

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06380

研究課題名(和文) デジタル位相共役技術を用いた簡便な光複素振幅生成法の3Dディスプレイへの応用

研究課題名(英文) 3D optical projection with generation method of optical complex amplitude using digital phase conjugation technology

研究代表者

舟越 久敏 (Funakoshi, Hisatoshi)

岐阜大学・教育学部・准教授

研究者番号：50413711

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)：新しい光複素振幅生成法である空間クロスモジュレーション法を用いた簡便な3次元ディスプレイシステムの実現を目指し、再生画像の高画質化・大型化を目標として新たな光学系を提案しその性能を評価することを目的として研究を行った。本研究で構築した高速基本動作シミュレータを用いて、新たに提案する光学系による3次元表示システムの性能について評価を行った結果、従来光学系と同様に3次元表示能力を有すること、画素ピッチが粗い拡散板を用いた場合においても、従来型と同程度の画質が得られること、従来型と比較して3倍程度大きな投影画像が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光の位相情報のみで、位相情報だけでなく強度情報も含めた光複素振幅の生成を行うため、簡便な光学系により光複素振幅の生成が可能となる。この光複素振幅生成技術は、光複素振幅検出技術と組み合わせることによって、3次元ディスプレイだけでなく様々なフィールドにおいて、光複素振幅制御を用いた新しい応用技術の登場に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：This research aims at evaluating 3D display performance with the spatial cross modulation (SCM) method, that is our simple generation method of an arbitrary complex amplitude distribution, using new optical configuration. First, a high-speed digital encoder and a high-speed basic motion simulator for 3D display system were constructed by using General-purpose computing on graphics processing units (GPGPU). Next, 3D display performance of the SCM with newly proposed optical configuration was evaluated using the basic motion simulator. As a result, we have clarified the following: The new SCM has a 3D display capability as is the case with the conventional SCM. The same image quality as the conventional SCM can be obtained with the new SCM even if a diffuser with a coarse pixel pitch is used. A projected image about three times larger than that of the conventional SCM can be obtained with the new SCM.

研究分野：位相共役光学，光情報処理

キーワード：デジタル位相共役光学 デジタルホログラフィ 3次元ディスプレイ 超解像表示

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ホログラフィーによる 3 次元ディスプレイ技術は、裸眼でかつ両眼に視力差があったとしても自然な立体像を観察することが可能である。これは、ホログラムが輝度情報だけでなく位相情報も記録し再現できること、すなわち光複素振幅場を記録し生成できることに起因する。

光複素振幅場を生成する最も一般的な方法として、計算機合成ホログラム (CGH) を空間光変調器 (SLM) に表示する方法が挙げられる。この方法は、単一の SLM で光複素振幅の生成が可能であるが、解像度と光利用効率が低い。この問題を解消する生成方法として、キノフォームという生成方法が古くから提案されているが、3 次元像の再生空間が小さく、3 次元像の波面に拡散性を持たせるために付加したランダム位相によりスペックルノイズが発生し、再生画質の低下を招いてしまう。また最近では、誤差拡散法などの最適化処理によるノイズ低減手法や、2 台の位相型 SLM を用いた完全な光複素振幅生成法などの素晴らしい手法が提案されているが、計算量的負荷の増大や光利用効率の減少を招いており、簡便な処理法および光学系で解像度と光利用効率が高い光複素振幅生成法は申請者の知る限りまだない。

申請者の研究グループでは、新しい光複素振幅生成法として「空間クロスモジュレーション (SCM) 法」を提案している。SCM 法は、ランダム拡散板による空間位相変調技術と位相型 SLM によるデジタル位相共役再生技術を組み合わせた手法で、その基本動作はコンピュータ上で任意の複素振幅場を散乱位相画像にエンコードする過程とエンコードされた複素振幅場を光学的にデコードする過程で構成される (図 1)。SCM 法は、高い空間解像度と高い光利用効率を実現し、さらにはスペックルノイズが生じない光複素振幅場の生成が可能であるという優れた性能を発揮する。申請者は、SCM 法が有する優れた性能を生かした新しい 3 次元ディスプレイシステムの構築を目指している。

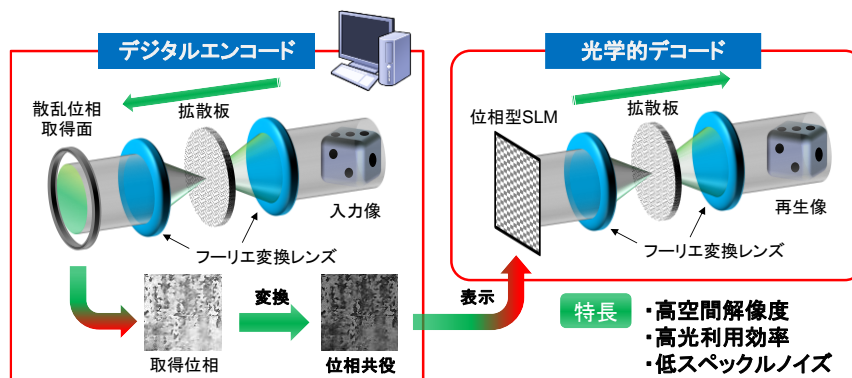


図 1 空間クロスモジュレーション (SCM) 法を用いた 3 次元ディスプレイ

これまでに、図 2 に示される SCM 法による 3 次元物体表示を想定した実験を行い、その実験結果から SCM 法が 3 次元表示に応用可能であることを示している。この実験では、拡散板を画素ピッチ $20\mu\text{m}$ の位相型 SLM で代用したため拡散効果が弱く、図 2(b) に示される画像の大きさは数 mm 程度であった。非常に細かいピッチの拡散板を用いることにより、再生像を大きくすることができるが、それは振動に対して脆弱になることを意味しており、現状では SCM 法の性能が十分に発揮されていない。したがって、SCM 法の優れた性能に加え、従来法よりも大きな再生像を得るためには、根本的な光学系の改良が必要である。

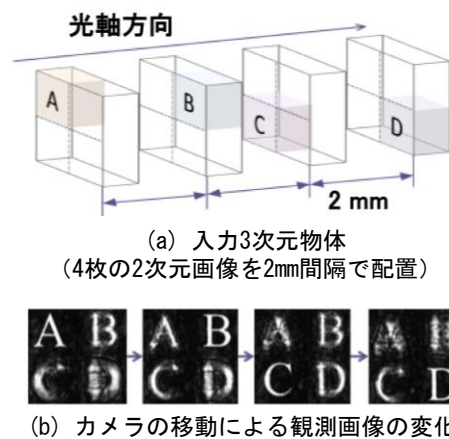


図 2 SCM 法による 3 次元表示の実験結果

2. 研究の目的

新しい光複素振幅生成法である空間クロスモジュレーション法を用いた簡便な 3 次元ディスプレイシステムの実現を目指している。本研究では、

- (1) デジタルエンコード過程だけでなく光学的デコード過程も含めた 3 次元ディスプレイの基本動作シミュレータによる性能評価システムを構築する
- (2) 再生画像の高画質化・大型化を目標として光学系を改良した空間クロスモジュレーション法について、改良の効果およびその性能を評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 再生画像の大型化を目標とした光学系の改良

図3にSCM法による3次元表示の初期型光学系(4-f型)を示す。SCM法では、空間位相変調を施した光波をフーリエ変換後の空間で拡散させることにより、変換後の面上における空間位相分布を最大限に活用して元物体の振幅および位相情報を埋め込むことが重要となる。図3に示した光学系では、空間位相変調を施す位置は入力像の空間スペクトル分布が現れる面となっており、入力光波の大半はこの面の中心に集中する。そのため、フーリエ変換後の面において、十分に拡散した光波分布を得るためには、非常に細かい空間位相分布を有する拡散板が必要となる。

図4に単レンズ型SCM法の概略図を示す。この光学系では、入力光波の実空間領域において空間位相変調が実行される。そのため、図3の光学系と比較して空間位相変調を施す拡散板の領域が大きくなり、入力物体の形状や位相分布に左右されることがなく、十分な拡散効果が得られると考える。また、図2の光学系ではフーリエ変換レンズは1つでよいことになり、光学系も簡素化できる。

(2) GPGPUによるデジタルエンコーダと基本動作シミュレータの構築

図5に単レンズ型SCM法のデジタルエンコード過程と光学的デコード過程の概略図を示す。本研究では、汎用GPU(GPGPU)を利用して、高速デジタルエンコーダと、改良した光学系の性能を評価するための基本動作シミュレータを構築する。

(3) 基本動作シミュレータを用いたSCM法の性能評価

(2)で構築したSCM法による3次元表示の基本動作シミュレータを用いて、以下の項目について評価する。

- ・単レンズ型SCMの3次元表示能力
- ・投影画像の画質と大きさ
- ・光複素振幅の再現性

4. 研究成果

(1) 単レンズ型SCM法の3次元表示能力

本研究で提案する単レンズ型SCM法が、3次元物体の表示に有用であることを確認するために、デジタルエンコード過程だけでなく光学的デコード過程までを含めた基本動作シミュレータによる3次元表示シミュレーションを行った。

この3次元表示シミュレーションを実行する光学配置や計算条件などを図6に示す。入力像として、光軸方向に変調面から10cm, 30cm, 50cm, 100cmの位置に図6に

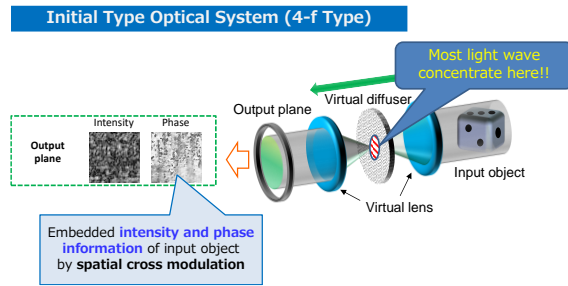


図3 SCM法による光複素振幅生成の初期型光学系

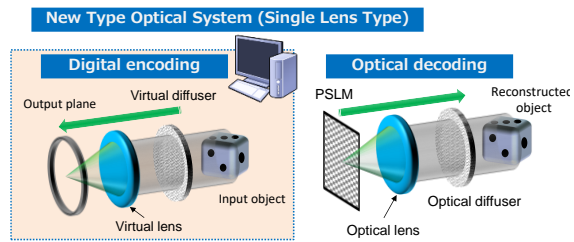


図4 単レンズ型SCM法による光複素振幅生成

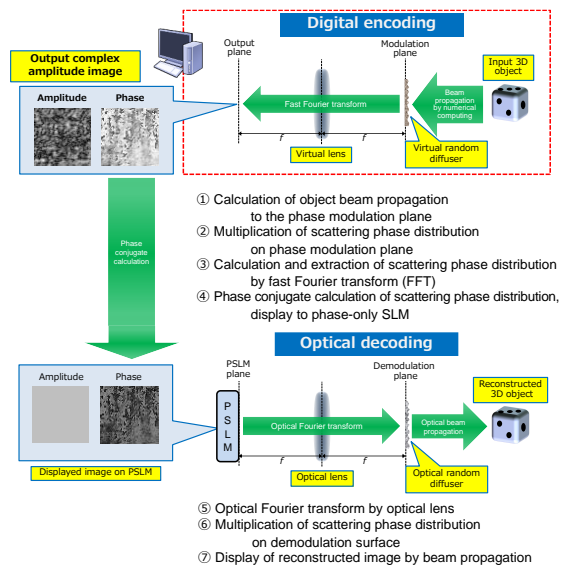


図5 単レンズ型SCM法のデジタルエンコード過程と光学的デコード過程

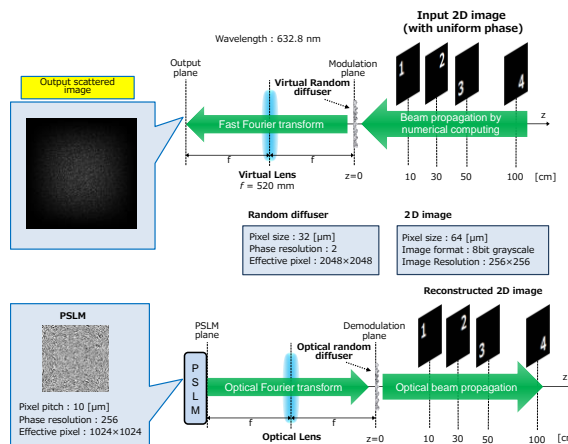


図6 3次元表示シミュレーションの光学配置と計算条件

示されるような4枚の2次元画像を配置する。それぞれの画像には、数字が1つ表示されており、その大きさは約1.5cmである。なお、各位置で与えられる2次元画像の位相分布は均一であり、単色光波の波長を632.8nmとする。

図7にシミュレーションによって得られた再生像を示す。図7には入力像として用いた4枚の元画像が配置されていた位置での再生像4枚を抽出している。それぞれの位置で1文字だけ焦点が合っていることが確認でき、単レンズ型SCM法においても3次元物体の表示に有用であることがわかる。

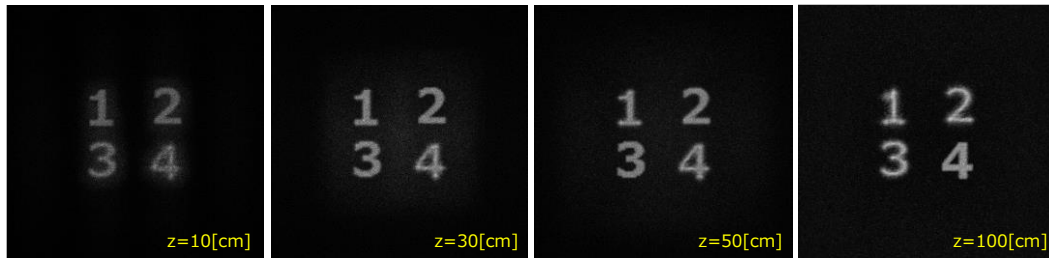
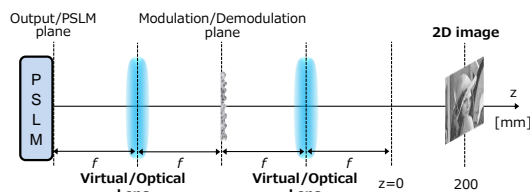


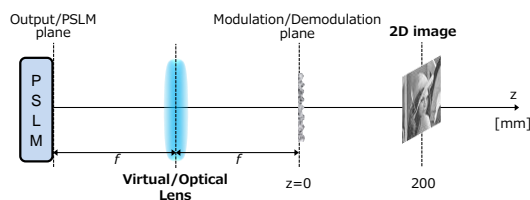
図7 単レンズ型SCM法の3次元表示シミュレーションによる再生画像

(2) 投影画像の画質と大きさ

投影画像の画質について評価するため、本研究で提案する単レンズ型SCM法と、図1および図3に示した初期型(4-f型)SCM法における再生画像の比較を行った。図8に各型の光学配置と計算条件を、表1に計算で用いたパラメータを示す。表1に示すとおり、この比較では、それぞれのSCMで同じ光学素子を用いて投影する場合を仮定して行っている。そのため、初期型(4-f型)SCM法においては、拡散板によって十分な拡散効果が得られない可能性があることに注意する必要がある。



(a) 初期型(4-f型)SCM法



(b) 単レンズ型SCM法

図8 投影画質評価シミュレーションにおける光学配置と計算条件

図9に、入力画像とそれぞれのSCM法における出力画像を示す。入力画像として、3枚の標準画像(256×256ピクセル、8ビットグレースケール)を用いており、画質の評価は、ピーク信号対雑音比(PSNR)を用いて行った。図9より、本研究で提案する単レンズ型SCM法において、良好な画質で再生できていることが確認できる。

次に、再生画像の大きさについて比較を行った結果を図10に示す。同じ光学素子(レンズや拡散板、SLM)を用いた場合では、本研究で提案する単レンズ型SCM法による再生のほ

表1 シミュレーションパラメータ

	Single lens type SCMM	4-f type SCMM
Wavelength		632.8 nm
Object image resolution		256×256
Image pixel pitch	64 μm	20 μm
PSLM pixels		1024×1024
PSLM pixel pitch		10 μm
PSLM phase resolution		256
Random diffuser pixels		1024×1024
Random diffuser pixel pitch		32 μm
Random diffuser phase resolution		2 (0, π)
Focal length of lens		520 mm
Analysis domain		2048×2048



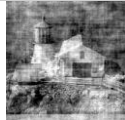
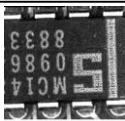





Object Image	Reconstructed image / PSNR [dB]	
	Single lens type	4-f type
 Lighthouse	 PSNR = 25.5	 PSNR = 22.0
 Text	 PSNR = 28.8	 PSNR = 24.2
 Lenna	 PSNR = 28.4	 PSNR = 23.2

図9 投影画質評価結果

うが3倍以上大きく投影されることが分かる。以上のことから、本研究で提案する単レンズ型 SCM 法によって、再生画像の高画質化・大型化が可能であることが明らかとなった。

(3) 光複素振幅の再現性

本研究で提案する単レンズ型 SCM 法の複素振幅生成器としての性能を評価するため、光強度分布と位相分布の再現性を調査するシミュレーションを行った。

図 11 に入力画像（光強度分布・位相分布）と光学配置を示す。図 11 に示すように、画像の輝度に応じた光強度と位相を入力光として与え、出力光の強度分布と位相分布を基本動作シミュレータで求めた。再現性の評価には、強度についてはピーク信号対雑音比を、位相については信号対雑音比 (SNR) を用いることとした。図 12 に出出力光の強度分布と位相分布とそれらの評価結果を示す。図 12 に示すように、強度、位相の両方において比較的高い再現性を有していることが分かり、本研究で提案する単レンズ型 SCM 法が、簡便な光学系で実現できる光複素振幅生成器として動作することが明らかとなった。

以上で述べた単レンズ型 SCM 法を用いた投影画像の高画質化の研究過程において、入力画像の情報は、SCM 法のエンコード過程で施されたランダム空間位相変調によって、出力された散乱複素振幅分布全体に限なく埋め込まれることが判明した。この事実、散乱複素振幅分布から位相分布を部分的に抽出し光学的デコードを施すと、元画像の情報はある程度失われるものの、元画像の重要な情報は保持されることを示唆している。

したがって、SCM 法のランダム空間位相変調と画像情報のスパース性を用いることによ

って、SLM の物理解像度を超える解像度を有する画像表示が実現できるのではないかとの着想に至り、SCM 法を超解像画像表示へ応用することを試みた。その結果、表示用 SLM の解像度が低くなるとノイズが大きくなるものの、条件によっては 1024×1024 ピクセルで構成される画像空間が 64×64 ピクセル程度の表示用 SLM の解像度で再現できることを明らかにしている。

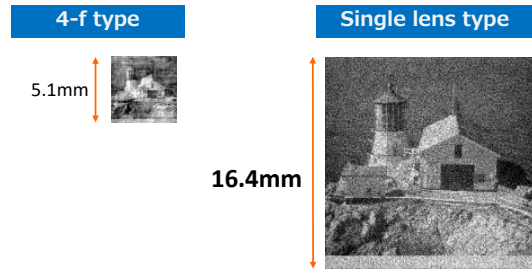


図 10 再生画像の大きさ

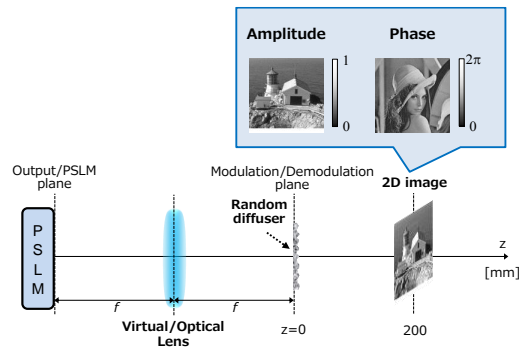


図 11 光複素振幅の再現性評価シミュレーションにおける光学配置と計算条件

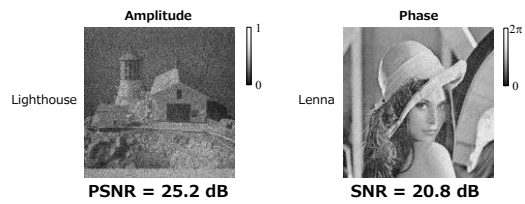


図 12 出力光の強度分布と位相分布の評価結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岡本 淳, 前田 智弘, 舟越 久敏	4. 巻 J103-C
2. 論文標題 空間光変調器を用いた光波制御と光情報処理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 -
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 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yiwo Lu, 岡本 淳, 舟越 久敏, 小川 和久, 富田 章久
2. 発表標題 空間クロスモジュレーションを用いた超解像画像投影手法
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yiwo Lu, Atsushi Okamoto, Hisatoshi Funakoshi, Tomohiro Maeda, Kazuhisa Ogawa, Akihisa Tomita
2. 発表標題 Super-Resolution Optical Projection Using Single-Lens Spatial Cross Modulation Method
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisatoshi Funakoshi and Atsushi Okamoto
2. 発表標題 Image Reconstruction Simulation by Spatial Cross Modulation Method with Single Lens and Random Diffuser
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yiwo Lu, Atsushi Okamoto, Hisatoshi Funakoshi, Tomohiro Maeda, Kazuhisa Ogawa and Akihisa Tomita
2. 発表標題 Super-resolution optical projection using spatial cross modulation method with single-lens and random diffuser
3. 学会等名 平成30年度 IEICE北海道支部学生会 インターネットシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 淳, 前田智弘, 舟越久敏
2. 発表標題 空間光変調器を用いた光波制御と光情報処理
3. 学会等名 2019年 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
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