



# 複数台プロジェクタでの動的プロジェクションマッピング におけるオンライン幾何較正

石田 仰輝<sup>\*1</sup>岩井 大輔<sup>\*1</sup>佐藤 宏介<sup>\*1</sup>

**Abstract** – 移動する投影対象に複数のプロジェクタから映像を投影する場合、幾何学的な較正誤差により、対象上でプロジェクタ間の投影像の位置ずれが生じる。本研究では、投影対象が移動する度に、投影対象の表面に貼り付けられた再帰性反射マーカの近傍に、空間コードパターンを選択的に投影することでプロジェクタ台数によらず一定時間でプロジェクタ座標と3次元座標との対応を取得し、プロジェクタ較正を行うことで、位置ずれを改善する手法を提案する。また、本手法ではプロジェクションマッピングのオンライン動作中に幾何較正を行うため、投影コンテンツに空間コード投影が混入して、没入感が損なわれる問題がある。そこで、フレームレートの高いプロジェクタを導入し、継時加法混色を利用して、コード投影を不可視化する手法で解決する。投影実験を行い、提案手法により位置ずれが改善されること、および投影コードを不可視化できることを確認した。

**Keywords** : プロジェクションマッピング, 複数台投影, 動的プロジェクションマッピング, プロジェクタ較正

## 1 はじめに

近年、現実空間の三次元物体を投影対象とし、プロジェクタでその形状に合わせた映像を重畳投影することで、物体の見た目を変化させるプロジェクションマッピング技術が注目されている。Nomotoらは複数台のプロジェクタを用いて、再帰性反射マーカを物体に取り付けるマーカベースの手法を用いて、移動する物体に対して映像を投影する動的プロジェクションマッピングを行った [1]。このような、プロジェクタを複数台用いた映像投影では、物体への投影光が遮蔽されても、影ができないプロジェクションマッピングを実現できる [2]。

しかし、複数台のプロジェクタを用いて動的プロジェクションマッピングを行うと、物体が移動した際に投影像と物体の位置ずれが生じる [3][4]。この位置ずれは、プロジェクタ較正時に生じる誤差によって、投影像の位置合わせの精度が空間一様ではないことが原因となって生じる。プロジェクタの較正は、一般的に、3次元位置姿勢が既知の基準物体を用いて行う。つまり、較正誤差による投影像のずれは、較正時に基準物体が設置されていた位置から投影対象が離れるにつれて大きくなる。この位置ずれを改善するためには、投影対象が移動する度に、プロジェクタ較正を行う必要がある。そこで本研究では、物体が移動する度に、プロジェクタ幾何較正を行うことで、位置ずれを改善することを目指す。なお本研究では、複数台のプロジェクタを用いて、移動する物体に映像を投影するシステ

ムを用いる。

## 2 プロジェクタの幾何較正

プロジェクタの幾何較正では、三次元の世界座標系の位置と二次元のプロジェクタ画像座標系の位置の対応関係を求める必要がある。プロジェクタ較正は画角などの内部パラメータが予め求められている場合、三次元の世界座標系の点と、二次元のプロジェクタ画像座標系の点の対応関係が4点以上あれば行うことができる。この対応関係は、プロジェクタから二次元グレイコードパターン投影を行うなどすることで取得できる。

一般的に、Zhangらが提案したチェッカボードを異なる姿勢で撮影するカメラ較正技術を拡張し、チェッカボードに対してグレイコードパターン投影を行い、ボード上のプロジェクタ画像座標を求めることで、プロジェクタを幾何較正する手法が用いられてきた [5]。しかし、動的プロジェクションマッピングを行う場合、較正誤差による投影像の位置ずれを解消するために、物体が移動する度に幾何較正をオンラインで行う必要がある。そのため、グレイコード投影を繰り返さなければならず、プロジェクションマッピング体験が頻繁に中断され、鑑賞の邪魔となり、ユーザ体験の没入感が損なわれる。この問題に対して、ZollmannらはHuangらの位相シフト法 [6] を不可視化して、幾何較正を行う手法を提案している [7]。また、Grundhoferらも同様に人間視覚では知覚できない高速なパターン投影技術を実装した [8]。

一方、複数台のプロジェクタ較正では、グレイコー

<sup>\*1</sup>大阪大学

ドパターン投影をプロジェクタ毎に行う必要がある。そのため、一般的にプロジェクタ較正の処理時間は、プロジェクタの台数に線形に増大していく。これにより、複数台プロジェクタを用いる動的プロジェクションマッピングにおいて、物体が移動する度に幾何較正を行うと、パターン投影に時間がかかる。すなわち、幾何較正の処理により物体への映像投影に遅れが生じてしまう。そのため、幾何較正処理の並列化する手法が求められる。

### 3 提案手法

#### 3.1 オンライン幾何較正

本研究では、投影対象が移動する度に、その表面に貼り付けた再帰性反射マーカ付近のみに限定したグレイコードパターン投影により、同マーカ位置に照射しているプロジェクタ画素を計測して幾何較正を行うことで、位置ずれを改善する手法を提案する。なお、この手法で用いるシステムでは、光学式座標計測装置 (OptiTrack) によって、マーカの世界座標を取得することで、物体の位置姿勢推定を行う。また、物体への投影に用いるプロジェクタ近傍にはグレイコードパターン取得用のカメラを配置する。システム図を図1に示す。

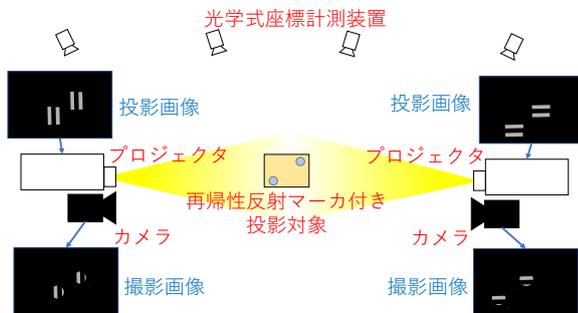


図1 システム図

マーカの再帰性反射材は、光が照射された方向にしか反射しない性質を持っている。そのため、プロジェクタの近くにカメラを配置すれば、プロジェクタから投影されたパターン光の反射光をそのカメラのみで撮影することができる。すなわち、複数台のプロジェクタから同時にパターン画像投影を行っても、それぞれのパターン光が干渉しあうことなく、パターン投影による幾何較正を並列処理できる。そのため、この手法の幾何較正による時間は、プロジェクタの台数に依存しない。

また、グレイコードパターン投影はプロジェクタ投影画面全体で行うのではなく、マーカ領域に限定するよう選択的に行う。これは投影コンテンツへの見た目

への影響を最小限に抑えるためと、投影パターン数を削減するためである。マーカ領域への選択的なパターン投影を行っている様子を図2に示す。

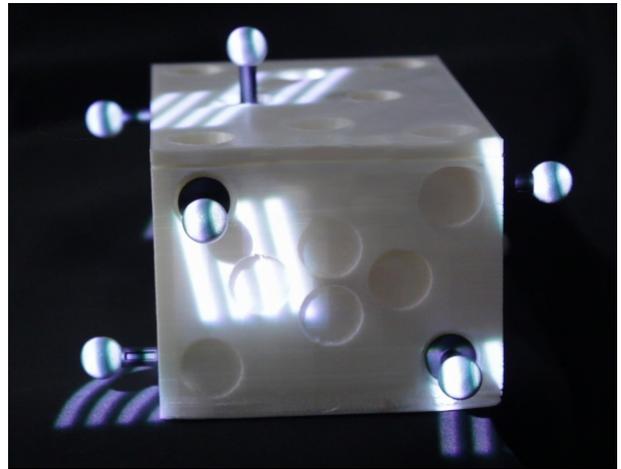


図2 マーカ領域への選択的なパターン投影

この選択的な投影で幾何較正を行う流れは以下のようになる。まず、投影開始前にプロジェクタの幾何較正を行い、初期較正パラメータを取得する。動的プロジェクションマッピングを実行中は、前フレームまでのプロジェクタ幾何較正結果を用いて、世界座標系でのマーカの位置から、プロジェクタ画像座標系でのマーカ近傍の位置を取得する。そのため、プロジェクタ画像座標系においてマーカ近傍の小領域にグレイコードを割り当てて投影することができる。これによってマーカのプロジェクト画像座標系での位置を計測することができる。またこのとき、光学式座標計測装置によってマーカの世界座標系での位置が分かっているため、マーカへのグレイコードパターン投影を4点以上で行うことができれば、追加較正が可能になる。追加較正を行うことができた場合、追加較正結果を更新する。

なお、グレイコードパターン投影は物体が素早く移動しているときには行うことができない。しかし、人間の視覚特性を考慮すると、移動している物体に投影されている映像の位置ずれは鑑賞品質に重大な影響は与えないと考えられる。そのため、物体が移動して止まる度にここで述べた幾何較正を行うことを想定している。

#### 3.2 パターン投影の不可視化

本提案手法ではプロジェクションマッピングを継続したまま、物体に取り付けたマーカに選択的にグレイコードを投影し、幾何較正を行う。この手法により、グレイコードパターン投影が投影コンテンツに与える影響は最小限に抑えられている。しかし、マーカ付近の投影コンテンツにはグレイコードパターン投影が重なる

るため、本提案手法でもグレイコードパターン投影はプロジェクションマッピングの没入感を損なっている。

そこで、フレームレートの高いプロジェクタを用いて、人間の視覚特性を考慮することでグレイコードを不可視化する手法を取り入れる。人間の目では、臨界融合周波数以上の周波数で変化する光は、入射光の時間積分として光を感知する。そのため、白の画面と黒の画面が素早く交互に表示されるとグレーの画面に見える。これを継時加法混色と言う。この継時加法混色は、テクスチャに空間コードを埋め込むことに利用することができる。

継時加法混色の原理を利用して、人間にコード投影がされていないように見せる手法は以下になる。まず、グレイコードパターン投影を正のパターンの投影と負のパターンの投影の2回に分ける。次にこれらのパターンを交互に投影する。なお、プロジェクションマッピングで投影しているコンテンツも同時に投影しておく。120Hz以上で切り替えを行うことで継時加法混色が起こり、人間の目にはコード投影がされていないように見える。

ここで、グレイコードパターン投影の正のパターンの投影と負のパターンの投影は、グレイコードを輝度値のパターンとみなし、コンテンツ画像に足し引きすることで実装することができる。以上の流れを図3に示す。

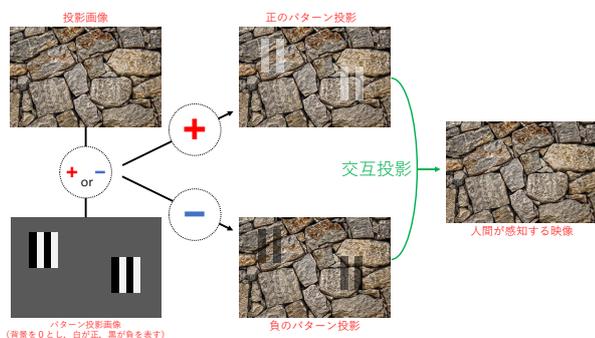


図3 パターン投影不可視化の仕組み

また、幾何較正を行う際には、正のパターンの投影と負のパターンの投影を撮影した2枚の画像の差分画像からデコードを行う。これによって、通常のグレイコードパターン投影を行った場合と同じ方法で幾何較正を行うことができる。

## 4 実験

### 4.1 オンライン幾何較正

提案手法により位置ずれが改善されることを実験によって確認した。まず、プロジェクタ2台で、それぞれから赤色と緑色の稜線を投影対象に投影し、投影像

の重なりを確認した。物体を移動(図4(a))した後、追加較正を行う前(図4(b))の拡大図は図4(d)のようになっており、赤色と緑色の稜線投影は実物体の稜線と位置ずれを起こしていることが分かる。その後、本研究の提案手法を用いて追加較正を行った後(図4(c))の拡大図は図4(e)のようになっており、位置ずれが改善されていることが分かる。

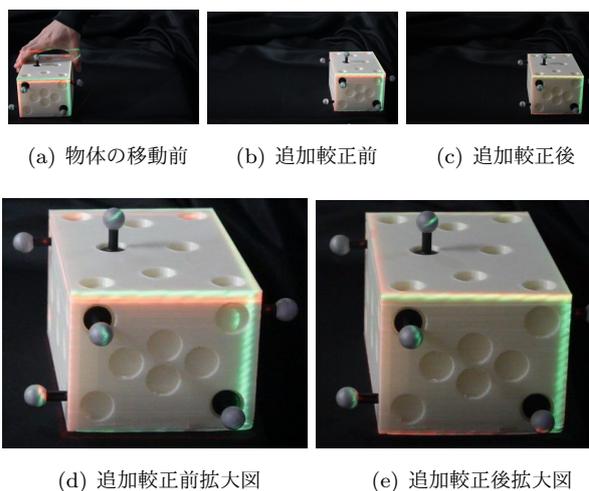


図4 プロジェクタ2台での稜線投影実験の結果

次に、市松模様のテクスチャを物体の各面に投影し、画像の乱れを確認した。以上より本手法が位置ずれ改善に有効であることがわかった。

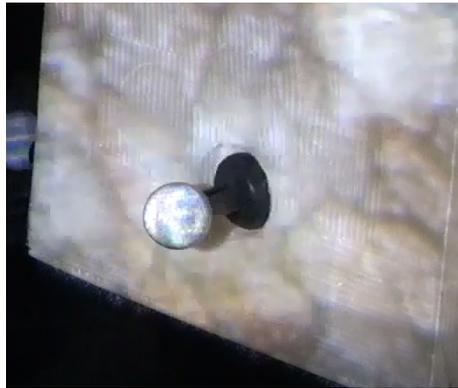
### 4.2 パターン投影の不可視化

高速に正のパターン投影と負のパターン投影を切り替えることでグレイコードパターン投影を行っても、投影コンテンツを障害しないことを投影実験により確認した。投影コンテンツに対する正のパターン投影(図5(a))と負のパターン投影(図5(b))を交互に投影した様子が図5(c)のようになっており、投影コンテンツへの影響が抑えられていることが分かる。なお、図5(a)は正のパターン投影のみを、図5(b)は負のパターン投影のみを、図5(c)は正パターンと負パターンの交互投影をそれぞれ120Hzで行い、カメラの露光時間は1/60秒に設定して撮影した。



(a) 正のパターン投影

(b) 負のパターン投影



(c) 交互投影した様子

図5 パターン投影の不可視化実験の結果

以上よりパターン投影の不可視化ができることを確認できた。

## 5 まとめ

本研究では、複数台のプロジェクタを用いて、移動する物体に映像を投影するシステムにおいて、物体が移動する度に、不可視化されたプロジェクタ幾何較正を行うことで、投影コンテンツを視覚的に障害せず、オンラインで位置ずれを改善すること手法を提案し、原理検証実験によりその有効性を確認した。物体が移動する度に、その表面に貼り付けた再帰性反射マーカの領域のみに限定する選択的グレイコードパターン投影により、幾何較正を行うことで、位置ずれを改善する手法を提案し、その手法により位置ずれが改善されることを確認した。また、実験によりパターン投影が不可視化できることを確認した。

今後はパターン投影の不可視化をしている状態で、移動する物体に対して映像を投影するプロジェクションマッピングを実現する。その際、移動する度に自動的に幾何較正を行い、位置ずれを修正することで、常に位置合わせがされているプロジェクションマッピングを行う。

## 参考文献

- [1] Takashi Nomoto, Wanlong Li, Hao-Lun Peng, and Yoshihiro Watanabe. Dynamic projection mapping with networked multi-projectors based on pixel-parallel intensity control. *SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies*, No. 11, pp. 1–2, 2020.
- [2] Christian Siegl, Matteo Colaianni, Lucas Thies, Justus Thies, Michael Zollhöfer, Shahram Izadi, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 6, pp. 1–11, 2015.
- [3] Vanessa Lange, Christian Siegl, Matteo Colaianni, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Robust blending and occlusion compensation in dynamic multi-projection mapping. In *Eurographics (Short Papers)*, pp. 1–4, 2017.
- [4] Philipp Kurth, Vanessa Lange, Christian Siegl, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Auto-calibration for dynamic multi-projection mapping on arbitrary surfaces. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 24, No. 11, pp. 2886–2894, 2018.
- [5] 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.
- [6] Peisen S Huang and Song Zhang. Fast three-step phase-shifting algorithm. *Applied optics*, Vol. 45, No. 21, pp. 5086–5091, 2006.
- [7] Stefanie Zollmann and Oliver Bimber. Imperceptible calibration for radiometric compensation. In *Eurographics (Short Papers)*, pp. 61–64, 2007.
- [8] Anselm Grundhofer, Manja Seeger, Ferry Hantsch, and Oliver Bimber. Dynamic adaptation of projected imperceptible codes. In *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 181–190, 2007.