



投影像の傾き補正機能を有するドローンと高輝度プロジェクターによる空中ディスプレイ

Aerial Display using Drone and High-Brightness Projector using Tilt Control of Projected Image

廣橋惟冬¹⁾, 奥寛雅²⁾

Yuito HIROHASHI and Hiromasa OKU

1) 群馬大学大学院理工学府 (〒 371-0044 群馬県前橋市荒牧町 4-2, t231d061@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: 我々の研究グループではドローンと動的投影技術を用いた空中ディスプレイが提案されており、先行研究では高輝度プロジェクターを用いた遠方スクリーンへの動的投影手法が開発された。また、これと並行して単色レーザーと IR マーカーを用いた、スクリーンの中心推定の原理も提案されている。本研究では、この IR マーカーとプロジェクターを組み合わせ、スクリーンの傾きに合わせた投影像の制御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る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。

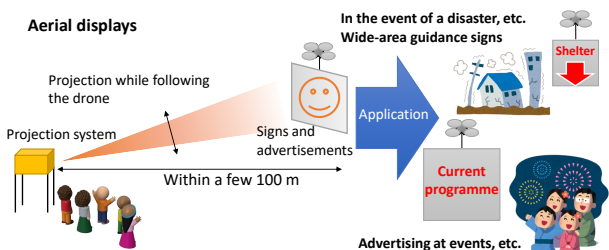


図 1: ドローンに吊るしたスクリーンへの動的投影手法の概要

先行研究では、遠方を飛翔するスクリーンへの投影方法として、望遠投影レンズを有する高輝度プロジェクターを使用した遠距離動的投影手法が提案されている [5]。なお、ここではスクリーンの傾きを考慮しておらず、スクリーンが

傾いた際に、投影像がスクリーンからはみ出してしまうという問題があった。

また、これと並行して、飛翔するスクリーンへの投影の安定化を目指した研究として、スクリーンの中心を推定可能なマーカーや、ドローンに吊る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]。

本研究では、高輝度プロジェクターによる遠距離動的投影手法と IR マーカーによるスクリーンの中心推定手法を組み合わせ、スクリーンの傾きに応じたプロジェクター像の投影位置の制御を図った結果について報告する。

2. 投影システム

まず、飛翔するスクリーンへの動的投影を行うための投影システムの構成図を図 2 に示す。

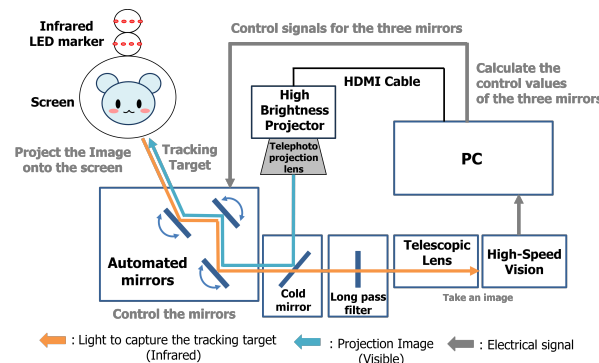


図 2: 遠距離投影システムの構成図

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 [6] と呼ばれる機構を用い

て、遠方を動き回る対象を 1000fps 程度の撮像と高速画像処理が可能な高速ビジョンで追従して捉えている。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、高速ビジョン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高速ビジョンの視線方向を制御している。望遠レンズ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、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。

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 のディスプレイ上的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、高速ビジョン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、高速ビジョン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、高速ビジョンが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捉えることができる。

また、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。ここでは回転補正アルゴリズム [7] によって求めた、ミラーの影響による投影像の傾き θ を打ち消す方向に投影像を回転させることで、投影像の向きが正しくなるように補正を行っている。

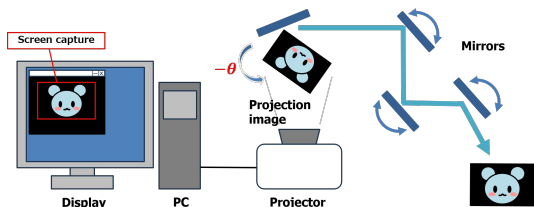


図 3: プロジェクターから映像を投影する際の概要図

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 [6] 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 4 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ビジョンの前方に 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高速ビジョン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高速ビジョンで空間中の異なる位置・視線に存在しているときと同じ映像を撮影することができる。

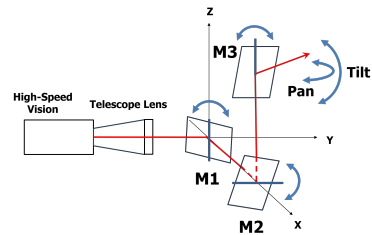


図 4: 望遠 3 枚鏡方式視線制御システムの構成図

3. スクリーンの中心推定を行うトラッキングマーカー

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、そのマーカーを高速ビジョン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 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 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。

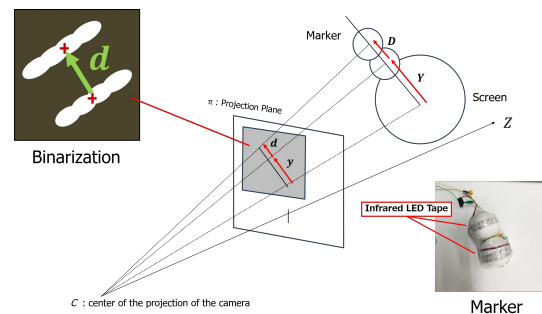


図 5: マーカーによるスクリーンの中心推定の概要

ここでは、スクリーンは高速ビジョン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 と Y からそれらの比 $k = \|D\|/\|Y\|$ 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。

$$y = \frac{1}{k} d = \frac{\|Y\|}{\|D\|} d \quad (1)$$

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、図 6 のようにマーカーを高速ビジョン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。

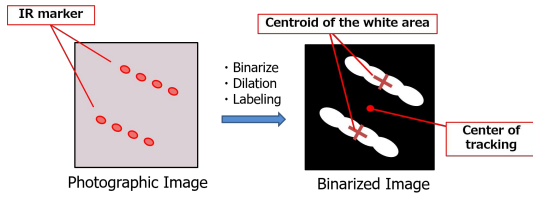


図 6: 撮影した画像の 2 値化と重心の算出

ここでは、2つの赤外光領域の重心を常に高速ビジョン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高速ビジョン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。

具体的な中心推定の方法としては、基準値の設定として、まずはじめに投影像を高速ビジョンの視線方向に合わせ、マーカーをトラッキングした後、投影像をスクリーン中心へ手動で移動させる。このとき、投影平面上における移動方向のベクトル y_0 (投影像をマーカーからスクリーン中心に手動で移動させるのに必要な移動量) および、カメラ画像上の2つの赤外光の重心間を結ぶベクトル d_0 の情報を保持しておき、それらの絶対値と逐次更新されるベクトル d を用いてスクリーン中心までのベクトル y を $y = (||y_0||/||d_0||)d$ のように求めている。

4. 提案手法

先行研究では、プロジェクターを利用していた際に常にマーカーの真下に投影像が映るようにしていたが、本研究ではマーカーによるスクリーンの中心推定の原理を用いて、スクリーンの中心位置にプロジェクター像を投影できるようにソフトウェア実装を行った。プログラム処理の概要を図 7 に示す。

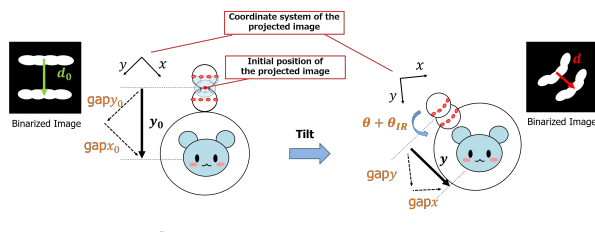


図 7: 提案手法の概要図

ここでは、はじめにマーカーに投影像を合わせてトラッキングした後、プログラム実行時に表示されるスライダーを用いて投影像をスクリーンの中心まで移動させる。このとき、投影像の座標系において、マーカーからスクリーン中心までのベクトルを y_0 、 x 軸方向の移動量を $gapx_0$ 、 y 軸方向の移動量を $gapy_0$ とする (つまり、 $y_0 = (gapx_0, gapy_0)^T$)。このとき、初期状態としてカメラ画像上に写る2つの赤外光の距離 $||d_0||$ 、および $gapx_0$ 、 $gapy_0$ の値を保存する。

次に、スクリーンが傾いた場合、投影像の座標系におけるマーカーからスクリーン中心までのベクトルを y 、 x 軸方向の移動量を $gapx$ 、 y 軸方向の移動量を $gapy$ 、カメラ画像上の赤外光の距離を $||d||$ とすると、中心推定の原理の式 $y = (||y_0||/||d_0||)d$ および、 $y = (gapx, gapy)^T$ の事実より、 $gapx$ 、 $gapy$ はそれぞれ $gapx_0$ 、 $gapy_0$ を用いて $gapx = (gapx_0/||d_0||)||d||$ 、 $gapy = (gapy_0/||d_0||)||d||$ と表せる。

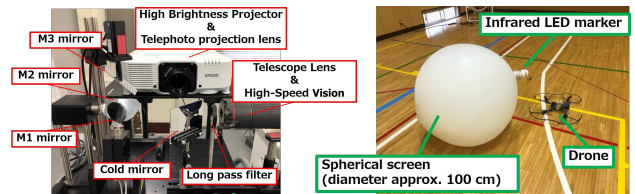
これらの値を用いて、投影像をマーカーの中心位置から $gapx$ 、 $gapy$ だけ移動させた位置に表示し、さらにマーカーを軸に「ミラーの回転補正角度 $\theta + 2$ つのマーカーが成す角度 θ_{IR} 」分だけ投影像の座標系を回転させることで、スクリーンの中心位置への投影を可能にしている。

本研究における先行研究の差分としては、プロジェクターによる投影を行った場合でもスクリーンの中心を推定して投影位置を制御できるようになった点、および投影距離を原理検証時の約 16m から約 30m に伸ばし、実際にドローンに吊るした投影を行うことで本手法による空中ディスプレイの有効性を実証した点である。

5. 評価実験

5.1 実験方法

提案手法により、ドローンに吊るしたスクリーンの傾きに合わせて投影を制御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、図 8(b) のように、ドローンに 12V の電源を載せ、約 100cm の大きさのバルーンの上にマーカーを取り付け、図 8(a) の投影機材から約 30m 離れた位置を飛行する球体スクリーンへの投影実験を行った。ここで、スクリーンとマーカーは、ドローンから垂らしたステンレス製の長さ約 80cm のワイヤーで吊るし、電源とマーカーを導線でつないだ。電源は、1.5V の単三電池を 8 本使用した電池 BOX をドローンの上部に載せている。実験環境を図 9 に示す。



(a) 投影システムの外観図 (b) マーカー付きスクリーンをワイヤーで吊るしたドローン

図 8: 実験機材

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

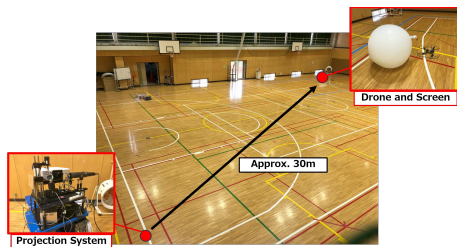
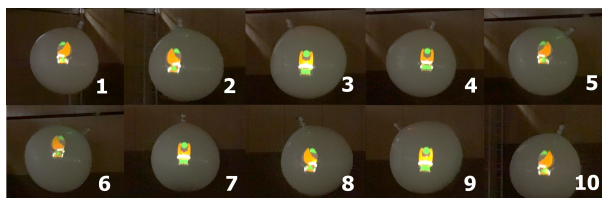


図 9: 実験環境

- 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)
- スクリーンおよびマーカー
 - ジャイアントバルーン ホワイト 72” (180cm) (キッシーズ)
 - 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)
- ドローン
 - DJI Mavic 3

5.2 実験結果

投影実験の結果を図 10 に示す。この結果から、提案手法により、遠方を飛翔するスクリーンに対して、その傾きに応じた投影像の制御が行えることが確認できた。



©Gunma pref. GUNMACHAN,00433-01

図 10: 投影実験の結果

6. 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を実現するために、先行研究で開発された高輝度プロジェクターによる長距離動的投影手法と、トラッキング

用 IR マーカーによるスクリーンの中心推定手法を組み合わせることで、スクリーンの傾きに応じたプロジェクター像の投影制御を可能にした。評価実験では、約 30m 先を飛翔するスクリーンに対して、スクリーンが傾いた場合でも投影像をスクリーン内に留めることができることを確認した。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP24K02971, JP23K18473, JST CREST JPMJCR23B2, 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。また、実験に協力していただいた山本真平さんをはじめとする研究室メンバーの皆様にご心より感謝申し上げます。

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 : 2024 年 6 月 30 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] Yuito Hirohashi and Hiromasa Oku: Aerial Display Method Using a Flying Screen with an IR Marker and Long Range Dynamic Projection Mapping, SIGGRAPH Asia 2023 Posters (SA '23) (International Convention Centre (ICC), Sydney, Australia, 2023.12.13-15), Article 2, 1–2. [doi:10.1145/3610542.3626123]
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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.