位相共役光を用いた極細型ファイバースコープ[†]

佐 藤 拓 宋*・張 錫 相*

Ultra-Thin Fiberscope Using Phase Conjugate Waves

Takuso SATO* and Suksang CHANG*

Optical fiberscopes have been used extensively as a powerful means for medical inner scope or nondestructive testing. In the conventional devices, however, one fiber is used as one pixel, hence bundled fibers of several tens thousands should be used resulting in fairly thick fiberscope.

In this paper, a new fiberscope which uses only one fiber for image transmission is shown. The image distortion is compensated by using the phase conjugated wave which is generated at the output of the fiber and the result is retransmitted through the same fiber.

The special features of the proposed system are as follows; i) introduction of time-shearing write and read processes reduced the severe conditions which are required for the fiber and it is also very effective for the elimination of extra noise waves, ii) using the special feature of phase conjugated wave it becomes possible to reconstruct any desired cross-section of 3-D object field, and iii) the diameter of the fiberscope is reduced to two times of a fiber and ultra-thin fiberscope is realized. The usefulness of these techniques are shown by the constructed system.

Key Words: fiberscope, phase conjugation, 3-D image, nondestructive testing

1. はじめに

光ファイバを用いた内視鏡は医用診断の分野や非破壊検査などにおいて重要な役割を果たしており、最近その画質の向上も顕著である。また最近 CCD カメラ

を用いた全電氣的なものもその小型化が進み数 mm の直径のものまで可能になり使用目的によっては光ファイバを用いるものにとって代りつつある。しかし本来の目的が光により物を見るということであることを考えると光の場そのものの伝送のほうがより直接的であるともいえる。ただ従来の光ファイバースコープではほとんどの場合、多数のファイバを束ねて用いており、おのおののファイバは一つの画素として使われているため画質とのかねあいとその直径が大きくなってしまいうという本質的な制約があった。これに対してセルフオックレンズを用いて画像を単一の光ファイバで送る方法も提案されているが、その適用にはファイバが直線的で短いものでなくてはならないなどの制約があった¹⁾。

一方、最近単一のマルチモードファイバを用いても任意の入射波に対して位相と伝搬方向を正確に逆にさせることのできる位相共役光を用いて同一特性のファイバを逆伝搬させれば元の像が忠実に再現できるという性質を利用したファイバースコープも提案され注目されている²⁾⁻⁵⁾。しかし、それを実現したという報告はいまだにない。

これが簡単にいかない理由はつぎのようなところにあると考えられる。

- (1) 同一特性のファイバを製作することがきわめて困難である。
- (2) ファイバの端面などでの反射などにより位相共役光以外に不要な雑音光が混入し S/N が低くなる。
- (3) モード間の干渉などによるスペckルの雑音が大きいの。

そこで本論文では(1)の問題に対しては位相共役光の発生器として BSO 結晶を用いその記録保存能力を利用して単一のファイバのみで書き込みとともに読み出しも行うことによる解決を考えた。すなわち、まずフ

[†] 第34回応用物理学関係連合講演会で一部発表(昭62・3)

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町 4259

* The Graduate School at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology, Yokohama
(Received October 29, 1987)
(Revised January 29, 1988)

ファイバの先端を観測領域に入れてこれを通して波面をBSO 結晶上に記録し、つぎにファイバを観測領域から取り出しその先端をビデオカメラ上にもっていき、そこに光の場を再現するようにした。このことで実時間性は失われるがファイバに対する要求は極端にゆるめられた。つぎに(2)の問題に対しては(1)のように書き込みと読み出しを分離したために書き込みのときに必要な高強度の照射光の端面による反射などの余分な光の影響は読み出し時には完全におさえることができるようになった。また(3)の問題に対しては従来のスペックル除去と同じく照射方向などを少しずつ変えて多数の像を得てこれらをインコヒーレントに重ね合わせるによりスペックルの雑音をおさえることができた。

これらを採用することにより実際に単一ファイバでの映像が得られるようになったが、更に位相共役波を利用していることの利点である照射している物体上の光の3次元的な場が読み出しにおいても再現できることを用いて物体空間の任意の断面の像を得ることができるよう系を構成を工夫した。また、照射方法についてもマイクロレンズとファイバを用いた照射系を用いることにより多モードファイバ2本分の直径でのファイバースコープが実現可能であることを示した。したがって、ここで示す系は従来胃カメラなどに用いられていたような実時間的に動きがカラー像として観測できるというファイバースコープではないが、きわめて細いファイバ1本あるいは2本を用いて材料などの内部の状態を調べることができるという意味からここでもファイバースコープという呼び方をするにことにした。以下にこれについての詳細を示す。

2. 単一のファイバと位相共役波を用いた像の伝送

まず Fig. 1 に示したようなファイバを通しての画像伝送において位相共役光を用いれば画像の歪みの補償が行われることをまず示す。レーザー光により照射された物体場 f_1 をレンズによりファイバの入力端に集束させる。そのときファイバ入力端での場はモード展開により(1)式のように示されるとする。

Fig. 1 Schematic for analysis of the optical fiber-scope which uses phase conjugate wave

$$f_2(x_2, y_2) = \sum_{k=1}^N A_k \varepsilon_k(x_2, y_2) \quad (1)$$

ここで、 A_k は k 番目のモードの場 ε_k の振幅であり、 N はファイバ開口により決められるモードの数である。するとファイバ出力端での光の場は入力のおおののモードに対する伝搬常数 β_k を用いて(2)式のように示される。

$$f_3(x_3, y_3) = \sum_{k=1}^N A_k \varepsilon_k(x_3, y_3) \exp(j\beta_k L) \quad (2)$$

ここで、 L はファイバの長さである。

さて、ここでファイバの出射面において理想的な位相共役波が発生されると位相は反転され、それがファイバを逆伝搬すると、それによる入力面での光の場はつぎようになる。

$$f_r(x_r, y_r) = \sum_{k=1}^N A_k \varepsilon_k(x_r, y_r) \quad (3)$$

この観測面での場 f_r は帯域が制限された入力場の再現場にほかならない。

これらのことを数値解析により検討してみた。

Fig. 2 にそのいくつかの結果を示す。(a)は入力物体で、(b)はファイバを1回通った後、位相共役鏡面で得られる場である。(c)と(d)は位相共役器で位相が反転され、これがファイバを逆伝搬した後、観測面で得られた像である。(c)は直径 200 μm で長さ 1 m の場合であり、また(d)はファイバコア直径 100 μm で長さ 50 cm のもので得られた結果である。これらより位相共役波の利用による歪みの補償は入手できるファイバを用いて 50 cm から 1 m くらいの長さであれば十分可能であることがわかる。また一般にファイバコア径は大きく長さが短いほど位相共役波による補正の効果が大きであるがこれらは単純な比例関係にはないことも示された。なお、この解析ではファイバの不均一性やモード間の散乱は考慮していな

Fig. 2 Numerical results.

(a) object, (b) image at the phase conjugating mirror plane, (c) image at the screen for fiber with 200 μm -dia and 1 m-length (d) image at the screen for fiber with 100 μm -dia and 50 cm-length

い。

3. 系の構成における基本的考え方

3.1 時間分割的書き込みと読み出し

位相共役器としてたとえば BSO 結晶を用いた場合その反射率はかなり低く (1% 以下), したがって観測面での再生像の強度は一般に弱いものとなる。一方, 書き込みのときにおけるファイバ入力端からの反射はかなり大きく, したがって書き込みと読み出しを同時に行くと S/N が小さくなってしまふ。これを防ぐためにここでは BSO 結晶の中に形成されるホログラム格子が照射を行わなければ長時間保存できるという特性を用いて書き込みと読み出しを時分割的に行うことにした。またこのことにより用いるファイバは一つですみ, したがって同じ特性の二つのファイバを製作しなくてはならないというきわめて困難な要求をさけることができた。

3.2 多重露光による画像演算

一般に観察面で得られる再生像はスペックルの雑音によりかなり S/N が低くなる。これらのスペックルの雑音はたとえば, 伝搬に伴うモード間の干渉により起こるものであるが, これらは照射条件を変えることによってその特性が変わってくる。これは具体的には照射用のファイバの前面にある集束用のレンズを微小移動させるか, 照射方向を微小に変えることによって変化させることができる。そこで, ここではこのようにして得られた複数個の画像をインコヒーレントに加えあわせてスペックルの除去を行うことにした。

3.3 ファイバ曲げの影響

実際にファイバースコープはある程度, 曲げがある条件下で使われる場合が多い。曲げがある場合, 直線的な場合に比して画像を忠実に再現するのに寄与するモードの数が減少するため像の質は落ちるが³⁾, 書き込みのときと読み出しのときが同じ曲げの条件で同一のファイバであれば, 位相共役光を利用することにより十分実用的なファイバースコープが実現できることを数値解析により確認したが, ここではその結果は省略した。

3.4 任意断面の映像

位相共役光によりファイバースコープで得られる再生場は, 元の光の場を再現しているので観測面の設定を変えればそれに応じた断面の映像を得ることができる。このため CCD カメラの位置を必要に応じて動かせるようにした。

4. 系の具体的構成

前記のような条件を考慮した微小物体観測用のファイバースコープの具体的構成を Fig. 3 に示す。出力端にマイクロレンズを付けたファイバを通して物体を照射する。物体からの反射による光の場は観測用のファイバの入力端に集められ, その出力は面積 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ の BSO 結晶に入れられる。BSO 結晶中での位相共役波の発生は四波混合によっている。時間をずらして発生された位相共役場は同一ファイバを逆伝搬し, 入力面での再生像は CCD カメラで観測される。書き込みと読み出しを時間分割的に行うためには二つ

Fig. 3 Optical fiberscope system for observation of small object.

Operation of two shutters S1 and S2 are also shown. L1, L2; focusing lenses, BS; beam splitter, M1-M5; mirrors, ML; microlens

のシャッタ S1, S2 を使った。Fig. 3 に示したように書き込みのときには両方とも開け、読み出しのときはシャッタ 2 のみを開け、それに同期してイメージプロセッサに CCD カメラからの入力像を取り込み、計算機内で必要な画像演算を行った。光源としては波長 $\lambda = 0.5145 \mu\text{m}$ での出力が 500 mW の Ar レーザーを用い、ファイバはコア直径 $200 \mu\text{m}$ で長さは 6 cm のものを用いた。シャッタの露光時間は $T_1 = 3\text{s}$, $T_2 = 2\text{s}$, $T_3 = 1/30\text{s}$ とした。

5. 実験結果と考察

上記の実験系を用いてつぎのような結果を得た。まず、位相共役光のファイバのモード分散による伝搬像の歪みの補正とスペックルの除去が可能であることを示したものが Fig. 4 である。(a)は物体、(b)はこの物体の場が1回ファイバを通った後、位相共役器面で得られた像であり、元の像の形はほとんど見られなくなっている。(c)は位相共役場を用いてファイバで逆伝搬させて入力面で得られた像である。位相共役波を用いることによってファイバによる歪みが補正され、入力像が再現されていることを示している。しかし、スペックルの雑音に加わっている。そこで、このような像を8個インコヒーレントに重ねることにより得られたのが(d)である。このことで元の像がより忠実に再現されていることがわかる。

つぎにファイバの曲げの再生像への影響に関する実験結果を Fig. 5 に示す。(a)はファイバを直線的に

して書き込み、同じ直線的ファイバで読み出した場合である。(b)はファイバを直線的にして書き込み曲率半径が約 1 m の曲げがある条件で読み出しを行ったものであり、この場合再生像がぼけているのがわかる。(c)は同じく曲率半径が 50 cm の条件で読み出

Fig. 5 Experimental results which show the effect of fiber bending.

(a) is the result under the condition that both process are performed with straight fiber. (b) and (c) are the results obtained under the condition that the write process is performed with straight fiber while the read process is performed with bending of radius of curvature 1m and 50 cm, respectively. (d) is the result obtained when the write and read process are carried out under the same condition of curvature 20 cm.

Fig. 6 Experimental results which demonstrate the range resolution.

(a) is the object. (b) is the image when two bars and the cylinder's edge surface are placed at the same distance. (c) is the image obtained when the surface of the cylinder is dislocated from these of the bars 5 mm and observed the image at the bars' position, (d) is the image obtained when they are separated by 10 mm with the same observation conditions

Fig. 4 Experimental results which show the ability of image reconstruction by using phase conjugating mirror.

(a) object, (b) image on the front surface of the phase conjugate mirror, (c) image obtained by using phase conjugation at the input plane (d) image after speckle reduction processing

Fig. 7 Demonstration of observation of a small object.

(a) photograph of PROM chip and (b) reconstructed image by the fiberscope (the part which is indicated by solid box in the photo. (a) is imaged under the condition that the plane of the lead wire holders is focused)

した像で、この場合も元の像は再現されない。(d)は書き込みと読み出しを同じ 50 cm の曲率のもとに行ったものでありここでは元の像がほぼ忠実に再現されている。これらは書き込みと読み出しが同じ条件であれば曲げのあるファイバを用いることもできることを明確に示している。

つぎに 3 次元的な構造をもたせるため **Fig. 6(a)**に示したように棒状のものと円筒状の物体を用いそれらの間の位置をずらしてみた。(b)は円筒の前面と棒が同じ面内にあるとき得られた像で両方ともよく再現されている。(c)は円筒の前面を棒の面より 5 mm ずらしたときの棒の面での再生像であり円筒面がぼけはじめている。(d)は 10 mm ずらした場合で円筒面の像は消えている。これらより 3 次元的な断面の映像化が可能なのがわかるが、この場合奥行方向には約 5 mm の分解能になっていることもわかる。

最後に微小物体の例として PRON チップの一部を見たものを **Fig. 7** に示した。**Fig. 7(a)**はチップの写真であり、(b)は写真(a)に太線で示した部分を構成したファイバースコープを用いて観測した結果である。これを見ると、チップの中のリード線の部分がよく再生されているのがわかる。

6. 結 論

従来のファイバースコープでは各ファイバを一つの画素としているため数万本の束を用いるのが普通であった。ここでは単一のマルチモードファイバのみを用い、それによる歪みは位相共役波の利用で補償すると

いう新しいファイバースコープの構成、数値的評価と実験結果を示した。具体的には位相共役波発生器としては BSO 結晶を用い、その記録保存能力を利用して同一のファイバで書き込みと読み出しを時分割的に行うことで、ファイバに対する要求はゆるめられ、また S/N も向上できた。更に位相共役波の特徴である物体上の光の 3 次元的な場の再現可能性を利用して、3 次元の場の任意の断面の像が観測できることを示した。また照射方法についても、マイクロレンズと組み合わせたファイバを用いることにより、極細型のファイバースコープが実現可能であることを示した。

今後複数個の BSO の使用により多重露光のプロセスをファイバの出し入れなしに行うなどの改善により特に機械あるいは材料の内部の状態をきわめて細い穴からファイバ 1 本あるいは 2 本のみを通して検査できる系として実用的なファイバースコープの完成と応用をはかっていきたいと考えている。

最後にファイバの研磨、マイクロレンズの結合などのところでご助力いただいた東京工業大学の古川、伊賀、石原研究室の方々に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) T. Uchida, M. Furukawa, I. Kitano, K. Koisumi and H. Matsumura: Optical Characteristics of Light-Focusing Fiber Guide and Its Applications, IEEE J. Quantum Electron., **QE-6**, 606/612 (1970)
- 2) A. Yariv, J. AuYeung, D. Fekete and D. M. Pepper: Image Phase Compensation by Four-Wave Mixing in Optical Fibers, Appl. Phys. Lett., **32**, 635/637 (1978)
- 3) G. Dunning and R. Lind: Demonstration of Image Transmission through Fibers by Optical Phase Conjugation, Opt. Lett., **7**, 558/560 (1982)
- 4) A. Yariv: Three-Dimensional Pictorial Transmission in Optical Fibers, Appl. Phys. Lett., **28**, 88/89 (1976)
- 5) A. Yariv: Phase Conjugate Optics and Real Time Holography, IEEE J. Quantum Electron., **QE-14**, 650/660 (1978)
- 6) S. Chang and T. Sato: Optical Fiberscope Using Phase Conjugate Waves, Appl. Opt., **26**, 5241/5244 (1987)
- 7) S. Chang and T. Sato: Observation of 3-D Structure of Small Object Using Phase Conjugate Fiberscope, Appl. Opt. (submitted)
- 8) E. E. Grigor'eva and A. T. Semenov: Waveguide Image Transmission in Coherent Light (review), Sov. J. Quantum Electron., **8** (September), 1063/1073 (1978)