

高速投影による運動物体の残像色制御手法

幸谷 有紗* 宮藤 詩緒* 小池 英樹*

概要. 本研究では、高速投影技術と残像効果を利用し、観測者視野内における物体の運動に応じた残像の目的色提示を実現する新たな手法を提案する。継時加法混色による投影中に投影フレームを遮る物体が動くと、物体の残像に意図しない色が視認される。本研究では、運動時の残像に目的の色を提示するため、目的色で構成された複数フレームとその補色で構成された単一フレームを生成し、両者を高速に投影する。提案手法はトラッキング装置を必要とせず、残像の色彩を自在に制御することで、より豊かな視覚体験を提供する。検証により、本手法が静止時の知覚に影響を与えることなく運動時の残像に目的色を提示できることが示された。本手法は、歩きスマホの抑制や、キャラクターとのインタラクション、カメラ撮影時の映像変化を利用した新しいインタラクションが期待される。

1 はじめに

人間の視覚系は、短時間に受け取った光情報を統合して色や形を認識している。この特性は、DLP プロジェクタやディスプレイ技術において、RGB 光による多彩な色表現に活用されている。特に DLP プロジェクタでは、カラーホイールと呼ばれる円盤状のフィルターを使用し、RGB 光を順次高速に投影することで、継時加法混色を実現している。しかし、継時加法混色において、高速移動する物体による遮蔽や急激な視線移動時に RGB の各色が分離して知覚されるカラーブレイキング現象が発生する。この現象は、人間の視覚における残像効果や光の積分特性に起因する。この知覚特性を利用し、運動速度や光の統合を制御することで、意図的な残像を知覚させる手法が提案されてきた。単色の LED ライトを振ることで映像を表現する手法 [2, 21] や、特定の運動ベクトル下で異なる映像を知覚させる手法 [8, 18] がこれに該当する。しかし、これらの手法は運動ベクトルに制約がある。そこで、我々の先行研究ではこの制約を緩和し、観測者の歩行時に特定の箇所に意図的にモザイク模様を知覚させる手法 [11] を提案した。しかし、ランダムな色での表現に制限されており、特定の色の絵やロゴを表現することはできない。本論文では、これらの問題を解決するため、運動方向の制約を最小限に留めたまま、投影フレームを遮る運動物体の残像に特定の色を提示できる新たな手法を提案する (図 1)。提案手法では、重畳する複数枚の投影フレームのうち、目的色で構成されたフレームの割合を増やすことで、残像の色を目的に近づける。本手法は、従来手法と比較して、より自由度の高い色制御を可能にし、観測者に多様な視覚体験を提供する。本論文の貢献は以下のとおりである。

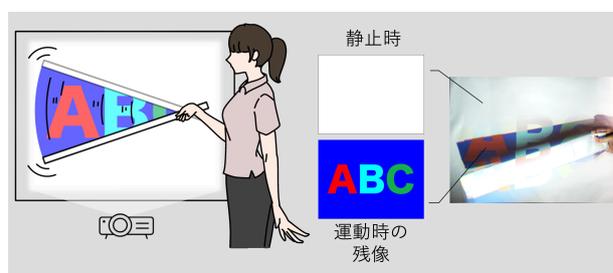


図 1. 投影フレームを遮る運動物体の残像に特定の色が観測される

- トラッキングを必要とせず、動きに応じた色知覚の変化を実現する新たな投影手法の提案
- 提案手法の視覚的原理に関する説明
- 提案手法を用いた応用事例の提示による実用性の議論

2 関連研究

2.1 高速プロジェクタを用いた動的プロジェクション技術

高速プロジェクタは、高フレームレートでの映像投影が可能なプロジェクタである。そのため、運動物体に対する動的プロジェクション技術の基盤となっている。この技術は、物体の動きに合わせてリアルタイムで映像を変化させ、観測者にインタラクティブで臨場感のある体験を提供する [14]。Narita ら [17] は、マーカと高速カメラを用いた高速追従型動的プロジェクション手法を開発した。また、Bermano ら [3] は、赤外線カメラと高速カメラを組み合わせ、低遅延の顔面への動的プロジェクション技術を提案した。さらに、Miyashita ら [16] は、マーカレスで高速移動物体にテクスチャを付与する投影手法を実現した。

Copyright is held by the author(s).

* 東京科学大学 情報理工学院

これらのシステムは、カメラやマーカを利用して動的物体の位置情報を取得し、高速な動的プロジェクションを可能にしている。

2.2 残像効果を用いた知覚刺激の変化

人間の目は、残像効果により、一定の時間の光を重ね合わせて観測する。残像効果を用いた視覚刺激の変化手法として、棒状LEDライトの高速移動による2次元画像の提示が挙げられる [2, 21]。この効果をプロジェクションで起こすことで、観測者の動きに応じて異なる資格情報を提示することが可能である。Ikedaら [8] は、観測者の動く方向に応じて異なる白黒画像が認識される手法を提案した。この研究では光の時間的重なりを利用して、色彩表現に制約がある。また、Sakaueら [18] は、観測者の運動ベクトルに応じて異なるカラー画像を提示する投影手法を提案した。この手法では、運動ベクトルに応じて複数のカラー画像を提示できるが、移動は特定のベクトルに制限される。さらに、我々の先行研究 [11] では、モザイクパターンを用いて歩行時の視線を誘導する手法を提案した。この研究では、赤、緑、青、黒の4色からなるモザイクパターンを映像内に埋め込み、色の配置を変えながら時間積分することで、観測者の運動時のみ知覚されるモザイクパターンを実現している。しかし、高速に時間積分される4色のモザイクは、運動時には虹色のに観測され、色彩を制御することはできない。これらの技術は、残像効果を用いた運動時の視覚変化手法として有用であるが、色彩や映像表現の自由度向上が課題となっている。

2.3 本研究の位置づけと目的

本研究では、以下の要件を満たす新たな高速投影手法を提案する：

1. 観測者や投影対象の位置情報を必要としない
2. 運動方向や速度の制約が少なく、自由な動きに対応可能である
3. 物体の運動によって生じる残像に目的の色を提示する
4. 物体の運動時と静止時で異なる映像知覚を実現する

本手法は、従来の高速プロジェクタを用いた動的プロジェクションとは異なり、運動物体の位置情報を必要とせず、残像効果を用いて運動物体の残像に対して特定の色知覚を実現する。これにより、既存のプロジェクション技術や残像効果を用いた手法の制約を解決し、より柔軟で効果的な視覚体験の提供を目指す。

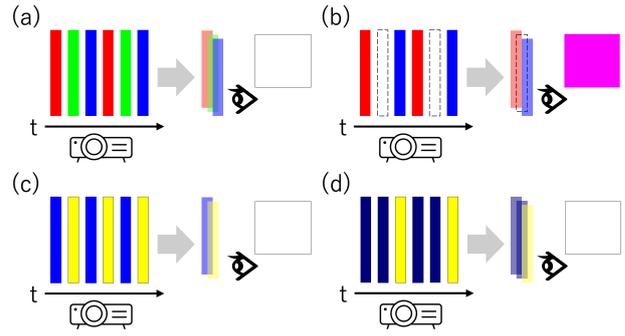


図 2. 継時加法混色による色の知覚刺激の変化

3 手法

3.1 手法の概要

本研究では、残像効果と高速投影を組み合わせ、運動物体の残像に意図的な色を提示する新たな投影手法を提案する。本手法の特徴は、運動時の残像に特定の色を強調するため、複数枚で構成される投影フレームのうち目的色の割合を増やすことである。また、静止時には目的色の補色フレームを重畳することで、運動時とは異なる色を提示する。これにより、運動時と静止時で動的な色の变化を可能にする。

3.2 残像効果

人間の視覚システムは、残像効果により一定時間内の光刺激を統合して知覚する [4]。この性質を利用し、DLP プロジェクタでは RGB 光を継時加法混色することで多彩な色を表現している。赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の3色が高速に重なり合わさることで白色が知覚され (図 2(a))、RGB 光の割合を変更することで、多様な色を表現できる (図 2(b))。R,G,B それぞれの色の合計画素値が一致するように各フレームを分解することで、黄色と青の重畳、さらに、黄色と暗い青2枚の重畳というように、重畳するフレームの色を変更して同じ色を知覚させることも可能である。提案手法では、 T 枚の投影フレームの t 枚目のフレームを $F(t)$ とし、 $F(0)$ から $F(T)$ までを合成すると静止時の目的画像 I_s となるように、投影フレームを設計する。

$$I_s = \sum_0^T F(t) \quad (1)$$

また、物体の運動時に表示したい目的の画像を I_t とする。この I_t を残像として知覚させるために、表示するフレーム $F(t)$ を設計する。物体が微小に移動する際、運動軌道にフレームが順次知覚される。そのため、運動時に目的のカラー画像 I_t を残像として知覚させるためには、フレーム内で I_t の色の割合を増やす必要がある。そこで、 $T-1$ 枚の目的色フレームと1枚の補色フレームを用意することで、残

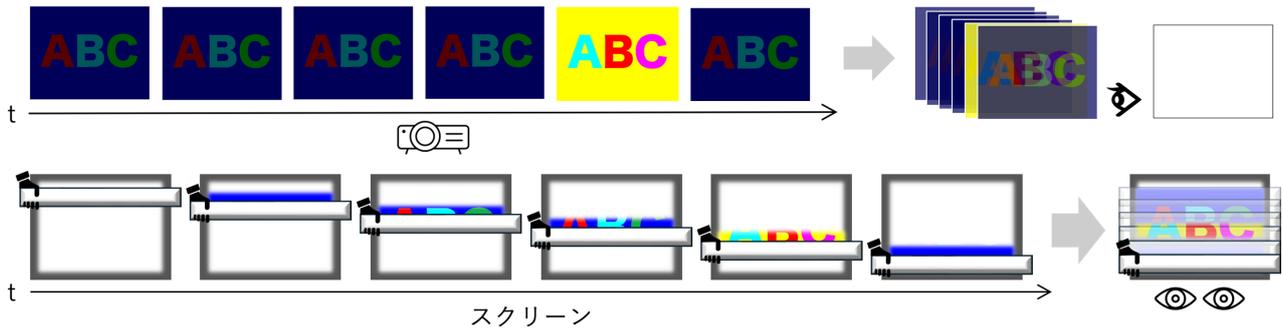


図 3. 投影フレームのうち目的色の割合を増やすことで、運動物体の残像を目的の色に近づけることができる

像中の目的色の割合を最大化し、残像の色を I_t に近づけることができる (図 3). 重畳するフレーム数 T が増加すると、個々のフレームの輝度は低くなるが、人間の視覚特性により暗い投影でも目的色を十分な輝度として認識できる [19]. これにより、物体の運動によって目的色の残像 I_t を知覚させることができる.

3.3 投影フレームの色の割り当て

上記のような条件を満たすように各投影フレームを作成する. 画像 I_s を $T-1$ 枚の暗い目的色フレーム F_d と、補色となる 1 枚のフレーム F_c に分割するため、 F_d と F_c を以下の式で求める.

$$F_d = \frac{I_t}{T-1} \quad (2)$$

$$F_c = I_s - (T-1)F_d \quad (3)$$

上の式から求められる $T-1$ 枚の F_d と 1 枚の F_c を繰り返し投影することで、残像効果により全フレームが重畳し、静止時に見える画像 I_s が知覚される. このとき、運動時の目的画像 I_t は、静止時に観測される画像 I_s よりも小さな画素値で構成される必要がある.

4 実装

装置

本手法は PC による投影画像生成と高速プロジェクタによる投影によって実装した. 図 4 にシステムで用いる装置構成を示す. 高速投影には DynaFlash プロジェクタを使用する [22]. プロジェクタを制御する PC には RTX-3080 の GPU を搭載しており、高速投影処理に用いられている. また、投影環境は黒色布で覆われており、映像はスクリーンに投影される.

フレームの作成

図 5 に実装の概要を示す. 実装の手順として、まず静止時に知覚する画像 I_s と物体の運動時に知覚する

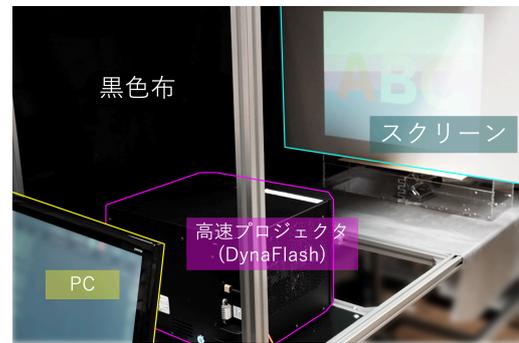


図 4. 装置

画像 I_t を入力データとして定める. 次に、式 (2),(3) に基づいて投影フレーム F_d, F_c を生成する. ここで、フレームの分割数 T が大きいほど運動時に知覚される映像が目的色 I_t に近づくが、分割数が増えると投影周波数の増加とともに F_d の輝度が低下するため、色の再現性が減少する. このため、プロジェクタの投影速度や色域に応じて分割数 T を設定する必要がある. 本実装では、分割数 T を 16、投影周波数を 960fps に設定した. これにより、16 枚のフレームが重畳された I_s は 60fps で観測される. この周波数は CFFF (臨界閾値周波数) [13, 15] を超えており、観測者がちらつきを感じないように選択されている. $T=16$ として式 (2) に基づき、目的色画像 I_t の各画素値を 15 で割り、 F_d を算出する. なお、投影するフレームは 8bit の整数で表現される必要があるため、小数点を切り捨てて整数化する. その後式 (3) により補色フレーム F_c を算出する. F_d を 15 枚、 F_c を 1 枚、合計 16 枚のフレームを用意し、これらのフレームを 960fps で高速プロジェクタで繰り返し投影することで目的の視覚効果を実現する.

5 検証

5.1 目的

本章では、提案手法によって投影された映像が物体の静止時および運動時にどのように観測されるか

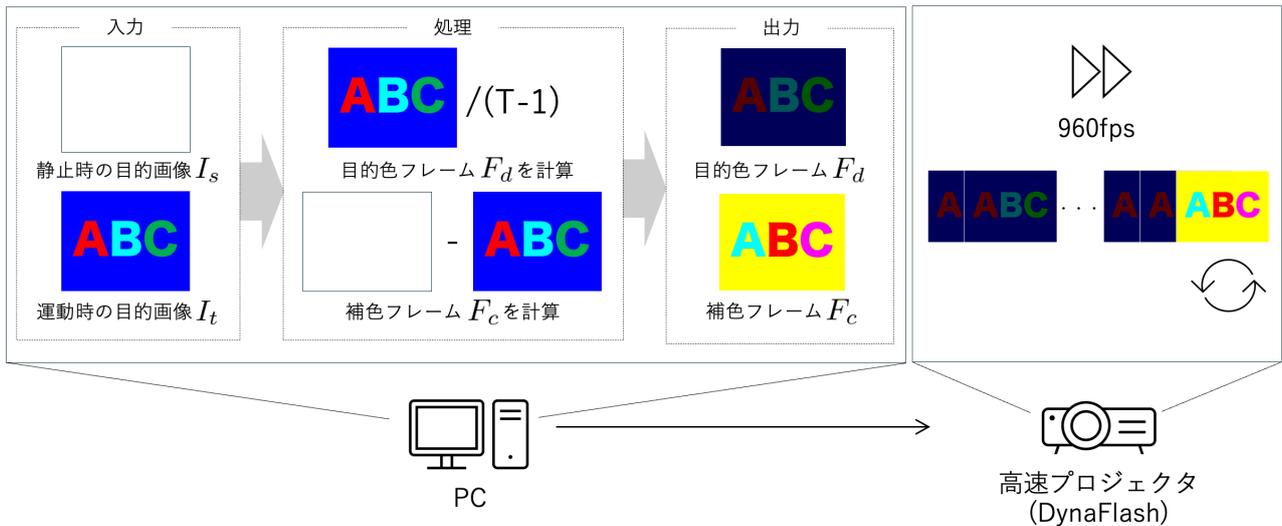


図 5. 実装の概要図

を確認し、さらに、フレームの分割が運動時の色知覚に与える影響を検証することを目的とする。特に以下の2つの仮説を検証する。

- H1: 投影結果は、物体の運動時に静止時とは異なる色が残像として観測される
- H2: 重畳する投影フレームにおける目的色の割合が増えることで、運動時の残像が目的色に近づく

5.2 評価方法

以上の仮説を検証するため、

1. 静止時と運動時における目的色と観測結果の色差の比較
2. 目的色フレームの異なる割合における目的色と観測結果の色差の比較

以上の2点を評価した。フレーム分割による目的色提示の効果を検証するため、本検証では目的色と補色の割合を変えてその効果を比較した。実験では静止時の目的色 I_s を16フレームに分割し、目的色 F_d と補色 F_c の割合を4種類の分割数:(a)8:8 (b)12:4 (c)14:2 (d)15:1で投影した。このとき、フレームの投影順序は(a): $F_d F_c F_d F_c \dots$, (b): $F_d F_d F_d F_c F_d F_d F_d F_c \dots$ ということになり、補色フレームが時間的に最も離れるようにした。各フレームは960fpsで投影し、 I_s は60fpsの映像として観測される。観測結果の記録には、SONY ZV-E10カメラを使用し、シャッタースピードは60fpsに設定した。この設定は人間の知覚に近く [15]、実際に観測される知覚を再現している。静止状態ではカメラを固定し、運動状態ではスクリーンの前で黒色の棒を縦に振ることで再現した(図6右)。投影する画像は、静止時と運動時の双方で様々な色が含まれるように設計した(図6左1列目)。静

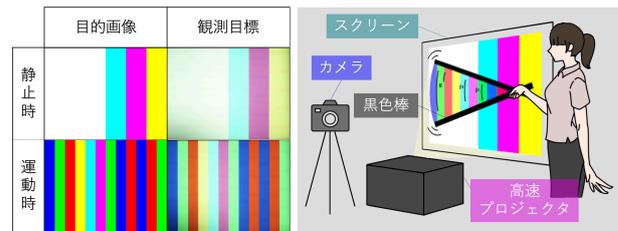


図 6. 実験の観測目標 (左) と実験の様子 (右)

止時には、画像の左半分が白色光、右半分が順にシアン(C)、マゼンタ(M)、イエロー(Y)を示し、運動時には、左からBGRYCMGBRBRGの順に色が知覚されるようにフレームを作成した。これらの画像を投影し、撮影することで静止時および運動時における投影目標とした(図6左2列目)。(a)-(d)の各分割数について静止時と物体の運動時における投影結果を撮影し、投影目標と色を比較することで、色の再現性を評価した。色差の評価にはCIEDE2000 [20]を使用し、観測目標と投影結果の各画素における色差を算出し、カラーマップに示した。

5.3 結果

各分割数で撮影された投影結果と、投影結果と観測目標との色差を図7に示す。静止時の結果より、どの分割数においても色差のカラーマップが全体的に小さな値となっており、観測目標に近いことが示された(図7上段)。また、運動時の結果より、いずれの分割数においても残像に静止時とは異なる色が知覚されることが確認された(図7下段)。特に棒の周辺には重畳されたフレームの色が提示されており、フレームの分割割合に応じてその色の割合が変化している。これらの結果から、仮説H1が支持される。

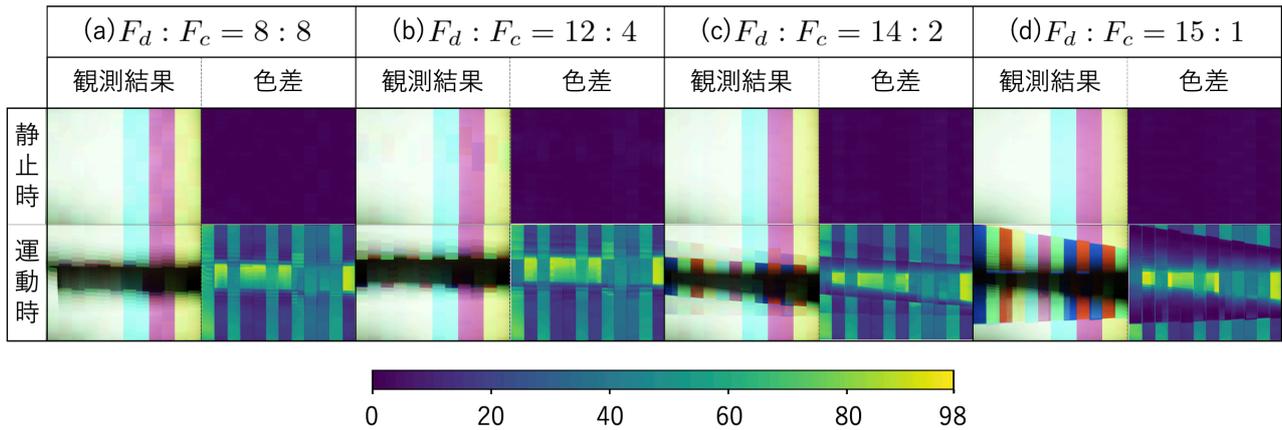


図 7. 各分割数における投影結果と、観測目標との色差を示すカラーマップ

また、運動時の残像色について、(a) では残像の色はランダムに表現されており、残像の色を制御できていない一方、分割数を増やすにつれて残像の色がより鮮明になり、目的色との色差も減少している。これにより、仮説 H2 が支持される結果となった。

6 アプリケーション

本手法は、トラッキング技術や観測者の動きに応じた映像の変更を伴わずに運動物体の残像の色を操作できる。また、個別の着用デバイスも不要であり、公共の場においても幅広く応用可能である。以下に、具体的なアプリケーション例を示す。

6.1 環境光への埋め込み

Brittany ら [5] は、投影を環境光と一体化させることで、実世界の物体に対する知覚を変化させる手法を提案した。本手法を白色環境光として利用することで、日常的な状況において、物体の運動時にのみ知覚を変化させることが可能である。以下に二つの具体例を示す。一つ目は歩きスマホ防止のアプリケーションである。図 8(a) は静止時にスマートフォンを使用している場合には白色環境光として知覚される一方、歩行時にはスマートフォンの動きに応じて、警告を意味する映像を周囲に表示することができる例である。これにより、駅や商業施設での歩きスマホを効果的に抑制することが期待できる。二つ目は、人の往来の可視化である。図 8(b) は、人の進行方向に応じた残像を提示することができる例である。これにより、人の動きに応じた空間演出が可能となり、空間の雰囲気をも動的に変えることができる。

6.2 インタラクションへの応用

本手法を利用することで、観測者の動きに応じた映像変化を通じて、様々なインタラクションが実現

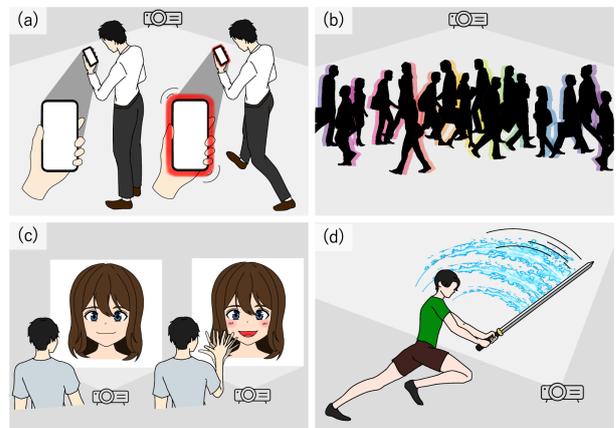


図 8. アプリケーション例:(a) 歩きスマホの抑制 (b) 人の往来への残像提示 (c) キャラクターとのインタラクション (d) 振りかぶった剣への効果線の提示

可能である。以下に二つの具体例を示す。一つ目はキャラクターとのインタラクションである。提案手法を用いることで、静止時にはキャラクターが表示され、観測者が手を振るなどの動作を行うと、運動時に用意されたエフェクトをキャラクターに追加することができる。図 8(c) は、観測者がキャラクターの映像に手を振ることで、キャラクターが微笑むような知覚映像の変化を与えている例である。これにより、動作を通じたキャラクターとの対話的な体験を提供することができる。二つ目は効果線の提示である。提案手法を用いることで、剣やバットを振った際に、残像に効果線を表示することが可能となる。図 8(d) は、剣を振った際に、水のエフェクトが残像に表示される例である。これにより、現実世界でのアクションが視覚的に強化され、より没入感のある体験を提供できる。

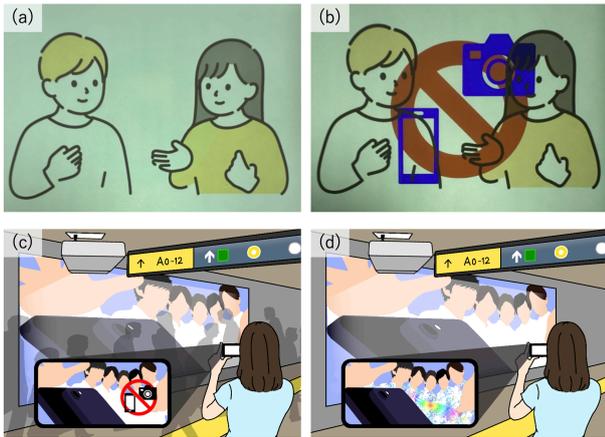


図 9. カメラ撮影による映像の変化 (上段) と、駅の広告におけるアプリケーション例 (下段)

6.3 カメラとのインタラクション

本手法は、カメラを用いた新しいインタラクション手法としても応用可能である。先行研究 [1, 6, 10] では、投影とカメラを同期させることで、映像内にバーコードのような二値画像を埋め込み、撮影を通じたインタラクションを実現している。本手法では、カメラで投影を撮影することで、シャッタースピードとデジタル処理によるフレームの欠損を利用し、運動時の観測と同様に特定の映像を知覚させることができる。この手法は、カメラと映像の同期を必要とせず、一般的なスマートフォンのカメラでも容易に応用できる。図 9 上段の画像は、実際に提案手法を用いて映像に撮影禁止のピクトグラムを埋め込んだ例である。人間の知覚よりも長いシャッタースピードで撮影した場合には静止時の目標画像となり (図 9(a)), シャッタースピードが短い場合は運動時の目標画像となる (図 9(b))。特に、スマートフォンのシャッタースピードは手ブレを防ぐために高速であることが多いため、運動時の目標画像が撮影される可能性が高い。カメラを用いた具体的なアプリケーションとして、駅の広告における撮影抑制・促進が挙げられる。駅には多くの魅力的な広告が掲示されており、その中には多くの人々に撮影されるものもある。広告の写真撮影は、その後の拡散によって広告効果を高める可能性があるが、ラッシュ時には撮影者が歩行者の妨げになることが懸念される。図 9(c) は、人の往来の多いラッシュ時には広告の撮影を妨げ、図 9(d) は、閑散時には広告内の人物の服装の変化という撮影による付加価値を提供し、撮影を促進することができる例である。これにより、適切なタイミングでの広告の拡散をコントロールすることが可能となり、広告効果を最大化することができる。

7 議論

本研究では、残像効果と高速投影を組み合わせ、運動時の残像に目的の色を提示する投影手法を提案した。評価実験においても、静止時および運動時の双方において目的の色を提示できることが確認された。しかし、本手法にはいくつかの制約が存在する。

運動速度に関する制約

まず、運動速度に関する制約が挙げられる。本手法が効果的に機能するためには、物体の運動が人間の目の残像時間を上回る速度で行われる必要がある。この条件を満たさない場合、運動時に意図した色や画像が十分に知覚されない可能性がある。

運動時画像における周波数成分の制約

次に、運動時画像における周波数成分の制約が挙げられる。高周波成分を含む画像は運動時により顕著に知覚されやすいが、ぼやけた文字や模様など、低周波成分を含む低い顕著性の画像は知覚が困難である [9]。そのため、エッジの強調や大きな色の変化を含む画像を用いることで、より効果的に目的の映像を提示することができる。

投影周波数の制約

さらに、適切な投影周波数の選定における制約も存在する。CFFF (臨界閾値周波数) が環境光、輝度、色彩条件、個人差に応じて変動するように [1, 7]、本手法における投影分割数と投影周波数も、これらの要因に依存する。また、周辺視のほうが中心視よりもフリッカー周波数に対して敏感であるため [12]、中心視では観測されなかったフリッカーが、周辺視では知覚される可能性がある。本研究における実験では、分割フレーム数を 16、投影周波数を 960fps に設定したが、環境光の強さ、投影画像の彩度、補色の輝度などの要因によって、最適な投影周波数は変動することが考えられる。これらの制約を踏まえ、今後より広範な条件下での適応性を検討することが必要である。

8 結論

本研究では、高速投影技術と残像効果を組み合わせることで、物体の運動に応じた残像の目的色提示を実現する新たな手法を提案した。提案手法では、運動時の残像に目的の色が強調されるよう、複数の目的色フレームと 1 枚の補色フレームを高速で繰り返し投影する。検証の結果から、提案手法による目的色フレームの分割は、残像の色の制御に有効であることが示された。しかし、運動速度や投影周波数における制約があり、今後制約の緩和が望まれる。本手法は、トラッキング装置を必要としないため、公共の場でのインタラクションやエンターテインメント分野への応用が期待される。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H04221 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Abe, A. Arami, T. Hiraki, S. Fukushima, and T. Naemura. Imperceptible Color Vibration for Embedding Pixel-by-Pixel Data into LCD Images. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '17*, p. 1464–1470, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [2] H. Ando, J. Watanabe, T. Amemiya, and T. Maeda. Full-Scale Saccade-Based Display: Public / Private Image Presentation Based on Gaze-Contingent Visual Illusion. In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies, SIGGRAPH '07*, p. 5–es, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [3] A. H. Bermanno, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer. Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection. *Computer Graphics Forum*, 36(2):311–323, 2017.
- [4] J. R. Brockmole, R. F. Wang, and D. E. Irwin. Temporal integration between visual images and visual percepts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(2):315, 2002.
- [5] B. Fatura, L. LaPerche, P. Reyneri, B. Jones, and K. Karsch. Lightform: procedural effects for projected AR. In *ACM SIGGRAPH 2018 Studio, SIGGRAPH '18*, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [6] A. Grundhöfer, M. Seeger, F. Hantsch, and O. Bimber. Dynamic Adaptation of Projected Imperceptible Codes. *ISMAR '07*, p. 1–10, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [7] S. Hattori and T. Hiraki. Accelerated and Optimized Search of Imperceptible Color Vibration for Embedding Information into LCD Images. In *SIGGRAPH Asia 2022 Posters, SA '22*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [8] H. Ikeda, T. Hayakawa, and M. Ishikawa. Bilateral Motion Display: Strategy to Provide Multiple Visual Perception Using Afterimage Effects for Specific Motion. *VRST '19*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [9] L. Itti, C. Koch, and E. Niebur. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11):1254–1259, 1998.
- [10] R. Junichi. Temporal Phase Shift: 時間位相差を持つプロジェクションシステムによる錯視現象とそのモデル化. *WISS2009*, p. 0028, 12 2009.
- [11] A. Kohtani, S. Miyafuji, K. Uragaki, H. Katsuyama, and H. Koike. MOSion: Gaze Guidance with Motion-triggered Visual Cues by Mosaic Patterns. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '24*, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [12] B. Krajanich, P. Kellnhofer, and G. Wetzstein. A Perceptual Model for Eccentricity-Dependent Spatio-Temporal Flicker Fusion and Its Applications to Foveated Graphics. *ACM Trans. Graph.*, 40(4), jul 2021.
- [13] C. Landis. Determinants of the Critical Flicker-Fusion Threshold. *Physiological Reviews*, 34(2):259–286, 1954. PMID: 13155188.
- [14] J. Lee, Y. Kim, M.-H. Heo, D. Kim, and B.-S. Shin. Real-Time Projection-Based Augmented Reality System for Dynamic Objects in the Performing Arts. *Symmetry*, 7(1):182–192, 2015.
- [15] N. D. Mankowska, A. B. Marcinkowska, M. Waskow, R. I. Sharma, J. Kot, and P. J. Winklewski. Critical Flicker Fusion Frequency: A Narrative Review. *Medicina*, 57(10), 2021.
- [16] L. Miyashita, Y. Watanabe, and M. Ishikawa. MIDAS Projection: Markerless and Modelless Dynamic Projection Mapping for Material Representation. *ACM Trans. Graph.*, 37(6), dec 2018.
- [17] G. Narita, Y. Watanabe, and M. Ishikawa. Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(3):1235–1248, 2017.
- [18] F. Sakaue and J. Sato. Active 3D Motion Visualization Based on Spatiotemporal Light-Ray Integration. In *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1977–1985, 2020.
- [19] H. Seetzen, W. Heidrich, W. Stuerzlinger, G. Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, and A. Vorozcovs. *High Dynamic Range Display Systems*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1 edition, 2023.
- [20] G. Sharma, W. Wu, and E. Dalal. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research Application*, 30:21 – 30, 02 2005.
- [21] J. Watanabe, T. Maeda, and H. Ando. Gaze-Contingent Visual Presentation Technique with Electro-Ocular-Graph-Based Saccade Detection. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 9(2), jun 2012.
- [22] Y. Watanabe, G. Narita, S. Tatsuno, T. Yuasa, K. Sumino, and M. Ishikawa. High-speed 8-bit Image Projector at 1,000 fps with 3 ms Delay. 12 2015.