This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2023 年 9 月）

アイトラッキングによるアイボックス追従を備えたマクスウェル視ディスプレイ

Maxwellian View Display with Moving Eye-box Controlled by Eye Tracking

野倉大輝 [1)]，吉川柊太 [2)]，大橋聖也 [3)] ，木島竜吾 [4)]
Daiki NOKURA, Shuta YOSHIKAWA, Seiya OHASHI 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, nokura.daiki.i4@s.gifu-u.ac.jp）
2) 岐阜大学 工学部（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, yoshikawa.shuta.j0@s.gifu-u.ac.jp）
3) 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, ohashi.seiya.d9@s.gifu-u.ac.jp）
4) 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：マクスウェル光学系を用いたディスプレイは融像を容易にすることができるが，アイボックスは非常に小さく，少し眼を動かすだけで像が見えなくなる．そこで，使用者の瞳をトラッキングし，瞳をピンホール像が追うようにマクスウェル光学系のピンホール光源を動かすシステムを考案，試作した．ディスプレイとの統合はなされていないものの実験により十分な速度と精度を確認した．

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，アイトラッキング，アイボックスの瞳追従

1. はじめに

現在，3D 映画や 3D ゲーム機といった立体的にモノを表示できる 3 次元ディスプレイが普及している．さらに，ディスプレイを頭にのせることでユーザーに高い臨場感や没入感を提示できる頭部搭載型ディスプレイも普及している．これらの主流は左右両眼に異なる像を見せる視差式である．提示する映像は一般に一定の深さにあり，与えられる３次元の手掛かりは両眼視差のみである．３次元ディスプレイを使用すると酔いや眼精疲労などの悪影響や使用中に融像ができない，または難しくなるという影響がある．

人間の眼の機能のうち，立体視にとって重要なものは輻輳と調節である．輻輳は，ある対象物を見るように両眼が回転する機能であり，調節はある対象物を見るときに水晶体の厚さを変化させて網膜上に明瞭な像を得ようとする機能である．輻輳と調節は連動し，一方を制限するともう一方の制御できる範囲が制限されることが実験により明らかになっている[1].

現実世界では，輻輳と調節の制御系が与える距離情報が一致している．しかし，視差式の 3 次元ディスプレイでは，映像の提示面は固定であり，鮮明な網膜像を得るために調節をそこに合わせようとする．また，輻輳は立体像を見るように動作するため，両者の制御系が与える距離情報の矛盾が生じる[1]. これは輻輳調節矛盾と呼ばれ，視覚疲労などの影響を与えることが指摘されている[2].

筆者らは，マクスウェル光学系を用いた 3 次元ディスプレイを使い焦点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[3]. しかし，マクスウェル光学系を用いた 3 次元ディスプレイの実用化のためには，幾つか問題が存在する．明るさと融像容易性とのトレードオフ，アイボックスが非常に小さいこと，解像度と融像容易性のトレードオフだ．１つ目の問題については，筆者らはピンホール像の大きさが 1[mm]から 2[mm]であっても融像を容易にでき，光量を確保できることを明らかにした[4]. 現在は，２つ目の問題に着目し，使用者の瞳をトラッキングし瞳の位置に合わせて光源を動かすシステムを作成している．本稿では，そのシステムについて報告する．

2. アイトラッキングによるアイボックス追従を備えたディスプレイの作成

図 1 に筆者らが作成したマクスウェル光学系を用いたディスプレイの設計図を示す．マクスウェル光学系を用いたディスプレイはアイボックスが非常に狭く，少し眼を動かすだけで提示像が見えなくなる．眼の運動を捉えて瞳内部に光源の像を作り続けるために，図 2 に示すような仕組み

© 2023 日本バーチャルリアリティ学会

を用いた．点光源からの開散光は第一レンズで平行光となり，第二レンズで瞳の内側で像点を結ぶ．点光源を下側に移動させるとレンズ間の平行光には上向きの角度がつき，光源の移動量と同じ距離だけ像点は上に動く．以下ではこの仕組みを構成する要素である，瞳位置のトラッキングと光源移動機構について説明する．

2.1 アイトラッキング

赤外領域まで感度のあるモノクロームカメラ（表 1）を用いて瞳の画像を取得した．赤外線 LED をカメラの側に設定して使用者の顔や眼球を照らした．このカメラ映るものは，ハーフミラーでの反射を介した使用者の顔や眼球と，ハーフミラーを透過して見える再帰反射材上のピンホール像である．これにより，眼球の追跡と，瞳内にピンホール像があるかどうかの確認を同時に行うことができる．

得られた画像（図 3）から瞳を検出する方法を以下に述べる．

1．眼の周辺を関心領域（ROI, Region of Interest）とし切り出す（図 4）．手作業で切り取る範囲を指定する．
2．切り出した ROI 画像を二値化する（図 5）．パラメータは手作業で調整する．
3．二値化して得られた暗い方の領域を囲む矩形を求め，その中心の座標を瞳の中心座標とする（図 6）．

得られた瞳の中心の座標はシリアル通信を介して光線追従装置に送る．

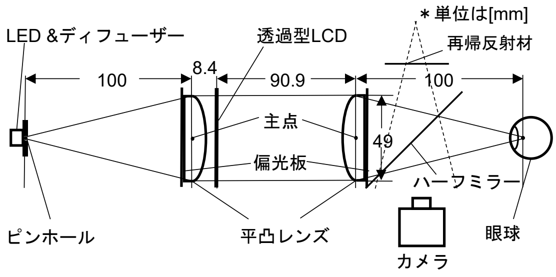

図 1:ディスプレイの設計図

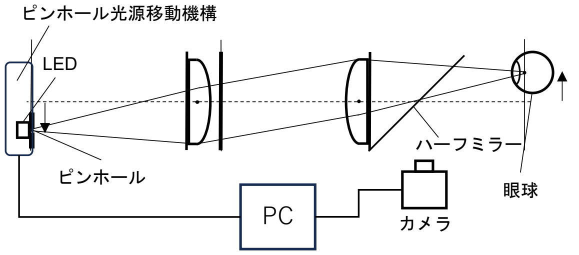

図 2:アイトラッキングによるアイボックスの瞳追従

表 1:モノクロームカメラの諸元

製造元	Ailipu Technology
品番	ELP-USBGS720P02-L36-JP
解像度	1280×720[px] MJPEG @ 60[fps]

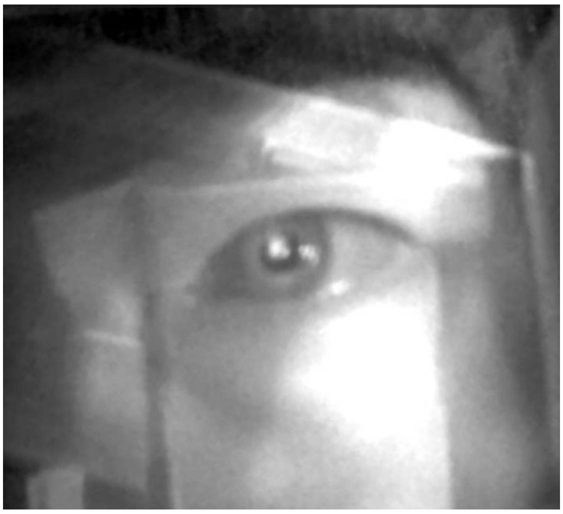

図 3:カメラから得られた画像

図 4:眼の周辺を切り出した ROI 画像

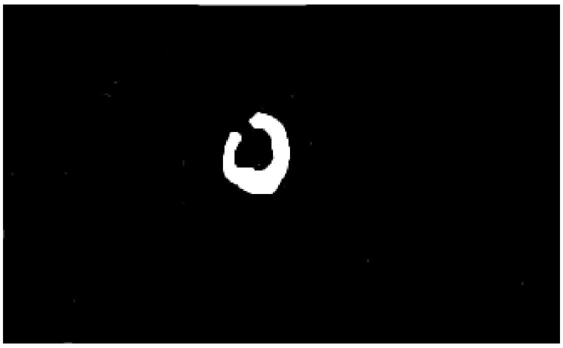

図 5:二値化を行った ROI 画像

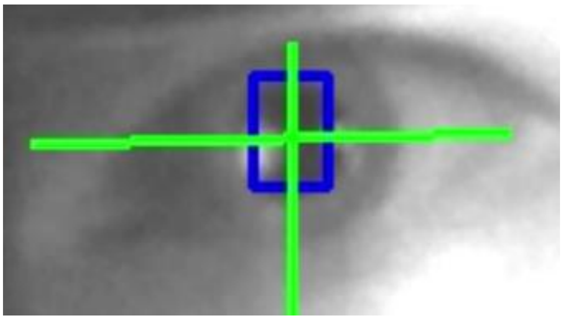

図 6:瞳を検出した ROI 画像
青い矩形 :瞳，緑の十字 :瞳の中心

Ⓒ 2023 日本バーチャルリアリティ学会

2.2 光源移動機構

ピンホール光源を移動させるための機構を試作した．その構成図を図 7 に，試作品の画像を図 8 に，用いた材料の諸元を表 2 に示す．

DC モータで歯車を介して送りねじを回転させ，その上にナットを接着した LED 基盤を配置することで図の左右方向への運動を作っている．スライドボリュームは，LED 基盤を保持するリニアベアリングの役割と，位置センサの役割を果たしている．現在のところ運動は 1 軸であり，稼働範囲は±10[mm]である．

駆動のための回路は，組み込み用 CPU，モータドライバなどから成っている（図 10）．瞳検出を行っているホスト PC から CPU に仮想シリアル通信で目標位置が送られると，スライドボリュームの電位からわかる光源位置と比較し，瞳を追うようにモータを駆動させる．

2.3 試作結果

瞳検出は安定しており，LED が瞳を追うように移動することを確認した．主に実験中の輻輳運動を想定してモータの駆動速度を抑えているため，サッケードのような素早い視線の運動があると一時光源像は瞳から外れてしまうが，すぐに瞳内に移動する．

3. まとめ

マクスウェル光学系を用いたディスプレイの欠点の一つは，アイボックスが非常に小さく，使用者とディスプレイの位置関係が変わったり，視線が動いたりするとすぐに何もみえなくなってしまうことである．本稿では，カメラを用いた瞳検出の結果に応じてピンホール光源を動かすことでその点像を使用者の瞳の内側に留め続けるシステムを考案し，その試作を行った．現在までのところ動作は水平方向に限られ，ディスプレイとの統合はなされていないものの，被験者実験により筆者らが目的としている十分な速度と精度を確認した．

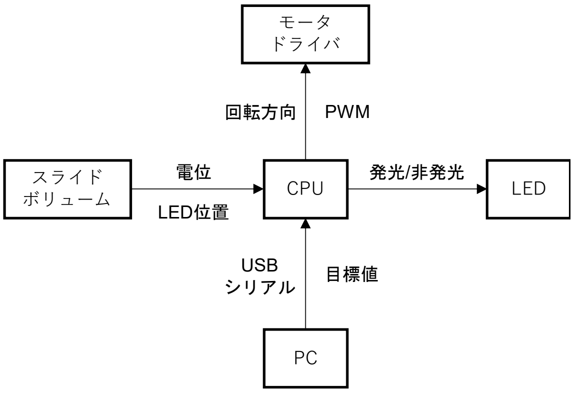

図 10：光源移動機構駆動回路のブロックダイアグラム

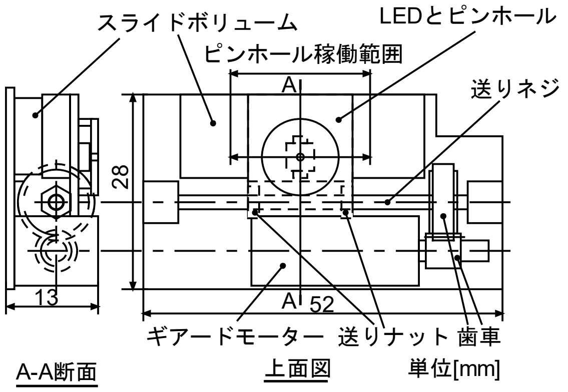

図 7：ピンホール光源移動機構の構成

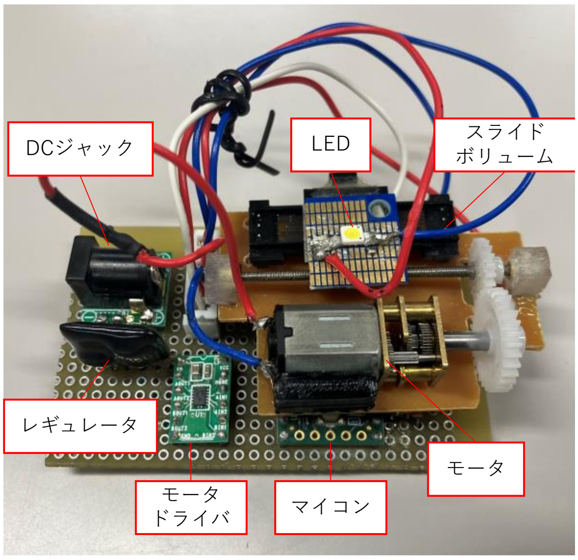

図 8：試作したピンホール光源移動機構

表 2：ピンホール光源移動機構の材料諸元

レギュレータ	製造元	ローム
	品番	BP5293-50
	入力電圧	7[V]~26[V]
	出力電圧	5.0[V]
	出力電流	1[A]
モータドライバ	製造元	Texas Instruments
	品番	DRV8835
マイコン	製造元	PJRC
	品番	TeensyLC
モータ	製造元	MERCURY MOTOR
	品番	MG1012-06208-50L
	定格電圧	6[V]
LED	製造元	Intematix Technology Center Corporation
	品番	A3535-01005-CW
	順電流	120[mA]
	順電圧	3.2[V]~3.3[V]
	光度	12.5[cd]~13.5[cd]
スライドボリューム	製造元	アルプスアルパイン
	品番	RS20H11AA019

© 2023 日本バーチャルリアリティ学会

参考文献

[1] 原島博，元木紀雄，矢野澄男 : 3 次元画像と人間の化学，オーム社，2000.

[2] 山賀達也，吉澤誠，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研究集会，287-10，2014.

[3] 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.

[4] 野倉大輝，木島竜吾：視差式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, No 60. MVE2023-10, pp 51-56, 2023.

Ⓒ 2023 日本バーチャルリアリティ学会