

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860048

研究課題名(和文) 参照光が不要なホログラム記録を可能にする自己参照型ホログラフィに関する研究

研究課題名(英文) Self-referential holographic recording technique for eliminating the use of reference beam

研究代表者

高林 正典 (Takabayashi, Masanori)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教

研究者番号：70636000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：参照光が不要なホログラフィとして「自己参照型ホログラフィ」を提案し、その記録メカニズムの解明、およびその性能評価を目的とした研究を行った。具体的には、ホログラムによる回折理論を基礎とした原理の定式化、原理実証のための動作確認、単一記録特性の評価、再生品質を向上させる記録方法の提案と効果の検証、シフト多重記録性能の評価などを、理論、数値シミュレーション、光学実験などによって多角的に行った。

研究成果の概要(英文)：A novel holographic technology named "self-referential holography (SRH)" which enables to record holograms without using reference beam is proposed. This research aims at clarifying the recording mechanism and the recording properties of SRH and they are achieved them by theoretical, numerical and experimental approaches. Concretely, the principle, the recording properties for single recording, the recording procedures and its effectiveness for high-quality readout, and the shift-multiplexing properties are clarified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：ホログラフィ 光記録 体積ホログラム

1. 研究開始当初の背景

大規模な情報の高速な処理を可能にする光技術への注目・期待が高まっている。その背景には、我々の取り扱う情報量が電氣的な情報処理では対応できないほどにまで爆発的に増加していることがある。このような状況に際し、光源や検出器等のデバイス技術はもちろん、変復調技術、伝送技術、演算技術、蓄積技術などに関する研究が行われている。

光によって情報処理を行うために必要な要素技術はいくつかあるが、中でもホログラフィは、角度や波長に対する選択性を有しながら光波の完全な記録再生を可能にすることなどから、三次元表示、三次元計測、高密度光記録、並列光演算等を狙った重要な要素技術として注目されている。ホログラフィは、光波の干渉を基礎としており、情報を有する光波（物体光）とそれと可干渉な光波（参照光）による干渉パターンをホログラムとして記録（屈折率の違いなどに変換）する。物体光と参照光のどちらか一方を用いて、もう一方の光波を再生することが出来る。ホログラフィでは2つの光波を用いることによって、さまざまな恩恵を得ることが出来るが、応用分野によっては、参照光の存在がマイナス要素として働いてしまう。

次世代光メモリの最有力候補技術として注目を集めている技術にホログラフィックメモリがある。当該技術も参照光が存在することによって、恩恵を受ける一方、不利益を被っている。ホログラムの多重記録と1000×1000bit程度の情報の並列記録再生を特長としており、高い記録密度と高い転送速度を同時に達成することができる。ホログラフィックメモリは原理上、一光束で記録再生を行う従来の光メモリ（CDなど）とは異なり、情報の記録再生に二光束を必要とする。その結果、従来に比べて光学系が大型化・複雑化する傾向にあるほか、振動等の外部環境変化に対する耐性が低くなってしまふ等の問題点が生じる。

このような状況に際し、我々は参照光を用いずにホログラムを記録再生することが出来る「自己参照型ホログラフィ」を新たに提案する。自己参照型ホログラフィでは、被記録情報が位相変調された物体光とそれ自身の干渉（自己干渉）によって記録し、ホログラムを照射した読み出し光の透過成分と回折成分の結合の結果により、強度変調信号として再生する。つまり自己参照型ホログラフィでは、情報を光波の位相分布として記録しているにもかかわらず、読み出し時には強度変調信号として再生する。このことは、自己参照型ホログラフィにおいては、ホログラムが「光波の波面形状」を担うのではなく、あくまで「情報」の記録再生を担っていることを示している。そのため、光波の記録再生を要求するアプリケーションには適さない

が、情報の記録再生を要求するアプリケーション（例えば光メモリや光演算）に適している。一方、当該手法の大まかな骨組みは確立されているものの、その動作確認や詳細な記録メカニズム、具体的なアプリケーションを想定した各種性能は明らかになっていない。さらに、自己参照型ホログラフィによって可能になる新たな応用の開拓も期待される。

2. 研究の目的

自己参照型ホログラフィを提案し、参照光を用いずに情報を記録再生出来ることを実証する。また当該技術の記録再生メカニズムを解明する。その際、自己参照型ホログラフィの実用可能性について検討する目的で、モデルプラットホームとしてホログラフィックメモリを想定し、その各種性能評価を通じて課題を明確にする。具体的には、記録条件と再生品質の関係を明らかにすることで課題を明確にし、それを解決するための手法を提案する。さらに、ホログラフィックメモリに用いられる多重記録に関して、新規の、または従来技術と同様の多重方式を自己参照型ホログラフィックメモリ（SR-HDS）に適用し、選択性能などの基本的な評価を行う。さらに、実験室もしくはシミュレーションによって複数枚のデータページの記録再生を行う。また、ホログラフィックメモリ以外の自己参照型ホログラフィの新たな応用分野を模索・検討する。

3. 研究の方法

本研究はSR-HDSをモデルプラットホームとし（図3-1）、自己参照型ホログラフィの原理を解明する。目的を達成するために、本研究は、Kogelnikの結合波動理論を基礎とした原理式の導出と数値計算、高速フーリエ変換ビーム伝搬法を用いた3次元シミュレーション、実験によって多角的に行う。

Kogelnikの結合波動理論は、厚いホログラムの回折特性を解析するために広く用いられている。SR-HDSでは、当該理論で取り扱うことの出来る平面波同士によって形成されるホログラムの重ね合わせで考えることが出来る。本研究では、多数の要素ホログラムが互いに独立して存在しているという理想的な状況を想定し、光波の結合を表す連立微分方程式を導出する。導出した連立微分方程式を数値的に解くと、読み出し光がホログラムを通過する際に受ける強度変化を解析することが出来る。この強度変化が記録光と再生光の位相差分布に依存していることが結果として得られれば、記録光と読み出し光の位相差分布が適切な条件を満たすとき、読み出し光内のピクセル間でエネルギー移動が起き、結果として得られる光強度分布が先の位相差分布に一致するという、SR-HDSの動作を実証出来る。

高速フーリエ変換ビーム伝搬法を用いたホログラフィックメモリの3次元シミュレーションでは、図3-2に示すように、光学配置を計算機上で想定し、各位置での光強度分布、光位相分布、屈折率分布を計算することでSR-HDSの記録再生過程をシミュレーションすることが出来る。高速フーリエ変換ビーム伝搬法は、形成されたホログラム(屈折率分布)中の光波の伝搬を計算することができる。他の有限差分ビーム伝搬法や有限差分時間領域法などに比べて精度は劣るものの、現実的なサイズの記録媒質を想定できる上、比較的簡易にコーディングすることが出来る等の理由から採用している。

SR-HDSの実験は全て図3-3に示す光学系を用いて行う。実際の記録再生実験を行う前に用いるSLMの位相変調特性を測定しておく、得られたデータを用いて、信号パターン、Additionalパターン、記録パターン、読み出しパターンを適宜作成する。記録媒質にはライトワンス用のホログラム記録媒質として期待されているフォトポリマを採用する。

4. 研究成果

(1) 単一記録再生

自己参照型ホログラフィックメモリでは、「記録光と読み出し光の位相差分布が適切な条件(位相差分布が π の倍数でない2値からなるという条件)を満たすとき、読み出し光内のピクセル間でエネルギー移動が起き、結果として得られる光強度分布が先の位相差分布に一致する。」という仮説を実証するために、Kogelnikの結合波動理論をベースとした理論式の導出、高速フーリエ変換ビーム伝搬法を用いたシミュレーション、および実験を行った。

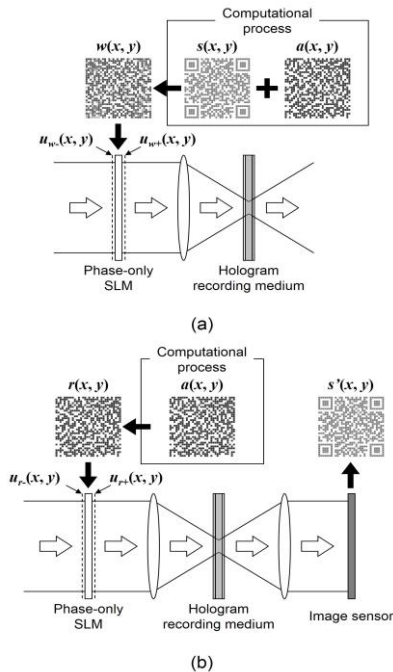


図3-1 自己参照型ホログラフィックメモリの概念図。(a)記録過程。(b)再生過程

初めに Kogelnik の結合波動理論の初期条件を変え、SR-HDSの動作を表す連立微分方程式を導出した。この時、多数のホログラムは互いに影響を及ぼし合わないとする最も理想的な状況を想定した。図4-1は、導出した連立微分方程式を数値的に解いた結果であり、横軸は光波の伝搬距離、縦軸は読み出し光の強度である。 $\Delta\phi_{ij}$ は (i,j) 番目のピクセルの記録時と読み出し時の位相差である。結果より、記録時と読み出し時の位相差の値に依存して出力光強度が変化することが見て取れる。この結果は、理想的な条件下ではあるが、先に述べた仮説が正しいと示すものである。

次にシミュレーションと実験によって、より現実的な条件下での動作確認を行った。条件は前項「研究方法」に記載しているので、ここでは結果のみを示す。図4-2、図4-3はそれぞれシミュレーションと実験における信号位相パターンと出力光強度分布である。どちらの場合においても記録時の位相分布が強度分布となって読み出されており、SR-HDSの動作が実証された。また、ホログラフィックメモリ以外のアプリケーション

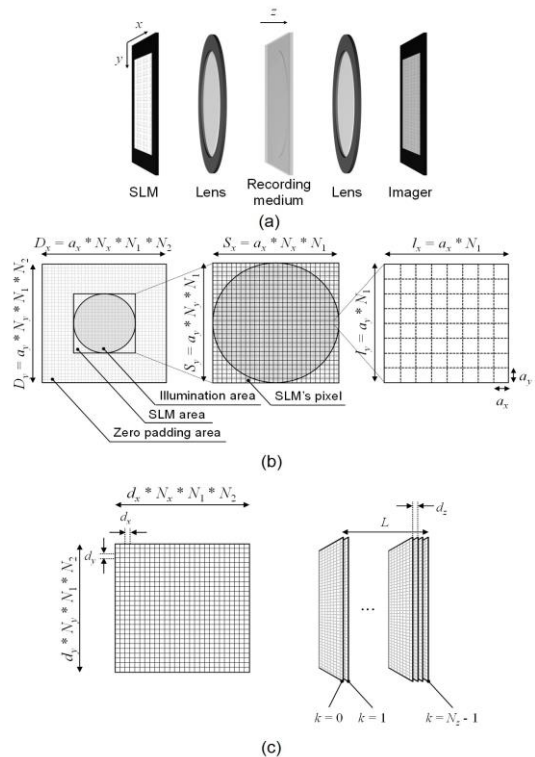


図3-2 シミュレーションモデル。(a)光学配置。(b)SLM面での計算メッシュ。(c)記録媒質の計算メッシュ。

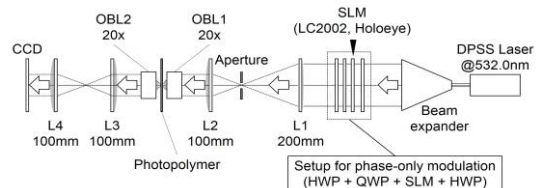


図3-3 実験光学系。

として、光位相強度変換器の動作確認を行った。光位相強度変換器に関することと詳細なデータは文献[Masanori Takabayashi and Atsushi Okamoto, Optics Express 21, 3669-3681 (2013).]にまとめた。

(2) 記録品質向上法

SR-HDS の再生信号品質を向上させるための手法を 2 つ提案し、実証を行った。「Off-the-focus (OTF)法」では、対物レンズの焦点位置を記録媒質外部に配置して記録を行う。「Oversampled additional pattern (OSA)法」では、記録再生時に用いる Additional パターンとして信号パターンより細かいものを用いる。シミュレーションと実験の両面からその効果を実証した。図 4-4 と図 4-5 はそれぞれの手法を適用した際の各種結果である。本報告書では結論のみを述べるが、両手法を適用することによって、再生品質が劇的に改善されていることが見て取れる。この結果から、両手法には SR-HDS の再生品質を高める働きがあることが分かる。シミュレーションによって得られるホログラムの分布に注目すると、局所的なホログラムの形成を防止することが出来れば再生品質の向上が期待できることが予想される。

(3) シフト多重記録再生

SR-HDS でホログラムを多重する際にシフト多重方式を適用することを想定し、各種評価を行った。SRH の再生過程は、読み出し光のホログラムでの透過成分と回折成分の結合によって実現される。そのため、記録媒質をシフトして、回折光成分を生じさせなくす

れば出力光強度分布が平坦になる。このことを利用して複数のページデータを多重記録することが出来る。まずは、記録媒質をわずかにシフトさせながら再生したときに出力光強度分布が徐々に平坦になることを確認する。図 4-6 は記録媒質シフト時の再生光強度分布を示している。記録媒質をシフトすることによって、再生光強度分布は信号パターン状のものから平坦な分布へと変化していることが確認できる。次にどの程度のシフト距離で再生光強度分布が平坦になるかをシミュレーションによって調査した。図 4-7 はその結果であり、従来技術であるコリニアホログラフィックメモリのシフト選択性も同条件で評価した。注目すべきは、コリニアホログラフィックメモリのシフト選択性と SR-HDS のそれがほとんど同程度である点である。これまでコリニアホログラフィックメモリに関する研究で、約 500GB/inch² を達成した例が報告されているが、SR-HDS では情報の変調に割り当てられるビーム断面積がコリニア方式の約 2 倍程度となるので、理想的にはコリニアホログラフィックメモリの 2 倍、つまり約 1TB/inch² 以上の記録密度を達成し得る。最後に実際にページデータを 25 多重するシミュレーションを行った。図 4-8 はその結果を示している。25 多重記録を行っ

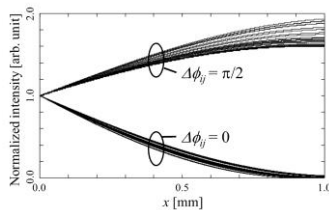


図 4-1 結合波動方程式の数値計算結果

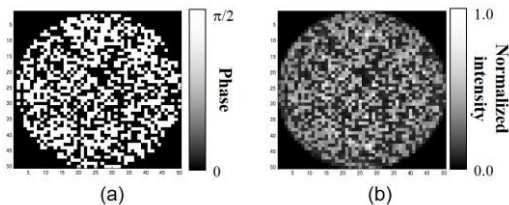


図 4-2 シミュレーション結果. (a)記録光位相分布. (b)出力光強度分布.

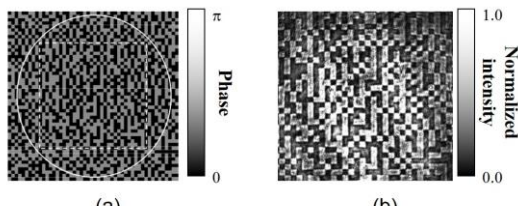


図 4-3 実験結果. (a)記録光位相分布. (b)出力光強度分布.

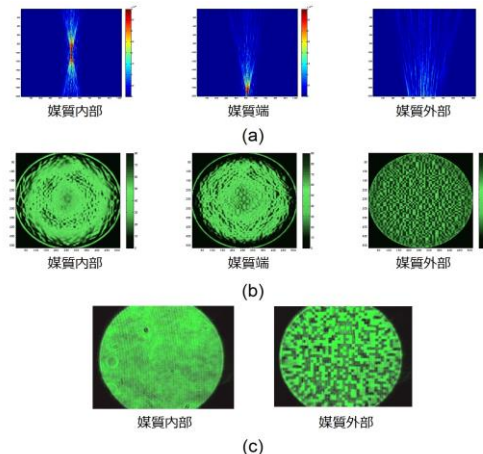


図 4-4 OTF 法. (a)ホログラム分布 (シミュレーション). (b)出力光強度分布 (シミュレーション). (c)出力光強度分布 (実験).

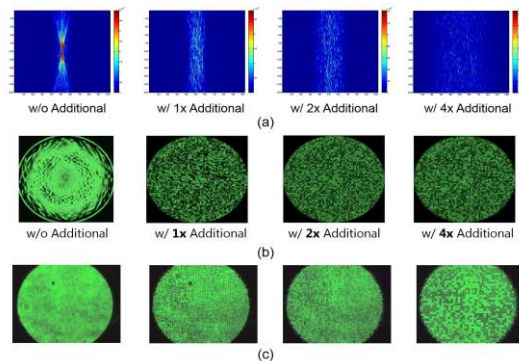


図 4-5 OSA 法. (a)ホログラム分布 (シミュレーション). (b)出力光強度分布 (シミュレーション). (c)出力光強度分布 (実験).

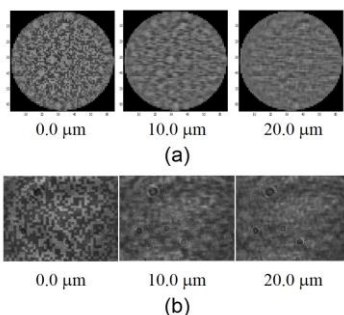


図 4-6 記録媒質シフト時の出力光強度分布. 数字はシフト距離を示す. (a)シミュレーション. (b)実験.

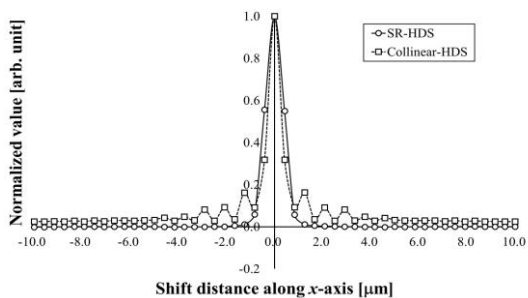


図 4-7 シフト選択性.

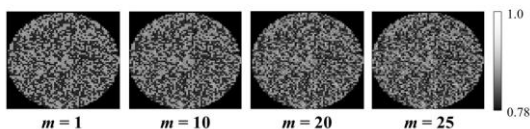
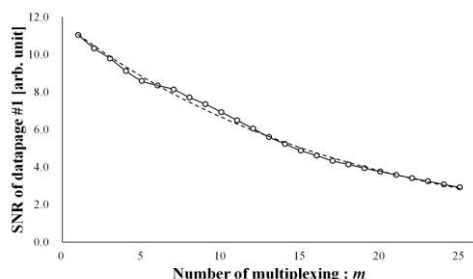


図 4-8 シフト 25 多重シミュレーション結果. SNR と再生光強度分布

でも信号パターンが再生されていることが確認できる.

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Masanori Takabayashi and Atsushi Okamoto, “Self-referential holography and its applications to data storage and phase-to-intensity conversion,” *Optics Express* 21, 3669-3681 (2013). 査読あり
- ② 高林正典, 江藤太亮, 文仙正俊, 岡本淳, 岡本卓: 自己参照型ホログラフィックメモリにおける単一記録プログラムの読み出し特性, 電子情報通信学会技術研究報告(IEICE Technical Report), 113, 11-16 (2013). 査読なし

[学会発表] (計 6 件)

- ① Masanori Takabayashi, Atsushi Okamoto, and Takashi Okamoto, “Improvement of Signal-to-Noise Ratio in Self-Referential Holographic Data Storage by using Oversampled Additional Pattern,” International Workshop on Holography and Related Technologies (IWH 2013) Digests, 15a-4, Kitami, Japan, Oct. 12, 2013.
- ② Masanori Takabayashi, Atsushi Okamoto, and Takashi Okamoto, “Influence of additional phase modulation pattern and focal shift in self-referential holographic data storage,” The Tenth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE '13) Technical Digest, 93-94, Utsunomiya, Japan, Sep. 2, 2013.
- ③ Masanori Takabayashi, Atsushi Okamoto, and Takashi Okamoto, “Shift-Multiplexing Properties of Self-Referential Holographic Data Storage,” International Symposium on Optical Memory (ISOM '13) Technical Digest, 66-67, Incheon, Korea, Aug. 20, 2013.
- ④ Masanori Takabayashi, Atsushi Okamoto, Masatoshi Bunsen and Takashi Okamoto “Multi-Level Self-Referential Holographic Data Storage,” International Symposium on Optical Memory (ISOM '12) Technical Digest, 12-13, Tokyo, Japan, Oct. 1, 2012.
- ⑤ 高林正典, 岡本淳, 文仙正俊, 岡本卓: 自己参照型ホログラフィにおける読み出し信号品質の改善に向けた記録条件の最適化, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan (OPJ 2013) 講演予稿集 CD, 23aD4, タワーホール船堀(東京), 2012年10月23日.
- ⑥ 岡本淳, 高林正典: 位相変調技術を用いた自己参照型ホログラフィックメモリ, フォトニクスポリマー研究会 講演要旨集, 5-6, 慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川), 2012年6月14日. (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/ba841985/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

高林 正典 (TAKABAYASHI, Masanori)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教
研究者番号: 70636000