ピクセルマップ更新による動的な投影ずれ補償

笠谷 昇平[1,a)]　天野 敏之[1,b)]　大槻 正樹[2,c)]

概要：プロジェクタとカメラで構成されるプロジェクタカメラ系を用いた空間型拡張現実感では，較正によって求められたキャプチャ画像と投影画像の画素対応（ピクセルマップ）に基づき，投影画像の幾何学補償を行う．しかし，投影対象の位置が変化するとピクセルマップと実際の射影との間にズレが生じ，投影画像にアーチファクトパターンが生成される．本研究ではこのアーチファクトに着目し，エピポーラ拘束に基づき，投影画像とキャプチャ画像間のオプティカルフローを求めることにより，ピクセルマップを適応的に更新する幾何学較正方法を提案する．

キーワード：空間型拡張現実感，プロジェクタカメラ系，幾何学較正，アーチファクト

Adaptive geometrical compensation of projection image by update the pixel map

Shouhei Kasaya[1,a)]　Toshiyuki Amano[1,b)]　Masaki Ohtsuki[2,c)]

Abstract: The Spatial Augmented Reality using the projector and camera system enables the geometrical compensation of the projection image based on the pixel correspondence (pixel map) between a capture image and a projection image obtained by the calibration. However, an artifact pattern is generated by a projection image because of a disparity between the pixel map and a physical projection when the projection is changed.

In this paper, we propose the geometrical calibration method that update the pixel map adaptively. The idea is it uses the artifact pattern, and calculates the optical flow between a projection image and a capture image based on epipolar constraint.

Keywords: Spatial Augmented Reality , Projector camera system , Geometrical calibration , Artifact

1. はじめに

近年，現実世界に対して情報を付加させる拡張現実感（AR:Augmented Reality）の研究が盛んに行われている．特に，プロジェクションマッピングのように現実空間に直接働きかける空間型拡張現実感 (SAR:Spatial Augmented Reality) の分野は注目を集めている．

SAR の研究の 1 つにプロジェクタとカメラから構成されるプロジェクタカメラ系を用いて実世界上の物体に対して，その見かけを変化させる見かけの操作 [5] が提案されている．一方，プロジェクタの小型化が進んでおり，デジタルカメラやスマートフォンなどに表示デバイスとしてプロジェクターが搭載されている製品も市場に登場している．これらのことより，モバイルデバイスでの SAR の応用が現実的なシナリオとなりつつある．

モバイルデバイスでの SAR の実用を考慮すると，投影物と投影対象の位置関係が常に変化している状態が想定される．一般的に，プロジェクタカメラ系では意図する投影を実現するために，事前の幾何学較正により投影像 P の画素からの投影が撮像画像 C 上のどの画素で撮影されるかという対応関係を示す $P2C$ マップを求める．しかし，プロジェクタとカメラを個別に配置した系では，投影対象との距離や姿勢の変化によって実際の幾何学的な関係と $P2C$

1　和歌山大学システム工学部
　〒 640–8441 和歌山県栄谷 930
2　株式会社ニコン映像カンパニー開発本部
　〒 140–8601 東京都品川区西大井 1–6–3
a)　s151011@center.wakayama-u.ac.jp
b)　amano@sys.wakayama-u.ac.jp
c)　Masaki.Ohtsuki@nikon.com

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

マップに齟齬が発生する．そのため，投影対象の位置や姿勢が変化するたびに，幾何学較正やレジストレーションを必要とし，そのままでは動的なシーンへの適用ができないという問題がある．また，カメラとプロジェクタの状態をリアルタイムで繰り返し反映するフィードバック系の処理においてその齟齬が発生した場合，フィードバックが破綻することによって縞模様状の投影パターン（以降，アーチファクトという）が発生し意図する処理が適用できなくなる．しかし，このアーチファクトは，実際の幾何学的な関係と $P2C$ マップとの齟齬を知るうえで有用な情報となる．

そこで，本論文では，このアーチファクトを利用し，投影像と撮影画像の比較から推定される $P2C$ マップのずれ変化量を用いた幾何学較正方法を提案する．

2. 関連研究

プロジェクタとカメラの幾何学較正方法として，Johnson ら [1] や Audet ら [2] は適応的な幾何学較正手法を提案している．これらの方法により，投影対象の形状が既知であるか，もしくは平面物体に対して限定するなどの条件下では実現可能である．しかし，モバイルデバイスへの応用では，様々な対象への適用が想定される．

また， $P2C$ マップに齟齬が発生するという観点での解決方法としては，プロジェクタとカメラをプレート型ビームスプリッタにより分光する方法があり，3D シーンに対する動的な光学補償 [3]，熱画像の可視化 [4]，高速なプロジェクションマッピング [6] および見かけの操作 [5] で用いられている．

ビームスプリッタにより分光する方法では装置の光学系は複雑になるものの，投影対象によらず光学的に画素対応は不変となるため動的な幾何学較正は不要となる．しかし，こちらはモバイルデバイスへの適用を考えると，サイズ，光学系の費用ともに大きな問題となる．

以上を踏まえ，本研究では見かけの制御のモバイルデバイスへの実用の観点から，プロジェクタとカメラが非同軸であり，この際に形状の情報をあらかじめ必要としない投影像の動的なずれ補償手法を行う新たな方法について考える．

3. アーチファクト

3.1 見かけの操作

見かけの制御 [7] はユーザによって与えられる画像処理によって実際の物体の見かけを動的に変化させる技術である．具体的には図 1 に示されるプロジェクタとカメラによるフィードバック系で構成され，色彩やガンマなどの補正が施されたキャプチャ画像 C と投影画像 P から，白色照明下での見かけ C_{est} を推定する．その後，ユーザにより定義される画像処理を施して目標画像 R を生成し，モデル予測制御 (MPC) によって P を調整することで連続的に現実

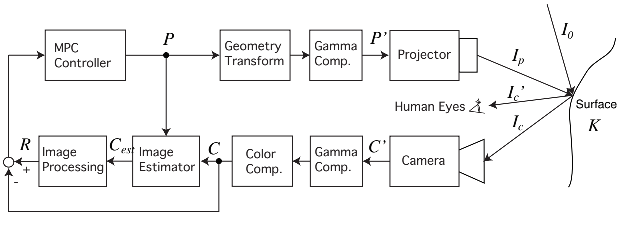


図 1 プロジェクタカメラフィードバック系 [7]

Fig. 1 Projector camera feedback system. [7]

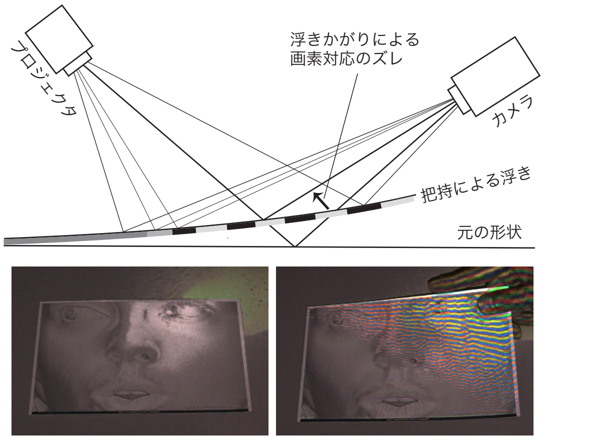


図 2 画素対応のずれによるアーチファクト

Fig. 2 Artifact by the disparity of pixel corresponding.

上段のように印刷媒体が浮き上がると画素対応に齟齬が生じてフィードバックが破綻する．下段は白黒化の見かけの制御を行った結果であり，左のように P2C マップに齟齬がない場合は意図する制御ができるが，フィードバックが破綻すると右のように波状のアーチファクトが発生する．

世界の見かけを操作する．

3.2 アーチファクトのメカニズム

アーチファクトは，図 2 に示すようにプロジェクタとカメラとの間の画素対応関係を示す $P2C$ マップと実際のカメラとプロジェクタの位置関係に齟齬が生じた際に発生する．このようなアーチファクトは本来は意図しない制御結果であるが，この投影像のコントラストは強く，P と C の対応画素を求める特徴として有用である．そこで，本研究ではこのアーチファクトを手がかりとして $P2C$ マップを修正し，オンラインで幾何学較正を行う方法を提案する．

4. 提案手法

提案手法では，まず図 3 に示すように，アーチファクトが発生した状態において，プロジェクタからの投影画像とカメラのキャプチャ画像の比較を容易にするために明度の正規化を行う．これは，投影画像とキャプチャ画像に色彩や明度にずれがあるうえに，キャプチャ画像は投影対象のテクスチャに影響されるためである．そして，明度正規化後に投影画像の座標系をピクセルマップ (P2C) によりカメラ画像の座標系に変換し，カメラ画像の座標系においてアーチファクトのマッチングを行うことで，現状の画素対

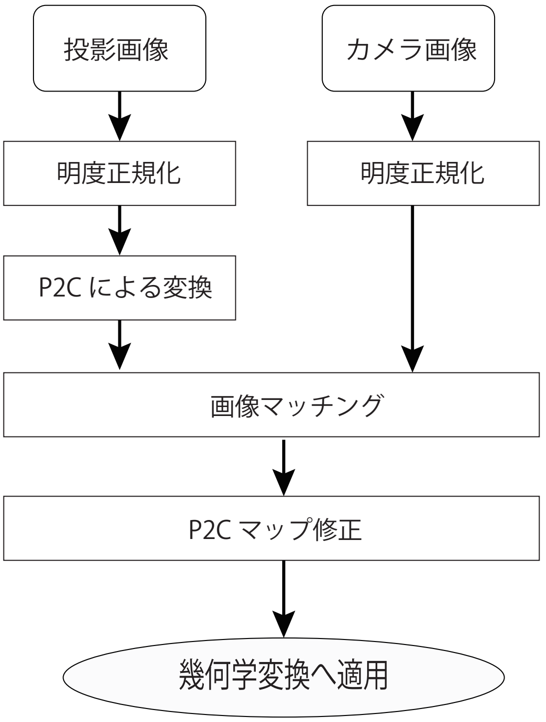


図 3　提案手法の処理フロー
Fig. 3　Processing flow of proposed method.

応と較正時に取得した $P2C$ マップとの変化量を推定し，$P2C$ マップを修正する．これをプロジェクタカメラフィードバックへ反映させることで投影像のずれ補償を実現する．

以下に，これらの処理のうち投影画像と撮影画像の正規化，画像マッチングについて詳細を述べる．

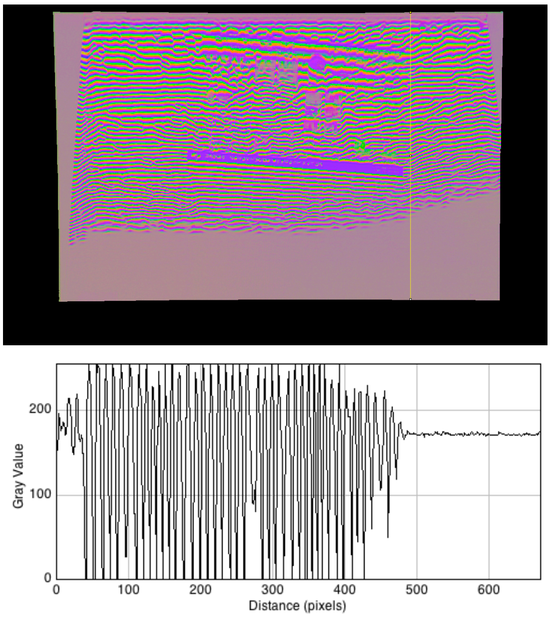
4.1　投影画像と撮影画像の明度正規化

プロジェクタからの投影画像とカメラキャプチャ画像には，サイズと明度の違いがある．カメラキャプチャ画像の明度を C プロジェクタ画像を P，反射率を A，プロジェクタとカメラの色味を調整する色混合行列を V 環境照明を F とする場合 Fujii ら [3] により (1) 式のような関係が示されている．

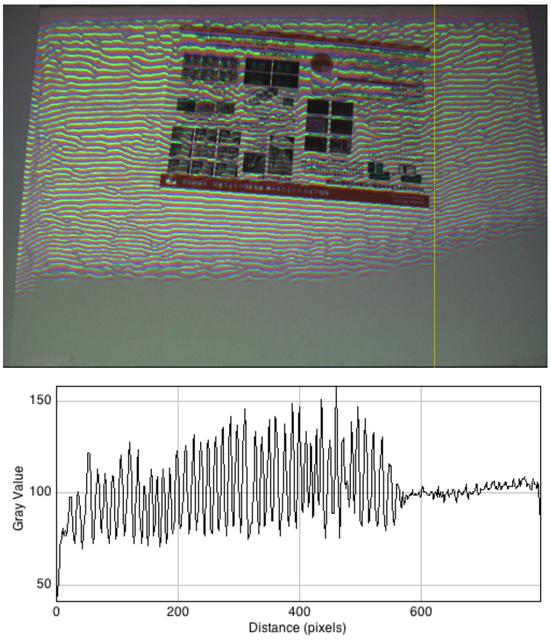
$$C = A(F + VP) \tag{1}$$

これはすなわち，カメラとプロジェクタの色空間の違いだけでなく C は F の変化や，投影する対象によって変化するため，P と C の色彩や明度は画像の部分毎に異なることを示す．

図 4 に投影画像とカメラキャプチャ画像を示す．画像の下に示したグラフは画像に示した黄色い線上の明度変化であり，投影画像とカメラキャプチャ画像の線は幾何学的に対応している．これらのグラフからわかるように，輝度分布は大きく異なるため，そのまま対応する点を探索すると誤った対応付けがなされるおそれがある．そのため，図 5 に示すように，明度の上限 I_{sup} と下限 I_{inf} を求め，



(a) Projection image.



(b) Captured image

図 4　アーチファクト発生時の投影画像とキャプチャ画像
Fig. 4　Projection image and capture image when the artifact appeared.

$$I' = 255\frac{(I(x) - I_{inf}(x))}{(I_{sup}(x) - I_{inf}(x))} \tag{2}$$

として画像の明度を正規化する．カラー画像の場合は，R,G,B のチャネルごとに同様の処理を適用する．I' が明度正規化後の画素値とし，注目画素を中心として，上限と下限を得るために適切な半径 r のウィンドウにおいて最大値と最小値を求めて注目画素における I_{sup} と I_{inf} とする．ただし，アーチファクトが発生していない部分を除外するため $I_{sup} - I_{inf}$ が閾値 th 以下の場合を 0 とした．

図 6 に $th = 30$ としたときの処理結果を示す．画像の下

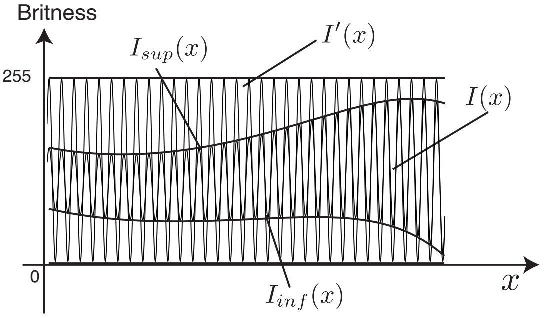


図 5　sup と inf による明度正規化
Fig. 5　Intensity normalization by sup and inf.

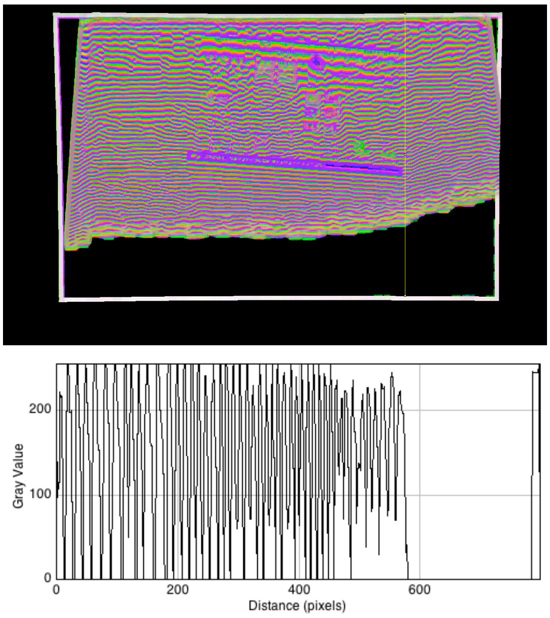
に示したグラフは投影画像とキャプチャ画像の明度正規化の結果において，対応する縦ライン (図中の黄色い線) について明度の変化をグラフに表したものである．図 4 に示したグラフと比較するとキャプチャ画像の明度変化は投影画像の分布と近くなっており，正確な対応付けが期待できる．この正規化の後，現在システムが保持しているピクセルマップ ($P2C$) を用いて投影画像の座標系をキャプチャ画像の座標系へ変換し，投影画像とキャプチャ画像においてアーチファクトの対応関係を求めた．

4.2　画像マッチング

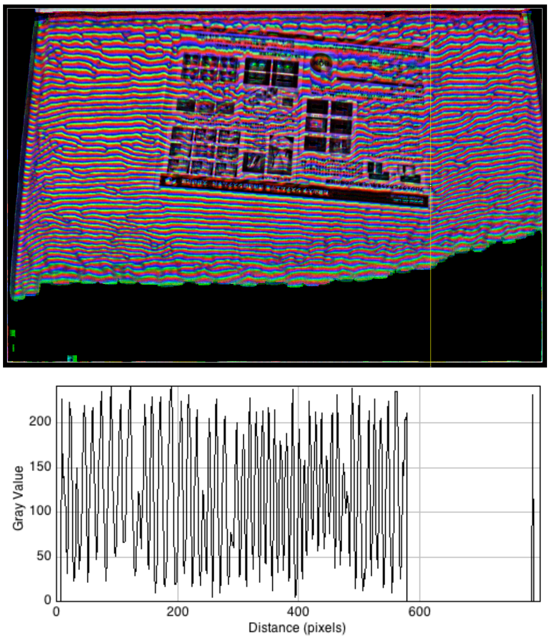
投影画像とキャプチャ画像において発生するアーチファクトは $P2C$ マップとの齟齬により発生するが，このズレは微小である．そのため，SIFT や SURF のように離れた位置であっても特徴量が類似する点を探索する方法は適切ではない．そのため，本研究ではオプティカルフローを応用してアーチファクトのズレを検出する．オプティカルフローの抽出方法には勾配法，特徴点ベース，ブロックマッチング等のさまざまな方法があるが，今回は Lucus-Kanade アルゴリズム [8] を用いた．

5.　実験

カメラとプロジェクタを水平に設置し，斜面に対してキャリブレーションを行う (図 7)．その後，斜面を平面に戻す．アーチファクトが観測後プロジェクタ投影画像とカメラキャプチャ画像をそれぞれ取得し，明度正規化，画像マッチングを行った．明度正規化の閾値は $th = 30$，上限と下限を得るために適切なウィンドウ半径を $r = 10$ とし，マッチングには，OpenCV ライブラリの cvCalcOpticalFlowLK を使用し，空間領域の範囲 $n \times n$ pixel は 15×15 として求める．また実験装置において，カメラは，解像度 1624 × 1224(Point Grey Research Grasshopper GRAS-20S4C-C)，プロジェクタは，解像度 1280 × 800(EPSON EB-W12) を用いた．またスクリーンには，反射率が一様な白色拡散反射面を用いた．



(a) Normalized result of the projection image.



(b) Normalized result of the captured image.

図 6　キャプチャ画像と投影画像
Fig. 6　A captured image and a projection image.

5.1　オプティカルフローの検出結果

明度正規化を行い，投影画像をキャプチャ画像の座標系に変換した後に，投影画像とキャプチャ画像のアーチファクトについてオプティカルフローを検出した結果を図 8 に示す．本実験では，カメラはプロジェクタの上方に傾きなく設置されている．そのため，エピポーラ拘束を考えると検出されるフローの検出方向は縦軸方向のみに限定されるはずである．しかし，実際に観測されたフローは横軸方向にも検出されており，幾何学的には正しくない対応が検出された．

© 2014 Information Processing Society of Japan

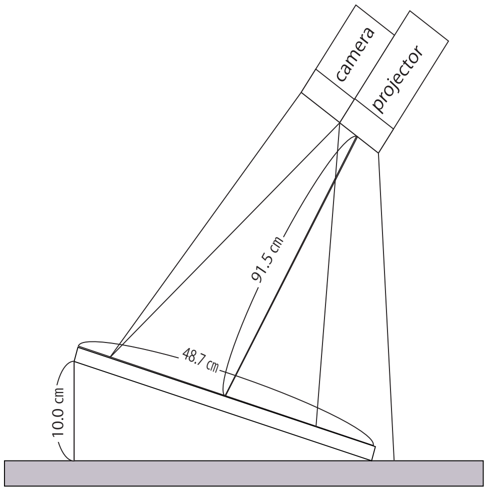
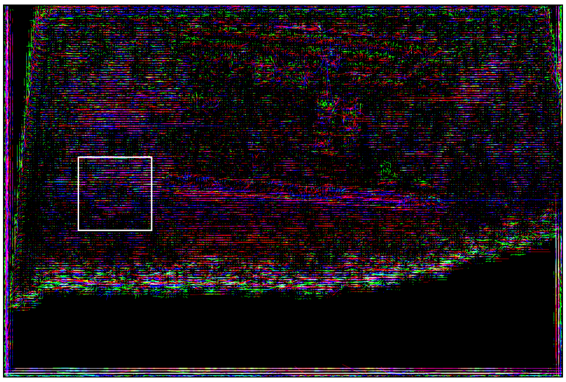
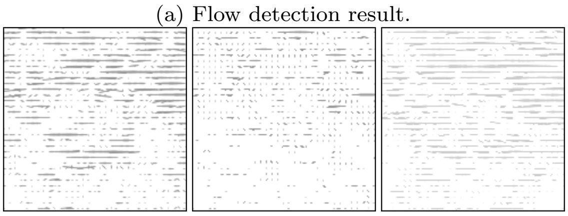


図 7　実験環境
Fig. 7　Experimental environment.



(a) Flow detection result.



(b) Detection result in the rectangle domain.

図 8　cvCalcOpticalFlowLK によるオプティカルフローの検出結果
Fig. 8　Detection result of the optical flow by cvCalcOpticalFlowLK.

5.2　考察

画像マッチングの結果において横軸方向にも対応付けられていた原因としてはオプティカルフロー推定における開口問題が考えられる．すなわち，輝度勾配が平坦である場合，あるいは一方向にしか存在しない場合には，対応する画素が複数存在するためにフローを検出できないという問題である．アーチファクトのような縞模様の場合，輝度勾配が平坦である箇所が多数存在するために，このように検出方向が一定とならず横軸方向にもフローが検出される結果となったと考えられる．そこで，先で示したフロー検出結果の横軸成分を除去したところ図 9 に示す結果が得られた．

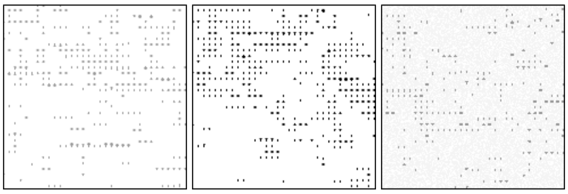


図 9　横方向成分除去による修正結果
Fig. 9　Refinement result by the removing horizontal component.

この結果は，オプティカルフロー検出において探索方向をエピポーラ線上に限定したものではないので，完全には正しい結果ではないが，実際のカメラとプロジェクタの位置関係から期待される画素対応のずれの大きさ (2 から 3 ピクセル程度) と近い結果が得られていることが確認できる．そのため，エピポーラ拘束を考慮したオプティカルフロー検出を実装することにより，フロー検出の精度向上が期待できる．また，探索方向を限定することで計算コストの軽減を見込むことができる．そのため，今後はアーチファクトのフロー検出にエピポーラ拘束を適用した手法を実装する予定である．

6.　まとめと今後の課題

本研究では，プロジェクタカメラフィードバックにおいて，ピクセルマップと実際の幾何学的な関係にずれが生じた際に発生するアーチファクトに着目し，投影画像とキャプチャ画像でアーチファクトのマッチングによってピクセルマップを適応的に更新する幾何学較正方法を提案した．

本稿では，このうちアーチファクトのマッチングを行うために投影画像とキャプチャ画像の色彩を揃える明度正規化手法を提案した．また，Lucus-Kanade アルゴリズムを用いたオプティカルフロー検出手法によりアーチファクトパターンのマッチングを行った結果を示した．さらに，カメラとプロジェクタが水平方向に設置しているという実験環境条件から，横軸方向を除去するフロー結果を示し，大まかな *P2C* マップと実際のカメラとプロジェクタの位置関係に齟齬の変化量を示した．

今後の課題としては，提案手法の改良として，エピポーラ拘束に基づくフロー検出，ブロックマッチング法での画像マッチングを行う．また，実際にフローから推定した *P2C* マップと実際のカメラとプロジェクタの位置関係の齟齬の変化量から *P2C* マップの更新を行っていきたい．

参考文献

[1] T. Johnson and H. Fuchs, “Real-Time Projector Tracking on Complex Geometry Using Ordinary Imagery,” Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition Workshops Procams2007, pp. 1–8, 2007.
[2] S. Audet, M. Okutomi, and M. Tanaka, “Direct image alignment of projector-camera systems with planar

surfaces," Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition Workshop Procams2010, pp. 303–310, 2010.
[3] K. Fujii, M. D. Grossberg, and S. K. Nayar, "A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments," Proc. of Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 814–821 vol. 1, 2005.
[4] 岩井大輔, 佐藤宏介, "ThermoReality: 実環境に偏在する熱現象を対象とする投影型エデュテイメントシステム," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 11, no. 4, pp. 569–572, 2006.
[5] T. Amano, "Projection Based Real-Time Material Appearance Manipulation," Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition Workshops CCD2013, pp.918–923, 2013.
[6] 奥村光平， 奥寛雅， 石川正俊, "高速光軸制御を用いた動的物体への投影型拡張現実感，" 映像情報メディア学会誌， Vol.67, No.7, pp.J204–J211, 2013.
[7] 天野 敏之, 加藤 博一, "モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系による見かけの制御," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J94-D, No. 8, pp.1368–1375, 2011.
[8] B. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," In Proc. Seventh International Conference on Artificial Intelligence, pp.674-479, 1981.