

令和元年6月3日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18872

研究課題名(和文)ホログラフィー技術を用いたコンタクトレンズ型ディスプレイの実現方法の提案

研究課題名(英文)Proposal of contact lens display using holography

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) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：拡張現実(AR)技術の表示デバイスとして、現在はシースルー型ヘッドマウントディスプレイが用いられている。本研究では、究極のAR用表示デバイスとして、コンタクトレンズ型ディスプレイをホログラム技術を用いて実現した。コンタクトレンズ型ディスプレイの実現では、ディスプレイをコンタクトレンズ内に置くと目がピント合わせできないことが問題となるが、ホログラムにより目から離れた位置に立体表示することでこれを解決した。本研究では、スケールアップ光学系を作製して、提案した表示原理の有効性を確認した。また、コンタクトレンズに組み込むために必要なレーザーバックライトを開発し、実際のホログラム表示に用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンタクトレンズ型ディスプレイは究極のARディスプレイと考えられているが、コンタクトレンズ内に表示した画像を網膜に結像することができないことが大きな問題となっていた。本研究では、ホログラム技術を用いてこれを解決できることを示した。従来のAR技術では、ゴーグル型のヘッドマウントディスプレイの装着が必要である点が普及の障害になっていたが、本研究によりコンタクトレンズ型ディスプレイの表示原理が明らかになったため、AR技術が広く普及することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In today's augmented reality (AR) technology, head mounted displays are used for display devices. In this study, as an ultimate display device for AR technology, a contact lens display was realized using holography. The issue for the contact lens displays is that eyes cannot focus on the display existed in a contact lens. In the proposed technique, holograms were displayed on the display to produce three-dimensional images apart from the eyes to solve the above mentioned issue. The scale-up optical system was constructed and the effectiveness of the proposed technique was verified. The laser backlight was also developed which is required for the holographic contact lens display. The hologram reconstructed images were obtained using the developed laser backlight.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：コンタクトレンズ型ディスプレイ ホログラム 拡張現実 シースルーディスプレイ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 最近、現実の風景にデジタル情報を重ねて表示する AR (拡張現実) 技術の開発が盛んになっている。AR 技術を用いると、人間と機械の溝を直感的・視覚的に埋めることができる。今後の人工知能などのコンピュータ技術の急速な進歩に伴い、AR 技術の重要度はさらに増すと考える。現在は、頭部に装着するヘッドマウント型のシースルーディスプレイが AR 用の表示デバイスとして用いられている。AR 用ディスプレイの究極形がコンタクトレンズ型シースルーディスプレイであるが、本研究ではこれを可能にする新しい光学技術の実現にチャレンジする。

(2) コンタクトレンズ内に液晶素子や LED アレイなどの表示デバイスを組み込む研究は、既に行われている。コンタクトレンズ型ディスプレイを実現する場合の最大の光学的課題は、図 1(a) に示すように、瞳の位置にディスプレイを置いても、そもそも、近すぎて目がピント合わせできないことにある。この問題に対する有効な解決法は未だ知られていない。本研究では、この問題を、ホログラフィー技術を用いて解決することにチャレンジする。図 1(b) に示すように、ホログラフィーは、物体から発せられた光の波面を記録・再生する立体表示技術であり、立体像をホログラムから離れた位置に表示できる。そこで、本研究では、同図(c)に示すように、コンタクトレンズ内の表示デバイスにホログラムを表示することで、目がピント合わせ可能な距離に画像を表示する。

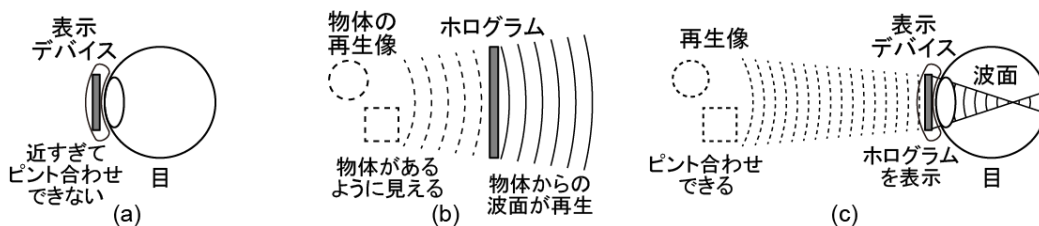


図 1 ホログラムを用いたコンタクトレンズ型ディスプレイの表示技術

(3) 図 2 に、米国 Google 社が開発しているスマートコンタクトレンズを示す。当初はディスプレイとして開発を開始したが、上述の理由でディスプレイの組み込みは断念し、グルコースセンサを組み込んだ血糖値モニタとして開発している。ただし、コンタクトレンズへの電子デバイスの組み込みやワイヤレス給電による動作は実現できている。

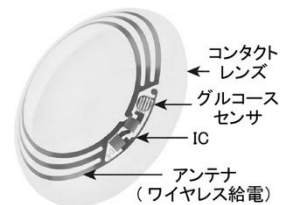


図 2 Google 社のスマートコンタクトレンズ

### 2. 研究の目的

(1) 図 3 に、本研究で提案するコンタクトレンズ型シースルーディスプレイの表示部の構造を示す。空間光変調器、レーザーバックライト、および偏光板で構成される。ホログラム表示に用いる表示デバイスを空間光変調器と言い、ビデオプロジェクタなどで使用される小型液晶パネルと同様な構造をもつ。ただし、本研究では、光の位相のみを変調する位相変調型の空間光変調器を用いる。空間光変調器にホログラムパターンを表示し、レーザーバックライトで照明することで、波面が再生される。空間光変調器は特定方向の直線偏光を変調するので、レーザーバックライトはこの変調方向に偏光したレーザー光を出射する。

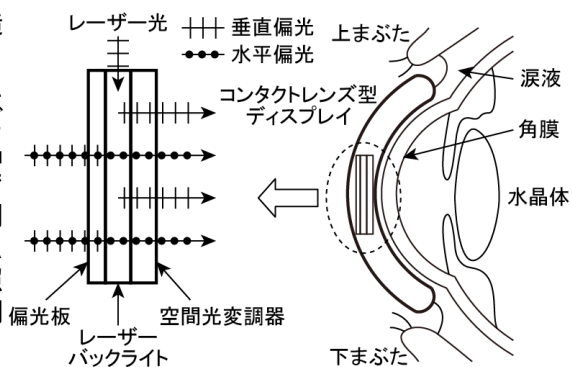


図 3 コンタクトレンズ型ディスプレイの構造

(2) 偏光板は、外界からの光のうち変調方向と直交した直線偏光を透過し、この光は空間光変調器で位相変調されずに透過する。また、位相変調型の空間光変調器は光の振幅は変調しないので光の減衰が少ないため、シースルー機能を実現できる。

(3) 本研究は、(1)提案するシースルーディスプレイの表示原理の確認と、(2)コンタクトレンズへの組み込みの実現性の検証を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 表示原理の確認のために、図 4 にスケールアップ光学系を作製する。空間光変調器には、透過型の液晶変調素子を用いる。偏光板とレーザーバックライトの代わりに、偏光ビームスプリッタを用いる。これは、空間光変調器の変調方向の直線偏光を反射し、外界からの光のうち変調方向と直交する直線偏光を透過する。目を模したレンズとイメージセンサで、網膜像を評価する。

(2) 本研究では、位相型ホログラムを用いることで光の吸収をなくし、外界からの光をシースルーして見ることを可能にする。通常の振幅型ホログラムでは共役像やゼロ次光などの不要光が発生するのに対して、位相型ホログラムは光の波面を直接制御するため不要光が生じないという特徴がある。しかし、物体からの波面の振幅を1にする単純な位相化を行うと、再生像の画質が低下する。そこで、本研究では、図4に示すフーリエ反復アルゴリズム (Appl. Opt. 21, 2758 (1982))を用いて、再生像の画質向上を図る。これは、ホログラムと再生像の間にフーリエ変換の関係があることから、フーリエ変換と逆フーリエ変換を繰り返し行い、ホログラム側では振幅を一定(位相化)とする拘束条件を与え、再生像側では強度分布(すなわち振幅分布)を目的画像とする拘束条件を与える繰り返し最適化手法である。

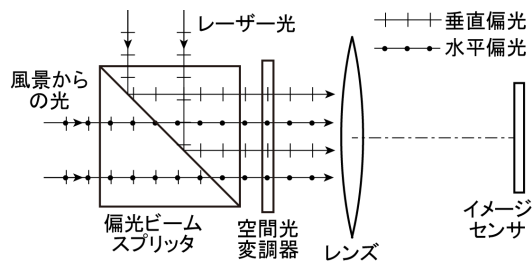


図4 スケールアップ光学系

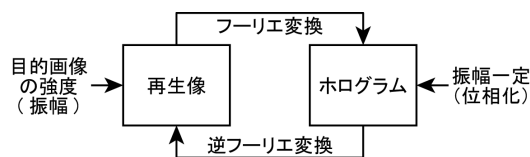


図5 位相型ホログラムの最適設計

(3) 提案するシースルーディスプレイの各構成要素について、コンタクトレンズ内への実装の可能性を検討する。液晶素子については、既に研究例 (H.D.Smet, et al.: EuroDisplay 2013, Paper No 3.1(2013))があるのでこれを参考にす。また、必要な解像度や画素ピッチについても検討する。偏光板にはポラロイドなどの高分子材料の利用を考える。レーザーバックライトについては研究例がないので、以下で研究を行う。

(4) 液晶を用いた空間光変調器は、外部レーザー光で照明する必要がある。本研究では、図3に示す薄型のレーザーバックライトを開発する。これは、導光板とホログラムカップラの組み合わせで実現される。レーザー光は光ファイバから導光板へ供給する。レーザーバックライトの作製法を図6(a)に示すが、平行光のレーザー光を物体光として、光ファイバから出射され導光板内を全反射して伝搬するレーザー光を参照光として、これらの干渉縞をホログラム材料に記録する。ホログラム材料を現像したものがホログラムカップラとなり、同図(b)に示すように、光ファイバからのレーザー光(参照光)が入射すると、平行光(物体光)が再生され、これを空間光変調器の照明光として用いる。

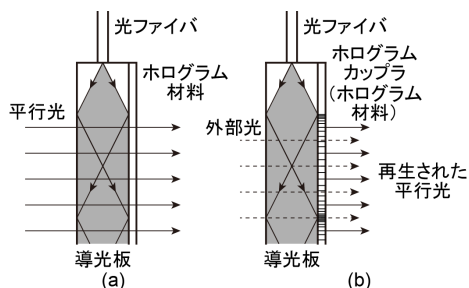


図6 レーザーバックライト

(5) 現状でコンタクトレンズに組み込めるサイズの空間光変調器は存在しないので、通常のホログラムフィルムにホログラムを記録し漂白して透明化した位相型ホログラムを用いて実証実験を行う。

#### 4. 研究成果

(1) スケールアップ光学系を作製した。空間光変調器には、HoIoEye社のLC2012を用いた。これは、市販されているなかで唯一の透過型の位相変調型空間光変調器である。解像度は1,024 × 768で、画素ピッチは36 μmである。ただし、ツイストネマチック液晶を用いているため、純粋な位相変調は行えず、位相変調とともに偏光が回転する。そこで、円偏光を用いて実験を行なった。光源には波長633 nmのHe-Neレーザーを用いた。実験装置を図7に示す。人間の目を模したカメラで撮影した撮影した網膜像を図8に示す。ホログラムの再生像である「光」の文字と、背景が同時に観察できることがわかる。以上のように、スケールアップ光学系を用いて、本研究で提案する表示原理の有効性を確認できた。

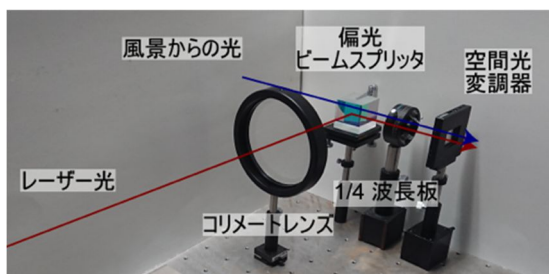


図7 スケールアップ光学系

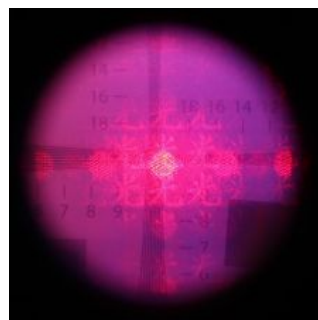


図8 実験で得られた網膜像

(2) 位相型ホログラムの計算法を開発した。フーリエ反復アルゴリズムであるGSアルゴリズムを用いて、位相型空間光変調器に表示する位相分布を計算することを可能にした。図8の実験結果は、求めた位相分布を用いた実験結果である。しかし、フーリエ反復アルゴリズムは、位相分布を求めるためにフーリエ変換を100回程度行う必要があるため、計算に時間を要することが問題であることが判明した。そこで、新たな位相型ホログラムの最適計算法として、Gradient Descent法に基づく方法を提案した。これは、ディープラーニングの学習過程で用いられるバックプロパゲーション法で利用されるチェーンルールを利用して再生像の誤差をもとに位相分布の修正量を決める方法である。この最適計算法により、GSアルゴリズムより高速なホログラム計算が可能になった。最適化の際の評価関数の変化の様子を図9に示す。また、求めた位相分布の例を図10に示す。

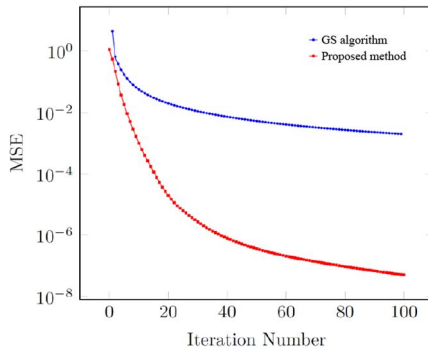


図9 位相最適化の過程

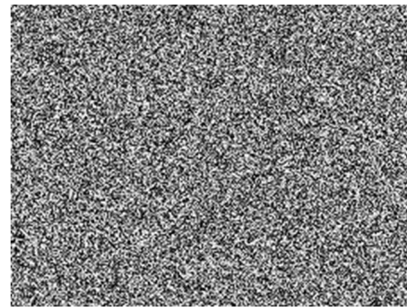


図10 最適化した位相分布

(3) コンタクトレンズ内への液晶素子の組み込みについて検討した。液晶材料を曲面状に形成し画像表示する技術は既の実現されているので、これを参考にして、液晶素子にホログラムを表示して目から離れた位置に画像情報を表示するために必要な解像度と画素ピッチについて検討した。網膜の中心窩(大きさ1 mm)の範囲に画像表示する場合には、画素ピッチ10.2  $\mu\text{m}$ で解像度が350  $\times$  350程度の空間光変調器が必要であるが、これは透過型の構成により現状の技術で実現できる。網膜上の画像表示範囲を3 mmまで広げると、解像度が約1,000  $\times$  1,000程度で画角が約10度の表示が可能になるが、画素ピッチを3.4  $\mu\text{m}$ まで縮小する必要があるため、開口率が低くなる課題があることが判明した。

(4) 空間光変調器をレーザー光で照明する薄型のレーザーバックライトを、ホログラフィック光学素子(HOE)を用いて実現した。HOEの材料には、フォトポリマーを用いた。設計したレーザーバックライトの構造を図11に示す。樹脂基板の表面にフォトポリマー層を形成し、プリズムにより全反射するレーザー光を樹脂基板内に導入し、これと樹脂基板外からのレーザー光をフォトポリマー層で干渉させることでHOEを作製した。フォトポリマーには、Covestro社製のBayfol HX200を用いた。膜厚は16  $\mu\text{m}$ である。光源には、波長633 nmのHe-Neレーザーを用いた。HOEは紫外線処理により透明化を行なった。図12に作製したレーザーバックライトを示す。光の利用効率は約38%であった。

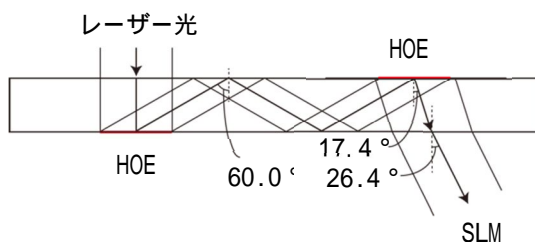


図11 レーザーバックライトの設計

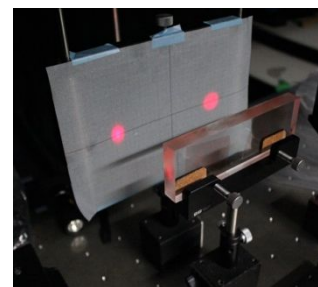


図12 レーザーバックライトの実験

(5) ホログラムフィルムの記録したホログラムを漂白処理して、(4)で作製したレーザーバックライトで照明する実験を行なった。その結果、再生像が観察できることを確認した。さらに、電子的なホログラム表示システムである水平走査型ホログラフィーの実験システムの空間光変調器のレーザーバックライトとして利用して、再生像が得られることを確認した。得られた再生像を図13に示す。ただし、シースルー型ではないため、背景は観察することはできない。

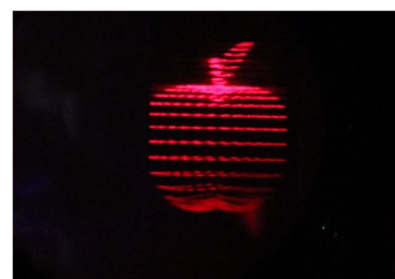


図13 ホログラムの再生像

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

Y. Takaki and N. Fujimoto, "Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display," Optics Express, vol. 26, no. 18, 22985-22999 (2018). (査読あり)

DOI: 10.1364/OE.26.022985

〔学会発表〕(計 5件)

Y. Nagahama, N. Fujimoto, Y. Takaki, "Acceleration of hologram generation for holographic retinal view display using a GPU", OPTICS & PHOTONICS International Congress 2019, Yokohama, Japan, 24 Apr. 2019.

長浜 佑樹, 藤本 直大, 高木 康博, "GPUを用いたホログラフィック網膜投影型ディスプレイのリアルタイム表示", 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東工大, 2019年3月11日.

S. Liu, Y. Nagahama and Y. Takaki, "An algorithm for CGH using gradient descent method", 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東工大, 2019年3月11日.

藤本直大, 長浜佑樹, 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へのアイトラッキング機能の導入", 映像情報メディア学会冬季大会, 東工大, 2018年12月21日.

S. Liu, T. Imamura, Y. Nagahama, and Y. Takaki, "Flat-panel type holographic near-eye display," 映像情報メディア学会冬季大会, 東工大, 2018年12月21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〕

ホームページ

[http://web.tuat.ac.jp/%7Ee-takaki/research/holographic\\_display.html](http://web.tuat.ac.jp/%7Ee-takaki/research/holographic_display.html)

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

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、研究者個人に帰属されます。