

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H03277
研究課題名（和文）輻輳と調節が矛盾しない2眼ステレオ超多眼方式網膜投影型3次元ディスプレイの開発

研究課題名（英文）Development of a stereoscopic retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display without accommodation-vergence conflict

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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：単眼の超多眼方式網膜投影型ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を2台組み合わせることで2眼ステレオ表示が可能な3D-HMDを開発した。提案した3D-HMDは、水晶体の調節作用と両眼の輻輳および両眼視差を伴った自然な3D仮想映像を、輻輳と調節に矛盾なく表示できる。試作した3D-HMDは、瞳孔からの距離が200mmから3500mmの範囲の任意の位置に3D映像を提示できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法の特色は、水晶体の調節作用と両眼の輻輳に乖離が無く両眼視差を伴った高画質で自然な3D表示ができること、必要な情報だけを選択的に提示できることである。一般的な2眼ステレオ表示では、水晶体の調節と両眼の輻輳に乖離が生じ疲れやすい欠点があるが、提案手法では調節と輻輳に乖離が生じない。本研究成果の応用例は、車の運転時などの外界の動きが速い状況における的確なAR表示、外科手術における精度の高い手術支援、網膜投影方式の特長である高齢者や低視力者の視覚を補助する情報提示などが考えられる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a 3D head-mounted display (3D-HMD) capable of binocular stereo display by combining two monocular retinal projection type super multi-view head-mounted displays. The proposed 3D-HMD can display natural 3D virtual images with both the stimulus-to-accommodation and the stimulus-to-vergence without accommodation-vergence conflict. The prototype 3D-HMD can present 3D images at any position within the range of 200mm to 3500mm from the pupil.

研究分野：人間情報学／ヒューマンインタフェース・インタラクション 電気電子工学／電子デバイス・電子機器

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(AR)表示を行う場合、本来3次元(3D)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AR表示の実現が困難であり、人間が立体感を感じる生理的要因を満足する自然な3D仮想映像を提示するHMDが望まれていた。

一方、我々はこれまで、シースルー型の網膜投影型HMDの研究を行ってきた[1,2]。本HMDの特長は、瞳孔を通して映像を直接網膜に投影するマックスウェル視の原理を用いていることであり、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できるために眼の焦点調整が不要となることである。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いる。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AR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る。また、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]。さらに、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AR表示の問題を克服するため、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、3Dディスプレイで用いられる超多眼方式[4,5]を応用することにより、水晶体の調節作用を利用した単眼での3D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AR表示を実現してきた[1,2,6-8]。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3D像を認識することができる。しかし、超多眼状態によって誘導される水晶体の調節作用だけでは、数メートル以上離れた距離に提示された3D仮想映像の立体感を単眼で認識することは生理的に困難である[9]。この問題を克服するためには、水晶体の調節作用だけでなく、人間が立体感を感じる生理的要因のうち、数メートル以上離れた距離でも有効な両眼視差と両眼の輻輳効果も伴った映像提示手法が望まれるところであった。

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。一方、網膜投影型HMDは、原理上、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、眼が疲れないという利点があった。網膜投影方式に似た網膜走査方式のディスプレイ[10,11]がわずかではあるが提案されていたが、3D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。また、本研究におけるHMDは瞳孔上に映像を収束させてから網膜上へ投影するという網膜投影方式の特長を積極的に利用し、複数の映像収束点を常時瞳孔上に配置することによって超多眼状態を常時実現することを可能としているが、超多眼状態を常時実現する超多眼ディスプレイは、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の研究結果[1,2]に超多眼方式を応用した網膜投影型3D-HMDを提案し、注視点に対応した仮想映像だけを鮮明に観察できる超多眼方式網膜投影型3D-HMDを開発してきた[6-8]。そこで本研究では、これまでの研究成果に基づき、単眼のシースルー型の超多眼方式網膜投影型3D-HMDを2台組み合わせることによる2眼ステレオ表示を用いることにより、水晶体の調節作用と両眼の輻輳に矛盾が無く両眼視差を伴った自然な3D仮想映像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AR表示を実現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、単眼のシースルー型の超多眼方式網膜投影型3D-HMDを2台組み合わせることで2眼ステレオ表示が可能なシースルー型の超多眼方式網膜投影型3D-HMDを開発し、水晶体の調節作用と両眼の輻輳に矛盾が無く両眼視差を伴った自然な3D仮想映像表示を可能とするとともに、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AR表示を実現した。また、3D映像を構成するための複数の視差画像を時分割多重表示することによって、高画質な超多眼状態を実現する手法も確立した。具体的には、提示したい3D映像を構成するための複数の視差画像を網膜上へ時分割多重投影することによって超多眼状態を実現する網膜投影型3D-HMDのためのHOEと映像投影システムの開発、水晶体の調節と両眼の輻輳を満足し、注視点に対応した3D仮想映像だけを鮮明に観察できる効果的な

AR 表示を実現する映像の提示手法の確立を行った。以下に、具体的な方法について年度ごとに述べる。

(1) 2018 年度は、以下の項目について研究を行った。

3D 表示に用いる複数の視差画像を網膜上へ時分割多重投影表示を行うことによって視差画像の画質を劣化させずに、高画質の 3D 表示が可能な超多眼状態を実現する単眼の表示システムを試作し、その有効性を確認した。具体的には、瞳孔上に約 1~2mm 間隔で 3~5 枚の視差画像を収束させる多重収束点を実現する多重露光 HOE の作製手法の確立と、3~5 枚の視差画像を時分割多重投影する映像投影システムの試作を行い、多重露光 HOE と時分割多重映像投影システムを組み合わせた単眼の時分割多重投影方式の超多眼 3D ディスプレイの原理確認を光学定盤上で行い、その有効性を確認した。

(2) 2019 年度は、以下の項目について研究を行った。

より自然に水晶体の調節作用を誘導することを目指し、網膜上へ時分割多重投影表示を行う視差画像の数を増やすために、時分割投影用の映像表示デバイスとシャッターを改良した。具体的には、収束点数は 8 個、約 0.8mm 間隔の超多眼状態を実現した。また、2 眼ステレオ表示に発展させるために、両眼の輻輳角が変化しても網膜投影型 3D-HMD を観察し続けることを可能とする手法についても基本原理を確認した。

(3) 2020 年度は、以下の項目について研究を行った。

網膜像におけるより自然なぼけを表現するために、網膜上へ時分割多重投影表示を行う視差画像の数や投影位置を柔軟に変化させることができるように、DMD 表示デバイスを時分割投影用のシャッターとして用いて、シャッターの開口位置、開口部の数、形状、大きさを自由に設定する手法を提案し、投影光学系を改良した。また、本研究で提案している、複数の視差画像を網膜上へ多重投影することにより水晶体の調節を誘導する網膜像のぼけの表現方法を応用し、表示距離に応じてぼけの状態が異なる映像を混在させる手法を確立し、異なった距離に複数の仮想物体を同時に表示することによりその有効性を確認した。

(4) 2021 年度は、以下の項目について研究を行った。

2 眼ステレオ表示に基づいた 3 次元表示を行うために、単眼の超多眼 3D-HMD を 2 つ組み合わせた 2 眼ステレオ超多眼方式網膜投影型 3D-HMD を試作し、試作システムによりその有効性について評価を行った。評価の手法として、水晶体（カメラ）の調節作用による合焦・ぼけの程度を定量的に評価する調節分離度と、2 眼ステレオ立体視における輻輳機能の誘導の程度を定量的に評価する輻輳分離度の 2 つの評価指標を定義し、試作システムを用いて、注視点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た。また、仮想映像の提示できる距離については、主に調節作用が有効である約 2m までの距離から、主に輻輳が有効となるより遠方の距離まで、シームレスに、輻輳と調節の乖離がない 3D 表示が可能となることを確認した。

4. 研究成果

両眼の輻輳と水晶体の調節に矛盾を生じない自然な拡張現実感 3 次元表示が可能な 2 眼ステレオ超多眼方式網膜投影型 3D-HMD 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、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して、輻輳と調節を同時に満足させる特長を持った単眼の 3D-HMD を 2 台組み合わせ、2 眼ステレオ方式の 3 次元仮想映像の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、効果的で自然な AR 表示を実現した。

(1) 試作システム

図 1 に提案システムの構成図を示す。DMD1 は 3D 映像表示用の視差画像を時分割表示する表示デバイスである。HOE1 は DMD2 上に複数個の収束点をつくる多重露光 HOE である。DMD2 は、DMD1 に表示される視差画像に対応した収束点の光だけを通過させる位置可変の光シャッターとして機能する。HOE2 は、瞳孔上に収束点を形成してマックスウェル視を実現し視差画像の網膜投影を行うシースルー型のホログラフィックレンズである。左右の眼に対応して 2 台の 3D-HMD を用いて、2 眼ステレオ視を実現する。試作システムにおいては、単眼の視差画像数 5 枚、収束点数は水平方向に 5 個、収束点の間隔は 1mm である。

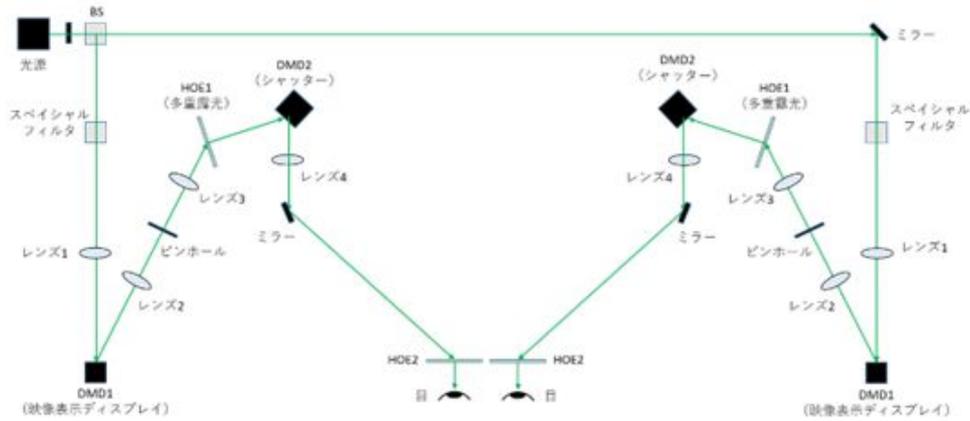


図1 試作した2眼ステレオ超多眼方式網膜投影型3D-HMDの構成図

(2) 試作システムの評価

本研究では網膜上における視差画像のずれに着目し、分離度と呼ばれる評価指標を定義して試作システムの評価を行った。水晶体の調節による画像のずれから計算される分離度を調節分離度 α_a 、両眼の輻輳による映像のずれから計算される分離度を輻輳分離度 α_c とする。調節分離度は式(1)に示すように、隣り合う視差画像の対応点で分離度をそれぞれ計算し、算出された分離度の平均値で表される。ここで、 n は視差画像数、 Δw_n は各視差画像の間隔、 P_s は視差画像の幅である。

$$\alpha_a = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\Delta w_k}{P_s} \quad (1)$$

輻輳分離度は、左眼側と右眼側それぞれで各視差画像における対応点の重心を求めてそれぞれの画像における代表点とし、左右の代表点の間隔 Δw を用いて式(2)で表される。

$$\alpha_c = \frac{\Delta w}{P_s} \quad (2)$$

調節分離度および輻輳分離度は、仮想映像の表示位置からピント調節距離が離れるほど値が大きくなり、映像のぼけが強くなることを示す。

提案システムを用いて提案手法による3次元映像表示の評価を行った。まず単眼の状態で水晶体の調節の誘導を確認した。仮想映像およびピント調節位置を200mm、450mm、2000mmに設定し、調節分離度を比較した。表1(a)および表1(b)から、200mm~2000mmの範囲で水晶体の調節機能が誘導されていることがわかる。次に、両眼の輻輳の誘導を確認した。仮想映像および輻輳位置を450mm、2000mm、3500mmに設定し、輻輳分離度を比較した。表2から、450mm~3500mmの範囲で輻輳が誘導されていることがわかる。これらの結果から、試作システムにおいては、200mm~3500mmの範囲で水晶体の調節および両眼の輻輳の誘導による3次元仮想映像表示が可能であることが確認できた。なお、評価実験において仮想映像の表示位置が3500mmまでとしたのは、実験室の広さによる制限であり、原理上は無制限までの表示が可能である。

提案手法を用いた試作システムの評価結果から、提案手法の原理通り200mmから3500mmの範囲において、水晶体の調節作用と両眼の輻輳に矛盾が無く両眼視差を伴った自然な3D仮想映像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AR表示を実現できることが確認できた。

表1(a) 調節分離度(左眼側)

調節分離度 (左眼側)	仮想映像表示距離[mm]			
	200	450	2000	
ピント調節 距離[mm]	200	0.0050	0.0709	0.1132
	450	0.0907	0.0048	0.0481
	2000	0.1793	0.0732	0.0093

表1(b) 調節分離度(右眼側)

調節分離度 (右眼側)	仮想映像表示距離[mm]			
	200	450	2000	
ピント調節 距離[mm]	200	0.0125	0.0549	0.0717
	450	0.0605	0.0125	0.0204
	2000	0.1058	0.0298	0.0084

表2 輻輳分離度

輻輳分離度	仮想映像表示距離[mm]			
	450	2000	3500	
輻輳位置 [mm]	450	0.0000	10.4497	13.8746
	2000	13.8057	0.0142	2.3153
	3500	15.9499	2.5831	0.0285

(3) 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

本研究で提案した輻輳と調節が矛盾しない2眼ステレオ超多眼方式網膜投影型3次元ディスプレイは、単眼のシースルー型の超多眼方式網膜投影型3D-HMDを2台組み合わせることによる2眼ステレオ表示を用いることにより、水晶体の調節作用と両眼の輻輳に矛盾が無く両眼視差を伴った自然な3D仮想映像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AR表示を実現するものである。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、国内外でほとんど研究されていない。また、水晶体の調節作用と両眼の輻輳について、定量的に評価するための評価指標を提案したことは、立体視を客観的に評価する研究において有意義なことである。

本研究で試作したシステムは、複数の視差画像を網膜上へ投影する手法として時分割投影を行ったために、画質は向上したがシステムの構成が複雑になった。今後、投影光学系の単純化によるシステムの小型軽量化が可能となれば、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, 日本ロービジョン学会誌, 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. H.Takahashi, M.Chikayama, T.Aida, Thin three-dimensional display based on the reconstruction of parallax rays, IJICIC, 3, 6, 1421-1432, 2007.
6. H.Takahashi, Y.Ito, S.Nakata, K.Yamada, Retinal projection type super multi-view head-mounted display, Proc. SPIE, 9012, 90120L(CD-ROM), 2014.
7. 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, SDA452-1-SDA452-6, 2016.
8. 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, 188-193, 2017.
9. 三次元画像工学, 大越孝敬, 朝倉書店, 3章, 1991.
10. The virtual retinal display - A retinal scanning imaging system, M.Tidwell, R.S.Johnston, D.Melville, T.A. Furness, Proc. Virtual Reality World '95, 325-333, 1995.
11. 菅原充, 鈴木誠, 荒川康彦, 網膜走査型レーザアイウェア: ロービジョンエイドからスマートグラスまで, 電子情報通信学会総合大会論文集, 2016(1), "SS-21", 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takuro Ohara, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi	4. 巻 11708
2. 論文標題 Retinal projection type super multiview 3D head-mounted display with the variable function shutter using a DMD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11708, Advances in Display Technologies XI	6. 最初と最後の頁 117080T-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2577440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Junya Kohno, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi	4. 巻 11304
2. 論文標題 Retinal image generation method for retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11304, Advances in Display Technologies X	6. 最初と最後の頁 1130413-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2545393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Maeda Hiroaki, Kohno Junya, Yoshimoto Kayo, Takahashi Hideya	4. 巻 10942
2. 論文標題 Analysis of displayable depth range for retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display using the time division projection optical system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE 10942, Advances in Display Technologies IX	6. 最初と最後の頁 109420X-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2506983	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kazuya Fujikawa, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi	4. 巻 12024
2. 論文標題 Retinal projection type super multi-view stereoscopic head-mounted display	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE 12024, Advances in Display Technologies XII	6. 最初と最後の頁 120240F-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2608438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Takuro Ohara, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi
2. 発表標題 Retinal projection type super multiview 3D head-mounted display with the variable function shutter using a DMD
3. 学会等名 Photonics West 2021 Digital Forum, Advances in Display Technologies XI (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junya Kohno, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi
2. 発表標題 Retinal image generation method for retinal projection type super multi-view 3D head-mounted display
3. 学会等名 Photonics West 2020, Advances in Display Technologies X (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Maeda, Junya Kohno, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi
2. 発表標題 Analysis of displayable depth range for retinal projection type super multiview 3D head-mounted display using the time division projection optical system
3. 学会等名 Photonics West 2019, Advances in Display Technologies IX (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Fujikawa, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi
2. 発表標題 Retinal projection type super multi-view stereoscopic head-mounted display
3. 学会等名 Photonics West 2019, Advances in Display Technologies XII (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	前田 寛了 (MAEDA Hiroaki)		
研究協力者	河野 隼也 (KOHNO Junya)		
研究協力者	大原 拓朗 (OHARA Takuro)		
研究協力者	藤川 和也 (FUJIKAWA Kazuya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------