



マクスウェル光学系を用いた輻輳調節矛盾の 解消効果

Elimination of Vergence-Accommodation Conflicts by Maxwell Optical System
Decreases Difficulty to Fuse Stereoscopic Images

野倉大輝¹⁾, 稲守一晃, 木島竜吾²⁾

Daiki NOKURA, Kazuaki INAMORI, and Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, y3033112@edu.gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima@gifu-u.ac.jp)

概要 : 人の眼の輻輳と視焦点は連動しているが, 3D テレビやHMDなどの視覚提示装置では, 輻輳は映像によって変化するのにに対し, 視焦点位置は映像提示面に固定という矛盾から近距離での輻輳困難が生じる. そこで, マクスウェル光学系を用いて水晶体調節機能を自由にした装置を作成し, その装置と虚像式ディスプレイで融像時間について対照実験を行った. その結果, 輻輳調節矛盾の解消により融像が容易になることが示された.

キーワード : 視覚, マクスウェル光学系, 輻輳調節矛盾, ノンフォーカスディスプレイ

1. はじめに

1.1 輻輳と水晶体調節

輻輳とは, 眼が注視点の深さに合わせて寄ったり離れたりする運動である. このとき両眼と注視点を結ぶ 2 つの線がなす角を輻輳角という. 輻輳角は注視点までの距離が長いほど小さく, 短いほど大きくなり, 注視点までの距離を知る手がかりのひとつである.

水晶体調節とは, 眼が注視点の距離に合わせて水晶体を伸縮させ, 屈折率を変えることでピントを合わせることである. 水晶体調節も注視点までの距離を知る手がかりのひとつである.

輻輳と水晶体調節は相互作用し合い, 連携して動作する関係にある[1].

1.2 輻輳調節矛盾

視差式 3D ディスプレイは, 映像の提示面の距離が人から一定であるため, 視焦点面は固定される. しかし, 輻輳は提示される映像によって自由に变化する. これにより, 輻輳が示す注視点の距離と水晶体調節が示す距離に不一致が生じる. このことを輻輳調節矛盾と言う. この矛盾が引き起こす不具合として, パフォーマンスの低下[2]や知覚深度の歪み[3]が指摘されている. また, 水晶体調節が固定されている場合, 輻輳できる範囲に限界があることが分かっている. [4]によると, 例えば, 水晶体調節の距離が 1[m] の場合, 輻輳が行える範囲は 0.2[m]までだという.

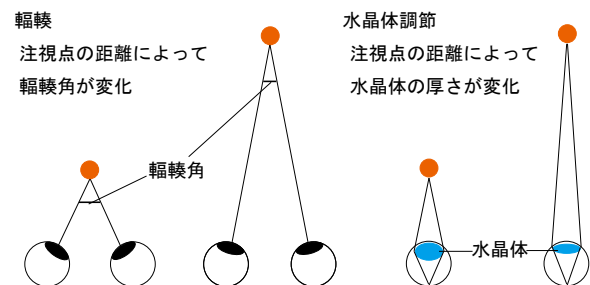


図 1: 輻輳と水晶体調節

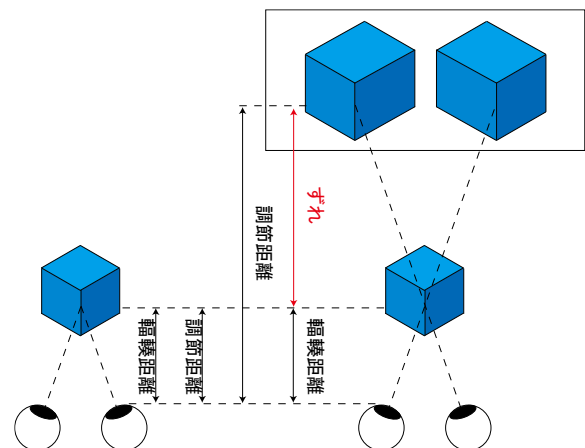


図 2: 輻輳調節矛盾

1.3 研究目的

Head Mounted Display (以下, HMD) をはじめとする視差式 3D ディスプレイには融像可能限界距離があり, 近距離での融像が困難である. 3D ディスプレイでより近くの物体を表現し, 使用時の快適性や没入感の向上・3D コンテンツの幅を広げるためには融像限界を拡大することが不可欠である. 本研究では, 融像困難の原因が輻輳調節矛盾であると考え, 矛盾の解消による融像限界距離の拡大を目的とする. 輻輳調節矛盾を解消したディスプレイを製作し, 矛盾を解消していないディスプレイと視焦点の距離ごとに融像時間について対照実験を行う.

2. 輻輳調節矛盾を解決する方法の検討

2.1 マクスウェル光学系

マクスウェル光学系[5]は, ピンホールやレンズ等の光学部品を同一光軸上に並べ, 瞳内に点光源の像を結像させる光学系で, 網膜照度測定などに使われる. ピンホールから出た光源は独立なまま, 混じり合わずに瞳に達するので, 光路中にフィルムや表示素子を挿入することで, 水晶体調節がどの距離にあってもボケのない明瞭な像が見える.

2.2 製作したディスプレイ

マクスウェル光学系を用いてフォーカスフリーなディスプレイ(Focus Free Display, 以下 FFD)を両眼用に 2 台製作した. 図 3, 4 にディスプレイの設計図を示す. 一方で, このディスプレイからピンホールを削除し液晶の表面にディフューザーを追加すると, 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る. この状態のディスプレイを Virtual Image Display(以下 VID)と呼ぶ. なお, 虚像の距離は, HMD で一般的な 1[m]とした. 図 7 に FFD 使用時と VID 使用時のそれぞれの見え方を示す. VID では虚像距離 1[m]に対して大きく視焦点がずれて, 0.15[m]では像は完全にボケているが, FFD ではほとんどボケはなく, 意図した通りフォーカスフリーとなっている. 尚, FFD の輝度は約 0.380[cd/m²], VID の輝度は約 10.7[cd/m²]であった.

マクスウェル光学系の視野角は, レンズの有効径と焦点距離によって決まり, 本 FFD のでは, 約 28.07[deg]である. また, 画素 1 個当たりの視野角は約 6.67[min]であり, 換算視力[6]は約 0.15 である.

平凸レンズ	直径	50.00[mm]
Edmond Optics japan 社 TS	焦点距離	100.00[mm]
	有効径	49[mm]
	ピンホール	開口径
Edmond Optics japan 社	厚さ	0.03[mm]
	透過型 LCD	有効エリア
テイデック社 ATM0430D25 +ZEDV0430D25	解像度	480×272[pixel]
	ドットピッチ	0.066[mm]×0.198[mm]
	LED	電流
Opto Supply 社 XPGWHT 5W 白色	光束	130-433[lm]
	サイズ	3.45[mm]×3.45[mm]

図 6: 材料諸元

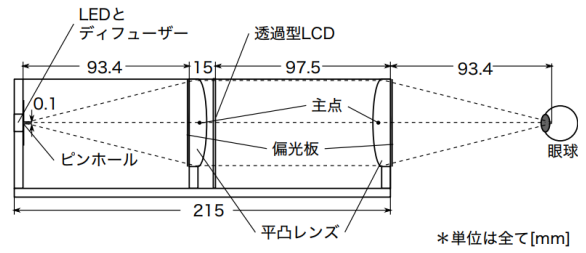


図 3: 製作したディスプレイの寸法

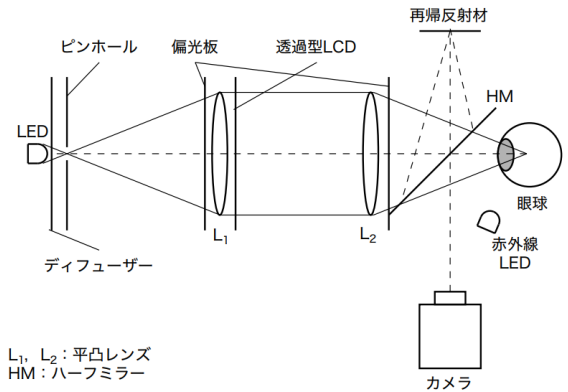


図 4: Focus Free Display (FFD) 構成

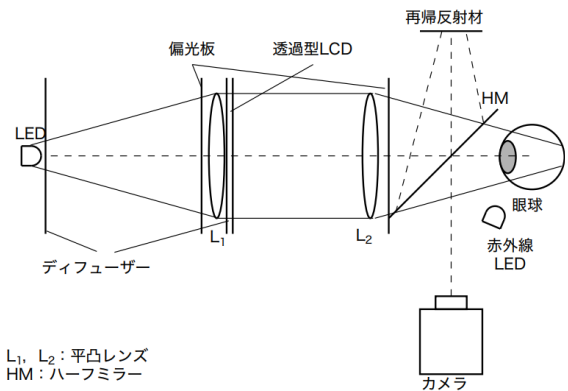


図 5: Virtual Image Display (VID) 構成

	FFD	FFD (明るさを加工)	VID	
カメラの 焦点距離	1 [m]	TEST	TEST	TEST
		TEST	TEST	TEST
	0.5 [m]	TEST	TEST	TEST
		TEST	TEST	TEST
	0.15 [m]	TEST	TEST	TEST
		TEST	TEST	TEST

図 7: 像の様子の比較

3. 実験

製作した FFD 及び、VID の 2 つのディスプレイを用いて、指標の融像にかかる時間を比較する被験者実験を行った。図 8 のように、被験者は 5 秒間だけ表示される青色の基準の指標を注視し、基準が消えると同時に表示される緑色の指標を注視し、融像できた時にキーボードを押すことで、融像にかかった時間を計測する。指標の形はどちらも正方形であり、大きさによる距離情報を無くすために視野角に占める範囲は常に一定となるようにした。緑色の指標の距離は 1.0, 0.5, 0.3, 0.25, 0.2, 0.175, 0.15[m]の中からランダムに全て表示した。緑色の指標に切り替わってから融像できるまでの時間を計測した。なお 10[sec]以内に融像できない場合は、記録を 10[sec] (融像不可) とした。各被験者は FFD と VID において 2 セットずつ実験を行った。被験者数は 10 人である。平均融像時間の比較には有意水準 5% の t 検定を行った。

また、指標をワイヤーフレーム立方体に変えて同様の実験を行った。被験者数は 19 人である。

3.1 結果

正方形指標の場合の結果を図 9, 10 に示す。VID において特に 0.2[m]以下で融像時間が長くなる傾向があり、平均融像時間の比較では指標距離 0.15, 0.175[m]において有意差が見られた。FFD の時は融像不可となる被験者はいなかった。

ワイヤーフレーム立方体指標の場合の結果を図 11, 12 に示す。FFD, VID 共に指標距離が短くなるほど融像時間が長くなっている。また、指標距離 0.5[m]以下では VID より FFD の融像時間が短くなり、0.3, 0.25, 0.2, 0.175, 0.15[m]において有意差が見られた。融像不可率については、VID より FFD の方が割合が小さくなっている。

3.2 考察

融像時間の比較より、正方形指標、ワイヤーフレーム指標共に FFD の方が融像が容易であった。また、VID 使用時よりも FFD 使用時の方が融像不可の割合がどの指標距

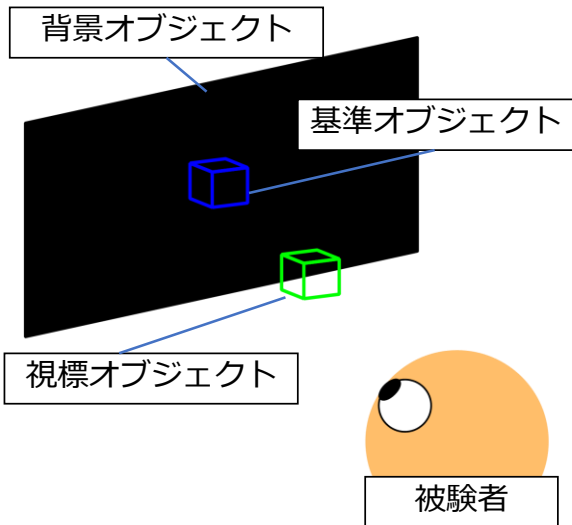


図 8: ワイヤーフレーム立方体指標の実験俯瞰図

離においても低かった。以上のことより、マクスウェル光学系を用いた輻輳調節矛盾の解消により、融像限界距離が拡大されたとと言える。

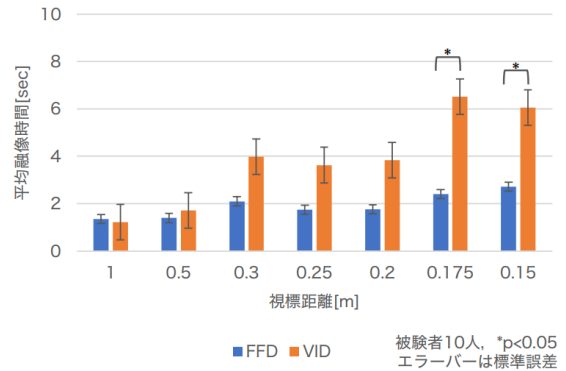


図 9: 正方形指標の平均融像時間

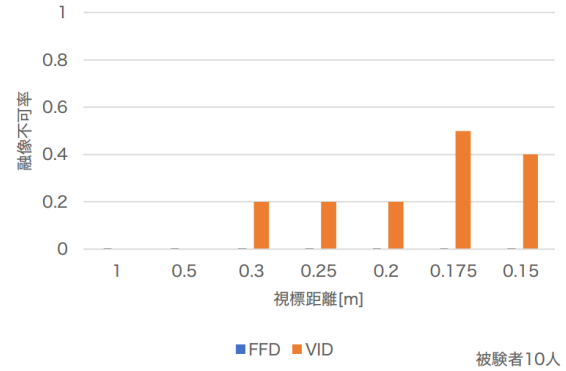


図 10: 正方形指標の融像不可率

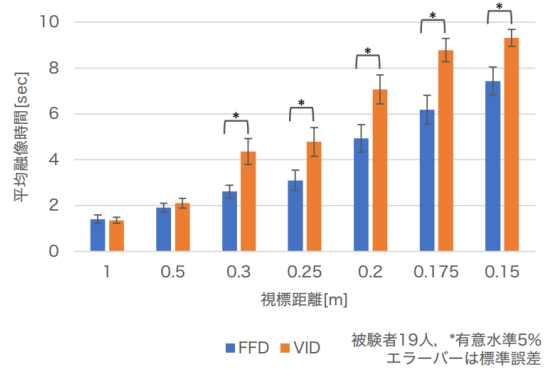


図 11: ワイヤーフレーム立方体指標の平均融像時間

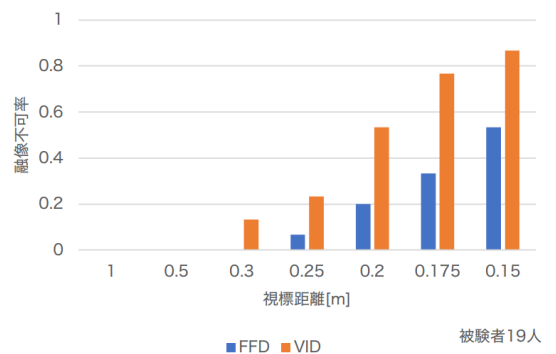


図 12: ワイヤーフレーム立方体指標の融像不可率

4. 結論

4.1 まとめ

本研究では、3D ディスプレイにおける輻輳調節矛盾が融像困難の原因となっているだろうと予想し、矛盾の解消方法及びその有効性を検証した。マクスウェル光学系を用いたディスプレイを設計・製作し、フォーカスフリーな場合と虚像が一定距離に立つ場合で指標の融像時間について対照実験を行った。その結果、以下の2つのことが明らかになった。

- (1)マクスウェル光学系を用いて輻輳調節矛盾を解消すれば、融像限界がより近くに広がり、近距離の融像が容易になること
- (2)輻輳調節矛盾が融像を阻害する大きな要因であること

4.2 今後の展望

本研究で用いた方法を実用化するにあたって更に求められる点を3つ挙げる。

1つ目は、光学系の移動が必要な点である。人間が物体を見る際には輻輳運動以外にも、両眼を平行に動かす運動、上下への運動、そして両眼視野の中心以外の物体を輻輳により見る場合が考えられる。そのため、マクスウェル光学系を用いるような狭い視野のディスプレイが、それらの眼球運動に対応するには、眼球運動のトラッキングに基づく視線追従と、スポットが瞳内から外れないようにするディスプレイ本体の追従動作が求められる。

2つ目は、解像度と回折干渉のトレードオフである。透過型LCDを用いてFFDを設計する場合、規則的に配置された画素開口により光の回折、干渉が起こり、フォーカスフリーがくずれてしまう問題を避けるために、ある程度画素の大きさが大きいものを選ぶ必要がある。しかし、画素の大きさが大きいと、ディスプレイが表現できる換算視力や空間周波数の限界値が極めて小さくなってしまふ。そのため、丁度良いディスプレイの画素を調べる必要がある。

3つ目は、像の焦点深度と明るさのトレードオフである。

ボケを少なくするために、ピンホールが大きさが小さい方が良い。しかし、ピンホールが小さいと瞳内に入る光量が減ってしまう。そのため、人間が気にならない程のボケで、できるだけ光量が確保できるような丁度良いピンホール大きさを調べる必要がある。

マクスウェル光学系を用いたディスプレイは、実用化まで課題は多いものの、近距離の融像困難の解消だけでなく、近視・遠視などの水晶体調節力が低下している人にもメリットがある。また、VRコンテンツの幅として、例えば、VR空間で小さな部品を手に取り眺める、照準を覗く、手術をするといった近見での作業を頻繁に必要とするシーンを表現しやすくなり、実用的なアプリケーションの幅が広がるであろう。

参考文献

- [1] 吉田辰夫, 渡部 叡: 眼球運動, 調節作用の連係動作の解析, NHK 放送科学基礎研究所, 人間工学 vol.7, No.4, 1971.
- [2] Paul V. Johnson, Jared A.Q. Parnell, Joohwan Kim, Christopher D. Saunter, Gordon D. Love, and Martin S. Banks : Dynamic lens and monovision 3D displays to improve viewer comfort, Optics Express, Vol.24, Issue 11, pp.11808-11827, 2016.
- [3] Simon J. Watt, Kurt Akeley, Marc O. Ernst, Martin S. Banks : Focus cues affect perceived depth, Journal of Vision, Vol.5, pp.834- 862, 2005.
- [4] 渡辺 叡: 視覚の科学, 写真工業出版, 1975.
- [5] Gerald westheimer : The maxwellian view, Vision Reserch, Vol.6, Issues 11-12, pp.669-682, 1966.
- [6] 岩本和世, 前田太郎, 谷江和雄:視線追従型映像提示系への応用を目的とした注視点近傍における視覚特性の検討, 1993.