# 5-2 フォトリフラクティブ効果を用いた歪画像 補正

## 5-2 Distorted Image Reconstruction Using Photorefractive Effects

張 家森 吉門 信 有賀 規 Jiasen ZHANG, Shin YOSHIKADO, and Tadashi ARUGA

#### 要旨

ゆらぎ媒質を通過する歪画像の新たな補正方法として、フォトリフラクティブ効果を用いる方法を紹 介する。この方法では、一つの物体ビームと一つの標本化ビームを使用するだけで歪画像補整が可能で ある。また、忠実度の高い再生画像が得られる。

A new method of distorted image reconstruction through a turbulent medium is demonstrated using photorefractive effects. In this method, there are only one object beam and one sampling beam. The images, reconstructed with high-fidelity, are picked up.

#### [キーワード]

画像歪補正, 歪画像, インコヒーレントーコヒーレント光変換, フォトリフラクティブ効果, 扇効果 Image reconstruction, distorted image, incoherent-to-coherent conversion, photorefractive effect, fanning effect.

#### 1 はじめに

不均質な媒質を通過する一方向の画像伝送に は、ホログラフィと実時間4波混合(FWM: four-wave mixing) が長年にわたって利用されて きた[1]~[17]。FWM はリアルタイムである分、 ホログラフィより魅力的である。1982年、Yariv とKoch[5]は歪媒質を通過する画像伝送にFWM を使用することを提案し、後にFisherら[6]がフ ォトリフラクティブ(光誘導屈折)結晶を用いて これを実証した。画像伝送法[11]~[17]はこのほか にもいくつか提唱されている。こうした方法で は、歪媒質は薄くなければならない。言い換え ると、FWM材料の上に歪媒質の像が結像されな ければならない。一方、厚く動的な歪媒質を用 いる画像伝送についても低速応答材料を使った 実証試験が行われている[2] [9] [10]。もう一つ特殊 なケースとして、動的散乱媒質を通過する画像 伝送に対して受動的な位相共役鏡を用いるもの がある[18]。本論文では、厚い動的歪媒質を通過 する一方向の画像伝送を実現する新たな方法に ついて紹介する。この方法では参照ビームが必 要なく、物体ビームのほかに一つの標本化ビー ムがあれば歪補正した画像が得られる。

本論文で取り扱うような一方向画像伝送系で は、一般にFWMが必要とされる。FWMでは、 二つの書込みビームが歪媒質に関して共通の位 相・振幅情報をもつほか、片方のビームには入 力画像情報も含まれる。FWMの位相差過程によ り、出力ビームには入力画像と同じ位相・振幅 情報が含まれる。一方、Feinberg[11]は、こうし た方法は薄い位相歪媒質を通した画像伝送にし か有効でないと指摘した。FWMの位相差過程で は、厚い位相歪媒質を介した画像伝送の問題点 が解決できない。

使用する歪媒質が薄くなく、ゆらぎ大気のよ うに厚く動的なものであるケースは多い。厚く 動的な歪媒質を通過する画像伝送の場合、歪媒

質のゆらぎ周期がホログラフの露光時間又は非 線形材料の応答時間に比べて十分に短いと、ホ ログラフ物質又は非線形材料の振幅変動を平均 化することによって忠実度の高い画像歪補正が 得られる[2] [9] [10]。この方法では、アポダイゼー ションの時間平均が基礎となる。すなわち、低 速応答性の非線形材料は時間平均した強度パタ ーンにしか反応せず、高速変動する強度パター ンは「見え」ない。時間平均した強度パターン は、無歪画像とほぼ均質なノイズ背景との重ね 合わせだと考えることができる。つまり、最大 時間平均強度のパターンには無歪画像に関する 空間情報が含まれている。問題は、動的歪媒質 のゆらぎ周期より十分に長い時間スケールにお いてノイズ背景からいかにして無歪画像を取り 出すかである。以上の議論から、厚い動的歪媒 質については位相差過程がなくてもよいことが わかる。画像を厚い動的歪媒質を介して伝送す る場合、参照ビームがなくても、さらにいえば FWM過程がなくてもかまわない。

この原理に従えば、非線形材料の時間応答が 動的歪媒質のゆらぎ周期に比べて遅いこと、及 び非線形材料が物体ビームの時間平均強度に応 答して変化することが必要となる。さらに、物 体ビームの最大時間平均強度パターンに関する 空間情報が出力信号に含まれていなければなら ない。我々は最近、フォトリフラクティブ扇効 果を用いる新たなインコヒーレント-コヒーレ ント光変換器[19] [20]を提案した。インコヒーレン ト・ビームの強度が上がるにつれてコヒーレン ト・ビームの透過率が上昇することが明らかに なっている。ノイズ背景から無歪画像を取り出 す過程にこの特性を使用すれば、厚い動的歪媒 質を通過する一方向の画像伝送が参照ビームや FWM 過程を用いずに実施できる。そのことを以 下に述べる。

#### 2 実験構成

図1に実験構成の概略を示す。送受信光源には 波長532nmのcw二重Nd:YVO4レーザを用いた。 物体ビームL。には主として一般の自然光ビームが 使用されるが、今回の実験ではNd:YVO4レーザ から放射される通常偏光かつ直径6mmのレーザ

ビームを用いた。物体ビームLは、米国空軍の解 像力テストチャート RC を通過すると RC の画像 の空間情報を得る。送信側・受信側の望遠鏡は それぞれL1、L2、L3、及びL4のレンズで構成さ れる。L2とL3の距離は800mmである。L2とL3 の間に1200Wの電気ファンヒータを2台置いて 高温空気をつくった。これが動的歪媒質の役割 を果たす。物体ビームの伝搬方向における歪媒 質の全長はおよそ550mmである。これは集光光 学系の被写界深度(約4mm)よりもはるかに長い。 そのため厚い媒質と考えて差し支えない。高温 空気について測定された外乱ゆらぎ周期は10ms 前後であった。用いたフォトリフラクティブ結 晶はCe:BaTiO<sub>3</sub>であり、その寸法は7.38mm× 7.22mm×6.34mm、またc軸は7.38mmの辺に平 行である。受光側の標本化ビーム L。は、Nd:YVO4 レーザによる均一のコリメート・レーザビーム であり、異常偏光並びに6mmの直径をもつ。I。 との光路差がレーザのコヒーレント長よりはる かに長いため、LとLは互いにインコヒーレント である。つまり、物体ビームと標本化ビームを それぞれ異なる2光源で生成してもかまわないの である。I<sub>s</sub>とI<sub>o</sub>はビームスプリッタBSによって 結晶に同軸で入射する。これによって高い解像 度が得られる。外部入射角は25°とした。結晶は L4の焦点面に置き、米国空軍の解像力テストチ ャートRCの像をL1、L2、L3、及びL4によって 元の被写体と同じ大きさで結晶上に結像させる。 その後、偏光ビームスプリッタ PBS を用いて物



体ビーム I。と出力される標本化ビーム I。とを分離 する。伝送された画像と補正された画像の写真 をスクリーン又は CCD カメラ系を使って記録す る。

### 3 実験結果

はじめに図1に示した実験構成を使って画像歪 補正の実証試験を行った。結晶は強い扇効果を 有するため、標本化ビーム」の透過率はきわめて 小さい。米国空軍の解像力テストチャートの動 的歪画像を物体ビームLに与え、それを使って扇 効果格子を消そうとしたところ、標本化ビーム の出力強度パターンはLによって選択的に変調さ れた。Lの出力強度は、Lの時間平均強度に比例 して増加するはずであり、その結果、Lの出力最 大強度パターンはLの最大時間平均強度パターン に関する空間情報をもつことになる。一方で前 述の議論によると、物体ビームLの最大時間平均 強度パターンは無歪画像の空間情報をもってい るはずである。したがって、出力されるLには無 歪画像の空間情報が含まれていると考えられる。 出力される標本化ビームを検出するためのCCD カメラを使用すれば、歪補正画像は記録できる と考えられる。

物体ビーム I。と標本化ビーム I。の強度がそれぞ れ 150mW/cm<sup>2</sup>と 34mW/cm<sup>2</sup>だったとき、扇効 果の確立時間と消滅時間はそれぞれ 6.4秒と 1.3秒 であった。これは歪媒質のゆらぎ周期に比べて はるかに長い値である。物体ビームによって搬 送され結晶上に結像した画像を歪媒質の発生前 後で比較したものが、図2の(a)と(b)である。 原画像が動的歪媒質によって完全にぼけている ことがわかる。フォトリフラクティブ結晶がも つ遅い応答特性を使用することにより、図2(c) に示すような高解像度の歪補正画像が得られた。

次の実験では、Lの強度を150mW/cm<sup>2</sup>のまま で固定し、Lの強度を変化させて歪補正画像の解 像度を測定した。その結果を図3に示す。βは(I. を基準にした) LとLの比である。 歪補正画像の 解像度は B が大きいときに高い値を示している ことがわかる。 $\beta$ の値が小さくなるとノイズや 不安定性が明らかに増加した。さらに、強度比 を B =4.4 に固定した状態でテストチャートを取 り除き、Lの強度と応答時間との関係を測定した。 扇効果の確立と消滅に関する応答時間を図4に示 す。消滅時間を測定するときは、物体ビームと 標本化ビームの両方を発生させた。応答時間は 強度を上げると変化したが、β=4.4の固定条件 のもとではLの強度を変えても歪補正画像の解像 度に明らかな変化は見られなかった。その理由 は、応答時間が歪媒質のゆらぎ周期よりはるか に長いためである。

これらの実験結果を見ると、厚い動的歪媒質 に対する画像歪補正が参照ビーム及びFWM過程 を用いなくても実施できたことがわかる。この 方法では、物体ビームが標本化ビームの伝送を 空間変調する消去ビームの役割を果たしている。 また結晶は、物体ビームの時間平均強度に応答 して変化する。したがって、白色光源を送信側 の光源として使用することができる。このこと から本方法には広範な応用が期待できる。もう 一つ、本方法では一つの標本化ビームと一つの インコヒーレントな物体ビームがあれば厚い動





的歪媒質を介した画像伝送が行え、しかも参照 ビームを必要としない。この特徴により、光学 系のビーム位置合わせにおいて、通常のFWM画 像伝送系のように物体ビームと参照ビームの重 なりを正確に調整する必要がなくなり、ビーム 調整過程が簡素化されるうえ、歪補正された出 力画像において高い解像度が得られる。扇効果 を利用することにより、物体ビームは標本化ビ ームの透過率を直接変調し、その結果、系の効 率が向上し、歪補正された出力画像は大きな強 度をもつことができる。

#### 4 まとめ

本論文では、厚い歪媒質を介した一方向の画 像伝送を参照ビーム並びにFWM過程を用いずに 実施する新しい方法について紹介した。この方 法では、一つの物体ビームと一つの標本化ビー ムを使用するだけである。フォトリフラクティ ブ結晶の応答時間は、動的歪媒質のゆらぎ周期 よりも十分に長いことが必要である。これによ り、結晶は高速変動する物体ビームに関して時 間平均強度パターンにしか応答しなくなる。フ ォトリフラクティブ扇効果を利用することで、 物体ビームの時間平均強度パターンが標本化ビ ームの透過率を直接変調する。その結果、出力 される標本化ビームは無歪画像の空間情報をも つことになる。本方法によって、忠実度の高い 歪補正画像が得られる。

#### 参考文献

- 1 J. W. Goodman, W. H. Huntley, Jr., D. W. Jackson, and M. Lehmann, Appl. Phys. Lett. 8, 311 (1966).
- 2 J. D. Gaskill, J. Opt. Soc. Am. 58, 600 (1968).
- 3 H. Kogelnik and K. S. Pennington, J. Opt. Soc. Am. 58, 273 (1968).
- 4 J. W. Goodman, D. W. Jackson, M. Lehmann, and J. Knotts, Appl. Opt. 8, 1581 (1969).
- **5** A. Yariv and T. Koch, Opt. Lett. 7, 113 (1982).
- 6 B. Fisher, M. Cronin-Golomb, J. O. White, and A. Yariv, Appl. Phys. Lett. 41, 141 (1982).
- 7 O. Ikeda, T. Suzuki, and T. Sato, Appl. Opt. 22, 2192 (1983).
- 8 O. Ikeda, T. Sato, and M. Takehara, Appl. Opt. 22, 3562 (1983).
- 9 T. G. Alley, M. A. Kramer, D. R. Martinez, and L. P. Schelonka, Opt. Lett. 15, 81 (1990).

- 10 M. A. Kramer, T. G. Alley, D. R. Martinez, and L. P. Schelonka, Appl. Opt. 29, 2576 (1990).
- 11 J. Feinberg, Appl. Phys. Lett. 42, 30 (1983).
- 12 K. R. MacDonald, W. R. Tompkin, and R. W. Boyd, Opt. Lett. 13, 485 (1988).
- 13 Z. Li and Y. Zhang, Opt. Commun. 81, 11 (1991).
- 14 H. S. Lee and H. Fenichel, Appl. Phys. Lett. 55, 543 (1989).
- 15 Y. Sun and M. G. Moharam, Appl. Opt. 32, 1954 (1993).
- 16 J. Khoury, J. Fu, and C. L. Woods, Opt. Lett. 19, 1645 (1994).
- 17 M. A. Kramer, C. J. Wetterer, and T. Martinez, Appl. Opt. 30, 3319 (1991).
- 18 D. Peri, Opt. Commun. 67, 409 (1988).
- 19 J. Zhang, H. Wang, S. Yoshikado, and T. Aruga, Opt. Lett. 22, 1612 (1997).
- 20 J. Zhang, H. Wang, S. Yoshikado, and T. Aruga, Appl. Opt. 38, 995 (1999).



**張 家森 (ZHANG Jiasen)** 基礎先端部門光 COE 特別グループ専 攻研究員 非線形光学



**告的 信** 基礎先端部門光 COE 特別グループ主 任研究員 博士(工学) レーザ計測、画像処理、等



**着賀 規** 上席研究員 理学博士 空間光伝送・伝搬