This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2022 年 9 月）

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

Proposal for an aerial display using dynamic projection mapping on a distant flying screen

井内将俊 1), 廣橋惟冬 2), 奥寛雅 2)
Masatoshi IUCHI, Yuito HIROHASHI, and Hiromasa Oku

1) 群馬大学大学院（〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, t211d009@gunma-u.ac.jp）
2) 群馬大学（〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1）

概要: 本研究では，高速視線制御系とレーザーディスプレイを組み合わせ，遠距離の動的対象にプロジェクションマッピングを行うことで空中ディスプレイを実現する手法を提案する．この手法は，飛翔するドローンに吊り下げられたスクリーンにプロジェクションマッピングを行って空中ディスプレイを実現するものである．実際に試作システムを用いて約 36m 先の遠方を飛翔するドローンに装着したスクリーンに動的プロジェクションマッピングを行った結果から，提案手法が空中ディスプレイを実現する原理として有効であることを示す．

キーワード： 空中ディスプレイ，プロジェクションマッピング，トラッキング

1. はじめに

SF の世界では空中に映像を出現させる技術が描かれることが多く，現実の世界でもこのような技術の実現に向けて様々な手法が検討されている．注目を集める手法として，ドローンを用いた空中映像表示が挙げられる．例えば，Intel 社では Shooting Star[1] という高輝度な LED を搭載した小型ドローンを大量に飛行させ，空間に 3 次元映像を表示する技術を発表している．この技術は東京オリンピック 2020 の開会式でも使用され，大きな注目を集めた．他には，株式会社 NTT ドコモでは，残像ディスプレイを用いた浮遊球状ドローンディスプレイ [2] を開発しており，球状のディスプレイを空中に浮かし映像を表示させることができる．

また，近年では動的なプロジェクションマッピングを用いた演出も注目を集めている [3][4][5]．樋口らによって開発された，広角度範囲の動的プロジェクションマッピングを用いたドローン型アバターロボット [6] では，サッカードミラー 3[7] という高速視線制御系を用いて，ドローンに括り付けたバルーンを対象として広範囲かつ高速に動的プロジェクションマッピングを行っている．もしドローンに大きなスクリーンを吊るして飛翔させ，そこに映像を投影することができれば，大型の空中ディスプレイが実現できることが期待される．この場合，投影機材からドローンまでの距離は近くても数 10m 程度，遠い場合は数 100m に及ぶと考えられる．しかし，このように遠方を移動する対象に追従して映像を投影することは既存技術では難しかった．

これに対し我々の研究グループでは，遠方への動的プロジェクションマッピング手法を研究・開発している．この手法は望遠レンズとサッカードミラー 3 を組み合わせた望遠 3 枚鏡方式視線制御システム [8] と，レーザーディスプレイに基づくものであり，これまでは実験室内で 10m 程度離れた，人間が把持して動かすスクリーンへの映像投影に成功したことを報告している [9]．

本発表では，この遠方への動的プロジェクションマッピング手法によりドローンに吊るされたスクリーンへ映像を投影する，新たな空中ディスプレイを提案する．さらに投影機材から約 36m 先の遠方を飛翔するスクリーンを対象とした動的プロジェクションマッピング実験を行い，提案手法が空中ディスプレイの実現に有効であることを検証した結果を報告する．

2. 遠方への動的投影による空中ディスプレイ

本研究では，ドローンに吊るされたスクリーンに，地上に置かれた機材から映像を投影することで空中ディスプレイを実現することを提案する．提案する空中ディスプレイの概要を図 1 に示す．

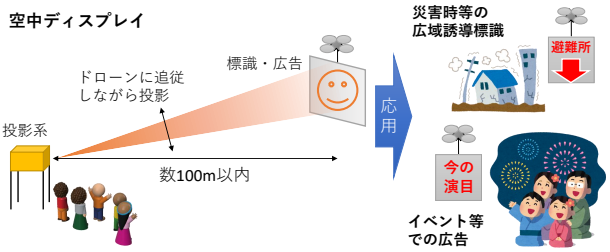


図 1: 空中ディスプレイの概要

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

ドローンを用いた他の方式としては，ドローン自体にディスプレイを搭載して飛翔させる手法も提案されているが [2]，ドローンから電源供給が必要となり，ドローンの限られた電源容量がさらに少なくなるという問題に加え，ドローンが担う質量が重くなり墜落時の安全性確保が難しくなるとうい問題もある．一方，提案手法はドローンは柔らかく軽量のスクリーンのみを担えばよいため，墜落時の安全性確保は容易であることが期待される．また，投影機材は地上にあるため，その電源確保は容易である．

提案する空中ディスプレイにおいて，映像の投影は，望遠 3 枚鏡方式視線制御システムを用いて遠方の対象をトラッキングし，レーザー光による動的プロジェクションマッピングを行うことで実現する．空中ディスプレイシステム全体の構成図を図 2 に示す．

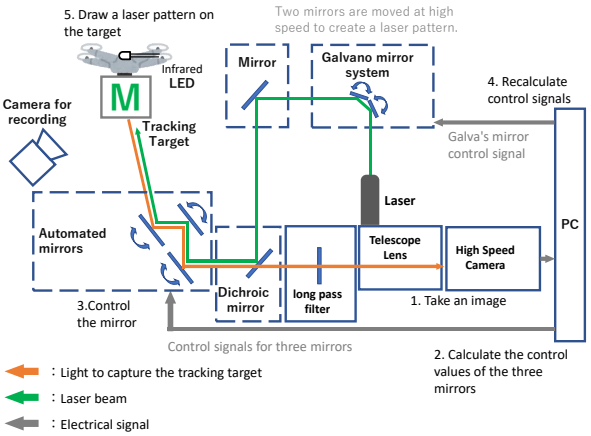


図 2: 空中ディスプレイシステムの構成図

システムの動作の流れを順に説明する．まず高速カメラが望遠レンズを通して遠方の追従対象の画像を取得し，対象が画像中央に来るように，3 枚の回転鏡それぞれの制御値を求め，3 枚の鏡を動かし対象のトラッキングを行う．これにより，対象はその位置によらずに常に高速カメラの視野内に追従される．

これとは独立に，レーザー光による投影像の形を制御する X 軸，Y 軸のガルバノミラーシステムにも PC から制御値が送られる．この制御値はレーザーディスプレイに描く投影像を制御する値であり，どのような形にレーザーを動かすか制御し，投影像の形の切り替えや，投影像の回転角の制御に使用する．

最後に，レーザーディスプレイ用ガルバノミラーシステムで形が制御されたレーザー光を，ダイクロイックミラーを用いて高速カメラの視線方向に重ねる．これにより，レーザー光の投影領域は常に高速カメラの視野とほぼ同じ範囲となり，遠方の移動対象に追従する動的なプロジェクションマッピングが可能となる．

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 [8] は，小笠原らによって開発された，望遠カメラとサッカードミラー 3[7] を組み合わせたシステムであり，大きく分けてカメラ，望遠レンズ，3 枚の回転鏡から構成される．システムの構成図を図 3 に示す．M1 と M2 が主にチルト方向，M3 がパン方向の制御を担い，この 3 枚の回転鏡を制御することで視線制御が可能となる．なお，チルトとパンの 2 方向の制御に対して 3 枚の鏡を使用する冗長な構成となっているのは，M1 もしくは M2 を固定した際にパン・チルト方向のどちらかしか制御できなくなる特異姿勢が存在するためである．望遠 3 枚鏡方式視線制御システムにより，遠方の物体を対象とした高速かつ広範囲の視線制御を行うことが可能となる．

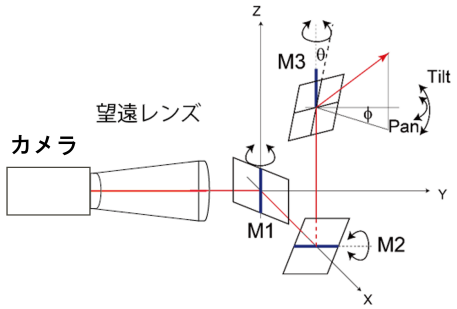


図 3: 望遠 3 枚鏡方式視線制御システムの構成図 [8]

2.2 レーザーディスプレイ

本研究では X 軸 Y 軸の 2 枚のガルバノミラーシステムとレーザーを組み合わせたレーザーディスプレイにより，レーザー光を用いた投影像作成を行い，プロジェクションマッピングを行った．本研究で用いたレーザーディスプレイの概要を図 4 に示す．図 4 では，右斜め上の直線をレーザー光を用いて描画する例を示している．図 4 のように，レーザーディスプレイは 2 つの回転鏡を使用し，レーザーから放射される光の方向を高速に制御する．高速制御の結果レーザー光は残像を残して高速に移動し，指定した形の投影像を映し出すことができる．ガルバノミラーと，レーザー出力の ON/OFF 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．

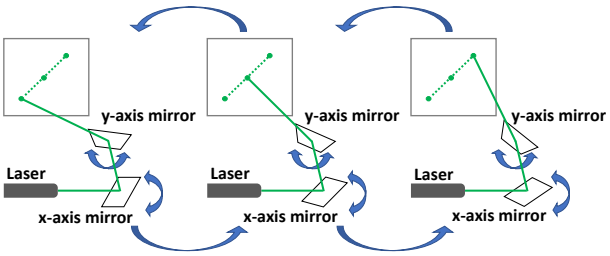


図 4: レーザーディスプレイの概要図

レーザーディスプレイ投影対象を図 5 に示す．本研究ではガルバノミラーシステムにより，レーザー光による投影像がアルファベットの「M」に見えるように制御し，小型ドローンへ吊るしたスクリーン上に投影されるように調整した．また，トラッキング用の目印として赤外 LED を使用し

ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会

た為，赤外 LED をドローンの端へ固定している．

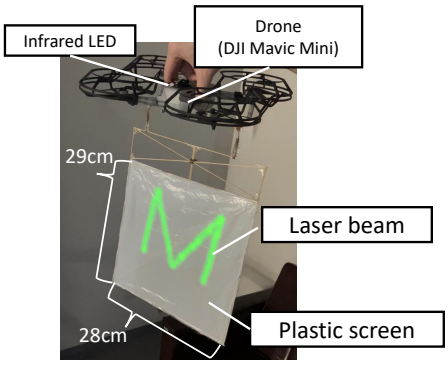


図 5: レーザーディスプレイ投影対象

2.3 トラッキングアルゴリズム

本研究では小型ドローンへ赤外の LED を取り付け，その光をトラッキングの目印として使用した．高速カメラで取得した画像中央へ赤外 LED の光の重心が移動するように，望遠 3 枚鏡方式視線制御システムの 3 枚の回転鏡の角度を制御し，対象のトラッキングを行う．目印としている赤外 LED 以外の光がカメラに入ることでトラッキングが乱れることを防ぐために，高速カメラの手前にはロングパスフィルターを設置し，赤外の光のみ高速カメラへ届くようにした．なお，先述の通りカメラの視線方向とレーザーの投影方向は同時に制御されるため，動的プロジェクションマッピングのための投影光軸の制御はつまり，カメラの視線方向の制御である．回転鏡の制御はサッカードミラー用に開発されたビジュアルサーボアルゴリズムで実現した [7].

また，3 枚の回転鏡の配置による影響でレーザーによる投影像の基底ベクトルは現実世界の天地・水平方向の軸とは一致せず回転補正を行う必要がある．本研究での回転補正は広角度範囲の動的プロジェクションマッピング用に開発されたアルゴリズム [6] を使用した．

3. 評価実験

3.1 試作した空中ディスプレイシステム

以上の構成に従って空中ディスプレイシステムを試作した．試作したシステムの写真を図 6 (a), (b) に示す．また，システムを構成する要素の詳細を表 1〜表 3 に示す．

3.2 実験方法

試作したシステムを用いて遠方対象への動的プロジェクションマッピングが可能か実験し，検証する．投影を行う対象は．システムから約 36 m 離れた位置を飛翔するドローンに吊るしたスクリーンとし，ドローンを上下左右へ操作することで動的なプロジェクションマッピングが行えているかを確認する．トラッキングはドローンに取り付けた赤外 LED の光を目印として行い，レーザー光による投影は目印となる LED の数十センチ下に映るように調整した．実験環境を図 6 に示す．

表 1: 3 枚鏡方式視線制御システム

種目	機材名
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 (Nikon)
M1,M2 用 スキャナ	6260H(Cambridge Technology)
M3 の鏡	鏡は独自設計 モーターは SGMAV-C2ADA21 (安川電機)

表 2: レーザー制御システム

種目	機材名
レーザー	DPSS ポインティング用 レーザー 532nm x 10mW
ダイクロイック ミラ-	50mm × 50mm 45° GREEN DICHROIC FILTER (EDMUND Optics)
ロングパス フィルター	透過阻止帯 (nm) 200 - 735 透過帯 (nm)765 - 1650 (edmund optics)
ガルバノミラー レーザー 制御用マイコン	mbed1768
XY ガルバノミラー システム	6215H, φ 5mm (Cambridge Technology)

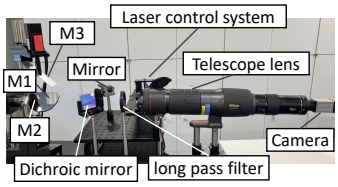
表 3: 追従対象

種目	機材名
ドローン	DJI Mavic Mini
トラッキング用赤外 LED	OSR6LU5B64A-5V 630-650nm
記録用カメラ	デジタルスチルカメラ DSC-RX10M2 (Sonny)

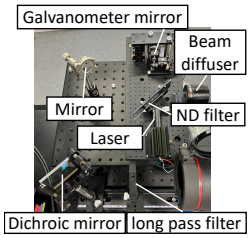
3.3 実験結果

実験を行った際に記録用カメラで撮影した映像を 0.5 秒おきに画像化したものを図 7 に示す．図 7 に示すように，ドローンが移動しても投影が行えていることが確認できる．よって，提案手法によりレーザーディスプレイを用いた遠方の動的対象へのプロジェクションマッピングが行えることが確認できた．

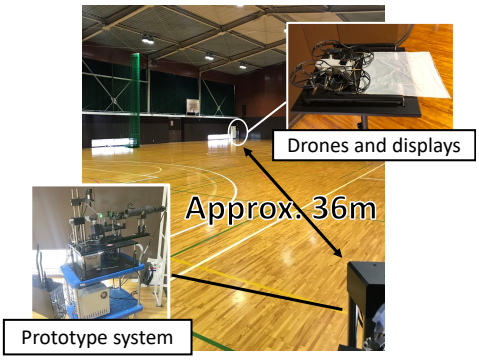
ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会



(a) システムの概要



(b) レーザー制御システム



(c) システムおよび投影対象

図 6: 実験環境

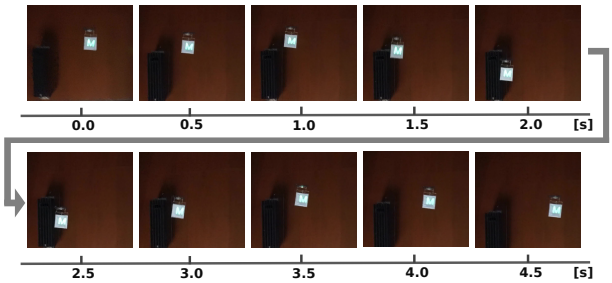


図 7: 動的プロジェクションマッピングの結果

4. むすび

本研究では，高速視線制御系とレーザーディスプレイを組み合わせ，遠距離の動的対象にプロジェクションマッピングを行うことで空中ディスプレイを実現する手法を提案した．約 36 m 先を飛翔するドローンに吊るしたスクリーンへ動的プロジェクションマッピングを行う実験より，提案手法が空中ディスプレイを実現できることを確認した．今後はスクリーンの大型化並びに投影距離の延長，またレーザーディスプレイの高精細化・カラー化に取り組む予定である．

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP21H03458, JP20K20626 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Intel, “Intel® Shooting Star™ System,” https://www.intel.com/content/www/us/en/technology-innovation/shooting-star-system.html, (2022 年 7 月 12 日アクセス)

[2] 山田渉, “浮遊球体ドローンディスプレイ,” 映像情報メディア学会誌, vol. 72, no. 4, 2018.

[3] G. Narita Y.Watanabe and M. Ishikawa, “Dynamic Projection Mapping onto Deform- ing Non-rigid Surface using Deformable Dot Cluster Marker,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 1235-1248, 2017.

[4] 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.

[5] 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 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5C-08, 2019.

[6] S. Higuchi and H. Oku, “Wide angular range dynamic projection mapping method applied to drone-based avatar robot,” *Advanced Robotics*, vol. 35, issue. 11, 2021.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 井内将俊 樋口詩乃 奥寛雅, “レーザーディスプレイを用いた遠方の動的対象へのプロジェクションマッピング手法の基礎検討,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演論文集, 2P2-F03, 2022.

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会