

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：23604

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20326

研究課題名（和文）フルカラー動画像表示が可能な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 a wireless transmission system for computer-generated holograms for displaying full-color 3D images

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、フルカラーCGHの計算（撮影・記録）、無線伝送、表示を組み合わせたシステムを開発し、伝送エラーによる画質劣化の影響のないフルカラーCGH無線伝送システムの実現を目的とした。この研究により、CGHの無線伝送時に発生する伝送エラーがCGH自身へと与える影響や再生像が伝送エラーによって受ける画質劣化の影響をシミュレーションおよび光学再生実験により解明し、伝送エラーによる画質劣化の影響のないフルカラーCGHの無線伝送を行い、フルカラー3次元動画像のストリーミング再生の実現性について検討を行った。

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、伝送時に生じる伝送エラーがCGHの再生像へ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おこなった。特にフルカラー再生像に与える画質劣化について、波動光学に基づく数値解析により画質劣化の光学的特徴を明らかにし、実環境下におけるCGHの無線伝送とフルカラー再生の実現性について検討を行った。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。

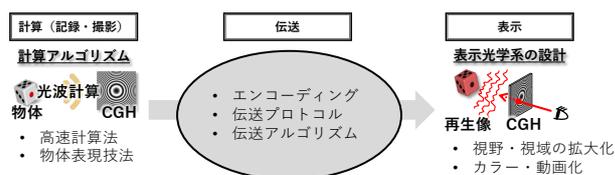
研究成果の概要（英文）：The objective of this research was to develop a system that combines full-color CGH computation (capturing and recording), wireless transmission, and display. In order to realize a full-color CGH wireless transmission system that is free from the effects of image quality degradation caused by transmission errors. Through this research, the effects of transmission errors that occur during wireless transmission of CGH on CGH itself and the effects of image quality degradation caused by transmission errors on reproduced images were clarified through simulations and optical reconstructed experiments. The feasibility of wireless transmission of full-color CGH without image quality degradation due to transmission errors and the feasibility of streaming of full-color 3D moving images were investigated.

研究分野：ホログラフィ

キーワード：計算機合成ホログラム CGH 電子ホログラフィ 無線伝送システム GPGPU

1. 研究開始当初の背景

計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下, CGH とよぶ) 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を中心とした研究や, 表示する再生像の大きさ (視野) と再生像を観察可能な範囲 (視域) の拡大化のための光学系の設計手法を中心とした研究が報告されている (右上図). 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, 伝送プロトコルやアルゴリズム, エンコーディング技術といった技術が必要不可欠であるが, これまでの CGH では, 計算装置と表示装置間でのデータのやり取りには, 無圧縮・無劣化でデータのコピーがされていることが一般的であった. しかしながら実用化のためには, CGH データの伝送技術は必要不可欠であり, CGH データの伝送に適したアルゴリズムを検討する必要がある.

これまでに, 伝送エラーが CGH 自身に与える影響の理論的な解析, シミュレーションによる 3 次元空間中の光波分布の解析, 劣化した CGH データから再生される再生像のシミュレーション再生, 光学再生による画質劣化の評価を実施してきた (JSPS 科研費 JP16K16104). この研究を通じて, 通信品質を考慮した伝送アルゴリズムを用いることで, 画質劣化のない CGH 無線伝送を実現できることを示したが, モノクロでしか再生像を表示できず, また無線通信時の通信品質・伝送速度の観点から高画質な立体映像のストリーミング再生には制限が生じていた. また, モノクロ再生時とフルカラー再生時では, 伝送エラーによるノイズの見え方が異なるといった光学的な特性も挙げられていた.

右図の例に示すように, 伝送エラーが生じることによって CGH 自身に一般的な画像と同様なノイズが発生する. これにより劣化した CGH から再生された再生像には 3 次元空間中に光学的なノイズとしてあらわれ, その結果画質劣化が引き起こされる. このような伝送エラーが引き起こす画質劣化の影響は具体的に何か? 特に CGH では再生像の画質劣化へと及ぼす影響は何か? これらは検討し解明しなければならない問題である.

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, CGH 無線伝送システムを開発することを目的としている. これを実現するために, 無線伝送時に生じ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, とくに再生像のフルカラー表示化について検討を行った.

3. 研究の方法

本研究では, 下記の研究項目を実施した.

- (1) 伝送エラーによる光波分布の理論的解析を行い, モノクロ再生時, フルカラー再生時における伝送エラーをモデル化し, CGH 自身の劣化, 劣化した CGH から再生される光波に生じるノイズの光学的特性を明らかにする.

(2) シミュレーション再生・光学再生による実験を通じて、伝送エラーによって再生像にあらわれるノイズを定量的に評価し、再生像に生じるノイズの光学的特性を実験的に明らかにする。

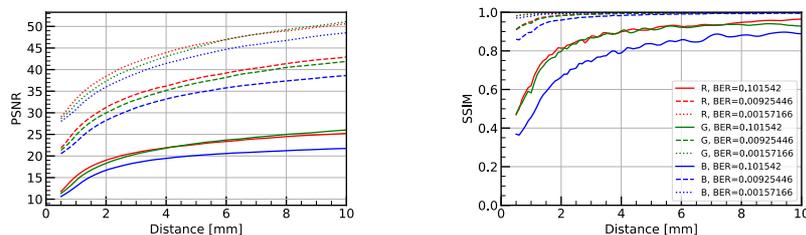
(3) CGH 計算・伝送・表示を統合した CGH 無線伝送システムの開発を行う。また、フルカラー動画像のストリーミング表示に適した CGH 伝送用のアルゴリズムを開発し、CGH の計算から伝送、表示まで、伝送エラーによる画質劣化の影響のないフルカラーCGH 無線伝送の実現性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 伝送エラーによる光波分布の理論的解析

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 と光の波長 λ により、回折角が定まることがわかっている。これにより、開口の大きさ、光の波長により伝送エラーによって生じた開口からの光波（ノイズ成分）が定まる。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。

下図に CGH からの（左図）伝搬距離対 PSNR 特性、（右図）伝搬距離対 SSIM 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。フルカラーの波長（R, G, B）ごとフレネルゾーンプレートを CGH 計算し、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 PSNR および SSIM 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でき、また波長により PSNR・SSIM とともに数値にわずかな差は見られるが、同様の傾向であることを確認した。これより、伝送エラーによる再生像の画質劣化の影響は、特定の波長（色）に依存せず、どの色で再生したとしても同様の画質劣化傾向にあることが確認できた。



(2) シミュレーション再生・光学再生

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、無線伝送区間が 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。

下図に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ck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、PSNR・SSIM 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。

フルカラー再生時において、波長（色）ごとの差を確認したところ、画質劣化による影響は上述したものと同様の傾向であることが確認できた。しかし、人間の目の波長感度特性までは考慮できておらず、この点は今後の検討課題としたい。



(3) CGH 計算・伝送・表示を統合した CGH 無線伝送システムの開発

(1), (2)の結果から確認された CGH の再生像に許容されう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おこなった. 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った.

CGH の伝送には, 1000GBASE-T 規格の有線接続, IEEE802.11a 規格の無線接続を使用した. 11a では, 最大伝送速度が 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.

リンク速度が最大の 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 に対して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. 一方, 有線接続の場合では, リンク速度として 1Gbps が確保できているため, 無線伝送時よりも高いフレームレートで伝送が可能であることを確認した.

(4) 今後の展望

本研究では, カラーの再生像を対象として, 伝送エラーによる画質劣化の影響を検討した. モノクロ時と同様な画質劣化の影響があり, 特定の波長に依存しないことを確認した.

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 通信規格も普及してきている. 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

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kazuhiro Yamaguchi and Yuji Sakamoto
2. 発表標題 Wireless Communication System for Computer Generated Holography: Trends and Key Technologies in Wireless Communication System
3. 学会等名 International Workshop on Holography and Related Technologies 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamaguchi and Yuji Sakamoto
2. 発表標題 Evaluation of Quality of Light-Waves considering Transmission Errors for Wireless Transmission System in CGHs
3. 学会等名 Imaging and Applied Optics Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口一弘, 坂本雄児
2. 発表標題 計算機合成ホログラムの無線伝送システムにおけるカラー表示に向けた一検討
3. 学会等名 2020年度 IEICE 信越支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamaguchi, Yuji Sakamoto
2. 発表標題 Quality Analysis of Light-Waves considering Transmission Errors of Various Images for Wireless Transmission System of CGHs
3. 学会等名 THE 26TH INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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