

令和元年6月13日現在

機関番号：23604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16104

研究課題名(和文) 伝送エラーによる画質劣化の影響のない計算機合成ホログラムの無線伝送システムの開発

研究課題名(英文) Development of Wireless Transmission System Considering Transmission Errors for Computer-Generated Holograms

研究代表者

山口 一弘 (Yamaguchi, Kazuhiro)

公立諏訪東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：90649063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CGHの無線伝送時に生じる伝送エラーがCGHの再生像へと与える影響を明らかにするために下記の3項目について研究を行なった。

「伝送エラーによるノイズの理論的解析」、「シミュレーション再生・光学再生による画質劣化の解析」、  
「CGH無線伝送システムおよびCGH無線伝送用アルゴリズムの開発」

これらの結果より、伝送エラーはスペckルノイズと同様に3次元空間中全体へとノイズのような画質劣化の影響を与えること、再生像の画質劣化と伝送エラー率との関係性を明らかにし、実環境下におけるCGH無線伝送時の実現性について検討を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CGHの計算方法やCGHを表示する光学系に関しては盛んに研究されているが、計算したCGHを表示装置へと伝送する研究については数少なく、未解明な点が多かった。本研究では、伝送時に発生する伝送エラーがCGHの再生像へと与える画質劣化の影響を検討し、理論的・実験的にその影響について研究を行なった。伝送エラーがCGH自身・CGHからの再生像へと与える影響を明らかにし、実環境下においてCGHの無線伝送の実現性について検討した。これにより、計算したCGHの伝送の自由度が向上し、HMDベースのCGH表示などへの応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Holography is a three-dimensional display technology, and it reconstructs natural three-dimensional objects. Computer-Generated Holograms (CGHs) are holograms generated by using computer simulations of light-waves based on the principle of recording process of the holography. A lot of researches have been reported about calculating algorithms for generating CGH and optical systems for enlarging viewing zone and visual field of optical reconstructed objects. However, few studies have reported on transmitting of CGH.

In this study, wireless transmission system for CGH was developed, and influence of transmission errors was analyzed. CGH data was transmitted based on IEEE 802.11a standard wireless transmission system, and the data including some transmission errors was obtained. SNRs of light-waves and reconstructed objects were evaluated. Moreover, we discussed parameters of CGH wireless transmission under actual environments.

研究分野：ホログラフィ

キーワード：3次元画像 計算機合成ホログラム 無線伝送システム

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

計算機合成ホログラム (CGH : Computer-Generated Hologram) は、ホログラフィの記録過程における光波の物理現象に基づき、計算機の数値シミュレーションによって生成されたホログラムである。CGH には、ホログラフィと同様に立体視に関わる人の目の生理的要因を完全に満足するという特徴を持つほか、シミュレーションにより任意の仮想物体を表示可能という利点がある。また、CGH を空間光変調器 (SLM : Spatial Light Modulator) に表示することで、従来のホログラフィと同様に光学的に再生像を表示することができる。

近年の CGH 研究では、主として CGH 計算の高速化やリアリスティックな物体を表示するための計算アルゴリズムと、表示物体の大きさ（視野）と観察可能範囲（視域）の拡大化のための光学系に関する研究が報告されている。これに対して、CGH の伝送に関する研究は数少なく、未解明な点が多い。一般にデータの伝送時には、エンコーディング・デコーディング技術、伝送プロトコルや伝送アルゴリズムといった技術が必要不可欠となる。

CGH の伝送に関して、文献[1, 2]では簡易的な CGH 伝送について報告されているが、無線伝送システムが実環境に比べてあまりにも不十分であり、また肝心の再生像の画質劣化については言及されていない。データに伝送エラーが含まれる CGH を表示すると、伝送エラーは CGH 自身に対してノイズとして現れる。そして、そのノイズを含んだ CGH から再生される立体像にも同様にノイズが生じ、結果として再生像の画質劣化が生じてしまう。このため、伝送エラーによって引き起こされる再生像の画質劣化への影響を解明し、再生像の画質劣化を防がなければ、鮮明な再生像を観察できる CGH 無線伝送システムは実現できない。

### 引用文献：

- ① T. J. Naughton, et. al., Appl. Opt., 42, 4758-4764 (2003)
- ② Li-Chien Lin, Optics Communication, 281(5), 1008-1016 (2008)

### 2. 研究の目的

本研究では、CGH 無線伝送技術のまだ解明されていない伝送エラーと再生像の画質劣化との関係性を解明し、画質劣化の影響のない CGH 無線伝送システムを開発することを目的とした。これを実現するために、無線伝送時に発生する伝送エラーのモデル化、伝送エラーによる CGH 自身の画質劣化の理論的解明、シミュレーション再生・光学再生による再生像の画質劣化の実験的解明を行い、CGH 無線伝送アルゴリズムの開発を行なった。そして、CGH の計算から、伝送、表示までの CGH 無線伝送システムを開発し、伝送エラーの影響のない CGH 無線伝送の実現性について検討を行なった。

### 3. 研究の方法

伝送エラーによる画質劣化の影響のない CGH 無線伝送システムを開発するために、下記の項目について研究を行なった。

#### (1) 伝送エラーによるノイズの理論的解析

CGH の無線伝送時における伝送エラーの影響を解明するために、無線伝送と無線伝送時に生じる伝送エラーのモデル化を行い、伝送エラーと CGH 自身、および CGH から再生される光波との関係性を理論的に明らかにした。

#### (2) シミュレーション再生・光学再生による画質劣化の解析

理論的に導出した 3 次元光波分布をシミュレーション再生・光学再生により比較解析した。これにより、伝送エラーが 3 次元空間全体へと及ぼすノイズの影響を評価した。

また、伝送エラーによるノイズを含んだ CGH データから、シミュレーション再生・光学再生を行い、シミュレーション再生像と光学再生像における画質劣化を解析した。これにより、伝送エラーが再生像へと及ぼすノイズの影響を評価した。

#### (3) CGH 無線伝送システムおよび CGH 無線伝送用アルゴリズムの開発

CGH の計算装置、伝送装置、表示装置を開発し、CGH の計算から表示までの CGH 無線伝送装置を開発した。CGH の計算・伝送には膨大な計算量が要求されたため、GPGPU を用いて実装を行なった。また、実環境に近い無線伝送路をモデル化し、CGH 伝送用アルゴリズムを開発し、実現性について検討を行なった。

## 4. 研究成果

### (1) 伝送エラーによるノイズの理論的解析

CGHの無線伝送時における伝送エラーをモデル化し、伝送エラーを含んだCGHから再生される光波について解析を行なった。ある矩形の開口(大きさ:  $d \times d$ )からの光波は、開口からの伝搬距離に反比例した強度分布となる光学特性が得られることがわかっている。また、開口の矩形の大きさ  $d$  により回折角が定まることがわかっている。これらの光学特性に対して、開口面に伝送エラーが含まれた場合を考え、数式化を行い、波動光学に基づく数値シミュレーションにより3次元空間中の光波分布を評価した。

図1にCGHからの伝搬距離対SNR特性の一例を示す。この結果は、フレネルゾーンプレートに対して、1箇所のみ伝送エラーが発生したと仮定した場合の結果である。伝送エラーがない場合のフレネルゾーンプレートから再生された光波を元信号(理想状態)としてSNRを測定した。CGHからの伝搬距離が長いほど伝送エラーによる光波分布への影響が少なくなることを確認した。

無線伝搬路の雑音を考慮し、AWGNを用いた伝搬路モデルにおけるCGHの無線伝送下において、計算機シミュレーションにより伝送エラーを含んだCGHの生成および伝送エラーを計測した。得られたCGHを用いて光波分布を計算し、伝送エラーがないCGHから再生される光波分布と比較してSNRを計測した。

図2に計測した伝送エラー率対SNR特性の一例を示す。伝送エラー率が小さいほど元信号に近い光波分布になるため、光波分布の品質は高くなる。特に伝送エラー率が0.1%よりも小さい場合には、SNRは30dB以上となっていることが確認できた。

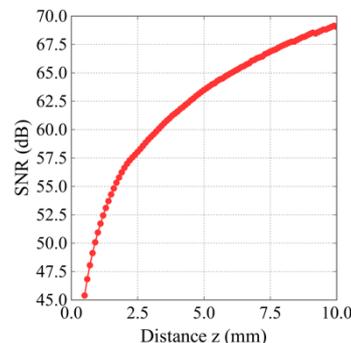


図1: 伝搬距離対SNR特性  
(フレネルゾーンプレート)

### (2) シミュレーション再生・光学再生による画質劣化の解析

理論的解析時と同様に、フレネルゾーンプレートに対して1箇所のみ伝送エラーを与えた場合と、AWGN環境下における伝送エラーが生じた場合において、CGHからシミュレーション再生および光学再生を行い、再生像の画質を評価した。

図3にシミュレーション再生像の一例を示す。CGHに伝送エラーが含まれている場合、スペックルノイズのように再生像全体へとノイズが広がることが確認できた。また、SNRを計測したところ、伝送エラー率と再生像の画質劣化には、(1)の理論的解析時と同様の傾向があることが確認できた。

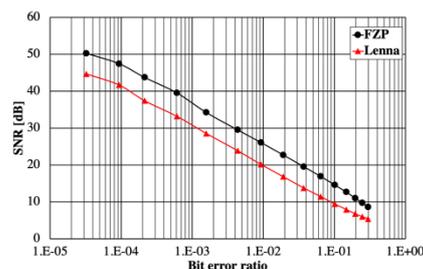


図2: AWGN環境下における伝送エラー率対SNR特性

### (3) CGH無線伝送システムおよびCGH無線伝送用アルゴリズムの開発

(1)、(2)の成果から確認されたCGHの再生像に許容される伝送エラー率をもとに、CGHの無線伝送用のアルゴリズムの開発を行った。そして、CGHの計算から、伝送、表示までのシステムを開発し、再生像の画質評価を行なった。

CGHの無線伝送には、IEEE802.11a通信規格の無線LAN(Wi-Fi)を利用した。11aでは、最大通信速度が54Mbpsであり、無線伝搬路の通信品質によって通信速度が可変としてデータの送受信をするのが一般的である。評価のため、通信速度を固定し送受信後のCGHから伝送エラー率を計測し、再生像の画質評価を行なった。

通信速度が最大の54Mbpsとなる環境下において測定を行なったところ、他の無線LANシステムからの電波干渉が限りなく少ない環境下では伝送エラー率がほぼ0%となった。しかし、一般的な環境下では、他の無線LANシステムからの電波干渉を受けるため、通信速度を低速にする必要があることを実環境下で確認した。また、フレームレートやCGHのピクセル数などのパラメータ次第では、計算したCGHを伝送エラーを抑えつつ無線伝送によりほぼリアルタイムで再生できることを確認した。



図3: シミュレーション再生像

### (4) 今後の展望

本研究では、モノクロの再生像を対象にして、伝送エラーによる画質劣化の影響を検討したが、カラーCGHについても同様に伝送エラーによる画質劣化の影響を解明しなければならないと考える。また、これに伴い、無線伝送時に要求される通信速度やCGH計算の計算量などが増大することが予想される。これらの点については今後の検討課題と考える。

また、通信速度に関しても、IEEE802.11a通信規格よりも高速通信が可能なIEEE802.11ac通信規格が普及してきており、さらに高速なIEEE802.11ax通信規格も策定中である。伝送エラー

率を抑えつつ、より高速な無線通信が見込まれるため、今後はこれらの通信規格においても検討する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

- ① Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto, "Simulated Analysis of Light-waves Considering Transmission Errors of Wireless Transmission System on CGH for Holographic Display", International Workshop on Photonics Polymer for Innovation, 58, 2018年10月
- ② Kazuhiro Yamaguchi and Yuji Sakamoto, "Quality Analysis of Light-Waves for Wireless Transmission System of CGHs", The 18th International Meeting on Information Display, 627, 2018年8月
- ③ Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto, "Quality Analysis of Light-Wave Distributions Considering Transmission Errors for Wireless Transmission System of Computer-Generated Hologram", The 24th International Display Workshops, 2017年12月
- ④ 山口一弘, 水戸部将也, 坂本雄児, "計算機合成ホログラムの無線伝送システムにおける伝送エラーが光波分布へと与える影響の解析", 第16回情報科学技術フォーラム, 2017年9月12日

[その他]

専門誌における解説記事

山口一弘, 坂本 雄児, "電子ホログラフィにおける再生像の画質評価 : 伝送エラーによって生じる画質劣化の解説", 画像ラボ 28(11) 13-18 2017年11月

※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。