# 高速投影と時間方向の色分解による視線移動方向に応じた映像提示手法

宮崎 竜輔\* 宮藤 詩緒\* 小池 英樹\*

概要. 本論文では、ユーザの視線の移動方向に応じて知覚される映像が変化する映像表示手法を提案する. 本手法によって知覚される映像は、視線が静止している状態では視線静止時の目的画像のみであるが、視線を特定の方向に移動させながら映像を閲覧することにより、埋め込まれた視線移動時の目的画像を視認することができる. また、上下左右のうち異なる2方向について、それぞれの方向への視線移動時に異なる画像を提示することも可能である. 本手法は、人間の臨界融合周波数を超える高速での映像表示が可能な高速プロジェクタ等のデバイスと、特定の方法での画像の分割手法により実現される. 本論文では、観察者に目的の色を知覚させる手法や色、解像度、表示速度に関する制約を表示実験を通して議論する. また、各ユーザの視線状態に応じて異なる映像を提示するアプリケーション例を紹介する.

### 1 はじめに

ディスプレイやプロジェクタでの情報提示は社会において様々な場面で使用されている。特に公共の場など不特定多数の閲覧者が存在する空間においてこれらのデバイスを用いて情報を提示することには、単一のデバイスで多くの閲覧者に同時に情報を提示できるという利点がある。なかでも、プロジェクタは曲面など複雑な面への投影が可能である他 [3,21]、ディスプレイも構造物の壁面や床といった部分に埋め込むことで、構造物の表面への映像投影が可能となる。カメラやセンサを用いて閲覧者をトラッキングすれば、インタラクティブな情報提示を行うことも可能となる。

しかし、一般的なディスプレイでは、異なる閲覧 者に対してそれぞれに対応した異なる映像を提示す ることは困難である. ヘッドマウントディスプレイ では、各閲覧者ごとにデバイスを装着させることに より各個人への異なる情報提示が可能だが、不特定 多数の閲覧者を対象とする場合は,閲覧者の増加に 伴い必要となるデバイス数が増加する問題が生じる. また、カメラやセンサなどによるトラッキング例に ついても、特に不特定多数の閲覧者がいる公共空間 においては、精度やプライバシーに関する懸念があ る. これらの課題を解決する方法として、トラッキ ングなどを用い映像そのものを閲覧者に合わせて変 化させるのではなく、映像自体は変化しないが閲覧 者の状態によって知覚される内容が変化する表示手 法が考えられる. 本論文では、特に閲覧者の視線の 動きに着目する.

本論文では,各観察者に個別の情報表示を目的として,表示映像が観察者の視線が特定の方向に移動したときにのみ特定の画像を提示する新たな映像表



図 1. 本提案の概要.最大 2 方向の視線移動に対して, それぞれの移動方向に応じた異なる画像を提示す ることが可能となる.

示手法を提案する(図 1)本手法では、観察者の視 線が静止している状態時は「静止時目的画像」のみ が知覚される. しかし、視線を特定の方向に移動さ せながら映像を閲覧すると,「視線移動時目的画像」 を視認することができる. さらに、上下左右のうち 異なる2方向について、それぞれの方向への視線移 動時にそれぞれ異なる視線移動時目的画像を提示す ることも可能である. 本手法は、視線移動方向に応 じて映像が変化する手法 [13, 14] を発展させ、従来 手法では不可能であったカラー表示への対応を行う. 具体的には、従来同色領域に対して適用していた手 法を改良し、特定のピクセル領域ごとに「視線移動 時目的画像」の色と、その補正色を用いたフレーム に分解し、高速プロジェクタなどの高速表示が可能 なデバイスを用いて映像の表示を行う. これにより、 カメラやセンサ等のトラッキングを用いずに複数の 閲覧者にそれぞれ異なる情報を提示することが可能 となる.

### 2 関連研究

### 2.1 視線を用いたインタラクション手法

プロジェクタによる投影映像やディスプレイによる表示映像とのインタラクション手法としては,ハンドジェスチャをトラッキングするものや [2],他の物体やデバイスを入力として利用するもの [20,23],プロジェクタユニットそのものの動きを入力とする

Copyright is held by the author(s).

<sup>\*</sup> 東京科学大学

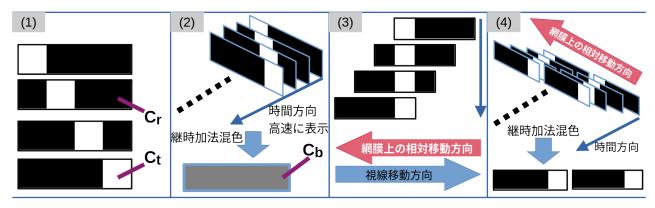


図 2. 色分解手法の説明.

もの [16, 9] など多数の方法が研究されてきた.これらの例では,ユーザやデバイスの動作を検出する方法として,主にカメラなどを用いたトラッキングが使用される.

インタラクション手法として、視線を利用する方 法が存在する [25, 6]. この方法は、身体の大きな動 きを必要としない. そのため, 両手が塞がっている 状態での入力手法や、VR 環境における入力手法と して身体のジェスチャを用いた入力と併用するなど して利用される [7, 11]. また, 視線の動きはユーザ の意識を顕著に反映するため、ユーザの注意や興味 を分析し利用することができる [4]. これらの手法 は基本的に専用のアイトラッカを利用し視線を検出 することで実現されている. キャリブレーション不 要な手法も研究されているが、多くは専用のデバイ スとキャリブレーションが必要であり、同時に体験 することができる人数に制限がある. 本提案手法も, 視線のなめらかな移動を利用したインタラクション を可能としているが、トラッキングを行わず、視線 の動きに応じて知覚される画像が直接変化する. ま た, 視線移動を直接インタラクション手法として用 いるのではなく、視線移動を原理の一部として利用 しているという点で従来とは異なる立ち位置である.

### 2.2 トラッキングを使用しない手法

上記の手法では、映像とのインタラクションには、トラッキングなどを併用する必要であった。Sakaueら [19] は、トラッキングなどを用いずに、プロジェクタと投影先のスクリーンの距離の変化に応じて映像が変化する投影手法を提案している。これは、本提案と同様移動方向などに応じて映像を変化させることができる一方、移動方向はスクリーンの法線方向に限定されている。

Ikeda ら [8] は、投影映像を左右に特定の速度で移動させることにより知覚される投影映像を変化させる手法を提案している。これも本提案と似たコンセプトであるが、静止時には意味を持たない模様が投影されてしまい、静止時の情報提示を妨げるという問題があった。

他には、レンチキュラーレンズなどを用いスクリーンに特殊な加工を施すことや [22]、ディスプレイの前に無数の穴をあけたバリアを設置すること [15, 10] などにより、見る角度により異なる映像を提示するものがある。

### 2.3 高速表示を利用したディスプレイ

500Hz 以上といった高速で映像を提示すること が可能なプロジェクタやディスプレイが存在する. 高速投影の利点として, 人間の視覚特性を利用した アプリケーションが可能となる点がある. 人間が感 知できる光の点滅の周波数の限界は臨界融合周波数 (CFF) と呼ばれており、様々な条件にもよるがおよ そ 60Hz である [5]. この速度を十分に超えた投影を 行うことにより様々な映像表示やインタラクション が可能となる [17]. Phyxel は、高速投影と回転する 質感を持ったスクリーン用いて投影に質感を提示し ている [28]. Kohtani らは、通常の映像投影に加え て,映像の一部を特定のパターンに投影色を分解し 投影を行うことで,映像の一部に視線誘導を行って いる [12]. また, Tosa らは同様に知覚限界に近い速 度での色の点滅を用いて視線誘導を行っている [24]. また、高速な視線移動であるサッケード運動を利用 し、サッケード運動により1次元表示デバイスを用 いて 2 次元画像を知覚させる例がある [1, 26].

### 3 提案

本論文では、観察者の視線移動方向に応じて異なる画像を提示する映像投影手法を提案する. 本提案の概要を図1に示す.

# 3.1 継時加法混色と視線移動時の知覚

人間の視覚は一般に 60Hz 程度である CFF を超える高速で複数の色刺激を提示された場合,それぞれの色を峻別することはできず,一定期間に提示された色刺激を混色し知覚する [5]. そのため,図 2(1) のような n 枚の画像フレームを,1/60 秒間に等間隔で順番に高速に表示した場合,図 2(2) のように各画素は時間方向に平均化され知覚される.この高

速表示を行う際に、視線を左から右になめらかに移動させる場合を考える.この際、人間の網膜上の座標系では、表示フレームが相対的な右から左に移動する.図2(3)のようにこの相対的な移動速度と、表示映像における白色部分の仮想的な移動速度が一致した場合、図2(4)のように時間方向に混色が行われるため、白黒の模様が出現したように知覚される.この手法を用いることにより、視線の静止時と特定方向への視線移動時で異なる模様を提示することが可能となる.

# 3.2 色分解手法の拡張

上記手法を,任意の色を提示するために拡張する. 以下,色の表現には赤緑青それぞれ $0\sim255$  の8 ビット階調を使用する. 視線移動時に顕在化させることを目的とするターゲット色を  $C_t=(R_t,G_t,B_t)$  とし,視線静止時に提示することを目的とする背景色を  $C_b(R_b,G_b,B_b)$  とする.  $C_t$  を打ち消す補正部分の色を  $C_r=(R_r,G_r,B_r)$  とする. 使用するフレームの枚数を n  $(n\geq3)$  とした場合に,これらの間には以下の式が成立する.

$$\frac{C_t + (n-1)C_r}{n} = C_b \tag{1}$$

ここで、表示するフレームに使用される色である  $C_t, C_r$  は、 $0 \le R_t, G_t, B_t < 256$  及び  $0 \le R_r, G_r, B_r < 256$  である。 $C_t$  について、 $R_t, G_t, B_t$  が下限 である 0 のとき、 $R_r, G_r, B_r$  の範囲より、

$$0 \le R_b < 256 \times \frac{n-1}{n} \tag{2}$$

となる.  $R_t$ ,  $G_t$ ,  $B_t$  が上限である 255 のとき,

$$\frac{255}{n} \le R_b < \frac{256(n-1) + 255}{n} \tag{3}$$

となる. これらの共通範囲より、この範囲において $C_b$  は以下の範囲に制限される.

$$\frac{255}{n} \le R_b, G_b, B_b, < 256 \times \frac{n-1}{n} \tag{4}$$

この制約内において、視線移動方向にnピクセル分の領域を、視線静止時は $C_b$ 、視線移動時は1ピクセルの $C_t$ とn-1ピクセルの $C_r$ の領域に分解することが可能となる.

上記の分解手法を用い,目的とする画像の各画素値に応じた色に分解することで,視線移動により知覚される目的画像を映像中に埋め込むことができる.ただし,1 ピクセルの  $C_t$  とn-1 ピクセルの  $C_r$  を提示した際に,人間の視覚やカメラのセンサがその領域を何色であると知覚するかについては,表示例の章にて説明するが, $C_t$  の反対色であるように知覚することが示唆されている.そのため,目的画像の各画素の値に対して,その反対色を  $C_t$  の値とし

て採用することにより,目的画像を埋め込むことが可能となる.詳細な手順については実装の章にて説明する.

### 3.3 2方向の視線移動への対応

上記手法により、ある 1 方向の視線移動が行われている際にのみ目的画像を提示することが可能となった.次に、2 方向の視線移動に対してそれぞれ異なる画像を提示する方法を説明する.まず、各視線移動方向と対応する方向に色  $C_t$  の領域が移動するように分解した 2 種類の画像セットを用意する.そして、これらをそれぞれ順番に交互に出力する.これにより、各視線移動方向に対応する目的画像を表示することが可能となる.

#### **3.4** なめらかな視線移動の誘発

本提案手法はなめらかな視線移動を前提としてい る.しかし、一般に人間はある位置から別の位置へ 視線を移動しようとした際に、サッケード運動が発 生する [30]. これはなめらかな動きではなく、瞬時 に注視点が移動し、また移動中の視覚の情報はサッ ケード抑制により知覚されない. そのため、他の方 法で視線移動を誘発する必要がある. この方法には、 意図的な視線移動と意図しない視線移動の2種が考 えられる. 意図的な視線移動の誘発方法としては、 表示面上に移動する点を重畳表示しその点を注視す る、指で表示面をなぞりその指を注視するといった 方法が考えられる. これらの例のように移動する物 体を追跡する場合、注視点は物体の 0.7 ~ 0.9 倍程 度の速度で移動し、位置の差は定期的にサッケード 運動で補完される [18]. 意図しない視線移動の誘発 方法としては、表示デバイスや映像そのものが急に 動く場合 [29] や, スマートフォンなどの手に持った 別の物体に注視した状態で歩くなど、他の物体に注 視しながら観察者や表示デバイスが移動するなどの 例が考えられる. これらを利用したアプリケーショ ン例について、アプリケーション例の章で議論する.

# 4 実装

#### **4.1** ソフトウェア

本提案手法をもとに、ある静止時目的画像と視線移動時目的画像に対して、それぞれを視線の静止時と移動時に知覚させるような処理方法を説明する. 処理の手順は図 3 に示してある. まず、分割数 n 及び対応する視線移動方向を決定する. 次に、静止時目的画像が制約条件 (4) を満たすように、各画素値 c を  $0 \le c < 256$  から  $255/n \le c' < 256 \times (n-1)/n$  にスケールする. 視線移動時目的画像は各画素を反対色に変換する. 反対色とする理由は考察の章にて述べる. 次に、静止時目的画像と視線移動時目的画像の両方を、視線移動方向が長辺となるように  $1\times n$ 



図 3. 目的画像からの画像分解手順.

ピクセルの長方形領域に分割し,その領域の代表色を領域内の色の平均で定める。そして各領域に対して, $C_b$ を静止時目的画像におけるその領域の代表色, $C_t$ を色反転後の視線移動時目的画像におけるその領域の代表色として定め, $C_r$ を計算し,提案手法によりn枚のフレームに分解する。

#### 4.2 ハードウェア

本提案では、CFF を超える非常に速い速度での映像の出力が可能であるデバイスが必要となる。本実装では、投影速度の柔軟性や実装の容易さなどの理由から高速プロジェクタ DynaFlash [27] を使用した。これは、 $1024 \times 768$  ピクセル 24bit フルカラー画像を最大およそ 900Hz の高速で投影が可能なデバイスである。

### 5 表示例

### 5.1 画像分割数及び埋め込み枚数と視認性の関係

本提案手法による表示の実現性及び各パラメータと視認性の関係を確認するために、画像の分割数n及び視線移動の方向数xを変え投影を行った.投影周波数Fは、分割したフレームの1周期分を1/60秒以内に投影することを目安に、 $F=60\times n\times x$ と定めた.投影した映像をカメラを動かしながら撮影した.

#### 5.2 撮影方法

投影及び撮影の様子は図4に示した。撮影には X-A7(Fujifilm) を使用し、シャッタスピードを人間の 視覚に近づけるため 1/60 秒とし、ISO 感度 2500、露出補正 0 とした。カメラを対応する方向に振ることで視線移動を再現し、その様子を動画で撮影した。

### 6 考察

投影結果を図5に示した.この結果より,以下の示唆が得られた.



図 4. 投影環境のセットアップ.

### 6.1 分割数 n, 視線移動方向数と視認性の関係

分割数nを大きくするほど,視線移動時目的画像の視認性が向上した.しかしその一方で,目的画像の処理時にnに比例する大きさの領域に画像を分割するため,nを大きくするほど画質が荒くなり,文字などの識別可能性は低下する.また,nに比例して CFF を考慮した投影周波数は増大するため,投影デバイスの最大出力可能周波数というハードウェア面の制約も考慮する必要がある.視線移動方向の数については,2方向埋め込み時は1方向埋め込み時と比較して視線移動時画像の視認性が低下しており,また投影周波数も倍となるため,よりハードウェア面の制約を受ける.

#### 6.2 $C_t$ と視認される色の関係

図 5 左の移動時元画像を  $1 \times n$  ピクセルの領域に分割し各領域内で平均をとったものが  $C_t$  であるが,投影の結果知覚される色はおよそその反対色となった.そのため,画像の前準備段階で提示したい目的画像の反対色画像を作成しそれをもとに  $C_t$  を計算する必要があることが示唆された.このように反対色が知覚された理由としては,画像分解手法の関係上色が  $C_r$  となる領域が存在することが関係していると考えられる. $C_r$  は視線移動時の目的色  $C_t$  を打ち消して視線静止時の目的色  $C_t$  を打ちれているため,背景画像次第ではあるが基本的に $C_t$  の反対色の明度を下げた値に近くなる.投影の

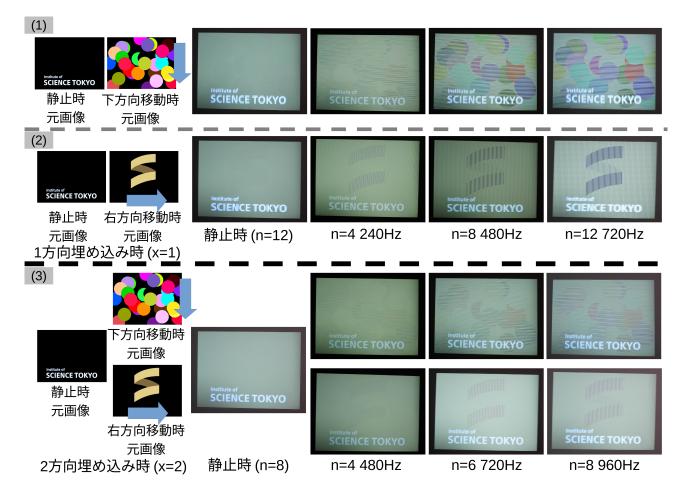


図 5. 投影結果. ただし,視線移動時元画像は色反転後の状態を表示している. (1) 下方向の視線移動に対して知覚される画像のみを埋め込んだ場合の結果. (2) 右方向の視線移動に対して知覚される画像のみを埋め込んだ場合の結果. (3) 下及び右方向に対応する画像を同時に埋め込んだ場合の結果.

明るさや視線静止時の画像などの条件次第で $C_r$ が $C_t$ と比較してより強く知覚されたため反対色のように見えたと考えられる。これらがどの程度関係しているかの解明は今後の課題である。

# 7 制限

本提案で提示できる画像について、視線移動時、視線静止時の提示画像両方について、 $1 \times n$  ピクセルの領域に分割するため解像度が下がる他、視線静止時の画像については式 (4) の色の制約が存在する。また、視線移動時に知覚される色が元画像の色をどれだけ再現できているかどうかは検証の必要がある.

本提案では高リフレッシュレートでの映像表示が可能なデバイスとして高速プロジェクタを選択した.そのため、本提案がゲーミングディスプレイといった高速なディスプレイ装置でも可能かどうかは今後の課題である.特に、表示の明るさなどの影響によって $C_r$ と $C_t$ のどちらがより強く知覚されるかにより目的の色を提示する際の最適な分解手法は変化する可能性がある.

また、本提案では上下左右から2方向について、

それぞれの方向への視線移動時に知覚できる画像の 埋め込みを実験したが、3方向以上については未検 証である.また、斜め方向の視線移動に対応する場 合は、基本的に立方体である画素に対して、どのよ うに斜め方向の領域に分解するかなどの課題が残る.

### 8 アプリケーション案

本提案手法は、視線移動により生じる網膜上の相対的な映像の移動によって知覚される画像が変化する.この相対的な移動を意図的に誘発する方法及び意図せず誘発する方法を用いたアプリケーション案をそれぞれ述べる.

#### 8.1 意図的な視線移動

#### 8.1.1 指を用いた映像とのインタラクション

このアプリケーション案は、通常時は文字が見えないが、指でスクリーンをなぞりながらその指を見つめることで画像を知覚することができるというものである [13]. このアプリケーションの概要を図 6 左上に示す. このアプリケーション案では、あるユーザが指でスクリーンをなぞり、それを複数名でみた

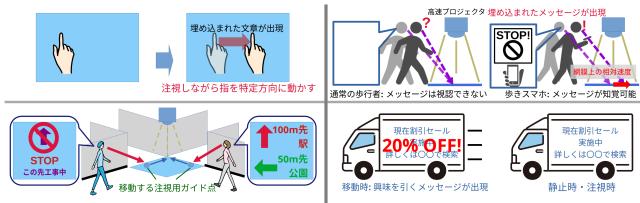


図 6. アプリケーション案の概要.

場合でも、指に視線を合わせているかどうかで画像を知覚できるかどうかが変化する。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。このアプリケーションにおいて、ユーザは指を動かすことで、能動的に視線移動を誘発し、文字を知覚するかどうかを選択することが可能となる。

# 8.1.2 交差点などでの情報提示

また、異なる複数方向への視線移動で異なる情報 を提示できることを利用し、交差点など、不特定多 数の人が異なる方向へ移動する場所の床などに情報 を投影することが考えられる. 概要を図6左下に示 す. これにより、異なる方向へ移動するユーザにそ れぞれに対応した情報を提示することができる. 交 差点の床などに本提案手法を配備し、各移動方向ご とに視線移動を誘発する移動点を複数重畳表示する. ユーザは、どの移動点を注視するかによって知覚す る映像を選択することができる. 本提案は、投影し ている映像は変化させることなく、ユーザの状態に より知覚される情報が変化する. そのため、同一位 置にある情報でも、ユーザの動きや視線によって異 なる知覚を与えることができる. そのため、同一位 置に、対象となるユーザによってそれぞれ異なる情 報を提示することが可能となる.

#### 8.2 意図しない視線移動

#### 8.2.1 歩きスマホ者向けディスプレイ

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 [14]. この例の概要を図6右上に示す。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。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サインを表示する例が考えられる。

### 8.2.2 車両の側面などでの広告表示

車両の側面など、移動する物体に本提案手法を適用することにより、移動しているときと停止しているときで周囲の閲覧者に異なる情報を提示することができる。概要を図6右下に示す。例として、車両が走行中は大きな文字など移動中でも読みやすい情報を投影して、停止時はその文字が消え細かい説明が見えると言ったものが考えられる。ユーザが時見た相対速度は0となるため、車両の側面に描かれていた広告などの細かい文字を集中して読むことができる。車両が走行中の場合は、ユーザが車両を視認してから車両を追従できるまでの時間に、埋め込まれた映像を意図せず知覚できる。そのため、大きな字で目を引くような情報を埋め込み、広告表示に重畳するといった用途が考えられる。

# 9 結論と展望

本論文では、視線移動方向に応じて異なる画像を 知覚させることができる映像表示手法を提案した。 今後の展望として、表示実験を通して示唆を得た表 示パラメータと視認性の関係などについて、表示手 法の評価とユーザ実験を行う予定である。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25K03164 の助成を受けた.

#### 参考文献

[1] 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 SIG-GRAPH 2007 Emerging Technologies*, SIG-GRAPH '07, p. 5–es, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [2] H. Benko and A. D. Wilson. Multi-point interactions with immersive omnidirectional visualizations in a dome. In ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '10, p. 19–28, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [3] C. Boletsis. The Gaia System: A Tabletop Projection Mapping System for Raising Environmental Awareness in Islands and Coastal Areas. In Proceedings of the 15th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '22, p. 50–54, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [4] G. Buscher, A. Dengel, and L. van Elst. Query expansion using gaze-based feedback on the subdocument level. In *Proceedings of the 31st Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '08, p. 387–394, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [5] 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.
- [6] H. Drewes and A. Schmidt. Interacting with the computer using gaze gestures. In Proceedings of the 11th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction - Volume Part II, INTERACT'07, p. 475–488, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [7] A. Esteves, E. Velloso, A. Bulling, and H. Gellersen. Orbits: Gaze Interaction for Smart Watches using Smooth Pursuit Eye Movements. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15, p. 457–466, New York, NY, USA, 2015. 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. In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [9] N. Joshi, A. A. R. Irudayaraj, J. Hartmann, and D. Vogel. An Instrumented Office Chair with a Steerable Projector for Personal Spatial Augmented Reality. In Proceedings of the 2022 ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [10] A. Karnik, W. Mayol-Cuevas, and S. Subramanian. MUSTARD: a multi user see through AR

- display. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, p. 2541–2550, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [11] J. Kim, S. Park, Q. Zhou, M. Gonzalez-Franco, J. Lee, and K. Pfeuffer. PinchCatcher: Enabling Multi-selection for Gaze+Pinch. In Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [12] 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 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [13] R. Miyazaki, S. Miyafuji, K. Kim, and H. Koike. A Display Method Visible Only During Gaze Fixation on Moving Objects using High-Speed Projection and Striped Pattern. In Adjunct Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST Adjunct '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [14] R. Miyazaki, S. Miyafuji, and H. Koike. Be Smart-Phone Zombie!: Guidance Display for Texting While Walking Using Striped Pattern and High-Speed Projection. In Adjunct Proceedings of the 27th International Conference on Mobile Human-Computer Interaction, Mobile-HCI '25 Adjunct, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [15] A. Nashel and H. Fuchs. Random Hole Display: A non-uniform barrier autostereoscopic display. In 2009 3DTV Conference: The True Vision Capture, Transmission and Display of 3D Video, pp. 1–4, 2009.
- [16] B. Patnaik, H. Peng, and N. Elmqvist. Vis-Torch: Interacting with Situated Visualizations using Handheld Projectors. In Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [17] J. Rekimoto. 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] T. Sato, D.-H. Hwang, and H. Koike. MlioLight: Projector-camera Based Multi-layered Image Overlay System for Multiple Flashlights Interaction. In Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces

- and Spaces, ISS '18, p. 263–271, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [21] T. Sato, J. Pardomuan, Y. Matoba, and H. Koike. ClaytricSurface: An Interactive Deformable Display with Dynamic Stiffness Control. *IEEE Computer Graphics and Applica*tions, 34(3):59–67, 2014.
- [22] A. Shirai, H. Suzuki, Y. Yamaguchi, and K. Yanaka. Glassless augmented display for public Signage. In Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference, VRIC '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [23] M. Spindler, S. Stellmach, and R. Dachselt. PaperLens: advanced magic lens interaction above the tabletop. In Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '09, p. 69–76, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [24] R. Tosa, S. Hattori, Y. Hiroi, Y. Itoh, and T. Hiraki. ChromaGazer: Unobtrusive Visual Modulation using Imperceptible Color Vibration for Visual Guidance, 2024.
- [25] M. Vidal, K. Pfeuffer, A. Bulling, and H. W.

- Gellersen. Pursuits: eye-based interaction with moving targets. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, p. 3147–3150, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [26] J. Watanabe, T. Maeda, and H. Ando. Gazecontingent visual presentation technique with electro-ocular-graph-based saccade detection. ACM Trans. Appl. Percept., 9(2), June 2012.
- [27] 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.
- [28] T. Yoshida, Y. Watanabe, and M. Ishikawa. Phyxel: Realistic Display of Shape and Appearance using Physical Objects with High-speed Pixelated Lighting. In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16, p. 453–460, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [29] 日本視覚学会. 視覚情報処理ハンドブック. 朝倉 書店, 東京, Japan, 2017.4 2017.
- [30] 日本視覚学会. 図説視覚の事典. 朝倉書店, 東京, Japan, 2022.11 2022.