



高速投影による視線移動方向に応じた複数映像表示手法

宮崎竜輔¹⁾, 宮藤詩緒¹⁾, 小池英樹¹⁾

1) 東京科学大学 情報理工学院 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1,
miyazaki.r.a5eb@m.isct.ac.jp, miyafuji.s.7e2b@m.isct.ac.jp, koike.h.5ff5@m.isct.ac.jp)

概要: 本研究では, 縞模様に分解した画像を高速プロジェクタで表示することで, 閲覧者の視線の移動方向に応じて異なる画像を提示する手法を提案する. 投影される映像は, 静止時は単色画像のように知覚されるが, 特定方向への視線移動を行う間のみ目的画像が知覚される. また, 複数の異なる視線移動方向に対して異なる画像の提示が可能である. 本論文ではこの手法の原理を述ベインタラクションへの応用例を提案する.

キーワード: 高速プロジェクタ, プロジェクション, 視覚, 継時加法混色

1. はじめに

公共の空間での大型モニターやプロジェクタなどでの情報提示は, 1つのデバイスで多くのユーザに情報を提示できる利点がある. 一方で, 1つのディスプレイを多くのユーザが共有して見るため, 通常, 各個人に合わせたパーソナライズされた情報の提示は行うことができない. これに対し, カメラ等のセンサによるユーザトラッキングや HMD (Head Mount Display) デバイスを用いることでそれぞれのユーザに異なる情報を提示する手法がある. しかし, 不特定多数の閲覧者が居る公共の場面では, カメラ等のセンサによるトラッキングは精度やプライバシー面での懸念, HMD を使用する場合は必要となるデバイス数がユーザ数に比例して増加する等, 公共の場面での使用に向かない.

この問題を克服する手法として, 高速投影を用いて, 注視対象や観察対象に動きが生じた時のみ特定の画像が可視化される手法が開発されている [1, 2, 3]. そこで本論文では, 高速投影を用いて観察者の視線の移動方向に応じて異なる画像を提示する手法を提案する. 本手法で投影される画像は, 視線静止時には視認することができないが, 特定方向への視線移動を行う間のみ目的画像が知覚される. また, 視線移動方向によって異なる画像を知覚させることができ, 異なる 2 方向についてそれぞれ異なる画像を提示することが可能となる. 本手法は, 高速プロジェクタ等の高リフレッシュレートでの映像提示と, 目的画像の縞模様への分解を用いて実装される. 本手法により, トラッキングや個人に特化したデバイスの必要なく, 観察者がそれぞれの視線の状態を自発的に変更することで, 知覚する映像を変えるというインタラクションが可能になる. 本論文では, 提案技術の背景を述べた後, 概要と理論を説明し, 高速投影が可能なプロジェクタを使用し理論を検証する. そして, 閲覧者が意図通りの知覚を得ることができているかのユーザ実験の結果を述べる.

2. 提案

本提案で使用する画像の例を図 1 左に示す. 図のように, 提示したい目的画像を 4 枚程度の縞模様パターンに分解する. 目的画像のうち, 模様部分は長さ 1 の白線と長さ 3 の黒線が交互に出現するような縞模様となっている. 背景部分は分解画像のうち 1 枚を白色, 3 枚を黒色としている. この際, 縞模様は, 例として右から左への視線移動により知覚させることを意図する場合, 1 フレームごとに右から左に移動するような位置に白線を配置している. 人間が知覚できる光刺激の周波数の閾値は, 実用上およそ 60 Hz 以上であれば知覚することはできないとされている [4]. この 4 枚の画像を 500 Hz 程度の高リフレッシュレートで表示すると, 人間の視覚では, 各ピクセルの色は時間方向に積分され知覚される. この分解手法は各ピクセルの色の時間方向の平均値が均一となるように計算されている. そのため, 通常時投影映像は単色に見える. これにより通常のディスプレイ上に重畳して表示した場合などであっても, 元々の映像を妨げることなく使用することが可能である.

この映像出力を行いながら, 右から左へなめらかな視線移動を行う場合, 観察者の視界から見てスクリーンは移動方向と逆方向である左から右に相対的に移動しているようにみなすことができる. 投影されている縞模様の各白黒の位置は右から左に移動しているため, この相対的な移動速度が縞模様の右方向への移動速度と一致した際, 人間の視界から見た座標系において, 縞は停止しているようにみなされる. このように 1 色が留まり続ける時間がある程度継続した場合, 人間の視覚はこれらの白色や黒色の縞模様を知覚することができる. これにより, 視線を移動していない状態では知覚できなかった画像を知覚することが可能となる. ただし, 単色のみが投影されているスクリーンを見ながら視線を一定の速度で移動させようとした場合でも, 人間の脳は特定の位置を注視するように自動で補正をかける傾向がある [5]. そのため, ユーザ自身が投影面を指で右から左へなぞるなど, 移動する物体を配置しそれを見つめる

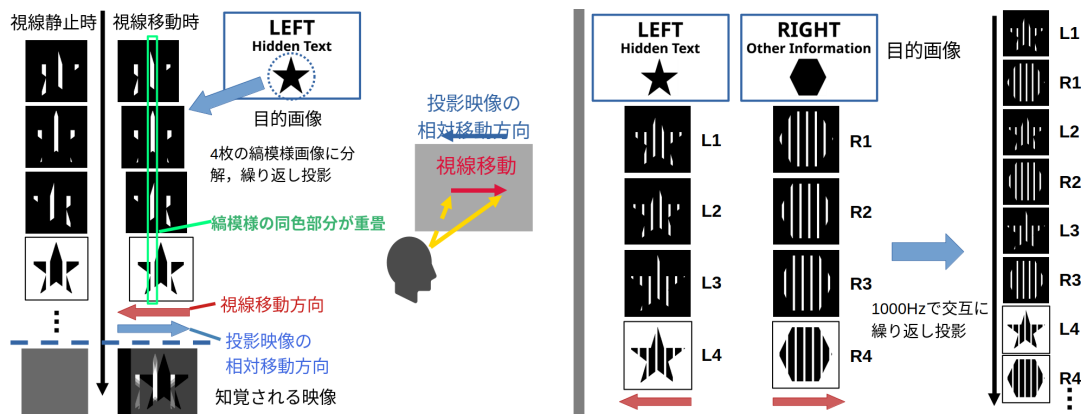


図 1: 提案の概要。(左) 投影される映像は通常時継時加法混色により均一な灰色に知覚されるが、特定方向に視線移動を行うことで埋め込まれた画像が知覚される。(右) 複数方向の視線移動への対応。複数方向の縞模様パターンを交互に投影する。

などの方法が必要である。

3. 実装

本システムは高速プロジェクタと制御用の計算機で構成されている。高リフレッシュレートな画像提示を実現するために、高速プロジェクタ lightCrafter4500¹を使用した。これは、解像度 912 × 1140 の 1bit パターン画像を最大およそ 4000 Hz で投影することができる。今回は、2 方向の視線移動時に知覚できる画像を埋め込む際は、投影周波数を 1000 Hz、1 方向であれば 666 Hz とした。

4. 実験

方向による表示の変化が人間の視覚システムでも観測されるか、また本手法がどのような特性を持つのか解明するために、参加者実験による検証を行った。本実験は 2 つの段階に分かれている。1 つ目は、本手法による提示画像が最も視認しやすい視線移動速度の検証である。2 つ目は、左右 2 方向への視線移動時に、それぞれ異なる画像を正しく知覚できているかどうかの検証である。実験に使用した実験環境を図 3 に示す。実験参加者には顎置きに顎を設置させ、顔とスクリーンの距離を固定した。顔とスクリーンの距離は 700 mm とした。ユーザの正面に高速プロジェクタ lightCrafter4500 を設置し、高速プロジェクタは投影映像の幅が 456 mm となるようにした。これは、使用している高速プロジェクタの水平方向の解像度が 912px であるため、1 px = 0.5 mm となるように調節したためである。また、視線移動用の移動物体の代わりに、別のプロジェクタを用いてスクリーン上に動く白い点を投影した。このプロジェクタの投影サイズは、同様に 1 px = 0.5 mm となるように、横幅 1600 px のウィンドウの横幅がスクリーン上で 800mm となるように設定した。表示する白い点は直径 50 px であり、60 FPS で 1 フレームあたり何 px 移動するかを 1 px 刻みで制御することができる。

4.1 タスク 1

タスク 1 は、本提案手法の適切な視線移動速度を検証することを目的に、視線移動用の動点を表示しながら映像を視聴させる実験を行った。本実験では、図 2 左のような 3 つのランドルト環が視線移動時にのみ見えるようにした。参加者には、視線移動用の移動点を見つめながらこの映像を閲覧するように指示した。ユーザには映像を閲覧しながら、ユーザ自身が速度を変化させ、最も視認しやすい速度を 1 刻みで求めさせた。その後、点の移動方向を逆向きにして同様の実験を行った。参加者を半分に分け、片方は左から右への移動方向を先に、半分には右から左を先に行った。投影周波数は 666 Hz であり、縞模様の移動速度は 333 mm/s である。その後、感想や意見を自由記述または口頭で答えさせた。

4.2 タスク 2

タスク 2 は、左右 2 方向の異なる移動方向に対して、それぞれ異なる映像を正しく提示することができることを証明するために、同一の投影に対して、左右それぞれの視線移動時に見える画像を答えさせる実験を行った。本実験では、図 2 右のような 5 つのランドルト環が、左から右、右から左それぞれの視線移動時に見えるように投影した。ランドルト環の向きは上下左右から乱数で選択しているが、同じ箇所にあるランドルト環の向きが左から右、右から左の視線移動の両方で同一となった場合は再抽選を行った。本実験においてランドルト環を提示画像として選択している理由は、2 方向に対する提示画像が同時に知覚されてしまった場合に、円形部分が重なり円として知覚されるようにすることで、重なり合った画像から 2 方向それぞれの正しい画像を導き出せないようにするためである。これにより、2 方向のうちどちらかのランドルト環のみが知覚された場合のみ正しく解答ができるようにしてある。

参加者を 2 グループに分け、左から右への視線移動を先に行うグループと右から左を先に行うグループを作った。実験 1 と異なり、2 種類の画像を埋め込んでいるため、まず参加者には、サンプル画像を投影し、適切な視線移動用点の速度を求めさせた。その後、ランドルト環を埋め込んだ映

¹<https://www.ti.com/tool/DLPLCR4500EVM>

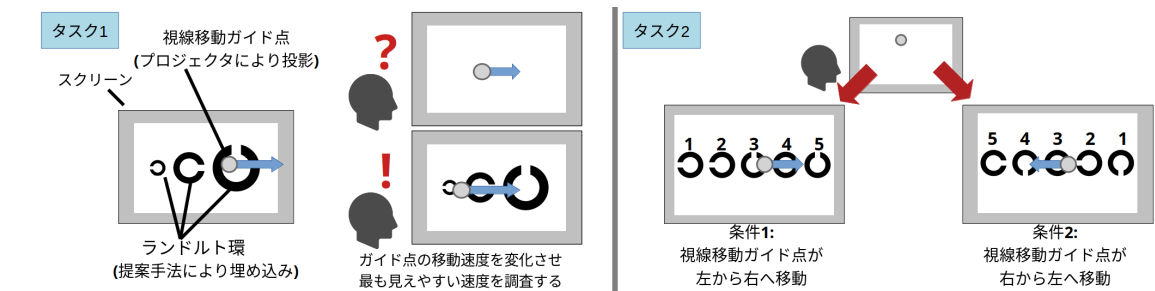


図 2: 実験タスクの概要.

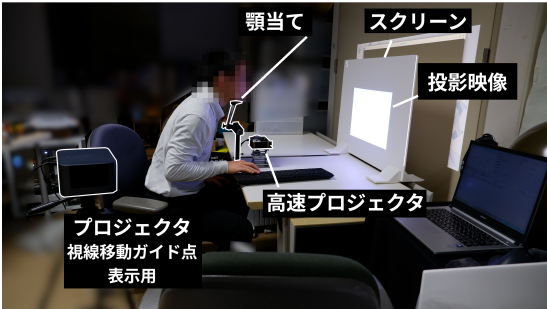


図 3: 実験設計の様子.

像を投影し、1 分間で 5 つ全てについて方向を答えさせた。わからない場合にはわからない旨の選択肢を選ぶように参加者には伝えた。その後、視線移動方向を入れ替え、同様に適切な速度を求め、1 分間で 5 つのランドルト環の方向を答えさせた。その後、感想などを自由記述もしくは口頭で答えさせた。

参加者は男性 10 人女性 2 人の 12 人で、年齢は 22 歳から 28 歳、平均 23.4 歳で標準偏差は 1.62 である。本実験は高速投影を伴うため、光刺激によりてんかんなどの症状が出たことがないことを確認している。実験後には謝礼として 1000 円を渡した。実験は倫理委員会の承認を得て行われた。

4.3 結果

タスク 1 の適切な速度は、左から右について、平均 16.1 pixels/frame、標準偏差 4.50 であり、右から左については平均 17.5 pixels/frame、標準偏差 5.30 であった。適切な速度について、視線移動方向によって有意な差があるか Wilcoxon test 検定で検定したところ、有意差は確認できなかった。

タスク 2 について、実験前に調節させた適切な速度の平均は左から右は 12.4 pixels/frame、標準偏差は 2.47 であり、右から左では 12.3 pixels/frame 及び 3.08 であった。それぞれの視線移動方向についての結果は表 1 に示した。また、正答率の平均は 81.6 % 及び 73.3 % であった。Cochran's Q test で検定したところ、左から右、右から左、両方の集計それぞれにおいて場所による有意差は見られなかった。

5. 考察

実験 1 の結果より、適切な点の移動速度の平均は mm/s に換算すると、483 mm/s と 525 mm/s となり、縞模様の移

表 1: 実験タスク 2 の結果 (%). 混同率は逆方向の視線移動時に提示される画像を答えた場合を指す。

方向/位置	1	2	3	4	5	合計
左から右	91.7	83.3	100	83.3	50.0	81.6
混同率	(8.3)	(16.7)	(0)	(0)	(0)	(5.0)
右から左	66.7	83.3	58.3	83.3	75.0	73.3
混同率	(8.3)	(0)	(25.0)	(8.3)	(0)	(8.3)

動速度である 333 mm/s より 1.5 倍程度早い結果となった。これについて、人間が移動物体をなめらかに視線で追従する場合、視線の移動速度は物体の移動速度の 0.7-0.9 倍であるといわれている [6]。また、今回の実験では、平面のスクリーンを用いている。そのため、スクリーンの端付近にガイド点がある場合は、スクリーンの中心付近にある場合と比較して、幾何学的理由により視界から見える速度が遅くなる。今回の実験設計では、スクリーンの端での速度は中心での速度のおよそ 0.87 倍となる。これらの結果と考察を踏まえて、視線移動を誘導点を表示するなどして誘発する場合は、縞模様の実際の移動速度のおよそ 1.5 倍程度といった速い速度が良いという示唆が得られた。

タスク 2 ではおよそ 70%以上の正答率が得られた。一方で、平均して 6.7%の解答は、逆方向への視線移動時に知覚されることを意図した画像を答えていた。参加者に入力させた自由記述欄や口頭での報告では、ランドルト環の見え方について、「ちかちかと点滅して見える」、「ランドルト環が見えたと思いランドルト環の方向を見ると消えた」といった意見が挙げられた。

6. 制限

本提案の制限としては、埋め込める画像は単色 1bit 画像のみであることがあげられる。また、視線移動の方向が現段階では 2 方向まで検証しているが、3 方向以上に増やすとその分だけ高速な投影が必要となる。対応する方向を増やすほど投影周波数が増大するため、高速プロジェクタの最大投影周波数も考慮する必要がある。今回は投影周波数や縞模様の周期といったパラメータは経験則的に視認性の良かったものを採用した。これらのパラメータについても検証の余地が残っている。また、今回は高速な映像表示デバイスとして高速プロジェクタを採用した。そのため、オク

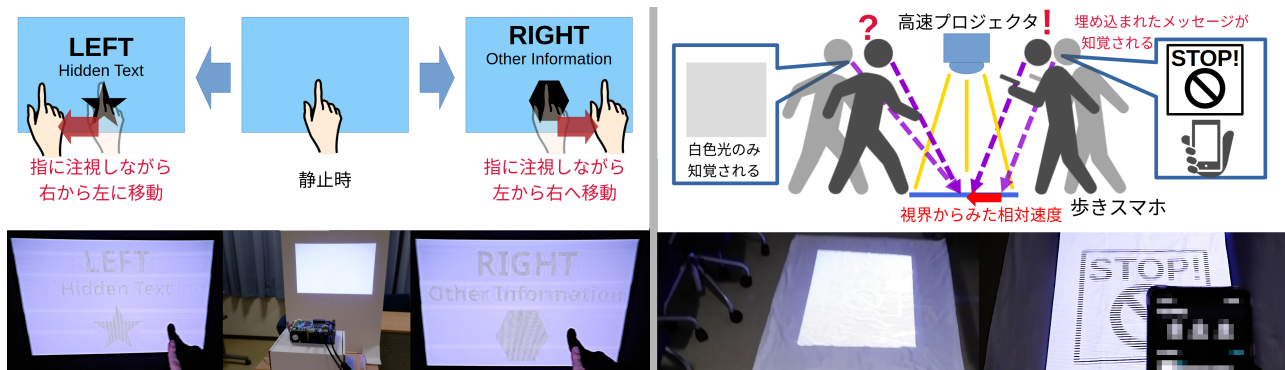


図 4: アプリケーション例. (左) 指を用いたインタラクション. (右) 歩きスマホ中にもみ知覚される表示

ルーションや輝度などの制約は残り、屋外などでの使用については明るさに注意する必要がある。他にも、ユーザは視線をなめらかに移動させる必要があり、投影映像を見る際に中心視野に長時間投影映像を捉えられず、視線移動時の図形の識別能力や識字能力が低下している可能性がある。

7. アプリケーション案

7.1 指を用いたインタラクション

このアプリケーション例において、通常時は投影されている文字は読めないが、スクリーンを指でなぞり、その指を注視することで文字を知覚することができるようになる。このアプリケーションの概要及び投影の様子を図 4 左に示す。この例では、異なる 2 方向に移動する縞模様画像を交互に投影することにより、左右それぞれの動きに対して異なる情報を提示することが可能である。複数人で映像を閲覧した場合でも、指に視線を合わせているかどうかや、指の移動方向によって知覚される映像は閲覧者ごとに異なる。これにより、スクリーン上を指でなぞることで画像情報を取り出すというインタラクションが生まれるほか、視線の合わせ方で異なる人に異なる映像を同時に同位置に提示することが可能である。この例は意図的に視線移動を発生させることによるインタラクション手法の例である。ユーザは指の動かし方や指に注視するかどうかにより知覚される映像を変化させることができる。

7.2 歩きスマホ中にもみ知覚される表示

また、本提案手法を床や壁などに配備することにより、歩きスマホを行っている歩行者にのみ情報を提示することが可能となる(図 4 右上)。歩きスマホを行っている歩行者は、手元のスマートフォンに視線を固定している。その状態で歩行することにより、背景は相対的になめらかに後ろへ移動しているようにみなすことができる。一方で、通常の歩行者が配備箇所を見つめた場合でも、視線が固定されなめらかな移動は発生しない。そのため、歩きスマホを行っている歩行者のみが映像を知覚できる。この例は、意図しない視線移動を利用し知覚される映像を変化させる例である。本デモでの投影画像を図 4 右下に示す。ユースケースとして、歩きスマホへの警告や、移動方向などの誘導などを行

う標識を表示する例が考えられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25K03164 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Arisa Kohtani, Shio Miyafuji, Keishiro Uragaki, Hidetaka Katsuyama, and Hideki Koike. Motion: Gaze guidance with motion-triggered visual cues by mosaic patterns. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [2] Shio Miyafuji, Arisa Kohtani, and Hideki Koike. Motion-aware image interaction using temporal additive color mixing and high-speed projection. In *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [3] Haruka Ikeda, Tomohiko Hayakawa, and Masatoshi Ishikawa. Bilateral motion display: Strategy to provide multiple visual perception using afterimage effects for specific motion. In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [4] H. de Lange Dzn. Research into the dynamic nature of the human fovea→cortex systems with intermittent and modulated light. i. attenuation characteristics with white and colored light. *J. Opt. Soc. Am.*, 48(11):777–784, Nov 1958.
- [5] Davide Zambrano, Egidio Falotico, Luigi Manfredi, and Cecilia Laschi. A model of the smooth pursuit eye movement with prediction and learning. *Applied Bionics and Biomechanics*, 7(2):579713, 2010.
- [6] D. A. Robinson, J. L. Gordon, and S. E. Gordon. A model of the smooth pursuit eye movement system. *Biological Cybernetics*, 55(1):43–57, oct 1986.