



両眼に対する相補的な色振動付与の基礎検討

沈有方¹⁾, 畑田裕二²⁾, ハウタサーリアリ²⁾, 苗村健²⁾

Yuuhou SHIN, Yuji HATADA, Ari HAUTASAARI, and Takeshi NAEMURA

1) 東京大学大学院 学際情報学府 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, yuuhou@nae-lab.org)

2) 東京大学大学院 情報学環 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {hatada, ari, naemura}@nae-lab.org)

概要: 本研究では、視線誘導の手法として画像の一部領域について輝度変調と色度変調の 2 種類のフリッカー刺激を与えることを検討した。また、通常のフリッカー刺激に加えて HMD を用いて左右眼で相補的に見えるフリッカー刺激を提示し、刺激の誘目性を不可視性の観点から調べた。その結果、両眼相補的に輝度変調のフリッカー刺激を与えることで色振動半径を小さく抑えつつ周辺視野において効果的に視線を誘導できる可能性があることが示された。

キーワード: 色振動, 視線誘導

1. はじめに

近年ではヘッドマウントディスプレイ、(Head-Mounted Display, HMD) が普及したことで、個人でも気軽に HMD を用いた体験をすることが可能になった。HMD を用いた体験は、360° 見渡したり広大な空間を歩いたりといった、コンテンツへの没入感を持ち、ユーザの自由度が高い特徴がある。一方で、これらのコンテンツを体験する際に、画面上にユーザが関心を持つ領域 (Region of Interest, ROI) が複数登場する場合、ユーザはその自由度の高さが故に、コンテンツの制作者が注視を促したい ROI を見るとは限らない。

上記の問題を解決するために、ROI に視線を誘導する様々な研究がなされてきた。しかし、HMD ユーザは好きな方向を自由に見たいと思う場合もあるため、制作者による明らかな見べき領域への誘導は VR のインタラクティブ性と相性が悪い。この問題を解決するための方法の一つとして、HMD ユーザの自由意志を阻害しない範囲内で視線を誘導することが挙げられる。

1.1 フリッカー刺激

Bailey らは、図??の画像のように特定の領域について 10 Hz の明暗色または寒暖色の明滅刺激を施すことで、その領域に注意を引くことができると示した [1]。これは、人間の周辺視野が中心視野に比べて輝度変化を伴う視覚刺激に敏感であるという特性を用いたものである。注目させたい領域に明滅刺激を与えることで視線を誘導し、誘導された後は明滅刺激をやめることで、ユーザに気づかれずに視線を誘導することができる。しかし、この方法ではアイトラッキングを行い、ユーザの視線位置によって明滅刺激の制御を切り替える必要がある。

Waldin らは、60 Hz もしくは 72 Hz の高周波数の明暗色のフリッカー刺激は、周辺視野でのみその明滅を知覚しやすいという特性を利用した手法を提案した [2]。この手法では、刺激を付与しつづけた場合でも、視線を誘導した後の

中心視野におけるフリッカー刺激はユーザに気づかれることがないため、刺激を制御するために視線をアイトラッキングする必要がなくなった。しかし、高周波数の明滅刺激を映し出せる 120 Hz もしくは 144 Hz 以上のリフレッシュレートの高いディスプレイが必要となるというハードウェアの制約がある。

阿部らは、高速な色度変化フリッカーを 2 次元コードとして画像に埋め込むことで、人間には不可視なディスプレイ-カメラ間通信を実現した [5]。これは、人間は輝度変化に比べて色度変化を知覚しにくいことを利用し、25 Hz 以上の色振動においては 2 色の時間平均の色を知覚することを踏まえたものであり、30 Hz の色振動により 60 Hz のモニターにて不可視な情報を埋め込むことに成功した。

Bailey らと Waldin らの研究はどちらも輝度変調を用いており、阿部らのように色度変調を用いたフリッカー刺激の視線誘導の効果は明らかになっていない。

1.2 両眼視野闘争

両眼視野闘争とは、左眼と右眼に異なる映像を提示することで、両眼の知覚画像が完全に一致しない状況を表す。特に HMD の登場により、左右ディスプレイに異なる映像を映し出すことが容易となったため、両眼視野闘争を用いた視線誘導も様々な検討されてきた。

Krekhov らは、特定のオブジェクトを片目にのみ提示することでオブジェクトを強調した。この強調は視野内の情報を素早く集中せずとも自動的に処理することができる前注意的処理のもと認識できるものであり、オブジェクトを強調する手法の一つとしての有効性を示した [4]。

Grogorick らは、特定の領域について、片方の目には明るく、もう片方の目には暗くなるように輝度を調整した映像を付与することで、視覚入力の不一致による両眼視野闘争を生み出す視線誘導を行った [3]。この手法では実際のシーン内容との強い干渉を防ぐため、輝度変調の強さは変調に気

づかない閾値を乗り越えて超えるものを使用し、広い FOV をもつ VR において有効であることが示された。

これらの誘導手法はどちらも両眼に異なる映像を映し出すものであるが、静的にしか提示しておらず、フリッカー刺激のように動的に両眼で異なる映像を提示した際の効果は明らかになっていない。

1.3 本研究の立ち位置

フリッカー刺激による視線誘導は研究されてきたが、輝度変調ではなく色度変調によるフリッカー刺激の誘目性は明らかになっておらず、目立たない視線誘導を実現できる可能性がある。また、両眼において動的で相補的なフリッカー刺激を提示する視線誘導の効果も明らかになっていない。以上を踏まえて、本研究では基礎検討として、VR における輝度変調と色度変調のフリッカー刺激を実装し、不可視性の観点からそれらの効果の違い、および両眼に相補的と同一的なフリッカー刺激を付与した場合の違いを明らかにする。

2. 提案手法

2.1 フリッカー刺激

本研究では、特定の領域に色の変調をかけた 2 枚画像を交互に提示することでフリッカー刺激を実現する。具体的には、ユーザの視線を誘導させたい領域 (Focus Regions, FR) について、YUV 色空間において変調をかけた 2 枚一組の画像を生成し、特定の周波数を用いて交互に提示する。

2.2 刺激の生成方法

2 枚一組の画像の生成に関しては以下の手順を踏む。まずはじめに、与えられた原画像の色域を制限する。これは、のちに YUV 色空間で色を変調し、元の RGB 色空間に逆変換する際に値域をはみ出さないようにするためである。今回の実装では、8 bit 型の画像について、RGB の値域を 60 から 200 の間に線形補完した。

つづいて、OpenCV の `cv2.cvtColor` 関数の `cv.COLOR_BGR2YUV` を用いて画像を RGB 色空間から YUV 色空間に変換するが、YUV 色空間においても 8 bit 型の画像として値をもっていることに留意する。ここで、色度変調と輝度変調の 2 通りの変調を行う。まず、色度変調では図 1 のように UV 平面上で振幅 d と角度 θ を用いて、元の画素値 (Y, U, V) から変換先の 2 色 $(Y, U + d \cos \theta, V + d \sin \theta)$ 、 $(Y, U - d \cos \theta, V - d \sin \theta)$ を決定する。このとき、振幅 d を大きくすると、RGB 色空間に戻す際に値域がはみ出ないように原画像の色域をより狭める必要があり、画質が劣化することに注意する。なお、 θ は UV 平面の U 軸となす角度とするが、今回の実装では θ を 90° で固定し、V 成分のみに変調をかけている。輝度変調では元の画素値 (Y, U, V) から変換先の 2 色 $(Y + d, U, V)$ 、 $(Y - d, U, V)$ として Y の値を d だけ変調させる。

この後、OpenCV の `cv2.cvtColor` 関数の `cv.COLOR_YUV2BGR` を用いて YUV 色空間から RGB 色空間に逆変換して画像を取得する。最後に、FR のみが変調画像、FR 以

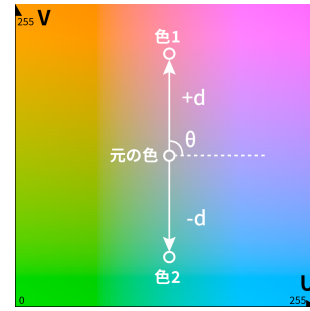


図 1: YUV 色空間における変調先の 2 色の選択方法



(a) 輝度変調

(b) 色度変調

図 2: 輝度と色度においてそれぞれ振幅を 20 として変調した画像

外が原画像となるように 2 つの画像をアルファブレンドで合成し、FR の境界線で画像を滑らかに接続した画像を生成する。なお、FR は円形とし、人間のは中心視野の大きさである 1.5° に収まるようにした。このようにして生成した $d = 20$ の輝度変調および色度変調画像を図 2 に示す。

2.3 フリッカー刺激の提示方法

本提案手法では、フリッカー刺激を両眼に対して同一の画像を提示する方法と異なる画像を提示する方法の 2 種類を用い、前者を同一的提示、後者を相補的提示とする。図 3 の通り、同一的提示の場合、時間軸に対して左右眼に映る画像は同じ位相で切り替わるのに対して、相補的提示の場合、ちょうど逆位相で切り替わる。

2.4 フリッカー刺激の周波数

今回使用する HMD は HTC VIVE Pro Eye であり、リフレッシュレートの上限は 90 Hz であった。そのため、本デバイスを用いて実現できる最も高い周波数は 1 フレームごとに画像を切り替えた場合の 45 Hz のフリッカー刺激である。同様に 2 フレーム、3 フレームごとに画像を切り替えた場合は 22.5 Hz、15 Hz のフリッカー刺激となる。

3. 実験

輝度変調と色度変調および相補的と同一的のフリッカー刺激の不可視性を評価する予備実験を 2 つ行った。実験 1 では中心視野における色度変調のフリッカー刺激が不可視となる色振幅を調査した。実験 2 では色振幅を固定し、中心視野と周辺視野双方における輝度変調と色度変調および相補的と同一的なフリッカー刺激の不可視性を調査した。

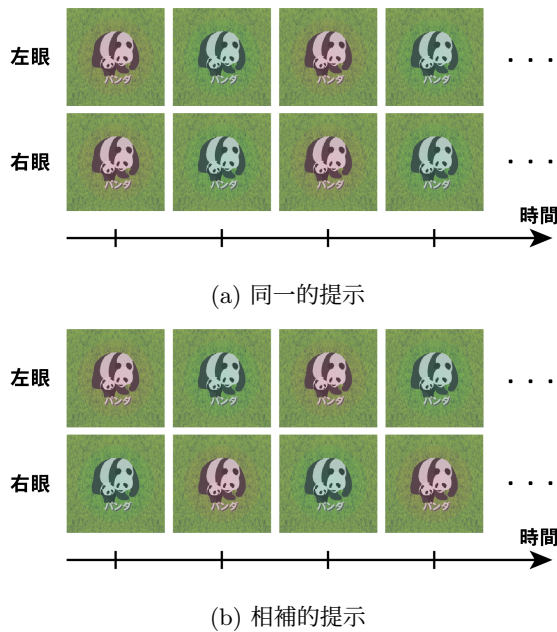


図 3: 2 種類のフリッカー刺激の提示方法

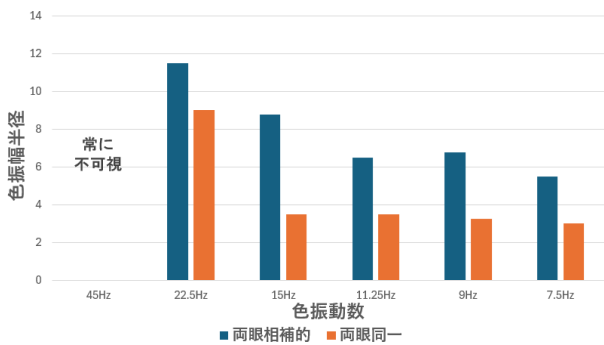


図 4: 中心視野における色度変調フリッカー刺激が不可視性

3.1 実験 1

3 人の実験参加者に対して、中心視野に色度変調のフリッカー刺激を与え、刺激が見えはじめるもしくは見えなくなる振幅 d の閾値を 0 ~ 25 の範囲内で極限法により調べた。提示方法は相補的なものと同一的なものの 2 条件とし、振動周波数は 45 Hz, 22.5 Hz, 15 Hz, 11.25 Hz, 9 Hz, 7.5 Hz の 6 条件で調べた。

3.1.1 実験結果

実験結果は図 4 の通りである。45 Hz においては、振動の振幅を最大の $d = 25$ まで増長させても実験参加者が刺激に気づくことはなかった。また、フリッカー刺激の周波数によらず、両眼に対して相補的に刺激を提示する方が同一的に刺激を提示するより不可視となる振幅 d の閾値が大きくなった。

3.2 実験 2

実験画像には、草原の上にパンダのイラストレーション 17cm ごとに計 7 体配置した。このとき、各パンダの位置番

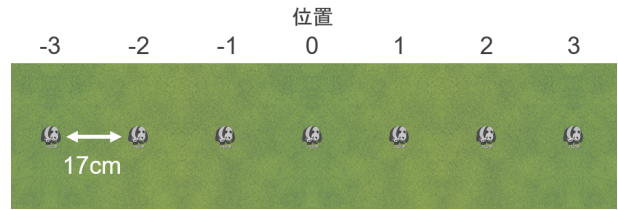


図 5: 実験に使用した画像

表 1: 各パンダの位置番号と中心から視野角の関係

位置	-3	-2	-1	0	1	2	3
視野角	40°	30°	16°	0°	16°	30°	40°

号と中心から視野角の関係性は図 5 と表 1 に示した。画像は HMD の位置トラッキングによらず、常に実験参加者の視点カメラから 60 cm 前方に固定されるように表示した。

画像の変調方法は輝度変調と色度変調の 2 通り、視覚効果の提示方法は相補的と同一的の 2 通りの計 2×2 の 4 通りの条件で行った。また、パラメータに関しては先の実験結果を参考に、色の振幅は $d = 10$ で固定し、フリッカー刺激の周波数は 11.25 Hz, 22.5 Hz, 45 Hz の 3 種類、視覚効果の提示位置は先述したパンダの位置の 7 種類を用意し、各パラメータにつき 10 回の試行を行った。3 人の実験参加者には、1 条件あたり計 210 回のフリッカー刺激をランダムな順番に提示し、刺激に気づくか気づかないかをボタンを押すことで報告させた。

3.2.1 実験結果

実験結果は図 6 の通りである。横軸は刺激の提示位置を示し、端ほど周辺視野であることを表している。また、縦軸は提示した刺激に気づく割合を示し、棒グラフが高いほど刺激に気づきやすいという観点から誘目性が高いことを表している。全体の傾向としてフリッカー刺激の周波数を大きくすると刺激に気づかれないことが分かった。また、輝度変調と色度変調を比較すると、同じ色振幅の変調においてはフリッカー刺激の周波数によらず、輝度変調の方が誘目性が高いことが明らかとなった。

輝度変調のフリッカー刺激においては、11.25 Hz と 22.5 Hz は 9 割以上の試行において実験参加者に気づかれる結果となった。一方で、45 Hz 条件下では両眼相補的に提示する方が誘目性が高かった。また、周辺視野の刺激の方が中心視野の刺激より誘目性が高いことが明らかとなった。

色度変調のフリッカー刺激においては、実験 1 と同様に 45 Hz 条件下で刺激に気づくことはなかったが、11.25 Hz と 22.5 Hz 条件下では両眼同一的に提示する方が誘目性が高かった。また、中心視野の刺激の方が周辺視野の刺激より誘目性が高いことが明らかとなった。

3.3 考察

実験 1 の結果から、色度変調においては両眼相補的に提示することで両眼同一的に提示した場合と比較して知覚しにくい刺激となることが明らかとなった。これは、相補的

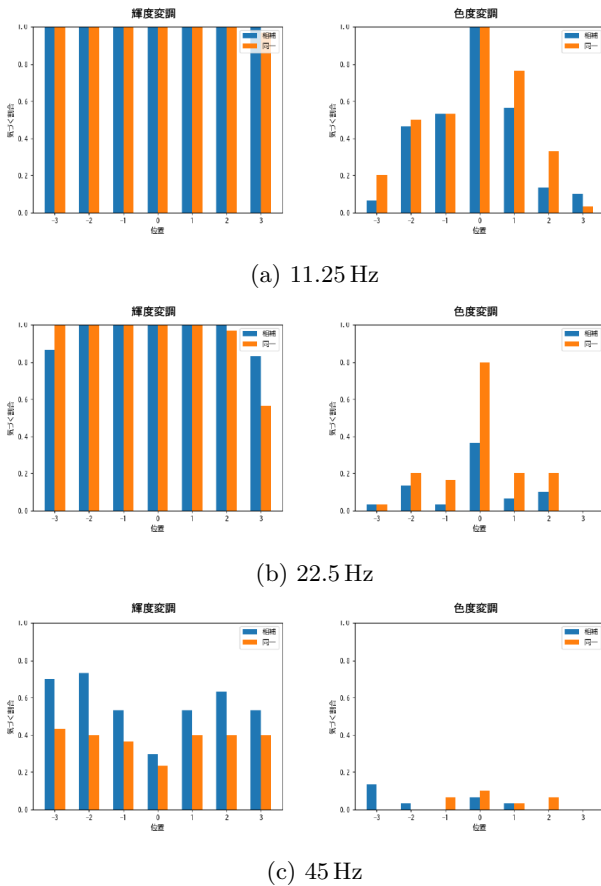


図 6: 各フリッカー刺激の周波数における刺激に気づいた割合

表 2: 各変調方法における誘目性の高い提示位置と提示方法

	提示位置	提示方法
輝度変調	周辺視野	相補的提示
色度変調	中心視野	同一的提示

提示の場合、色度の異なる 2 つの画像を左右眼で自動的に統合することで原画像と同じ色として知覚し、刺激の変化に鈍感となっていることが理由として考えられる。

実験 2 の結果より得られた各変調方法における誘目性の効果が高い提示位置と提示方法を表 2 に示す。フリッカー刺激の提示位置について、輝度変調では周辺視野、色度変調では中心視野にある刺激の方が誘目性が高いことが示された。これは人間の眼の受容細胞について、周辺視野には光に敏感な桿体細胞が多く分布されることから説明できる。また、フリッカー刺激の提示方法については、輝度変調では相補的提示、色度変調では同一的提示の方が誘目性が高いことが示された。輝度変調では色度変調と異なり、左右眼で異なる画像を統合することができず、両眼視野闘争を起因とする誘目性とフリッカー刺激を起因とする誘目性が重なり、増強されたことが原因と考えられる。

4. 結論と今後の展望

本研究では輝度変調によるフリッカー刺激と色度変調によるフリッカー刺激、両眼同一的フリッカー刺激と両眼相補的フリッカー刺激の差異について、振動周波数や視野角を変化させて不可視性の観点から誘目性を調査した。その結果として、両眼相補的に輝度変調のフリッカー刺激を与えることで、色振動半径を小さく抑えて画質の劣化を防ぎつつ、周辺視野において効果的に視線を誘導できる可能性があることが示された。周辺視野のみで知覚されやすいという特性を利用することで、アイトラッキングを用いずに継続的に刺激を提示することで自然な視線誘導を行ったり、視野外への視線誘導を実現したりすることに応用できると考える。

今回の実験では、実験画像として白黒で構成されたパンダを用いたが、フリッカー刺激の不可視性はコンテンツの輝度にも依存するため、様々な画像を用いて実験する必要がある。今後の展望として、変調方法、提示方法および周波数条件に応じて、フリッカー刺激の大きさや色の振動半径等のパラメータの適切な値を検討していく。また、今回の一連の予備実験においては刺激を知覚できるか否かという不可視性の観点からのみ誘目性を評価したが、実際にコンテンツにフリッカー刺激を適用し、視線データを測定することでの誘目性の評価を行う予定である。さらに、提案する視線誘導手法がユーザの体験を阻害しない自然なものであるかという質的評価もユーザスタディを通して調査する予定である。

参考文献

- [1] Bailey, Reynold and McNamara, Ann and Sudarsanam, Nisha and Grimm, Cindy. "Subtle gaze direction", ACM Trans. Graph., 28(4), 2009.
- [2] N. Waldin, M. Waldner, and I. Viola. "Flicker observer effect: Guiding attention through high frequency flicker in images", Comput. Graph. Forum, 36(2):467-476, 2017.
- [3] Steve Grogoric, Jan-Philipp Tauscher, Georgia Albuquerque, Marc Kassubeck, and Marcus Magnor. "Towards VR Attention Guidance: Environment-dependent Perceptual Threshold for Stereo Inverse Brightness Modulation", ACM Symposium on Applied Perception, Article 22, 1-5, 2019.
- [4] Krekhov, A., Cmentowski, S., Waschke, A., Krüger, J. "Deadeye visualization revisited: investigation of preattentiveness and applicability in virtual environments", IEEE Trans. Visual. Comput. Graph., 26(1), 547-557, 2019
- [5] S. Abe, T. Hiraki, S. Fukushima, and T. Naemura. "Imperceptible color vibration for screen-camera communication via 2d binary pattern" ITE Trans. on MTA, 8(3):170-185, 2020.