広視域網膜投影型表示システムの一方式

非会員 高橋 秀也*   非会員 江泉 清隆*
非会員 平澤 真樹*   正 員 志水 英二*

An Approach to a Retinal Projection Display with Wide Viewing Zone

Hideya Takahashi*, Non-member, Kiyotaka Eizumi*, Non-member, Masaki Hirasawa*, Non-member, Eiji Shimizu*, Member

It is necessary for Mixed Reality technology to use a see-through Head-Mounted Display (HMD) in which both the real world and virtual world can be seen at the same time. A conventional see-through HMD has a fixed focal point for the virtual images on the spatial light modulator, while the eye dynamically accommodates to the changing fixation point of real objects. Therefore, both real and virtual objects cannot be steadily observed because an observer can only accommodate to one of them. In order to overcome this problem, a Retinal Projection Display has recently been proposed. In a Retinal Projection Display, an image is projected onto a retina directly, so we can view images with long focal depth by using the principle of the Maxwellian View. However, the viewing zone in the Maxwellian View is very narrow because the center of the pupil has to correspond to the converging point of the rays. This paper proposes a new method of a Retinal Projection Display which has a wide viewing zone, and describes an experimental result.

キーワード：マックスウェル視，網膜投影ディスプレイ，ヘッドマウントディスプレイ

Keywords：Maxwellian View, Retinal Projection Display, Head-Mounted Display

1. まえがき

近年，現在のバーチャルリアリティ(Virtual Reality: VR)技術における視覚情報呈示装置では，現実世界と見紛う如きの仮想世界を実現することができない問題を克服するために，現実世界と仮想世界が融合した世界を扱う複合現実感(Mixed Reality: MR)技術が提唱されている⁽¹⁾。中でも，現実世界の情報に仮想世界の情報を付加して人間の現実世界に対する情報処理能力を増強させようとするAR(Augmented Reality)では，実際の産業に応用できる技術の開発が進んでいる。MR技術を実現するためには，現実世界が観察できると同時に仮想映像も観察できる，シースルー型ヘッドマウントディスプレイ(Head-Mounted Display)が必要不可欠の表示デバイスであり，HMDに関する様々な研究が行われている。

現在，MRで用いられている一般的なシースルー型HMDでは，HMD内部の液晶表示システム(LCD)に表示される仮想映像が，内部光学系によって観察者の眼前に虚像拡大される。この仮想映像と現実世界の映像をハーフミラーにより重ね合わせることで，複合映像が得られる。しかし，一

般的に用いられているHMDの呈示画像の光学的距離は数m程度に固定されているため，現実映像と仮想映像の両方に同時に目の焦点を合わせることができないという問題がある。

この問題を解決する方法として，マックスウェル視の原理を用いた網膜投影ディスプレイが開発されている⁽²⁾⁽³⁾。網膜投影ディスプレイは，虚像拡大された像を観察するのではなく，仮想映像をユーザーの網膜上に深い焦点深度で直接投影する方式のディスプレイである。この網膜投影ディスプレイをMR用の表示装置として用いるならば，現実世界のどの位置に焦点を合わせても仮想映像が鮮明に見えることになり，両者を安定して観察することができる。

しかし，このマックスウェル視型の網膜投影ディスプレイでは，原理上，光の収束点が正確に瞳孔上にあるときしか画像が見えないため，得られる視域は狭いという欠点を持つ。現実映像と仮想映像が違和感なく自然に融合した映像提供を目指すならば，観察者が上下左右どの方向に眼を向けても合成映像が見えるようにするべきであり，通常のマックスウェル視型の網膜投影ディスプレイでは不十分である。

本論文は，マックスウェル視型の網膜投影ディスプレイの視域を広げる手法を提案し，提案する手法に基づいた広視域網膜投影ディスプレイを試作し，評価実験によって提案

* 大阪市立大学大学院工学研究科
〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138
Graduate School of Engineering, Osaka City University
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585

手法の有効性を示すものである。

2. マックスウェル視

〈2・1〉 マックスウェル視の原理 マックスウェル視とは、観察対象物体から発せられる平行光線束をレンズ系により収束させ、その収束点に瞳孔を置いて眼球内に物体からの光を入れ、物体を観察するものである。

図1にマックスウェル視の概念図を示す。点光源 S から発せられる光はコリメータレンズ $L1$ で平行光となり、透過物体 M に入射する。 M をレンズ $L2$ の前焦点面に置き、観察者の瞳孔をレンズ $L2$ の後焦点に置くと、物体 M と観察者の網膜は共役の関係となり、観察者は焦点深度が深い物体 M の光刺激を感じることができる。本光学系は、小さな開口絞り（ピンホール）の実像を瞳孔位置に作ると考えることができ、観察者の水晶体の焦点調節によらず網膜上に結像可能なディスプレイを実現することができる⁽¹⁾。また、マックスウェル視で与えられる画角 θ は、平行光線束の径を T 、レンズ $L2$ の焦点距離を f とすると、

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{T}{2f} \right) \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。

従って、焦点距離 f を短くすると大きな画角が得られるので、小型光学系で広視野の HMD を実現するには都合がよい。しかし、瞳孔をレンズの焦点位置に置かなければならず、光学系の調整が困難であることを考慮する必要がある。

〈2・2〉 網膜投影型表示システム 一般的なシースルー型 HMD と上述のマックスウェル視の原理を用いた表示システムの概念図を図2に示す。

一般のシースルー型 HMD では、図2のように現実物体と仮想映像の表示位置が異なり、両方同時には水晶体による焦点調節ができず、両者を安定して観察することができないという問題がある。一方、マックスウェル視の原理を用いた網膜投影型表示システムでは、光を一旦瞳孔上に収束させ、直接網膜に投影しているため、焦点深度が深く、観察者は、現実世界のどの位置に焦点を合わせても仮想映像を鮮明に見ることができる。また、眼の水晶体調節機能を用いていないため、水晶体調節異常者、水晶体摘出者でも映像を見ることができるなどの利点もある。しかし、前述の通り、マックスウェル視で投影される仮想映像の視域は非常に狭い。そのため、網膜投影型表示システムを使用する場合は、観察者毎に瞳孔を置く位置を調整する必要がある。ただし、この方法では、眼球の位置のずれをなくすることができるが、眼球の回転によるずれをなくすることはできない。つまり、マックスウェル視を用いた MR 用の網膜投影型表示システムで現実・仮想の合成映像が得られるのは、観察者がほぼ真正面を見ているときのみであると言える。

〈2・3〉 マックスウェル視の視域⁽⁵⁾ 一般的に、視域とは、視点(眼の位置)の動きうる範囲を表す、と定義されている。そのため、本論文では、マックスウェル視の観察範囲

図1 マックスウェル視の概念図

Fig. 1. Principle of the Maxwellian View.

図2 従来のシースルー型ディスプレイとマックスウェル視を用いた網膜投影ディスプレイの比較

Fig. 2. Comparison between a conventional HMD and a new HMD based on the Maxwellian View.

を視域として考える。マックスウェル視で映像を観察する場合、観察者は図1のレンズ $L2$ の後焦点位置、すなわち平行光線束の収束点に瞳孔中心を置き、しかも光軸を視線方向に一致させなければならない。従って、マックスウェル視を HMD の接眼光学系として実現する場合には、瞳孔を置く位置を観察者毎に調整する必要がある。平行光線束の収束点と瞳孔中心のずれが、光軸方向および光軸に垂直な方向である場合は、HMD 装置に調整機構を付けることで、ずれを吸収することができる。しかし、HMD 装置の工夫によって瞳孔を置く位置の調整を行っても、眼球の移動(回転)に伴う瞳孔位置のずれが生じる。そこで、眼球の回転に伴う瞳孔位置のずれとマックスウェル視の視域の関係について考察する。

図3は、眼球回転時の観察範囲を示している。図1では、模式的に平行光線束の収束点が瞳孔中心になる場合を示しているが、瞳孔中心と収束点のずれはある程度許容される。瞳孔中心と収束点のずれの許容範囲は、観察者の瞳孔径の範囲である。図3に示すように、平行光線束は、収束点が水晶体中心をはずれても屈折されるだけなので、収束点は瞳孔径の範囲に置けばよく、収束点が瞳孔の端部と重なる 때가マックスウェル視の観察範囲の限界であると考えられる。瞳孔径を D 、眼球の半径を R とし、観察可能範囲にお

図3 眼球回転時の観察範囲

Fig. 3. Viewing area for rotation.

ける眼球の限界回転角を ϕ とすると、

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{D}{2R} \right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。 $D=1\sim4\text{mm}$ 、 R を標準的な眼球の直径 24mm の $1/2$ と仮定すると、眼球の限界回転角 $\phi=4.8^\circ \sim 18.4^\circ$ となる。

この結果から、眼球が回転してもマクスウェル視が観察可能な範囲、つまり視域は非常に狭く、眼球の回転に伴ってすぐに映像が視域から外れることがわかる。従って、実用的な HMD を実現させるためには、たとえ眼球が回転しても映像が視域から外れない、広視域化が必須条件となる。

3. 広視域網膜投影型表示システム

〈3・1〉 広視域化の原理

通常のマクスウェル視では、収束点の位置は表示システムの設計時に決定されるある 1 点に固定されている。そのため、得られる視域が狭くなるが、この収束点の位置を可変して見かけ上拡大できるようにシステムを工夫できれば、眼球の回転によって瞳孔の位置が変化した場合でも、収束点と瞳孔が重なった状態を保つことができる。そうすることで、観察者に対し、常に網膜投影方式の画像を与えることができる。つまり、表示システムの視域を広げることができる。しかし、この方法では、常に観察者の瞳孔の位置を把握しておく必要があり、瞳孔位置を追跡するアイトラッキング装置を組み込まなければならない。

そこで、収束点の位置を変化させるのではなく、収束点を複数用意することを考える。空間上に複数の収束点が存在すれば、それらの収束点のうちどれか 1 つが瞳孔と重なれば画像を観察することができるようになる。また、これらの収束点の間隔を瞳孔のサイズを考慮して設計すれば、観察者の眼球の回転に伴って動向がどの方向に向いても、常に瞳孔と収束点が重なるようになり、画像を観察することができるようになる。また、この方式では、光軸に垂直な方向における収束点と瞳孔中心のずれを調整するための HMD に搭載する調整機構を簡略化することも可能となる。図 4 に複数収束点を用いた広視域網膜投影型表示システムの概念図を示す。

〈3・2〉 試作システムの構成 図 5 に、LED 光源を用いたシステムと拡散光源を用いたシステムの概要を示す。試作する表示システムでは、画像の表示に液晶ディスプレイ (LCD) を用いている。また、使用した LCD は、市販の

図4 広視域網膜投影型表示システムの概念図

Fig. 4. Principle of the Retinal Projection Display with wide viewing zone.

(a) optical configuration using multiple point sources

(b) optical configuration using a diffusion source and multiple pinholes

図5 広視域網膜投影型表示システムの基本構成

Fig. 5. Optical configurations of the Retinal Projection Display with wide viewing zone.

HMD (SONY 社製 PC Glasstron PLM-S700, 解像度=SVGA) を分解して取り出したものである。

図 5 (a) の光学系では、それぞれの白色 LED 光源から発せられる光が、レンズ L1 を通り、平行光となって LCD に入射される。LCD を透過した光は、レンズ L2 によってピンホールに集光される。ピンホールは、高次回折光を除去するために用いられている。ピンホールを通った光は、レンズ L3, L4 によって収束点を形成する。この光学系において、LED 光源の個数、間隔、位置を調整することにより、図 5 (a) のように、収束点の個数と収束点間隔および収束点の位置を任意に設定することができる。

図 5 (b) に、拡散光源を用いた広視域網膜投影型表示システムの概要を示す。

図 5 (b) の光学系では、白色拡散光源を LCD に入射し、レンズ L1 の焦点距離の位置にピンホールを配置している。ピンホールは、高次回折光を除去し、レンズ L2, L3 によって収束点を形成するために用いられている。このピンホールの個数、間隔、位置を調整することにより、図 5 (b) のように、収束点の個数と収束点間隔および収束点の位置を任意に設定することができる。

図6 拡散光源を用いた広視野網膜投影型表示システム
Fig. 6. Appearance of optical system.

図7 観察された画像
Fig. 7. Observed image.

また、図5(b)の構成において、ピンホールをLCD等の電子的に操作できるデバイスを用いて構成することにより、ピンホールの数、間隔、位置を容易に変更することができる。つまり、個人差や周囲環境（明るさ）などに依存して変化する瞳孔の位置や大きさに合わせて、電子的に収束点の設定を変更することが可能となる。さらに、アイトラッキングシステムと組み合わせることにより、瞳孔の移動にピンホールの移動を追従させることも可能となる。

図6に、拡散光源を用いた試作システムの外観を示す。また、この試作システムで観察された画像を図7に示す。図のように、鮮明なカラー画像を観察することができた。

今回試作した表示システムでは、図5に示すように仮想映像と同時に現実映像を観察することができないが、光学系にハーフミラー等を組み込めば、現実映像も観察することができる。

4. 広視野化評価実験

試作した広視野網膜投影型表示システムの評価として、収束点が1点の時の視野と収束点が複数の時の視野を測定し、理論値と比較検討する。評価実験には、個々の被験者に合わせて収束点位置を初期設定する必要があるため、図5(b)の拡散光源を用いたシステムを用いた。

網膜投影型表示システムでは、第2章で述べたように、使用前に観察者毎に瞳孔と収束点の位置を合わせることを

図8 視野測定の実験原理
Fig. 8. Schematic of the experimental setup.

前提としている。つまり、仮想映像を観察しているときに瞳孔と収束点の位置がずれるというのは、眼球が回転した時だと考えられる。従って、本表示システムでは、眼球の回転角に対する視野の測定を行った。図8に、視野測定実験の概略図を示す。

以下に実験の手順を説明する。

- (i) 指標を入射画像の中心と重なるようにレンズ前面に置き、被験者に頭部を固定した状態で指標に注目してもらう。
- (ii) 指標を正面の位置から図8のように移動させる。被験者は、指標を目で追っていくことにより、眼球を回転させる。
- (iii) 眼球を回転させることにより、しだいに収束点が瞳孔からけられていき、表示画像を観察する事ができなくなる。このときの瞳孔の位置を視野の限界と考え、被験者に口頭で答えてもらう。

実験は、まず収束点が1点の時の、眼球の回転角 θ_1 を測定し、次に右隣に収束点がもう1点ある時の回転角 θ_2 、右隣に収束点が2点ある時の回転角 θ_3 を測定した。各収束点の間隔は、2 mm とした。実験は、11 人対して各5回ずつ行った。

図9は、被験者達のそれぞれの平均値をプロットしている。誤差棒は、t 推定から信頼度 95% の区間を推定したときの値を用いている。

図9に示すように、被験者の間で θ_1 、 θ_2 、 θ_3 の値にずれが生じているが、これは、瞳孔の大きさが個人によって異なるために起きていると考えられる。しかし、相対的な回転角、つまり、回転角の広がりには無関係であると考えられる。従って、 $\theta_2 - \theta_1$ 、 $\theta_3 - \theta_1$ の値について検討を行う。

(a) test subject A, B, C, D, E, and F

(b) test subject G, H, I, J, and K

図9 視域測定結果

Fig. 9. Critical angle of rotation.

データ解析法として、各被験者の収束点数の増加に伴う回転角の広がり（平均値）をデータ群とし、 t 推定を行う。

これより、信頼度 95% では、収束点数が 1 点から 2 点に増えることに伴う回転角の広がり（平均値） $\theta_2 - \theta_1$ は、8.70 ～ 10.22 の間にあることが分かり、収束点数が 1 点から 3 点に増えることに伴う回転角の広がり（平均値） $\theta_3 - \theta_1$ は、16.79 ～ 19.07 の間にあることが分かる。従って、この範囲から外れるデータを省き、平均値を求めると

$$\theta_2 - \theta_1 = 9.39^\circ \quad (3)$$

$$\theta_3 - \theta_1 = 18.04^\circ \quad (4)$$

となる。

一方、各収束点の間隔を 2 mm、標準的な眼球の半径を 12 mm とすると、理論値はそれぞれ、

$$\theta_2 - \theta_1 = 9.46^\circ \quad (5)$$

$$\theta_3 - \theta_1 = 18.43^\circ \quad (6)$$

となる。

理論値と実験で得られた値では、若干の誤差が出ている。これは、理論値を求める際に標準的な眼球の半径を使用した、実際には個人差があるためであると思われる。このことを考慮すると、提案した手法を用いることにより、マクスウェル視の視域がほぼ理論どおりに拡大できることが確認できた。

また、瞳孔が 1 つの収束点から次の収束点へ移動するとき、瞳孔の大きさと収束点の間隔との関係によっては、同時に 2 つの収束点が瞳孔上に位置したり、瞳孔上に収束点が存在しないということが起こりうる。同時に 2 つの収束点が瞳孔上に位置する場合、厳密には二重像を観察することになるが、瞳孔から 80 cm 以上離れたところに焦点調節を合わせた場合、二重像は観察されなかった。従って、MR 用の表示装置としての応用を考えた場合、問題ないと考えられる。また、瞳孔上に収束点が存在しない場合は画像を観察できないが、眼球は絶えず微動しており（固視微動）、瞳孔上に収束点が存在しない時間は短く、観察される画像は、わずかに暗く感じられる程度で実用上問題ないと考えられる。しかし、これらの状況はできるだけ起こらないように設計すべきであり、評価実験を行った条件では、各収束点の間隔は 2 mm が最適であった。

5. むすび

本論文では、複数の LED 光源や拡散光源とピンホールの組み合わせによってマクスウェル視の視域を拡大する手法を提案した。また、提案した手法を用いた表示システムを試作し、マクスウェル視の視域が、ほぼ理論どおりに拡大できることを確認した。今回試作した表示システムでは、仮想映像と同時に現実映像を観察することができないが、ハーフミラー等を光学系に組み込むことにより、仮想映像と現実映像の同時観察も可能となるシースルー型の表示システムとすることができる。

（平成 15 年 2 月 24 日受付、平成 15 年 6 月 20 日再受付）

文 献

- (1) H. Tamura and Y. Ohta : "Mixed Reality", Ohmsha (1999)
- (2) G. Westheimer : "The Maxwellian View", *Vision Res.*, Vol.6, pp.669-682 (1966)
- (3) M. Inami, N. Kawakami, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi : "A Stereoscopic Display with Large Field of View Using Maxwellian Optics", *TVRSJ*, Vol.4, No.1 pp.287-294 (1999-1)
稲見昌彦・川上直樹・柳田康幸・前田太郎・館 暲 : 「マクスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ」, 日本 VR 学会論誌, 4, 1, pp.287-294 (1999-1)
- (4) T. Ando, K. Yamasaki, M. Okamoto, and E. Shimizu : "Retinal Projection Display Using Holographic Optical Element", *SPIE Proc.*, Vol.3956, pp.211-216 (2000)
- (5) T. Ando and E. Shimizu : "A Head-Mounted Display Using a Holographic Optical Element", B. Javidi and F. Okano, Editors, *Three Dimensional Television, Video and Display Technology*, pp.67-100, Springer Verlag (2002)

高 橋 秀 也

(非会員) 1987 年 3 月大阪市立大学大学院工学研究科後期博士課程単位取得退学。同年, 大阪市立大学工学部助手。現在, 同大学大学院工学研究科助教授。3 次元表示, 光情報処理, ウェアラブルコンピュータ, 網膜投影型ディスプレイの研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, OSA, SPIE 各会員。

平 澤 真 樹

(非会員) 現在, 大阪市立大学工学部在籍。網膜投影型ディスプレイの研究に従事。

江 泉 清 隆

(非会員) 2001 年 3 月大阪市立大学工学部卒業。同年, 大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程に入学, 現在に至る。網膜投影型ディスプレイ, 3 次元ディスプレイの研究に従事。電子情報通信学会会員。

志 水 英 二

(正員) 1963 年 3 月大阪大学工学部卒業。同年, 大阪市立大学工学部助手。1983 年, 同教授。電子回路, オプトロニクス, 3 次元ディスプレイ, ウェアラブルコンピュータ, 網膜投影型ディスプレイの研究に従事。工学博士。映像情報メディア学会フェロー。電子情報通信学会, IEEE, SPIE 各会員。