

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03271

研究課題名（和文）次世代HMDのための1000volume/s超高速体積ディスプレイの開発

研究課題名（英文）1000-volume/s high-speed volumetric display for high-speed HMD

研究代表者

奥 寛雅（Oku, Hiromasa）

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：40401244

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は光学シースルー型のHMDにおいて、(1)眼の輻輳と焦点調節の間の矛盾の問題と、(2)像提示遅延の問題の両方を解決するディスプレイ方式の実現を目的とするものである。高速な可変焦点レンズと高速ストロボによる提示奥行き位置制御によって1000Hzの提示像更新周波数を実現する体積型ディスプレイ原理の研究・開発を行い、評価実験からその有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、人間の眼の焦点調節に整合する高速な三次元ディスプレイを実現する手法が開発できた。この技術は従来技術に比べてより自然な三次元画像を人間に提示できるため、視聴者がより自然にかつストレスなく利用できるヘッドマウントディスプレイやARディスプレイを実現するための基礎技術として学術的・社会的意義を持つものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to realize a display method that solves both (1) the problem of Vergence Accommodation Conflict (VAC), and (2) the problem of image presentation delay in optical see-through HMDs. We researched a volumetric display principle that achieves an image update frequency of 1000 Hz by controlling the presentation depth position with a high-speed variable-focus lens and a high-speed strobe. A prototype system was developed, and it demonstrated its effectiveness through evaluation experiments.

研究分野：ダイナミックイメージコントロール

キーワード：体積表示 高速 液体可変焦点レンズ ヘッドマウントディスプレイ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年 VR/AR/MR への関心が高まるにつれて、様々なヘッドマウントディスプレイ(HMD)が開発されている。しかし、HMD にはまだ課題も多く、視野角、解像度、フレームレート、映像提示の遅延、輻輳と眼焦点調節との矛盾、遮蔽の再現性などがあげられ、すべてにおいて十分な性能をもつ HMD はいまだに実現されていない。

特に透過型の HMD で動的な現実世界に情報を重畳させることを考えると、情報提示までの遅延は相当に短いことが要求される。例えば、タッチパネル状のディスプレイにおいて、手の動きから映像提示までの遅延が知覚されないようにするためには、遅延は 2.38ms 以下にすることが必要であるという報告もある[1]。実際、DMD を利用した高速プロジェクターを用いて 1000fps の画像を 3ms の遅延で投影することで動的な対象に張り付いているかのように映像を投影した研究も報告されており、画像の生成や転送はミリ秒オーダーの高速性を実現しつつある。また、HMD 用のディスプレイの遅延を低減させる研究もなされており、ディスプレイ自体の遅延を低減するものや、表示の遅延を打ち消すために予測を利用した手法などが提案されている。

従来 HMD のほとんどは両眼視差を利用して三次元情報を提示している。提示している距離に対応して両目の視線が提示物に集まるように眼の角度が調整され、これは輻輳と呼ばれている。一方、提示に利用しているディスプレイの眼からの光学的な距離は固定値であるため、眼の焦点距離はこのディスプレイに合焦するように調節されている。そのため、眼の輻輳が対応する対象までの距離と、眼の焦点調節が対応する対象までの距離との間に相違があり、これは輻輳距離と焦点距離の不整合と呼ばれ、英語では Vergence Accommodation Conflict (VAC) と呼ばれる。HMD を装着した人が、時として気分が悪くなったり眼精疲労を起こしたりする、いわゆる VR 酔いを起こすことが知られているが、VAC はこの原因の一つといわれている[2]。長時間装着しても疲労が少なく眼の発達などに悪影響を与えない HMD の実現のためには VAC の解決は必須であると考えられる。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では光学シースルー型の HMD において、VAC と遅延の問題の両方を解決するディスプレイ方式を研究開発してきた。特に低遅延かつ VAC のないディスプレイ原理として、体積型ディスプレイで 1000Hz の提示像更新周波数の実現を具体的な目標として定め、これを実現する原理の研究・開発と、これに基づく応用実験を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、1000Hz で提示像更新が可能な高速体積ディスプレイ原理の開発と、その原理による試作システムの構築、さらに、試作システムによる評価実験と応用実験とを行った。以下では開発した高速体積型ディスプレイ原理についてまず説明する。

体積型ディスプレイは、提示される光源の位置が実際の奥行位置に対応する方式のディスプレイであり、原理的に VAC が存在しないものである。前述したように理想的な遅延の時間が 2.38ms 以下であるという報告もあることから、提示を更新する周波数が 1000Hz、つまり 1ms 毎に表示を行うことでミリ秒の遅延での提示を目指すこととした。なお、提示の遅延には、ディスプレイ自体の遅延に加えて、映像情報の生成や転送の遅延も含まれるため、これらの低減も必要となる。しかし、前述したように 1000fps、3ms の遅延での映像提示がすでに実現されていることから、映像の生成や転送の遅延は解決しつつある。そのため、この研究ではディスプレイ原理自体の遅延に焦点を当て、その低減をめざした。

研究・開発した体積型ディスプレイ原理は、映像提示の奥行位置を高速に選択し、各奥行位置に異なる映像を提示することで三次元情報を表示するものである[3]。奥行位置は、約 69kHz で焦点距離が振動する高速な共振型の液体レンズと、ナノ秒オーダーのストロボ発光の発光タイミング制御とを組み合わせることで選択している。TAG レンズは数十 kHz で焦点距離が振動する共振型の液体可変焦点レンズである。このレンズは円筒形の金属容器の内部に透明な液体を封入した構造を持ち、この内部の液体に粗密波の共振を励起することで可変焦点レンズとして機能する。TAG レンズはいわゆる gradient index (GRIN) レンズと同様に、屈折率分布を利用してレンズとしての機能を実現しており、屈折力が 0 となるところを中心として正の領域、つまり凸レンズとして働く状態と、負の領域、つまり凹レンズとして働く状態とが交互に繰り返す。また、屈折力は正弦波状に振動し、その振動は基本的に止められない。液体の物理的な特性からその共振周波数は 50 ~ 500kHz 程度となり、非常に高速な焦点距離の変動が実現される。本研究で利用した TAG レンズは直径約 58mm、長さおよそ 80mm 程度の円筒形状をもち、円筒の上面と下面に 16mm 径の円形の光学窓が光軸上に中心がくるように配置されている構造を持つ。しかし、実際にレンズとして利用できる径は 16mm より小さく、振動モードに依存して決まる。本研究で利用した振動モードでは有効な径は 11mm であり、その共振周波数は約 69kHz であった。

次に高速体積型ディスプレイ原理を説明する。図 2 左に提案するディスプレイ原理の概要図を示す。前述したように、TAG レンズの焦点距離は高速に振動しており、特定の焦点距離で停止することはできない。しかし、体積型ディスプレイでは異なる奥行に個別に映像を提示したいので、

特定の焦点距離を利用して映像を投影することが必要になる。そこで、ストロボ光源を利用して、TAG レンズが特定の焦点距離となったタイミングでのみ短時間照明することで、特定の焦点距離のみで映像を提示することとした。ここでストロボ光源としてはLED を利用しており、その発光タイミングは電気的に制御できるので、ほぼ瞬時、具体的には可変焦点レンズの共振周期である $14.5\mu\text{s}$ 以内に焦点距離を選択することができる。この原理の概要図を図2右に示す。

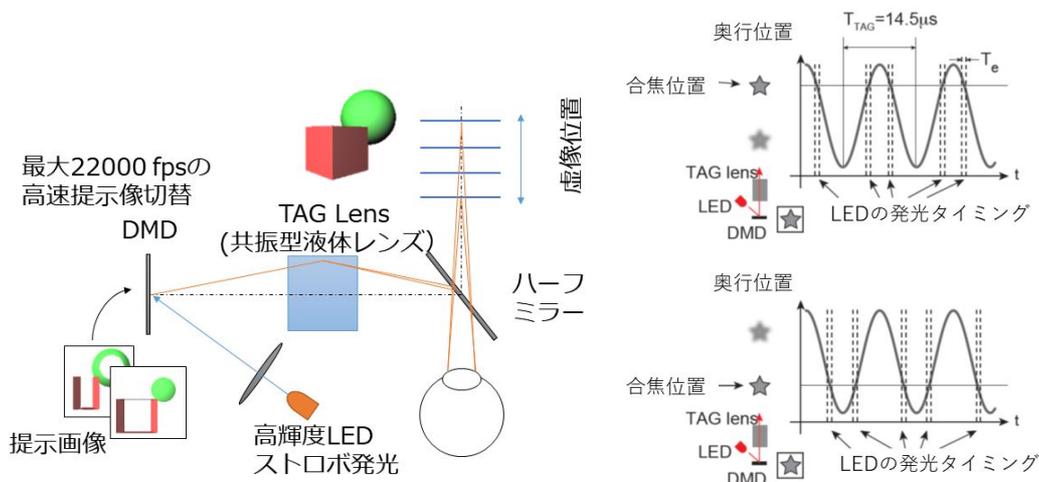


図2 提案する高速体積型ディスプレイ原理の概要図(左)と発光タイミングによる奥行位置選択原理の説明図(右)

各奥行位置に提示する映像は小さな可動鏡がアレイ状に並んでいるデジタルマイクロミラーデバイス(Digital Micro-mirror Device; DMD)により形成している。現在市販されているDMDのうち最も高速なもので22000fpsの映像更新周波数を持ち、この時DMD1フレームの期間は $45.4\mu\text{s}$ である。TAGレンズの振動周期が $14.5\mu\text{s}$ であり、1フレーム期間中に焦点距離はおよそ3往復するので、特定の焦点距離をおよそ6回通過する。つまり、DMDのフレーム毎に任意の焦点距離を通過する機会が少なくとも6回あることを意味しており、適切に発光タイミングを選ぶことでフレーム毎に任意の焦点距離で映像を投影することが可能である。

DMDの1フレームでは各画素のon/offのみを制御できるため、各フレームで提示できるのは1,0のみの画素値で構成されるバイナリ画像である。22000fpsのDMDを仮定すると、1ms中に22枚の異なるバイナリ画像を任意の焦点距離で提示することが可能である。具体的には提示したいシーンを構成する物体を距離ごとに断面にした映像を作成し、各奥行位置にその位置に対応した断面を提示することで、全体として三次元像を提示する。

4. 研究成果

以上の原理に基づいて、試作システムの構築と、そのシステムを用いた評価実験、応用実験を行った。これらについて順に説明する。

(1) 提案原理検証用の試作システム

図3に試作したシステムの光路図と外観写真を示す。光源としてはLEDを利用し、LEDの光を2つのマイクロレンズアレイを通したあとにDMD上に集光して一様な照明として利用した。DMDの直前にはTotal Internal Reflection (TIR)プリズムを配置し、On状態の鏡の反射光は投影用のレンズ系に導かれ、Off状態の鏡の反射光は異なる角度に放射されるようにした。

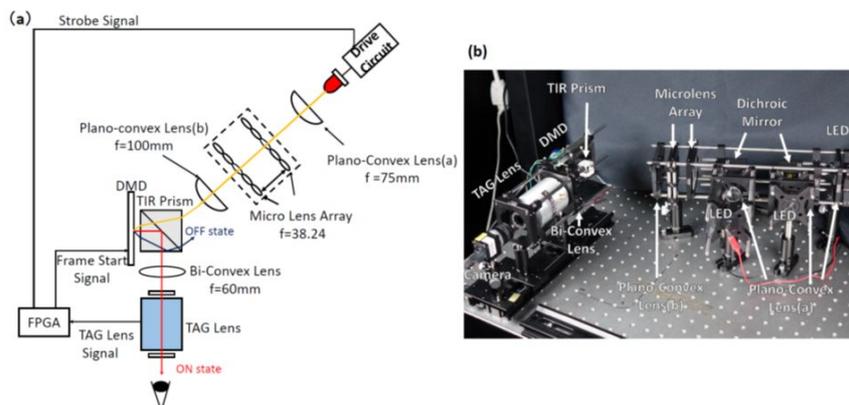


図3 試作システムの光路図(a)と外観写真(b)

DMDのOn状態の鏡で反射された光はTAGレンズと投影距離調整用のレンズを組み合わせた投影光学系を通して人の眼、もしくは観察用のカメラレンズに入射する。

LED を特定のタイミングでストロボ発光させるためには、TAG レンズと同期した照明制御が必要となる。TAG レンズには振動が特定の位相にあるときに同期信号を出力する機能があるので、この同期信号に一定の遅延時間を加えて LED を発光させることで焦点距離を選択した。同期信号に遅延を加えるために、同期信号を Field Programmable Gate Array (FPGA) に入力し、FPGA 内部で一定時間の遅延を加えてから LED 発光用の信号を出力するようにした。

DMD のフレーム切り替えも LED 発光と同期させる必要がある。この試作で利用した DMD は 6600fps のフレーム周波数をもち、1ms では 6 枚のバイナリ画像を提示可能なものであり、本試作システムは 6 か所の異なる奥行に 6 種類のバイナリ画像を提示することが可能となる。DMD のフレーム切り替えとの同期も FPGA によって制御した。この DMD はフレーム開始信号を外部から入力できるため、TAG レンズの振動 11 周期ごとにフレーム開始信号を入力することとした。これは $159.5\mu\text{s}$ 、周波数にして 6270Hz に対応する。6 枚表示するのに $957\mu\text{s}$ 必要であり、1044 volume/s の更新レートに対応する。LED の発光はフレーム切り替えごとに一回行うこととし、異なる奥行に異なるバイナリ画像が提示できるようにした。利用した TAG レンズの屈折力は -1.0, -0.6, -0.2, 0.2, -0.6, 1.0 dpt である。ここで dpt は焦点距離の逆数の単位であり 1/m と等しい。

(2) 評価実験と結果

以上で構築した試作システムについて、発光タイミングと提示する奥行位置の測定実験、静的な体積表示実験、1000volume/s での高速体積情報更新実験、の 3 種類の評価実験を行った。

提示奥行位置測定実験では、発光タイミングの変更で提示位置を制御できることを確認することを目的として、LED の発光タイミングと提示されるディスプレイ虚像の奥行位置を計測した。虚像奥行位置と横倍率を、利用した屈折力を横軸にとってプロットした結果を図 4 に示す。なお、光学 CAD による数値シミュレーション結果も併せて表示した。これより、TAG レンズの屈折力に対応して観察用光学系前面からおよそ 350mm から 700mm の奥行距離に像を提示できたことがわかる。また、計測された結果は CAD による数値シミュレーション結果とほぼ一致していた。

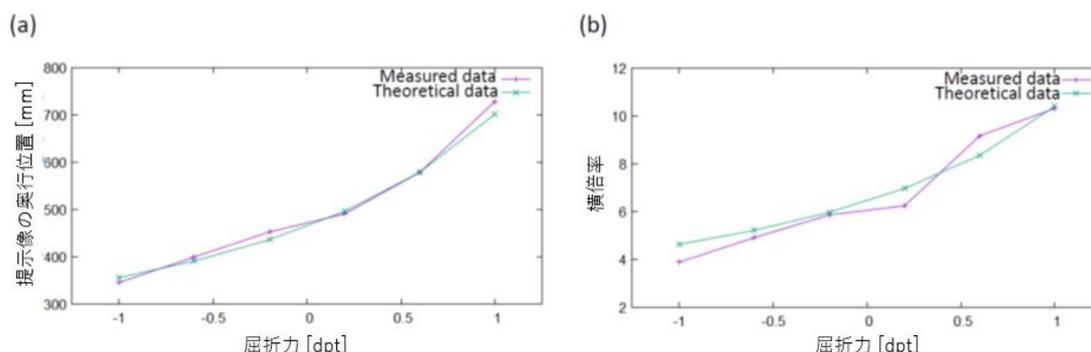


図 4 測定結果。虚像奥行位置(a)と横倍率(b)の屈折力に対するプロット[11]。Measured data は実測値、Theoretical data は光学 CAD による数値計算による推定値を示している。

次にカメラの前にハーフミラーを挿入し、実物体と投影像を重ねて観察できるようにし、6 枚の画像を 6 箇所の異なる奥行位置に提示することで一つの体積を表示する実験を行った。ここでは、アルファベットの「A」が一番近い提示面に提示され、そのあと、B, C, D と順に奥の方に提示され、「F」が一番奥の提示面に提示されるようにした。6 枚の像の表示は DMD の 6 フレームで完了できるため、全体の提示を 1ms 以内に実行することができる。図 5 にこの実験の結果をカメラで観察した結果を示す。比較用に、A と同じ一番近い奥行に右側の紙を設置し、F と同じ一番奥の奥行位置に左側の紙を設置した。図 5 から、確かに A が一番近い場所に提示されており、B, C, の順で奥の方に提示され、F が一番奥に提示されていることが確認できる。

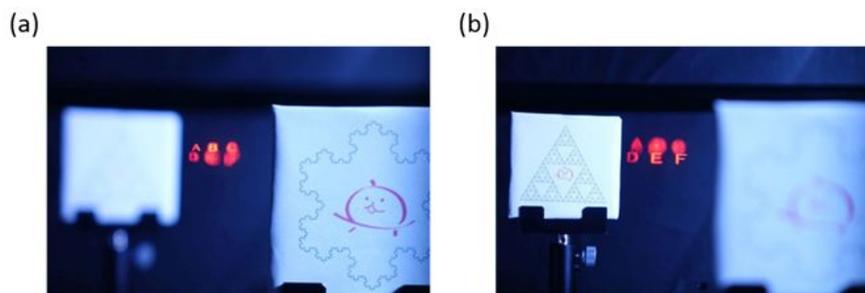


図 5 手前から A, B の順で一番奥に F を表示した状態を写真に撮影した結果[11]。2 枚の写真はそれぞれ、一番手前にフォーカスを合わせた時(a)と、一番奥にフォーカスを合わせた時(b)のものである。

さらに6箇所奥行位置で構成される体積情報を1000Hz以上の更新周波数で更新できることを実験から確かめた。この実験では、上述したシステムにおいて、1ms毎に異なる画像セットを提示することとした。提示した画像は15000fpsの高速カメラで計測することで確かに体積情報を1000Hzで更新できることを確認した。

(3) 応用実験と結果

以上の試作システムを用いて、多階調画像の1000volumes/s高速提示と、動的对象位置に対応した動的映像提示を実現した結果について紹介する。

通常DMDで多階調表示をするためには、DMDの複数のフレームを利用して光量が異なるビットプレーンを提示する必要がある。そのため、多階調の画像表示にはDMDの多くのフレームを利用する必要があり、高速提示が難しくなるという問題があった。そこで従来はどのフレームでも同じ回数であった1フレーム中のパルス発光回数を、フレームごとに変えることで明るさを変調しビットプレーンを表現する手法を提案・開発した[4]。図6左にこの原理を、右に試作システムによる実験結果で、3ビット階調の画像を奥行の異なる2箇所に1000Hzで提示したときの像を撮影したものを示す。

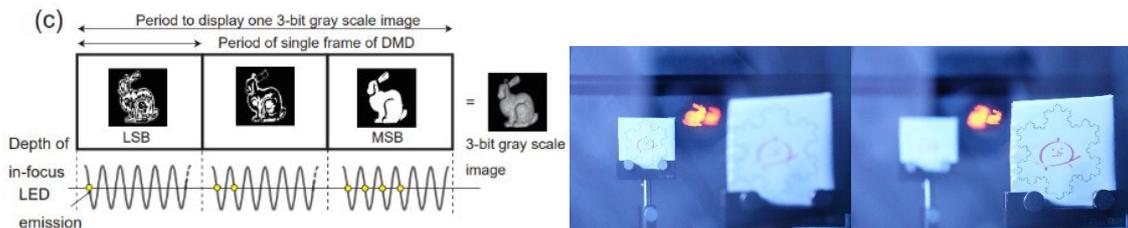


図6 3bit階調画像の高速提示手法の原理(左)と、手前と奥の2か所に同時に3bit階調画像を提示した実験結果の写真(右)

次に奥行方向に移動する物体の位置を追従して、その奥行位置に物体を提示する実験を行った[5]。物体の位置は高速ビジョンシステムを利用し1000fpsで計測し、その位置に合わせてLEDの発光タイミングを制御して虚像を提示する奥行き位置を追従させた。追従動作をしながら提示されている虚像を異なる奥行にフォーカスを併せた2台のカメラで同時に計測し、確かに対象の動きに連動して提示位置が変化していることが確認できた。また、虚像を提示すべき位置となる物体を二つ配置して、どちらに合わせて像を提示するのかを500msごとに切り替えることでステップ応答を計測した。提示される虚像の変化を960fpsの高速カメラで計測したところ、およそ5.6msの遅延で追従していることが確認され、人間の知覚に影響を与えない高速性が実現できていることが確認された。

参考文献

- [1] R. Jota, A. Ng, P. Dietz, and D. Wigdor, "How fast is fast enough?," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '13*, 2013, p. 2291, doi: 10.1145/2470654.2481317.
- [2] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, and M. S. Banks, "Vergence - accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," *J. Vis.*, vol. 8, no. 3, pp. 1-30, 2008, doi: 10.1167/8.3.33.Introduction.
- [3] K. Suzuki, Y. Fukano, and H. Oku, "1000-volume/s high-speed volumetric display for high-speed HMD," *Opt. Express*, vol. 28, no. 20, p. 29455, Sep. 2020, doi: 10.1364/OE.401778.
- [4] 鈴木康平, 深野悠吾, 奥寛雅, "1000-volume/s高速体積表示ディスプレイにおける多ビット画像提示手法の提案," *日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2020 講演予稿集*, 2020, p. 17pB4.
- [5] 深野悠吾, 鈴木康平, 奥寛雅, "1000volumes/s高速体積型ディスプレイによる像提示奥行位置の実物体への追従制御," *第25回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, 2020, pp. 2B1-3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Suzuki Kohei, Fukano Yugo, Oku Hiromasa	4. 巻 28
2. 論文標題 1000-volume/s high-speed volumetric display for high-speed HMD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29455 ~ 29455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.401778	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamato Kazuki, Tanaka Yusuke, Oku Hiromasa, Yasutomi Keita, Kawahito Shoji	4. 巻 28
2. 論文標題 Quasi-simultaneous multi-focus imaging using a lock-in pixel image sensor and TAG lens	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19152 ~ 19152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.394760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 奥寛雅	4. 巻 31
2. 論文標題 高速光学素子と高速画像処理によるダイナミックイメージコントロールとその応用展開	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 46 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 奥寛雅	4. 巻 49
2. 論文標題 高速可変光学デバイスによるダイナミックイメージコントロール	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 256 ~ 262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kohei Suzuki, Yugo Fukano, Hiromasa Oku
2. 発表標題 Vergence-accommodation conflict free near eye volumetric display principle with high-speed display rate of 1000 volumes/s
3. 学会等名 OSA Imaging and Applied Optics Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromasa Oku, Kazuki Yamato, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito
2. 発表標題 Arbitrary Focusing based on Nano-Second Multi-Exposure and TAG Lens
3. 学会等名 The 27th International Display Workshops (IDW'20) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥寛雅, 山登一輝, 安富啓太, 川人祥二
2. 発表標題 共振型液体レンズと露光タイミング制御によるマイクロ秒フォーカシングとその応用
3. 学会等名 一般社団法人映像情報メディア学会 情報センシング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木康平, 深野悠吾, 奥寛雅
2. 発表標題 1000-volume/s高速体積型ディスプレイにおける多ビット画像提示手法の提案
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2020 (OPJ2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深野悠吾, 鈴木康平, 奥寛雅
2. 発表標題 1000volumes/s高速体積型ディスプレイによる像提示奥行位置の実物体への追従制御
3. 学会等名 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (VRSJ2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深野悠吾, 鈴木康平, 奥寛雅
2. 発表標題 透過型HMD のための1000volumes/s 高速体積型ディスプレイの試作と性能評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 (ROBOMECH2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromasa Oku, Kazuki Yamato, Yusuke Tanaka, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito
2. 発表標題 Simultaneous imaging: quasi-simultaneous multi-focus imaging using Lock-in Pixel imager and TAG lens
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies (SIGGRAPH '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥寛雅, 鈴木康平, 春原岳
2. 発表標題 高速HMDのための1000volumes/s高速体積型ディスプレイ原理の提案
3. 学会等名 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (VRSJ2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木康平, 春原岳, 奥寛雅
2. 発表標題 1000volumes/s高速体積型ディスプレイ用光学系の基礎評価
3. 学会等名 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (VRSJ2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 執筆者:64名、技術情報協会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 576
3. 書名 VR / AR技術における感覚の提示、拡張技術と最新応用事例	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 体積型ディスプレイ	発明者 奥 寛雅	権利者 国立大学法人群馬大学
産業財産権の種類、番号 特許、特開2021-43232	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

群馬大学奥研究室 https://www.okulab.org/ Oku Laboratory channel (YouTube) https://www.youtube.com/channel/UC7vJ6ckgT_bnXzKTnWMMGuPQ

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------