

空間描画のための投擲型残像ディスプレイの設計と実装

桑原 大樹^{1,a)} 小川 剛史^{2,b)}

概要：本稿では、残像効果を用いることで空中に映像を提示する投擲型ディスプレイを提案する。提案システムは、ボールをプロジェクタから映像を投影するスクリーンとして利用するのではなく、残像を提示するための視覚刺激装置として利用することで、情報提示できる領域を空間に拡張している。デバイス内部にはボールの運動状況を計測するセンサを内蔵し、ボールの運動に応じてデバイス表面に配置した LED の点滅を制御する。実験により、投擲型残像ディスプレイの実現可能性について検討を行った。

キーワード：ボール型ディスプレイ, 空中像ディスプレイ, 残像効果

Design and Implementation of Throwable PoV Display for Mid-air Imaging

KUWABARA DAIKI^{1,a)} OGAWA TAKEFUMI^{2,b)}

Abstract: In this paper, we propose a throwing-type display that draws images in the mid-air by applying principle of persistence of vision. The proposed system does not use the ball as a screen for projecting the image from the projector, but as a visual stimulation device for presenting the after-image, expands the display area for showing digital information. The device equips with a 6DOF sensor and controls the blinking of the LED on the device surface according to the motion of it. Experiments were conducted on feasibility of throwable POV display.

Keywords: Ball Display, Mid-Air Display, Persistence of Vision

1. はじめに

ディスプレイ技術の発達により、大規模かつ薄型のディスプレイが公共の場に設置され、デジタルサイネージやナビゲーションのための情報提示機器として活用されている。大型のディスプレイには一度に多くの情報を提示できるだけでなく、多数の人々へ同時に情報を提示することが可能であるが、壁や柱などに固定されていることが多く、ディスプレイを容易には移動できないため、空間中の任意の場所へ情報を提示することは難しい。これに対し、拡張現実感 (AR, Augmented Reality) の技術を用いれば、空間中ど

こであっても情報を提示することが可能で、低価格なヘッドマウントディスプレイ (HMD, Head Mounted Display) の登場やスマートフォンで利用可能な AR アプリケーションの登場により、AR の体験が身近になってきている。AR では、あたかも目の前に情報が存在するかのように提示することが可能であるが、HMD を装着することの煩わしさや、スマートフォン越しに情報を見るために広い範囲を見渡すのが難しいなどの問題があった。

そこで本研究では、空間に情報を描画する新たなディスプレイを提案する。提案ディスプレイはボール型で表面に LED、内部にはディスプレイの運動状況を計測するためのセンサを配置し、投擲中のディスプレイの運動に応じて点灯させる LED を決定して映像を提示する。これまでもボール型のディスプレイは存在するが、ボールの表面を映像の提示面としていたのに対し、提案ディスプレイはヒト

¹ 東京大学大学院 工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

² 東京大学 情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo

a) d.kuwabara@ogawa-lab.org

b) ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

の眼の残像効果を用いて空間に映像を提示することで、情報を提示できるエリアを現実空間に拡張している。本稿では、提案ディスプレイを実現するにあたり、ディスプレイの運動に応じた LED の発光制御に関して実施した初期検討について述べる。

2. 関連研究

2.1 ボール型ディスプレイ

ボール型のディスプレイとして、Qoom[1]やBallumiere[2]などが提案されている。これらは、移動するボールをモーションキャプチャシステムによって高速に追跡し、リアルタイムなプロジェクションマッピングを行うことで球面への映像投影を実現している。ボール型のため、回転させる・投げるといったインタラクティブな操作が可能となっている。例えばスポーツでは、ボールを中心に競技が展開するため観戦者はボールを注視することが多く、ボール自体に映像を投影することで、競技から目を離すことなく情報を取得するのが特徴的である。しかしこれらのシステムでは、プロジェクションマッピングやモーションキャプチャを利用しているため、ボールが競技者によってカメラやプロジェクタの死角となる問題や、スタジアムのような広い場所で利用するためには遠距離からの正確なセンシング技術と投影技術が必要となるといった課題がある。また、ディスプレイとして利用できる物理的な表示領域がボールのサイズに限定されている。

一方、ボール表面や内部に LED を配置した自発光式の球面ディスプレイ [3][4]が開発されている。大久保らのシステムはスポーツ拡張を目的として構築されており、内蔵したセンサでボールの回転を認識し、回転状況に応じてディスプレイ表示を切り替えることで、ボールが投げられた状態でも提示された情報を視認できる仕組みを備えている。外部からのセンシングや投影を必要としないため、利用する場所に制限はなく、選手によって死角となるような問題も発生しないが、QoomやBallumiereと同様に情報提示に利用できる領域が狭い問題がある。

2.2 空中像ディスプレイ

Maekawa らによる 2 面コーナリフレクタアレイ (Di-hedral Corner Reflector Array : DCRA)[5]や、アスカネット社の AI プレート (Aerial-Imaging Plate)[6]は、プレート内に格子状に配置されたミラーによって背面から入射した光をプレートに対して面对象な位置に空中で結像させる新しいディスプレイ装置で、専用のメガネ等をかけることなく空中に表示された映像を観察できる。原理上、光源からプレートまでの領域とプレートから映像提示面まで領域は同一サイズの空間が必要なため、光学装置が大きくなる傾向にあるが、例えば EnchanTable[7]のように AI プレー

トと装置をテーブル下に設置することで、ユーザに装置を意識させず、テーブル上に実際に物体が存在するかのように結像させて情報を提示することができる。現実感を損なうことなく空間中に重畳して情報を表示できるという優位性がある一方で、広範囲での情報提示に利用するためにはプレートのサイズを大きくしなければならなかったり、観察可能な視点方向が限定されるという課題もある。

2.3 残像効果ディスプレイ

残像効果ディスプレイとは、LED アレイなどの発光する光源を決まったパターンで高速に点滅させ、同時に移動させることで空中で映像を提示するシステムであり、バーサライタと総称される。手で左右に振り文字などを浮かび上がらせる簡易的なものや、マイコンでモータの回転や LED の点滅を適切に制御するものなど、様々な種類が存在する。残像効果は人間の目の時間分解能が約 50~100ms 程度であり [8]、これよりも短い時間間隔の光の点滅を認識できず、連続して点灯しているように見える現象である。

AwareCycle[9]は自転車の車輪を残像ディスプレイとして用い、ホイール部に取り付けた LED アレイの点灯パターンを走行状態に応じて変化させ、種々の残像を提示できるようにしたものである。

iSphere[10]は、ドローンを囲うように並べた 8 本の LED テープを回転させて、映像を提示する残像効果ディスプレイである。内部のドローンで任意の場所に飛ばすことができるため、同じ球体ディスプレイであるが、プロジェクタやモーションキャプチャが必要となる Qoom とは異なり事前に投影装置を準備することなく、様々な場所で使用できる。LED テープの回転を制御することで、意図した映像が提示できるようにしている。

玉井らは、スマートフォンを用いた残像ディスプレイ [11]を提案している。スマートフォンを回転装置に装着して回転させることで、センシングした回転速度に応じて表示を切り替え映像を提示している。スマートフォンのジャイロセンサと磁気センサを使用することで回転量を検出するため、任意の回転において画面表示を切り替えることが出来るインタラクティブなデバイスである。

3. 提案システム

3.1 システム概要

本研究では、投擲動作によって発光物体を空間中に投げ、その残像を空中像として提示するシステムを提案する。提案システムの特徴・要件は次の 4 点である。

- 投擲による残像表示
- デバイスサイズを越えた描画エリアの拡張
- デバイス内での姿勢検出による表示制御
- 現実空間との一体性

従来のボール型ディスプレイと同様に、本提案システムも投げて利用するディスプレイであり、残像による映像提示を行うため、装置自身が運動していることを前提としている。また、従来の残像効果ディスプレイは、バーの回転を制御して適切なタイミングでLEDを点灯させているのに対し、提案システムでは装置が投げられた後、その装置の姿勢を制御できないため、内蔵したセンサを用いて回転などの運動を認識し、適切なLEDを選択し適切なタイミングで点灯させる。表示が残像による空中像として提示されることから、実在する物体がオクルージョンにより隠れることもなく、現実感を損なわず提示できる。

本研究では、将来的に球状など立体表面へ発光部を取り付け、全方向の回転に対応させることを考えている。この実現のためには3軸の回転を検出する必要があるが、本稿では簡単のため、円筒形の物体の底面をディスプレイ表示部として用い、円筒の底面を同じ方向に向けて投擲することで、実際に残像が映像として提示されるかどうかを検討する。この場合、角速度の検出を行う回転軸は1軸でよい。そのためシステムとして必要な計算量が少なく、デバイスの計算力に制約があっても実現可能である。

3.2 ハードウェア設計

投擲物体として、直径8.4cm、深さ11cmの瓶状のPET製容器を用意した。底面の部分は図1に示すように、ディスプレイ表示部として、2つの同心円の円周上に8個および中心に1個のLEDを配置し、これらのLEDを制御用のマイコンに接続した。映像提示に用いるLEDの光が容器の素材によって拡散され残像がぼやけるのを防ぐため、LEDが露出するように穴を開けている。発光制御にはArduino Mega 2560を用いた。

回転速度のセンシングのため、3軸加速度および3軸角速度センサを内蔵するInvenSense社のMPU6050と信号処理用のIC等を搭載した6軸センサボード(GY-521)を用いた。ArduinoとI2C接続でセンサの計測値を送信する。このセンサを図3のようにLEDと共にポリウレタンマットに固定した。これらを容器に入れた様子が図2である。

3.3 ソフトウェア設計

図5に提案デバイスのシステムフローチャートを示す。提案デバイスでは、MPU6050に内蔵されているジャイロセンサの計測値を積算することによってデバイスの回転量を算出する。具体的には、 $\lambda[ms]$ 毎にジャイロセンサの値を読み、取得した角速度を $\omega_n[deg/s]$ 、1サイクル前($\lambda[ms]$ 前)に取得した角速度を $\omega_p[deg/s]$ とし、デバイスの傾きの増加分 $\Delta rotation[deg]$ を以下の式で求める。

$$\Delta rotation = \frac{(\omega_n + \omega_p) \times \lambda}{1000}$$

回転角は、角速度を時間積分したものであるが、センサ

からは離散的にデータを取得し、計算処理の時間もあるため厳密な積分値の取得は不可能である。そこで図4に示す台形の面積を積算することで近似した。

初期角度にはデバイスが静止している際の角度を加速度センサによって演算して求めている。ジャイロセンサから得た値を連続して積算すると、ドリフトによる誤差が蓄積し正確な値が得られない。ジャイロセンサにおけるドリフトの誤差を補正するために、加速度センサの取得値を用いてカルマンフィルタや相補フィルタなどのフィルタを適用する手法があるが、このデバイスが加速度を持って運動しているため適切な補正角度を得ることができない。

そこで、事前は無回転の状態でジャイロセンサの値をサンプリングし、統計的に平均を求めたものをオフセットとして除去している。処理の実行は、Arduinoのタイマー割り込みを利用して2[ms]周期で行う。実装にはライブラリとしてmstimer2を用いた。これにより、回転量の演算時間や、後述のLED表示切り替えに所要する時間の多寡によらず一定の時間間隔で計算が実施される。

回転角度を計算し、表示にあたって使用するLEDを選択する。まず文字表示の際に「直径上にある、もっとも鉛直に近いLED5個」を使い、そのLED5個をArduinoに指定したパターンに応じて点滅させ情報を提示した。つまり、情報表示に際しては中心を通る4列8方向のLEDを用い、デバイスが45度回転するごとに表示を切り替える。文字情報の表示には鉛直方向に最も近い列にあるLED5個を用い、それ以外のLED12個は表示には使用せず消灯させている。

残像としての情報の提示は、デバイスのLED数の仕様から縦が5ビットで行われる。あらかじめ発光パターンをArduinoに設定しておき、一定の時間間隔で表示する列を切り替えることで連続的に残像として提示している。デバイスを投擲したときに残像として見やすいよう表示時間を調整している。

4. 評価実験

4.1 予備実験：提案システムの有効性検証

4.1.1 実験目的・概要

本システムの有効性の検証のため、提案システムを実際に投擲し、表示した文字が判別できるかどうかを確認する。回転量の計算や表示の切り替えを行うのに不足ないセンサデータ取得間隔を決めるため、図5に示した1サイクル、つまり、センサからの回転速度の取得を開始してから、回転量の計算、LED表示の切り替えが終了するまでの計算の所要時間を計測したところ、最大で1.782[ms]という値を得た。したがって、タイマー割り込みを用いて、図5における1サイクルを2[ms]周期で処理することとした。

文字表示に使用する5つのLEDを鉛直上方向からLED1,2,3,4,5としたときの点灯パターンを図6に示し



図 1 LED 配置

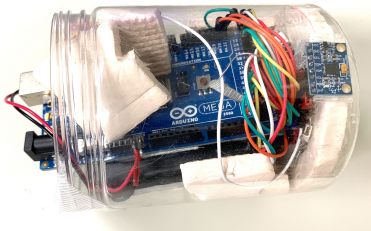


図 2 デバイス外見

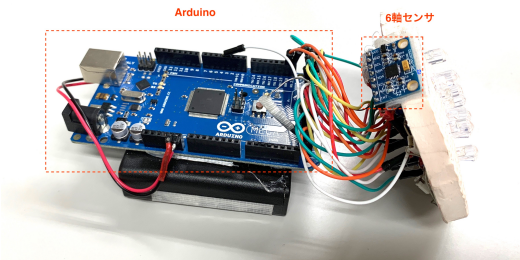


図 3 デバイス中身

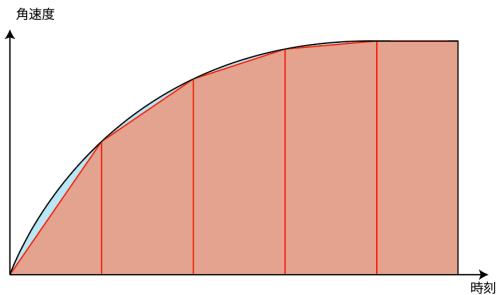


図 4 回転角度計算
台形積分

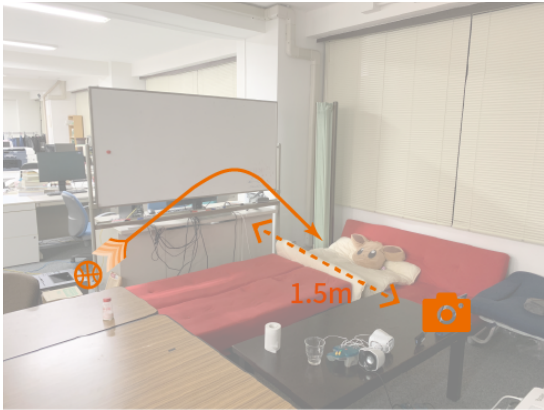


図 7 実験環境

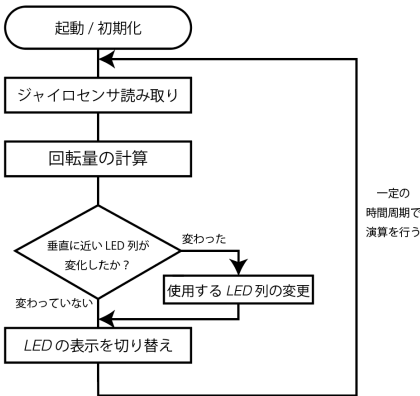


図 5 システムフローチャート

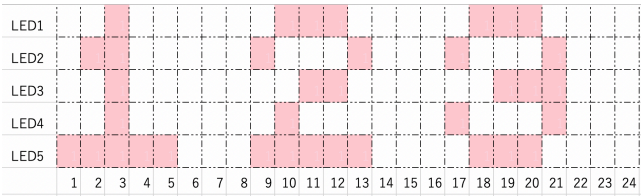


図 6 表示パターンの切り替え

ている。縦方向は5ドットで、数字の「1,2,3」と知覚できるようにLEDの表示パターンを決定した。赤い部分はLEDが点灯、表示は図の列番号を1,2,3,4,...,24までを順番に切り替え、投擲によって左から右へデバイスを移動させることで残像が視覚的に一連の情報として知覚される。

LEDの表示列は、4[ms]間隔で切り替えを行う。センサ

からのデータ取得・回転量計算を2[ms]間隔で行うため、2サイクルのうち1回はLED表示を変更する。固視残像の持続時間が100[ms]程度である[8]ことから、4[ms]間隔で切り替えることで表示を全て認識することが可能である。

表示の分析のための実験環境を図7に示す、1.5[m]ほど離れた位置に設置したカメラの前を左から右へディスプレイを通過させ、残像を撮影する。残像の撮影のため、カメラのシャッタースピードを4[s]とし、光の軌跡を1枚の写真として記録した。

4.1.2 実験結果

図8に示したように、概ね文字表示が水平方向に行われることが確認できた。一方で、デバイスの通過した軌道の頂点付近を越えた後の右側で文字の傾きが大きく、センサによって計算された回転角と実際の回転角が大きく乖離していることも判明した。

4.2 実験:軌道中の表示精度の評価

4.2.1 実験概要

予備実験において、提案デバイスは概ね期待通り文字を水平に表示できることを確認した。一方、後半では文字の表示に傾きが発生する事も判明した。その傾向の分析を行うため、次の実験を行う。

100[ms]周期でデバイスが認識している鉛直方向のLEDを点灯させる。同時にその際の角速度も記録する。実験1



図 8 予備実験:撮影結果



図 9 撮影した画像 (例)



図 10 歪みを補正し、角度を計測

と同様にカメラで撮影すると 100[ms] に 1 回縦方向に LED が点灯の様子を確認できる (図 9)。このようにして得た写真の歪みを補正し (図 10)、表示の傾き角度を計測した。投擲動作を複数回行い、傾き角と回転の角速度のデータを取得した。

4.2.2 実験結果・考察

各試行を撮影した写真において、最大となった傾き角とそのときの角速度をプロットしたものを図 11 にまとめ、近似直線を引いた。このデバイスは LED 列を 45 度間隔で並べているため、理想的な動作では表示している列が 22.5 度以上傾くと隣の列の傾きの方が小さくなるため、そちらに切り替わる。そのため、22.5 度までの誤差は設計誤差と

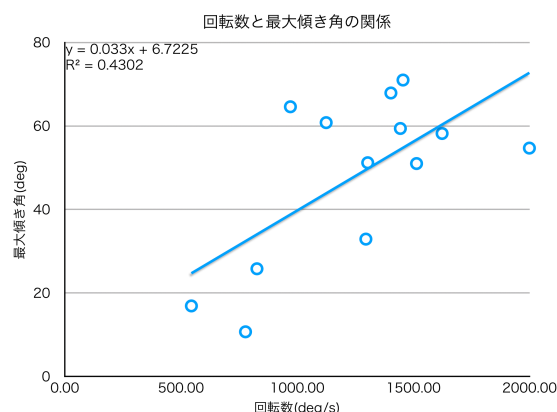


図 11 回転数と最大傾き角の関係



図 12 使用例

して許容できる。

この近似直線の決定係数が 0.4302 となっていることから、相関係数

$$R = \sqrt{0.4302} = 0.656$$

となり、強い正の相関があるといえる。図 11 にプロットした点を見ると、回転速度がおよそ 1000[deg/s] を越えるまでは傾き角が小さく 22.5 度程度に収まっているため、設計誤差として許容できる。一方、回転速度が 1000[deg/s] を越えると最大傾き角が大きくなり、設計誤差を越えた傾きが生じている。この実験から、比較的高速な回転においては正確に表示が行われないという課題が判明した

5. おわりに

本稿では、空間中に映像を描画する新たなディスプレイの開発を目指し、Arduino と 6 軸センサを用いて物体の姿勢検出および LED の制御をすることで、図 12 のように投擲することによって描き出す残像効果型ディスプレイを提案し実装した。

このデバイスはたとえば野球やサッカーなどボールの中に内蔵し、球速を表示したりすることで、ボールを見ただけで付加情報を取得できるなどスポーツへの活用が考えられる (図 13)。その他、投擲動作を行わず現実空間で手に持って動かす場合でも、動作に伴い位置検出をすることで、現実には見えない隠された物体を探していくという

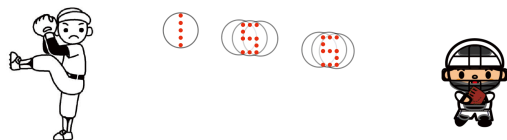


図 13 活用法

AR ゲームなどにも活用できると考えられる。

これらの活用法に向けた実装を行い、姿勢検出をした結果、概ねデバイスの姿勢に応じた表示が可能であった。また、投げはじめの部分では遅れなく回転に追従しているのに対し、軌道の後半部分においては多少の回転遅れが発生し、これが回転の角速度に依存するものであることも確認できた。

今後は軌跡中の全域において傾きなく正確な表示ができるよう多角的に検討を重ねる。具体的には、回転検知において角速度に応じて傾きが生じている原因を追求し、この解決を行う。また、現在は残像をカメラで撮影しているが、これが人間の眼を通して受け取れるよう、残像の提示パターンや光の強さ、移動速度との関係について詳しく調査し、残像の見やすさに関する主観評価を予定している。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 16K00266 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Miyafuji, S., Sato, T., Li, Z. and Koike, H.: Qoom: An Interactive Omnidirectional Ball Display, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 599–609 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126607 (2017).
- [2] Miyafuji, S., Sugasaki, M. and Koike, H.: Ballumiere: Real-Time Tracking and Spherical Projection for High-Speed Moving Balls, *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 33–37 (online), DOI: 10.1145/2992154.2992181 (2016).
- [3] 大久保賢, 佐藤俊樹, 野嶋琢也: 映像表示機能を有するボールの提案, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, Vol. 2016, No. 31C-03 (2016).
- [4] 3CINNO: LED Ball Display. <https://www.led-display-manufacturer.com/product/led-ball-display/> (2018/12/25 閲覧).
- [5] *Transmissive optical imaging device with micromirror array*, Vol. 6392 (2006).
- [6] Asukanet: Aerial imaging plate, Japanese patent P5437436 (2013).
- [7] Yamamoto, H., Kajita, H., Koizumi, N. and Nae-mura, T.: EnchanTable: Displaying a Vertically Standing Mid-air Image on a Table Surface Using Reflection, *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, ITS '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 397–400 (online), DOI: 10.1145/2817721.2823476 (2015).
- [8] 渡邊淳司, 坂本憲久, 則武 厚, 前田太郎, 舘すすむ: サ

ツカード残像の視覚的持続時間の研究, 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 12, pp. 1808–1814 (オンライン), DOI: 10.3169/itej.58.1808 (2004).

- [9] Kadomura, A., Ichioka, Y., Tsukada, K., Rekimoto, J. and Siio, I.: AwareCycle: Application for Sports Visualization Using an Afterimage Display Attached to the Wheel of a Bicycle, *Human-Computer Interaction. Applications and Services* (Kurosu, M., ed.), Cham, Springer International Publishing, pp. 256–264 (2014).
- [10] Yamada, W., Yamada, K., Manabe, H. and Ikeda, D.: iSphere: Self-Luminous Spherical Drone Display, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 635–643 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126631 (2017).
- [11] 玉井由良, 沖 真帆, 塚田浩二: スマートフォンを拡張したインタラクティブな残像ディスプレイの提案, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2018 論文集, Vol. 2018, pp. 39–42 (2018).