

# 赤外線 LED を用いた複数のジャグリング用リング向け トラッキング手法の提案および視覚効果生成への応用

伊藤花<sup>1</sup> 松永明佳<sup>1</sup> 福地健太郎<sup>1</sup>

**概要:** 本研究では、複数のジャグリング用リングを対象とした、高速点滅赤外線 LED による識別型トラッキング手法を提案する。従来の再帰性反射材を用いた受動的な手法ではリング同士の識別が困難で、リングの追跡が不安定であった。本手法では、各リングに無線での遠隔操作で点灯させられる赤外線 LED をマーカーとして 3 点配置し、高速度カメラのシャッタータイミングと同期させて点灯・撮影することで、マーカーがどのリングに属するかをフレーム単位で判別する。マーカーの消灯時は前後のフレームから位置を補間処理することで安定した追跡を実現した。2 人によるリングトスを用いた評価では、リングが交差する場面でも追跡が安定して行えることを確認した。またリングの回転方向および速度を反映した映像エフェクト生成が可能となり、従来の演技では観客が認知できなかった、リングの回転を視覚化した新しい表現の開発を可能とした。

## 1. 導入

ジャグリングや道具を用いたダンスなどでは道具の軌跡をトラッキングし、それに応じて映像や照明をリアルタイムに連動させる試みが数多く行われてきた。こうした取り組みは、パフォーマンスの臨場感を高め、観客に新しい視覚体験を提供するものである。特に、プロジェクションマッピングやインタラクティブ映像演出の発展に伴い、トラッキング技術はアートとテクノロジーを融合させる重要な要素となっている。[1]

しかし、これまでの研究や実践例の多くは、トラッキング対象の位置検出に特化している。例えばボールやクラブ、ヨーヨーの場合、カメラ映像から検出された道具の重心位置を追跡し、その位置を用いた演出が試みられてきたが、道具そのものの回転運動を検出する手法はあまり議論されていない[1][2]。

道具の回転運動は、特にボールやヨーヨー、今回我々が対象としているリングにおいては、そもそも観客からは見えにくい。そのため、観客に見せるためにあえて道具を必要以上に回転させるという演出は通常行われない。しかしヨーヨーやリングにおいては、演者の力量次第では高速回転や回転方向の使い分けなどをする余地があり、もしこれらの運動を観客に対して可視化することができれば、これを新たな演出として組み込むことが可能となる。

回転運動を検出するためには、個々の道具に複数のマーカーを付与する必要があるが、カメラに映る複数のマーカーがそれぞれどのリングに属するかを識別しなければならない。そこで本研究では、無線通信により点灯タイミングを操作できる赤外線 LED マーカーを用い、リングごとに点灯タイミングを変え、それを高速度カメラで撮影・解析

する方法を実装した。これにより、複数のリングの回転方向および速度を高精度に捉え、その情報をリアルタイムに映像演出へ反映させることが可能となった。

## 2. 背景・関連研究

ジャグリング道具のトラッキング技術としては、再帰性反射材と赤外線ライトを組み合わせる手法が用いられることが多い[3][4]。この方式は薄くて小さな再帰性反射材をマーカーとして用いるため、道具への改変を最小限に抑えられる一方で、個々のマーカーを遠距離から識別するのは困難である。そのため複数の道具の同時トラッキングにおいては認識されたマーカーの対応づけ処理が必要となり、マーカーの数が増えると処理負荷が増えるという問題がある。本研究で対象とするリングは外径 32.7cm、内径 25.3cm 円環形であり、またその回転運動の検出を目的としているため、安定した検出のためには複数のマーカーをリング上に配置する必要がある。しかし複数のリングを同時に追跡するには、どのマーカーがどのリングに属するかを特定する必要がある。

リアルタイム演出システムではプロジェクションマッピングにおける遅延低減手法など、動的な映像生成に関する研究が多数報告されている。たとえば“Juggling the Effects of Latency”[2] では、プロジェクタ・カメラ系における遅延の影響を、運動予測を用いて低減し、動く物体に対する投射精度・インタラクティブ性の向上に貢献している。しかし、これらの研究はいずれも道具の回転運動は検出していない。

複数マーカーの識別手法として、高速に点滅する赤外線 LED をマーカーとして用い、それぞれに固有の点滅パター

ンを割り当てる手法が提案されており、産業用ロボットや AR 分野で実用化が進んでいる[5][6][7]が、ジャグリングの道具のトラッキングへこれを応用した事例は報告されていない。

### 3. 提案手法

#### 3.1 目的

本研究では、複数のリングの位置および回転を追跡するために、無線通信で点灯タイミングを制御できる赤外線 LED をマーカーとしてリングに付与し、リングごとに点滅タイミングを変化させることで、同一リング上のマーカー群を識別可能にする手法を採用する。この方式により、点灯しているマーカーはすべて同一のリングに属していることが保証されるため、リングの識別は容易である。また、リングの形状は既知であるため、認識されたマーカー群からリングの位置も容易に推定できる。一方で、今回実装した赤外線マーカーは、無線通信のための部品やバッテリーなどの重量があるためリングが重くなり、また重量バランスを損ねてしまい、ジャグリングの支障となりうる問題がある。

これらの点を踏まえうえで、本研究では次のような構成によってトラッキングシステムを設計した。

#### 3.2 システム構成

今回構築したトラッキングシステムの概要を以下に示す。またシステム構成図を図 1 に示す。

ジャグリングで用いる各リングには、無線 LAN 制御の赤外線 LED マーカーを各 3 個ずつ取り付けて使用する。同一のリングに属するマーカーには同じ ID が割り振られている。また、後述する理由により、それぞれのリングと同じ ID を割り振った参照用マーカーをリングの数だけ用いる。この参照用マーカーは、カメラ視野内で、リングの動作範囲から外れた、既知の場所に固定設置する。

LED マーカーの位置測定には、赤外線を撮影可能な高速度カメラを用いる。またこのカメラのシャッタータイミング同期のために、やはり無線 LAN 制御のマイコンボードを接続する。

カメラの映像は PC で取り込み、PC 上で動作するソフトウェア群によりマーカーの位置検出および各リングの位置および回転を認識し、またそれらの情報を利用して映像効果を生成する。映像は、同じ PC に接続したプロジェクターを用いて舞台上に設置したスクリーンに投影する。リングと生成した映像との位置合わせは事前に行っておく。

PC と各マーカーおよびカメラ制御用マイコンボードは同じ無線 LAN に接続し、後述するように動作開始時に PC より同期用信号を送信する。

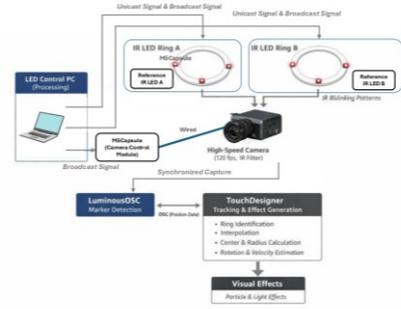


図 1 システム構成図

#### 3.3 赤外線マーカーとカメラについて

各赤外線マーカーは、赤外線 LED および制御用マイコンボードからなる。赤外線 LED は波長 880nm、大きさ 5mm $\phi$  の砲弾型のものを 4 個用い、動作確認用の可視光 LED 1 個を含む計 5 個の LED を搭載した基板を作成し、マイコンボードに接続して用いた。マイコンボードには M5Stack 社製 M5Capsule を用いた。M5Capsule は 2.4GHz Wi-Fi での無線接続が可能で、また公称容量 250mAh のリチウムイオンバッテリーを搭載している。マーカー 1 個あたりの重量は 23.3g である。このマーカーを、リング 1 つにつき 3 個搭載した。同一のリングに付与されたマーカーには同一の ID を与えた。

全体の点滅同期はブロードキャスト通信により行う。制御 PC から無線 LAN を通じて、点灯されるマーカーの ID を通知する。各マーカーは、自身の ID が通知された ID と同じであるときに、8.33 ミリ秒のあいだ赤外線 LED を点灯する。このとき、同じ ID を持つ参照用マーカーも同時に点灯することとなる。

撮影には The Imaging Source 社製の高速度カメラ DBK 33UX287 を使用した。同カメラの解像度は 640 $\times$ 360 ピクセルで最大 540fps でグローバルシャッターによる撮影ができる。カメラのシャッタータイミングと赤外線マーカーの点灯タイミングを同期させるため、同カメラのトリガ端子にやはり M5Capsule を接続し、点滅開始の同期信号を受信後、M5Capsule 内部のタイマーを用いて 120Hz でカメラヘトリガを送信するようにした。

このとき、リングに付加されたマーカー側で赤外線 LED に電流を印加し、LED が最大輝度で点灯するまでには若干の時間がかかる。そのため、カメラのシャッターを切るタイミングは、信号を受け取ってからやや遅らせる必要がある。今回はこれを手動で調整した。

#### 3.4 LED 点滅によるリング識別

今回の実装では、カメラ制御用の M5Capsule とリングに取り付けた各マーカー制御用 M5Capsule との同期は起動直後に行った後、PC との同期信号のやりとりはないため、カメラで撮影されたマーカー群がどのグループに属するものであるかは別途情報を得る必要がある。そのため、

各リングに対応する参照用マーカーをリングの数だけ使い、リングと同じタイミングで点灯する。参照用マーカーはカメラ視野内で固定された位置に設置し、撮影フレームごとにどのグループ（点滅パターン）が点灯しているかを基準として、同一リング上の LED 群を判定する。これにより、複数のリングが近接したときでも、どの LED がどのリングに属するかを正確に対応づけることができる。この仕組みによって、リングごとのマーカー識別を安定させるとともに、後段の幾何学計算（中心点・半径・回転方向）の信頼性を向上させることが可能となった。



図 2 使用したリングとマーカー

今回の実験では、使用したリングは2個で、それぞれのマーカーは交互に 60Hz で点灯する。

### 3.5 データ処理および演出生成

撮影映像からのオブジェクト検出には LuminousOSC を使用し、得られた座標データを OSC 通信を介して TouchDesigner へ送信した。TouchDesigner 側では、以下の処理を行った。

- フレームごとに参照用マーカーの点灯状態を判定
- 点灯しているフレームではオブジェクトの座標を保存し、点灯していないフレームでは、直前のデータを補間する
- 各グループのマーカー3点の位置から、リングの中心座標・半径・回転方向・回転速度を算出

この計算結果を基に、リングの動きに同期した映像エフェクトをやはり TouchDesigner で生成した。本実験では、リングの回転速度および回転方向に応じた演出を実装した。具体的には、リングの中心位置からパーティクルを発生させ、回転方向に合わせてパーティクルの挙動を変化させるとともに、回転速度に応じてパーティクルの発生量を増減させることで、リング特有の回転運動を視覚的に強調した。

## 4. 実験

### 4.1 実験内容

本研究で提案したリングトラッキング手法の有効性を検証するため、以下の装置構成および条件で実験を行った。

2人の演者によって2パターンのリングトスを実施し、提案手法における空中でのトラッキングの安定性を評価した。①リングを1枚ずつ連続で投げる方法と②リング2枚を同時にお互いに投げる方法である。各条件につき25回の投擲を行い、1試行あたりのトラッキング成功率を算出した。ただし現在の実装では、使用機器を長く動かすと M5Capsule の内蔵タイマーのずれが蓄積し動作が不安定になるため、5回に1回タイマーをリセットしている。トラッキング結果は TouchDesigner (120fps 目標設定) 上でリアルタイムに監視し、リングがトスされて空中にある間の全フレームのうち、トラッキングが途切れたフレーム数をカウントすることで安定性を評価した。なお、評価対象を空中にある状態に限定した理由は、リング上の赤外線 LED が遮蔽された場合にトラッキングが乱れることが避けられないためである。特に、1人の演者が2枚のリングを手を持っている状況では、リング同士が重なったり、演者の体に隠れてしまいカメラに映らなかったりするため、この問題が高い確率で発生する。トラッキング不能となる原因が明確であることから、これらの状況は本実験の評価対象から除外した。

### 4.2 結果

提案手法を用いた実験により、2人がリングトスを行う状況でも空中では安定したトラッキングが可能であることを確認した。①2枚のリングを1枚ずつ連続で投げたときの25試行のトラッキング成功率の平均は97.30%であった。また、②リング2枚を同時にお互いに投げた時、25試行のトラッキング成功率の平均は94.77%だった。以上の結果から、どちらの2条件でも実用上十分な安定性を示し、またトラッキングが乱れても①の条件では平均5.76フレーム、②では平均4.08フレームで回復していた。その際 TouchDesigner のフレームレートは90-100Hz で動作し続けていた。また、追跡結果を表示する際、リングの中心からパーティクルを噴射するエフェクトを作成し、リングの回転方向や速度に応じてエフェクトが変化していることを確認することが出来た。

本手法によって得られた情報をもとに、以下のような演出が可能となった。

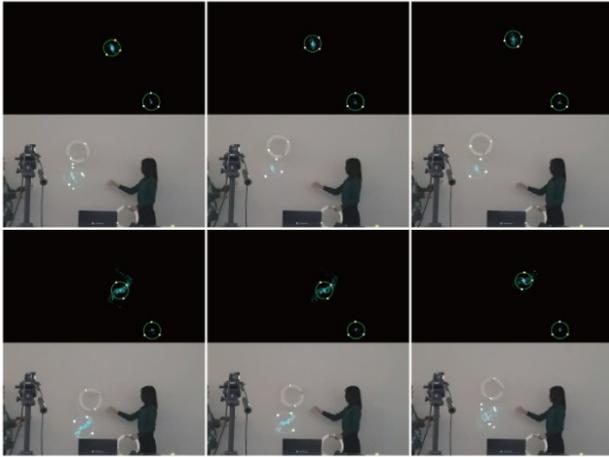


図3 リング1個のトラッキングの様子。左上から右下にかけて時間が推移している。各コマの上段は TouchDesigner の画面に表示された映像効果のみを示しており、下段は別途設置した高速度カメラ(120fps)で撮影した実際の様子を示している。

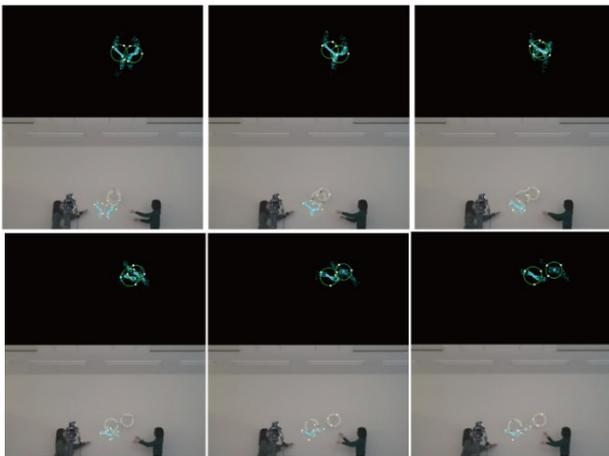


図4 リング2個でのトラッキングの様子。

- リングの回転方向に応じてエフェクトの量を変化させる
- 回転速度に応じて発光やパーティクルの強度を変化させる
- 炎や雪などの粒子エフェクトを回転に追従させる演出

## 5. 議論

本実験の結果より、提案手法はリングが空中に存在する状態において高い割合で安定したトラッキングが可能であることが確認された。ただし、一部のフレームではトラッキングが不安定となるケースが見られたため、その原因について考察する。

2つの実験条件（連続投擲および同時交差投擲）のい

れにおいても、トラッキング失敗の主な原因は LED マーカーの遮蔽であった。今回構築したプログラムでは、円を構成する3点のマーカー座標が取得できなかった場合、円の中心と半径を計算できないため、前フレームの座標を保持する補間処理を行っている。しかし、実験中にこの補間処理が有効に機能していたケースは、①の条件では失敗94フレームのうち2フレームで、②の条件では失敗81フレームのうち12フレームであり、多くの場合は誤った円が生成されていた。その際、本来除外されるべき参照 LED を含めて円が構成されているケースが多く観察された。参照 LED は LED マーカーのペア識別処理後に除外する設計であるため、この挙動は想定外である。これについては M5Capsule の内蔵タイマーの乱れにより、参照 LED が本来のペアではないタイミングで検出された可能性が考えられる。その結果、参照 LED が正しく除外されず、誤った円検出につながったと推測される。今回の実験では、点滅開始時にのみ同期を行いその後は内蔵タイマーに基づいて制御する実装方式を用いたため、このようなことが起こってしまった。現在はこれを改善し、毎フレーム同期を行う方式の実装を進めている。

また、リング同士の重なりが発生していない状況においてもマーカーが検出されないケースが確認された。これは、今回使用した赤外線 LED の指向性が強く、リングの傾きによって撮影された LED の光量が低下し、LuminousOSC においてオブジェクトとして検出されなかったことが原因であると考えられる。LuminousOSC では検出対象の大きさや輝度の閾値を調整可能であるが、過度に感度を高めると、ノイズやリング表面で反射した光まで検出してしまい、誤認識が増加するという問題がある。そのため、単純な閾値調整のみでは根本的な解決には至らない。

これらの課題を踏まえると、今後は先行研究で用いられている軌道予測アルゴリズムの導入や、ソフトウェア的なマーカーのグループ化手法を組み合わせることで、遮蔽や一時的な検出失敗に対する耐性を高める必要がある。

演出面では、回転速度を強調するエフェクトが観客に対して動きの理解を促すことが確認された。なお、2人が交差動作を行う場面では、各リングの軌跡が重なるため、演出が複雑に見える傾向があった。これを活かし、投げ合いと単独動作で異なるエフェクトを切り替える構成を設けると、より動きのコントラストが際立つと考えられる。

さらに、回転を演出に取り入れることで、新しい表現や演技構成が生まれる可能性がある。例えば、リングを高く投げ上げた際の回転速度を可視化することで、観客が「速い」「遅い」といった運動の質を直感的に感じ取ることができる。これにより、従来の演技では見えなかった部分を演出として表出させることが可能になる。

今後は、ジャグリング公演などで観客アンケートを実施し、どのエフェクトが最も印象的であったか、演技理解に

どの程度寄与したかを評価する予定である。

## 6. 結論

本研究では、赤外線高速点滅 LED による識別を用いた複数リングのトラッキング手法を提案し、その有効性を実験的に確認した。

本手法により、リングの識別、中心座標、半径、回転速度、回転方向を安定的に取得することが可能となった。さらに、得られた情報をもとに、リングの回転情報を活かしたリアルタイム映像演出を実現できることを示した。

この手法は、ジャグリングや舞台演出における新しい表現方法を創出し、演者の動きを拡張的に見せるインタラクティブアートとして応用可能である。今後は、システムの軽量化および複数枚のリング間の同期精度向上を目指し、より高次のリアルタイム演出へ発展させることを目指す。

## 参考文献

- [1] TEDx Talks, "Real-time motion graphics to redefine the aesthetics of juggling | Jonglissimo | TEDxLinz", YouTube, 2018 年 4 月 7 日, [https://www.youtube.com/watch?v=Zm\\_oy1m-g3k](https://www.youtube.com/watch?v=Zm_oy1m-g3k) (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
- [2] Knibbe, J., Benko, H., & Wilson, A. D. Juggling the Effects of Latency: Software Approaches to Minimizing Latency in Dynamic Projector-Camera Systems. UIST '15 Adjunct: Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. (2015). pp.93-94
- [3] Low-latency localization by Active LED Markers tracking using a Dynamic Vision Sensor Andrea Censi, Jonas Strubel, Christian Brandli, Tobi Delbruck, Davide Scaramuzza
- [4] Nakazato et al., "A Localization System Using Invisible Retro-reflective Markers" (MVA 2005)
- [5] T. Hara, C. Toyono, T. Tachikawa, G. Motai, K. Shuto, M. Danjo, H. Uchiyama, and S. Yoshimura, "An LED-Marker-Based Augmented Reality Guide System for Museums," IEEJ J. Electron. Inf. Syst. (電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌)), vol. 133, no. 1, pp. 54–60, Jan. 2013, DOI: 10.1541/ieejieiss.133.54.
- [6] R. Anand, "Glitter: A Robust and Lightweight Marker for Optical Motion Capture," Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), 2020. [Online]. Available: <https://rahul-anand.github.io/assets/pdf/glitter20.pdf>
- [7] L. Gorse, C. Löffler, C. Mutschler, and M. Philippsen, "Optical Camera Communication for Active Marker Identification in Camera-based Positioning Systems," 2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), pp. 1–7, 2018.