

論文の内容の要旨

論文題目 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリー

氏名 平山 颯紀

概要：表面型ホログラムを用いた新規メモリーシステムの記録再生原理・記録再生特性の解明

ホログラフィックメモリー[1]は、ホログラフィーの原理[2]を応用した光メモリー技術であり、3次元記録媒体にホログラムを多重記録することによる大容量記録と、2次元信号画像を再生することによる情報の高速読み出しを実現する。3次元記録媒体である体積型ホログラムは、大容量記録が可能であるという利点があるが、一方で熱膨張などによる僅かな記録媒体の変形によって再生信号が劣化するという欠点や、記録媒体の一括複製が困難であるという欠点がある。

このような背景のもと、本研究では、表面型ホログラムを記録媒体とするホログラフィックメモリーに着目した。表面型ホログラムは従来の体積型ホログラムと比較して、記録容量が原理的に劣るものの、熱膨張などの変形に強く、また表面微細加工技術による一括複製が期待できる。これらの利点に加え、ホログラフィックメモリーの特徴である高速読み出しを活かすことができるという点が表面型ホログラフィックメモリーの特徴として期待できる。

ホログラフィックメモリーにおけるホログラムの多重方式は、過去にさまざまな方式が提案されているが、原理的には体積型ホログラムのブラッグ回折条件を利用する方式[3,4]としない方式[5,6]に分けることができる。表面型ホログラムは体積型ホログラムとは回折原理が異なっており、前者の方式による多重記録は原理的に不可能であるが、後者の方式であれば多重記録ができる可能性がある。表面型ホログラムの多重記録を考慮したホログラフィックメモリーの記録再生原理や記録再生特性についてはこれまで明らかにされていないが、多重記録によって記録容量が向上する可能性も期待できる。このような着想に基づき、本研究ではブラッグ回折条件を利用しない代表的な多重方式である相関シフト多重方式を用いた表面型ホログラフィックメモリーについて、その記録再生原理および記録再生特性を解明することを目的として行った。

1. 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの記録再生システムの提案

ブラッグ回折条件によらない相関シフト多重方式は、入射角の異なる複数の平面波を同時に参照光として記録媒体に照射する。これにより、ホログラムからの再生信号画像は、ホログラムの僅かなシフトによって消えるという性質を持つ。このシフト選択性を利用し、複数のホログラムを僅かにずらして重ね合わせていくことによって多重記録を行う。代表的な先行研究には、信号光と参照光の光路が共通するコリニアホログラフィックメモリー[6]が挙げられる。本研究ではこの方式をベースとした、表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーを提案した。

従来の体積型コリニアシステムでは、信号光と参照光を干渉させてホログラムを記録するが、ホログラムには信号再生に寄与しないグレーティング成分が含まれてしまう問題があった。一方で、表面型の場合は、あらかじめ数値計算によって設計すべきホログラムの位相変調分布を計算し、その位相変調分布を再現するような表面構造を作製してホログラムを記録する。そのため、不要なグレーティング成分を選択的に除外したホログラムを設計できるという利点がある。

提案手法による信号画像の再生特性を調べるために、単一ホログラムにおける再生画像の信号対ノイズ比とシフト選択性をフレネル回折計算による数値シミュレーションによって評価した。その結果、不要グレーティングの除去によって、信号対ノイズ比の向上が見られたものの、体積型の場合より画像が劣化する様子が確認された。また、シフト選択性についても、一定のバイアスノイズが発生してしまうことが確認され、多重性能が大きく劣化することが示された。

2. 表面型相関シフト多重ホログラフィックメモリーの解析モデルの構築

本システムにおける信号の記録再生はフレネル回折計算による数値計算が可能であるものの、その計算過程は解析的ではない。そのため、本システム特有のノイズ発生原理も含めた、記録再生原理を定性的に理解するために、見通しの良い解析モデルの構築を行った。

従来の体積型コリニアシステムでは、平面波展開モデル[7]による解析モデルが提案されている。この解析モデルでは、再生時の読み出し光を波数ベクトルの向きが異なる平面波の重ね合わせとして考え、またホログラムについても、正弦波グレーティング成分の重ね合わせとして考える。本研究では、この平面波展開モデルの考え方を表面型ホログラムの場合に適用させ、本システムの新たな解析モデルを構築した。

平面波展開モデルにおけるホログラムからの回折光は、読み出し光の平面波の波数ベクトルとホログラムのグレーティング成分の組み合わせを一つ一つ考え、それぞれの組み合わせごとに発生する回折光の総和として考える。この時、体積型ホログラムではブラッグ条件が成立する組み合わせからのみ回折光が発生し、また、+1次回折光のみが発生する。一方で、表面型ホログラムでは全ての組み合わせから回折光が発生し、さらにあらゆる次数の回折光が発生する。したがって、表面型ホログラムの場合は、信号再生に寄与しない無関係な回折光が多数発生することになる。このことを考慮して本システムの記録再生過程の理論式を展開し、見通しの良い解析モデルを構築した。この解析モデルによって、信号・参照パターンなどの本システムのシステムパラメーターと最終的な再生信号画像との定性的な関係が直感的に理解できるようになった。

3. ラマン=ナス回折に起因する再生信号のノイズ発生メカニズムとその抑制方法

表面型ホログラムは、体積型ホログラムのブラッグ回折とは異なり、ラマン=ナス回折原理に従い、その結果として本システムには従来システムには存在しないノイズが現れる。本研究では、これらのノイズ発生メカニズムを解析し、抑制することを試みた。

まず、本研究で新たに構築した本システムの解析モデルに基づき、ノイズ発生メカニズムの解析を行った。本システムでは、信号画像の再生に寄与する回折光の他に、信号再生に寄与しない回折光も発生してしまう。このノイズ回折光が、再生すべき信号光と像面で空間的に重なって干渉することがノイズの要因となっている。このノイズ回折光の像面におけるパターンは、使用する信号光画像と参照光画像の画素配置によって決定される。

次に、以上の解析結果を踏まえて、このノイズの抑制手法の考案を行った。まず、ラマン=ナス回折では、ホログラムの位相変調量の深さを適切に設定することで、高次回折になるほど回折効率が小さくなることに着目し、ノイズの支配的な要因となる回折次数の評価を行った。数値計算による比較を行った結果、信号再生に寄与する+1次回折光強度に対して、±2次の回折光強度は 10^{-2} 倍から 10^{-3} 倍程度となり、ほぼ無視できる大きさであることが確認された。このことから、±1次のノイズ回折光の重なりを回避することが重要であることが示された。この方針に基づき、本研究では新たに「 Π 字型信号・参照パターン」を提案した。このパターンは横方向に1列の参照点を配置し、その両端を始点として、鉛直方向に2列の信号点を配置したパターンである。±1次のノイズ回折光が、再生すべき信号画像と一切重ならず、また、信号点数と参照点数が最大数となるよう効率良く配置されている。

最後に、提案した Π 字型信号・参照パターンの有用性を確認するために、再生信号のシフト選択性の評価を行った。従来コリニアシステムで一般的に用いられていた信号・参照パターンと比較すると、シフト選択性のバイアスノイズが大きく抑制されることが数値シミュレーションによって確認された。また、原理検証実験を行い、数値シミュレーションと矛盾しない結果が得られたことから、 Π 字型信号・参照パターンが本システムにおけるホログラムの多重記録に対して有効であることが確認できた。

4. 時系列信号の記録再生特性の解析と定量的評価

最後に、 Π 字型信号・参照パターンによる表面型ホログラムの多重記録を、従来の時系列信号方式コリニアホログラフィックメモリー[8]に適用した際に、メモリーとしてどのような記録再生特性が得られるかを調べた。

まず、本システムにおけるシステムパラメーター同士の複雑な関係を整理し、記録密度とデータ転送レートに関わる独立パラメーターを明らかにした。最終的な記録密度とデータ転送レートの値は、再生信号の信号対ノイズ比がどこまで許容できるかによって決定される。そのため、考慮すべき独立パラメーターを変えたときの再生信号の信号対ノイズ比の変化を定量的に評価した。数値シミュレーションによる評価の結果、記録密度・データ転送レートと信号対ノイズ比の対応関係から、十分読み出しが可能と考えられる3.8dBの信号対ノイズ比において、Blu-ray

Discと同じ記録密度 $3.3\text{MB}/\text{mm}^2$ に相当することが示された。また、この条件における理論的なデータ転送レートは $9\text{GB}/\text{s}$ （記録媒体のシフト速度 $30\text{m}/\text{s}$ の場合）に相当し、Blu-ray Discの約300倍、磁気テープの約20倍に相当することが示された。さらに、記録密度一定でデータ転送レートを増加させた場合に、信号対ノイズ比にほとんど変化が見られなかったことから、記録密度を落とすことなく、データ転送速度の更なる向上が期待できることが示された。

最後に、表面型ホログラムの構造を作製する上で、どの程度の作製精度が必要になるかを見積もるために、計算する表面型ホログラムの空間分解能および位相変調の諧調数と、信号対ノイズ比の関係を評価した。数値シミュレーションによる評価の結果、構造作製の空間分解能については、設計すべきホログラムの最大空間周波数成分に対して4倍以上の分解能であれば、信号対ノイズ比への影響がほとんど現れなくなることが示され、位相変調の諧調数については、8諧調以上であれば信号対ノイズ比への影響がほとんど現れなくなることが示された。

5. 総括

本研究では表面型ホログラムの多重記録を用いた、新規メモリーシステムを提案し、その理論的な記録再生原理・記録再生特性の解明を行った。そのために本システムの解析モデルを新たに構築し、従来手法には見られなかった本システム特有のノイズについて、その発生メカニズムを解明した。さらに、このノイズを理論的に抑制する手法を新たに考案し、その有用性を実証した。さらに、本システムのメモリーとしての記録再生特性について、システムパラメーターとの定性的な関係を解明し、その定量的な評価を行った。本研究で得られた理論的な知見は、表面型ホログラムを用いた光メモリーの将来的な実用化・応用に向け、信号対ノイズ比の向上といった、システムの最適化を行う上での指針として役立つことが期待される。

参考文献

1. P. J. van Heerden, "Theory of optical information storage in solids," *Appl. Opt.* **2**, 393 (1963).
2. D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777 (1948).
3. E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media," *Appl. Opt.* **5**, 1303 (1966).
4. G. Barbastathis, M. Levene and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," *Appl. Opt.* **35**, 2403 (1996).
5. C. Denz, G. Pauliat and G. Roosen, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Opt. Commun.* **85**, 171 (1991).
6. H. Horimai, X. Tan and J Li, "Collinear holography," *Appl. Opt.* **44**, 2575 (2005).
7. T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan and H. Horimai, "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function," *Opt. Lett.* **31**, 1208 (2006).
8. 大森遼. "位相変調型時系列コリニアホログラフィックメモリーの研究," 東京大学大学院工学系研究科修士論文 (未公開) (2018) .