

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820134

研究課題名(和文)空間直交振幅変調を用いた高速大容量ホログラフィックストレージに関する研究

研究課題名(英文) Study on high-transfer-rate high-capacity holographic data storage with spatial quadrature amplitude modulation

研究代表者

文仙 正俊 (BUNSEN, Masatoshi)

福岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50412573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：ホログラフィックデータストレージの更なる大容量化・高速化を目的として信号光の二次元強度変調に加え、二次元位相変調を施す空間直交振幅変調に関して、ホログラム記録・再生された変調信号光の複素振幅を高精度に検出・復調する手法について光学実験及び数値シミュレーションにより検討を行った。一回の撮像で空間直交振幅変調信号光の検出・復調を実現可能な位相シフト埋め込み法についても詳細に検討を行い、その有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：A signal beam modulation method called spatial quadrature amplitude modulation (SQAM) in which the spatial phase in addition to the spatial intensity of the signal beam is two-dimensionally modulated was studied to improve the data transfer rate and to increase the storage capacity of holographic data storage. The detection and demodulation methods of the SQAM signal beam which is holographically recorded and reconstructed in holographic material are experimentally and numerically investigated with several interferometric measuring techniques. The effectiveness of the phase-shift embedding method which realizes the single-shot detection of the intensity and the phase distributions of SQAM signal beam was also examined in detail.

研究分野：応用光学・光情報処理

キーワード：ホログラフィックデータストレージ 空間直交振幅変調 光メモリ

1. 研究開始当初の背景

テラバイト光メモリを実現するために様々な新技術が提案されている。特にホログラム技術を光メモリに応用するホログラフィックデータストレージ (HDS) は、近い将来の実現を目指し精力的に研究開発が進められている。HDS では空間 (二次元) 的に光強度変調されたデジタルデータのホログラムを記録材料の同一箇所にも多重記録し、更にこの多重記録領域を空間的に並べて多数形成することで超大容量記録が可能となる。主にフォトポリマ材料における非可逆的な光重合による局所的な屈折率変化をホログラム記録に利用し、長寿命でデータの改ざんや誤消去・書換えの心配が無い WORM (Write Once Read Many) メディアとして、特に映像・医療・製造分野や公的文書のアーカイブ保存に優れた性能を発揮することが期待されている。

ところで、人類が生み出すデータ量は爆発的に増大しており、2020年には2010年の50倍(40Z バイト)にもなると予測されている。現在、データのアーカイブには主としてハードディスク (HDD) が用いられているが、HDDには常に通電し続ける必要があり消費電力が問題になる。その一方で、これら保存されているデータの大部分はその後アクセスされないとも言われ、データ保存にエネルギーを消費しない光メモリが再び注目を集め始めている。上述したように、HDS はとりわけアーカイブ用途に適した特徴を有しており、更なる大容量化と高転送レートを実現することで今後増え続けるデータのアーカイブにも対応可能となり、意義は大きい。HDS の大容量化の方法として、従来明暗二値 (1bit/pixel) で強度変調されていたデータページを、より多諧調に強度変調しピクセルあたりの情報量を増大することが考えられる。この手法は光学系や構成装置に大幅な変更なく取り入れることが出来る点で有用ではあるが、光強度変調であるが故に達成可能な諧調数が SN 比やレーザーパワー等により制限されてしまい、大幅な容量・転送速度の向上は見込めない。これに対し、位相変調方式ではデータページの光強度レベルは諧調数に関わらず一定であり、これは多値変調を実現する上で有利である。また多値光強度変調と多値位相変調を組み合わせる空間直交振幅変調 (Spatial Quadrature Amplitude Modulation: SQAM) を用いることで一ピクセルあたりのデータ量を更に増加し大容量・高転送速度の実現を狙う試みも行われ、その可能性は広がりを見せている。

2. 研究の目的

現状では、上記 SQAM に関する研究において二次元変調信号中のシンボル数や位相変調の諧調数は少なくその検討は基礎的な段階にとどまっている。また、位相変調が施され

た信号光の検出には通常位相シフト干渉法が用いられるが、この方式は位相シフトを持つ複数枚の干渉縞画像の撮像を必要とする。具体的には記録データの再生時に複素振幅の計測対象である再生信号光と同時に参照光も CCD へ同軸照射し、参照光の位相を一定時間ごとにシフトさせながら複数の干渉縞画像の撮像を行い (通常4または2枚のマルチショット撮像)、再生光の複素振幅を得るものである。これをそのまま HDS システムに導入すると、転送速度の大幅な低下や振動耐性・複素振幅検出精度の劣化を引き起こし大きな問題となる。記録再生用のみならず再生専用光学系も複雑化・大型化し、実用化に際し大きな障害となることが予想される。そこで本研究では SQAM 変調方式を用いた HDS システムにおいて、大容量と高転送レートを同時にかつ簡易・高精度に実現することを目的とする。特に、従来の位相シフト法に代わるシングルショット撮像による SQAM 信号光の検出法の開発は、SQAM 変調方式の実現に不可欠な技術と考える。本研究は我々が提案している「位相シフト埋め込み法」を用いた HDS システムに関し更に研究を進め、簡易な光学系での高速・高精度な SQAM 変調信号光の検出復調を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

図1に SQAM 信号光のホログラム記録・再生及び従来型の位相シフト干渉法による SQAM 信号光検出・復調の光学系を示す。強度用の空間光変調器 (SLM) 及び位相用 SLM により多値空間光強度変調と多値空間位相変調を施した SQAM 信号光 (物体光) を参照光 1 と共にホログラム媒体へ入射し記録する。これまでに提案されてきた様々な多重記録法により記録媒体の同一箇所にホログラムを多重記録することが出来る (図はディフューザを用いたスペckル多重記録)。記録後にホログラムへ参照光 1 のみ照射すると、記録ホログラムによりこれが回折され SQAM 信号光が再生される。従来の強度変調データページの再生ではこの再生光強度分布を CCD により直接撮像するが、SQAM 変調信号を検出するためには図のように参照光 2 と再生信号光との干渉パターンを CCD で撮像する。この時、例えば 2 ステップ法においては、参照光 2 の位相をピエゾミラーにより 0 、 $\pi/2$ (rad) と変化させ 2 枚の干渉縞画像を撮像し、

$$\phi(x, y) = \text{atan} \left[\frac{\{I_{ij}^{(\pi/2)}(x, y) - a\}}{\{I_{ij}^{(0)}(x, y) - a\}} \right]$$

$$A_0(x, y) = \sqrt{\{I_{ij}^{(0)}(x, y) - a\}^2 + \{I_{ij}^{(\pi/2)}(x, y) - a\}^2} / 2Ar$$

へ各ピクセルの強度値を代入することで再生信号光の複素振幅 $A_0(x, y)\exp\{\phi(x, y)\}$ を得ることができる。ただし Ar は参照光 2 の振幅であり、上付きの (0) と ($\pi/2$) は位相シフト量を示している。

一方、位相シフト埋め込み法による信号光複素振幅検出では、図 2(a) に示すように予め SQAM

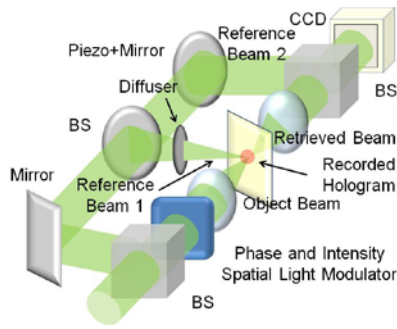
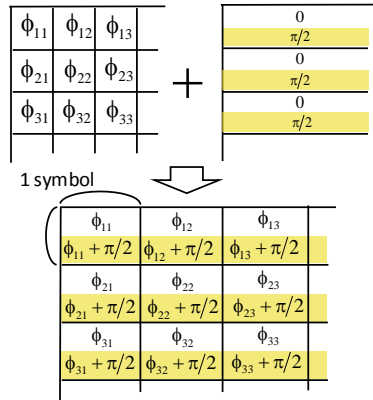
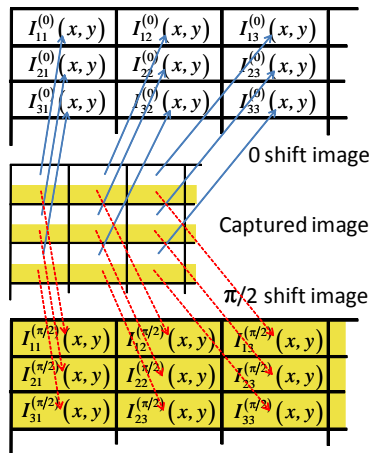


図 1 SQAM 変調を用いた HDS の概念図



(a) 位相変調の方法



(b) 干渉縞画像の分離と再構成

図 2 位相シフト埋め込み法 の概念図

信号光に載せられる位相変調信号 ϕ_{ij} に、シンボル内上部はそのまま、下部には $\pi/2$ を加算する。多重記録再生は従来法と同様の手法/光学系を使用出来る。特に再生用の光学系には一切の位相シフトデバイスが不要であることが特長である。再生時の複素振幅検出には参照光 2 と記録ホログラムからの再生信号光を CCD へ同軸照射し干渉縞画像を一枚のみ撮像する。この画像には図 2 (b) に示すように 2 枚の干渉縞画像が含まれており、これを 0 シフトと $\pi/2$ シフト画像に分離・再構成し上式へ代入することで SQAM 信号光を復調する。

本研究では、まず SQAM 変調信号光を生成する光学系について検討する。既に空間位相変調技術は保有しているが、もう一台の液晶

空間光変調器により更に強度変調を施すと、変調強度に応じて位相も変化させてしまう問題がある。これを考慮に入れ高精度な SQAM 変調信号光を生成する技術を開発する。次に、フォトポリマをホログラム記録材料として用い、これに記録・再生された SQAM 信号光の複素振幅検出・復調をいくつかの光干渉計測手法により試みる。 piezo 駆動ミラーによる位相シフト法、微小偏光子アレイ付き CCD カメラによるシングルショット位相シフト法、フーリエ縞解析法等により実験的検討を行う。更に本研究課題の主たる検討課題である位相シフト埋め込み法による SQAM 変調信号光の検出復調についても実験的検討を行う。高速フーリエ変換ビーム伝搬法を用いたホログラム記録再生及び再生信号光複素振幅の干渉計測シミュレーションも実施し、位相シフト埋め込み法により復調可能な SQAM 信号光の強度及び位相変調諸調数についても検討を行う。

4. 研究成果

以下に、SQAM 信号光の生成、ホログラム材料への記録及び再生、検出・復調に関する研究成果を示す。まず、SQAM 信号光の検出法として時間分割位相シフト法、空間分割位相シフト法及びフーリエ縞解析法を用い、検出精度やそれぞれの手法の特長について検討した。光源として波長 532nm の半導体励起固体レーザーを用い、ホログラム材料には厚さ 400 μ m のフォトポリマを使用した。信号光の強度変調及び位相変調には液晶 SLM を用いた。SQAM 信号光に与えられる強度変調パターン及び位相変調パターンを図 3 に示す。以下の検討では強度変調は 2 値、位相変調は 4 値及び 8 値変調とする。これらのパターンは縦 8 シンボル横 8 シンボルの計 64 シンボルで構成され、各シンボルのサイズは SLM 面において 480mm \times 480mm である。時間分割位相シフト干渉法において、干渉縞の位相変化は計測用参照光路に配置された piezo ミラーの変位によって導入する。空間分割位相シフト干渉法の実行時には通常の CCD カメラに変えて、微小偏光子アレイ付き CCD カメラを配置する。計測用参照光路上に新たに配置した $\lambda/2$ 板により計測用参照光を P 偏光とし、S 偏光の再生 SQAM 信号光とビームスプリッタにより合波する。更に偏光カメラ直前に $\lambda/4$ 板を新たに設置しこの透過光を撮像する。フーリエ縞解析の実行時には、ビームスプリッタの角度調整により周期が CCD の 5 ピクセル程度となるような干渉縞を生成し、計測を行う。一つのシンボルは、撮像に用いた CCD カメラの違いから、時間分割位相シフト法とフーリエ縞解析法においては 109 \times 109 ピクセル、空間分割位相シフト法においては 103 \times 103 ピクセルから成り、コンスタレーションダイアグラムは各シンボル内での平均振幅及び位相を算出しプロットしている。以下のシンボルエラー評価において振幅閾値は一定とし、

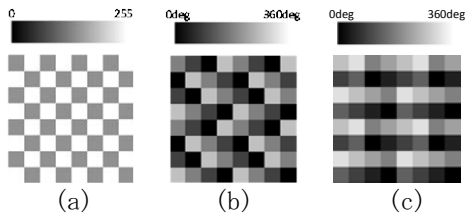


図 3 SQAM 信号光の変調パターン. (a) 2 値強度変調, (b) 4 値位相変調, (c) 8 値位相変調.

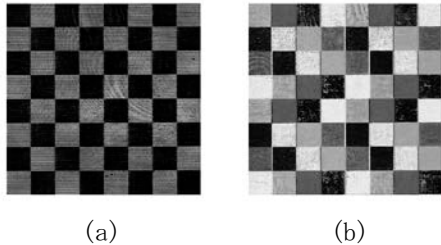


図 4 時間分割位相シフト法によって検出された SQAM 信号光の (a) 強度分布及び (b) 位相分布

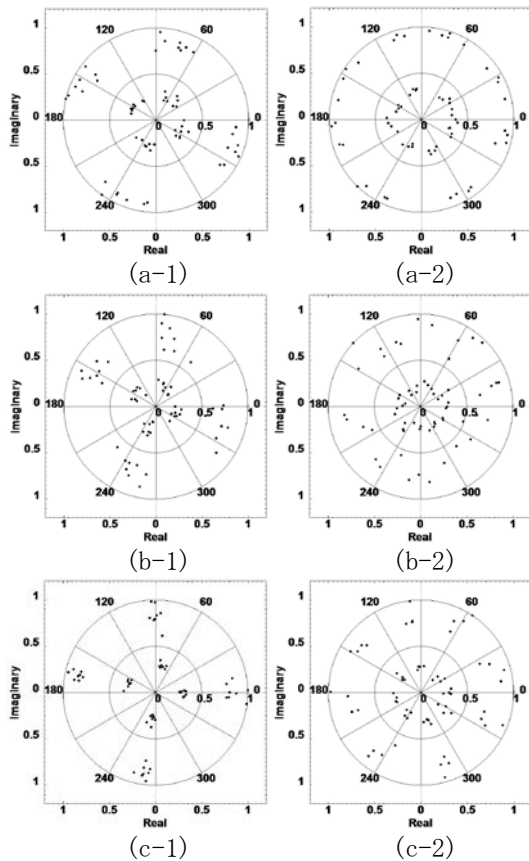


図 5 ホログラム記録・再生後に検出された SQAM 信号のコンスタレーションダイアグラム. (a-1, 2) 時間分割位相シフト法. (b-1, 2) 空間分割位相シフト法. (c-1, 2) フーリエ級数解析法. ハイフンに続く数字 1 は強度 2 値位相 4 値変調を表し, 2 は強度 2 値位相 8 値変調を表す.

また、位相閾値については位相 4 値変調の場合 90 度等間隔、位相 8 値変調の場合は 45 度等間隔とする。

図 4 及び 5 にホログラム記録・再生後に検

出された SQAM 信号光の強度・位相分布およびコンスタレーションダイアグラムを示す。強度 2 値位相 4 値変調の場合にはどの計測法を用いた場合にもシンボルエラーは観測されなかった。一方強度 2 値位相 8 値変調においては時間分割位相シフト干渉法で 2 個、空間分割位相シフト干渉法では 4 個のエラーシンボルが検出され、フーリエ級数解析法のみ全てのシンボルを正しく検出することが出来た。今回の実験に用いた光学系においては、計測時の干渉縞に若干の不規則な振動が視認され、これが一回の SQAM 信号検出に複数回の撮像を必要とする時間分割位相シフト法の検出精度を低下させる要因になっていると考えられる。これに対しフーリエ級数解析法はシングルショット撮像により SQAM 信号の検出が可能のため高精度な検出が実現できていると思われる。一方で、空間分割位相シフト干渉法もシングルショット撮像による SQAM 信号の検出が可能であるにもかかわらず、今回の実験においては十分な検出精度を得ることが出来なかった。この原因は不明であり、原因究明や光学素子のアライメント誤差の改善等による検出精度向上は今後の課題である。

図 6 に位相シフト埋め込み法により検出復調された SQAM 信号光の強度・位相分布およびコンスタレーションダイアグラムを示す。図 6 より SQAM 信号光の空間強度・位相分布が検出されていることがわかる。また、コンスタレーションダイアグラムにおける各シンボルは明瞭に分離されており、SQAM 信号光のホログラム記録・再生を行った際にも位相シフト埋め込み法が有効に機能していることが分かる。

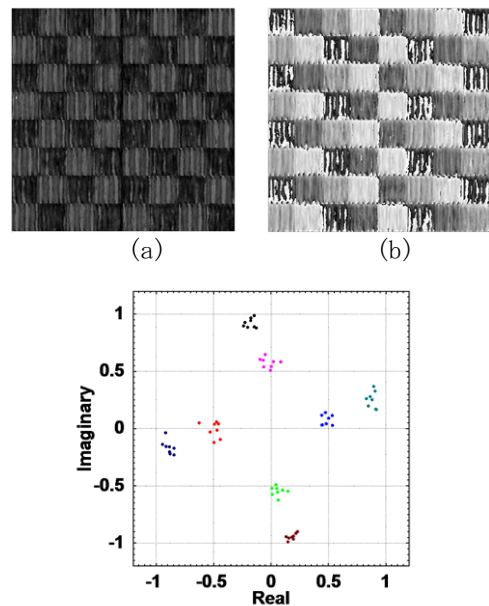


図 6 位相シフト埋め込み法によって検出された SQAM 信号光の (a) 強度分布及び (b) 位相分布と (c) コンスタレーションダイアグラム.

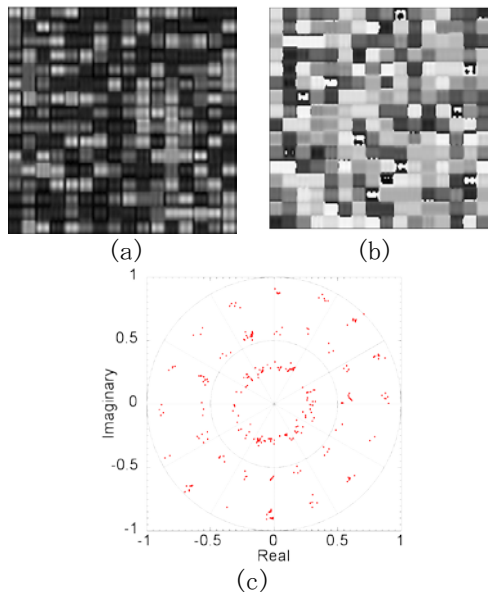


図 7 高速フーリエ変換ビーム伝搬法によるシミュレーション結果. 位相シフト埋め込み法によって検出された強度 3 値・位相 16 値 SQAM 信号光の (a) 強度分布及び (b) 位相分布と (c) コンスタレーションダイアグラム.

位相シフト埋め込み法による SQAM 信号光の検出復調の諸性能を高速フーリエ変換ビーム伝搬法によるシミュレーションによっても様々に評価した。図 7 に強度 3 値・位相 16 値 SQAM 信号光の強度及び位相分布とコンスタレーションダイアグラムを示す。変調階調数が増加しても、位相シフト埋め込み法は SQAM 信号光を高精度に検出復調できていることが分かる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 吉富圭史郎、菅野円隆、文仙正俊、強度輸送方程式法と連続的位相変調による空間直交振幅変調信号光の高精度非干渉検出、2016 年電子情報通信学会総合大会、平成 28 年 3 月 15 日、九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市)
- ② 佐藤隆典、菅野円隆、文仙正俊、ホログラフィックデータストレージにおける SQAM 信号の最小二乗法を用いた等化、2016 年電子情報通信学会総合大会、平成 28 年 3 月 15 日、九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市)
- ③ 柴田雄大、菅野円隆、文仙正俊、位相シフト埋め込み法による空間直交振幅変調信号光検出の性能評価、映像情報メディア学会マルチメディアストレージ研究会、平成 28 年 2 月 22 日、北海道大学 (北海道・札幌市)
- ④ Tatsuki Yamamoto、Keishiro Yoshidomi、Kazutaka Kanno、Masatoshi Bunsen、

Single-shot detection of spatially quadrature amplitude modulated signals in holographic data storage、20th Microoptics Conference (MOC'15) 平成 27 年 10 月 27 日、福岡国際会議場 (福岡県・福岡市)

- ⑤ Takanori Sato、Kazutaka Kanno、Masatoshi Bunsen、Linear minimum mean-square-error equalization of spatially quadrature amplitude modulated signals in holographic data storage、International Symposium on Optical Memory 2015 (ISOM2015)、平成 27 年 10 月 6 日、富山国際会議場 (富山県・富山市)
- ⑥ 吉富圭史郎、菅野円隆、文仙正俊、強度輸送方程式法による空間直交振幅変調信号光の非干渉検出に関する検討、平成 27 年度電気情報関係学会九州支部連合大会 (第 68 回連合大会)、平成 27 年 9 月 27 日、福岡大学 (福岡県・福岡市)
- ⑦ 山本達貴、菅野円隆、文仙正俊、フーリエ級数解析法による空間直交振幅変調信号光の復調性能向上に関する検討、平成 27 年度電子情報通信学会九州支部学生会第 23 回学生会講演会、平成 27 年 9 月 5 日、福岡大学 (福岡県・福岡市)
- ⑧ 文仙正俊、菅野円隆、久岡巧弥、柴田雄大、佐藤隆典、ホログラフィックメモリにおける空間直交振幅変調信号の検出法に関する検討、映像情報メディア学会マルチメディアストレージ研究会、平成 27 年 2 月 24 日、北海道大学 (北海道・札幌市)
- ⑨ 久岡巧弥、菅野円隆、文仙正俊、ホログラム記録再生された空間直交振幅変調信号の検出性能評価、2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、平成 26 年 9 月 25 日、徳島大学 (徳島・徳島市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

文仙 正俊 (BUNSEN, Masatoshi)

福岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50412573