



# 環境光変動にロバストな紙吹雪へのレーザーパターン投影手法

地徳涼音<sup>1)</sup>, 奥寛雅<sup>2)</sup>

Suzune CHITOKU, Hiromasa OKU

1) 群馬大学 情報学研究科 (〒 371-0044 群馬県前橋市荒牧町 4-2, j251a019@gunma-u.ac.jp)

2) 群馬大学 情報学部 (〒 371-0044 群馬県前橋市荒牧町 4-2, h.oku@gunma-u.ac.jp)

**概要:** 紙吹雪に光を動的に投影することで紙吹雪が光輝く新たな演出が可能になることが期待される。これまでに、カメラ画像から紙吹雪の輪郭を検出し、その中心位置に応じてレーザーで模様を投影するシステムを開発した。本研究ではこれに加えて、紙吹雪にレーザーを投影する際に赤外光照明を用いることで、環境光の影響を受けにくくし、明所・暗所を問わず紙吹雪の安定した検出を可能にした。

**キーワード:** 高速画像処理, レーザー, プロジェクションマッピング

## 1. はじめに

近年、ライブなどの舞台演出においては、複数のスクリーンやプロジェクターを用いて、ステージ背景や舞台上のオブジェクトに映像を映し出す手法や、アーティストの身体や衣装に直接映像を投影する手法が定番化しつつある。しかし、現在のライブの演出では主にプロジェクターが使用されており、この方法では映像を投影するまでに一定の遅延が発生するため、アーティストの身体や衣装の動きに対応する高速な投影には限界があった。

最近では、映像の入力から出力までの遅延を短縮した高速プロジェクターも登場しており、動的なプロジェクションマッピングを用いた演出が注目されている [1][2][3]。これらの研究では低遅延の投影により高速に動く対象にプロジェクションマッピングを実現している。ただし、その一方で投影可能な輝度に制約があるなどの課題もあった。

より高輝度で視認しやすい演出を可能にする手法として、著者らのグループでは、高速ビジョンで紙吹雪検出し画像処理を行うプログラムと、レーザーディスプレイ [4] を用いた高速なレーザー制御を組み合わせた演出方法を開発し、試作システムを提案している [5]。この手法では、落ちてくる複数の紙吹雪それぞれのランダムな動きにあわせて、各紙吹雪にレーザーで模様を投影する。ライブでよく用いられる紙吹雪にレーザーで模様を投影することが実現できれば、これらを組み合わせた演出は従来にはないため、見る人に新たな体験や驚きを提供できる可能性がある。提案演出の概要を図 1 に示す。

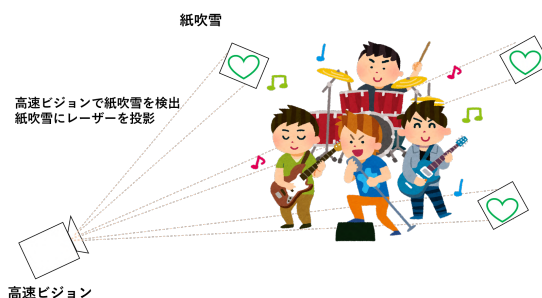


図 1: 提案演出の概要図

先行研究では、高速ビジョンで撮影した画像の中から、ある一定の値以上の部分を紙吹雪として検出している。しかし、ライブ会場のように周囲の明るさが変動する環境では、周囲の光の影響を受けてしまい、紙吹雪を安定して正確に検出することが難しいという課題があった。そこで本研究では、環境光の影響を受けにくくし、明所・暗所を問わず紙吹雪の安定した検出を行うために、紙吹雪にレーザーを投影する際に赤外光照明とロングパスフィルターを用いた結果について報告する。

## 2. システムの概要

高速ビジョンを用いて紙吹雪検出し、高速に制御されたレーザーで投影を行う。検出から投影までの遅延時間が長いと、紙吹雪が落下してしまい、レーザーの投影位置と実際の紙吹雪の位置がずれてしまう。そのため遅延時間を短縮し、落下中の紙吹雪の中心に正確にレーザーを投影することを目的とする。

### 2.1 高速ビジョンによる紙吹雪検出と画像処理

落ちる紙吹雪のように高速な物体を検出するために、最大 525fps で撮影できる高速ビジョンを使用している。レーザーを紙吹雪の中心に投影するには、紙吹雪の中心を求める必要がある。紙吹雪の中心座標は、高速ビジョンで撮影した画像を二値化し、OpenCV の findContours 関数を用

いて輪郭線の座標の抽出 [6] した後、その座標から中心を計算している。

また、高速ビジョンで紙吹雪を検出し、その紙吹雪にレーザーを投影するには、高速ビジョン画像上の座標と現実世界でのレーザーの投影座標の対応関係を計算する必要がある。今回必要な変換としては、高速ビジョン画像の座標系上で推定された紙吹雪の中心の推定座標をレーザー座標に変換する処理となる。対応関係の計算には、高速ビジョン画像とレーザーの投影面は同一平面上にあり、その平面上に紙吹雪があると仮定して、ホモグラフィ変換を使用している。ホモグラフィ変換行列は 4 点の対応から計算できるため、本研究では、ガルバノミラーの可動域の最大の 4 隅の 4 点に対しレーザーを投影し、その際の制御値と、その 4 点に対する高速ビジョン画像上の座標を記録。画像の 4 点の座標と、ガルバノミラーの可動域の最大の 4 隅の 4 点に対する制御値の 4 組の対応関係からホモグラフィ変換行列を計算する。このようにして求めたホモグラフィ変換行列を紙吹雪の中心座標に適応することで、レーザーの投影座標を求めている。

## 2.2 レーザーディスプレイ

紙吹雪にレーザーで模様を投影するためのシステムとして、レーザーディスプレイ [4] を使用している。これは、ガルバノミラーとレーザーによって構成されるものであり、X 軸ミラー・Y 軸ミラーの 2 枚のガルバノミラーを高速に動かし、レーザー光を制御することで、レーザー光の軌跡の残像を用いて模様を描画することができるというものである。本研究で用いたガルバノミラーシステムの概要を図 2 に示す。

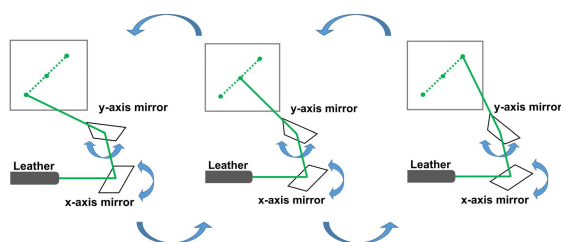


図 2: ガルバノミラーシステムの概略図 [4]

ガルバノミラーと、レーザーの ON/OFF の制御はイーサネット経由でホスト PC に接続されているマイクロコンピュータによって制御される。また、レーザーの投影座標を UDP 通信でホスト PC からマイクロコンピュータに送ることで、ガルバノミラーと、レーザーの ON/OFF の制御を高速に行っている。

## 2.3 システム構成図

システム構成図を図 3 に示す。システムの流れとしては、まず高速ビジョンで落ちてくる紙吹雪の画像を撮影し、ホスト PC でその画像から紙吹雪の輪郭を検出、そこから中心の座標を求め、レーザーを投影する座標に変換し、レー

ザーの ON/OFF の情報とともにマイクロコンピュータに値を送る。マイクロコンピュータでは、レーザーを投影する座標を DA Board におくり、DA Board では、レーザーを投影する座標の値から、電圧に変換し、電圧によってレーザーの出射方向を制御するガルバノミラーを制御する。そして、最後にマイクロコンピュータからレーザーの ON/OFF を制御する。これにより、紙吹雪の中心座標情報からレーザーの出射方向を制御することができ、紙吹雪への動的プロジェクションが可能となる。

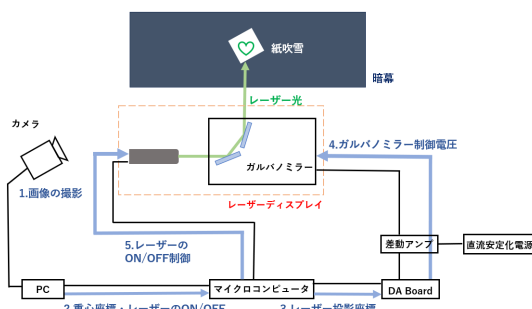


図 3: 先行研究のシステム構成図

## 3. 提案手法

本研究では、先行研究のシステムにロングパスフィルターを追加し、紙吹雪の落下範囲を赤外光照明で照らすことで、赤外光のみを透過し、高速ビジョンが赤外光以外の光の影響を受けないようにしている。提案手法のシステム構成図を図 4 に示す。

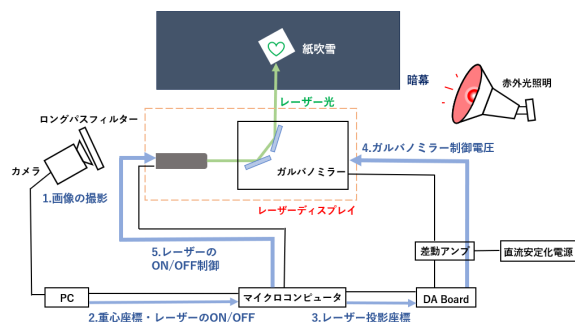


図 4: 提案手法のシステム構成図

## 4. 実験

この実験では提案システムを用いて、明所・暗所を問わず紙吹雪にレーザーを投影することが実現できるか確認する。紙吹雪は投影系から約 4m 離れたところにある暗幕の前で落とす。実験機材は以下に示す。

- 高速ビジョン：ac A720-520um (Basler)
- ガルバノミラー：GVS202 (Thorlabs)
- レーザー：DPSS ポインティング用レーザー 532nm x 10mW (EDMUND Optics)
- マイクロコンピュータ：Raspberry Pi 3 Model B+
- DA Board：Waveshare Raspberry Pi AD/DA Expansion

- アンプ : T-01LGAZ
- 直流安定化電源 : KX-S-100-L
- ホスト PC
  - CPU : intel®Core™i7-7800X CPU@3.50GHz

実験環境は図 5 に示す。

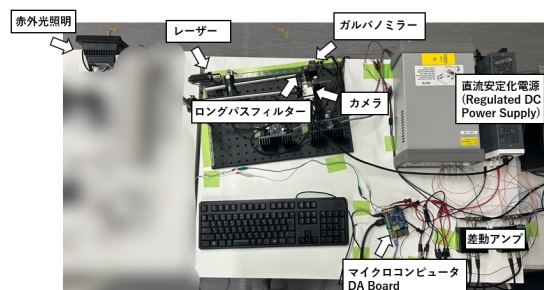


図 5: 実験環境

#### 4.1 実験結果

実験結果を図 6, 図 7 に示す。この結果から、提案手法により、明所・暗所を問わず紙吹雪にレーザーを投影することができるが確認できた。

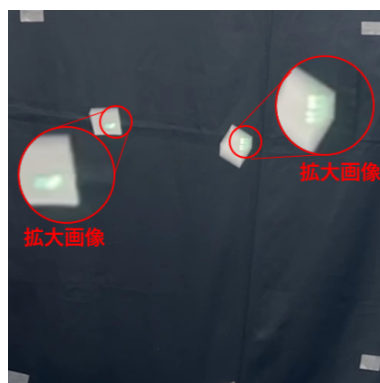


図 6: 明所での投影実験

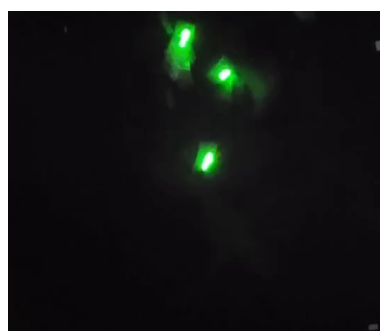


図 7: 暗所での投影実験

#### まとめ

本研究では、先行研究の高速ビジョンで紙吹雪検出し画像処理を行うプログラムと、レーザーディスプレイを用いた高速なレーザー制御を組み合わせたシステムに、ロングパスフィルターを追加し、紙吹雪の落下範囲を赤外光照明で照らすことで、環境光の影響を受けにくくし、明所・暗所を問わず紙吹雪の安定した検出できるか実験を行った。評価実験では、明所・暗所問わず安定した紙吹雪の検出を行い、そこにレーザーを投影できることを確認できた。

#### 謝辞

本研究の一部は JST CREST JPMJCR23B2, 未来社会創造事業 JPMJMI24H1, JSPS 科研費 JP24K02971, JP24K15843, 令和 4(2022) 年度～令和 6(2024) 年度群馬大学重点支援プロジェクト (G3), ならびに令和 7(2025) 年度群馬大学重点支援プロジェクト (G2) の支援を受けたものであり、ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] G. Narita Y. Watanabe and M. Ishikawa : "Dynamic Projection Mapping onto Deform-ing Non-rigid Surface using Deformable Dot Cluster Marker", IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, vol. 23, no.3, pp.1235-1248, 2017.
- [2] Y. Mikawa T. Sueishi and Y. Watanabe, and M. Ishikawa : "VarioLight: Hybrid Dynamic Projection Mapping Using High-speed Projector and Optical Axis Controller", SIGGRAPH Asia Emerging Technologies, no. 17, pp. 1-2, 2018.
- [3] 森久保優輝 橋本直己 : "Dynamic Projection Mappingのための輪郭に基づく反復計算によるロバストな位置姿勢推定", 第 24 下位日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5C-08, 2019.
- [4] 井内将俊 廣橋惟冬 奥寛雅 : "遠方を飛翔するスクリーンへの動的プロジェクションマッピングによる空中ディスプレイの提案", 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (VRSJ2022) / 予稿集, 1D4-3, 2022.
- [5] 地徳涼音 奥寛雅 : "紙吹雪への高速かつ動的なレーザーパターン投影による視覚効果付与手法の研究", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025(ROMOMECH2025) / 予稿集, 2A1-T05, 2025.
- [6] S. Suzuki and K. Abe : "Topological structural analysis of digitized binary images by border following", Computer Vision, Graphics and Image Processing", 1985.