

令和 4 年 9 月 13 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02189

研究課題名(和文) MEMS空間光変調器とパルス光照明を用いたホログラム表示技術の研究

研究課題名(英文) Holographic Display Technique Using MEMS SLM and Pulse Illumination

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：ホログラフィーは理想的な立体表示方式であるが、従来の電子的な実現方法では視域が狭いことが問題点であった。本研究では、MEMS空間光変調器をパルス光で変調することで光走査を実現しホログラム表示の視域を拡大する方法を提案し、実験的に40度以上の視域角の実現を実証した。さらに、ダブルパルス法による再生像の光強度の向上を行なった。HOEを用いたモジュール化方法を提案し、表示システムの小型化と再生像のさらなる光強度向上を実現した。カラー表示の実現方法として、RGBカップラを用いる方法とRGBファイバアレイを用いる方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は、光学的なホログラフィーの実現方法を電子的に実現しようとしたため、波長以下の画素ピッチが必要になり、実現が難しかった。本研究では、光学的な実現方法に囚われずに、輻輳調節矛盾を解決する波面再生を実現することで、画素ピッチの微細化を必要としない電子的なホログラム表示を可能にするホログラム表示におけるブレークスルーとなる技術である。

サイバーとフィジカルを融合するSociety5.0の実現やメタパースの普及のためには、VR・AR技術の高度化が必要である。本研究により、視覚インターフェイスデバイスにホログラフィーの利用が可能になり、長時間の利用や若年者の利用が可能になる。

研究成果の概要(英文)：Although holography is an ideal three-dimensional display technique, the narrow viewing zone is one of the main issues of the conventional electronic holographic display techniques. This study proposed the pulse-modulated MEMS SLM which performs the optical scanning for the enlargement of the viewing zone. We have experimentally verified the enlargement of the viewing zone angle to 40 degrees. The double-pulse technique was developed to increase the light intensities of the reconstructed images. The holographic display module using HOEs was also developed to reduce the size of the display system and to further increase the light intensities of the reconstructed image. Two techniques were developed for the color image generation; one employed the RGB coupler and the other employed the RGB fiber array.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ホログラフィー MEMS 空間光変調器 立体表示 光走査

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ホログラフィーは、レンズ等で光線を制御する現在の立体ディスプレイとは異なり、物体からの波面を再生するため真の立体映像を提供できる。そのため、リアルで高精度な立体表示が実現できる。また、従来の立体表示の問題点であった視覚疲労が生じないため、長時間の利用や若年者の利用が可能になる。そのため、医療や設計などのプロフェッショナル分野から、テレビやスマートフォンなどのコンシューマ分野まで幅広い利用が期待されている。

従来の電子的なホログラフィーでは、空間光変調器にホログラムパターンを表示しレーザー光を照明して立体像を再生する。従来法では、光学的なホログラフィーの原理をそのまま電子的に実現しようとするため、微細な画素ピッチによる回折で光を広げて観察範囲(視域)を確保し、画素ピッチと解像度の積で画面サイズを確保する。視域を広げるために画素ピッチを縮小すると画面サイズが小さくなり、画面サイズを大きくするために画素ピッチを拡大すると視域が狭くなる。視域と画面サイズの両方を拡大するためには、微細な画素ピッチをもつ超高解像度な空間光変調器が必要になる。例えば、視域角(視域の大きさ表す角度)を  $30^\circ$ 、画面サイズを 40 インチにするには、 $0.97 \mu\text{m}$  の画素ピッチと約  $764,000 \times 430,000$  の解像度が必要となる(波長  $0.5 \mu\text{m}$ )。スーパーハイビジョンテレビの画素ピッチが約  $0.2 \text{ mm}$  で解像度が  $7,680 \times 4,320$  であることを考えると、実現が極めて難しいと言える。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ホログラム表示の画面サイズと視域角の同時拡大を可能にするため、MEMS 空間光変調器のパルス光照明を用いたホログラム表示技術を確立することにある。

MEMS 空間光変調器の構造を図 1 に示す。表示面に MEMS ミラーが 2 次元配置されている。斜め方向から光を照射し、MEMS ミラーが瞬時に傾きを変えて反射光の方向を変えることで、反射光をオン・オフする。MEMS ミラーを一画素として用い、その 2 次元配置で 2 次元画像を表示する。MEMS ミラーは数  $\mu\text{s}$  と短時間で回転するため、MEMS 空間光変調器は数十 kHz の高いフレームレートで画像を表示できる。通常は、MEMS ミラーは光のオン・オフの 2 値表示を行い、光をオンする時間の長さで階調表現を行なう。

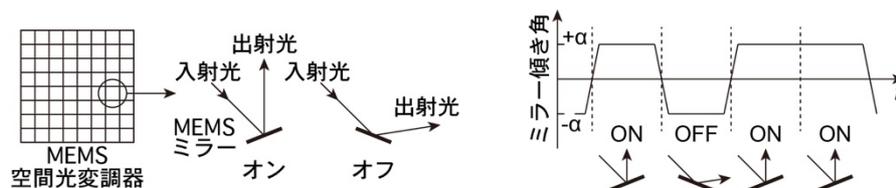


図 1 従来の MEMS 空間光変調器の光変調

本研究では、従来の MEMS 空間光変調器の使い方とは異なり、MEMS ミラーが傾きを変える時間を利用して、図 2 に示すように、この時間内にパルス光を照射する。パルス光は表示面に対して垂直に入射させる。パルス光の照射タイミングを変えると、異なるミラーの傾き角のときにパルス光が反射されるため、反射光の方向が変化する。すなわち、パルス光の照射タイミングの制御で、反射光の走査が実現できる。提案法では、この光走査を利用して視域角を拡大する。現状の MEMS ミラーの回転角は  $\pm 10^\circ$  程度で、この場合に実現できる走査角は約  $\pm 20^\circ$  となり、視域は約  $40^\circ$  に拡大できる。

本研究で提案する方法では、MEMS ミラーの間隔(画素ピッチ)の微細化が必要ないため、これを大きくすることで画面サイズを拡大できる。この場合、視域が縮小される。そこで、図 3 に示すように、ホログラムパターンを高フレームレート表示してパルス光の照射タイミングを適宜変化させることで、小さな視域を空間的に走査して視域角を拡大する。

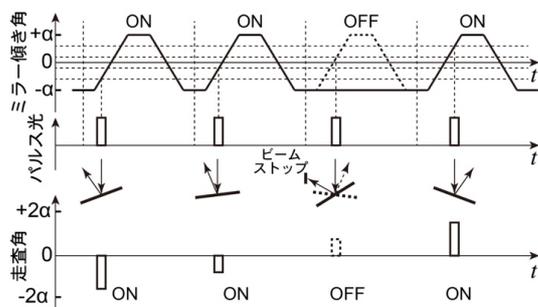


図 2 MEMS 空間光変調器のパルス光照明による光走査

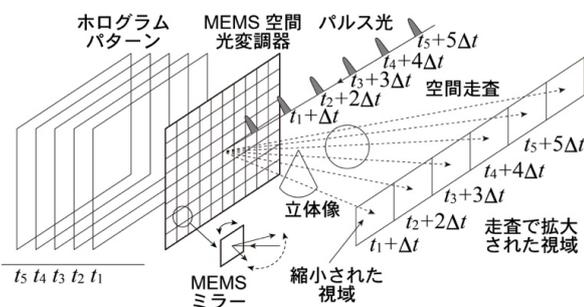


図 3 MEMS 空間光変調器による電子的ホログラム表示

### 3. 研究の方法

#### (1) MEMS 空間光変調器による光走査の実現

最初に、MEMS 空間光変調器による光走査の原理確認を行う。MEMS 空間光変調器としては、ビデオプロジェクタ等で利用されている Digital Micromirror Device (DMD)を用いる。光源にはパ

ルス変調が容易な半導体レーザーを用いる。

実験システムを図4に示す。DMDに同期したパルス光の発生タイミングの制御にFPGAを用いる。黒画像と白画像を交互に表示し、すべてのMEMSミラーを一斉に回転させる。黒画像から白画像に切り替わる際に光パルスを照射する。図5に示すように、MEMSミラーの回転時間を $\tau$ 、パルス光の時間幅を $\Delta t$ とすると、走査点数は $N = \tau / \Delta t$ で与えられる。ただし、ホログラム表示のフレームレートを $f_{3D}$ 、DMDのフレームレートを $f_{DMD}$ で表して、 $N \leq f_{DMD} / 2f_{3D}$ とする必要がある。本研究では、 $f_{DMD} = 22,727 \text{ Hz}$ 、 $\tau = 3.83 \mu\text{s}$ のDMDを用い、パルス幅を $\Delta t = 20 \text{ ns}$ として、走査点数 $N = 192$ の実現する。また、MEMSミラーの傾き角を $\pm \alpha$ とすると最大走査角は $4\alpha$ となる。本研究で用いるDMDは $\alpha = 12^\circ$ のため、最大走査角は $48^\circ$ となる。

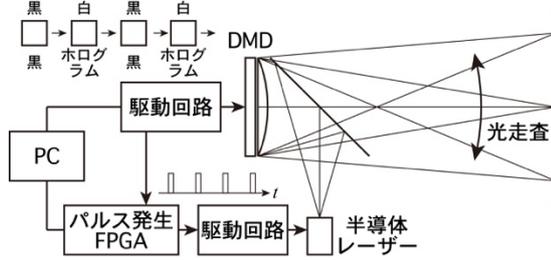


図4 DMDを用いた実験装置

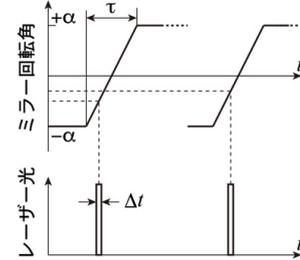


図5 タイミングチャート

## (2) MEMS空間光変調器のパルス光照明によるホログラム表示の確認

つぎに、DMDを用いて、本研究で提案するホログラム表示方式の原理確認を行う。

図4の実験システムを用いて、黒画像とホログラムパターンを交互に表示する。黒画像を挿入することで、一度、すべてのMEMSミラーの傾きをリセットする。ホログラムパターンは、対応する走査角の方向から3次元物体をみた再生像が得られるようにコンピュータで計算する。

光源には波長488nmの半導体レーザーを用いる。DMDのMEMSミラーは対角線を軸に回転するため、DMDを $45^\circ$ 傾けて用いる。走査距離は300mmとする。MEMSミラーのピッチは13.68 $\mu\text{m}$ であるが、この場合の縮小された視域幅は7.57mmとなる。提案法では、走査角がホログラム表示の視域角を与える。走査点数が192であることから、走査ピッチは1.31mmになり、視域角 $48^\circ$ の範囲で縮小された視域を隙間なく並べることができる。

## (3) ダブルパルス法による再生像の光強度向上

提案法では、照明に用いるパルス光のパルス幅をミラーの回転時間より十分短くするため、再生像の明るさが低くなる問題がある。そこで、ダブルパルス法を用いて再生像の光強度を増加させる。

図2で説明した方法では、パルス光はMEMSミラーがオフ状態からオン状態に変わる際に照射していた。提案するダブルパルス法では、図6に示すように、MEMSミラーをオン状態からオフ状態へ戻すリセット時にもパルス光を照射する。ダブルパルス光でMEMS空間光変調器を照明することとで、再生像の光強度を2倍にできる。

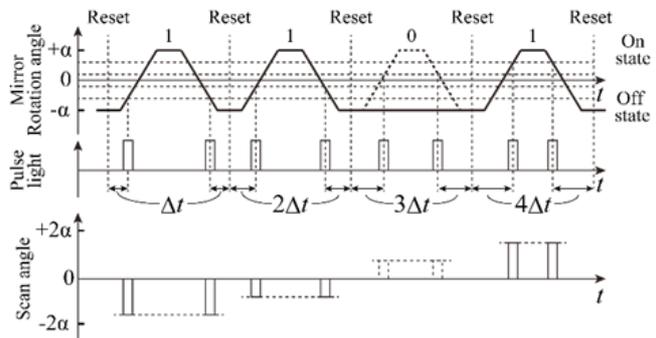


図6 ダブルパルス法

## (4) 表示システムのモジュール化

図4に示すように、パルス変調MEMS空間光変調器を用いたホログラム表示システムでは、ハーフミラーを使用してMEMS空間光変調器を照明するため、システムが大きくなり、光の強度が1/4に低下する問題がある。そこで、ホログラム光学素子(HOE)を用いて表示システムのモジュールを行い、システムの小型化と再生像のさらなる光強度向上を実現する。

HOEを用いた表示システムのモジュール化の原理を図7に示す。半導体レーザーから出射した発散光は導光板に入射し、1枚目のHOEで偏向されると同時に平行光に変換され、導光板内を伝搬する。伝搬したレーザー光は2枚目のHOEで偏向されると同時に収束光に変換されて導光板から出射し、MEMS空間光変調器の表示面を照明する。MEMS空間光変調器で反射された光は、HOEが存在しない導光板の上部を通過し、視域を形成する。HOEを用いてモジュール化した表示システムを図8に示すが、提案法により表示システムの小型化が可能になる。

HOEは、高い波長選択性と角度選択性を持ち、回折効率 $\eta$ は80~90%以上と高い。HOEの回折効率を $\eta$ で表すと、提案法の光の利用効率は $\eta^2$ となる。 $\eta = 0.8$ とすると、提案法の光の利用効率は0.64となる。ハーフミラーを用いた場合の光の利用効率は0.25であるが、これと比較して高い光の利用効率が得られる。

## (5) ホログラム表示のカラー化

パルス変調MEMS空間光変調器を用いたホログラム表示のカラー化を実現する。1台のMEMS空間光変調器に対して、RGBの3色の半導体レーザーでパルス光を順次照射することで、時分割法でカラー表示を実現する。

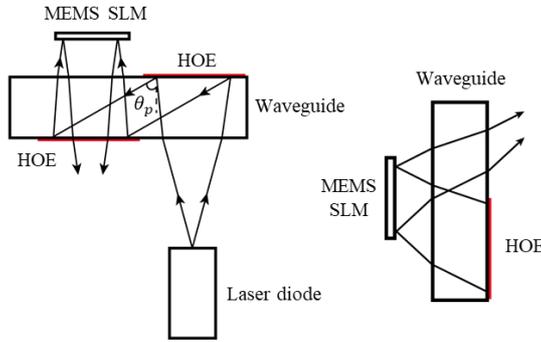


図7 HOEを用いたモジュール化の原理

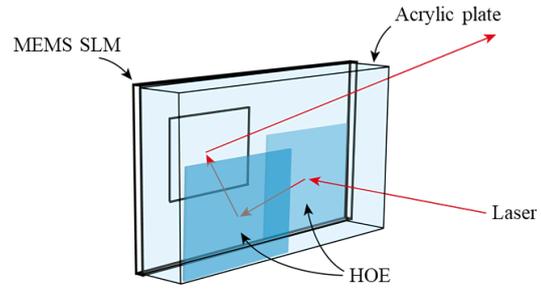


図8 HOEを用いた表示モジュールの外観

本研究では、時間多重化の方法として2つの方法を試みる。一つ目の方法は、図9に示すように、RGBレーザー光を光カップラーで合波する方法である。合波した光でMEMS空間光変調器を照明する。二つ目の方法は、図10に示すように、RGBファイバアレイを用いる方法で、RGBレーザー光で微妙に異なる方向からMEMS空間光変調器を照明する。前者は、RGBで視域が一致しているが、光カップラーによる光の損失がある。後者は、光の損失はないが、RGBで照明方向が異なるため視域に若干のずれが生じる。

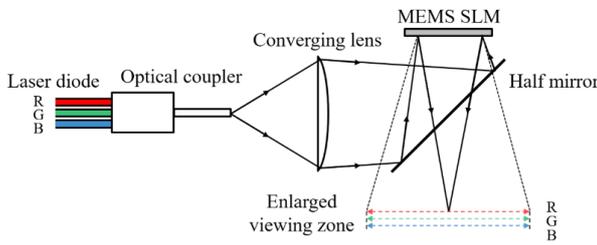


図9 RGBカップラを用いたカラー化

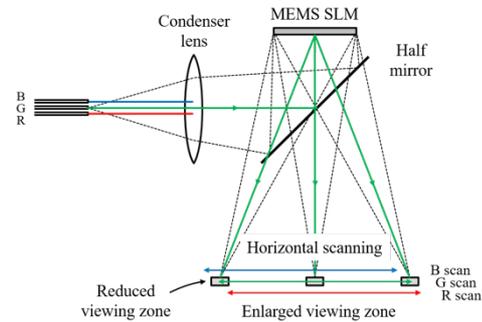


図10 RGBファイバアレイを用いたカラー化

#### 4. 研究成果

##### (1) MEMS空間光変調器による光走査の結果

実験システムの写真を図11に示す。縮小した視域を光走査した結果を図12に示す。±24°の範囲で走査を行なったが、マイナス側の走査端で不要な光分布が生じた。これは、オフ状態のまま回転しないMEMSミラーが、オン状態に向けて回転しているMEMSミラーの影響で振動したためである。そのため、有効な視域は-18°~+24°となり、有効な視域角として42°が得られた。

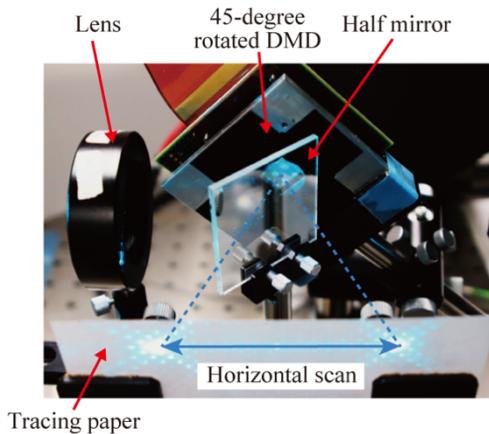


図11 実験システム

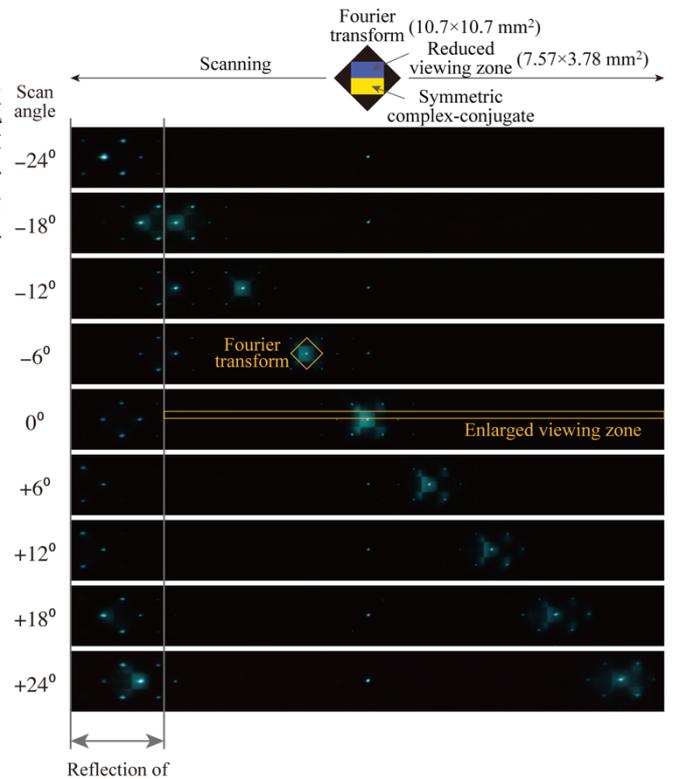


図12 視域走査の実験結果

##### (2) MEMS空間光変調器のパルス光照明によるホログラム表示の結果

つぎに、ホログラム表示を行なった。3次元物体を物体点法で表し、縮小された視域の走査位置に合わせて回折計算を行い、各走査位置に対応したホログラムを計算した。発生した立体像を図13に示す。実験結果より、40°以上の視域で再生像が観察できていることがわかる。再生像の明るさは、暗室環境で観察可能な明るさであった。

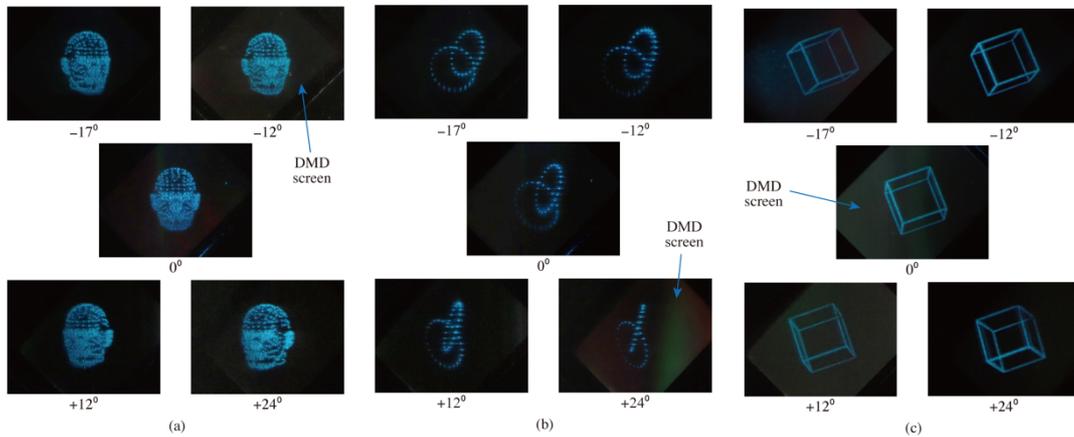


図 13 得られた再生像

(3) ダブルパルス法による再生像の光強度向上の結果

提案した MEMS 空間光変調器のダブルパルス変調を用いた再生像を図 13 に示す。比較のために、従来法を用いた再生像も示した。提案法により、再生像の明るさが向上していることがわかる。拡大された視域の中心の光強度は測定した結果、従来法では  $0.178 \text{ nW}$  であったのに対して、提案法を用いると  $0.352 \text{ nW}$  に向上した。

従来法では、走査の始まりで、回転しない MEMS ミラーの微振動に起因する光強度分布が生じたため、走査の始めを視域として用いることができなかった。ダブルパルス法では、MEMS ミラーの回転時の走査の始まりの領域は、リセット時の MEMS ミラーの逆方向の回転による走査の終わりの領域でカバーできる。そのため、視域角は  $48^\circ$  まで拡大できていることがわかる。

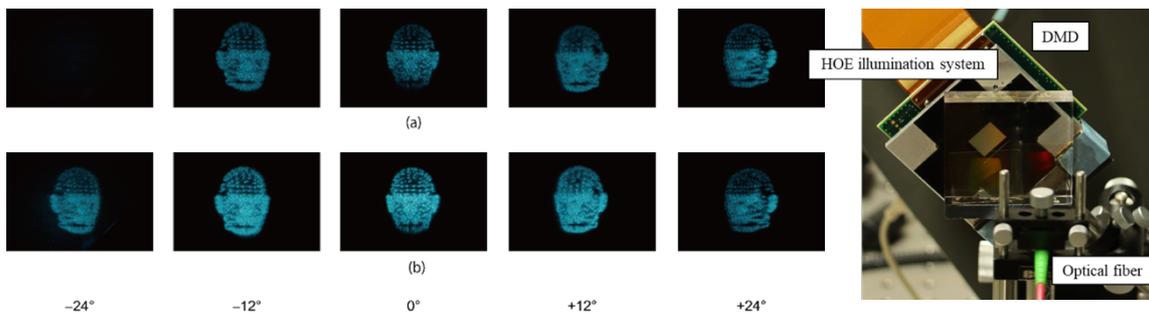


図 14 ダブルパルス法による再生像: (a) 従来法, (b) ダブルパルス法

図 15 モジュール化の結果

(4) 表示システムのモジュール化の結果

HOE を用いてホログラム表示システムをモジュール化した結果を図 15 に示す。モジュール化したシステムで表示した再生像を図 16 に示す。比較のために、従来の表示システムを用いた再生像も示した。再生像の光強度測定した結果、モジュール化したシステムの再生像の光強度は、従来のシステムと比較して 3.2 倍に向上し、通常の室内の照明化でも再生像を観察することができた。

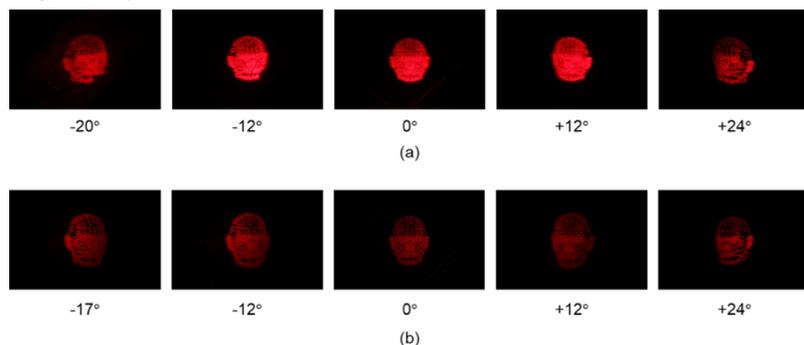


図 16 モジュール化したシステムの再生像: (a) 従来法, (b) モジュール化

(5) ホログラム表示のカラー化の結果

カラー化した再生像を図 17 に示す。同図 (a) が RGB カップラを用いた場合で、同図 (b) が RGB ファイバアレイを用いた場合である。前者は視域角を狭めることなくカラー化が実現できているが、後者は視域角が  $4^\circ$  程度狭くなった。再生像の光強度については、後者の方が前者に比べて大きな光強度が得られた。

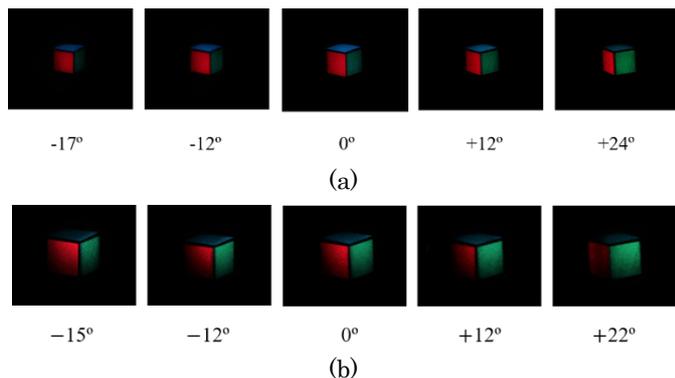


図 17 カラー化した再生像: (a) RGB カップラ, (b) RGB ファイバアレイ

## 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 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sano Junpei, Takaki Yasuhiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Holographic contact lens display that provides focusable images for eyes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 10568 ~ 10568
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.419604	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 Takekawa Yoshitaka, Takashima Yuzuru, Takaki Yasuhiro	4. 巻 28
2. 論文標題 Holographic display having a wide viewing zone using a MEMS SLM without pixel pitch reduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 7392 ~ 7392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.385645	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 該当する
1. 著者名 Liu Shujian, Takaki Yasuhiro	4. 巻 30
2. 論文標題 Gradient descent based algorithm of generating phase-only holograms of 3D images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17416 ~ 17416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.449969	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 Liu Shujian, Takaki Yasuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Optimization of Phase-Only Computer-Generated Holograms Based on the Gradient Descent Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 4283 ~ 4283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10124283	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 首藤玲、高木康博
2. 発表標題 パルス変調MEMS空間光変調器を用いたホログラフィックディスプレイのカラー化
3. 学会等名 立体映像技術研究会(オンライン)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Matsumoto, T. Uruma, and Y. Takaki
2. 発表標題 Holographic Display Using Pulse-Modulated MEMS SLM with HOE Illumination System
3. 学会等名 The 28th International Display Workshops (IDW '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木康博
2. 発表標題 光波を再現するホログラフィーによる究極の映像提示
3. 学会等名 将来のDXに向けた立体映像・音響シンポジウム (映像情報メディア学会) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 潤間俊博、高木康博
2. 発表標題 アイトラッキングによるパルス変調 MEMS SLM を用いたホログラム再生像の光強度向上
3. 学会等名 3次元画像コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本拓巳, 高木康博,
2. 発表標題 MEMS SLMを用いたホログラフィックディスプレイのHOE照明光学系の開発
3. 学会等名 映像情報メディア学会立体映像技術研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Uruma and Y. Takaki
2. 発表標題 Double Scanning Technique to Increase Brightness of Holographic Images Generated by Pulse-Modulated MEMS SLM
3. 学会等名 The 27th International Display Workshops (IDW '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 潤間俊博, 高木康博
2. 発表標題 ダブルパルス変調MEMS SLMを用いた視域走査型ホログラフィーの再生像の光強度向上
3. 学会等名 映像情報メディア学会立体映像技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Takaki
2. 発表標題 Electronic holographic display using MEMS SLMs
3. 学会等名 The 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 潤間俊博, 松本拓巳, 福山智隆, 竹川喜崇, 高木康博
2. 発表標題 パルス変調MEMS SLMを用いたホログラム表示のための計算法
3. 学会等名 3次元画像コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木康博
2. 発表標題 ホログラフィーによる立体表示の基礎と最新動向
3. 学会等名 3次元画像コンファレンス2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Takekawa, Y. Nagahama, Y. Takashima, and Y. Takaki
2. 発表標題 Electronic Holographic Display Using MEMS-SLM with 40 Degree Viewing Zone
3. 学会等名 The 26th International Display Workshops (IDW '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takekawa, Y. Nagahama, Y. Takashima, and Y. Takaki
2. 発表標題 Proposal of holographic display using MEMS-SLM and pulse modulated laser
3. 学会等名 OSA Digital Holography & 3-D Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川喜崇, 長浜 佑樹, 高木 康博
2. 発表標題 MEMS空間光変調器のパルス光照明による電子的ホログラム表示の提案
3. 学会等名 映像情報メディア学会年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究紹介  <a href="http://web.tuat.ac.jp/~e-takaki/research/research_introduction.html">http://web.tuat.ac.jp/~e-takaki/research/research_introduction.html</a>            ホログラムディスプレイ  <a href="http://web.tuat.ac.jp/~e-takaki/research/holographic_display.html">http://web.tuat.ac.jp/~e-takaki/research/holographic_display.html</a></p>
--

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
研究分担者	長浜 佑樹  (Nagahama Yuuki)  (60833598)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・助教    (12605)	

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