



# 光学的に動的な投影状況における高解像度静的映像投影手法

新田 暢<sup>1)</sup>, 末石 智大<sup>1)</sup>, 石川 正俊<sup>1)</sup>

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, Masashi.Nitta@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** プロジェクションマッピングにおいて観測者の動的な注視点付近に高解像度な映像を継続的に投影して、投影像をつなぎ合わせた大きな映像を生成する際には、モーションブレンダーなど投影像の品質劣化の課題があった。本稿ではミリ秒オーダーの制御が可能な高速光軸制御系と高速プロジェクタを投影像のダイナミクスを打ち消す形で組合せ、光学的に動的な投影状況における高解像度な静的映像投影手法を提案する。評価実験により高い幾何学的整合性に加え、時間的整合性における課題を確認した。

**キーワード:** 投影型拡張現実感, 高速ビジュアルフィードバック, 高速ミラー, 高速プロジェクタ

## 1. はじめに

プロジェクタを用いて視覚的な情報を実世界の物体に付加する技術はプロジェクションマッピングと呼ばれ、様々なアプリケーションが提案されている [1]。本稿では特に、動的に変化する人間の注視点位置に対応した映像投影技術に着目する。この技術は、既存のディスプレイやプロジェクタの画角に制限されず、ユーザーの視線が向いた方向に常に高解像度な映像を投影するものであり、擬似的に広範囲かつ高解像度な映像投影がなされることが期待される。

拡張現実感における重要な 3 つの整合性として、幾何学的整合性・光学的整合性・時間的整合性が挙げられている [2] が、変化する注視点に対する動的なフィードバック投影システムにおいては特に、異なる注視点において形状的な破綻のない投影をするという幾何学的整合性と、注視点の移動に応じて素早く投影像を変更する時間的整合性を取る事が重要である。

岩井らは、focus + context(F + C) ディスプレイを実現するという形で、この問題に取り組んだ [3]。F + C ディスプレイは、観察者が注目する領域に対して高解像度表示するプロジェクタと、そうでない領域全体を低解像度で表示する固定プロジェクタによって構成され、少ない台数のプロジェクタで広視野・高解像度な表示を実現する技術である。岩井らは、Pan-Tilt ミラーとプロジェクタを用いた系を構成し、Pan-Tilt ミラーを事前に予測した注視点に向かってどのように動かすかを工夫することで動的に注視点が変わる状況下における映像フィードバックを行うことによって、モーションブレンダーの低減を図った。一方で、ミラーやプロジェクタの速度性能が、装置として本質的に不十分であったとも解釈できる。

本稿で目指す動的な映像フィードバックを行うためには、取得した注視点に対して素早く応答する高速光軸制御と、注視点の変更に応じて素早く投影映像を変更する高速投影像

制御が必要不可欠である。このうち、高速映像投影技術については、近年 1,000 [fps] かつ最小レイテンシ 3 [ms] での映像投影が可能な高速プロジェクタ DynaFlash [4] が開発されており、様々なダイナミックプロジェクションマッピングが提案されている [5]。

また、高速光軸制御系としては瞳転送系とガルバノミラーを用いることで高速なフィードバックを可能にしたサッカーミラー [6] が開発されており、これについても様々なダイナミックプロジェクションマッピングが提案されている [7]。

そこで本研究では動的な注視点に追従したフィードバック投影技術として、サッカーミラーを用いた非常にダイナミクスの高い光軸制御による注視点追従と、高速プロジェクタを用いた光軸変化の影響をキャンセルする映像制御を組み合わせることによって、擬似的に広範囲な高解像度静的映像を投影する手法を提案する。

## 2. 提案手法

### 2.1 概要

提案するシステムのコンセプトを図 1 示す。提案するシステムでは、スクリーン全体にどのような絵を投影するかは決まっており、注視点位置に向けてガルバノミラーにより光軸方向を制御し、その光軸方向によってその絵のどの部分を投影するかが決まる。そして、光軸方向に合わせて高速プロジェクタが投影像を変更することによって、高解像度投影を行う。

図 2 にシステムの全体構成を示す。提案するシステムは高速プロジェクタ 1 台、高速カメラ 1 台、サッカーミラー 1 台および高速プロジェクタの投影先であるスクリーンからなる。ここで、高速プロジェクタの投影平面の座標系を  $\Sigma_P$ 、カメラの画像平面の座標系を  $\Sigma_C$ 、スクリーンの座標系を  $\Sigma_S$  とする。これらの異なる 2 次元平面間の座標変換は、ホモグラフィ行列  $H_{SC}, H_{SP}$  を用いて表現することが出来る。なお、サッカーミラーの 2 枚のミラーの光軸の角度を  $\theta, \phi$  とする。

提案手法の処理の流れは以下のとおりである。

Masashi NITTA, Tomohiro SUEISHI, and Masatoshi ISHIKAWA

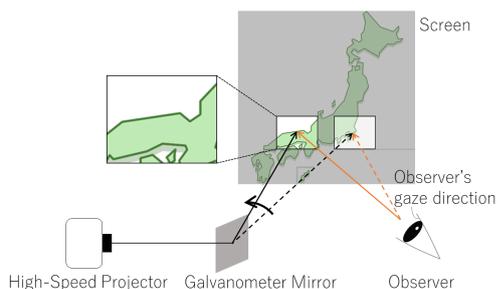


図 1: 提案システムのコンセプト

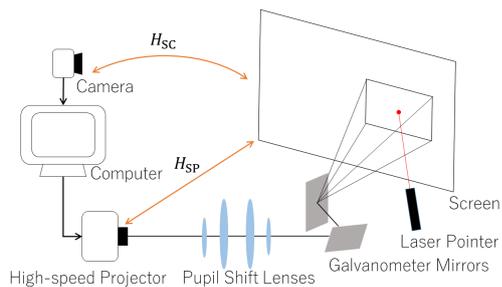


図 2: システム構成

1. スクリーン上での注視点位置を決定 (今回はレーザーポインタを利用し、カメラで検出した輝点位置を  $\Sigma_C$  から  $\Sigma_S$  へ座標変換)(2.2 節)
2. 注視点位置に基づくミラー角度変更 (バイリニア補間に基づく)(2.3 節)
3. ミラー角度に基づく高速プロジェクタの投影映像を生成 (事前に作成したルックアップテーブルとバイリニア補間に基づく)(2.4 節)

これらの処理が合計で 1[ms] 毎で処理される。それぞれの処理について詳細に説明する。

## 2.2 注視点位置の検出

光軸を向けるべき注視点位置を決定する際に、今回は簡単のためにレーザーポインタの照射位置を注視点位置とみなした。レーザーポインタの光量は十分に強いと仮定することが出来るので、カメラ画像から十分に輝度の高い部分を抽出し、その点をレーザーポインタ点として検知する。

## 2.3 ガルバノミラーの角度の決定

スクリーン全体に投影する画像の縦のピクセル数を  $h$ 、横のピクセル数を  $w$  とする。事前準備として、プロジェクタの中央に十字を投影し、それをスクリーン座標の  $(0, 0)$ ,  $(0, h)$ ,  $(w, h)$ ,  $(w, 0)$  に合うようにガルバノミラーの光軸の角度  $(\theta, \phi)$  を調整することで、4 点のスクリーン座標と  $(\theta, \phi)$  の対応を求める。それぞれの点とガルバノミラーの光軸の角度の対応を  $(\theta_{0,0}, \phi_{0,0})$ ,  $(\theta_{0,h}, \phi_{0,h})$ ,  $(\theta_{w,h}, \phi_{w,h})$ ,  $(\theta_{w,0}, \phi_{w,0})$  とする。

スクリーン上の  $(x, y)$  上に光軸の角度を合わせる場合、バイリニア補間の要領で光軸の角度  $(\theta, \phi)$  を求める。すな

わち、

$$\alpha = \frac{x}{w}, \beta = \frac{y}{h} \quad (1)$$

として、式 (2), (3) から求める。

$$\theta = (1 - \alpha, \alpha) \begin{pmatrix} \theta_{0,0} & \theta_{w,0} \\ \theta_{0,h} & \theta_{w,h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \beta \\ \beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\phi = (1 - \alpha, \alpha) \begin{pmatrix} \phi_{0,0} & \phi_{w,0} \\ \phi_{0,h} & \phi_{w,h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \beta \\ \beta \end{pmatrix} \quad (3)$$

## 2.4 プロジェクタの投影画像の決定

ホモグラフィ変換行列のルックアップテーブルを事前に作成して、バイリニア補間によって任意の角度に対応するホモグラフィ行列を生成する。具体的には、以下のように投影画像を決定する。

事前準備として、高速プロジェクタでスクリーン上に円形グリッドパターンを投影しつつガルバノミラーの光軸の角度を離散的に変えることで、光軸の角度ごとに、スクリーン座標から高速プロジェクタへのホモグラフィ変換行列を求める。すなわち、光軸の角度  $(\theta, \phi)$  をそれぞれ  $\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_n$ ,  $\phi_1 < \phi_2 < \dots < \phi_m$  と分けたとすると、光軸の角度を  $(\theta_i, \phi_j)$  ( $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ ) にした際のホモグラフィ変換行列をそれぞれ求める。

このようにして得られた光軸の角度とホモグラフィ行列の対応を集めたデータを

$$D = \{((\theta_i, \phi_j), H_{i,j})\}_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m} \quad (4)$$

とする。

光軸の角度が  $(\theta, \phi)$  の場合、以下のようにして投影画像を求める。

**Step 1.**  $(\theta, \phi)$  近傍となる 4 つの標本化角を  $D$  から求める。すなわち、 $\theta_i \leq \theta \leq \theta_{i+1}$ ,  $\phi_j \leq \phi \leq \phi_{j+1}$  を満たす  $i, j$  をデータ  $D$  から求める。

**Step 2.** バイリニア補間を行うことによって、スクリーン座標からプロジェクタ座標へのホモグラフィ変換行列  $H$  を求める。すなわち、

$$\alpha = \frac{\theta - \theta_i}{\theta_{i+1} - \theta_i}, \beta = \frac{\phi - \phi_j}{\phi_{j+1} - \phi_j} \quad (5)$$

と定義し、

$$H = ((1 - \alpha)I, \alpha I) \begin{pmatrix} H_{i,j} & H_{i+1,j} \\ H_{i,j+1} & H_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1 - \beta)I \\ \beta I \end{pmatrix} \quad (6)$$

とする。ここで、 $I$  は  $3 \times 3$  の単位行列である。

**Step 3.** スクリーン上に投影したい画像および  $H$  を用いて、プロジェクタが投影すべき画像を計算する。

### 3. 幾何学的・時間的整合性の評価実験

本節では提案手法における幾何学的整合性・時間的整合性の定量的評価を行った。評価実験システムを図3に示す。高速カメラは Photron IDP-Express R2000(1,000 [fps] で 512×512 画素のペイヤー画像を取得)を使用した。カメラレンズは Computar M0814-MP2(焦点距離 8 [mm], 開放絞り F1.4)を使用した。プロジェクタは DynaFlash(1000 [fps], 最小遅延 3 [ms], 1024×768 画素のモノクロ画像を投影)を使用した。ガルバノミラーには GIS グループ M2(光学走査角  $\pm 30$  [deg], 対応する入出力  $\pm 3$  [V])を用い、AD/DA 変換ボード (Interface 社 LPC361216, 入出力  $\pm 10$  [V], 16 ビット)を用いた。また、システムから投影対象であるスクリーンまでの距離はおよそ 1.9 [m] であり、スクリーンの投影範囲は 0.88 [m]×0.66 [m] である。時間的整合性の評価では、高い時間分解能の電圧計測にデータロガー KEYENCE NR-600 を、投影時刻の電氣的計測に光センサーモジュール (DFRobot DFR0026, 応答速度 15[us])を用いた。

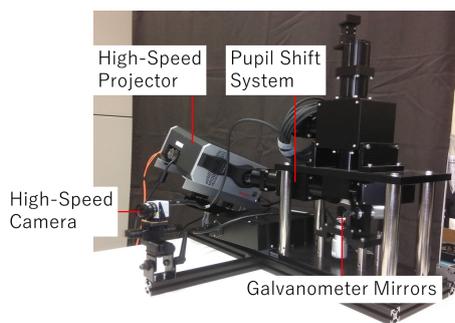


図 3: 評価実験システム外観写真

#### 3.1 幾何学的整合性の評価

最初にガルバノミラーを介したプロジェクタ投影像の位置の正確性、すなわち提案手法の幾何学的整合性について評価した。本評価では静止したガルバノミラーを対象とし、後述する時間的整合性の要素を含まないものであり、カメラ・ミラー・プロジェクタ間の校正精度に相当する。

実験手順としては、映像を円形グリッドに固定し、Pan/Tilt のミラー角度を離散的に指定した。各々の光軸方向において、カメラで実際に観測された円形グリッドの位置と、事前に構成した情報から円形グリッドがカメラで観測されるべき位置の差、すなわち再投影誤差を計算した。各光軸方向における再投影誤差を図4に示す。なお、誤差が負値の誤差は円形グリッドの不検出を意味する。

再投影誤差の平均値は 0.13 [px] 程度であり、実際ほとんどの再投影誤差が 0.10-0.15 [px] に集中している様子が確認できる。このことから、静止したガルバノミラーでは十分な幾何学的整合性が確認できた。

#### 3.2 応答性能の評価

ダイナミクスの高い注視点位置変動に対し常に静的な画像を投影し続けるためには、高速プロジェクタとガルバノ

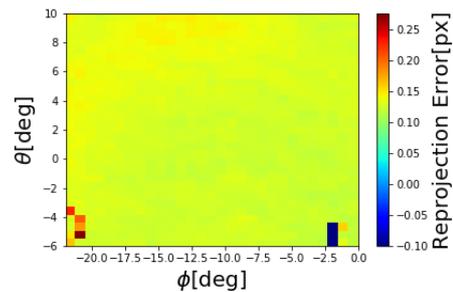


図 4: 各光軸方向における再投影誤差

ミラーの同期性が重要であるため、両装置の応答性能を同時に実験的に評価した。

実験では、ソフトウェアによるトリガを基準として、ガルバノミラーの角度変更(光軸走査角 1 [deg])と、高速プロジェクタによる投影映像切り替え(黒画像から白画像へ)を同時に行った。データロガーを用いて 5 [us] 毎に、DA 変換によるトリガ出力、ガルバノミラーの走査角の変化、そしてプロジェクタ投影像の変化を計測した。プロジェクタ投影像の変化は光センサーモジュールを高速プロジェクタのレンズ前方に設置して、光量変化に対応する電圧変化として計測した。なお、光軸走査角の 1 [deg] は 1 [ms] における人の視線変化の上限と仮定して設定した。

両装置の応答結果の一例を図5に示す。トリガを基準時刻  $t = 0$  [us] として、図5上は光軸の目標角(青線)と実際の角度(橙線)を示し、目標角の 98% 到達点(赤点線)をミラーの応答時間とする。また、図5下は電圧に変換された投影輝度値を示し、2 [V] 以下は黒画像、4 [V] 以上は白画像に対応する。また、20 回の試行に対する応答時間の平均、標準偏差を表1に示す。

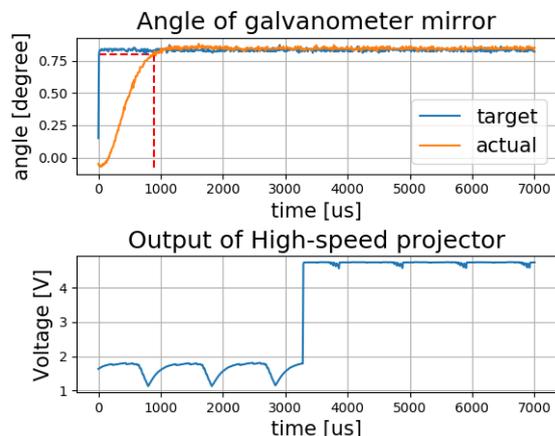


図 5: ガルバノミラー・高速プロジェクタの応答性能

図5および表1から、ガルバノミラーの応答に対して、高速プロジェクタの応答が 2 [ms] 程度遅れていることが確認できる。このため、高速プロジェクタの投影を投影する瞬間の光軸の角度に合わせて生成すると、実際に高速プロ

	平均 [us]	標準偏差 [us]
高速プロジェクタ	3091	523.7
ガルバノミラー	908.1	24.42

表 1: 高速プロジェクタ, ガルバノミラーの応答時間

ジェクタから生成された画像が投影される際には, 光軸の角度が投影すべき画像からずれている可能性がある。また, 高速プロジェクタの応答時間の標準偏差が非常に大きいのは, 今回の高速プロジェクタの制御が非同期であったためと考えられるため, ガルバノミラーと高速プロジェクタのレイテンシのずれだけでなく, 高速プロジェクタの非同期性も投影像の品質に影響する可能性がある。

### 3.3 時間的整合性の評価

幾何学的整合性の評価に引き続き, 時間的整合性の評価実験も行った。具体的には, ガルバノミラーを周期的に動かしながら, スクリーン中央に白い円が固定されるように投影した。今回の実験では, 時間的整合性の定量評価のため, 注視点の位置を仮想的に上下 30 [cm] 程度動くようにソフトウェアに与えた。時間的整合性の定量評価として, 注視点を上下させる周波数に対応した白い円の重心位置の変動を計測した。白い円の計測には注視点としてのレーザーポインタによる輝点計測用の高速カメラを 125 [fps] に設定して用いた。ミラーの動作周波数と投影像 (白円の重心) の位置変化の標準偏差を図 6 に示す。

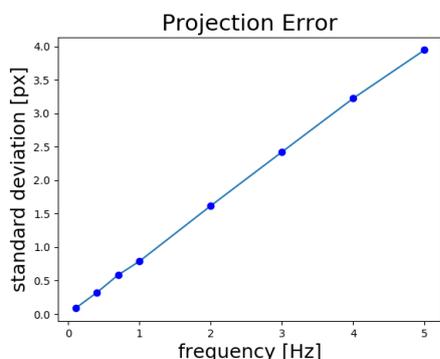


図 6: ミラー動作周波数と投影位置変化の標準偏差

図 6 から正比例の関係が確認でき, 幾何学的整合性での評価結果 0.13[px] 程度と比較しても, 十分大きな投影位置の誤差が確認できた。この大きな誤差は前節で確認した高速プロジェクタとガルバノミラーの非同期性 (2 [ms] 程度の誤差) に起因すると考えられ, 実際レイテンシによる誤差の見積もりと図 6 の直線の傾きはおおむね一致する。

### 4. ランダムな注視点による投影実験

実際に注視点に模したレーザーポインタを用いて, ランダムに動かした注視点位置に対する高速ビジュアルフィードバックに基づく動的投影光軸による静止映像投影の実験

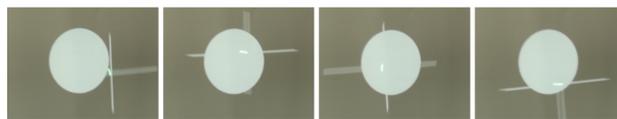


図 7: ランダムな注視点に対する投影像の時系列画像 (十字線は投影光軸中心を指す)

を行った結果を図 7 に示す。異なる注視点位置でも概ね静止した投影像が確認できたが, 時間的整合性の評価で大きな誤差を確認したように, 目視で投影像の位置ずれが確認できた。

### 5. おわりに

本稿では, 動的に注視点が変わる状況下における高解像度で静的な映像を投影する目的に向けて, 高速プロジェクタとサックードミラーを組み合わせて映像ダイナミクスをキャンセルする手法を提案した。実験的に幾何学的整合性および時間的整合性を定量的に評価し, 時間的整合性に大きな問題があることを確認した。今後の課題として, ガルバノミラーと高速プロジェクタの同期の向上と, アプリケーションの開発が挙げられる。

### 参考文献

- [1] Grundhö fer. A and D. Iwai: "Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications.", *Computer Graphics Forum*. Vol. 37. No. 2. pp. 653-675 2018.
- [2] 奥村光平ほか: 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)
- [3] D. Iwai, et al., "Reducing Motion Blur Artifact of Foveal Projection for Dynamic Focus-Plus-Context Display", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 25, No. 4, pp. 547-556, 2015.
- [4] Y. Watanabe, et al., "High-speed 8-bit Image Projector at 1,000 fps with 3ms Delay", *The International Display Workshops (IDW2015)*, (Ohtsu, 2015.12.11)/Proceedings, pp.1064-1065, 2015.
- [5] G. Narita, et al., "Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-rigid Surface using Deformable Dot Cluster Marker.", *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1235-1248, 2017.
- [6] 奥村光平ほか: アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.2, pp.201-211, 2011.
- [7] T. Sueishi, et al., "Lumipen 2: Dynamic Projection Mapping with Mirror-Based Robust High-Speed Tracking against Illumination Changes.", *PRES-ENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 25, Issue. 4, pp. 299-321, 2017