



立体物への遠距離動的投影を目的とした赤外マーカの試作

高橋杏実¹⁾, 奥寛雅²⁾

1) 群馬大学 情報学研究科 (〒 371-8510 群馬県前橋市荒牧町 4-2 荒牧キャンパス, j241a013@gunma-u.ac.jp)

2) 群馬大学 情報学部 (〒 371-8510 群馬県前橋市荒牧町 4-2 荒牧キャンパス, h.oku@gunma-u.ac.jp)

概要: 近年, 数 10m 以上遠方の対象に動的なプロジェクションマッピング行う手法が提案されている. しかし, このような遠距離にある対象の姿勢計測にはまだ課題があり, 対象の位置・姿勢 6 自由度すべてに整合する投影はまだ実現されていない. この問題の解決を目的として, ArUco マーカの原理と赤外光源を組み合わせた遠距離用赤外マーカを試作した. 本発表では, 30m 先の立体物姿勢推定で評価した結果を報告する.

キーワード: 計測・認識, 立体・空中像ディスプレイ, 拡張・複合現実, プロジェクションマッピング

1. はじめに

近年, ドローンやロボットを対象とした空中映像表現や空間演出において, 動的なプロジェクションマッピング技術が注目を集めている. 中でも, 数十 m 以上離れた対象物に対して投影を行う遠距離投影は, 都市スケールの演出や大型展示への応用が期待されている. こうした遠距離投影, 特に立体物への遠距離投影においては, 対象の 6 自由度の位置・姿勢を高精度に計測する必要がある. しかし, このような遠距離にある対象の姿勢計測には, 対象の形状計測に使える解像度が不足する傾向にあるなどの課題が残っており, 対象の位置・姿勢 6 自由度すべてに整合する投影はまだ実現されていない.

本研究では, 遠距離での位置姿勢推定用マーカの基礎的な検討として, 既存の Aruco マーカと赤外光源を組み合わせたマーカを試作し, 約 30m 先の遠距離環境での認識性能について実験的に評価した.

2. 関連研究

視覚マーカを用いた姿勢推定は, 拡張現実やロボティクスなど幅広い分野で利用されている. 特に, ArUco マーカ [1] や AprilTag [2] などの可視光マーカは, 近距離から中距離において高い認識性能を示すが, 夜間や暗所といった低照度環境, あるいは 10 m 以上の遠距離環境では認識精度の低下が指摘されている.

視覚マーカは, 大きくわけて, 外部照明に依存するパッシブマーカと, 自身が光源を有して発光するアクティブマーカに分けられる. 特にプロジェクションマッピング用途における利用を考えると, 投影が観察者に見やすい夜間や暗所での実施が求められることが想定される. そのため, 低照度環境でも認識できるアクティブマーカ方式の利用が適する. また, マーカを可視光で発光させると投影映像への干渉が発生し, 映像表現の品質を損なうので, 非可視光の利用が適しており, 特に既存の撮像素子でも比較的感度よく計測可能な近赤外光の利用が適していると考えら

れる.

赤外光を利用した 6 自由度姿勢推定の研究として, たとえば Hashimoto らは, 単一の赤外カメラとエッジ検出手法により, 動的対象物の 6 自由度推定とリアルタイムプロジェクションマッピングを実現している [3]. また, Tone らは, 3D プリント物体に赤外 LED と光ファイバーを組み合わせ, ID 情報も含めた姿勢推定が可能なアクティブ IR マーカの実装例を示している [4]. しかし, これらの既存手法はいずれも, 室内程度の空間での検証が主であり, 遠距離の状況は想定されていない.

そこで, 本研究では, 特に数十 m 以上の遠距離にある対象の位置・姿勢推定を最終的な目標とした. 本発表では, その基礎的な検証として, 既存の ArUco マーカの構造をもつ赤外アクティブマーカの位置姿勢推定性能を評価した結果を報告する.

3. 投影システム

本研究で使用する投影システムは廣橋らによって提案された, 遠方対象への動的プロジェクションマッピングを実現するためのシステムである [5]. システムの構成図を図 1 に示す.

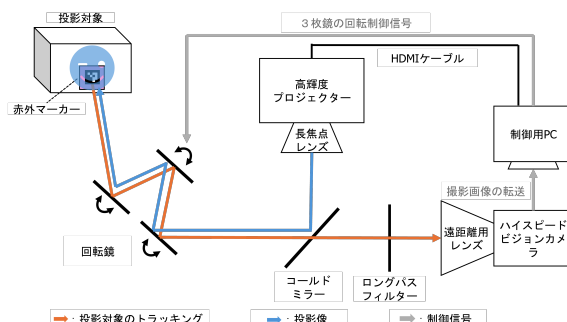


図 1: 投影システムの概要図

本システムは主に望遠 3 枚鏡視線制御システム [6], 高輝度プロジェクター, ならびにそれらを統合制御する機器に

によって構成される。

望遠 3 枚鏡視線制御システムは、Saccade Mirror3[7] と呼ばれる 3 枚の回転鏡を用いた視線制御機構と高速ビジョンおよび望遠レンズから構成されるシステムである。望遠レンズを取り付けた高速ビジョンの前方に配置された回転鏡 M1, M2, M3 の回転角を制御することで、カメラ本体を動かすことなく視線方向を高速に制御することが可能となっている。

高速ビジョンは、遠方の追従対象に取り付けられた赤外光源を望遠レンズ越しに撮像する。そして、その赤外光の重心が画像中央にくるよう 3 枚の鏡の回転角を逐次制御する。鏡の制御には、飯田らが提案した視線制御手法 [7] を採用している。

一方、コールドミラーを用いることで、高輝度プロジェクターからの可視光を反射し、赤外光を透過させている。これにより、プロジェクターの投影方向と高速ビジョンの視線方向とを一致させることができ、高速ビジョンがプロジェクターからの光の影響を受けることなく赤外光のみを安定して捉えることが可能となる。

また、望遠 3 枚鏡の構造上、プロジェクターから投影された像は観測者から傾いて表示される。この傾きを補正するために、ミラーによって生じる投影像の傾き θ を推定し、プロジェクター映像に逆回転を加えることで正しい向きに補正を行っている。なお、この補正角は回転補正アルゴリズム [8] によって計算されている。

4. 評価した赤外アクティブマーカー

4.1 ArUco マーカー

ArUco マーカー [3] は、正方形の外枠と内部に配置された 2 進数パターンから構成される視覚マーカーである。ArUco マーカーの外観を図 2 に示す。



図 2: ArUco マーカーの外観

各マーカーは一意な ID を持ち、コンピュータビジョン技術を用いて画像中からの検出と識別が可能である。検出されたマーカーの四隅のコーナー座標と、マーカーの物理的な大きさに基づき、透視変換を利用することで、マーカーに対するカメラの位置および 6 自由度の姿勢を推定することができる。

4.2 試作した赤外アクティブマーカー

赤外 LED アレイと ArUco マーカーを組み合わせることで赤外アクティブマーカーを開発した。試作したマーカーの外観を図 3 に示す。

また、赤外マーカーに使用した主な材料を以下に示す。本



(a) マーカーの正面外観 (b) マーカーの側面外観

図 3: 赤外アクティブマーカーの外観

マーカーの外形寸法は約 46 mm × 72 mm であり、ArUco パターンの大きさは 45 mm 角である。

- 赤外 LED：OptoSupply OSI5LA5453B（波長 940 nm）
- 拡散材：白色半透明テープ
- 透過基板：透明アクリル板 2mm 厚
- 表面パターン：ArUco コードを印刷した普通紙をセロハンで貼ったもの
- 電源：DC 12V（電池から供給）

赤外 LED は指向性が強く、マーカー姿勢に依存してカメラからの見え方が大きく変わってしまうことがあった。そこで本研究では、各赤外 LED の前面に白色のテープを貼付することで光を拡散し、各光源を一樣な輝度分布に近づけた。また、赤外 LED の前面にアクリル板を取り付け、その表面に ArUco マーカーを印刷した紙を貼付する構造とした。背面から赤外光を照射することで、パターン全体が均一に照らされ、画像上でマーカーの形状が明瞭に浮かび上がるように設計している。加えて、マーカーを対象物に手軽に着脱できるよう、背面にはマジックテープを用いた固定機構を採用した。これにより、現場環境や対象形状に応じた柔軟な設置が可能である。

5. 評価実験

5.1 実験方法

試作した赤外アクティブマーカーが遠距離で認識可能かを評価するため実験を行った。実験環境を図 4 に示す。



図 4: 実験環境

また、実験に使用した機材を以下に示す。

- 望遠 3 枚鏡視線制御システム
 - － 制御用 PC
 - * CPU : intel, Xeon E5-2634v4(3.5GHz)
 - * メモリ : 64GB
 - * GPU : NVIDIA Quadro M2000
 - * OS : Windows11
 - － カメラ : N-Box(Nac)
 - * 解像度 : 480 × 480
 - * フレームレート : 1000fps
 - － 望遠レンズ : TS C シリーズ 固定焦点レンズ 100mm
 - * F 値 : 2.8
 - － 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 : ELP1L08 (セイコーエプソン)
- 赤外アクティブマーカー : マーカーパターン 45 mm 角および 93 mm 角

本研究では 2 つの赤外アクティブマーカーを試作し、それぞれのマーカーの検出率及び姿勢推定の精度をそれぞれ評価した。1 つ目のマーカーは一で述べたマーカーを単体で使用了。これを以降マーカー 1 とする。2 つ目のマーカーは 4 つのマーカー 1 を、2 × 2 の配置で並べ、1 つのマーカーとして扱った。これによりマーカーパターンのサイズ拡大を図った。これを以降マーカー 2 とする。

マーカーの検出率は撮影した 500 フレームに対し、マーカーが検出されたフレーム数をカウントし算出した。また、姿勢推定の精度は対象の実際の姿勢とマーカー情報から算出された姿勢角度を比較した。

5.2 実験結果

まず、検出率に関する実験結果を図 5 に示す。

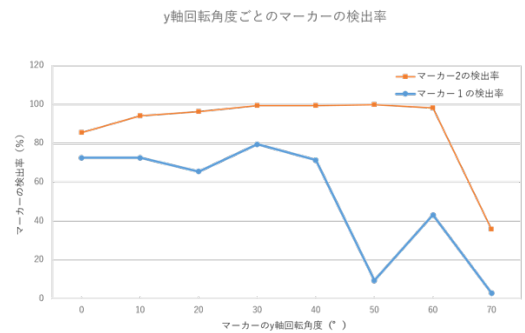


図 5: マーカー 1 および 2 の検出率

この結果から、マーカーパターンの拡大によって視野角変化に対する検出の安定性が向上したことを確認した。また、2 つのマーカーに共通して回転角が 70 度を超えると検出率が低下することを確認した。

次に、マーカー 2 の姿勢推定の精度に関する実験結果を図 6 に示す。

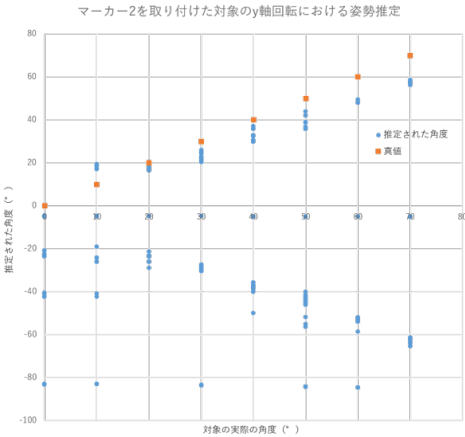


図 6: マーカー 2 の姿勢推定精度

図 6 より、姿勢推定の精度は十分でないことを確認した。また、一部の推定結果において、真値と符号が逆転したデータが確認された。これは単一マーカーの使用における、推定 z 軸方向の反転が原因だと考えられる。

6. むすび

本研究では、6 自由度での姿勢計測をしながら遠距離での動的投影を実現するために、ArUco マーカーの原理と赤外光源を組み合わせた遠距離用赤外マーカーを試作した。評価実験では、約 30 m 先の 93 mm 角のパターンを持つ赤外アクティブマーカーが回転角度 60 度まで安定して検出可能であることを確認した。しかし、精度については十分でなく、課題があることを確認した。

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] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín-Jiménez, M. J. (2014). "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion." Pattern Recognition, 47(6), 2280-2292.

[2] Olson, E. (2011). "AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system." In Proceedings of the IEEE

- International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3400-3407.
- [3] Hashimoto, K., Asayama, Y., Sato, T., & Iwai, D. (2017). "Dynamic Projection Mapping with a Single IR Camera." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(3), 1220-1228.
- [4] Tone, K., Saito, S., Yamaguchi, Y., Koyama, Y., & Igarashi, T. (2020). "FibAR: Embedding Optical Fibers in 3D Printed Objects for Active IR Markers." In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '20)*, pp. 1196-1207.
- [5] Masatoshi Iuchi, Yuito Hirohashi, Hiromasa Oku: Proposal for an aerial display using dynamic projection mapping on a distant flying screen (Conference Paper, 採択率約 21%) *Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2023)* (Online/Pudong Shangri-La Hotel, Shanghai, China, 2023.3.28) / *Proc. IEEE VR 2023*, pp. 603- 608
- [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] 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] 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.