



# ドローン動的投影に基づく空中ディスプレイの高精細化

High-definition aerial display based on drone dynamic projection mapping

廣橋惟冬<sup>1)</sup>, 奥寛雅<sup>2)</sup>

Yuito HIROHASHI and Hiromasa OKU

1) 群馬大学大学院理工学府 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, t231d061@gunma-u.ac.jp)

2) 群馬大学情報学部 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, h.oku@gunma-u.ac.jp)

**概要:** 近年、動的プロジェクションマッピングに基づく空中ディスプレイが提案され、先行研究では、3枚の鏡を用いた視線制御システムと単色のレーザーを組み合わせて、遠方を飛翔するドローンに吊り下げたスクリーンへの投影に基づく手法が提案されている。本発表では、先行研究で使用していたレーザーディスプレイを望遠投影レンズを有する高輝度プロジェクターに置き換え、投影像の高精細化を図った結果について報告する。

**キーワード:** 空中ディスプレイ, ダイナミックプロジェクションマッピング, プロジェクター

## 1. はじめに

近年、ドローンショーのような空中に映像を表現する技術が注目を集めている [1]。しかし、ドローンショーでは、ライトを搭載したドローンを数百機使用するため、莫大なコストがかかり、小規模なイベントなどでの活用が難しいという問題点があげられる。また、ディスプレイを搭載したドローンを用いた空中ディスプレイ手法の研究 [2][3] も行われているが、ドローン本体にディスプレイを取り付けるには、電源供給の問題や墜落時の安全性確保などの問題がある。

これに対し、我々の研究グループでは、遠方を動き回る対象への動的プロジェクションマッピングを可能にする投影機材を開発しており、空中ディスプレイの例として、単機のドローンに吊したスクリーンへの動的投影手法が提案されている [4]。この手法の概要を図 1 に示す。

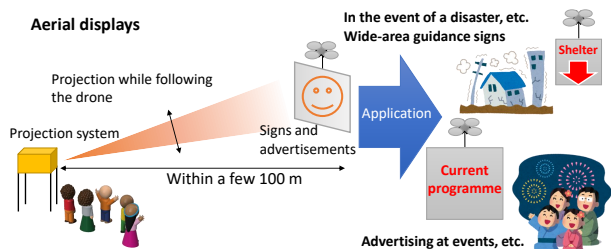


図 1: ドローンに吊したスクリーンへの動的投影手法の概要

また、この空中ディスプレイを実用化するにあたり、より安定した投影を行うことを目的とした研究として、スクリーンの中心を推定できるマーカーや、ドローンに吊すのに適した構造の球体スクリーンが提案されている [5]。

しかし、これらの先行研究では、単色のレーザーで生成した模様をスクリーンに投影していたため、高精細な映像

を映し出すことができなかった。そこで本研究では、先行研究で使用していたレーザーディスプレイを望遠投影レンズを有する高輝度プロジェクターに置き換え、投影像の高精細化を図った結果について報告する。

## 2. 提案システム

本研究では、先行研究で使用していた投影機材のレーザーディスプレイを、望遠レンズ付き高輝度プロジェクターに置き換えることにより、遠方を動き回る対象に高精細な映像を投影する手法を提案する。従来手法では 100m 以上遠方への投影をレーザーの持つ直進性を利用したレーザーディスプレイで実現していた。しかし、レーザーディスプレイで二次元的な面の映像を投影するためには高速な 2 次元走査が必要になる。この際に、投影像に十分な明るさを実現しようとする高出力のレーザーを利用することが必要となるが、アイセーフの観点から現状の法令下での高出力化は容易ではない。一方、一部の業務用プロジェクターは長距離投影用の望遠投影レンズを備えており、これを利用することでも 100m 以上遠方への投影が実現できることが見込まれる。例えば、望遠投影レンズ ELPLL08(EPSON) は適切なプロジェクターと組み合わせた際の最長投影距離が 161.74m となっており、100m 以上遠方へ投影が可能である [6]。このようなプロジェクターを利用すれば、実用的な解像度で二次元的な映像を投影することが可能となる。そこで、本研究では、このような望遠投影レンズを備えるプロジェクターをドローンに吊り下げられたスクリーンへの投影に利用する空中ディスプレイ手法を提案する。今回提案するシステムの構成図を図 2 に示す。

このシステムでは、カメラの視線方向を高速に制御する望遠 3 枚鏡方式視線制御システム [7] と呼ばれる機構を用いて、遠方を動き回る対象をカメラで追従して捉えている。

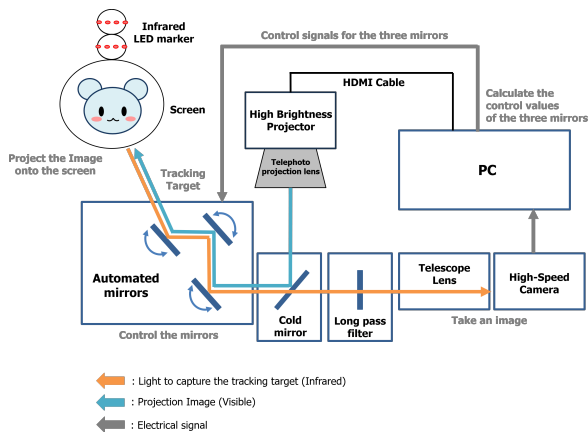


図 2: 提案システムの構成図

ここで、対象を追従する際は、ターゲットに取り付けた赤外 LED マーカーを目印にトラッキングを行っている。目印として赤外 LED を使用する理由は、効果的に投影できることが想定される時間帯が夕暮れから夜間であるためである。このとき、カメラが赤外光の重心を捉え続けるように 3 枚の回転鏡に制御値を送ることで、各ミラーの角度を調整してカメラの視線方向を制御している。望遠カメラの前方にはロングパスフィルターが取り付けられており、これにより、赤外光のみを透過し、カメラが赤外光以外の光の影響を受けないようにしている。

また、望遠 3 枚鏡方式視線制御システムを制御している PC のデスクトップ上の一部分を画面キャプチャした画像をプロジェクターで投影しており、投影像はコールドミラーを用いて反射させて、カメラの視線方向を制御している 3 枚のミラーに重ねる。これにより、カメラの視線方向にプロジェクターの映像を投影することが可能になる。なお、コールドミラーとは可視光のみを反射して赤外光のみを透過する特殊なミラーであり、このミラーを使用することにより、プロジェクターからの光の影響を受けずに、目印となる赤外光のみをカメラで捉えることができる。

### 2.1 望遠 3 枚鏡方式視線制御システム

望遠 3 枚鏡方式視線制御システム [7] は、Saccade Mirror3[8] という、3 枚の回転鏡を用いてカメラの視線制御を行う機構をもとに開発されたシステムである。このシステムの構成図を図 3 に示す。望遠 3 枚鏡方式視線制御システムは、望遠レンズが取り付けられた高速撮影カメラの前方に 3 枚の回転鏡 M1, M2, M3 が置かれた構造をしており、3 枚のミラーの回転角度を高速に制御してカメラに入る光の方向を変えることにより、本来固定されているカメラで空間中の異なる位置・視線に存在するときと同じ映像を撮影することができる。

### 2.2 トラッキングアルゴリズム

望遠 3 枚鏡方式視線制御システムは、追従するターゲットに取り付けた赤外 LED を目印にトラッキングを行っている。ここでは、図 4 のように、高速カメラで撮影した画像を 2 値化した際に、画像内の白色の領域の重心を常に高速カメ

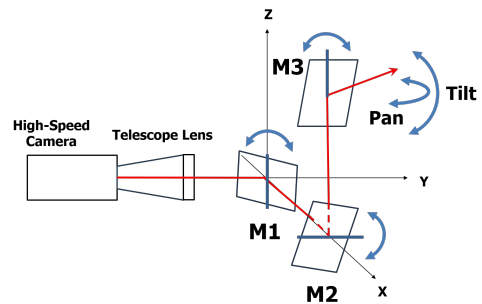


図 3: 望遠 3 枚鏡方式視線制御システムの構成図

ラの中心に捉え続けるように 3 枚のミラーの角度を調整してカメラの視線方向を制御している。3 枚の鏡の制御には、飯田らが提案した手法 [8] を使用しており、画像処理によって抽出された対象位置と画像内での対象の目標位置から画像内の位置偏差を求め、そこから鏡の角度を計算している。

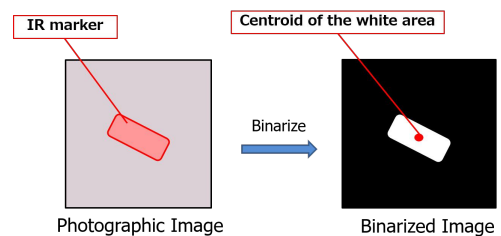


図 4: 撮影した画像の 2 値化と重心の算出

さらに我々の研究グループでは、テープ状に並んだ赤外 LED を 2 箇所に取り付けたものをトラッキングの目印として使用することで、そのマーカーをカメラで撮影した際に得られる画像の 2 つの赤外 LED の位置関係から、スクリーンの中心を推定する手法を提案・報告している [5]。この手法の概要を図 5 に示す。なお、 $D_0$  は「3 次元空間上でマーカーの赤外 LED 間を結ぶベクトル」、 $Y_0$  は「3 次元空間上でスクリーンの中心からマーカーまでを結ぶベクトル」、 $d$  は「カメラ画像上に写る 2 つの赤外光の重心間を結ぶベクトル」、 $y$  は「投影平面上のスクリーンの中心位置からマーカーまでを結ぶベクトル」を表している。

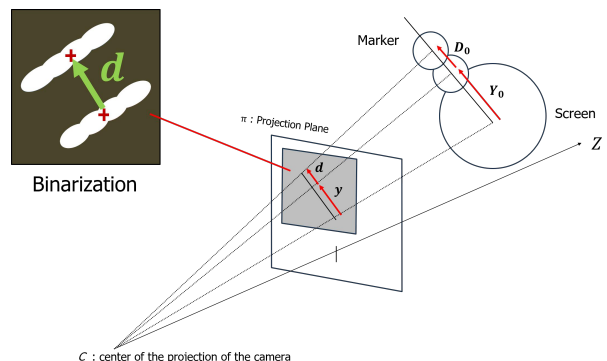


図 5: 2 つの赤外 LED を使用することでスクリーンの中心推定を可能にするトラッキング用マーカー

ここでは、スクリーンはカメラから見て遠方に存在する

ため、弱透視投影を仮定している。既知のベクトル  $D_0$  と  $Y_0$  からそれらの比  $k = \frac{\|D_0\|}{\|Y_0\|}$  がわかるため、弱透視投影による投影平面上のベクトル  $y$  は、カメラ画像上に映るベクトル  $d$  を用いて、以下の式 (1) のように表せる。

$$y = \frac{1}{k}d = \frac{\|Y_0\|}{\|D_0\|}d \quad (1)$$

ベクトル  $y$  が求まると画像内でのスクリーン中心位置がわかり、それからスクリーン中心に映像を投影するための方向が推定できるので、スクリーン中心に映像が投影できるようになる。このとき、マーカーをカメラで撮影した際に得られる画像において、2つの赤外光の重心をとり、さらにそれらの重心となる位置をトラッキングの中心としている。

### 2.3 プロジェクターの投影像

プロジェクターによって映像を投影する際の概要を図 6 に示す。

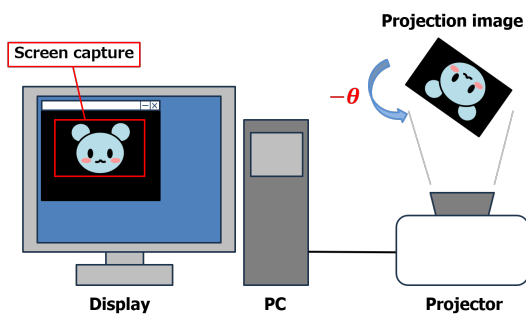


図 6: プロジェクターから映像を投影する際の概要図

ここでは、プログラム実行時にデスクトップ上の一部の領域をリアルタイムで画面キャプチャしており、プロジェクターで投影したい映像をその領域に入れることで投影像を決定している。プロジェクターは PC のデュアルディスプレイとして接続されており、キャプチャした像をプロジェクター側に映すことで投影を行っている。

ここで、プロジェクターから投影された像は、望遠 3 枚鏡方式視線制御システムの 3 枚の鏡の配置の影響により、実際に映像を見る人からは傾いて見えてしまう。そこで、本研究では樋口らによって開発された広範囲動的プロジェクションマッピングのための回転補正アルゴリズム [9] を使用して、ミラーの影響による投影像の傾き  $\theta$  を求め、それを打ち消す方向にキャプチャ画像を回転したものをプロジェクターから投影することで、3 枚のミラーで反射させた後も投影像の向きが正しくなるように補正を行った。

## 3. 評価実験

### 3.1 実験方法

提案システムにより、遠方を動き回る対象への高精細映像の投影が可能かを確かめるために、実際に評価実験を行った。ここでは、投影機材から約 16m 離れた位置で直径約 40cm のマーカー付き球体スクリーンを手で持ち上げて動かすことにより、提案システムの動作を確認した。

ここで、提案システムの外観を図 7 に、使用したスクリーンを図 8 に示す。なお、トラッキングの目印に使用したマーカーは、直径約 8cm の発泡スチロール球を 2 つ連結させ、各発泡スチロール球に赤外 LED テープを 1 つずつ巻き付けて作成しており、それを直径約 40cm の発泡スチロール球の上部に取り付けることで球体スクリーンの模型を作成している。

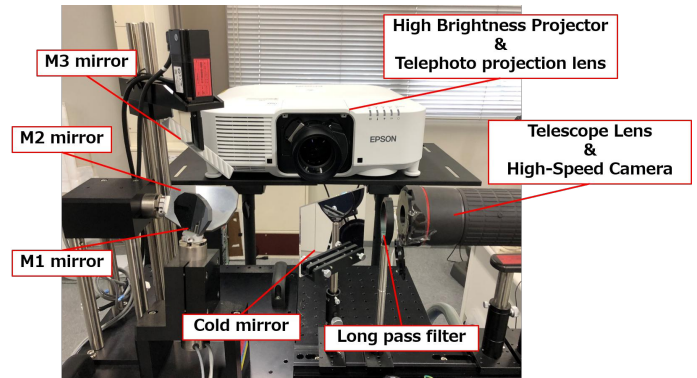


図 7: 提案システムの外観図

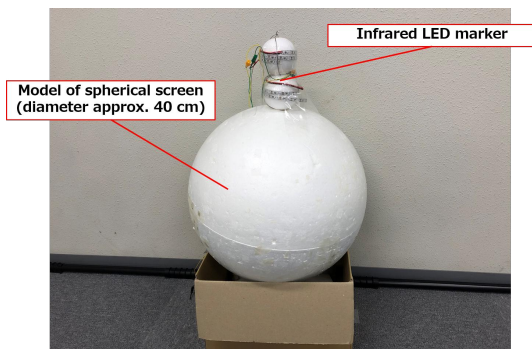
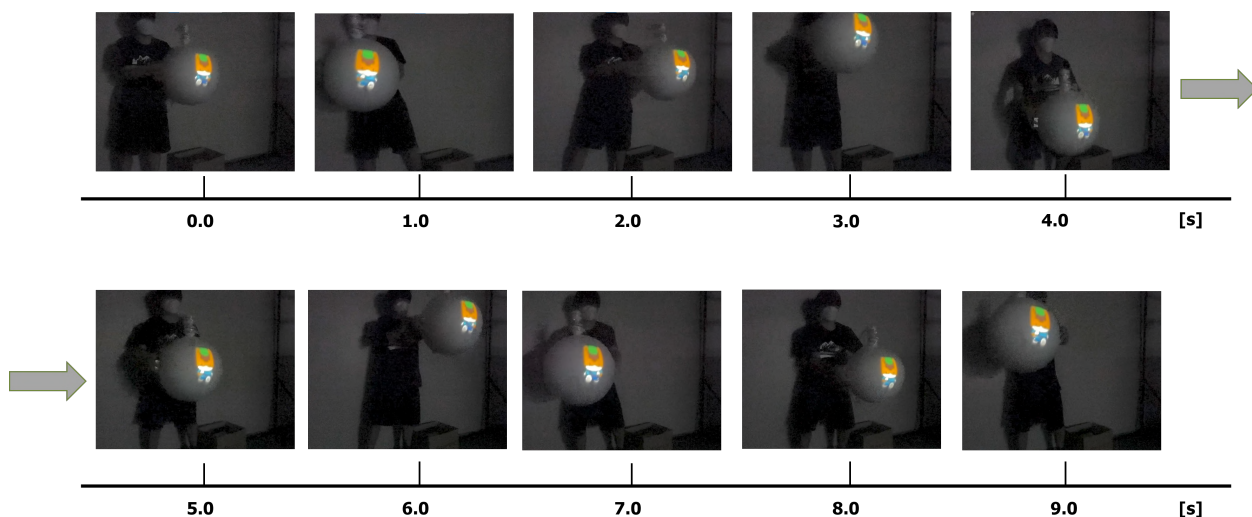


図 8: マーカー付き球体スクリーン (直径約 40cm)

また、実際に実験で使用した機材は以下のとおりである。

- 望遠 3 枚鏡視線制御システム
  - 制御用 PC : CPU:intel , Xeon E5-2634v4(3.4GHz), メモリ:64GB, GPU:NVIDIA Quadro M2000, OS:Windows11
  - カメラ : N-Box(Nac) 480 × 480,1000fps
  - 望遠レンズ : EDG65+FSA-L2 (ニコン)
  - M1,M2 スキャナー:6260H(ケンブリッジテクノロジー)
  - M3 ミラー : 独自に設計されたミラー, モーター : SGMAV-C2ADA21 (安川電機)
- プロジェクター
  - 高輝度プロジェクター : EB-PU1007W (セイコーエプソン)
  - 長焦点レンズ : ELPLL08 (セイコーエプソン)



©Gunma pref. GUNMACHAN,00433-01

図 9: 提案システムによる動的プロジェクションマッピングの結果

- スクリーン

- 赤外 LED テープ：高密度 8mm 幅 3528 赤外線 (850nm)，電圧仕様 DC12V (草心デジタル)
- 発泡スチロール球 (約 8cm × 2 および約 40cm × 1)

### 3.2 実験結果

提案システムを使用して、手動で動かしたスクリーンへの高精細映像の投影を行ったときの様子を図 9 に示す。この結果から、提案システムを使用することにより、遠方対象への高精細映像の動的プロジェクションマッピングが行うことができ、空中ディスプレイの高精細化も可能であるということが確認できた。

## 4. むすび

本研究では、ドローンを使用した動的投影による空中ディスプレイの高精細化を行うために、先行研究で使用していた投影機材の単色レーザーを、望遠投影レンズを有する高輝度プロジェクターに置き換えたシステムを提案した。提案システムを使用した投影実験では、遠方を動き回るスクリーンに対して高精細映像の動的な投影を行えたことから、空中ディスプレイの高精細化が可能であるということが確認できた。

**謝辞** 本研究の一部は JSPS 科研費 JP21H03458, JP20K20626, 23K18473, 令和 4(2022) 年度群馬大学重点支援プロジェクト (G3) の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Spectacular intel drone light show helps bring tokyo 2020 to life. <https://olympics.com/ioc/news/spectacular-intel-drone-light-show-helps-bring-tokyo-2020-to-life-1>, 2020. (最終閲覧日：2023 年 6 月 26 日)
- [2] W. Yamada, K. Yamada, H. Manabe, and D. Ikeda. Isphere: Selfluminous spherical drone display. In Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17, p. 635–643. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017. doi: 10.1145/3126594.3126631
- [3] H. Tobita, S. Maruyama, and T. Kuzi. Floating avatar: Telepresence system using blimps for communication and entertainment. CHI EA '11, p. 541–550. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2011. doi: 10.1145/1979742.1979625
- [4] Masatoshi Iuchi, Yuito Hirohashi and Hiromasa Oku, "Proposal for an aerial display using dynamic projection mapping on a distant flying screen", Proc. the 30th IEEE Conf. on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2023), March 2023.
- [5] 廣橋惟冬 奥寛雅, "動的投影による空中ディスプレイのためのマーカー付きスクリーン" ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演論文集, 2A1-I02, 2023.
- [6] セイコーエプソン, ELPLL08, <https://www.epson.jp/products/bizprojector/supply/other.htm#lens> (最終閲覧日：2023 年 7 月 4 日)
- [7] 小笠原健 飯田和久 奥寛雅, "高速・高解像度望遠計測のための 3 枚鏡方式視線制御システムの試作" ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演論文集, 2A1-L17, 2018.
- [8] 飯田和久 奥寛雅, "3 枚の回転鏡を用いた高速かつ広範囲な視線制御機構用ミラーの開発" ロボティクス・メカトロニクス講演論文集, 2A1-19b5, 2016.
- [9] S. Higuchi and H. Oku, "Wide angular range dynamic projection mapping method applied to drone-based avatar robot," Advanced Robotics, vol. 35, no. 11, pp. 675–684, 2021.