

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00281

研究課題名(和文) 注視点関連情報を選択的提示可能な網膜投影型ヘッドマウント3次元ディスプレイの開発

研究課題名(英文) Development of retinal projection type head-mounted 3D display that can selectively present gazing point related information

研究代表者

高橋 秀也 (TAKAHASHI, Hideya)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30197165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：シースルー型の網膜投影型ヘッドマウントディスプレイ(HMD)に3次元ディスプレイで用いられる超多眼方式を応用することにより、単眼での3次元表示を実現するとともに、注視点に対応した仮想映像だけを鮮明に提示することも可能とする網膜投影型ヘッドマウント3次元ディスプレイを開発した。提案したHMDは、網膜像のぼけを用いることで水晶体の調節効果の誘導を行い、単眼3次元表示および注視点に対応した仮想映像の提示を行うことができる。試作したHMDは、瞳孔からの距離が113mmから2000mmの範囲の任意の距離に3D映像を提示できる。

研究成果の概要(英文)：We proposed a see-through retinal projection type super multi-view (SMV) head-mounted display (HMD). The smooth motion parallax provided by the SMV technique enables accurate superposition of virtual 3D images in real scenes. Moreover, when the viewer focuses one's eyes on the displayed 3D image, since the stimulus for the accommodation of the human eye is reproduced by the SMV technique, the viewer can observe only the virtual 3D image corresponding to the gazing point. The prototype HMD can display 3D images in the range of 113 mm to 2000 mm in front of the pupil.

研究分野：ヘッドマウントディスプレイ, 3次元画像入出力

キーワード：網膜投影ディスプレイ ヘッドマウントディスプレイ 3次元表示 拡張現実感表示 超多眼

### 1. 研究開始当初の背景

シースルー型ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いて拡張現実感表示を行う場合、本来3次元である外界の風景に2次元仮想映像を重畳するため、現実の物体と仮想映像を関連付けることが困難であった。また、仮想映像全体が常時視野に入るため、注視しているものに対する情報だけを視認することができなかった。これらの理由により、効果的で適切な拡張現実感表示の実現が困難であった。

一方、我々はこれまで、瞳孔を通して映像を直接網膜に投影することにより鮮明でコントラストが高い映像を提示でき、さらに深い焦点深度を実現するために眼の焦点調整が不要となる、シースルー型の網膜投影型HMDの研究を行ってきた[1,2]。また、網膜投影ディスプレイを構成する主要な光学素子にホログラフィック光学素子(HOE)を用いており、表示映像と外界の風景が重畳されて見えるシースルー型を実現しており、これらの特長から、外界の風景を見ながら同時に表示映像を観察する拡張現実感表示への応用において、仮想映像を観察するために眼の焦点調節を必要としないため、外界の風景に対してスムーズに視点移動が可能であり、スポーツ時や車の運転時などの動きの速い状況での使用においても眼が疲れないという利点があり、さらに、高齢者や低視力者にも視認性が良いという特長を有している[3]。

現実の物体と仮想映像の関連付けが困難であること、また、仮想映像全体が常時視野に入るため、注視しているものに対する情報だけを視認することができないという、拡張現実感表示の問題を克服するため、本研究では、我々がこれまで研究を行ってきたシースルー型の網膜投影型HMDに3次元ディスプレイで用いられる超多眼方式[4]を応用することにより、単眼での3次元表示を実現するとともに、必要な仮想映像(情報)だけを選択的に提示することも可能とし、効果的で適切な拡張現実感表示を実現するシステムを提案した。超多眼とは、物体のある1点から放射(反射)される光線のうち少なくとも2本以上が瞳孔に入射する状態のことであり、この状態では水晶体の自然な調節が誘導され、単眼で3次元像を認識することができる。

研究開発当初では、シースルー型HMDは、国内外において多数研究されており商品化されているものもあったが、虚像投影方式を用いているものが大部分であり、外界の風景と仮想映像の両者に同時に眼の焦点を合わせることができないため、視点の移動が激しい用途には利用できなかった。この問題を克服するために、網膜投影方式に似た網膜走査方式のディスプレイ[5]がわずかではあるが提案されていたが、3次元表示や必要な仮想映像だけを選択的に提示することが可能なものは、国内外で研究されていなかった。

### 2. 研究の目的

我々はこれまでに、シースルー型の網膜投影型HMDの研究と、超多眼状態を実現する3次元ディスプレイの研究[6]を行ってきた。さらに、これらの成果を応用し、網膜投影型ディスプレイによって3次元仮想映像を表示する手法を提案し、光学実験台上で基本原理の確認を行い、各焦点位置に対応した仮想映像だけを鮮明に観察できることを確認している[7]。そこで本研究では、これまでの研究成果に基づき、シースルー型の網膜投影型HMDに3次元ディスプレイで用いられる超多眼方式を応用することにより、単眼での3次元表示を実現するとともに、必要な仮想映像(情報)だけを選択的に提示することも可能とし、効果的で適切な拡張現実感表示を実現することができる網膜投影型ヘッドマウント3次元ディスプレイを開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、これまでの研究成果に基づき、シースルー型の網膜投影型HMDに3次元ディスプレイで用いられる超多眼方式を応用することにより、単眼での3次元表示を実現するとともに、注視点に対応した仮想映像だけを鮮明に提示することも可能とする網膜投影型ヘッドマウント3次元ディスプレイを開発した。具体的には、網膜投影型3次元HMDを実現するためのHOEおよびHOEへ映像を投影する光学系の開発、3次元表示と注視点に対応した仮想映像だけを鮮明に提示することを実現するためのHOEへ投影する映像の作成方法の確立を行った。以下に、具体的な方法について年度ごとに述べる。

(1) 平成27年度は、以下の項目について研究を行った。

本研究で提案する網膜投影型HMD用いた単眼での3次元表示を実現する方式では、観察者の眼に対して超多眼状態を満足させる必要がある。そのためには、図4に示すように、提示したい3次元映像を構成するための複数の視差画像を、瞳孔上で約1~2mm間隔の異なる収束点に集光させた後、網膜上に投影する必要がある。これを実現するためのHOEの構成手法を確立し、HOEの設計および製作を行った。具体的には、3枚以上の視差画像を投影可能なHOEを試作した。

で作製したHOE上へ複数の視差画像を投影する手法を確立した。投影視差画像の画素と各画素に対応した微小な要素ホログラム(HOEの構成要素)との位置合わせが重要であるため、両者の位置合わせ手法を確立した。

(2) 平成28年度は、以下の項目について研究を行った。

平成27年度に確立したHOE上へ複数の

視差画像を投影する手法に基づいて、HMD に組み込むための映像投影光学系の設計および製作を行った。また、投影光学系に合わせて HOE の改良を行った。

で作製した HMD に組み込むための投影光学系と HOE を組み合わせ、光学実験台上で単眼 3 次元表示および注視点に対応した仮想映像提示について、基本動作を確認した。また、HMD 光学系による網膜像(網膜上に投影された映像)を解析し、これを用いた HMD の 3 次元表示能力を評価する手法を確立した。

(3) 平成 29 年度は、以下の項目について研究を行った。

提案システムにおける 3 次元表示では、表示される 3 次元像の画質は、網膜へ投影される視差画像の画質に依存するところが大きい。記号や文字などの 2 次元情報を眼前の任意の距離に表示することは容易であるが、3 次元と認識できる物体の映像を提示するためには、視差画像の画質をできるだけ劣化させずに網膜上へ投影する必要がある。これを実現するために、平成 28 年度に行った基礎実験の成果を踏まえて、映像投影光学系と HOE の改良を行った。

人間の水晶体の調節効果に注目し、網膜像のぼけを用いることで、自然な調節効果の誘導を行い、単眼 3 次元表示および注視点に対応した仮想映像提示を活かした効果的な拡張現実感表示を行った。また、網膜像(網膜上に投影された映像)を解析し、試作した HMD 光学系の 3 次元表示能力の評価を行った。

#### 4. 研究成果

健常者だけでなく高齢者や低視力者への情報提示も可能なヘッドマウント式の網膜投影型 3 次元ディスプレイの方式を開発し、これを用いた効果的な拡張現実感インタフェースの手法を確立した。具体的には、シースルー型の網膜投影型ヘッドマウントディスプレイに 3 次元ディスプレイで用いられる超多眼方式を応用することにより、単眼での 3 次元表示を実現するとともに、注視点に関連した仮想映像だけを鮮明に提示することも可能とした。

(1) 超多眼網膜投影型ディスプレイを構成するための HOE の作製手法の確立

超多眼状態を実現する網膜投影型ディスプレイを構成するための HOE の作製手法の確立と、HOE 上へ複数の視差画像を投影する手法の確立を行った。超多眼状態を実現するために、提示したい 3 次元画像を構成するための複数の視差画像を、瞳孔上で約 1~2mm 間隔の異なる収束点に集光させた後、網膜上に投影する必要がある。水平視差のある 3 枚の視差画像を用いる方式と、水平およ

び垂直方向に視差のある 9 枚の視差画像を用いる方式を試作した。前者の HOE は、収束点間隔 2mm、水平視野角 40.2°であり、3 枚の視差画像をストライプ状に分割して交互に並べることで、広い視野角を実現したことが特長であるが、HOE 上へ投影する視差画像の位置合わせが困難であった。後者の HOE は、収束点間隔 2mm、視野角 4.77°であり、3×3 個のホログラフィック・マイクロレンズがアレイ状に並んだ構成であり、水平および垂直方向に視差のある 9 枚の視差画像を、各ホログラフィック・マイクロレンズ上へ投影する。この方式の特長は、水平および垂直方向に立体感のある画像を表示できること、HOE と投影視差画像の位置合わせが容易であることである。しかし、視野角が狭いため、今後改良を検討する必要がある。

(2) 超多眼網膜投影型ディスプレイ用 HOE と複数の視差画像投影光学系の設計および製作

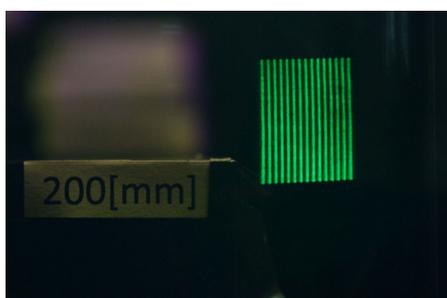
超多眼状態を実現するために、提示したい 3 次元画像を構成するための複数の視差画像を網膜上に投影する必要がある。水平視差のある 3 枚の視差画像を投影する方式と、水平および垂直方向に視差のある 9 枚の視差画像を投影する方式の 2 種類の方式を提案し、それぞれの方式に対応した HOE の作成手法を確立したが、超多眼網膜投影型ディスプレイの光学系全体を HMD の形に組み上げるにあたっては、投影光学系に用いる小型の液晶ディスプレイ(LCD)またはデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)の画素数が少ないため、超多眼状態を実現するための投影視差画像の数が多くなるほど個々の視差画像を構成する画素数が少なくなり、HMD の表示像が劣化する。そのため、水平視差のある 3 枚の視差画像を投影する方式を採用することとした。収束点間隔 2mm で 3 枚の視差画像をストライプ状に分割する HOE を作製し、これに合わせた投影光学系の設計を行った。さらに、設計した投影光学系を用いた HMD による 3 次元表示の能力を見積もるために、表示デバイスの 1 画素の点像分布関数と Gullstrand の模型眼[8]を用いて網膜像を解析し、瞳孔からの距離が 113mm~2000mm の範囲で表示可能であることを示した。一般的に、人間は 200mm~2000mm の範囲で水晶体の調節が可能であるといわれており、十分な性能が得られることが分かった。

(3) 試作した HMD 光学系における単眼 3 次元表示および注視点に対応した仮想映像提示

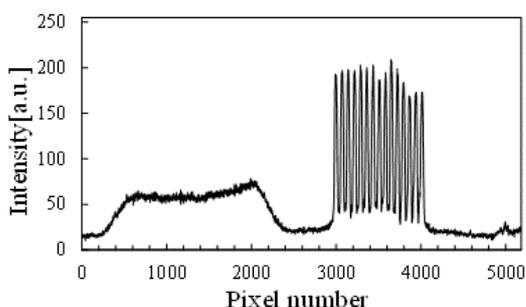
提案システムにおける 3 次元表示では、水晶体の調節作用を利用して、注視点に対応した必要な仮想映像だけが合焦し、不必要な仮想映像をぼけさせることにより、必要な情報だけを選択的に提示可能であることを確認した。図 1 および図 2 に実験結果の一例を示

す。0.6mm 幅の縦縞模様の仮想映像を眼からの距離が人間の水晶体の調節可能範囲の限界である200mmと2000mmの位置に表示させ、それぞれの場合においてカメラのピントを200mmと2000mmに合わせて撮影し、縦縞模様のコントラストを測定した。HMDで表示する縦縞模様は、試作したHMD光学系で網膜上に投影される網膜像を波動光学と模型眼を利用して解析することにより作成した。

図1は仮想映像を200mmに表示してカメラのピントを200mmに合わせた画像と光強度分布であり、図2は仮想映像を200mmに表示してカメラのピントを2000mmに合わせた画像と光強度分布である。図1では、コントラストは66.4%で縦縞模様の光強度の半値幅は0.59mmであったので、カメラのピントが仮想映像に合っていることがわかる。一方、図2では、コントラストは34.0%となり、仮想映像がぼけていることがわかる。これらから、提案方式により水晶体の調節作用による網膜像の合焦とぼけを利用できる映像表示を実現できていることがわかる。

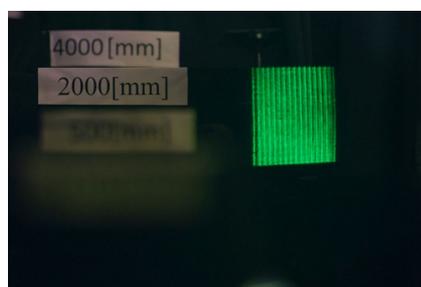


(a) 200mm の位置に焦点を合わせた画像

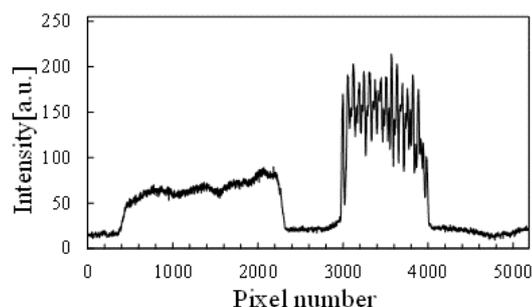


(b) (a)の画像の水平方向の光強度分布

図1 仮想映像を200mmに表示してカメラのピントを200mmに合わせた画像と光強度分布



(a) 2000mm の位置に焦点を合わせた場合



(b) (a)の画像の水平方向の光強度分布

図2 仮想映像を200mmに表示してカメラのピントを2000mmに合わせた画像と光強度分布

#### (4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクトおよび今後の展望

本研究で提案した注視点関連情報を選択的提示可能な網膜投影型ヘッドマウント3次元ディスプレイは、シースルー型の網膜投影型HMDに3次元ディスプレイで用いられる超多眼方式を応用することにより、人間の水晶体の調節効果に注目して網膜像のぼけを用いることで、自然な調節効果の誘導を行い、単眼3次元表示および注視点に対応した仮想映像提示を活かした効果的な拡張現実感表示を行えるものである。シースルー型HMDは、国内外において多数研究されており商品化されているものもあるが、必要な仮想映像だけを選択的に提示することが可能なものは、国内外で研究されていない。

本研究で試作したシステムは、網膜上へ投影する視差画像の数が3枚と少なく、自然なぼけを十分には表現できていない。今後、網膜上へ投影する視差画像の数を増やし、より自然な3次元映像提示が可能となれば、拡張現実感表示や仮想現実感表示の発展に寄与できると考える。

#### < 引用文献 >

- [1] H.Takahashi, S.Hirooka, Stereoscopic see-through retinal projection head-mounted display, Proc. SPIE, 6803, 68031N(CD-ROM), 2008.
- [2] K. Takaichi, H. Takahashi, Multi-color see-through retinal projection head-mounted display, ICIC Express

- Letters, 6, 5, 1291-1296, 2012.
- [3] 白木 邦彦, 高橋 秀也 他, 網膜投影装置による視覚補助装置の開発, 日本ロージョン学会誌, 3, 78-81, 2003.
- [4] Y. Kajiki, H. Yoshikawa, T. Honda, Ocular accommodation by super multi-view stereogram and 45-view stereoscopic display, Proc. IDW '96, 2, 489-492, 1996.
- [5] M. Tidwell, R.S. Johnston, D. Melville, T.A. Furness, The virtual retinal display - A retinal scanning imaging system, Proc. Virtual Reality World '95, 325-333, 1995.
- [6] H. Takahashi, M. Chikayama, T. Aida, Thin three-dimensional display based on the reconstruction of parallax rays, IJICIC, 3, 6, 1421-1432, 2007.
- [7] H. Takahashi, Y. Ito, S. Nakata, K. Yamada, Retinal projection type super multi-view head-mounted display, Proc. SPIE, 9012, 90120L(CD-ROM), 2014.
- [8] 西信 元嗣, 金原出版, 眼光学の基礎, 1990.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

T. Konda, K. Tanaka, K. Yoshimoto, H. Takahashi, Retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display using the time division projection optical system, Proc. of SPIE, 査読有, 10556, 2018, 105560L1-105560L11, DOI:10.1117/12.2287649.

T. Emoto, T. Konda, K. Yoshimoto, H. Takahashi, Analysis of retinal images for retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display, Proc. of Electronic Imaging Stereoscopic Display and Application XXVIII, 査読有, 2017, 188-193, DOI:https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.5.SDA-376.

Y. Takatsuka, Y. Kayo, H. Takahashi, Retinal projection type 3D head-mounted display using an HOE lens array, Proc. of IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2016, Stereoscopic Displays and Applications XXVII, 査読有, 2016, SDA452-1-SDA452-6, DOI:10.2352/ISSN.2470-1173.2016.5.SDA-452

[学会発表](計7件)

T. Konda, Retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display using the time division projection optical system, Photonic West 2018,

Advances in Display Technologies VIII, Jan. 1, 2018, San Francisco (USA).

前田 寛了, ホログラフィックレンズアレイを用いた超多眼ヘッドマウント3次元ディスプレイ, 平成29年電気関係学会関西連合大会, 2017年11月25日, 近畿大学(大阪府・東大阪市).

昆田 祥幸, 超多眼3Dヘッドマウントディスプレイにおける網膜像の解析, 平成29年電気関係学会関西連合大会, 2017年11月25日, 近畿大学(大阪府・東大阪市).

T. Emoto, Analysis of retinal images for retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display, Electronic Imaging 2017, Stereoscopic Display and Application XXVIII, Feb. 1, 2017, San Francisco (USA).

昆田 祥幸, 超多眼3Dヘッドマウントディスプレイにおける3次元像表示位置の検討, 平成28年電気関係学会関西連合大会, 2016年11月22日, 大阪府立大学(大阪府・堺市).

高橋 秀也, 網膜投影型ヘッドマウント3次元ディスプレイ, 映像情報メディア学会立体映像技術研究会, 2016年7月19日, 大阪市立大学(大阪府・大阪市).

Y. Takatsuka, Retinal projection type 3D head-mounted display using an HOE lens array, Electronic Imaging 2016, Stereoscopic Displays and Applications XXVII, Feb. 17, 2016, San Francisco (USA).

[図書](計1件)

高橋 秀也, 技術情報協会, VR/AR技術の開発動向と最新応用事例(第6章第3節), 2018, pp.243-250.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 秀也 (TAKAHASHI, Hideya)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30197165

(4) 研究協力者

昆田 祥幸 (KONDA, Tadayuki)

前田 寛了 (MAEDA, Hiroaki)

江本 卓司 (EMOTO, Takashi)

高塚 祥幸 (TAKATSUKA, Yasuhiro)