

## 4-2 フォトリフラクティブ効果を用いた 画像蓄積技術

### 4-2 *Image Storage Techniques using Photorefractive Effect*

高山佳久 張 家森 岡崎佑美 小舘香椎子 有賀 規  
TAKAYAMA Yoshihisa, ZHANG Jiasen, OKAZAKI Yumi, KODATE Kashiko,  
and ARUGA Tadashi

#### 要旨

フォトリフラクティブ効果を用いた画像蓄積において、ホログラムの形成にランダムな波面を有する参照光を適用し、画像の多重蓄積数を増大させる技術を開発した。本手法は、マルチモードファイバーの束を伝搬した参照光が被る擬似ランダムな波面歪の利用を特徴とする。LiNbO<sub>3</sub>結晶を記録媒質とした実験を行い、従来と比較してコンパクトな光学系で画像の多重蓄積が可能となることを示す。

Optical image storage techniques using the photorefractive effect are presented, where the random reference multiplexing scheme is introduced to the holographic recording process in order to increase the storage capacity. The common feature of our techniques is the use of a bundle of multimode fibers placed in the optical path of reference wave. This approach can automatically impose quasi-random patterns on the wavefront when the reference wave penetrates the fiber bundle. As a proof-of-principle, experiments of recording holograms are performed with a LiNbO<sub>3</sub> crystal. The results show that the use of fiber bundle enables us to build a simple and compact optical setup with keeping the capacity of hologram multiplexing.

#### [キーワード]

フォトリフラクティブ, ホログラム多重, 光メモリ, ファイバーバンドル  
Photorefractive, Hologram multiplexing, Optical memory, Fiber bundle

### 1 まえがき

近年、フォトリフラクティブ効果を用いた画像蓄積の研究が盛んとなり、画像の記録数を増加するホログラムの多重技術が検討されている[1]-[7]。特に最近では、光ファイバーを擬似ランダムな波面を生成するデバイスとして導入し、これまでに提案された多重方式との組合せが着目されている[8]-[10]。波長多重方式では、従来の効果に加えて、光ファイバーを伝搬した後の光が波長へ依存して異なる波面を成すことを利用し、画像の蓄積数を向上している[8]。また空間多重方式では、ホログラムの記録領域が空間的に重なっていても、ランダムな波面とこれを空間的に変位した波面との相関が低いことを利用し、多重記録を可能としている[9]。角度多重方

式においては、ランダムな波面とこれに角度変位を与えた波面との低い相関が、蓄積した複数の画像間のクロストークを抑えている[10]。

一方、画像の蓄積数の向上とともに、光学系の簡易化、コンパクト化も重要な検討課題である。これまで、簡易な構成で多重記録を可能とする光学系を構築するため、鏡やレンズなどを用いずに参照光を導くためのマルチモードファイバーの束(以下、「ファイバーバンドル」という。)が採用され[11]、我々のアプローチとして、記録媒体の平行移動とファイバーバンドルの使用を組み合わせた空間シフト多重を提案した[12]。この手法はランダムな波面と媒質の空間変位とを組み合わせた効果を有し、光学系の画像蓄積数を向上することに成功した。

しかし、記録媒質の位置を空間的に変位する

には、その動作に要する領域をあらかじめ確保する必要がある。そこで、よりコンパクトな光学系を構築するために記録媒質を固定配置し、ウェッジプリズムの回転動作を採用した[13]。プリズムの回転によって、これを透過した光の伝搬角度を制御し、ファイバーバンドルの光入射面をコニカルに照射する。この方法では、ファイバーバンドルから射出するランダムな波面が、バンドルを照射する光の伝搬角度に依存することを利用し、多重記録を可能とした。

これまでの方法では、固定配置したファイバーバンドルを他の能動素子と組み合わせてきたが、シンプルな光学系の構築には、光学系に含まれる素子数を減らすことが有効である。そこで、ファイバーバンドル自体を能動素子として取り扱い、他の能動素子を用いない光学系を提案した[14]。ここでは、ウェッジプリズムを回転する方法と同等の効果が、バンドルの回転によっても得られることに着目し、多重記録を行った。

以下では、これら三つの方法に基づいた実験結果を示し、シンプルな光学系で画像蓄積を行う本技術の有効性を示す。

## 2 空間シフトによる多重記録

ホログラムの記録媒質としてフォトリフラクティブ効果を示すLiNbO<sub>3</sub>結晶を用い、これを波長532nmのレーザ光で照射する。この場合、結晶の主屈折率は、常光線に対して2.32であり、異常光線に対しては2.23となることが知られている[15]。LiNbO<sub>3</sub>結晶を用いる場合、ホログラムの蓄積に異常光線を用いた方が、常光線を用いた場合に比べて、読み出し時に高い回折効率を得ることができる。一方、常光線を用いると、媒質の主屈折率が大きいので、画像の蓄積数の増加が期待できる。また、この場合、結晶の光学軸を含む平面内において直交する物体光と参照光の干渉が可能となる。これは、特にファイバーバンドルからの射出光を参照光として用いる場合、再生した画像と参照光の重なりを防ぐことに有効となる。したがって、以下の実験では、照射する光の偏光を結晶に対して常光線とし、画像の蓄積及び読み出しを行う。

ファイバーバンドルを用いた最初の試みとして、空間シフト多重とランダム多重とを組み合わせた光学系を図1に示す。ここで、BSはビームスプリッタ、Mは鏡、BEはビームエキスパンダ、SLMは空間光変調器、PFは偏光フィルタである。記録媒質として、一辺が長さ1cmの立方体の45deg-cut LiNbO<sub>3</sub>:Fe結晶を使用し、これを直動ステージに載せる。また、使用するファイバーバンドルは、長さ50cm、直径6mm、可視光の透過率は60%の市販品である。

ホログラムの多重に要する媒質の移動量を見積もるため、直動ステージのシフト量に対する回折効率の変化を測定し図2に示す。同図では、ファイバーバンドルの光出射面と結晶端面との距離をLと与えており、L=12mmの場合は空間シフト量2μm、L=22mmの場合は3μmで蓄積したホログラムからの回折がほぼ0に低下する。図3はL=22mmと設定し、多重記録として各ホログラムを6秒間書き込んだ場合の回折効率である。同図は、蓄積した複数のホログラムを明確に区別して読み出せることを示しており、この

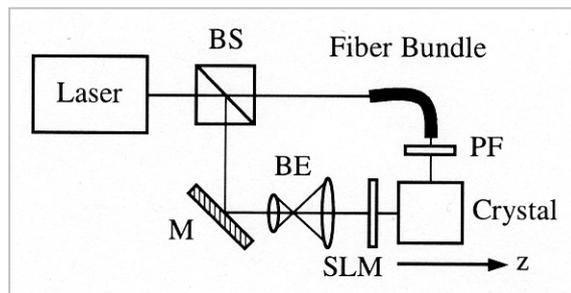


図1 空間シフトによる多重記録の光学系

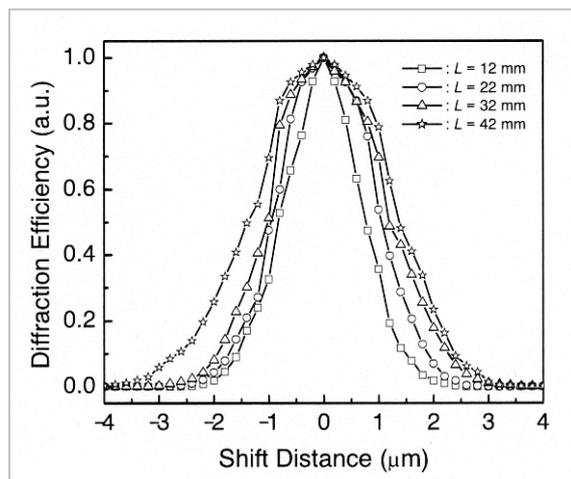


図2 ホログラムの回折効率

結果から本手法の有効性が確認できる。

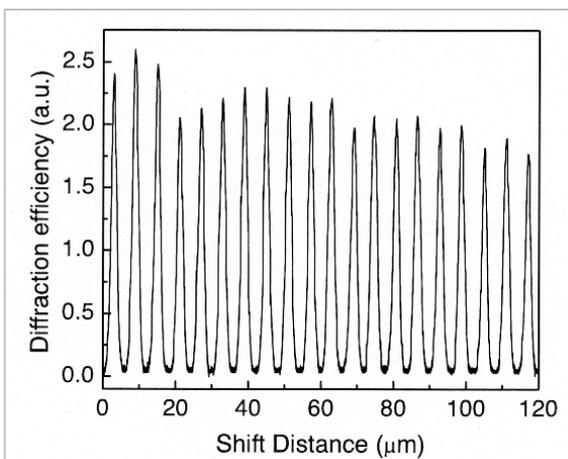


図3 多重記録したホログラムの回折効率

### 3 ウェッジプリズムの適用

直動ステージに結晶を乗せて空間シフトを行う方法に替わり、図4のように回転ステージに取り付けたウェッジプリズムをファイバーバンドルの手前に配置する。ウェッジプリズムの回転動作に伴いファイバーバンドルへの光の照射角度が変化すると、バンドルから出射する光の波面も変化する。ある伝搬角度でファイバーバンドルを照射して得たランダムな波面と、別の角度でファイバーバンドルを照射した場合に得られる波面とは相関が非常に小さくなることを利用し、画像の多重蓄積を可能とする。

ホログラムの選択的な取扱いを可能とするウェッジプリズムの最小回転角度を求めるため、回転ステージにウェッジプリズムを載せ、微小角度 $\Delta\theta$ 回転した場合における回折効率を測定する。例としてウェッジプリズムの傾斜角度が4度

及び8度の場合について回折効率を測定し、規格化した結果を図5に示す。ここで、ファイバーバンドルは、図1に示した実験と同じ市販品を使用した。同図においては、傾斜角8度の場合の回折効率の方が、傾斜角4度の場合と比較して、回転角度の変化に対して敏感に減衰する。この特性は、画像蓄積の多重数の向上に有効である。よって、以下の実験では、プリズムの傾斜角度として8度を採用する。

物体光として画像を用い、ウェッジプリズムの回転によって複数の画像を多重蓄積する。プリズムの回転角度を戻し、蓄積した画像を読み出した結果を図6に示す。同図においては、再生像間の重なりがほとんど観測されず、複数のホログラムを区別して取り扱えることが確認できる。

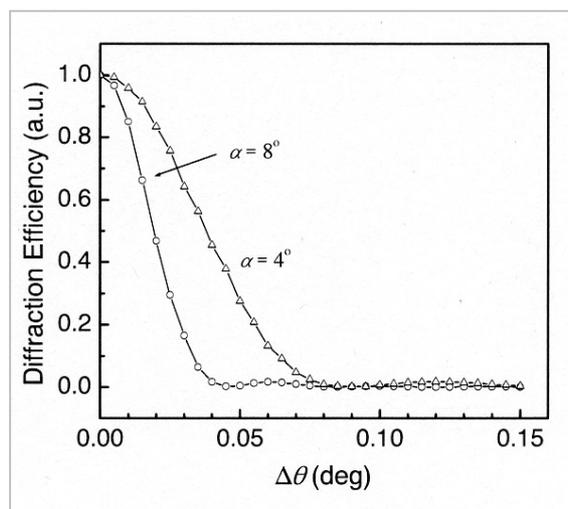


図5 ホログラムの回折効率

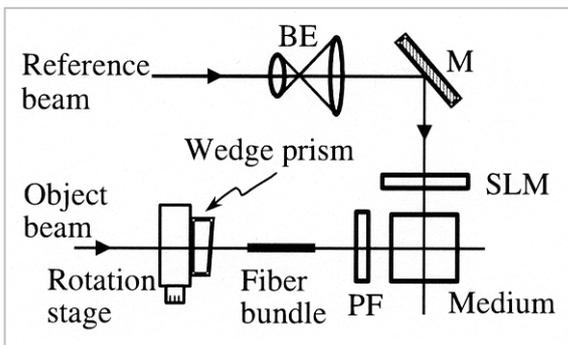


図4 ウェッジプリズムによる多重記録の光学系

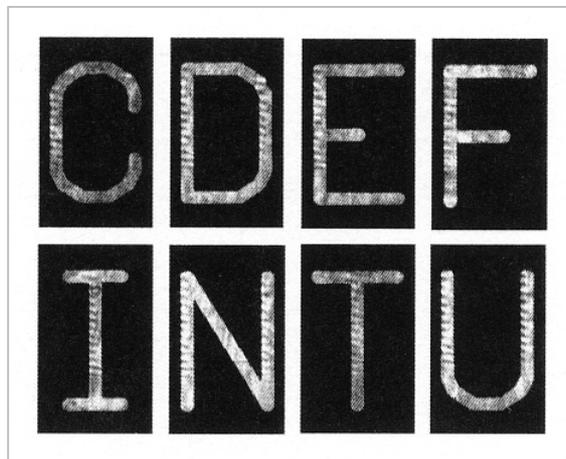


図6 100枚蓄積した画像からの再生像（抜粋）

なお、再生像には干渉縞が含まれているが、これは結晶端面による反射光が大きく影響している。よって、結晶端面に無反射コートを施すことにより、十分に干渉縞を低減できると考えられる。

#### 4 ファイバーバンドルの回転

ファイバーバンドルの二つの使用形態を図7(a)及び7(b)に示す。図7(a)では、ファイバーバンドルは固定配置され、バンドルの光入射面が斜めに照射されている。入射面を照射する光の伝搬角度を変化させることにより、バンドルから出射する光の波面がランダムに変化する。これと同様の効果が、図7(b)に提案するように、伝搬方向を固定した光で光入射面を照射されたファイバーバンドルの回転動作によっても得られる。

図8に示す実験光学系においては、図7(b)の方法を採用し、ファイバーバンドルの入射面に対してわずかに傾いた角度で光を入射している。

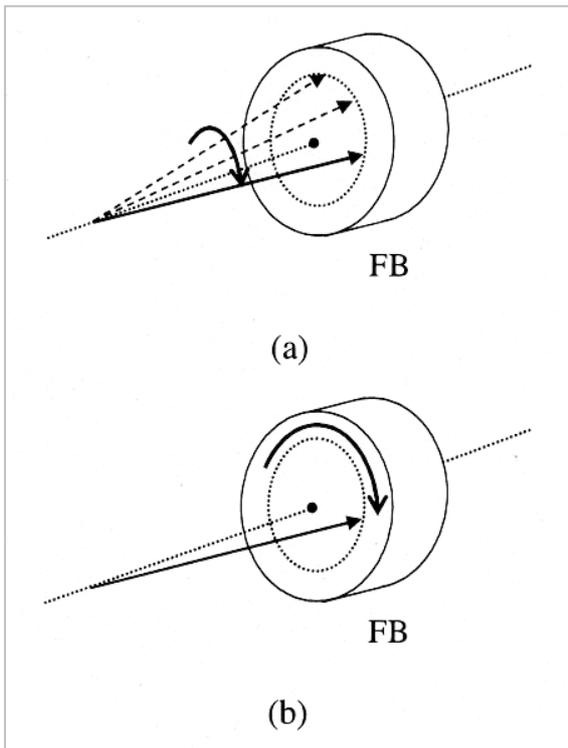


図7 (a) 固定配置したファイバーバンドルをコニカルに照射する場合。(b) 光の照射角度を固定し、ファイバーバンドルを回転する場合

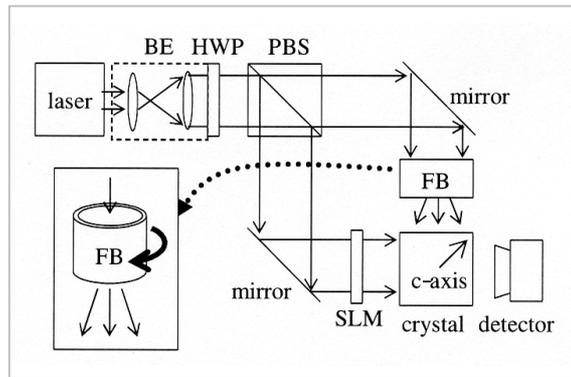


図8 ファイバーバンドルの回転による光学系

ここで、FBはファイバーバンドルであり、その回転動作を挿入図中の太い矢印で示す。実験に用いたファイバーバンドルは商品として入手可能であり、開口数は0.56、可視光の透過率は60%である。回転動作を行うため、バンドルの円柱側面はアルミニウムで覆われており、図4に示したウェッジプリズムを載せた回転ステージと同じステージに載せられている。バンドルは、これ自体を回転するため、長さが1cmに切れられ、その直径は1cmである。ここに直径50 $\mu$ mのマルチモードファイバーが約40000本束ねられている。

実験においては、ファイバーバンドルの入射面の法線方向から4.7度傾けた角度で光を入射する。PBSで反射された光の偏光は結晶に対する常光線であり、PBSを透過した光の偏光は異常光線である。しかし、ファイバーバンドルを透過した光は偏光も乱されるため、結晶を照射するバンドルからの出射光には、常光線成分も自動的に含まれている。

結晶を照射する全光電力を20mW、参照光と物体光の電力の比を10:1とする。多重記録を行うに当たり、まず数字の1を30秒間書き込んだ後に物体光を遮断し、ファイバーバンドルを0.2度回転する。この後に数字の2を30秒間記録する。この手続きを繰り返し、数字の30までを蓄積する。蓄積した画像を数字の順に読み出し、CCDカメラで取得した結果を図9に示す。再生された数字1全体の光電力は、数字2を書き込む前には0.663mWであった。しかし、読み出し過程直前では0.177mWまで減衰した。これは、参照光が結晶を照らす光電力の3.7%から0.98%への低下に相当し、画像の多重記録に伴う回折効率の低下

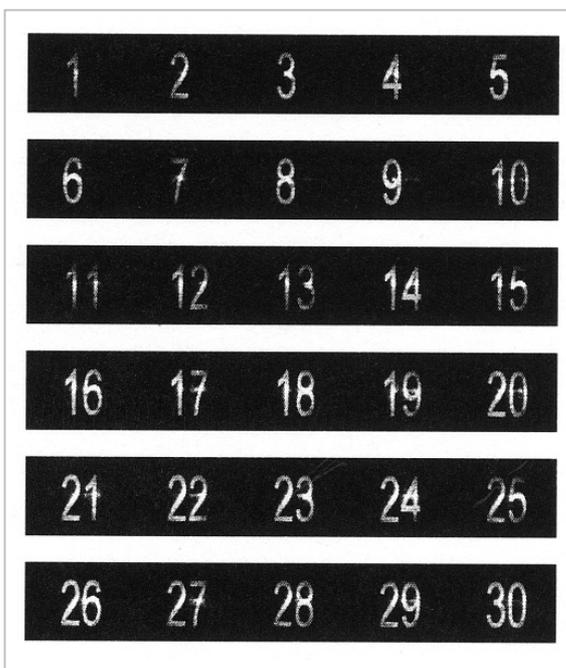


図9 再生像

が観測されている。しかし、蓄積された画像は、ファイバーバンドルの回転という単純な動作によって、鮮明に読み出されている。

光学系のサイズを縮小するには、ホログラムの多重記録を可能とする機能を担う素子の小型化が最も効果的である。本方法では、長さ1cmと短く切ったファイバーバンドルの回転のみでこの機能を提供しており、レンズや可動鏡など

の光学素子を必要としない。また、ファイバーバンドルの回転は、光学素子が配置された平面と平行な軸回りを行うため、回転動作のために余分な空間を確保する必要もない。よって従来の光学系と比較して、よりコンパクトな光学系の構築に貢献するものと考えられる。

## 5 むすび

本報告では、フォトリフラクティブ効果を用いた画像蓄積において、ホログラムの形成にランダムな波面を有する参照光を適用し、画像の多重蓄積数を向上する技術について述べた。特に、ファイバーバンドルを伝搬した参照光が自動的に被る擬似ランダムな波面歪を利用し、三つの手法を提案した。第1の方法では、ファイバーバンドルからの出射光で照射された結晶の位置をシフトすることにより、多重記録を行った。第2の方法では、ウェッジプリズムを用いてファイバーバンドルを照射する光の伝搬角度を制御した。第3の方法では、ファイバーバンドル自身を回転動作させ、実験系に含まれる光学素子数を減少した。これらの方法を適用した実験を行い、従来と比較してコンパクトな光学系で画像の多重蓄積が可能となることを示した。

## 参考文献

- 1 J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Volume Holographic Storage and Retrieval of Digital Data", *Sci.* 265, 749-752, 1994.
- 2 D. Psaltis and G. W. Burr, "Holographic data storage", *IEEE Computer*, 31, 52-60, 1998.
- 3 C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method", *Opt. Commun.* 85, 171-176, 1991.
- 4 G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage using orthogonal wavelength multiplexed volume holograms", *Opt. Lett.* 71, 1471-1473, 1992.
- 5 K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing", *Opt. Lett.* 19, 993-994, 1994.
- 6 H. Lee and S. K. Jin, "Experimental study of volume holographic interconnects using random pattern", *Appl. Phys. Lett.* 26, 2191-2193, 1993.
- 7 G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves", *Appl. Opt.* 35, 2403-2417, 1996.
- 8 K. H. Kim, H.-S. Lee, and B. Lee, "Enhancement of the wavelength selectivity of a volume hologram by use

- of multimode optical fiber referencing", Opt. Lett. 23, 1224-1226, 1998.
- 9 Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing", Opt. Lett. 22, 739-741, 1997.
  - 10 Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Angular and speckle multiplexing of photorefractive holograms by use of fiber speckle patterns", Appl. Opt. 37, 6969-6972, 1998.
  - 11 Y. Jeong and B. Lee, "Effect of a random pattern through a multimode-fiber bundle on angular and spatial selectivity in volume holograms: experiments and theory", Appl. Opt. 41, 4085-4091, 2002.
  - 12 J. Zhang, S. Yoshikado, and T. Aruga, "Shift multiplexing for holographic storage system using fiber bundle referencing scheme", Appl. Phys. Lett. 82, 1, pp. 25-27, 2003.
  - 13 J. Zhang, S. Yoshikado, and T. Aruga, "Compact holographic storage by using a fiber bundle to guide the reference beam", Rev. Laser Eng. 31, 11, 2003.
  - 14 Y. Takayama, Y. Okazaki, J. Zhang, T. Aruga, K. Kodate, "A method of hologram multiplexing using a fiber bundle with rotary movement", Appl. Opt. (accepted).
  - 15 E. D. Parik, "Handbook of Optical Constants of Solids", 699, Academic Press, San Diego, 1998.



たかやま よしひろ  
**高山佳久**  
無線通信部門 光宇宙通信グループ研  
究員 博士(工学)  
空間光通信、非線形光学



**張 家森(Zhang Jiasen), Ph.D.**  
北京大学教授  
optical memories, ultrafast near-  
field optics, holography, nonlinear  
optics



おかざき ゆみ  
**岡崎佑美**  
日本女子大学理学研究科博士課程前期  
2年  
光情報処理



こだて かへこ  
**小館香椎子**  
日本女子大学理学部教授 博士 (工  
学)  
マイクロオプティクス、光エレクト  
ロニクス



あるが のりあき  
**有賀 規**  
基礎先端部門特別研究員 理学博士  
空間光伝送・伝搬