



視差式立体ディスプレイにおける融像困難問題 に対する焦点深度情報削除の効果

Effect of focal depth information discrimination on the
difficulty of binocular fusion in 3D parallax display

稲守一晃¹⁾, 木島竜吾¹⁾

Kazuaki INAMORI, Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

概要: HMD などの視差式ディスプレイでは、水晶体調節が固定された状態で輻輳の変化を利用して深さを提示するため、両者に齟齬が生じ、これが近距離における融像困難の原因であると指摘されている。本研究では、マクスウェル視を用いて調節固定を排除した視差式ディスプレイを製作し、融像の困難性を定量的に測る被験者実験を行った。実験の結果は、調節が固定されない状態でも融像困難は解決できない可能性を示した。

キーワード: 視覚, 輻輳, 水晶体調節, マクスウェル視光学系

1. はじめに

1.1 輻輳と水晶体調節

人間が実物体を見るとき、近い物体に対しては両眼球は寄り目になり、遠い物体に対しては両視線方向は平行に近くなる。このように視距離に応じて両眼を異なる方向に動かす運動を輻輳といい、物体と両眼の瞳を結んだ線のなす角を輻輳角と呼ぶ。また、物体までの距離に応じて、眼球は水晶体の厚みを変化させて物体に焦点を合わせ、網膜上の像を明瞭にしている (図 1)。この輻輳運動と水晶体調節は同時に行われており、実空間においてそれぞれが独立に動くことはないとしている [1][2]。

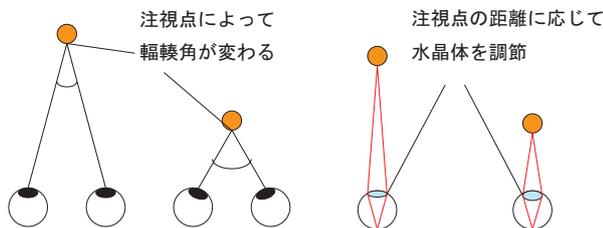


図 1: 輻輳と水晶体調節

1.2 HMD における輻輳と水晶体調節の齟齬

HMD のほとんどは視差式のディスプレイである。提示されるものは、距離一定の平面像であり、輻輳角を駆動する視差は正しいが、水晶体はそれとは異なる距離にある像面に焦点を合わせる必要がある。つまり輻輳角の面と水晶体調節面での提示距離には食い違いが起きる。HMD など、固定像面を用いた両眼立体視ディスプレイの利用経験から、眼精疲労や不快感 [3][4]、特に近距離での融像困難 [5] など

が指摘されており、その原因の一つとしてこの輻輳と水晶体調節の不整合が挙げられている (図 2)。

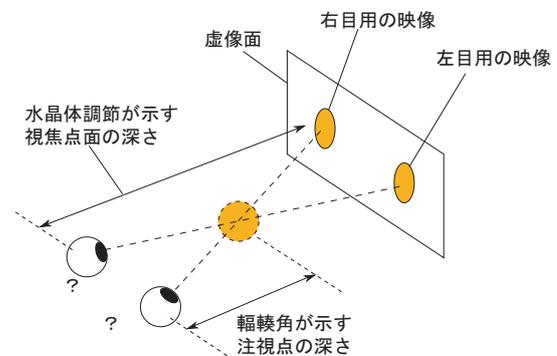


図 2: 輻輳と水晶体調節の齟齬

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、輻輳と水晶体調節の齟齬が、HMD の立体視における融像障害にどのように影響を与えているのかどうかを調べることである。このために、マクスウェル視を用いた、水晶体調節に関わらず明瞭な像が見えるディスプレイを製作し、一定距離に像面がある通常のディスプレイとの間で、視標を融像する被験者実験を行い、両者の結果を比較する。つまり、輻輳に関する距離情報である視差は提示するが、水晶体調節に関する距離情報の有無により融像障害の違いを評価する。

2. 水晶体調節の排除

2.1 マクスウェル視光学系

古くから、マクスウェル視光学系 (Maxwellian Optical System) [6] とよばれる、やや特殊な光学系が視覚研究で用いられている [7]. 図 3 にこの光学系の構成を示す. 光源 S から発した光を凸レンズ L1 で一旦平行に近い光線群とし, L2 で集光してピンホールにより点光源を作ったのち, L3 で再び平行光に変え, L4 がこれを一点に収束させる. この点を眼球のノードポイント付近に置く. 平行光部分にフィルムや透過型ディスプレイ素子をおけば, 人間はそこに表示された形状を見ることができ, しかも焦点調節にかかわらず像にはボケは生じない.

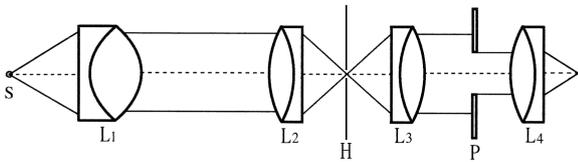


図 3: 1 チャンネルマクスウェル視光学系の模式図. S:光源, L1:コンデンサレンズ, L2-L4:レンズ, H:ピンホール, P:刺激パタン. ([7] より引用, 改変)

2.2 製作したディスプレイ

Maxell 視を用いたディスプレイを作成した. その構成を図 4 に示す. 図 3 との違いは, 近年の LED 光源の光源サイズは十分小さく, 光量も十分であるため, ピンホールによる点光源の手前のレンズを削除したことである. 本稿ではこれをノーフォーカスディスプレイと呼ぶ. このディスプレイからピンホールを削除することで, 一定距離に平面虚像を提示する状態に変えることができ, これをフォーカスディスプレイと呼ぶことにする. 図 6 に両者の見え方を示す. マクスウェル視を用いると焦点調節に関わらず明瞭な像が見えている.

視標の提示には OHP フィルムを使用した. 提示画像は, 図 7 のような赤と黒の縦線の視標であり, OHP フィルムに印刷して作成した. レーザープリンター (IMC5500, RICOH 社, 解像度 600[dpi] × 600[dpi]) を用い, 分解視力以上に細い線の視標ならば, 距離による太さの変化という手がかりがなくなり, 純粋に輻輳角と水晶体調節の情報だけを提示できるため, 最小幅での印刷を行った. 単純に計算するとプリンタのドットピッチの視角は 4.31[min] であり, 換算視力値 [3][4] は 2.322[/ min] である. ノーフォーカスディスプレイ仕様のレンズの有効径が約 25[mm] であることから, フィルム上での視標が直径 25[mm] の円の内側にぴったりと収まるように長さを調節することで, 固定フォーカスディスプレイ仕様の視標には視野制限を設けた.

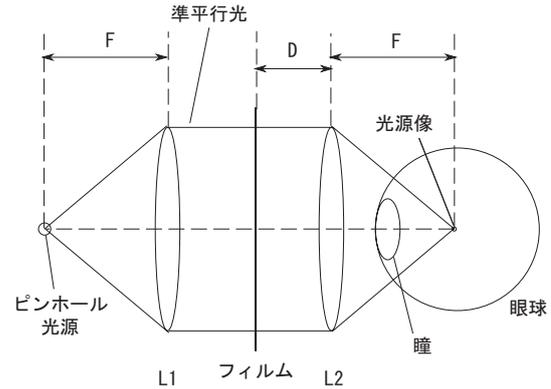


図 4: ノーフォーカスディスプレイの構成

片凸フレネルレンズ	焦点距離	35[mm]
	直径	45[mm]
パワー白色LED	光束 130[lm]	350[mA]
	光束 433[lm]	1500[mA]
	最大電流	1500[mA]
	サイズ	3.45x3.45[mm]
ピンホール	ピンホール径	0.1[mm]

図 5: 材料諸元



図 6: 像の様子の比較

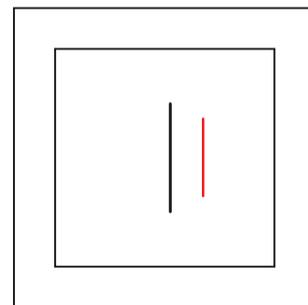


図 7: 視標の例

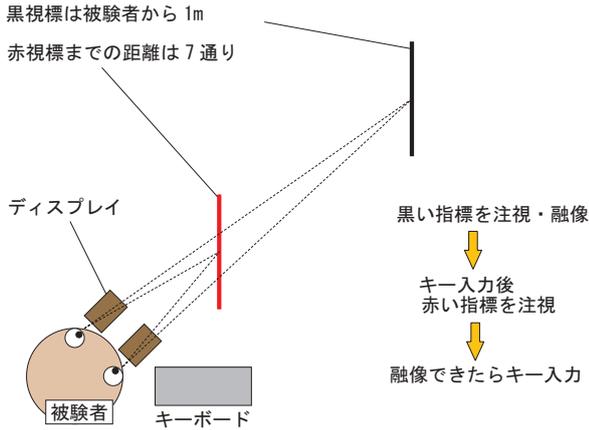


図 8: 実験の構成

3. 実験

被験者が観察する指標は、一定の距離 1m に提示する黒い縦線と、それと距離が異なる赤い縦線とした。なお、提示する赤い縦線までの距離は 500[mm], 400[mm], 350[mm], 300[mm], 250[mm], 200[mm], 150[mm] の 7 種類である。両者ともユーザーから真っ直ぐ前に置き、同時に表示された。ユーザは、まず黒線を融像し、キーボードを押すと同時に赤線を融像することを求められた。赤線が融像できたら再びキーを押すことで、融像にかかる時間を計測した。黒い指標までの距離は一律で 1m, 赤い指標までの距離は 7 種類の中からランダムに選び、被験者に融像させる実験を、ノーフォーカス・フォーカスの 2 つの環境で 3 セットずつ行った。なお被験者は 20 代の男女 12 名である。

3.1 結果

融像時間の平均を以下に示す。エラーバーは標準誤差である。また横軸の数字は赤指標までの距離 [mm] である。ノーフォーカス 1 セット目の値の振れが顕著であった。また 2 セット目以降では、ノーフォーカスとフォーカスの結果に有意差は見られなかった。

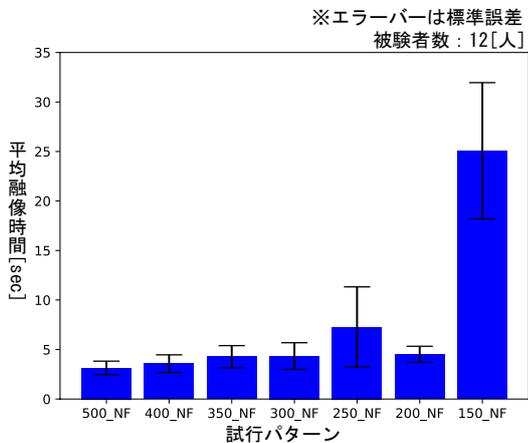


図 9: ノーフォーカス 1 セット目

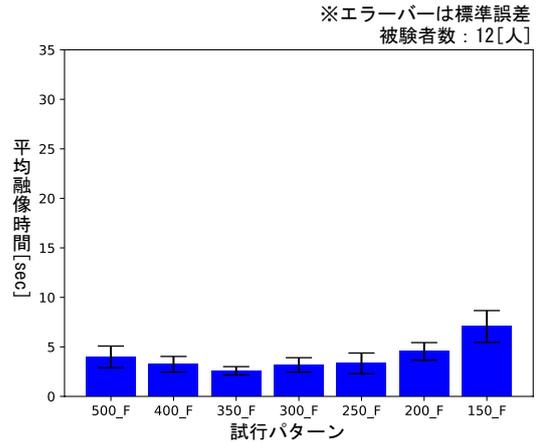


図 10: フォーカス 1 セット目

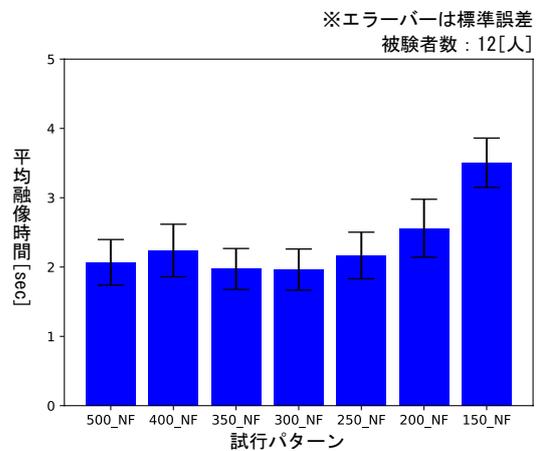


図 11: ノーフォーカス 2-3 セット目

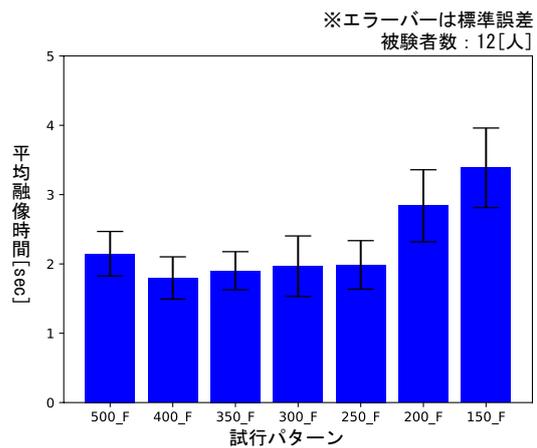


図 12: フォーカス 2-3 セット目

4. 結論

4.1 まとめ

輻輳情報あり、水晶体調節情報なし（ノーフォーカス）の場合と、輻輳情報あり、水晶体調節情報あり（両者の齟齬あり、フォーカスディスプレイ）の場合の融像時間に有意差は見られなかった。しかし、ノーフォーカスディスプレイを初

めて使用する際、特に近距離視標の融像に困難があることが分かった。すなわち、水晶体調節の情報を削除（どこでもピントが合う）しても、近距離での融像困難は解消せず、1回目の使用時にはむしろ悪化することが判明した。

4.2 議論と展望

製作したノーフォーカスディスプレイにはいくつかの欠点が生じていた。1. ノーフォーカス性から、両眼で異なるフレネル円環が明瞭に見えること、2. 適切な視点位置が瞳径内部と非常に狭く、容易に視野欠損が生じ、しかも片眼のみの欠損には気づきにくいこと、である。これらの欠点の実験結果に影響した可能性は排除できない。融像困難性の原因としては、輻輳と調節作用の不整合の他に、輻輳による視点位置の変化とレンダリング時に用いた視点位置の不整合や、被写界深度ボケなど、他の要素も考えられ、さらにそれらの総合作用つまり、相乗効果や打ち消しあいなども影響するかもしれない。今後はディスプレイの改良とともに、これらの要素についても合わせて検討してゆきたい。

参考文献

- [1] Clifton M.Schor, A Dynamic Model of Cross-Coupling Between Accommodation and Convergence: Simulations of Step and Frequency Responses, OPTOMETRY & VISION SCIENCE, 69, 4, 258-269, 1991.
- [2] 吉田辰夫, 渡部毅: 眼球運動, 調節作用の連携動作の解析, 人間工学 Vol.7, No.4, Jun 1971.
- [3] 山賀達也, 吉沢誠, 杉田典大, 阿部誠, 本間経康: 3D映像視聴における焦点距離と輻輳距離の矛盾が生体に与える影響の評価, 計測自動制御学会東北支部 第287回研究集会, March 2014.
- [4] George-Alex Koulieris, Bee Bui, Martin S.Banks, George Drettakis: Accommodation and Comfort in Head-Mounted Displays, ACM Transactions on Graphics, Vol. 36, No. 4, Article 87, July 2017.
- [5] M. Emoto, Y. Nojiri and F. Okano: Changes in fusional vergence limit and its hysteresis after viewing stereoscopic TV. Displays, 25, 67-76, 2004.
- [6] Gerald Westheimer: The maxwellian view, Vision Research, Volume 6, Issues 11-12, December 1966, Pages 669-682.
- [7] 滝浦 孝之: マックスウェル視光学系, 広島修大論集 第45巻 第2号, 2004.
- [8] 尾山 拓也: HMDの解像度及びアンチエイリアシングがユーザーの平衡に及ぼす影響, 岐阜大学工学部電気電子・情報工学科卒業論文, 2018.
- [9] 前田太郎: 知覚系の視点から見たHMDの処方箋含有成分と使用上の注意, 日本バーチャルリアリティ学会 vol.3 no.2, pp.119-125, 1998.