

左右に異なるレンズを用いたHMDの視野角拡張

上田 裕貴^{1,a)} 山田 渉² 真鍋 宏幸^{1,b)}

概要:ヘッドマウントディスプレイ(HMD)が普及し、多くのユーザがVRやARのコンテンツを楽しんでいる。そのようなコンテンツで没入感を高めるための重要な要素として、広視野角があげられる。しかし、視野角を広げるためには、高価なディスプレイやレンズを使用する必要がある。本論文では、monovisionの考えを基にHMDの左右に焦点距離の異なるレンズを装着して視野角を拡張する方法を提案する。ユーザの脳内で、焦点距離の短いレンズによる拡大映像と焦点距離の長いレンズによる精細な映像の2つを融合させユーザに単一の映像を認識させる。融合させた映像は、中心部は精細で、周辺部はぼやけて広がって見える。試作機を作成し、実験を行った。その結果、ユーザは異なる映像を単一の映像として認識することができた。また、提案手法のHMDが特に主観視点で動きの速い動画において有効であることが確認された。

1. はじめに

近年、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)は、解像度の向上、画像処理能力の向上、小型化や軽量化など画期的な進歩を見せている。また、仮想現実(VR)や拡張現実(AR)のコンテンツの数も増えており、ユーザは様々な体験を楽しめるようになってきている。これらのことにより、HMDはさらに広く普及していくと考えられる。このようなVRやARでの強い没入感を体験するために必要な要素として広視野角化があげられる [1]。

HMDには主に2つのタイプがあり、いずれのタイプでも視野角の拡張が試みられている。1つ目のタイプは、処理装置やディスプレイ、レンズが内蔵され一体となっているものである。このタイプの中には、“StarVR One”^{*1}のように、高解像度ディスプレイと複雑なレンズを組み合わせて広視野角を実現しているものもある。前述したように、広視野角はVR体験などで非常に重要な要素のために、このような一体型のHMDの開発が進められている。しかしながら、この一体型のHMDは一般的に高価になってしまう。2つ目のタイプは、スマートフォンをディスプレイとして利用するものである。これは、レンズと専用のケースだけで構成されたHMDであり、ユーザの所有しているスマートフォンが描画処理を行い、ディスプレイに映像を表示するものである。一体型のHMDに比べて低価格であ

り、多くのユーザがすぐにVR体験を始めることができるというメリットがある。しかしながら、スマートフォンを使用したHMDには、ディスプレイのサイズが限られているために、一体型のHMDに比べて視野角が狭くなるというデメリットが存在する。

2. 関連手法

2.1 人間の視覚特性を用いた研究

人間の周辺視野は解像度が低く、大まかな動きを捉えるのに適している [2]。このような特性を考慮すると、HMDの中心視野と周辺視野に一律に同じ解像度の映像を与える必要がない。これに着目して、視野角の拡張、没入感の向上、計算コストの削減などを目的とした研究がいくつか行われている。例えば、Illumiroom [3] は、テレビの周囲の部屋の壁や床などの周囲の空間にテレビの画面の延長となる映像や画面と連動する映像を映し出す。これにより、ゲームの没入感や臨場感を高め、新しいゲーム体験をユーザに提供している。このような周囲への拡張映像を生成するシステムとして、ExtVision [4] が研究されている。このシステムは、ディープニューラルネットワークを利用して、オリジナルの映像に基づく周囲の文脈映像を生成する。Foveated Rendering [5] は、映像の中心部を高解像度に、外側に行くほど低解像度にレンダリングする。これにより、描画処理の負担を軽減し、描画におけるフレームレートを上げることができる。また、処理能力の低いコンピュータでもレンダリングが可能になり、高価な装置を必要としないためコストの削減につながる。このシステムは、HMDでも導入されている。XiaoらのHMD [6] では、レンズの

¹ 芝浦工業大学

² NTT ドコモ

^{a)} ma21020@shibaura-it.ac.jp

^{b)} manabehiroyuki@acm.org

^{*1} <https://www.starvr.com/product/>

周りにLEDを設置して、周辺視野部に粗い映像を作り出すことで、周辺視野への情報提示を行っている。LEDがディスプレイ上の映像に連動して光るので、ユーザは周囲の映像を拡張しているように知覚することができる。YamadaらのHMD [7]では、中心視野部に凸レンズを配置し、その周りを焦点距離が短いフレネルレンズで埋めることで、周辺視野部を低解像度の映像で覆い視野角を拡張している。

人間の視覚特性を利用したHMDの改良なども行われている。VR HMDを使用すると様々な要因により、目の疲れが生じてしまう。その要因の1つに輻輳開散運動の不一致がある。これは、本来、HMD側が意図的にユーザの目に錯覚させたい奥行と、ユーザの脳が立体視した結果の奥行が一致しないことが原因で、目が疲れてしまう現象である。Focus-Tunable HMD [8]では、焦点を調整できるディスプレイやMonovisionが、奥行の不一致を緩和すると報告されている。

2.2 Monovisionに関する研究

人間の視覚知覚に基づいた興味深い技術にMonovisionがある [9]。我々人間は左右の目で物を見ており、左右の映像の微妙な違いにより、奥行き感を生み出している。Monovisionは、左右で大きく異なる映像を脳内で結合させ、単一の映像として認識させるものである。通常は、老眼を矯正するために、コンタクトレンズやレーシック手術などで、片目を近くを見る用に、もう片目を遠くを見る用にする方法である。Monovisionは、ディスプレイにも適応されている。Monovisionを使って、左右に異なる解像度と視野の映像を映して、ユーザに中心を高解像度、周辺を低解像度の単一の映像と認識させ、HMDの視野角を拡張するという研究もすでに行われている [10], [11], [12]。Dichoptic image fusion [12]では、映像を単一の映像として認識する際の利き目や弱視などによる影響について言及している。また、Focus-Tunable HMD [8]では、Monovisionを用いたことで、VRアプリケーション内において高精度にターゲットを検出できると報告されている。しかしながら、特に高解像度ディスプレイを用いたVR HMDにおいて、ユーザがMonovisionをどのように認識しているか、結像した映像を見ることができるのか、VR体験を向上できるのかについて触れられてはいない。

3. 提案手法

HMDの視野角を拡張するためのアプローチとしては、単純に大きなディスプレイを用いたり、焦点距離の短いレンズを使うことが考えられる。スマートフォンを使用したHMDを考えると、前者は非常に大きなディスプレイを持ったスマートフォンが必要となり、後者は解像度の低い映像を見ることになってしまう。

提案手法では、関連研究 [6], [7]と同じように人間の視覚

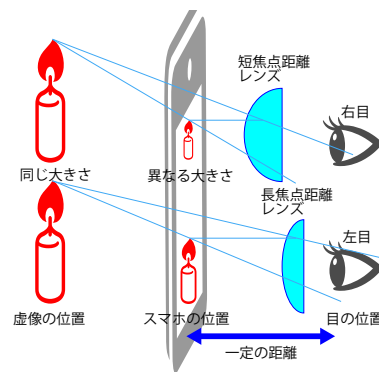


図1 提案手法の原理図

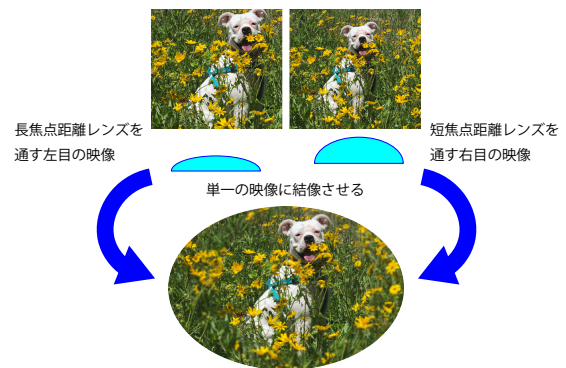


図2 提案手法で見た時の映像のイメージ

特性を用いて、周辺視野を低解像度の映像で埋めることで視野角を拡張するが、これらの研究と異なり、Monovisionのようにそれぞれの目に異なる映像を与える。提案手法では、HMDの左右に焦点距離の異なるレンズを配置する。レンズの焦点距離によって、レンズを通した際の映像の解像度や視野角、像の大きさなどが異なる。焦点距離の長いレンズで視野角は狭いが精細な映像を作り、焦点距離の短いレンズによって視野角の広い低解像度の映像を作り出す。レンズの焦点距離によって映像の拡大率が異なるが、図1のように、ディスプレイ上で表示する映像の大きさを変えることによって、ユーザは同じ大きさとして認識することができる。そして、それぞれの目で見た異なる映像を脳内で融合させ、図2のように、中心部の解像度が高く、周辺部に視野が広く解像度が低い映像をユーザは知覚する。そのためユーザはHMDの視野角が拡張したと感ずることになる。低解像度の映像は、ぼやけたり歪んだりすることがあるが、全体の画質にはあまり影響しないと考える。逆に、画像のぼけによって、特に低解像度のディスプレイを拡大表示した際に生じる、格子状の模様や境界などが曖昧になると期待している。

提案手法は、中心部の画質を犠牲にすることなく、HMDの視野角を拡張する。また、ハードウェアの面ではレンズを平凸レンズの追加、ソフトウェアの面では画像の拡大を行うのみなので、簡単かつ容易に適用することができる。提案手法が有効であるか評価を行うために、試作機を開発

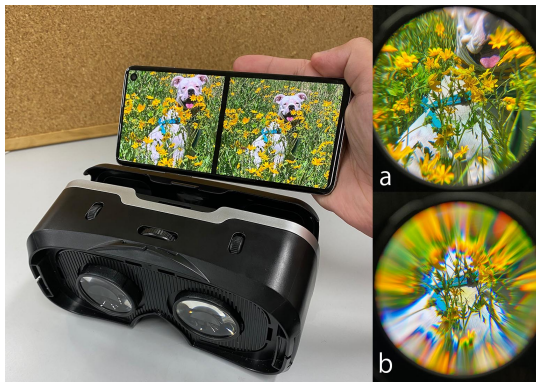


図 3 試作機. 焦点距離 60mm のレンズで見た映像 (a) と, 焦点距離 40mm のレンズで見た映像 (b)

し, いくつかの実験を行った.

4. 実装

提案手法を検証するために, 試作機の作成を行った (図 3). 通常, HMD には 40mm や 60mm の同じ焦点距離の凸レンズが左右に配置されている. 焦点距離 40mm のレンズを使用すると, 視野角が広くなり, 解像度が低くなる. また, 色収差が起きたり, 低解像度のディスプレイでは画面の格子状の模様が目立つなどの問題も起きる. 一方, 焦点距離 60mm のレンズを使用すると, 視野角が狭くなる代わりに精細な映像を見ることができる. 試作機には, 左側に焦点距離 60mm, 右側に焦点距離 40mm の平凸レンズを配置している. どちらの直径も 40mm である. 試作機のベースは市販のスマートフォン用 HMD^{*2}である. 使用したスマートフォンは, “Samsung Galaxy s10” (150mm × 70mm, 3040 × 1440 pixels, 550 ppi) である.

また, 見える映像を同じ大きさにするために, 左側に表示する映像を拡大する必要がある. 両方の映像が同じ大きさに見えるかどうかは, 様々な要因があり, 適切な倍率を計算することは難しい. いくつかの設定を試した結果, 左側を 1.3 倍することが最適であったため, それを用いた.

5. 実験

5.1 実験 1: 結像するかの検証

5.1.1 実験内容

被験者に 6 枚の静止画を見てもらい, それぞれの画像について図 2 のように, 中心部が精細で, 周辺部がぼやけている画像が見えているかどうかを 5 段階評価で回答してもらった. 画像の種類は以下の 6 種類である. (1) 画像全体にフォーカスが合っていて, 被写体が中心にある画像, (2) 昼間の都市の風景画, (3) 夜間の都市の風景画, (4) 画像全体にフォーカスが合っていて, 被写体が中心にない画像, (5) 中央に被写体があり, 被写体だけにフォーカスが合った画像 (図 4), (6) 多くの人の顔が映った細かい画

^{*2} Elecom, VRG-X01BK



図 4 中央に被写体があり, 被写体だけにフォーカスが合った画像

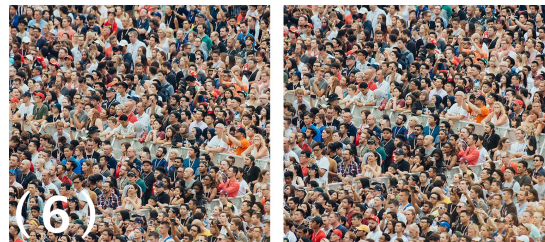


図 5 多くの人の顔が映った細かい画像

像 (図 5).

5.1.2 結果

多くの画像で被験者は画像の結像を認識することができた. 特に画像 5 については, 5 名の被験者が「違和感なく非常によく見える」と回答した. 一方, 画像 6 については, 画像がずれて見えたり, 全体がぼやけていると回答した被験者が 3 名いた. また, 画像 6 において, 見えた画像の左側がぼやけていないと回答した被験者もいた.

5.2 実験 2: 静止画を使用した HMD の比較

5.2.1 実験内容

実験 2 では, 実験 1 で使用したのと同じ静止画を用いて, 試作機と従来の HMD との比較を行った. 試作機, 左右に焦点距離 60mm の平凸レンズを配置した HMD (60mmHMD), 左右に焦点距離 40mm の平凸レンズを配置した HMD (40mmHMD) の計 3 台の HMD で比較を行った. 視野角と解像度の点で, 試作機が従来のものと比べてどれだけ良い (または悪い) かを 5 段階評価で回答してもらった. また, 各画像において全体的に満足している HMD を選んでもらった.

5.2.2 結果

実験 2 から得られたグラフを図 6 に示す. 横軸は, 回答した被験者の人数を表す. 提案手法を用いた試作機の方が, 従来の 60mmHMD よりも視野角が広いという意見が多くみられた. 一方で, 試作機が 40mmHMD よりも解像度が高いという有意な結果は得ることができなかった. また, 図 8 が示すように, 総合的に良かった HMD についての回答の結果として, 提案手法を用いた試作機よりも, 従来の HMD の方が静止画に適していることが分かった.

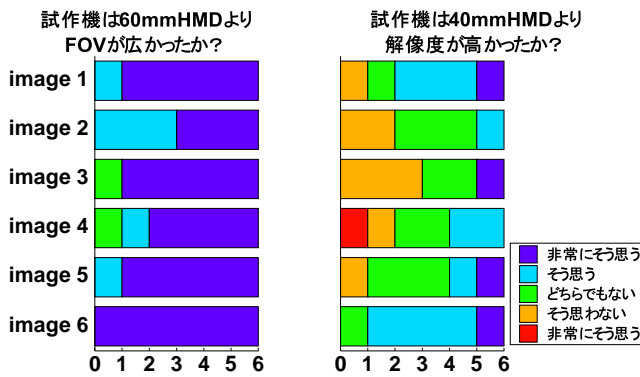


図 6 実験 2 の主観的評価

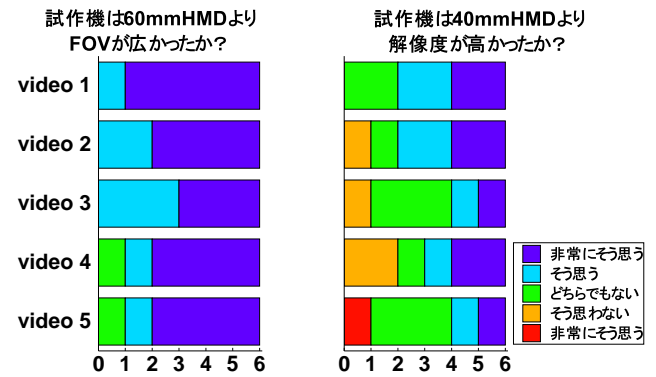


図 7 実験 3 の主観的評価

5.3 実験 3：動画を使用した HMD の比較

5.3.1 実験内容

実験 3 では、実験 2 と同様の比較実験を 5 つの動画を用いて行った。視野角と解像度の比較に加えて、没入感の比較も行う。被験者には 5 段階評価で回答してもらい、最後にそれぞれの動画について総合的に良かった HMD を 1 つ選んでもらった。動画の種類は以下の 5 種類である。(1) ジェットコースターに乗っている際の主観視点での動きの速い動画、(2) 花火の定点での動画、(3) 空中から撮影した風景の動画、(4) パルクールをしている人の主観視点での動きの速い動画、(5) 水槽の中の魚を見る定点での動画。

5.3.2 結果

実験 3 から得られたグラフを図 7 に示す。実験 2 と同様に、提案手法を用いた試作機が 60mmHMD に比べて視野角を拡張していることが見て取れる。解像度の点に関しては実験 2 と比べて、40mmHMD と比較した際に試作機の方が解像度が高いという回答が多く得られた。図 8 によると、動画 2 と動画 4 において、提案手法が最も没入感を感じた HMD となっていることが分かる。動画 1 においても 40mmHMD と同数ではあるが没入感を高く感じていることが分かる。また、提案手法を用いた試作機の全体的な良さが動画において高いことが図 8 から見て取れ、試作機は動画の視聴に適していることが分かった。特に、ジェットコースターの動画などの速い動きを含む動画や主観視点の動画に適していることが分かった。一方で、動画 2 の花火の動画は例外であるが、動きの少ない動画に対しては既存の HMD の方が適していることが分かった。

6. 議論

提案手法を用いた試作機では、広い視野角を与えることだけでなく、映像の中心部の解像度を保つことを期待していた。実験を行った結果、解像度に関してはあまり良い結果は得られなかったが、広い視野角を与えていることが分かった。また、実験により提案手法は、特に主観視点で動きの速い動画に対しては有効であるが、静止画には不向きであるという興味深い結果も得られた。静止画に関しては

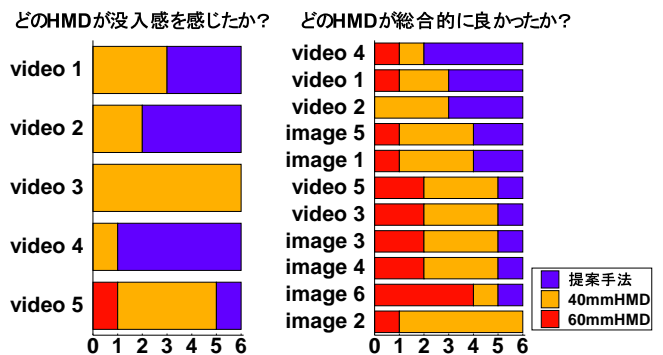


図 8 最も没入感のある HMD (左)、コンテンツごとに最適な HMD (右)

従来の HMD の方が向いているが、多くの VR コンテンツは動画であり、頭の動きを反映させた主観視点のものなので、今回の提案手法は VR 体験を向上させると言える。

今回の提案手法にはいくつかの問題があることがわかった。以下でそれらの問題点について述べる。

6.1 周辺視野への映像の提示に関する問題点

今回の提案手法では、解像度の高い映像の周囲を解像度の低い映像で覆うことで視野角を拡張している。しかしながら、実験 1 での報告のように、結像した映像の左側がぼやけていないという被験者の回答がいくつかあった。つまり、映像の左側の視野が広がっていないということになる。先行研究では、HMD の左側にもフレネルレンズを用いたり、LED を設置したりすることで、左側の視野の広がりを実現させている。しかしながら、今回の提案手法の場合、HMD の左側には焦点距離の長いレンズを取り付けており、左目へは広視野の映像を与えていない。目の構造上、両目で見た際の視野角の一番左は左目で見た情報が使われる。今回の提案手法に関しても同様に、結像させた映像の左側には、左目で見た視野の広がっていない映像が使われたため、左側が拡張しなかった。現状、具体的な解決策は考えられていないが、何らかの形で左目にも広視野の情報を与える必要がある。

6.2 収差に関する問題点

収差とは、色のにじみや像の歪み、ずれを生み出し、画質の低下などの悪影響を及ぼすものである。収差には、いくつかの種類が存在する。光軸からの距離に応じて、像の倍率が異なるために歪みが起こる歪曲収差や光の波長の違いによる結像位置の違いや倍率の違いによって色のにじみが起きる色収差などがある。今回の実験2で生じた静止画での画質の低下や実験3での動きの少ない動画での没入感の低下についてこの収差が関係していることが考えられる。静止画や動きの少ない動画では、収差が際立ってしまい全体の満足度も下がってしまう。一方で、動きの速い動画では、映像自体が動いてぶれたり、映像が頻繁に切り替わるので収差が曖昧になると考える。そのために、ユーザは歪曲収差や色収差を気にすることなく、映像に没入できているのだと考えられる。また、実験3における興味深い意見に、動画2の花火の映像において色収差によるぼかし効果によって光がよりリアルに感じられ、臨場感が増したという回答があった。これに関しては、図8も示しているように、定点動画ではあるが花火の動画の評価が高いことがわかる。しかし、静止画における色収差の影響が顕著に表れているため、この問題を解決して汎用性を高めるためには、レンズの焦点距離や位置、さらにはレンズの光学設計そのものなどについて再度検討する必要がある。

7. 結論

本論文では、HMDの左右に焦点距離の異なるレンズを使用して、HMDの視野角を拡張する方法を提案した。左右の異なる映像はユーザの脳内で結像し、ユーザは解像度を保ちながら広視野角な映像をみることができる。試作機を実装して、従来のHMDとの比較評価を行った。その結果、ほとんどの静止画、動画において期待通りの結像された単一の映像を認識することができた。また、提案手法は動画に適しており、特に主観視点の動画や動きの速い動画において有効であることがわかった。しかしながら、画質やVR体験を向上させるためには、さらなる研究が必要であるが明らかとなった。

参考文献

[1] Lin, J. J. ., Duh, H. B. L., Parker, D. E., Abi-Rached, H. and Furness, T. A.: Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment, *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002*, pp. 164–171 (2002).

[2] Suzanne P. Mckee, K. N.: The detection of motion in the peripheral visual field, *Vision Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 25 – 32 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90140-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90140-8) (1984).

[3] Jones, B. R., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A. D.: IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI

'13, p. 869–878 (2013).

[4] Kimura, N. and Rekimoto, J.: ExtVision: Augmentation of Visual Experiences with Generation of Context Images for a Peripheral Vision Using Deep Neural Network, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–10 (online), DOI: [10.1145/3173574.3174001](https://doi.org/10.1145/3173574.3174001) (2018).

[5] Patney, A., Salvi, M., Kim, J., Kaplanyan, A., Wyman, C., Benty, N., Luebke, D. and Lefohn, A.: Towards Foveated Rendering for Gaze-Tracked Virtual Reality, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 6 (2016).

[6] Xiao, R. and Benko, H.: Augmenting the Field-of-View of Head-Mounted Displays with Sparse Peripheral Displays, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1221–1232 (2016).

[7] Yamada, W. and Manabe, H.: Expanding the Field-of-View of Head-Mounted Displays with Peripheral Blurred Images, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, p. 141–142 (2016).

[8] Konrad, R., Cooper, E. A. and Wetzstein, G.: Novel Optical Configurations for Virtual Reality: Evaluating User Preference and Performance with Focus-Tunable and Monovision Near-Eye Displays, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1211–1220 (2016).

[9] Evans, B. J. W.: Monovision: a review, *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol. 27, No. 5, pp. 417–439 (2007).

[10] Melzer, J. E.: Overcoming the field-of-view/resolution invariant in head-mounted displays, *Helmet- and Head-Mounted Displays III* (Lewandowski, R. J., Haworth, L. A. and Girolamo, H. J., eds.), Vol. 3362, International Society for Optics and Photonics, SPIE, pp. 284 – 293 (1998).

[11] Kooi, F.: Binocular configurations of a night-flight head-mounted display, *Displays*, Vol. 14, No. 1, pp. 11 – 20 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-9382\(93\)90004-O](https://doi.org/10.1016/0141-9382(93)90004-O) (1993).

[12] Curry, D. C., Harrington, L. K. and Hopper, D. G.: Dichoptic image fusion in human vision system, *Helmet- and Head-Mounted Displays XI: Technologies and Applications* (Brown, R. W., Marasco, P. L., Rash, C. E. and Reese, C. E., eds.), Vol. 6224, International Society for Optics and Photonics, SPIE, pp. 1 – 11 (2006).