



頭部搭載可能な小型マクスウェル視ディスプレイとその性能

Compact Maxwell Display that can be mounted on the head and its performance

神谷陸杜¹⁾, 金光宇²⁾, 木島竜吾³⁾

Rikuto KAMIYA, Kou KIN, and 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, kamiya.rikuto.e1@s.gifu-u.ac.jp)

2) 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, kin.kouu.j0@s.gifu-u.ac.jp)

3) 岐阜大学 工学部 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima.ryugo.n4@f.gifu-u.ac.jp)

概要: 本研究では、輻輳調節矛盾の軽減を目的に、小型で頭部装着可能なマクスウェル視ディスプレイを製作した。アイトラッキングによりピンホール光源位置を制御してアイボックスを動的に拡大することで見え方を安定させた。被験者実験により視差式 3D ディスプレイよりも近距離での融像性が向上することを示した。

キーワード: マクスウェル光学系, マクスウェル視ディスプレイ, アイボックスの拡大機能, 性能評価

1. はじめに

1.1 輻輳調節矛盾による問題

VR ヘッドセットのほとんどは、視差式の三次元ディスプレイつまり、ユーザーの両眼に対し、視差を持つ別々の映像を提示する方式である。画像中の物体位置の違いにより両眼の輻輳角を誘導することで、距離感が生まれるのだが、一方で虚像面は動かず、水晶体調節による視焦点はそこにあっていなければならない。実空間では輻輳による距離と調節による距離は一致しているのだが、視差式三次元ディスプレイでは両者が食い違い、これを輻輳調節矛盾と呼ぶ。人間の調節と輻輳の機能は連動しているため仮想物体に輻輳を合わせた状態で調節を行える範囲には限界があり [2]、これは眼精疲労や知覚深度の歪みといった悪影響 [1][3] を起こすことが知られている。現在市販されている VR ヘッドセットでは、例えば 30cm など近距離にある物体がうまく融像できないという融像困難が生じ、これは輻輳調節矛盾のためではないかと考えられる。

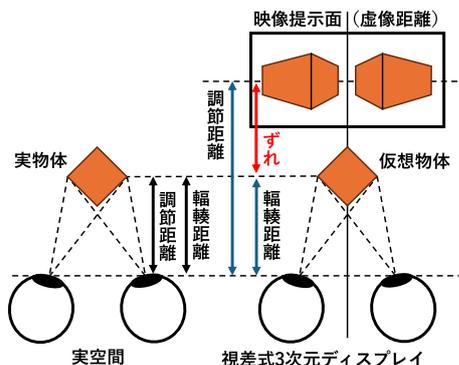


図 1: 輻輳調節矛盾

1.2 マクスウェル視ディスプレイ

マクスウェル光学系 [4] とは、ピンホール光源と 2 枚の凸レンズを同一光軸上に配置する光学系である。この光学系では、ピンホール光源からでた光が 1 枚目の凸レンズで平行光となり、2 枚目の凸レンズで収束光となる。この光が収束する点に眼を置くと、レンズ全体が光っているように見える。凸レンズの間に透過型液晶素子を挟むと画像を提示できる。瞳孔中のピンホール像の大きさが実際の瞳孔系として働き、水晶体調節がどこにピントを合わせていても画像がはっきり見える、つまり被写界深度がとても深い状態となる。これをマクスウェル視ディスプレイと呼ぶことにする。

1.3 研究目的

筆者らは、マクスウェル視ディスプレイを使い被写界深度が非常に深い映像を提示することで融像を容易にできることを明らかにした [5][6]。眼球は動くので、ピンホール像を瞳の内部に入れ続けるためには、アイトラッキングとそれに基づくピンホール光源の運動が必要である。本稿では機械式のピンホール運動に変えて [7]、液晶ディスプレイ上の小領域を発行され光源とする方式を採用し頭部装着型へと変更するとともに、虚像距離を大胆に目の近くに持ってくることでヘッドセットの奥行きを縮小する試作を行なった。

2. 実験装置の作成

作成したマクスウェル視ディスプレイの設計図を図 2 に、材料諸元を表 1 に示す。アイトラッキングを用いた点光源移動には、Jetson Nano と Arduino を用いて瞳の輪郭検出と点光源移動を行った。液晶ディスプレイへの表示は Raspberry Pi を用いた。視野角は約 30[deg]、換算視力は約 0.01 である。また、虚像距離は約 65[mm] である。

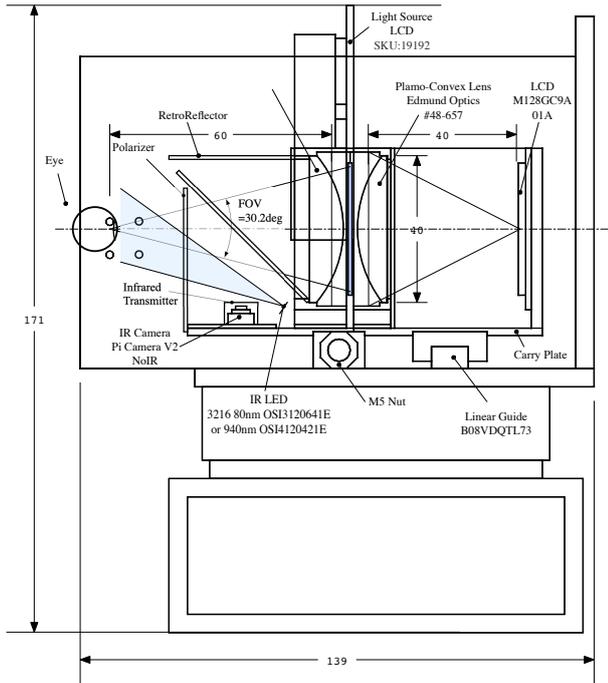


図 2: 作成したマクスウェル視ディスプレイの側面図

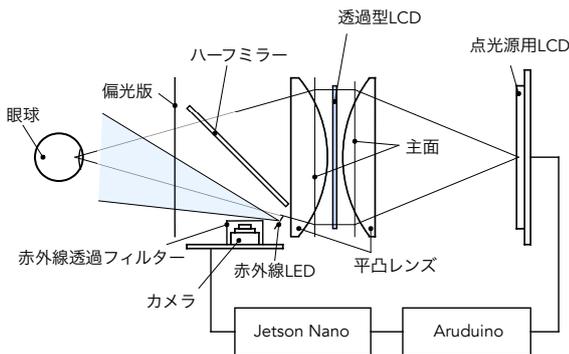


図 3: アイボックスの拡大手順図

2.1 アイボックスの拡大機能

点光源像を動く眼球の瞳内部に入れ続けるため、カメラにより瞳孔を認識し、その位置を液晶上の点光源の制御に用いた。赤外線 LED が目の周りを証明し、赤外線透過フィルタを介してカメラはハーフミラーを介して眼球の画像を撮影した。取得した画像中の、瞳の中心位置座標を求め、点光源用 LCD の表示位置座標へと変換し、点光源を更新した。

2.2 点光源マップ

瞳の中心位置座標から点光源用 LCD への座標変換には事前に点光源マップを作成して用いた。点光源用 LCD 上のある位置に点光源を表示し、瞳検出用カメラから見たその像の画像座標を保存する。この対応関係を逆に解けば、得られた瞳中心画像座標から、光らせるべき光源 LED 画像座標が求められる。

表 1: 構成機器の仕様一覧

製品名	項目	内容
Jetson Nano	製造元	NVIDIA
	Memory	4GB LPDDR4 -3200
透過液晶ディスプレイ	製造元	Waveshare
	品番	1.28inch LCD Module
	本体サイズ	40.4 × 37.5 Φ 37.5 [mm]
	有効エリア	Φ 32.4[mm]
	解像度	240 × 240 [px]
Raspberry Pi 3B+	製造元	Raspberry Pi
	品番	Raspberry Pi 3 Model B+
平凸レンズ (F40)	製造元	エドモンド・オプティクス・ジャパン社
	品番	#48-654
	直径	40.0 [mm]
	焦点距離	40.00 [mm] @ 587.6 [nm]
	BFL	35.13 [mm]
平凸レンズ (F60)	製造元	エドモンド・オプティクス・ジャパン社
	品番	#45-149
	直径	40.0 [mm]
	焦点距離	60.00 [mm] @ 587.6 [nm]
赤外線カメラ	製造元	Raspberry Pi
	品番	Raspberry Pi Camera Module V2 NoIR
ハーフミラー	製造元	エドモンド・オプティクス・ジャパン社
	品番	#43-818
	本体サイズ	50.0 × 50.0 [mm]
	R/T 比	25/75
	製造元	秋葉原社
点光源表示用ディスプレイ	品番	M128GC9A01A
	本体サイズ	36 × 44 [mm]
	有効エリア	Φ 32.4[mm]
	解像度	240 × 240 [px]
	ドットピッチ	0.135 × 0.135[mm]

3. 性能評価

3.1 ピンホール光源径ごとのボケ方

点光源用 LCD の光源径、カメラの焦点距離を変更し、図 4 を撮影した。撮影に用いたカメラは、センサーから得られた画素値に補正が施されていないリニアな特性を持つカメラである。ピンホール光源径ごとに見ていくと、0.945[mm]までは焦点距離を 0.35[m] まで変えたときでも文字を読むことが可能である。一方で、1.485[mm] 以降では焦点距離が 0.11[m] のときには、かろうじて文字を読むことができるが、焦点距離を変えたときにはボケがひどくなってしまい読むことができなくなっている。このことから、今回作成したマクスウェル視ディスプレイではピンホール光源径が 1.485[mm] より大きい場合には、被写界深度が深いという特性に適さないため不十分であるといえる。

3.2 輝度測定

同じカメラを用いて、測定を行った。測定方法は、点光源用 LCD の大きさを変えながら、表示用液晶ディスプレイの白色を撮影したものを表 2 に示す。また、輝度箱も同様に撮影を行った。この輝度箱の輝度値は 400[cd/m²] と固定の値であるため、この値からマクスウェル視ディスプレイの輝度値の算出を行った。今回の実験では、焦点距離を変えた際のボケ方、輝度を踏まえてピンホール径 0.945[mm] で行った。

3.3 MTF 測定

制作した小型マクスウェル視ディスプレイの解像度性能を把握するため、変調伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF) を計測した.MTF は、ディスプレイに様々な周波数の正弦波濃淡画像を表示し、周波数ごとのコントラストの推移を求めることで算出される。

空間周波数 u において観測される画像の最大輝度を $L_{max}(u)$ 、最小輝度を $L_{min}(u)$ とすると、コントラスト $C(u)$ は次式で表される。

$$C(u) = \frac{L_{max}(u) - L_{min}(u)}{L_{max}(u) + L_{min}(u)} \quad (1)$$

横軸に空間周波数 [cycle/deg]、縦軸にコントラスト $C(u)$ をプロットすることで、MTF が求められる。

本実験では、正弦波濃淡画像ではなく、矩形波画像と第3項までのコルトマン補正を用いて MTF を算出した。測定した MTF のグラフを図5、図6に示す。図6で示した理論値は、液晶の解像度だけを考え光学系によるボケを考慮しないものである。利用範囲をコントラストが0.5以上の時と定めると、制作したディスプレイの換算視力は約0.01であった。これは理論値を大幅に下回り、ピンホール径0.945[mm]が生じるボケを考慮しても換算視力は0.03程度であるから、光学系の動作に設計外の要素が入っていると考えられる。

4. 視差式3次元ディスプレイとマクスウェル視ディスプレイとの融像比較実験

4.1 実験目的

先行研究 [6] で用いたマクスウェル視ディスプレイでは、虚像までの距離を約1.1[m]と、市販のVRヘッドセットを模擬した設計であった。このときの近距離融像はマクスウェル視ディスプレイの方が容易であった。本稿では虚像距離を約65[mm]とほぼ眼前にある設計とした。ピンホール径0.945[mm] (マクスウェル視状態、以降 Maxwell と記す) と32.4[mm] (通常のヘッドセット状態、以降 VID (Virtual Image Display) と記す) とで比較実験を行い、融像が容易になるのかを調べた。

4.2 実験環境

実験環境を図7、図8に示す。なお、Maxwellの実験を行う際には、事前にアイトラッキングを実施し、瞳孔に光が適切に入っていることを確認した。さらに、被験者が眼を動かしても映像が変わらず見えることを確認した後、実験を開始した。

表 2: 各ピンホール径毎の輝度

ピンホール径	輝度
0.945 [mm]	0.50525 [cd/m ²]
1.485 [mm]	1.27208 [cd/m ²]
2.025 [mm]	1.99096 [cd/m ²]

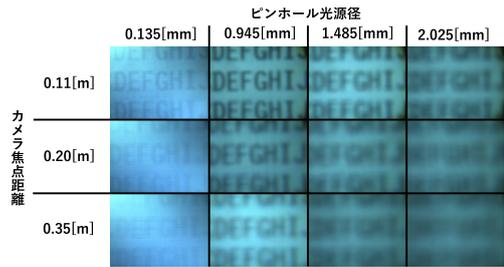


図 4: ピンホール光源径比較画像

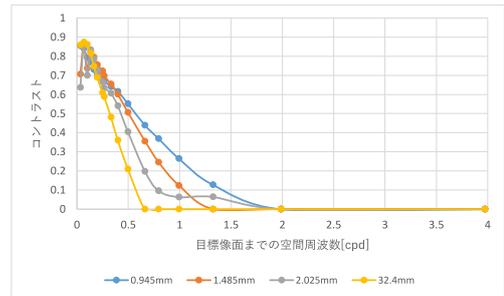


図 5: コルトマン補正後のピンホール光源径別 MTF グラフ

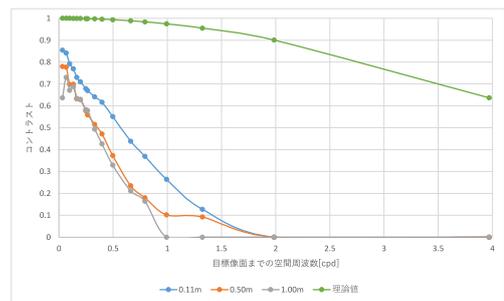


図 6: コルトマン補正後の焦点距離別 MTF グラフ

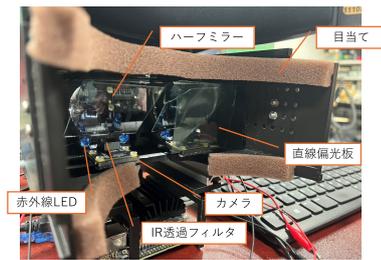


図 7: 実験環境



図 8: 実験の様子

4.3 実験内容

Maxwell 条件と、VID 条件とでの融像困難性を比較する実験を行なった。まず、3.00 [m] の輻輳距離に青色のワイヤフレーム立方体を 15 秒間表示し、その後、5 種類の輻輳距離を 0.15, 0.20, 0.30, 0.50, 1.00 [m] に中心を持つワイヤフレーム立方体を 5 秒間表示した。被験者には、15 秒間のうち、緑色のワイヤフレームが融像できている間スペースキーを押してもらい、入力開始 時間および入力継続時間を記録した。

立方体の視覚は一定 (8.69deg) とした。提示距離はランダムに 1 回ずつ表示を行った。背景は黒とした。Maxwell 条件と、VID 条件とで輝度がほぼ同じになるように調整した。画像生成に用いた両眼間隔は、日本人の平均値を考慮し 64 [mm] とした。図 9 に表示した画像を示す。図 9 に表示した画像を示す。

4.4 実験結果

図 10, 図 11 に融像できていた時間の平均, 融像までにかかった時間の中央値を示す。検定は、各指標距離ごとに対応のあるサンプルの t 検定 (有意水準 5%, 両側検定) である。図 10 では、Maxwell と VID を比べたとき、ほとんどの指標距離で VID より Maxwell 視ディスプレイの方が融像できていた時間が長かった。図 11 では、Maxwell と VID を比べたとき、全ての指標距離で VID より Maxwell の方が融像までにかかった時間が短かった。この結果は先行研究 [6] のときに比べ結果が悪かった。これは、小型化した際に虚像距離を極端に近くしたため提示映像がボケてしまったためだろうと考えられる。

5. 結論

本研究では、制御が安易にできるアイトラッキングによる光源移動機能を、従来のマクスウェル視ディスプレイに付加することで、擬似的なアイボックスの拡大を実現するマクスウェル視ディスプレイ制作した。実験では、虚像距離の違いに関わらず VID の状態よりもマクスウェル視ディスプレイが融像を容易にすることを明らかにすることができた。

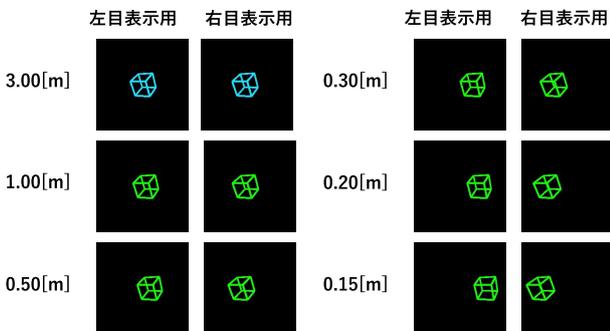


図 9: 提示映像

参考文献

- [1] 山賀達也, 吉澤誠, 杉田典大, 阿部誠, 本間径康: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, 資料番号 297-10, 2014.
- [2] 畑田豊彦: 3次元映像技術の動向と視覚特性; 日本写真学会誌, 51 巻, 1 号, 1988
- [3] Simon J. Watt Kurt Akeley, Marc O. Ernst, Martin S. Banks:Fo-cus cues affect perceived depth, Journal of Vision; Vol 5, pp.834-862, 2005
- [4] Gerald westheimer : The maxwelloan view, Vision Research, Vol6, Issues 11-12, pp.669-682, 1966.
- [5] 野倉大輝, 稲守一晃, 木島竜吾: マクスウェル光学系を用いた輻輳調節矛盾の解消効果, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D3-1, 2022.
- [6] 野倉大輝, 木島竜吾: 視差式 3 次元ディスプレイにおける両眼立体視時の融像困難性と観察瞳制限の関係, 信学技報, Vol.123, No60.MVE2023-10, pp51-56, 2023.
- [7] 野倉大輝, 金光宇, 神谷陸杜, 木島竜吾: アイトラッキング機能を備えたマクスウェル視ディスプレイの小型化, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3E2-03, 2024

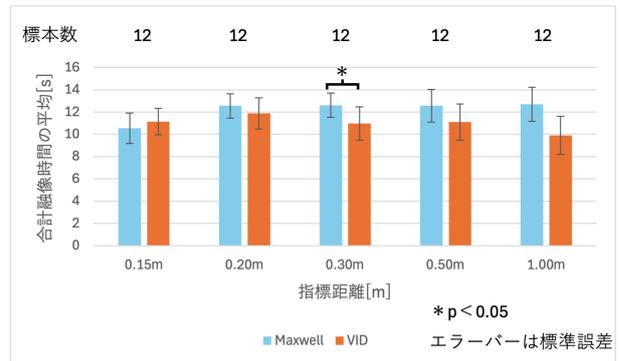


図 10: 合計融像時間平均

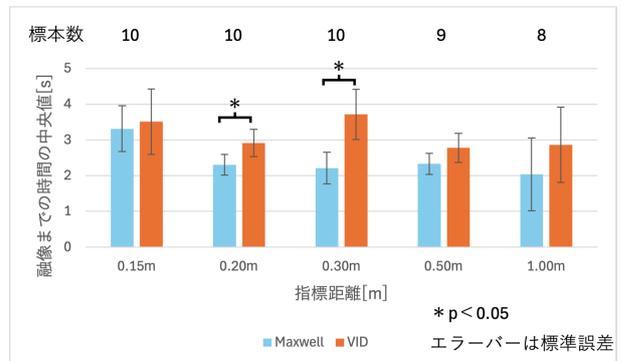


図 11: 融像までにかかった時間の中央値