

携帯プロジェクタのための 映像キャリブレーションの一手法

琢磨直広^{†1}

岡谷貴之^{†1}

出口光一郎^{†1}

本稿では、携帯プロジェクタのためのプロジェクタカメラシステムの校正法を述べる。システムは、プロジェクタの他、一台のカメラおよび平面スクリーン（投影面）からなる。校正の目的は、携帯プロジェクタを手で持って動かしたとき、その位置・姿勢によらずスクリーン上では常に正しく正規化された画像が投影されるようにすることである。そのためには、スクリーンとカメラの幾何学的関係を知る必要があり、その推定が校正の実体である。提案する校正法は、スクリーン上に人工的なマーカの設置を要せず、プロジェクタを手で動かしながら自然画像を投影する間に、自動的にこの関係を推定する。校正後、画像を高速に補正する方法も述べる。

A Calibration Method for a Image Projection by a Mobile Projector

NAOHIRO TAKUMA,^{†1} TAKAYUKI OKATANI^{†1}
and KOICHIRO DEGUCHI^{†1}

This paper presents a method for calibrating a projector-camera system that is specially targeted at the use with a mobile projector. The system consists of the projector, a stationary camera and a planar screen surface onto which images are projected. The goal of the calibration is to make it possible that the image projected from a hand-held mobile projector be always correctly rectified regardless of the pose of the projector. To do this, it is necessary to estimate the geometric relation between the screen surface and the camera, which is the purpose of the calibration. The proposed method can automatically perform this, while a natural image is projected from the projector moved in an arbitrary manner by a hand; it does not require fiducials on the screen surface. We also present a method for rectifying the projected image in real time after the calibration.

^{†1} 東北大学大学院情報科学研究科
仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01
Email:takuma@fractal.is.tohoku.ac.jp



(a) 携帯プロジェクタ. (b) プロジェクタ搭載型携帯電話.

1. はじめに

プロジェクタとカメラを組み合わせることでプロジェクタからの投影画像を制御するシステムはプロジェクタカメラシステムと呼ばれ、広く研究されている¹⁾⁻³⁾。このシステムでは、プロジェクタによって投影された画像をカメラによって撮影し、得られた画像から抽出した情報をプロジェクタ側にフィードバックする。これによって例えば投影面上での投影像が望みのものになるように制御することができる。実際に投影した時の見えにおける幾何学的な変形の補正⁴⁾、プロジェクタの出力特性などによる輝度変化の補正³⁾、また複数のプロジェクタを用いて行われる画像の高解像度化などの手段として用いられている⁵⁾。

近年、映像プロジェクタの小型化が急速に進み、携帯可能なプロジェクタが各メーカーから発売されている。さらに、携帯電話等のモバイル情報端末へのプロジェクタ機能の搭載が検討されている（図1）。これらの携帯プロジェクタは他の多くの映像表示機器と異なり、映像を表示する位置やその大きさを自由に換えられるという特性を持つ。映像を表示する面は、あらかじめ用意されたものである必要はなく、例えば壁面や地面といった日常生活で目にする物体への映像表示が可能となる。さらにこの映像を上述のプロジェクタカメラシステム等を用いて制御することで複合現実感を実現するなど、新たなアプリケーションが期待される。

プロジェクタカメラシステムを用いた研究では、システムの校正が主な課題の1つである。本稿では携帯プロジェクタを用いて投影面に表示されている画像を望みの形状に補正で

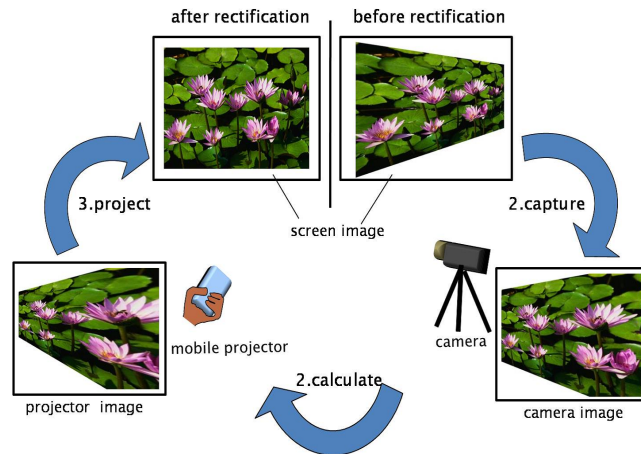


図2 投影画像のフィードバック制御

きるようにするプロジェクタカメラシステムのための校正を考える(図2)。本研究で対象とする補正とは、投影された画像の幾何学的な歪みに関するものであり、補正後の画像は投影面上に正しいアスペクト比の長方形の領域に表示されることを目標とする。固定された投影面(平面とする)と固定カメラ1台、そして運動する携帯プロジェクタ1台のみを用いることで実現するため、事前の特別な準備や、投影面上への特殊な仕掛けを必要としない手軽な校正が可能となる。校正の手順は以下の通りである。

1. 投影する面が撮影できるようにカメラを配置する。
 2. 携帯プロジェクタを用いて画像を投影し、そのまま携帯プロジェクタを自由に運動させる。すると投影像の変化をカメラがとらえて、自動的に校正を行う。
 3. 校正完了後はプロジェクタをどのように動かしても画像は正しく補正され続ける。
- ここで、校正とは投影面とカメラの間における位置関係を表すパラメータを得ることであり、補正とはプロジェクタの運動によって変化するパラメータを得ることに相当する。校正を行う最も直接的な手段として、投影面上に座標が既知であるマーカーを設置して撮影することで、カメラ画像座標と投影面の座標を対応付ける手法がある。しかし本研究ではそのようなマーカーを用いずに、投影面を自由に選んで簡単に校正を行う方法を用いる。また、補正についても細工のない自然画像のみを投影することで行えるようにした。

2. プロジェクタ-カメラシステムによる校正

本節では、まずプロジェクタとスクリーンとの関係について考える。プロジェクタでスクリーン上に画像を投影したとき、プロジェクタ画像上の座標 $[u_1, u_2]^T$ の点は(1)式のようにスクリーン座標 $X = [X, Y, Z]^T$ の点に投影される。

$$\alpha \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

このとき透視投影行列 \mathbf{P} はプロジェクタにおける焦点距離や画像中心、アスペクト比などによって決定される 3×3 の正方行列である内部パラメータ \mathbf{K} とプロジェクタ座標とワールド座標の位置関係によって決定される外部パラメータであり、 3×3 の回転行列 \mathbf{R} と 3×1 の平行移動ベクトル \mathbf{t} によって式(2)のように表される。

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \quad (2)$$

ここで、対象となるスクリーンが空間上のある平面上にあるとすると、その平面をワールド座標系の $Z = 0$ として、その平面上の点 $[X, Y, 0]$ とプロジェクタ画像上の点 $[u_1, u_2]$ が対応しているとする。このとき、式(1)、(2)より式(3)を得る。

$$\alpha \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3次元の正規直交ベクトル $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ を用いて $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3]$ とすると、式(3)は式(4)と表せる。

$$\alpha \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{H} = \mathbf{K}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3]$ とおく。 \mathbf{H} はホモグラフィ行列といい、 \mathbf{H} を用いると式(4)

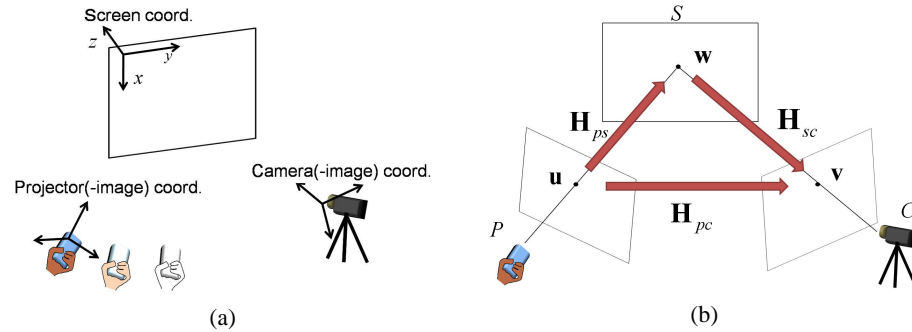


図 3 (a) 各座標系の設定 . (b) 各平面間におけるホモグラフィ行列 .

は式 (5) と表すことができる .

$$\alpha \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

画像中で同一平面上の点は同じホモグラフィによって空間から画像面に投影される . ホモグラフィ行列は 3×3 の正方行列であるため , 9 自由度があるが , スケール倍の不定性があるので自由度は 8 となる .

次に , 実際のプロジェクタカメラシステムを考える . 先述の通り我々の扱うプロジェクタカメラシステムとは平面のスクリーン , 1 台の固定カメラ , そして 1 台の移動可能な携帯プロジェクタで構成されており , それぞれについて 3 次元の座標系を設定する (図 3(a)) . プロジェクタ画像上の点を \mathbf{u} とし , カメラ画像上でそれが対応する点を \mathbf{v} , スクリーン上で同様に対応する点を \mathbf{w} とし , プロジェクタ画像上からスクリーン上への変換ホモグラフィを \mathbf{H}_{ps} , スクリーン上からカメラ画像上を \mathbf{H}_{sc} , プロジェクタ画像上からカメラ画像上を \mathbf{H}_{pc} とすると (図 3(b)) \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} のそれぞれの点の関係はスケール倍も考慮して以下の式で表される .

$$\mathbf{w} \propto \mathbf{H}_{ps} \mathbf{u} \quad (6)$$

$$\mathbf{v} \propto \mathbf{H}_{sc} \mathbf{w} \quad (7)$$

$$\mathbf{u} \propto \mathbf{H}_{pc} \mathbf{v} \quad (8)$$

式 (6) , (7) , (8) より各ホモグラフィ間の関係は以下ようになる .

$$\mathbf{H}_{ps} \propto \mathbf{H}_{sc}^{-1} \mathbf{H}_{pc} \quad (9)$$

ホモグラフィ行列 \mathbf{H}_{ps} については [4] で次のように 3 つの 3×3 の行列に分解されることが分かっている .

$$\mathbf{H}_{ps} \propto \mathbf{T}_p \mathbf{R}_p \mathbf{K}_p^{-1} \quad (10)$$

ここで \mathbf{T}_p はスクリーン座標系でのプロジェクタの位置を $[x_p, y_p, z_p]$ としたときに次式の形に拘束される .

$$\mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} z_p & 0 & x_p \\ 0 & z_p & y_p \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

また , \mathbf{R}_p はプロジェクタ座標系からスクリーン座標系への回転に関する変換行列であり , \mathbf{K}_p はプロジェクタの内部パラメータを含む行列である .

3. \mathbf{H}_{sc} 算出の必要性

本研究で用いるプロジェクタ-カメラシステムの校正では , スクリーンとカメラ間のホモグラフィ \mathbf{H}_{sc} を取得することが鍵となることを本節で述べる . まず , スクリーン上の投影像を目的の形に補正することは , プロジェクタからの出力画像を直接操作することのみ実現できる . そこでプロジェクタとスクリーン間のホモグラフィ \mathbf{H}_{ps} を求めることが必要となるがこれを直接求めることは叶わない . 一方でプロジェクタとカメラ間のホモグラフィ \mathbf{H}_{pc} については , 投影している画像と撮影した画像の間において 4 箇所以上の対応点を見つけることで計算可能であり , 移動し続ける携帯プロジェクタのどの位置においても常に求めることができる . \mathbf{H}_{ps} と \mathbf{H}_{pc} は式 (10) の関係をもつので , スクリーンとカメラ間のホモグラフィ \mathbf{H}_{sc} が算出できればよい .

\mathbf{H}_{sc} については , マーカーなどをスクリーン上に設置して座標既知の点をつくることでカメラ画像との対応から直接的に求めることができる . しかしこの手法では応用できるアプリケーションの幅を大きく制限することになる .

4. マーカーを使わない校正法

スクリーン上に座標既知の点がない場合でも \mathbf{H}_{sc} を決定できる手法が 5) に提案されている . しかしここではプロジェクタの内部パラメータに関しては全て既知であるとしている . 本研究ではこれと同じ考え方を用いてプロジェクタとカメラの画像のみを用いて \mathbf{H}_{sc} を計

算する。5)では複数得られる H_{pc} に左からある行列 H をかけた時、その結果の行列の QR 分解 (QR 分解の直交行列と上三角行列の順序を入れ替えたもの) が式 (11) の形をもつかどうかで行列 H を推定している。

$$HH_{pc} \rightarrow TRK^{-1} \quad (12)$$

式 (9), (10) からわかる通り、この H は今求めたい H_{sc} の逆行列に相当するものである。しかしながら、このようにして求めた H_{sc} は不定性を持つ。それは適当な分解 T, R, K^{-1} が決まったとき、それらに左からある行列 S をかけると、別の正当な分解 T', R', K'^{-1} になるということである。すなわち、

$$STRK^{-1} \rightarrow T'R'K'^{-1} \quad (13)$$

行列 S は、

$$S = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & s_{13} \\ \sin \theta & \cos \theta & s_{23} \\ 0 & 0 & s_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

であって、この形に限られる⁵⁾。この不定性は、スクリーン平面上に任意の直交座標系を取る自由度に対応しており、当然決まらない自由度であり、像の回転に関する自由度を除いて、カメラの視野などを基準に H_{sc} のパラメータを拘束することで決めることができる。

もしプロジェクタの内部パラメータが全て未知なら H_{sc} を求めることはできないが、一部が既知の場合 (正確には焦点距離のみ既知の場合) は H_{sc} を求めることができる。6)では複数台のプロジェクタを用いてこれを算出している。実用上重要なのは、プロジェクタの焦点距離が未知で、運動に伴って変化する場合であるのでこれを求められることは大いに意味がある。しかしながら、部分的にのみ校正されたプロジェクタを扱う際には閉形式のアルゴリズムでは H_{sc} を計算することができない。よって本研究では部分的のみ校正された状況でバンドルアジャストメントに基づく非線形最適化を行うことで各パラメータを推定する。

5. バンドルアジャストメント

本研究で用いたバンドルアジャストメントを述べる。あるプロジェクタ画像上において i 番目の特徴点を u_{pi} とし、それに対応するカメラ画像上での対応点を v_{pi} とする。またその画像内の特徴点全点から推定したホモグラフィを用いて計算した、カメラ画像上での対応点を \hat{v}_{pi} とすると、

$$\hat{v}_{pi} \propto H_{sc} H_{ps} u_{pi} = H_{sc} T_p R_p K_p^{-1} u_{pi} \quad (15)$$

また H_{pc} に関するパラメータで構成されるベクトル x を用いて再投影誤差 $E_p(x)$ について次式が成り立つ

$$E_p(x) = \sum_{i=1}^n (\tilde{v}_{pi} - \hat{v}_{pi})^2 \quad (16)$$

さらに、 m 組分の再投影誤差の合計 $E_{1:m}(x)$ については

$$E_{1:m}(x) = \sum_{p=1}^m E_p(x) \quad (17)$$

バンドルアジャストメントでは、この再投影誤差を最小化するパラメータ x が解となる。最小化の数値計算にはレベンバーグマーカート法を用いた。

6. H_{pc} の算出

本節ではプロジェクタカメラ間のホモグラフィ H_{pc} の算出方法について述べる。既に述べたように H_{pc} はプロジェクタ画像とカメラ画像の間で対応付けを行うことで計算できる。その手法の一つとして局所記述子によって得られる特徴ベクトルを用いて画像を表現し、その特徴ベクトル同士を比較することで画像間対応をとるものがある。代表的なものとして SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)⁷⁾ があり、これの高速化版として SURF (Speeded Up Robust Features)⁸⁾ などが提案されている。SURF を用いることで H_{pc} を直接求めることができる。

H_{pc} は常に変動するプロジェクタの位置に影響を受ける値であるため、逐一算出できなければならない。特に校正後のリアルタイム補正では連続な画像の描画が求められるため、 H_{pc} は高速に算出しなければならない。そのためには SURF のように、色も形状も異なるプロジェクタ画像とカメラ画像の間で直接対応をとるのは難しい。よって本研究ではまず SURF で得られた H_{pc} を用いて校正を行い、その後のリアルタイム補正ではカメラ画像間の対応付けのみで H_{pc} を更新することとした。例えば (図 4) のようにカメラ画像 C_1 がカメラ画像 C_2 に変化した場合、変化後の対応 H_{pc2} は変化前の対応 H_{pc1} とカメラ画像間の射影変換行列 H_{c1c2} を用いて次式であらわせる。

$$H_{pc2} = H_{c1c2} H_{pc1} \quad (18)$$

この手法では時間の経過とともにパラメータが真値からずれることが想定されるもの的高速な計算が可能になる。

カメラ画像間比較の手法には KLT 法が有用である^{9),10)}。KLT 法は局所領域における各点の動きは同一であると仮定し、弛緩法により目的関数を最小化する手法である。KLT 法で

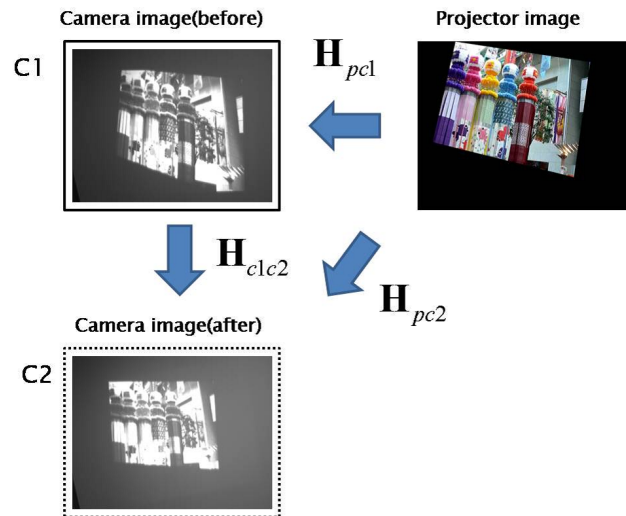


図4 カメラ画像間比較による H_{pc} の更新

は微小時間における領域は平行移動のみしかせず、照明の変化による輝度値の変化はない、という仮定の下で移動先を推定し、高速な対応付けを可能としている。まとめると、校正から補正に至る一連の流れは以下ようになる。

1. まずプロジェクタの運動に伴い得られ続けるプロジェクタ画像とカメラ画像の組を全て SURF で対応付けて H_{pc} を複数求め、 H_{sc} を推定してシステムを校正をする。

2. 校正後は投影画像をリアルタイムで補正する。その際は KLT 法を用いたカメラ画像間の比較で高速に得られるカメラ間ホモグラフィを最初の H_{pc} に次々かけていくことでのみ最新 H_{pc} へと更新する。

これによりユーザーはただプロジェクタを動かしているだけで、常にスクリーン上で補正された画像を見ることができる。

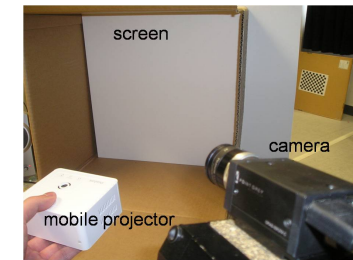
7. 実験

7.1 実験に用いたシステム

実験で使用した携帯プロジェクタは Oculon 社製のプロジェクタ XPro920 (図 5(a)) で解



(a)



(b)

図5 (a) 使用した携帯プロジェクタ。(b) 実験風景。



(a)



(b)

図6 (a) モデル画像1。(b) モデル画像2。

像度は 640×480 、カメラは POINT GREY RESEARCH 社製の GRAS-03K2M-C で解像度は 640×480 でフレームレートは 120 枚/秒とし、投影するプロジェクタ画像の解像度は 640×480 である (図 6)。また室内の壁面を平面スクリーンと見立てて (図 5(b)) のように配置した。

7.2 実験結果

プロジェクタが異なる 2 つの姿勢をとった時についてそのカメラ画像を取得し、それらとモデル画像との対応付けから得られた H_{pc} の情報を元に H_{sc} を推定して補正結果をスクリーン上に表示した (図 7)。また、プロジェクタの位置姿勢に関わらず、補正した投影像の形状を維持することを行った (図 8)。

7.3 評価

校正によるスクリーン上の投影像を正しいアスペクト比の正しい長方形への補正、また校正後のリアルタイム補正について評価するための実験を行った。校正に関してはまずスクリー

表 1 モデル画像 1 における $\cos \theta$ の評価

	平均 (average)	分散 (deviation)
カメラ 1	3.502×10^{-2}	5.436×10^{-5}
カメラ 2	3.024×10^{-2}	1.955×10^{-4}
カメラ 3	4.825×10^{-2}	5.518×10^{-4}

表 2 モデル画像 2 における $\cos \theta$ の評価

	平均 (average)	分散 (deviation)
カメラ 1	4.695×10^{-2}	3.482×10^{-4}
カメラ 2	4.212×10^{-2}	1.462×10^{-4}
カメラ 3	1.012×10^{-1}	2.521×10^{-3}

表 3 モデル画像 1 における L の評価

	平均 (average)	分散 (deviation)
カメラ 1	1.026	7.14×10^{-5}
カメラ 2	1.030	2.67×10^{-4}
カメラ 3	1.057	8.71×10^{-5}

表 4 モデル画像 2 における L の評価

	平均 (average)	分散 (deviation)
カメラ 1	1.027	3.48×10^{-4}
カメラ 2	1.036	1.46×10^{-4}
カメラ 3	1.084	2.52×10^{-3}

ン上に座標を既知とするマーカーを設置し、これを使って正しい H'_{sc} を推定する。次に、実験で補正された画像のカメラ画像をこの H'_{sc} の逆行列で変換することで実際にスクリーン上で見えているであろう画像を得る。この画像における 4 頂点の位置から各角の直角度合いとアスペクト比を計算することで補正結果を評価する。

画像の縦と横を a, b を定義すると角度とアスペクト比は次式で評価できる

$$\cos \theta = \frac{a \cdot b}{|a||b|} \quad (19)$$

$$L = \frac{640|b|}{480|a|} \quad (20)$$

ここで得られた $\cos \theta$ の値の 0 からのずれにより直角度合いを、 L の値の 1 からのずれによりアスペクト比を評価する。また各辺について同様に計算することで画像の補正結果を評価



図 7 補正前 (左) と補正後 (右)

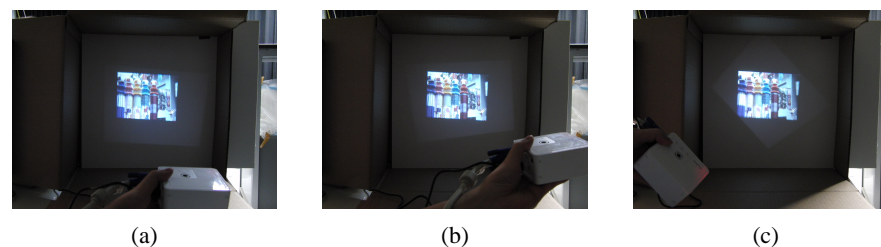


図 8 (a)1 フレーム目 . (b)5 フレーム目 . (c)100 フレーム目 .

する。

カメラ位置を適当に 3 パターン変え、プロジェクタをランダムに動かして 10 回ずつ H_{sc} を求めた後、それを評価した。以下に 4 つの角 θ の平均の $\cos \theta$ とアスペクト比を評価する L について平均と分散を示した (表 1 - 表 4)。

7.4 結果の考察

評価結果について考察する。

1. 校正に基づく最初の補正については、角度についてはどのカメラ位置においても概ね補正できていた。しかしモデル画像 2 においては角度、アスペクト比ともにモデル画像 1 よりも誤差が大きく、不安定であった。またカメラ 3 においては他より誤差が大きく、安定していない。

2. リアルタイム補正については、補正形状の維持に関しては概ね成功した。カメラ画像間比較による誤差の蓄積の影響が危惧されていたが、1 フレーム目と 100 フレーム目の比較 (図 8) で見る限り、その影響は少ないと言える。これはカメラ画像間の対応が非常に正確に取れていたことによるものと考えられる。しかし画像の出力速度に関しては秒間 8 枚程

度と不十分であり、画像が完全に静止しているように見せることはできなかった。

今回用いた2枚の画像の違いは検出できた特徴点の数である。 H_{sc} は H_{pc} を元に計算されるため、 H_{pc} 計算の際の特徴点対応の数や精度が補正に影響したと考えられる。またカメラの位置にも影響されるようで、スクリーンとカメラの角度が過ぎ過ぎる(カメラ3の配置がそうであったため)と誤差が大きくなってしまいう結果となった。これについても、カメラ画像上で像が圧縮されて写り特徴点対応がうまくとれなかったことが原因であると考えられる。結果、補正精度はカメラの位置、モデル画像の有する特徴点数に影響を受けることがわかった。カメラの位置の問題についてはバンドルアジャストメントに基づいた非線形最適化手法にて精度の向上が見込めると考える。KLT法を用いたリアルタイム補正に関しては、抽出する特徴点を増やせば精度の向上と同時に計算速度が低下してしまうため、改善が必要がある。

8. まとめと今後の課題

本研究では、携帯プロジェクタのための映像の校正法を示した。これを使うとマーカーなどの特別な仕掛けをスクリーン上に施さずに、自由に動かせる携帯プロジェクタから画像を投影することのみで投影画像を正しいアスペクト比の長方形に補正することができる。これは H_{ps} が特別な行列の分解に拘束されていることを利用している。また校正後はプロジェクタをどのように動かしてもその投影画像を補正し続けることができる。これについてはカメラ画像とプロジェクタ画像の対応を逐一取得することで可能となるが、今回はカメラ画像間での対応付けを利用することにより高速化を図った。今後の課題を述べる。まず、校正についてはカメラの位置によって結果が左右されたりと不安定であった。これはスクリーンとカメラ間の対応が正確にとることができなかったためである。これについては、非線形最適化を行うことで精度の向上が図れるものと考えられる。また、 H_{pc} そのものの値自体を正確に取得する手法も考える必要もある。補正後の投影画像の維持についてはプロジェクタ出力画像の計算・提示速度が不十分であったため、投影画像を完全に静止して見せることは叶わなかった。これまでに画像のレンダリングをGPUで行うなど計算速度の向上に努めてきたが、さらなる工夫が必要である。今回は静止画のみの投影を考えたが、動画の補正を行ったり、カメラが固定されていることを条件としない、という方法の実装を目指す。

参考文献

- 1) Rasker, R. van Baar, J., Beardsley, P., Willwacher, T., Rao, S., Forlines, C.: iLamps: Geometrically aware and self-configuring projectors. In: Proc. ACM SIGGRAPH.(2003)
- 2) Rehg, J.M., Flagg, M., Cham, T.J., Sukthankar, R., Sukthankar, G.: Projected light displays using visual feedback. In: Proc. International Conference on Control, Automation, Robotics

- and Vision. (2002)
- 3) Johnson, T., Fuch, H.: Real-time projector tracking on complex geometry using ordinal imagery. In: Proc. CVPR. (2007) 1-8
- 4) Rasker, R., Beardsley, P.: A self correcting projector. In: Proc. CVPR.(2001) 626-631
- 5) Okatani, T., Deguchi, K.: Autocalibration of an ad hoc construction of multiprojector display. In: Proc. PROCAMS. (2006) 1-4
- 6) Okatani, T., Deguchi, K.: Autocalibration of a projector-camera system. IEEE Trans. PAMI27(12) (2005) 1845-1855
- 7) D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints" In *International Journal of Computer Vision*, pages.91-110, (2004)
- 8) H. Bay, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "SURF: Speeded Up Robust Features", Proc. of the 9th European Conference on Computer Vision, May 2006. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision* (2001)
- 9) B. D. Lucas and T. Kanade. An iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, Proc. In *7th International Conference on Artificial Intelligence*, pages.674-679 (1981)
- 10) C. Tomasi and T. Kanade. Detection and Tracking of Point Features, Technical Report, CMU-CS-. 91-132(1991)