

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12078

研究課題名(和文) 計算機ホログラムを用いたマクスウェル視の実現

研究課題名(英文) Maxwellian-view display using computer-generated holograms

研究代表者

高木 康博 (Takaki, Yasuhiro)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50236189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：マクスウェル視では、水晶体で集光する光を用いて画像提示することで、水晶体の屈折状態によらずに網膜像を形成できるため、弱視者へ画像提示する有効な手段である。本研究では、計算機ホログラムを用いてマクスウェル視ディスプレイを実現した。ホログラムによる波面変調を用いて、機械的な可動部なしに、眼球運動に追従して集光点を電子的に移動することを可能にした。また、水晶体の複雑な歪みに起因する乱視、特に、眼鏡やコンタクトレンズでは補正できない不正乱視に対する画像提示を可能にした。さらに、光学系の小型化方法を提案し、実際に表示システムを試作することで、将来的にHMDとして実現できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The Maxwellian-view is a powerful technique to provide images to persons with low-vision, because images are displayed using light converging at a crystalline lens of an eye so that retinal images are formed not depending on light refraction function of the crystalline lens. In the present study, the Maxwellian-view display was realized using the computer-generated holograms. By use of the wavefront modulation by holograms, the light converging point could be moved electrically according to the movement of eyes without using the mechanical parts. The astigmatism, which is caused by complicated distortion of the crystalline lens, could be corrected using the wavefront modulation. Especially, the irregular astigmatism could be corrected, which cannot be corrected using glasses and contact lenses. Moreover, the compact system configuration was proposed and the display system was demonstrated, which shows the possibility of the HMD implementation for the proposed technique.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ヒューマンインターフェイス ホログラフィー マクスウェル視 弱視

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の高齢化社会の進展により、弱視者の数は年々増加している。目のレンズである水晶体の異常により網膜上に正しく像を結べないことが、低視力の一因である。マクスウェル視では、図1に示すように、水晶体中心に集光する光線を用いて画像を表示する。レンズ中心を通った光線は直進するため、水晶体が正しくピント合わせできなくても、網膜上に像を形成できる。そのため、マクスウェル視を用いると、メガネによる視力矯正が難しい屈折矯正困難者や水晶体摘出者に対しても画像提示が可能になる。

(2) 国内外で、マクスウェル視を用いたヘッドマウントディスプレイ(HMD)型の視覚補助器具が研究開発されている。しかし、マクスウェル視では、レンズを用いて光線を水晶体中心に集光するため、目の回転・移動に対応できない。集光点の移動には機械的な機構が必要になり、装置の複雑化や大型化を招く。一方で、米国のMITより、インテグラルイメージングを原理とする光線再生型の立体ディスプレイを視覚補償に用いる提案があり、注目を集めている(ACM TRANS GRAPH 31, 87(2012))。

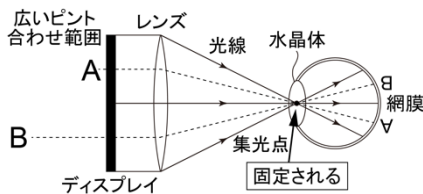


図1 従来のマクスウェル視

2. 研究の目的

本研究では、図2に示すように、波面再生型の立体表示技術である計算機プログラムを用いてマクスウェル視を実現する。波面は光の波の振幅と位相の情報を持ち、計算機プログラムは、3次元物体から発せられる波面を計算で求めて空間光変調器(SLM)に表示することで、立体像を表示する。計算機プログラムで、水晶体中心へ集光する波面を用いて画像表示できれば、マクスウェル視と同等な効果が得られることが期待できる。図2に示すように、計算機プログラムで波面の傾きや曲率を変えることで集光位置を電子的に移動でき、眼球運動に追従できる。

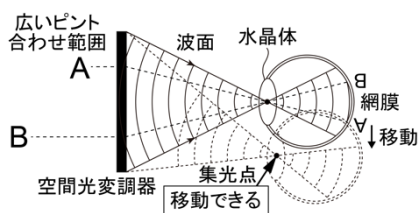


図2 計算機プログラムを用いたマクスウェル視

3. 研究の方法

(1) 計算機プログラムによるマクスウェル視の実用性の検証

最初に、本研究を通して利用する実験装置を作製する。つぎに、マクスウェル視を実現する新しいプログラム計算法について研究する。これを用いて集光点の位置を電子的に移動できることを確かめる。さらに、目の被写界深度と分解能について理論と実験の両面から検討する。

(2) 計算機プログラムによるマクスウェル視の機能性に関する研究

水晶体の異方的な歪みに起因する乱視などの複雑な屈折異常状態への対応について検証する。特に、眼鏡やコンタクトレンズでは矯正が不可能な不正乱視への対応を試みる。

(3) 光学系の小型化の研究

将来的にHMDとして実現することを考えて、光学系の小型化について検討する。

4. 研究成果

(1) 計算機プログラムを用いたマクスウェル視の実現

① 従来のマクスウェル視光学系を図3に示す。光線をレンズで集光して瞳孔に入射させるが、無限小の点に集光することはできないから、実際には画像の提示範囲は目の被写界深度(DOF)内となる。通常は目の被写界深度は瞳孔径で決まるが、マクスウェル視では瞳孔での光の広がりを実質的な瞳孔径となり、被写界深度が拡大する。すなわち、レンズにより結像されたディスプレイの虚像の前後に拡大された被写界深度が生じる。そのため、屈折異常の人がもともとピント合わせできる距離範囲を超えた画像提示が可能になる。従来のマクスウェル視光学系では、被写界深度の範囲を変更するためには、ディスプレイとレンズの距離を変える必要がある。

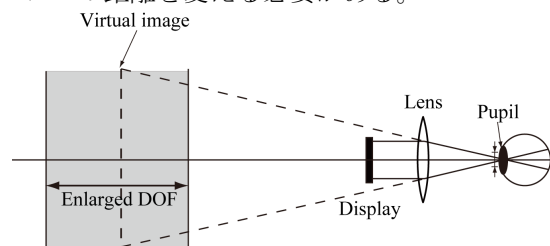


図3 従来のマクスウェル視光学系

② 本研究では、プログラム表示を用いたマクスウェル視を提案する。提案するマクスウェル視光学系を、図4に示す。SLMにプログラムを表示し、光の波面を変調する。プログラム計算時のパラメータを変えることで、画像の表示位置、光の収束位置とビーム径を制御できる。なお、レンズは収束する波面を光に与えるために用いるが、SLMのピクセルピッチが小さく十分な収束波面を発生できる場合にはレンズは必要ない。レンズを用いた場合でも、SLMによる波面変調により、光の収束位置とビーム径を制御できる。

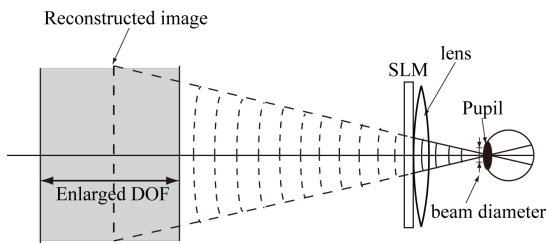


図4 ホログラムを用いたマクスウェル視光学系

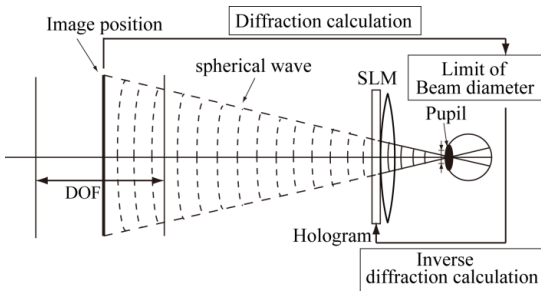


図5 ホログラム計算法

③ ホログラム計算の方法を図5に示す。空間に画像の表示位置を設定し、表示位置から瞳孔中心に収束する波面を考える。すなわち、表示画像の振幅分布をもち、球面波の位相分布をもつ波面を考える。この波面が瞳孔位置でもつ分布をフレネル近似により回折計算し、つぎにマクスウェル視で用いる瞳孔径でビーム径を制限する。この制限した分布をフレネル回折により SLM 位置まで逆回折計算し、レンズの位相分布を差し引くことでホログラム表示する波面を計算する。

④ 提案するマクスウェル視光学系では、被写界深度の位置と範囲を電子的に変えることができる。また、瞳孔の位置に合わせて収束点を動的に移動することができるので、従来のマクスウェル視の光学系では対応するのが難しかった眼球運動による瞳孔位置の変化に容易に対応できる。

⑤ インテグラルイメージングによる立体表示を用いる場合には、立体像に目のピントを合わせる必要がある。本研究では、被写界深度を広げるため、表示画像と異なる距離にある実物体を同時に見ることができる。

⑥ 提案したホログラム表示を用いたマクスウェル視を実験で確認した。図6に実験系を示す。SLMとして反射型LCOSを用いた。解像度は $4,096 \times 2,400$ で、画素ピッチは $4.8 \mu\text{m}$ である。光源には波長 633 nm のHe-Neレーザーを用いた。共役像とゼロ次回折光を除去するために、フォーリエ面にシングルサイドバンドフィルタを配置した $4f$ 光学系を用いた。 $4f$ 光学系の像面に、瞳孔への収束用レンズを配置した。焦点距離は 500 mm である。

⑦ 最初に、瞳孔位置でのビーム径を実験により決定した。ビーム径を小さくすると、被写界深度は広がるが、網膜像の分解能が低下する。そこで、ビーム径を $1, 2, 3 \text{ mm}$ と変化した場合の網膜像のボケを調べた。ただし、

画像は SLM 上に表示することとし、瞳孔と SLM の距離は 500 mm とした。網膜像は、入射瞳孔径を人間の平均瞳孔径である 5 mm としたデジタルカメラを用いて撮影した。実験結果を図7に示す。ただし、表示画像の最小線幅は $147 \mu\text{m}$ とした。これは、網膜の分解能を $5 \mu\text{m}$ としたとき、これが表示画像上でもつ大きさである。ただし、目の焦点距離を 17 mm とした。実験結果から、ビーム径を 2 mm 以上とすると画像のボケが小さいことがわかる。以上より、本研究では、ビーム径を 2 mm とすることにした。

⑧ つぎに、マクスウェル視による被写界深度の拡大を実験で確認した。画像表示面を、瞳孔から距離 $600, 700, 800 \text{ mm}$ の位置に設定した。計算で求めた目の被写界深度を図8に示す。ただし、網膜のボケの許容度を $5 \mu\text{m}$ とし、被写界深度を計算した。網膜像を、デジタルカメラを用いて撮影した結果を図9に示す。撮影に用いたカメラのピント位置を図8に矢印で示す。

⑨ S図9より、各表示距離において、計算で求めた被写界深度中で、ボケのない網膜像が得られていることがわかる。以上より、ホログラム表示を用いてマクスウェル視が実現できることが示せた。なお、瞳孔径を平均瞳孔径 5 mm とした場合の被写界深度は、3つの表示距離に対して、 $580 \sim 621 \text{ mm}$ 、 $673 \sim 729 \text{ mm}$ 、および $765 \sim 839 \text{ mm}$ である。

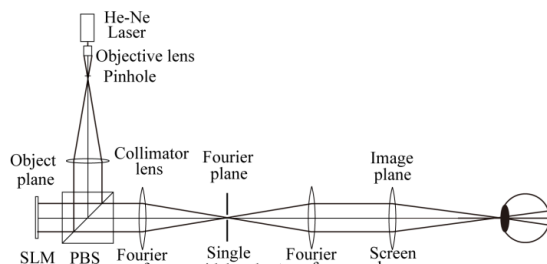


図6 実験系

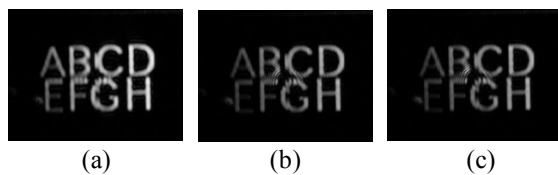


図7 網膜像：ビーム径 (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm

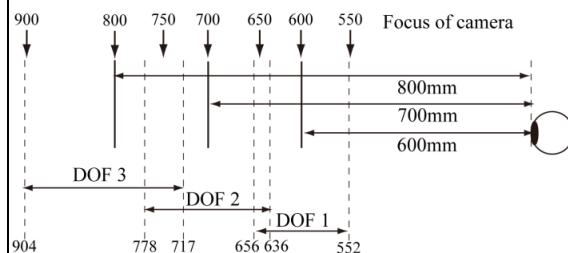


図8 実験条件

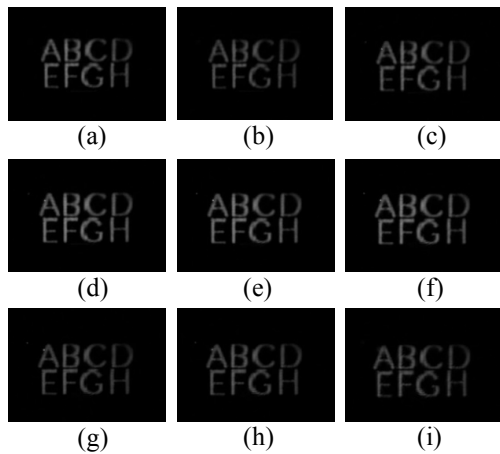


図9 網膜像：表示距離(a)-(c) 600 mm, (d)-(f) 700 mm, (g)-(i) 800 mm; ピント距離(a) 550 mm, (b) 600 mm, (c) (d) 650 mm, (e) 700 mm, (f) (g) 750 mm, (h) 800 mm, (i) 900 mm.

(2) 光学系の小型化

① 提案したホログラムを用いたマクスウェル視ディスプレイの構成では、レンズの焦点距離を f 、SLM のピクセルピッチを p 、および光の波長を λ で表すと、集光点の横方向の最大移動量は $\lambda f/p$ で与えられる。瞳孔の最大移動量を 20 mm とすると、本研究の実験条件 ($p = 8.1 \mu\text{m}$, $\lambda = 640 \text{ nm}$) では、焦点距離を $f = 253 \text{ mm}$ と長くする必要ある。そのため、表示システムが大型になることが問題点であった。

② 本研究で提案する小型化したマクスウェル視ディスプレイの構成を図 10 に示す。まず、レンズとして凸レンズと凹レンズを組み合わせたテレフォト型の組み合わせレンズを用いる。この組み合わせレンズではバックフォーカス（レンズ系から眼側焦点 F' までの距離）が合成焦点距離 f より短いため、レンズ系から眼までの距離を短縮できる。つぎに、図 10 と等価な光学系にするためには、SLM を組み合わせレンズの主平面 P に配置する必要があるが、この主平面はレンズ系より外側にできる。そこで、本研究では SLM をレンズに密着させることで、レンズ系と SLM の距離をゼロにする。この際に、主平面からレンズ系までの空間での回折を加味した波面を SLM に表示する。以上により、表示システムの小型化を実現する。

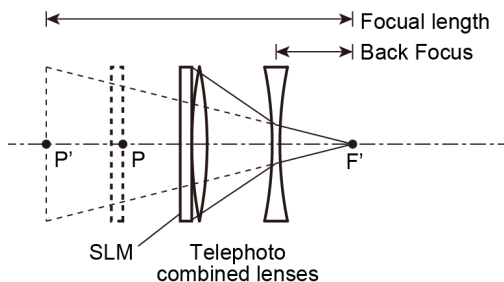


図 10 マクスウェル光学系の小型化

Table 1 テレフォト型の組み合わせレンズ

No	Positive lens focal length [mm]	Negative lens focal length [mm]	Spot-diagram diameter [μm]	Total length [mm]
A	75	-25	107.3	119.7
B	100	-35	54.8	134.8
C	125	-50	21.9	152.6
D	150	-100	23.2	180.1

③ 提案した小型化法をもとに、実験システムを設計・試作した。SLM には、HoloEye 社の LC-R 1080 (解像度 $1,920 \times 1,200$ 、ピクセルピッチ $8.1 \mu\text{m}$) を用いた。光源には中心波長が 640 nm の LED を用いた。

④ 合成焦点距離が 253 mm になるように、表 1 に示す 4 種類のテレフォト型の組み合わせレンズについて、光学設計ソフトを用いて画像歪みやスポットダイアグラムの大きさについて検討した。その結果、目までの距離を含む光学系の全長が最小となる A の組み合わせで十分な結像特性がえられることから、この組み合わせを用いることにした。

⑤ 設計した光学系をもとに試作した実験システムを図 11(a) に示す。SLM を底面に配置し、結像系は上下に構成してある。結像系の途中にビームスプリッターを設置し、観察窓から表示画像と実風景が同時に見えるようになっている。また、図 11(b) に示すように、観察窓近くに瞳孔位置をモニタするためのカメラが取り付けられるようになっている。

⑥ 試作システムを用いて集光点の移動を確認した。集光点を $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の範囲で移動させた結果を図 12 に示す。集光位置にトレーシングペーパーを配置して撮影した結果である。集光点の移動が確認できる。

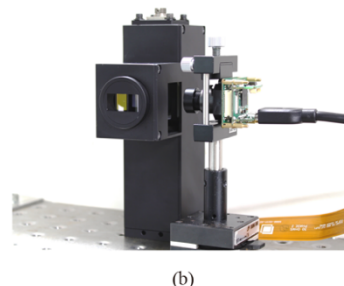
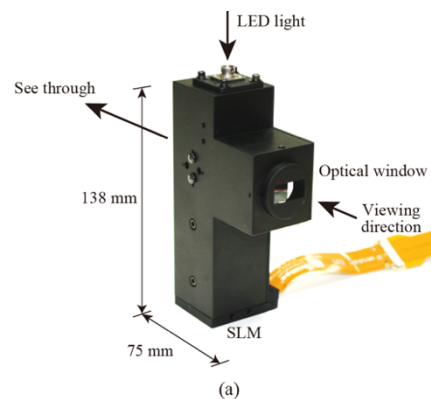


図 11 小型化した実験システム：(a) システムの大きさ、(b) モニタカメラの取り付け

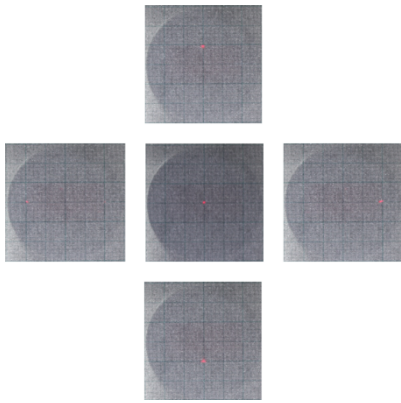


図 12 集光点の移動の実験結果



図 13 マクスウェル視による画像提示

⑦ つぎに、マクスウェル視による画像表示を行った。瞳孔位置でのビーム径は 0.82 mm とした。眼の位置にビデオカメラを置いて撮影した結果を図 13 に示す。カメラのピント位置を $300 \text{ mm} \sim 1,000 \text{ mm}$ で変化させた結果である。カメラのピント位置を変えても、表示画像が観察できることがわかる。

(3) 乱視への対応

① 乱視の目のレンズは、図 14 に示すように、球面レンズにシリンジカルレンズを加えたモデルで表すことができる。乱視の程度は、シリンジカルレンズの屈折力 (cyl) と対称軸方向 (Ax) を用いて表される。
 ② 乱視を補正するためには、図 14 のシリンジカルレンズと焦点距離の符号が逆のシリンジカルレンズを用いればよい。マクスウェル視では、水晶体の集光点において、焦点距離の符号が逆のシリンジカルレンズの位相分布を掛け合わせればよい。ホログラフィーの波面制御を用いると、集光位置での位相制御は容易に行える。すなわち、SLM に表示するホログラムパターンを変更するだけで、光学系の変更なしに、乱

視に対応した画像提示が可能になる。

③ 図 15 に、SLM が発生する波面を求める計算方法を示す。最初に、表示画像から発せられた光が集光点でもつ分布を回折計算で求める。つぎに、集光点でのビーム径を制限することでマクスウェル視を実現し、シリンジカルレンズ型の位相変調を行うことで乱視への対応を行う。最後に、逆回折計算を行い SLM が発生する波面を求める。

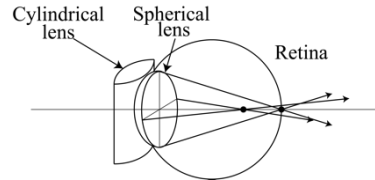


図 14 乱視のモデル

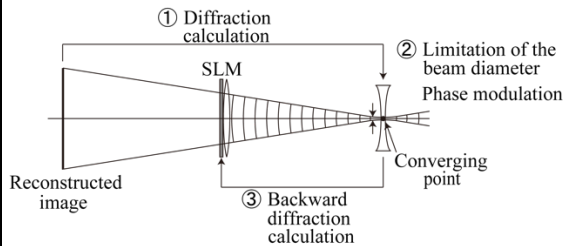


図 15 乱視を補正するホログラム計算

④ 提案したホログラフィックマクスウェル視ディスプレイを用いた乱視に対応した画像提示法を、実験で確認した。

⑤ 実験には、図 11 に示す実験システムを用いた。画像の表示位置は集光点から 500 mm の位置として、集光点でのビーム径は 5.0 mm とした。

⑥ 最初に、集光点の位置にカメラを置いて、再生像の表示位置にカメラのピントを合わせて撮影した結果を図 16 に示す。比較のために、再生像の表示位置の左側に表示画像を紙に印刷したものを、右側に縦横のラインパターンを紙に印刷したものを配置した。

⑦ 乱視の状態は、カメラのレンズの前にシリンジカルレンズを置くことで模した。シリンジカルレンズには、焦点距離が 100 mm のものと 150 mm のものの 2 種類を用いた。乱視度数 cyl で表すと -10.0 D と -6.7 D となり、強度な乱視状態に対応する。シリンジカルレンズの対称軸を垂直方向にした場合と、水平方向にした場合について実験を行った。シリンジカルレンズの屈折力 (cyl) と対称軸方向 (Ax) の値をもとにホログラム計算を行った。

⑧ カメラで得られた網膜像を図 17 に示す。シリンジカルレンズの焦点距離が 100 mm の場合を同図 (a) と (b) に、 150 mm の場合を同図 (c) と (d) に示す。シリンジカルレンズの対称軸が垂直方向の場合を同図 (a) と (c) に、水平方向の場合を同図 (b) と (d) に示す。

⑨ 図 17 より、乱視により比較画像が水平方向あるいは垂直方向にぼけていることがわかる。これに対して、ホログラム表示した画像には、このような異方的なボケが生じ

ていない。すなわち、乱視の目への画像提示が可能であることがわかる。

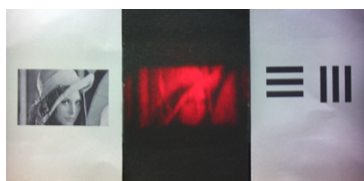
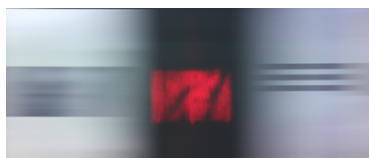
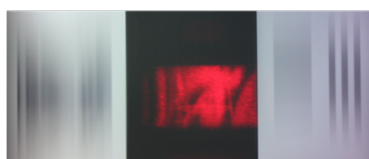


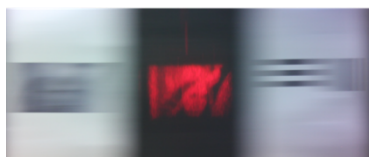
図 16 再生像と参照画像



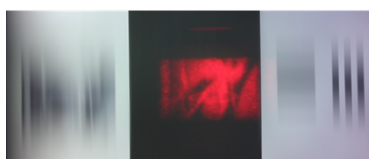
(a)



(b)



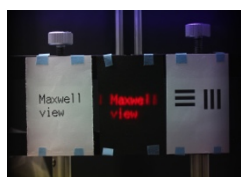
(c)



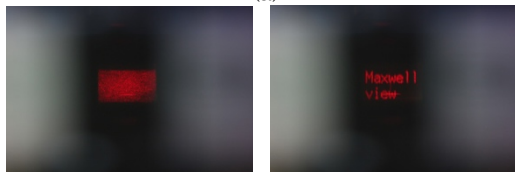
(d)

図 17 乱視補正の実験結果

(a) cyl-10.0D Ax90°, (b) cyl-10.0D Ax180°, (c) cyl-6.7D Ax90°, (d) cyl-6.7D Ax180°



(a)



(b)

(c)

図 18 不正乱視補正の実験結果

(a) 参照画像, (b) 不正乱視の網膜像, (c) 不正乱視を補正した網膜像

⑩ 最後に、従来の眼鏡やコンタクトレンズによる補正ができない不正乱視の補正を試みた。不正乱視は、屈折力が異なる複数のシリンダリカルレンズが異なる対象軸の傾きで組み合わせられた形でモデル化できる。図 18 に、2 枚のシリンダリカルレンズを用いて不正乱視の

状態を作り出し、ホログラムを用いた瞳位置での位相変調で補正した結果を示す。同図(a)は参照画像で、同図(b)は不正乱視の網膜像で、同図(c)は補正した網膜像である。不正乱視に対しても、網膜像形成が可能であることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

① 藤本直大, 高木康博, “ホログラフィックマクスウェル視ディスプレイを用いた乱視に対応した画像提示”, 3次元画像コンファレンス 2017, 千葉大(千葉県千葉市), 2017年7月6 - 7日。(発表決定)

② N. Fujimoto and Y. Takaki, “Holographic Maxwellian-view Display System,” Digital Holography & 3D Imaging, Cheju Halla University, Jeju Island, South Korea, May 29 - June 1, 2017.

③ Y. Takaki and N. Fujimoto, “Maxwellian-view Display Using Computer Generated Hologram,” JSAP-OSA Joint Symposia 2016, Niigata, Japan, Sep. 13 - 16, 2016.

④ 榎本圭佑, 高木康博, “ホログラムを用いたマクスウェル視ディスプレイの小型化”, 3次元画像コンファレンス 2016, 関西大学(大阪府吹田市), 2016年7月13 - 14日.

⑤ 伊藤悠介, 高木康博, “アイトラッキングを導入したホログラムを用いた視覚支援用マクスウェル視光学系”, 映像情報メディア学会立体映像技術研究会, 東京農工大, 2016年3月9日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

http://web.tuat.ac.jp/~e-takaki/research/holographic_display.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 康博 (TAKAKI, Yasuhiro)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 50236189