

基礎論文

マクスウェ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 柳田 康幸 前田 太郎 舘 暲

A Stereoscopic Display with Large Field of View Using Maxwellian Optics

Masahiko INAMI, Naoki KAWAKAMI,
Yasuyuki YANAGIDA, Taro MAEDA and Susumu TACHI

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. And this display allows an operator to observe real and virtual images in focus for wide range of depth.

Key Words: Maxwellian optics, stereoscopic display, depth of focus, augmented reality, virtual reality

1. 緒言

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][2]

HMDの最大の特徴として、頭部運動に応じて映像を提示するため、OMNIMAXやCAVE/CABINのように大規模なシステムを利用することなく全方位角の映像を提示可能ことがあげられる。しかし、視野の狭さ、眼球の輻輳と水晶体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。[3]

さらに近年、現実空間にCG等による映像を重畳

することにより現実空間での行動の支援を行うことを目指したオーグメンテッド・リアリティ(AR)という手法が提案され、実装に当たってはシースルー型のヘッド・マウンテッド・ディスプレイ(HMD)が多用されている。

シースルー型のHMDは現実空間とCGとを合成するために、ハーフミラーによる光学的な合成や、頭部搭載カメラによる電子的な合成が試みられているが、現実物体とCGとの焦点位置のずれの問題、狭い視野に起因する問題等が指摘されている。

そこで、まず現在のHMDの問題点を明確化したのちに、問題点を有効に解決可能な手法として焦点深度に着目した視覚提示装置構成法を述べ、最後にその試作結果について述べる。

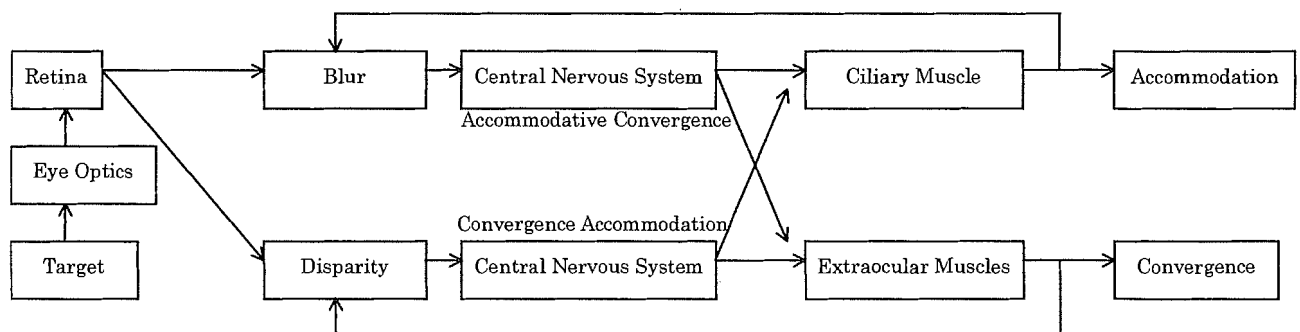


図 1 輻輳と調節の関係

Fig. 1 Relationship between convergence and accommodation

2. 現在の頭部搭載型ディスプレイ

現在用いられている HMD の問題点として視野の広さの問題、頭部運動に対する画像遅れの問題等が指摘されている[4]が本論文においては特に画像提示光学系の調節位置が固定されていることに起因する問題に着目し、以下検討を行う。

2.1 輻輳と調節の不一致

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、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。しかしながら、現在一般的に用いられている HMD では、提示画像の像位置が 1~2[m]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。[5]

図 1に示すように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。[6]

また、調節を一定に保ったままでも輻輳を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 1~2[m]の距離に調節を固定した場合、20[cm]~無限遠の範囲に輻輳を変化可能とされている。[7]

ところが人間は概ね 15~50[cm]の範囲で手作業を行うため、1~2[m]の距離に調節を固定したままの従来の HMD の構成を用いて手作業を行おうとした場合、近距離部分に於いて提示映像の両眼での融像が困難な状況となる。

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低下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。

頭部の目と共役な位置に搭載したカメラの映像を CG 映像と電子的に合成した上で提示するビデオシースルーによる合成手法は、現実世界と CG との像面の位置を一致させることが可能であるばかりか、実装によってはオクルージョンや頭部運動による CG の時間のずれまで補正も可能であり理想的な

AR 用のデバイスの一つと期待され、各所で研究が行われている。[8]

しかし、本手法は立体視時の輻輳と調節の不一致や視野の狭さなどの従来の HMD の問題点をもそのまま引き継いでいる。

2.2 光学式シースルー型 HMD での問題

光学式シースルー型 HMD(STHMD)は簡便に現実空間の映像とバーチャル空間の映像を重畳することが可能なため、古くから AR へ応用されている。[9]

本手法は視点の移動に伴い現実世界の物体の調節位置が変化するにも関わらず、像面の調節位置は固定されている。よって現実物体にバーチャル物体を重ねて表示しようとした場合、輻輳による提示距離が一致しているにもかかわらず、現実世界かバーチャル世界のどちらか一方にしか水晶体の焦点が合わないという問題が起こり、像面位置固定による違和感はさらに深刻となる。

2.3 輻輳と調節の不一致解消手法の現状

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。[10]

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ること
- 画像提示部以外に、視線方向検出装置等が必要となること
- 提示画像は奥行きが既知である CG 等に限られ、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。

また、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。[11]

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将来の技術といえる。

3. 焦点深度に着目した視覚提示

3.1 原理

ピンホールカメラは近景から遠景までピントの

あったいわゆるパンフォーカスを実現することが可能であり、生物でもオウム貝やヒドラ、エイの一種などはピンホールカメラ型の眼を持っている。

レンズ眼である人間でも夏の海岸など、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収縮したことにより、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 2~8[mm]であるが、本研究では光学系に絞りを設け、焦点深度を大きくとることにより水晶体の調節量によらず網膜に結像可能な視覚提示装置光学系を構築し、上記問題点の解決を行うことを提案する。

輻輳の変化により調節が誘導されたとしても焦点深度の範囲では自然に水晶体の調節量を変化させることが可能である。よって、焦点深度を大きくすることにより、自然な輻輳と水晶体調節の不一致による違和感を低減することが期待できる。

また、光学式シースルーディスプレイにおいても、現実世界の物体に対して焦点を固定させたまま同時にバーチャル物体を観察可能となると考えられる。

絞り径を小さくすればするほど焦点深度は深くなる。しかし、例えば瞳孔径 2.4[mm]以下では視力が低下するといった知見が得られている。[12]

これは回折や網膜照度の低下の影響に起因すると考えられている。よって、焦点深度に着目した視覚提示光学系を設計するに当たっては

- 焦点深度
- 回折現象
- 網膜照度

の3つの項目のバランスを十分考慮する必要がある。そこで以下それぞれの要素ごとに検討を行う。

3.2 焦点深度

光学系の像側焦点深度の値は射出瞳の径と焦点外れのためにつくられる錯乱円の許容量により幾何光学的に決定される。

ここで、簡単のために絞りの位置とレンズの位置が一致していると仮定し、焦点深度をレンズの屈折力の変化量を ΔD [D : diopter]、錯乱円許容量を画角で表した値を角解像度 Θ [rad]、絞りの直径を Φ [m] とおくと、

$$\Delta D = \frac{2 \tan \Theta}{\Phi} \approx \frac{2\Theta}{\Phi}$$

という関係になり、絞り径が小さいほどレンズ屈折力を変化可能な範囲が大きくなる。例えば瞳孔径

4.0[mm]、角解像度を視力 1.0 に相当する 2.9×10^{-4} [rad]とおくと焦点深度は 0.15[D]となり、この値は調節微動として通常観測される 0.1[D][13]に近い値となっている。

3.3 回折現象

光が障害物によって遮られたとき、幾何的には陰になるはずの部分にも光が回り込む。この現象は回折として知られている。

開口部が波長と同程度に細かい構造を持つ場合は回折前後の偏光の状態まで考慮に入れて検討する必要がある。しかし本研究の場合は波長に比べて十分開口部の構造が大きいと考え、以下キルヒホッフの簡略化された境界条件であるスカラー理論に基づいて回折の影響を検討して行く。

半径 a の円形開口を持つ平面スクリーンに、無限遠においた点光源から波長 λ の単色光が入射したとき、 $0 < z < a^2/\lambda$ の範囲では開口系の幾何的な陰の部分には回折光がほとんど回り込まず、分解能は開口部の幾何的形狀に規定されることになる。この領域は Fresnel 回折領域として知られている。ところが $a^2/\lambda < z$ の Fraunhofer 回折領域になると幾何的な陰の部分に円錐状に回折光が回り込むことになる。ちなみに直径 2[mm]のピンホールの場合、500[nm]の光の Fraunhofer 回折領域は 2[m]以上となる。

しかし、凸レンズは無遠方に向かう光をその焦点面に結像する作用があるため、開口による回折波を凸レンズに入射させればその焦点面上に Fraunhofer 回折像が観察されることになる。つまり、無収差の光学系の解像度限界は入射瞳の Fraunhofer 回折により規定されるといえる。

本研究は肉眼への画像提示を目的としている以上提示画像は最終的には眼球光学系により網膜に結像されることになる。よって以下無収差結像光学系との仮定の下 Fraunhofer 回折に主眼をおいて回折についての検討を進めて行く。

ここで、直径 Φ の円形の入射瞳を持つ、焦点距離 f の光学系に波長 λ インコヒーレント光の点像が入射した場合、焦点面での光軸からの距離 r と回折像の強度分布 I との関係は

$$I(r) \propto \frac{1}{\lambda f} \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi\Phi r}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi\Phi r}{\lambda f}} \right]^2$$

のようにあらわされる。ただし J_1 は第 1 種 1 次の Bessel 関数である。

このとき観測される光輪は Airy 環と呼ばれこの第 1 暗環までの距離により規定される分解能を Rayleigh の分解能限界といい、[14]

$$r = \frac{1.22\lambda f}{\Phi}$$

となり、先に用いた角解像度 $\Theta \approx r/f$ を代入して

$$\Theta \approx \frac{1.22\lambda}{\Phi}$$

となり、絞りの径が小さくなるほど角解像度が落ちることが示される。

例えば角解像度を視力 1.0 に相当する 2.9×10^{-4} [rad]を得るためには絞りの大きさは最低 2.3[mm]と計算され、この値も先に述べた瞳孔径 2.4[mm]以下では視力が低下するといった生理学的な知見に一致する。[15]

よって、本稿においてはこの Rayleigh の分解能限界を用いる。

3.4 網膜照度

網膜上の照度の厳密な値は眼球内の透過率や眼光学系の焦点距離など、眼球の光学的特性が厳密に定められないと計算することができない。そこで相対値としての網膜照度が下式 I [Td : Troland]のように定義されている。[16]

$$I = R \times \left(\frac{\Phi \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \pi \times L$$

Φ [m]は瞳孔の直径、 L [cd/m²]は観察物体面の輝度、 R は Stiles-Crawford 効果という瞳孔中心部を通過する光に比べ周辺部を通過する光の感度が低減していく現象を踏まえた補正項であり

$$R = 1 - 1.06 \times 10^4 \Phi^2 + 4.16 \times 10^7 \Phi^4$$

と記述される。

HMD や望遠鏡のような接眼光学系において、光学系の射出瞳より瞳孔径が小さい場合には、網膜照度は瞳孔径により規定され、大きい場合は光学系の入射瞳の径により規定されることになる。

網膜上の照度の低下にともない視力は低下し、網膜照度が 10[Td]のとき、ランドルト環視力で 1.0 だったものが、1[Td]では 0.25 程度にまで落ちることが報告されている。[15]

よって、視覚提示系に要求される解像度のスペックルに応じて必要な網膜照度を満たすように画像生成部及び光学系を設計する必要がある。

3.5 定数の決定

以上のことから、

- 焦点深度を大きくとるためには絞り径をでき

るだけ小さくする

必要があるが、一方

- 絞り径を小さくするほど回折の影響が大きくなる

といったトレードオフが明らかになった。さらに、

- 絞り径が小さくなったことに伴う網膜照度の低下により視力が低下する可能性がある

ため、提示に必要な解像度を満たすよう画像生成部の光量に十分注意を払う必要がある。といったことが明らかになった。

よってシステムに要求される角解像度を定めることにより、焦点深度を最大にするための絞りの径を定めることが可能となる。

以下、国際照明委員会制定の標準明所視比視感度関数によるピーク波長 555[nm]を基準波長として式を整理する。

視覚提示装置に要求される角解像度を Θ [rad] とすると、絞りの最小の直径 Φ [m] は

$$\Phi = \frac{6.77 \times 10^{-7}}{\Theta}$$

のように求めることができる。このときの焦点深度、つまり必要解像度を満たしたままでの水晶体屈折力の変化可能な量 ΔD [D]は、

$$\Delta D = \frac{\Theta^2}{3.39 \times 10^{-7}}$$

のようにあらわされる。

例えば視力 0.3 に相当する網膜解像度 9.7×10^{-4} [rad]を得るためには直径 0.70[mm]以上の絞りにする必要であり、この絞りによって得られる焦点深度は 2.8[D]となる。また、視力 0.3 を得るためには網膜照度として最低 0.5[Td]必要であり、0.70[mm]の絞りを設けた場合 1.4 [cd/m²]以上のディスプレイ輝度が必要となる。表 1の物体輝度表を参考にすると通常の液晶ディスプレイは 2×10^2 [cd/m²]あり、十分な輝度をとれることが確認できる

この光学系で得られる焦点深度 2.8[D]とは、物体を 71[cm]の光学的距離に配置した場合、36~∞[cm]の範囲に水晶体の調節量を変化可能なことを意味している。なお、同じ視力換算 0.3 の条件で 4[mm]の瞳孔の場合、0.49[D]の焦点深度となり 61~86[cm]の範囲でしか調節量を変化できない。

つまり、この範囲を超えた輻輳量の映像を提示すると輻輳量と調節量の不一致が起きることになる。

表 2に各要求解像度による絞りの最小直径、焦点深度、最低網膜照度、最低ディスプレイ輝度をまとめる。なお、プラズマディスプレイ、液晶ディスプ

レイの輝度は市販品の実測値であり、バックライト輝度や開口率の向上によりさらに明るくする事も可能である。

表 1 物体輝度表
Table. 1 Luminance of typical objects

物体	輝度[cd/m ²]
太陽	1.7×10 ⁹
キセノンアーク	1×10 ⁹
青空	4.5×10 ³
日なたの物体	2.4×10 ³
日陰の物体	6×10 ²
明るい室内	2.5×10 ²
プラズマディスプレイ	5×10 ²
液晶ディスプレイ	2×10 ²

表 2 各要求解像度による緒元
Table. 2 Optics parameters

解像度 [視力 換算]	絞りの 最小径 [mm]	焦点深 度 [D]	最低網 膜照度 [Td]	物体最 低輝度 [cd/m ²]
1.0	2.3	0.25	10	2.4
0.3	0.70	2.8	0.5	1.4
0.2	0.47	6.2	0.2	1.2

その他本ディスプレイを設計するに当たっては条件に応じて

- 眼球、レンズ間距離の影響
- 瞳孔によるケラレの問題
- 入射瞳径と射出瞳径の差を考慮する必要がある。

4. 装置構成法

4.1 マクスウェル光学系

以上、開口絞りの小さな光学系を利用することにより大きな焦点深度の映像を提示できることを示した。

開口絞りの最も容易な実装法としてはピンホールを設けたコンタクトレンズを眼球に装着することやピロカルピン等の縮瞳剤を点眼する方法などが考えられるがどちらも肉体に対して侵襲的な方法であり一般的な利用は極めて困難となる。

眼前にピンホールを配置する方法もあるが、視野も狭く、視線移動に伴う眼球の回転に追従不可能である。[17]

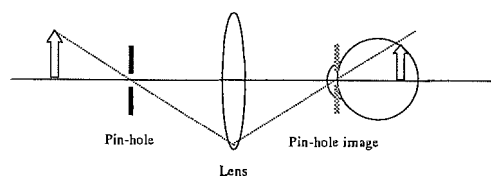


図 2 一般的なマクスウェル光学系
Fig. 2 Standard Maxwellian optics

そこで、図 2 に示すような絞りの実像を瞳孔の位置に作るマクスウェ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。マクスウェル光学系は例えばレーザー干渉縞を網膜に直接投影し、網膜解像力を測定する時などに用いられている。本研究では立体ディスプレイにマクスウェル光学系を利用することにより、輻輳による調節の誘導を阻害することなく、無理のない立体視を可能とすることを旨とする。

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
- 屈折異常者がディスプレイを使用するときの視度調節がほとんどいらない
- 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、前項での検討のごとく画像提示部の輝度に十分注意を払う必要がある。

4.2 装置の構成

以上マクスウェ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 2 に示したような、レンズを用いた一般的なマクスウェ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。そこで、本研究では図 3 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ェル光学系ディスプレイを試作した。

球面鏡の中心に眼球をおくことにより、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。

ここで、絞りの位置は、球面鏡の焦点の 2 倍の距離にあるため、この位置に球面鏡と同じ屈折力の凸

レンズを設けるとちょうどリレーレンズを構成することとなる。球面鏡は凸レンズとしての作用も持っているため、この絞りの位置に凸レンズを設けることにより球面鏡の凸レンズとしての作用を補正することになり、光学系結像特性が向上する。このとき、絞りの位置は瞳孔の位置と光学的に共役になるため、補正レンズにさらに屈折力を追加することにより、ディスプレイの光学的位置を変化させることができる。

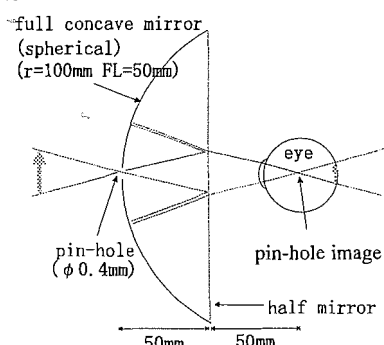


図 3 球面鏡を利用したマクスウェル光学系
Fig. 3 Maxwellian optics with full concave mirror

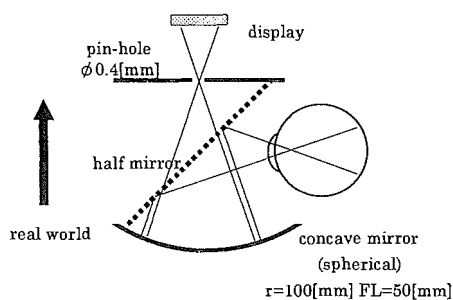


図 4 マクスウェル光学系を用いたシースルー型ディスプレイ
Fig. 4 See-through display using Maxwellian optics

例えば図 3 に示す光学系の場合、球面鏡の屈折力は 20[D]となるため、ピンホールの位置に 20[D]のレンズを配置することにより、裸眼と透過な状態になる。よって、ピンホールから 10[cm]の距離にある映像を 1[m]の光学距離に移動するためには 29[D]のレンズで補正することになる。

また、図 4 のように構成することにより、操作者は眼前のハーフミラーを通し、広い視野で現実世界を観察するとともに、ハーフミラーと球面鏡によってできたピンホール像を通し、深い焦点深度でディ

スプレイ像を観察することになる。つまり、本光学系を用いることにより、CG の映像は水晶体の調節量に依存ことなく網膜上に結像し続けるため、操作者がどの距離の現実物体を観察しようと CG の映像を同時に観察することが可能になる。

なお、実際のシースルー型 HMD の用途を考えた場合、現実空間の広視野映像が操作者の空間認知の重要な手がかりとして必要なことに比べ、重畳させるべき映像は作業領域にのみ必要であり、CG による映像は比較的狭い視野でも充分利用に耐えうると考えられる。

また、図 3、図 4 の例ではピンホールの像を作るのにハーフミラーと球面鏡を用いたが、本研究の要点は、いかにして大きな焦点深度を目に与えるか、という設計指針の提示であり、他にも様々な構成を考えることができる。よって、従来型のシースルー型の HMD でも適切な位置に絞りを設けることで、簡便に同様の効果を得ることが可能になると考えられる。

なお、本報告では、現実世界と CG 映像とのオクルージョンの問題、現実世界と CG 映像との輝度の違いの問題は特に考慮されておらず、今後の課題とする。

4.3 評価方法

本実験においては注視点を正面に設けた状態でのターゲット視認範囲の限界を静的な視野、ターゲットを注視し追従していった場合のターゲット視認範囲の限界を動眼視野と定義する。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、静的な視野、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(φ8[mm])でも同様の測定を行った。

なお、視野角の測定は図 3 の光学系を図 5 のように構成した装置を用い、ピンホールに対するターゲットの単眼での視認可能角度とした。図 5 のターゲット呈示装置は OHP の光源部分を用い、アルミ箔に 2mm 程度の小孔を空け、小孔位置を移動させることにより実現した。なお視野角の測定実験は、暗室内により行われた。

結像特性実験は図 4 の光学系を用い、25, 50, 100, 200[cm]の実指標と同時にシースルー型マクスウェル光学系により重畳提示されたプロジェクタ用液晶による CG ターゲットを単眼で同時観察すること

により行った。

双方の実験とも裸眼視力 0.1 の被験者 1 名がコンタクトレンズにより視力を 1.0 に矯正した状態で測定を行っている。

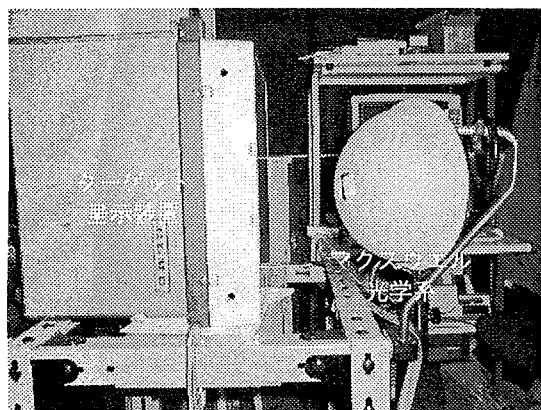


図 5 試作した光学系
Fig. 5 Implementation of Maxwellian optics with full concave mirror

4.4 結果と考察

まず、結像特性については肉眼で 200[lx]程度の屋内光の下で提示される映像は、現実空間でピントをあわせる位置によらず 25[cm]から 200[cm]の範囲で常にピントが合いつづけて観察することができた。図 6 で示されるとおり、カメラにおいても同様の範囲で提示映像（中心部の「H」）を観察することができた。

また、視野に関しては、表 3 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[deg]、散瞳状態で 110[deg]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[deg]、垂直 100[deg]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[deg]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[deg]程度となった。

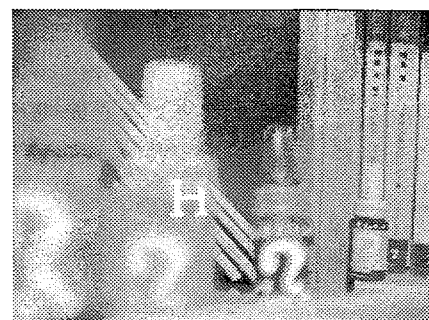
つまり視野の広さが瞳孔径に依存して変化していることが判明した。以上のことから本光学系の自然瞳時の映像は瞳孔により蹴られ、制限されていることがわかる。そして、この傾向はピンホール像の位置が眼球中心の時に顕著となる。

なお、被験者は 1 名であるが、被験者の通常時の静的な視野は単眼で水平 150[deg]、垂直 125[deg]

以上、動眼視野は単眼で水平 160[deg]、垂直 140[deg]以上あり、被験者の視野は本実験の視野を十分カバーしている。



focus point = 25[cm]



focus point = 200[cm]

図 6 マクスウエル光学系を用いたシースルー型ディスプレイによる映像

Fig. 6 Result image of see-through display using Maxwellian optics

表 3 ピンホール像の位置と瞳孔径による視野
Table. 3 Relationship the diameter of iris and field of view against the position of pin-hole image

ピンホール像の位置	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[deg]	-	110[deg]	-
眼球中心	40[deg]	110[deg] W 100[deg] H	90[deg]	110[deg] W 100[deg] 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る。

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する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。

5. まとめ

従来の像面焦点固定式の HMD で問題となっていた輻輳と調節との不一致を、焦点深度に着目して視覚提示を行うことにより可動部無しで解決可能であることを提案するとともに、焦点深度、回折現象、網膜照度を考慮に入れた設計指針を示した。

次に以上の設計指針に基づきマクスウエル光学系を応用することにより、接眼絞りを設けることなく実装可能であることを示した。さらに球面鏡をとハ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[deg]の視野を得ることができた。

また、試作した光学系により、裸眼状態に比べ極めて深い焦点深度をもって提示映像を観察することができた。

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] 舘 暉, 広瀬通孝 ほか, バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, (1992)
- [2] 前田太郎, 荒井裕彦, 舘 暉, 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)
- [3] 畑田豊彦, 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)
- [4] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE, *Proc. of Computer Graphics*, vol. 27, pp. 135-142, (1993)

- [5] 舘 暉, 人工現実感, 日刊工業新聞社(1992)
- [6] Semmlow, J. and Heerema, D., The synkinetic interaction of convergence accommodation and accommodative convergence, *Vision Research*, Vol. 16, pp. 1237-1242(1979)
- [7] 渡部 叡 ほか, 視覚の科学, 写真工業出版社(1975)
- [8] Ronald T. Azuma. A Survey of Augmented Reality, *Presence*, vol. 6, No. 4, pp. 355-385, (1997)
- [9] 廣瀬通孝, 木島竜吾, 佐藤洋一, 石井威望, シースルー型 HMD を用いた仮想空間による実空間の修飾の研究, 第 6 回ヒューマン・インタフェースシンポジウム論文集, pp.1-8, (1990)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 西田 勇, 眼の調節と瞳孔運動, 生理学大系, Vol6, 医学書院, pp. 483-507 (1967)
- [13] 鈴村 明弘, 調節微動の研究, 日本眼学会誌, 79, pp. 1257-1272, (1975)
- [14] 兵藤 申一 監, 鶴田 匡夫 著, 応用光学 I, 応用物理工学選書, vol. 1, 培風館 (1990)
- [15] 西信 元嗣 編, 眼光学の基礎, 金原出版, (1990)
- [16] 池田 光男, マックスウエル視のときの網膜照度の計算と測定, *VISION*, vol. 1, No. 1, pp. 58-61, (1989)
- [17] 久米 祐一郎, 河鍋 楠美, 村中 義夫, ピンホールを用いた眼鏡の開発, 日本眼科学会誌, vol. 6, No. 1, pp. 129 - 133, (1985)

(1999 年 1 月 29 日受付)