

マクスウエル光学系による広視野立体ディスプレイ

稲見 昌彦・川上 直樹・前田 太郎・柳田 康幸・舘 暲
(東京大学工学系研究科)

A Stereoscopic Display with Large Field of View Using Maxwellian Optics

Masahiko INAMI, Naoki KAWAKAMI, Taro MAEDA,

Yasuyuki YANAGIDA, Susumu TACHI

Faculty of Engineering, University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

email: minami@star.t.u-tokyo.ac.jp, kawakami@star.t.u-tokyo.ac.jp,

maeda@star.t.u-tokyo.ac.jp, yanagida@star.t.u-tokyo.ac.jp, tachi@star.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract: Conventional stereoscopic displays have inconsistent accommodation against convergence, which degrades sensation of presence. We developed a stereoscopic display applying Maxwellian optics to avoid such inconsistency by realizing large depth of focus. The display was also designed to provide large field of view (about 110 degree) with the simple optics.

keyword : Maxwellian optics ; convergence accommodation ; stereoscopic display ; virtual reality ;

1.はじめに

バーチャルリアリティ等の分野において、人間の眼球近傍での有力な画像提示デバイスとして、ヘッド・マウンテッド・ディスプレイ(HMD)が提案されて久しい¹。

HMDの最大の特徴は、頭部運動に応じて映像を提示するため、全方位角の映像を OMNIMAX や CAVE のように大規模なシステムを用いなくても提示可能であるということである。しかし、視野の狭さ、輻輳調節が満足されないことによる眼精疲労などの問題点も同時に指摘されている。

そこで、まず現在の HMD の問題点を明確化したあとに、マクスウエル光学系を応用する事によって、広い視野角を持ち、なおかつ輻輳調節を満足することが可能な立体ディスプレイの構成法、及び予備実験の結果について報告する。

2.現在の HMD の問題点

2.1.輻輳・調節の不一致による問題

人間の両眼による奥行き知覚の手がかりとしては、両眼網膜像の視差量と輻輳とが重要な役割

を果たしていることが知られており²、HMDをはじめとして、各種立体ディスプレイに二眼式の立体視が広く用いられている。

立体ディスプレイにおいては、理想的には両眼像の輻輳角の条件や網膜上の像の大きさ、水晶体調節を実際に見たものと同じ条件に調整する必要がある³。しかしながら、現在一般的に用いられている HMD では、提示画像の光学的距離が 1~2m に固定されているものがほとんどであり水晶体調節の条件は満たされていない。

水晶体の調節と眼球の輻輳との間には密接な関係があり、調節が起きると輻輳が起きる *accommodative convergence* や、逆に輻輳が起きたときには調節が連動して起きる *convergence accommodation* などの現象が明らかとなっている⁴。

また、調節を一定に保ったままでも輻輳はある程度は変化可能であり、一般的な HMD の像面提示距離である 1~2m の距離に調節を固定した場合、50cm~無限遠の範囲に輻輳を変化可能とされている。よって手元作業に適切とされる 30cm 前後の距離の物体を提示しようとした場合、両眼

映像の融像が困難な状況となってしまう。

さらに、融像範囲内であっても、輻輳と水晶体調節とのずれは奥行き認知精度の狂いや眼精疲労を引き起こすといった問題が指摘されている⁵。特にオーグメンテッド・リアリティへの応用が期待されるシースルーHMD(STHMD)として用い、現実世界の物体に仮想的な物体を重ねて表示しようとしても、輻輳による提示距離が一致しているにもかかわらず、現実世界か仮想世界のどちらか一方にしか焦点が合わないという問題も加わり、像面位置固定による違和感はさらに深刻となる。

以上の問題点を解決する手段として、輻輳に応じて像面の光学的距離を変化させる可変焦点型のディスプレイが提案されている⁶。

しかし、像の大きさを変えずに焦点距離を変化させるための光学系が複雑となってしまうこと。画像提示部以外に、視線方向検出装置等が必要となってしまうこと。提示画像は奥行きが既知であるCG等に限られてしまい、実画像の提示が必要なテレグジスタンスへの適用が困難であること。といった問題点を原理的に抱えている。また、広視野かつ可変焦点可能な光学系の設計は極めて困難である。

2.2. 視野角の問題

市販されているHMDの多くは対角で30~50度ほどの視野角のものがほとんどであり、極めて良好に設計されたものでも120度が限界である。

仮想空間における臨場感には視線方向以外の周辺視の情報が重要であることが指摘されており、より広視野角のHMDの開発が望まれている。

現在、広視野角のHMDとしては、光ファイバーを利用した特殊な素子を用いて眼球を覆うような形で全視野を提示することが可能なものが試作されている。しかしこの方法では、コンタクトレンズをあらかじめ装着する必要があり、実用的ではない。

また、輻輳・水晶体調節の一致と、広視野角を同時に実現する方法として、レーザーにより直接網膜に映像を投射する方法も研究されている⁷。しかし、この方法は、可動部があり、構造が複雑になること、走査型のため、フレームレートと解像度がトレードオフの関係にあること、微弱なものとはいえレーザーの網膜への長時間投射の安全性に十分な検討が加えられていないこと等か

ら、一般的な利用を考えると先の技術といえる。

そこで、以下筆者が提案するマクスウエル光学系によるディスプレイの原理、およびその優位性を述べる。

3. マクスウエル光学系を利用したディスプレイの原理

夏の海岸など、明るい場所では視力の低い者でも日常に比べ、遠方まで明瞭に景色を観察することが可能であることは良く知られている。これは明所で瞳孔が小さくなったことにより、目の焦点深度が深くなったためである。

瞳孔の大きさは、通常2~8mmであるが、径が1mm以下のピンホールの人工瞳孔を眼球に装着すればさらに焦点深度が深くなり、水晶体の厚さに関わらず網膜に結像可能な光学系を製作することが可能である。

ピンホールは収差のない理想レンズであると考えられるが、コンタクトレンズを装着するという方法では一般的に利用することが困難となってしまう、また眼鏡状のピンホールでは視野も狭く、眼球の回転に追従不可能である。

そこで、図1に示すようなピンホールの像を瞳孔の位置に作るマクスウエル光学系を用いることによって、水晶体の厚さによらず網膜に結像可能なディスプレイを提案する。この立体ディスプレイにマクスウエル光学系を利用する手法により、輻輳による調節の誘導を阻害することなく、無理のない立体視が可能になると考えられる。

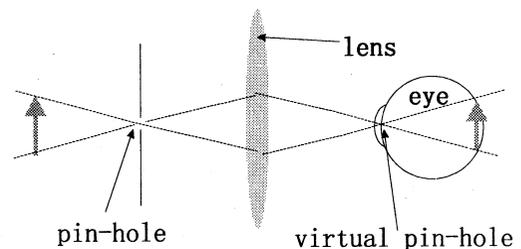


図1: 一般的なマクスウエル光学系

このディスプレイは

- 極めて大きな焦点深度を持つため、無理のない立体視を可能とするだけでなく、
- 屈折異常者のディスプレイ使用時の視度の調節が必要ない

- 老視等水晶体調節異常者、水晶体摘出者でも利用可能
- 任意の大きさの画像提示デバイスを任意の位置に配置可能

といった特長をもつと考えられる。

反面本ディスプレイは、ピンホールを用いるという性質上画像提示部の光量が不足するため、画像提示部には十分明るいものを必要とする。

4. マクスウエル光学系ディスプレイの試作

4.1. 装置の構成

以上マクスウエル光学系を立体ディスプレイ用いることの必要性を述べたが、図1に示したような、レンズを用いた一般的なマクスウエル光学系では広視野化が困難であり、また眼球の回転に伴う瞳孔位置の移動への対応が困難であると予想されるため、本研究では図2に示すように球面鏡とハーフミラーを利用したマクスウエル光学系ディスプレイを試作した。

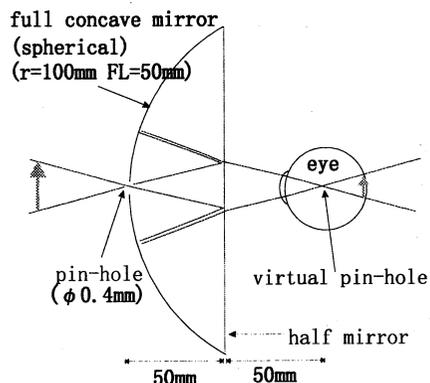


図2:球面鏡を利用したマクスウエル光学系

球面鏡とハーフミラーの組み合わせによるマクスウエル光学系も各種考えることができるが、図2に示すように、球面凹面鏡の表面にピンホールを明け、球面鏡の中心とピンホールとの垂直二等分面にハーフミラーを置き、球面鏡の中心に眼球を置くことにより、極めて簡単な光学系ながら、色収差、球面収差など各種収差の全く存在しない像を得ることが可能となる。

球面鏡のかわりに球面ハーフミラーを用いれば、STHMDとしても、用いることが可能であり、さらに、本光学系は図3のように構成することに

より、動眼視野を極めて広く設計することも可能である。

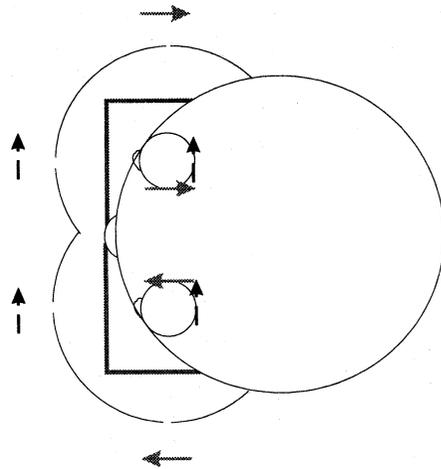


図3:マクスウエル光学系を用いた超広視野角立体ディスプレイ

4.2. 評価方法

本光学系は球面鏡の中心を瞳孔にあわせるか、眼球の中心にあわせるかにより、それぞれ、固視時の視野、動眼視野を広くとることができる。よって、それぞれの場合について視野の評価を行った。また、瞳孔の光量による大きさの変化の影響を統制するため、トロピカミド0.5%点眼薬を点眼し、散瞳状態(ϕ 8mm)でも同様の測定を行った。

なお、視野角の測定は図4の装置を用い、ピンホールに対する光源の視認可能角度とした。

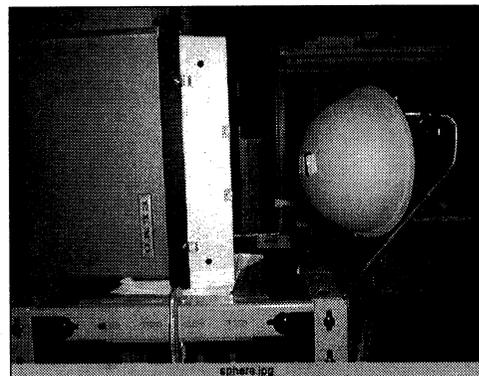


図4:試作した光学系

4.3. 結果と考察

表1に示すとおり、瞳孔を球面鏡の中心にあわ

せ、固視点を注視した場合の視野は自然状態で約90度、散瞳状態で110度となった。

眼球中心を球面鏡の中心にあわせた場合の動眼視野は水平110度、垂直100度であったが、固視点を注視した場合の静的な視野は瞳孔の大きさにもよるが40度ほどであった。散瞳状態では動眼視野には変化はなかったが静的な視野は90度程度となった。

表1 仮想ピンホールの位置瞳孔径による視野

仮想ピンホールの位置	静的な視野 (自然瞳)	動眼視野 (自然瞳)	静的な視野 (散瞳)	動眼視野 (散瞳)
瞳孔中心	90°	-	110°	-
眼球中心	40°	110° W 100° H	90°	110° W 100° H

本方式による映像提示における問題点としては、特に瞳孔径の視野角への劇的な影響があげられる。瞳孔径は光源の明るさによって変化するため、光源の明るさがディスプレイの視野角を左右している。そこで、より視野角の広いディスプレイを設計しようとする場合は、物体形状や、色再現性をぎりぎり保つ光量に押さえ、瞳孔径を大きくさせる工夫が必要となろう。

また、ピンホールからの光が点光源照明となるため、眼球表面や光路上に存在するごみや、睫毛等もはっきりと結像してしまうことも問題としてあげられる。

他にも眼球とHMD位置の関係がシビアであること、固視時の視野角の大きさと、動眼時の視野角の大きさとがトレードオフの関係にあることもあげられる。

なお、ピンホールからの直接光の影響は、波長板を適切に利用することにより低減できると考えられる。ピンホールの径による回折等の影響も含めた結像特性の変化、ピンホールレンズ等を利用した光学系の最適化は今後の課題とする。

5.まとめ

従来の像面焦点固定式の立体ディスプレイで問題となっていた輻輳と調節との不一致を、マクスウエル光学系を応用することにより可動部無しで解消する方法を提案した。また、球面鏡をとーフミラーを用いたマクスウエル光学系を用いることによって、簡易な光学系で広視野化に有利

な画像提示系を試作し、その評価を行った結果最大で110°の視野を得ることができた。

最後に、評価実験を行うに当たり検査薬を処方して頂いた東京医科歯科大学眼科学教室清澤源弘先生に深謝する。

参考文献

- [1] 前田太郎, 荒井裕彦, 館暲: 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5, pp.99-109(1992)
- [2] 渡辺 毅 ほか: 視覚の科学, 写真工業出版社(1975)
- [3] 館 暲: 人工現実感, 日刊工業新聞社(1992)
- [4] Semmlow, J. & Heerema, D.: The synkinetic interaction of convergence accommodation and accommodative convergence, *Vision Research*, Vol. 16, pp. 1237-1242(1979)
- [5] 畑田: 疲れない立体ディスプレイを探る, 日経エレクトロニクス, Vol.444, pp. 205-223(1988)
- [6] S. Shiwa, et. al., A New Binocular Parallax Display Method in which Vergence Changes are Linked to Accommodative Responses, *Asia Display '95 Technical Digest*, pp. 785(1995)
- [7] Kollin, J.: A Retinal Display for Virtual-Environment Applications., *Proceedings of Society for Information Display*(1993) International Symposium, Digest of Technical Papers, Vol. XXIV. pp. 827(1993)