

Magicatropo: ハーフミラーを用いた立体ゾートロープの 多層構造化によるアニメーション表現

横田智大^{†1} 橋田朋子^{†1}

概要: 本研究は、ハーフミラーを用いて立体ゾートロープを多層化し、1枚の円板上で2つの異なる物体群のアニメーションを共に提示可能とするものである。従来の立体ゾートロープでは空間の可視・不可視の切り替えに大域的かつ一様なストロボ光が用いられ、1枚の円板上では1つの物体群のアニメーションのみが提示されてきた。提案手法では、回転する円板の上部にハーフミラーを垂直に立てて設置する。これによって円板上を同心円状の2つの領域(=鏡の手前側と奥側)に分割し、それぞれの領域に別々の物体群を配置する。ハーフミラーの手前と奥で別々のストロボ光源を制御することで、1枚の円板上で2つの異なる物体群のアニメーションを共に提示することを実現した。これにより、2つの物体群によるアニメーションのスイッチングや、コマ数が異なる2つの物体群のアニメーションの同時提示など、従来の手法では不可能だった表現が可能となった。

Magicatropo: Representation of Animation by Multi-layer 3D Zoetrope with a Semitransparent Mirror

TOMOHIRO YOKOTA^{†1} TOMOKO HASHIDA^{†1}

Abstract. In this research, we multilayered a 3D zoetrope with a semitransparent mirror and present animations frame-by-frame with two different object groups together on the same turntable. In the conventional 3D zoetrope, a strobe light with global and constant frequency is used for switching between visible and invisible spaces, and on one turntable, only animation of one object group is presented. In the proposed method, a semitransparent mirror is set vertical above the turntable. As a result, the turntable is divided into two concentric regions (= the front side and the back side of the mirror), and different object groups are arranged in each region. By controlling different strobe lights in front of and behind the semitransparent mirror, we realized that frame-by-frame animations of two different object groups can be presented together on one turntable. Our contribution is to realize such expressions of conventional methods which are not able to be shown through switching of animation by two object groups and simultaneous presentation of animation of two object groups with different number of frames.



図 1 1枚の円板上で歩いている人物(左)と走っている人物(右)のアニメーションを切り替えて提示する様子。
Figure 1 Presenting animaion of walking (Left) and running (Right) on the same turntable.

1. はじめに

立体ゾートロープは円板の回転とストロボ光の制御により、円板上で実物体の周期的なアニメーションを提示する手法である。この手法は芸術だけでなく研究の分野でも注目されており、研究の分野からは立体ゾートロープの表現を拡張する新たな手法が多く提案されている。特に Smootらは、通過する物体に合わせて選択的にストロボを発光さ

せることで、非周期的かつインタラクティブな立体ゾートロープを実現した[3]。Fukayaらは、高速に回転させた1つの物体に対してプロジェクタによるパターン光を投影することで、物体の変形を表現した[1]。Miyashitaらは、円板の回転とストロボ光の制御を高速に行うことで実物体同士の重ね合わせやモーションブレンダーの低減を行い、幅広い質感を高解像度に提示可能なマテリアルデザインのための実体ディスプレイを提案した[2]。そして吉田らは、高速プロジェクタを位置分解能を持つストロボ光アレイとして用い、周期運動する実物体を視覚的に再配置することで、現実感

^{†1} 早稲田大学
Waseda University

の高い質感の像を提示できるディスプレイを提案した[4].

単純な立体ゾートロップにおけるアニメーション表現の制約として、円板上の1つの物体群による一定コマ数かつ一様なアニメーションしか提示できないという問題が挙げられる。様々な動きを持つ複数の物体群が1枚の円板上にまとめて配置される場合もあるが、その場合も一定周波数のストロボ光によって大域的に円板が照らされる。そのため円板の回転中にアニメーションに変化を与えることや、動きのコマ数が異なる物体群のアニメーションを同時に提示することは難しい。先行事例のように円板の回転やプロジェクタによる映像投影を高速に制御する手法は、立体ゾートロップの表現の幅を大きく広げるが、機材が高価になってしまう問題や運用に危険が伴う問題がある。

我々はこのような表現の制約に対して、円板の上部にハーフミラーを設置し、その手前と奥で異なるストロボ光源を制御することで、1枚の円板上で2つの異なる物体群のアニメーションを共に提示することができるシステム **Magicatrop**e を提案する。このシステムでは図 1 のように、2つの異なる物体群によるアニメーションを空間的に重なり合う位置に提示し、観察者はそれらを選択的に観察することが可能である。特に、2つの物体群が異なるコマ数で構成されている場合であっても、同時にアニメーションを成立させることができる。本稿では、**Magicatrop**e のシステム概要と設計及び実装結果について述べる。その後、**Magicatrop**e の応用として考えられるアニメーション表現の例を紹介し、本システムの限界について議論する。

2. Magicatrop

2.1 システム概要

Magicatrope は、1枚の円板上で2つの物体群のアニメーションを共に提示することができる立体ゾートロップである。図 2 に示すように、回転する円板の上部にハーフミラーを垂直に立てて設置する。このハーフミラーによって円板上を同心円状の2つの領域（＝鏡の手前側と奥側）に分割し、それぞれの領域に任意のコマ数で構成された別々の物体群を配置する。ハーフミラーの手前と奥で異なるストロボ光源を制御することで、1枚の円板上で2つの異なる物体群のアニメーションを共に提示することができる。

2.2 ハーフミラーの性質

Magicatrope のシステムはほとんどが従来の立体ゾートロップと同様であり、ハーフミラーを用いることが大きな特徴である。ハーフミラーは反射率と透過率が等しいマジックミラーであり、ミラーを隔てて存在する2つの空間の相対的な明るさの差に応じてふるまいが変化する性質を持つ。明るい空間側からハーフミラーを見ると、明るい空間からの反射光が暗い空間からの透過光をかき消すため、ハーフミラーは明るい空間内部を映し出す鏡としてふるまう。一方で、暗い空間側からハーフミラーを見ると、明るい空

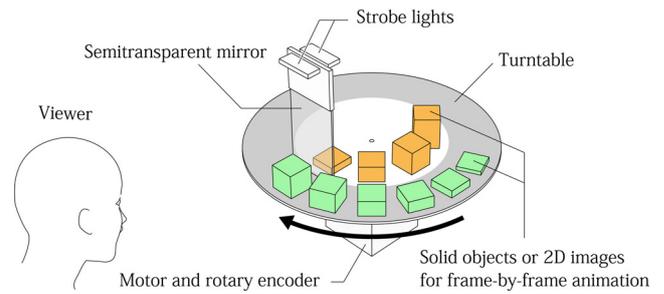


図 2 Magicatrop の構成

Figure 2 Configuration of Magicatrop.

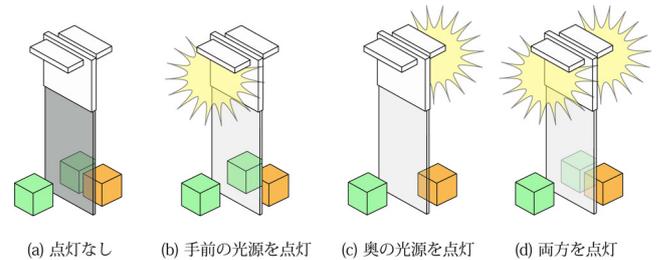


図 3 ハーフミラーを用いた選択的な物体の提示

Figure 3 Selectively displaying objects with a semitransparent mirror.

間からの透過光が暗い空間からの反射光をかき消すため、ハーフミラーは反対の空間が透けて見える半透明の板としてふるまう。

2.3 ハーフミラー上での物体の見えを制御するストロボ光源の設計

我々は上述したハーフミラーの性質に着目し、円板上のハーフミラーを挟む形でミラー前後の各領域を照らすストロボ光源を設置する。このとき、ストロボ光源は図 2 のようにハーフミラーの近傍に設置し、光源の下の数 cm には光を透過しない素材を用いるようにする。これにより、一方のストロボ光がハーフミラーの反対側の領域を直接照らし、各領域の明るさの差が小さくなってしまふことを防ぐ。

この状態でそれぞれのストロボ光源を点灯させたとき、ハーフミラー上で観察される様子を図 3 に示す。図 3(a) はどちらのストロボ光源も点けていない状態であり、特に暗い環境ではミラー上の物体を観察するのは困難である。図 3(b) のように手前のストロボ光源を光らせると、手前の領域に設置された物体がハーフミラーに映って見える。図 3(c) のように奥のストロボ光源を光らせると、奥の領域に設置された物体がハーフミラーを透けて見える。図 3(d) のように2つのストロボ光源を共に光らせたときには、各領域の明るさが重なり合い像は薄くなるものの、手前と奥の領域の各物体を共に見ることができるようになる。これらより、図 2 のように回転する2つの物体群の間にハーフミラーが存在していると、発光させるストロボ光源に応じて各物体群によるアニメーションを選択的あるいは同時に

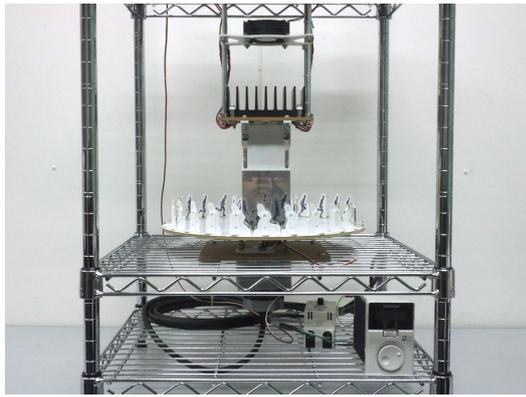


図 4 システムの外観
Figure 4 Appearance of the system.

提示することができる。このときハーフミラーの配置によって、2つのアニメーションの半径方向の位置関係が決定される。2つの物体群の間にハーフミラーを設置すると、ミラー上では2つのアニメーションを空間的に重なり合う位置に提示することができる。一方の物体群にハーフミラーを寄せると、それに合わせてミラーに映る手前の物体群の像が移動するため、2つのアニメーションを並べて同時に観察できるようになる。

3. 実装

実装したシステムの写真を図4に示す。円板を回転させるモータには、オリエンタルモータのブラシレスモータBLM460SHP-10Sを用いた。このモータを、同社のモータドライバBMUD60-A2によって駆動する。円板の回転速度は特に定めておらず、円板上の物体群に応じて様々な速度を試した。その際には、主に1~3rpsの値を設定した。ストロボ光源には10WのパワーLEDを4つ用いた。ハーフミラーの手前側に2つ、奥側に2つのパワーLEDを設置し、これらをLEDと同じ数のLEDドライバIC・CL6807によって駆動した。パワーLEDは全て100×50×40mmの放熱板に貼り付けて固定し、12V0.2Aのファンを用いて空冷した。モータの回転は、円板に取り付けたエンコーダによって外部から取得する。スリット付きの円板を3Dプリンタによって出力し、そのスリットの通過を透過型フォトセンサKI1233-AAによって取得した。エンコーダで取得した円板の向きと同期したストロボ光の制御には、Arduino Unoを用いた。物体がハーフミラーの前を通過するタイミングに合わせて、ストロボ光を約0.5~1ms程度点灯させる。このストロボの発光時間は円板の回転速度に合わせて、光量の確保とモーションブラーの低減をある程度共に満たす値を設定した。

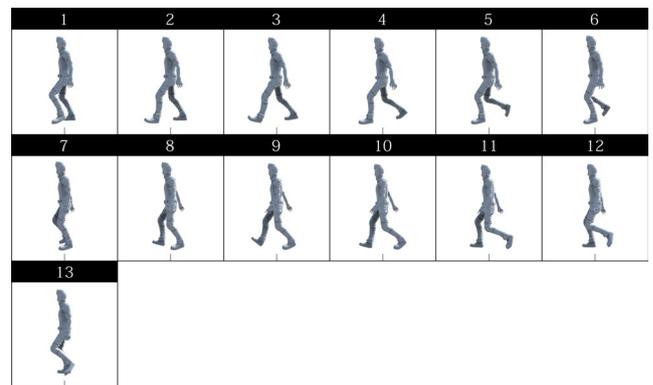
物体群をのせて回転させる円板の直径は300mmとした。円板の上部に設置するハーフミラーには、反射率と透過率が共に30%とされている反射膜タイプのガラス製ハーフミラーを用いた。このミラーの厚みは3mm、横のサイズは

64mmとした。縦のサイズは物体群の大きさに合わせて80~120mmの間で可変とし、パワーLEDはミラーの最上部から更に約60mm離れた位置に固定した。このハーフミラー及びストロボ光源を、円板に直接荷重がかからないように筐体の上から吊り下げたかたちで設置する。ハーフミラーは円板の中心から30mm~140mmの間の位置に自由に設置可能とした。円板上に載せる物体群には立体物を用いるのが理想だが、今回のプロトタイプでは簡単のために一連の動きの画像を紙に印刷し、それらを切り抜いたものを円板上に立てて設置した。

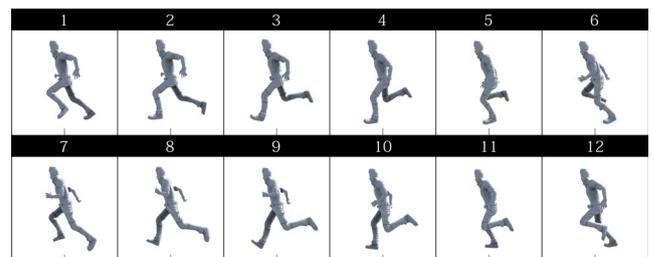
4. 動作結果

4.1 歩行と走行のアニメーション

動作確認も兼ねた Magicatropе のコンテンツとして、ある人物が歩いている姿と走っている姿の2種類のアニメーションを提示した。歩行及び走行のアニメーションの制作にはUnityを用いた。実際に用いた歩行と走行の画像群を図5に示す。歩行のアニメーションは13コマ、走行のアニメーションは12コマで1周期とし、ストロボの発光周期が被らないようにした。円板上では、ハーフミラーの奥の領域に歩行の画像群を1周期(13コマ)分設置し、手前の領域に走行の画像群を2周期(24コマ)分設置した。制作した円板を図6に示す。本システムでは手前の領域に配置した物体群はハーフミラーに映った像として観察されるため、必要に応じて左右を反転した物体群を用意する必要がある。今回は人物の進行方向を左方向で統一するため、



(a) Pictures of walking (13 frames)



(b) Pictures of running (12 frames)

図 5 アニメーションのための画像群

Figure 5 Pictures for frame-by-frame animation.



図 6 制作した円板
Figure 6 Turntable.

走行の画像群は左右を反転して印刷し円板上に設置した。システムは暗所で動作させ、円板は 1rps で回転させた。実際にアニメーションを提示した様子は、本稿の図 1 に示している。ミラー上では空間的に重なる位置に歩行と走行のアニメーションが観察されるため、1 人の人物が途中で走り出すような表現ができた。他にもハーフミラーの位置をずらすことで、異なるコマ数で動く 2 人の人物のアニメーションを並べて同時に提示することができた。ただしこの表現ではミラーの前後のストロボ光源が異なる周期で発光し、撮影が困難であるため画像は割愛している。

4.2 その他の応用例

4.1 では歩行と走行という 2 種類のアニメーションの切り替え及び同時提示を行ったが、本システムを応用することで他にも様々な表現が期待される。例えば、使用するストロボ光源を手前と奥で即座に切り替えるのではなく、PWM 制御により光量を徐々に入れ替えていくことで、手前の物体群が奥の物体群へゆっくりと変化するようなアニメーションを提示することが可能になる。また、衣服やアクセサリを人物から独立した物体群として用意し、それらをハーフミラー上で重ね合わせて提示することで、後から人物の着せ替えが可能でアニメーションが実現できる。

5. 議論

本システムは 1 枚のハーフミラーを用いて実装を行ったため、システムの正面が決まりアニメーションを観察可能な視点が限られている。複数のハーフミラーを回転軸を囲むように並べて設置し、各ミラーの前後に同じようにストロボ光源を設けることで、観察可能な視点を広げることが可能である。ただしこの場合は、各ハーフミラー間でもストロボ光源を個別に制御する必要がある。このとき、あるハーフミラーに設けられたストロボ光源の光が他のハーフミラーの見えに影響を与えないよう、各ミラー間で光を遮る設計を適切に行うことも求められる。また、今回はハーフミラーを垂直に立てて円板上に設置したため、正面からハーフミラーを見ようとすると手前の領域の物体群に視界

が遮られてしまう問題がある。4.1 で述べたように必要に応じて左右を反転した物体群を用意する必要がある点も、本システムの問題点の一つである。

また、**Magicrope** では反射膜タイプのハーフミラーを用いて立体ゾートロープの多層化を行った。この手法では、ハーフミラーを透過した像を正しい色味で観察することができないという問題がある。これは、ハーフミラーの反射膜(薄い金属膜)自体が色を持っていることが原因である。また、使用したハーフミラーは反射率と透過率が共に 30% であり、入射光の 40% はミラーに吸収されている。この吸収率も、ミラーを介した像の見えが肉眼と異なる原因になる。2 つの領域の物体群を違和感なく重畳するには、各領域の像を肉眼での見えに近いかたちで提示する必要がある。

Magicrope は高価な光学素子やアクチュエータを用いることなく、安価なシステムで立体ゾートロープによる表現の幅を拡張するものである。より高度な表現を可能にするためには改めて光学素子やアクチュエータを選定し、システムを再構成する必要がある。

6. まとめ

本稿では円板の上部にハーフミラーを設置し、その手前と奥で異なるストロボ光源を制御することで、1 枚の円板上で 2 つの異なる物体群のアニメーションを共に提示することができるシステム **Magicrope** を提案した。同システムの実装を行い、動作の確認として歩行と走行のアニメーションの切り替えや、コマ数が異なるそれらの動きを同時に提示するアニメーション表現を行った。また本システムの応用として、手前の物体群のアニメーションから奥の物体群のアニメーションへゆっくりと変化する表現や、立体物のデザインを自由に変更可能なアニメーションの可能性について述べた。最後に、本システムの限界について議論した。今後は他の光学素子を用いた実装の可能性について検討するとともに、現システムの発展としてハーフミラーの手前と奥の領域をそれぞれ異なる円板とモータで構成し、各領域の回転を個別に制御とすることで、より自由度の高い表現が可能な立体ゾートロープを実現したい。

参考文献

- [1] Fukaya, T., Iwai, T., and Yamanouchi, Y. Morphovision. *Proc. SIGGRAPH '06*, No. 22, ACM (2006).
- [2] Miyashita, L., Ishihara, K., Watanabe, Y., and Ishikawa, M. ZoeMatrope: A system for physical material design. *ACM Trans. Graph.* 35, 4 (2016).
- [3] Smoot, L., Bassett, K., Hart, S., Burman, D., and Romrell, A. An interactive zoetrope for the animation of solid figurines and holographic projections. *Proc. SIGGRAPH '10*, No. 6, ACM (2010).
- [4] 吉田 貴寿, 渡辺 義浩, 石川 正俊. 周期運動する実物体と高速時分割構成化光を用いたリアリスティックディスプレイの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22 巻, 2 号, pp.229-240 (2017).