

PraxinoAIRRscope: 実物体と隣接して動く空中像パラパラ漫画

明石 穂紀^{1,a)} 橘 卓見^{2,3,b)}

概要:

パラパラ漫画には、観察者自身の手で能動的に絵を動かすという点において、通常の映像鑑賞にはない体験がある。しかし、アニメーションは物体の中に現れるため、他の物体と隣接させて動かすことは困難であった。本研究では Praxinoscope と AIRR を組み合わせ、実物体と隣接してアニメーションが動くパラパラ漫画装置「PraxinoAIRRscope」を提案する。設計パラメータが満たすべき条件をまとめ、実装によりパラパラ漫画が実物体と隣接した位置に結像して動くことを確認した。また、展示した際の様子を述べる。

1. はじめに

パラパラ漫画には、観察者自身の手で能動的に絵を動かすという点において、切り替わっていく画を受動的に眺める通常の映像鑑賞にはない体験がある。

パラパラ漫画は 19 世紀に多数の方式が発明され [1], [2], 電子書籍におけるパラパラ漫画 [3] も提案されているが、いずれも切り替わる絵は何らかの物体の中に存在し、実物体と隣接してアニメーションが動くことはできなかった。

本研究では実物体と隣接した位置に絵を提示可能な空中像を用いることで、実物体と隣接したアニメーションを体験者の手で動かす新しいパラパラ漫画装置「PraxinoAIRRscope」(図 1) を提案する。

設計において各パラメータが満たすべき条件をまとめ、実装と展示した様子について述べる。

2. 関連研究

2.1 様々なパラパラ漫画

パラパラ漫画は紙の束を高速でめくる一般的なものの以外にも多数の形式提案されている。パランガ [3] は曲げセンサと細長い紙片つきローラが付いた漫画雑誌のような外観の装置であり、電子書籍のパラパラ漫画を実現している。この研究ではパラパラ漫画を楽しむ上での紙をめくる触感や音の重要性をユーザスタディによって明らかにし、紙片つきローラによって紙をめくる触感と音を実現している。

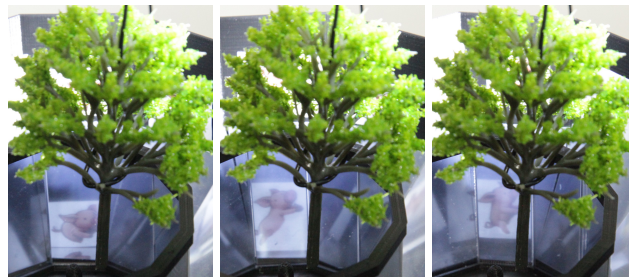


図 1: 実物体と隣接してアニメーションが動くパラパラ漫画装置: PraxinoAIRRscope

1831 年に発明された Phenakistoscope [1] は、裏面に複数コマの絵が描かれたスリットの空いた円盤であり、スリットを覗きながら回転させることでパラパラ漫画を見ることができる。1834 年には多人数で同時に体験できるように円筒状にした Zoetrope [2], 1877 年には鏡によってスリットを覗く必要のなくなった Praxinoscope [2] が発明された。

これらはすべて切り替わる絵が電子機器や紙や鏡像として存在するため、実物体に隣接してアニメーションが動くことができなかった。本研究は Praxinoscope を拡張し、切り替わる絵を鏡像ではなく実像とすることで、実物体に隣接して動くアニメーションを実現する。

2.2 Praxinoscope

Praxinoscope は 1877 年にフランスのエミール・レイノーが発明した回転式のパラパラ漫画である。観察者の正面にある鏡像が回転によって次々に入れ替わり、あたかも動いているかのように見える。外観と原理を図 2 に示す。回転の途中で像の位置が変わることによる歪みの発生を防ぐために、円周上に配置されたすべてのイラストの鏡像が反射

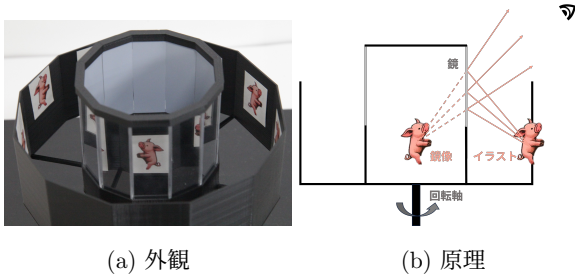
¹ 東京大学 大学院情報理工学系研究科

² 東京大学 医学部

³ 東京大学 大学院情報学環教育部

a) akashi@nae-lab.org

b) tachibana-t5496@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



(a) 外観 (b) 原理
図 2: Praxinoscope の外観と原理

によってちょうど回転軸上に来るよう、鏡と回転軸の距離は鏡とイラストの距離に等しくなっている。

Praxinoscope には紙芝居のような舞台に空いた穴から鏡像がのぞくことで、背景の中でアニメーションが動くタイプのものも発明されているが、アニメーションが実物体と空間的に直接隣接して動くことは実現されていない。

また、Praxinoscope の原理を光学系に組み込んだ研究も存在する [4] が、これは 360° から観察可能かつ見る方向によって異なるものを提示するペッパーズゴーストであり、パラパラ漫画的な使い方はしていない。

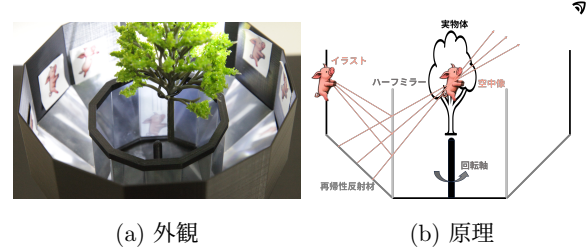
2.3 実物体と隣接した位置に映像を提示する手法

実物体と隣接した位置に映像を提示する手法としては、Head Mounted Display (HMD)、立体ディスプレイ、そして空中像が考えられる。

HMD を用いた場合、ユーザがバーチャルなパラパラ漫画を操作するのではランガ [3] で重要であると指摘された触感や音を実現できない。また、ユーザが実物体の装置を操作することに合わせて、表示されているバーチャルな絵が変化する形式でも、直接絵に働きかけるパラパラ漫画に比べて能動的に絵を動かしている感覚は乏しいことが考えられる。

立体ディスプレイとは、3D 眼鏡やレンチキュラーレンズ、パララックスバリアなどによって左右の眼に異なる映像を提示し、空中に物体があると錯覚させるディスプレイである。体験者が操作するパラパラ漫画装置と別に表示装置として立体ディスプレイを用いることは、HMD と同様能動的に絵を動かしている感覚が乏しい可能性がある。また、パラパラ漫画装置に立体ディスプレイを組み込むことは装置の煩雑さに懸念がある。

空中像は、反射や屈折により空中に結像した実像であり、光学素子によって形成される。光学系そのものをパラパラ漫画装置とすれば、紙のパラパラ漫画同様に直接の物理現象のみによってアニメーションが動き、コンピュータの仲介を必要としない。これにより体験者自身が能動的に絵を動かしている感覚は紙のパラパラ漫画と遜色ないことが期待される。また、電気が不要であることから配線等の装置の煩雑さもない。このことから本研究では空中像を用いる。



(a) 外観 (b) 原理
図 3: PraxinoAIRRscope の外観と原理

2.4 空中像

空中像は、レンズや凹面鏡など光軸のある素子を用いるもの [5] と、光軸を持たない再帰透過光学系に大別される。提案手法では Praxinoscope 式のパラパラ漫画とするため、回転によって光軸を外れた位置から像を観察することが必然的に発生する。光軸を外れると空中像は歪むため、光軸のない再帰透過光学系を採用する。

再帰透過光学系には、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [6], Retro-Transmissive Plate (RT Plate) [7], [8], Roof Mirror Array [9], Retro-Reflective Mirror Array [10] など様々なものが提案されている。本研究では、素子が安価で加工も容易であり、光学系配置の自由度が高く、視野角が広いことから AIRR を用いることとした。

3. PraxinoAIRRscope

Praxinoscope と AIRR を組み合わせ、実物体に隣接した位置に結像した実像が、体験者が装置を回すことでアニメーションとして動く PraxinoAIRRscope を提案する。

3.1 原理

提案装置の外観と原理を図 3 に示す。AIRR はビームスプリッタと再帰性反射材を組み合わせた光学系であり、今回はビームスプリッタとしてハーフミラーを用いた。ハーフミラーとは入射した光の一部を反射し、一部を透過する素子である。光源であるイラストからの拡散光はハーフミラーで一度反射し、再帰性反射材に入射する。再帰性反射した光は再びハーフミラーに入射し、透過する。これによりハーフミラーに対しイラストと面対称な位置に実像が結像する。結像位置は空中であり、スクリーンなどの実物体が存在しないため、イラストと関係した実物体を隣接して配置することができる。

装置を回転させることで視点位置から見える空中像が次々に入れ替わり、アニメーションとなる。

3.2 設計パラメータ

設計にあたり各パラメータが満たすべき条件について述べる。パラメータは、パラパラ漫画のコマ数 n 、ハーフミラー 1 枚あたりの幅及び高さ w_m, h_m 、光源であるイラストの 1 コマあたりの幅及び高さ w_i, h_i 、1 コマあたりの

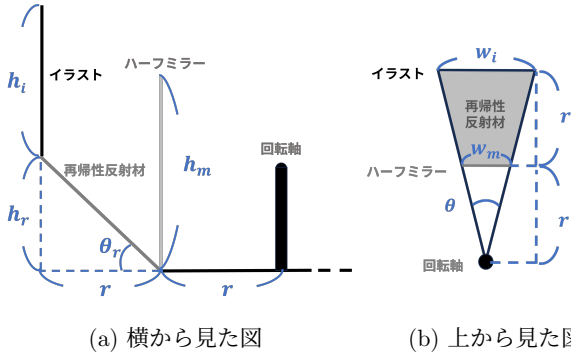


図 4: 設計パラメータ

角度 θ , 再帰性反射材の傾き θ_r , 再帰性反射材の高さ h_r , ハーフミラーと回転軸及びイラスト間の距離 r である。2つの距離が等しく r であるのは、2.2 節と同様に回転時に像の位置が動くことによる歪みの発生が起こらないように、すべてのイラストの結像位置が回転軸上で一致する必要があるためである。これらを図 4 に図示した。

幾何学的関係から、各パラメータは以下の条件を満たす必要がある。

$$\theta = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

$$W_m = 2r \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$W_i = 2W_m \quad (3)$$

$$h_r = r \tan \theta_r \quad (4)$$

また、奥のハーフミラーの下端と空中像の下端を結ぶ直線よりも手前のハーフミラーの上端及び手前のイラストの上端が低くないと、手前のハーフミラーまたはイラストによって空中像が隠されてしまうため、以下の条件も満たす必要がある。

$$h_m \leq 2r \tan \theta_r \quad (5)$$

$$h_r + h_i \leq 3r \tan \theta_r \quad (6)$$

更に、空中像はハーフミラーを見込む領域でのみ観察が可能であるため、空中像を見切れることなく観察するためには以下も条件である。なお、空中像の高さはイラストの高さと等しいため h_i である。

$$h_m > h_i \quad (7)$$

3.3 実装

PraxinoAIRRscope を実装した。一般的な AIRR の配置に従い、 $\theta_r = 45^\circ$ とした。また、コマ数 n は 12 コマとし、イラストの大きさを $w_i = 4\text{cm}$, $h_i = 5\text{cm}$ とした。(1) ~ (4) 式より $\theta = 30^\circ$, $W_m = 2\text{cm}$, $r = \frac{1}{\tan 15^\circ} \simeq 3.73\text{cm}$, $h_r = r$ となる。また、(6) 式を満たす。(5) 式及び (7) 式より、

$$5\text{cm} < h_m \leq 2r \simeq 7.46\text{cm} \quad (8)$$



図 5: 回転させた様子。周囲のイラストは高速に動くが、空中像の位置は回転軸上から動かないため見ることができる

を満たす必要があるため、 $h_m = 6\text{cm}$ とした。装置の全長は $4r$ であるため約 15cm である。

各パラメータに従い設計した筐体を 3D プリントし、イラスト、再帰性反射材を貼り付け、ハーフミラーを筐体に固定した。12 コマであるため、イラストは 12 枚用意し、日本カーバイド工業製の再帰性反射材をパラメータに合わせたサイズ 12 枚に切り出した。ハーフミラーは加工が容易なアクリルである三菱ケミカル製（反射率 40%、透過率 30%）を用い、 $h_m \times w_m = 6\text{cm} \times 2\text{cm}$ のサイズ 12 枚に切り出した。3D プリントした筐体の回転軸部分は中空構造になっており、中空部分に竹串をさして回転させるようにした。これにより回転に伴って筐体と竹串が擦れ、カラカラという音が鳴り、パララ [3] で重要性を指摘された聴覚フィードバックを実現している。

コンテンツとして、装置を回転させることで、イラストのブタが実物体の木に登ってはずれ落ちるパラパラ漫画を用意した。木の模型は装置を回転させても動かないようにするため、釣り針型にしたワイヤーの一端をテーブルに、もう一端を木の模型に固定することで上から吊るした。

3.4 評価

図 5 に回転させた様子を示す。光源である周囲のイラストは高速に動くため絵柄を判別することは困難だが、空中像の位置は中心の回転軸上から動かずに切り替わるため、1 コマ 1 コマの絵柄を判別することができる。

図 6 に結像している様子を示す。実物体である木の幹と隣接した位置に結像し、正しく運動視差が得られることがわかる。また、図 7 にピントを変えて観察した様子を示す。結像している幹の位置にピントを合わせたときのみ像のはっきりし、その他の場合では像がぼやけることから木の幹に隣接した位置に結像していることがわかる。



(a) 左から見た様子

(b) 中央から見た様子

(c) 右から見た様子

図 6: 視点位置を動かして観察した様子. 幹の位置に結像しており, 正しく運動視差が得られていることがわかる



(a) 筐体の手前にピントを合わせた様子

(b) 木の幹にピントを合わせた様子

(c) 奥のイラストにピントを合わせた様子

図 7: ピントを変えて観察した様子. 結像している幹の位置にピントを合わせたときのみはっきり見えることがわかる



図 8: 展示の様子. 右の 3 つが Praxinoscope, 左の 4 つが PraxinoAIRRscope. 実物体と隣接してアニメーションが動くものは中央の 1 つのみ

4. 展示

東京大学制作展において 5 日間の展示 [11] を行った. 本展示のある会場には 824 人が訪れた. 展示には通常の Praxinoscope を 2 つ, 2 段式で上下のコマ数を変えた Praxinoscope, 実物体と隣接してアニメーションが動く PraxinoAIRRscope (以下, 木の PraxinoAIRRscope), 実物体なしに空中でアニメーションが動くだけの PraxinoAIRRscope を 3 つの計 7 つを展示した. 展示の様子を 図 8 に示す.

来場者の様子を少し離れた位置から観察した. 複数人がパラパラ漫画が動く様子の動画を撮影していた. まれにい

くつかの装置を撮影する来場者もいたが, 大半が展示された 7 つのうち木の PraxinoAIRRscope を選んで撮影していた. 通常は 10 秒程度で終わる体験であるが, 1 分以上回し続ける例も多数見られ, 中には木の PraxinoAIRRscope を 10 分近く回し続けた来場者もいた. 一度体験し他の展示を見に行った後, 戻ってきて「もう一回これやる」と言って再度体験する子供や, 母親を連れて戻ってきて「これ回して, ね, これ回して」と自分がしたのと同じ体験を母親にもするようせがむ子供もいた. この展示は会場の奥にあり, 像を観察しやすい視点位置へ誘導する目的で椅子も置いてあったため, 客入りが疎らな時間帯には座って休憩する来場者もいた. 椅子に座り体験せずに携帯を弄るなどして休んでいた来場者が, 5 分ほどして何気なく目の前の木の PraxinoAIRRscope を回した結果, 実物体と隣接してアニメーションが動いていることに気づき興奮した様子で同伴者に報告する例も見られた. これらのことは, 実物体と隣接して動くアニメーションを眺め, その動きは自分が装置を回したことによるものだという実感を伴う体験が人々の情動に働き得ることを示唆している.

来場者からは, しばしばどこ見てもいいかわからないという声が聞こえた. これは, PraxinoAIRRscope では従来式である Praxinoscope と異なり, 静止した状態では像と光源であるイラストが同時に見えてしまい, また空中像は光源であるイラストよりも輝度が低く目立たないため, 回し始めた後もイラストの位置に注目し続けてしまうが, イラストは高速に移動するので見ることでできず, 注目すべきと

感じる領域がなくなるためだと考えられる。3D プリントした筐体は回転軸の先端がアニメーションの下端に隣接するように設計していたが、中心の回転軸の位置に注目するように伝えても理解されない場合も多かった。しかし、木の PraxinoAIRRscope を指して幹のところに注目するように伝えるとすぐに見るべき場所を理解し、他の実物体なしに空中でアニメーションが動くだけの PraxinoAIRRscope についても楽しむようになる来場者が多かった。このことから単にアニメーションが動く位置に実物体があるだけでなく、その実物体がアニメーションと関係することが重要であることが推察される。

5. 制約

空中像の輝度が光源に比べて低いことは PraxinoAIRRscope の制約の1つである。本稿の実装では、ハーフミラーによる光損失のみでも光利用効率が12%以下になってしまう。ビームスプリッターとしてハーフミラーのかわりに反射偏光特性フィルムを用いることで光利用効率が40%を超えることが可能 [12] だが、なお光源の方が倍以上明るい。AIRR は光学系配置の自由度が高く、光源のイラストが体験者に見えない配置もあり得る。一方でイラストが見えないことがパラパラ漫画体験の楽しさを低減させる可能性もあるため、十分な検討が必要である。また、装置の外観を回転中心に注目させるような意匠にするなど、輝度以外の方法で空中像を目立たせることも考えられる。

また、PraxinoAIRRscope では空中像はハーフミラーよりも手前に現れるため、一度に見ることができず空中像の幅はハーフミラーの幅よりも狭い。装置の回転中は残像効果によって静止した状態よりも幅広く空中像を観察可能ではあるが、横方向へ移動するようなパラパラ漫画は見切れる場合があり、提示可能なコンテンツに制限がある。

6. おわりに

実物体と隣接してアニメーションが動くパラパラ漫画装置「PraxinoAIRRscope」を提案した。設計パラメータが満たすべき条件をまとめ、実装によって実物体と隣接したアニメーションの実現を確かめた。更に、実物体と隣接しないパラパラ漫画と並べて展示した結果、実物体と隣接してアニメーションが動くことが新しい体験を生み、実物体と隣接しない場合よりも楽しめることが示唆された。

今後の課題としては、用いる素子や光学系配置、装置の外観などを検討し、空中像をより目立たせることがあげられる。また、パラパラ漫画が特定のコマになった回転位置に合わせて隣接した実物体も動くようにし、パラパラ漫画の動きと実物体をよりインタラクティブにするなど、更なるコンテンツの作成も行う。

謝辞 本研究は東京大学苗村研究室からの機材支援を受けた。

参考文献

- [1] Lipton, L.: *Plateau Invents the Phenakistoscope*, pp. 43–50 (online), DOI: 10.1007/978-1-0716-0951-4-4, Springer US (2021).
- [2] Lipton, L.: *The Zoëtrope and the Praxinoscope*, pp. 55–60 (online), DOI: 10.1007/978-1-0716-0951-4-6, Springer US (2021).
- [3] 伊藤雄一, 藤田和之, 城所宏行: パラパラ: 触覚フィードバックを持つ電子パラパラマンガ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 477–486 (2014).
- [4] Martinez, C., Lee, Y., Clement, N., Sermet, F., Sarasin, D., Mathieu, J. and Boudier, N.: Development of a 360 degree display based on transparent projection surface: application to a theatrical performance, *Advances in Display Technologies IX* (Lee, J.-H., Wang, Q.-H. and Yoon, T.-H., eds.), Vol. 10942, International Society for Optics and Photonics, SPIE, p. 109420J (online), DOI: 10.1117/12.2507258 (2019).
- [5] Ikeda, H., Naemura, T., Harashima, H. and Ishikawa, J.: i-ball: interactive information display like a crystal ball, ACM SIGGRAPH '01 (2001).
- [6] Yamamoto, H., Tomiyama, Y. and Suyama, S.: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924 (online), DOI: 10.1364/OE.22.026919 (2014).
- [7] Maekawa, S., Nitta, K. and Matoba, O.: Transmissive optical imaging device with micromirror array, *Three-Dimensional TV, Video, and Display V* (Javidi, B., Okano, F. and Son, J.-Y., eds.), Vol. 6392, International Society for Optics and Photonics, SPIE, p. 63920E (online), DOI: 10.1117/12.690574 (2006).
- [8] Makoto, O.: Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same, U.S. Patent No.8, 702, 252 (2014).
- [9] maeda, Y., Miyazaki, D. and Maekawa, S.: Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mirror arrays, *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 211–215 (online), DOI: 10.1109/GCCE.2014.7031217 (2014).
- [10] Koike, T. and Onishi, Y.: Aerial 3D Imaging by Retro-reflective Mirror Array, *Proceedings of the 2018 ACM Companion International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '18* Companion, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 25–29 (online), DOI: 10.1145/3280295.3281365 (2018).
- [11] 明石穩紀, 橘 卓見: プラクシノエアスコープ, 第25回東京大学制作展 (2023).
- [12] Tokuda, Y., Hiyama, A., Hirose, M. and Large, T.: Comparison of Material Combinations for Bright and Clear Floating Image by Retro-reflective Re-imaging Technique, *The 21st International Display Workshops, IDW'14*, Vol. 21, Tokyo, Japan, International Display Workshops Incorporated Association, pp. 818–819 (2014).