Large Distortion Lens in a Structured Light System,” MVA, pp.222-225. 2013.
- [9] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. “Optimization by simulated annealing,” science, vol.220, no.4598 pp.671-680, 1983.