

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K00282

研究課題名(和文) 計算機合成ホログラムの画質評価方法に関する研究

研究課題名(英文) A study on the quality evaluation of computer-generated hologram

研究代表者

吉川 浩 (YOSHIKAWA, Hiroshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：20182735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ホログラフィによる3次元像の記録と再生は、現在知られている3次元画像の中で唯一物理的にも正確で、見ただけでは本物と区別がつかない方式である。しかし、その画質の評価方法の国際的な規格はまだ存在していない。そこで、本研究では画質評価の方法を提案し、適用例として計算機合成ホログラムの計算方法による違いを評価した。その結果、これまで経験的に高画質とされていた方式が客観的にも正しいことが裏付けられた。また、国際規格を検討しているグループに加わり、議論に参加した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の高臨場感3次元ディスプレイとして光の干渉や回折を利用したホログラフィ方式が研究されている。この方式は、光の波長程度の高精細な表示用デバイスが必要で、画素数もハイビジョンより3桁以上が要求される。実用化に向けては、この制限を緩和するためにいろいろな工夫がされているが、それによって3次元画像としての画質が犠牲になることもある。そこで、表示システムの性能を正しく評価するために、ホログラフィの画質評価方法を確立することは重要である。

研究成果の概要(英文)：Holography is the only method that is physically accurate among the currently known 3D images and is indistinguishable from the real object just by viewing at it. However, there is no international standard for evaluating the image quality. Therefore, in this study, we proposed a method for evaluating image quality, and evaluated the difference in the calculation method of computer-generated holograms as an application example. As a result, it was confirmed that the method that was empirically considered to have high image quality is objectively correct. I also joined a group considering international standards and participated in discussions.

研究分野：光工学

キーワード：画質評価 計算機合成ホログラム 3次元映像 ホログラフィ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

最近、3D プリンタにより物体の3次元情報から3次元模型を容易に作成できる技術が注目されている。一方で、3次元画像表示技術のひとつであるホログラフィは、光の干渉・回折を利用して物体からの光波全ての情報を記録再生する技術であり、両眼視差、輻輳、焦点調節などの人が立体視をするときの生理的要因を全て満たすことができる。3D プリンタで出力した模型は触ることができるが、ホログラムからの再生像には触れないことが欠点ともいえる。しかし、ホログラムは平面状のガラスやフィルムをベースとして塗布された薄い感光材料に記録されているため、保管のためのスペースが少なく済み、持ち運びも容易である点など、3D プリンタより有利な点も多い。

ホログラムは、完全な3次元画像の記録と再生が可能な現在知られている唯一の方式であり、究極の3次元画像ともいわれる。しかし、その画質を客観的に評価する方法は標準化されておらず、観察者の主観による評価に頼っているのが現状である。ホログラムに関する標準化としては、平成23年1月に日本工業規格として、JIS Z 8791「ホログラムの回折効率及び関連する光学特性の測定方法」、JIS Z 8792「ホログラムの記録特性測定方法」が制定された。また、この規格を元にして国際標準化機構 ISO/TC 172/SC 9/WG 7 を通して ISO 17901-1 および ISO 17901-2 として、申請者がプロジェクトリーダーとなり標準化のための作業を行い、平成27年7月に制定された。しかし、これらの標準化はホログラムの回折効率、すなわちホログラムに照射した光に対する像として回折した光の割合であり、ホログラム記録材料の評価や、ホログラムを光学素子として使用する場合の評価には有用であるが、ホログラムからの3次元画像の評価にはあまり有用とは言えない。3次元ディスプレイの特性評価の国際標準化としては、韓国の全北大学の金男教授をプロジェクトリーダーとする IEC のプロジェクトがあるが、ホログラムは含まれていない。すなわち、ホログラムに関してはいわゆる業界標準や学会標準的なものも含めて、主観的評価法も客観的評価法も標準化がなされていないのが現状である。

本研究では、ホログラムからの再生像の画質の客観的な評価方法を検討し、製品や研究成果を公平で正当に評価することでこの分野の学術的な発展を促進するようにする。

2. 研究の目的

3次元物体データから3次元像を再生するための計算機合成ホログラムからの画質はこれまで主観的にしか評価されていなかった。また、レーザで記録したホログラムも含め、ホログラムの画質評価については公的な標準化はなされておらず、明確な業界標準も学会標準も存在しない。そこで、以下の項目を研究の目的とした。

- (1) ホログラフィの画質評価方法の提案と有効性の検証。
- (2) 計算機合成ホログラムの再生シミュレーションによる計算方法や振幅型と位相型の画質の比較。
- (3) 計算機合成ホログラムの光学再生による画質の評価。
- (4) 国際的な標準化の検討。

3. 研究の方法

- (1) ホログラフィの画質評価方法の提案と有効性の検証。

ホログラフィは3次元画像であるが、まずは評価方法の確立されている2次元画像の評価方法を参考にして、被評価画像が元の画像からどの程度変化しているかを、最大信号対雑音比 (PSNR) および構造的類似度 (SSIM) により評価する。PSNR は画像の違いを誤差として統計的に評価するため、計算が容易である利点があるが、その差異は必ずしも人間の知覚とは一致せず、SSIMの方がより人間の知覚に近い結果が得られるといわれている。これらの数値指標による客観的な評価方法が、人間の主観的評価と一致するかどうかについても比較を行う。再生像の忠実度だけでなく、ホログラフィでは回折効率も重要である。回折効率とは、再生のためにホログラムに照射した光の輝度に対する、再生像の輝度の比である。

3次元画像としての評価は、再生像を奥行き方向に多重断層に分割、各奥行き面で2次元再生像として評価を行う。

- (2) 計算機合成ホログラムの再生シミュレーションによる計算方法や振幅型と位相型の画質の比較。

計算機合成ホログラムの計算方法には、物理現象を忠実に模擬する複素振幅による計算方法や、実数のみによる計算、近似を用いた高速計算方法などがあり、これらの再生像の画質を再生シミュレーションにより比較する。振幅型ホログラムとは光の干渉による強弱を記録材料の透過率として記録するものであり、これを漂泊して位相型とすることで再生時に光の吸収がなくなるため明るい再生像が得られる。この振幅型と位相型の再生像の画質を比較する。

- (3) 計算機合成ホログラムの光学再生による画質の評価。

3次元表示のためのホログラフィは、最終的には光学的に再生した像を観察するので、その評価は重要である。本研究では、ハードコピーとしてホログラムプリンタで出力したホログラムと、液晶デバイスにホログラムの干渉縞を表示して再生した像の評価を行う。

- (4) 国際的な標準化の検討。

標準化については、国内・国外の研究者と連携して検討していく。

4. 研究成果

(1) ホログラムの画質評価方法の提案と有効性の検証。

ホログラムの再生像の忠実度を評価するために最大信号対雑音比(PSNR)および構造的類似度(SSIM)を用いる。ただし、ホログラムの回折効率が異なると再生像の明るさも変化してしまうので、原画像と被評価画像の輝度の平均輝度が一致する様に補正したうえで評価を行う方法を提案した。

(2) 計算機合成ホログラムの再生シミュレーションによる計算方法や振幅型と位相型の画質の比較。

まず、振幅型ホログラムに対して、複素数で厳密な計算を行った場合と、実数のみの計算による再生像を比較した。従来から、実数のみの計算の方が雑音となる成分を除去できるので画質が改善されることが予想されていた。ホログラムからの再生像を数値シミュレーションにより評価した結果、厳密な計算では SSIM の最良値が 0.966 であるのに対し、実数のみの計算では 0.997 とより高い値が得られることが分かった。ここで、SSIM が 1.0 ならば 2 つの画像は同一で、0.9 以上ならその違いはほとんどわからないといわれている。両計算方法を回折効率で比較すると厳密計算では 0.07% と非常に暗い像になってしまうが、実数のみの計算での回折効率は 0.56% となり、厳密計算より 8 倍明るくなった。また、振幅型の正弦波回折格子の最大回折効率の理論値は 6.25% であり、実数のみの計算での 0.56% はこの値の十分の一以下である。これについても、従来から干渉縞のトーンカーブを非線形変換してコントラストを上げることで改善できることが知られている。そこで、本研究でもコントラスト強調を行ったホログラムの画質評価を行った。その結果、コントラスト強調を行って回折効率を上げることができるが、その分画質が低下することを明らかにできた。SSIM が 0.9 となるコントラスト強調での回折効率は 2.7% となり、変換前より 4.8 倍明るくすることができた。

位相型ホログラムについても同様の比較を行った。厳密な計算では SSIM の最良値が 0.964 で回折効率が 0.9% であるのに対し、実数のみの計算では SSIM は 0.87 と低く回折効率は 6.9% と高い値となることが分かった。実数のみの計算で位相変調度を低減させると回折効率は低下するが SSIM は上昇する。そこで、SSIM が厳密計算と同じ 0.964 になるまで位相変調度を低減させたところ、回折効率は 3.15% となり、厳密計算と同じ SSIM で 3.5 倍明るい像が得られることが分かった。

SSIM による客観的な画質評価が妥当であることを検証するため、17 名の観察者による妨害評価による主観評価(DMOS: Degradation Mean Opinion Score)との比較を行った結果

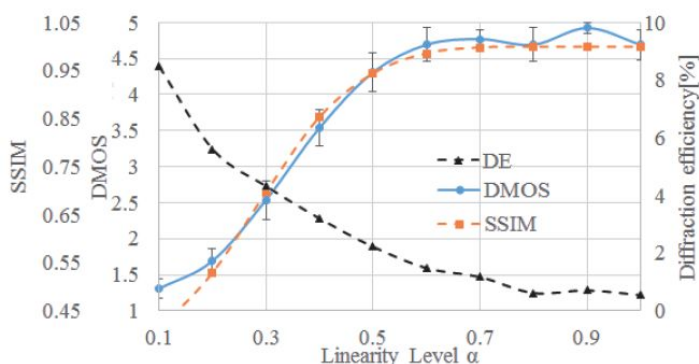


図1 振幅ホログラムの非線形変換に対する回折効率 (DE)、構造的類似度 (SSIM)、主観評価値 (DMOS) の変化

を図1に示す。振幅型ホログラムを非線形変換により再生像の忠実度を制御し、主観評価により画像の劣化が気にならない評価値4以上となる範囲と、SSIMで高忠実度の目安となる0.9以上となる範囲がほぼ一致した結果、SSIMによる客観的評価が有効であることが確認できた。

3次元画像としての評価方法としては、干渉縞のホログラムから再生される3次元像の奥行きを変えながらそれぞれの平面で2次元画像として数値シミュレーションにより再生し、元のホログラムと被評価ホログラムとの違いをSSIMにより評価した。その結果、同一ホログラムなら各断層でのSSIM値はほぼ一致することが分かったので、平均値により評価すれば十分であるとの見通しを得た。

(3) 計算機合成ホログラムの光学再生による画質の評価。

数値シミュレーションにより得られた結果は、光学再生像でも同様な傾向となることを確認した。ただし、光学再生の場合はレーザ光源のコヒーレンス(干渉性の良さ)に起因する粒子状の雑音や、光学系の調整不足などによるコントラストの低下や像の歪が加わり、これによる画質の低下が加わってしまう。また、SSIMは画像のずれや大きさの変化に敏感なので、

光学再生像をカメラで取り込む際にも条件の違いにより計測結果に差が出てしまうなど問題があることが明らかになった。また、ホログラムの干渉縞をプリンタで出力あるいは液晶パネルに出力する場合は入出力特性の非線形性によりコントラストが変換されてしまい、これも画質に影響が出ることが分かった。これらの問題は、視点を変えると表示システムの性能評価に利用できる。

3次元画像としての光学再生像の評価では、ホログラムから再生される3次元像の奥行きを変えながらそれぞれの平面で2次元画像としてイメージセンサにより撮像し、元のホログラムと被評価ホログラムとの違いをSSIMにより評価した。

(4) 国際的な標準化の検討。

静止画像の圧縮で知られるJPEGのグループがホログラムやライトフィールドなどの3次元画像の圧縮の国際規格に向けた検討をすでに行っていたので、この検討の会合に何回か参加した。現状では、干渉縞情報をどう扱うかなど基本的な検討を行っている段階であるが、本研究でも検討しているSSIMを評価指標として用いる方法を採用している。

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 4件）

1. 著者名 吉川 浩	4. 巻 48
2. 論文標題 ホログラフィと符号化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 541-544
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Takeshi、Yoshikawa Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 High Resolution Computer-Generated Rainbow Hologram	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1955(1~11)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app8101955	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 吉川 浩	4. 巻 69
2. 論文標題 光学とホログラム技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 表面技術	6. 最初と最後の頁 176~180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4139/sfj.69.176	査読の有無 無
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 Hua Hangbo、Yamaguchi Takeshi、Yoshikawa Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Partially Overlapping Printing with Digital Filter to Improve Quality of Volume Hologram Printer - Numerical Simulation -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3963~3963
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app10113963	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14件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Hangbo Hua, Takeshi Yamaguchi, and Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Partially Overlapping Printing to Improve Image Quality of Volume Hologram Printer -Numerical Simulation -
3. 学会等名 Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Image quality evaluation of partially bleached hologram
3. 学会等名 Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Toward international standards on evaluation of holograms
3. 学会等名 SPIE Proceedings of Applied Optical Metrology III (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 浩
2. 発表標題 ホログラムの画質評価と国際標準化の動向
3. 学会等名 日本光学会ホログラフィックディスプレイ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 浩
2. 発表標題 ホログラフィと符号化
3. 学会等名 2019年度 第47回画像電子学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Review on objective image quality evaluation of computer-generated holograms
3. 学会等名 10th International Conference on Information Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa, Takeshi Yamaguchi, Takumi Iwamoto
2. 発表標題 Improvement on printed image fidelity of fringe printer for computer-generated holograms
3. 学会等名 11th International Symposium on Display Holography 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川浩
2. 発表標題 デジタルホログラフィ技術を用いる3D映像表示
3. 学会等名 三次元映像のフォーラム第124回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植竹啓貴, 吉川浩, 山口健
2. 発表標題 計算機合成ホログラムにおける客観的評価方法の妥当性検証
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa, Hiroki Uetake and Takeshi Yamaguchi
2. 発表標題 Validation of objective image quality evaluation for computer-generated hologram
3. 学会等名 SPIE Photonics West (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa, Hiroki Uetake and Takeshi Yamaguchi
2. 発表標題 A Study on Objective Image Quality Evaluation of Computer-Generated Hologram
3. 学会等名 International Workshop on Holography and Related Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植竹啓貴, 吉川 浩, 山口 健
2. 発表標題 構造類似度を用いた計算機合成ホログラムの客観的評価方法の検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会映像表現&CG研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroki Uetake, Takeshi Yamaguchi, Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Image quality evaluation and control of computer-generated hologram with structural similarity index
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshikawa
2. 発表標題 Computer-generated hologram for 3D display
3. 学会等名 4th International Conference on Optical and Wireless Technologies (招待講演)
4. 発表年 2020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
研究 分担者	山口 健 (YAMAGUCHI Takeshi) (90434125)	日本大学・理工学部・准教授 (32665)	

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