

マルチモード光ファイバーによる往復画像伝送のモード結合依存性

原 豊・星野 和義・米村 政之・新美 智秀

名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻 〒464-01 名古屋市千種区不老町

Dependence of Image Transmission through a Multimode Optical Fiber on Modal Scrambling

Yutaka HARA, Kazuyoshi HOSHINO, Masayuki YONEMURA and Tomohide NIIMI

Department of Electronic-Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

An optical image distorted by modal dispersal in a multimode optical fiber can be reconstructed by phase conjugation and reverse propagation in the same fiber. Using a BaTiO₃ crystal which works as a phase-conjugate mirror and preferentially reflects only one polarization component, we examined the dependence of an optical image reconstruction and polarization recovery on modal scrambling. The strength of modal scrambling depends on the optical fiber length and the core diameter. For a short optical fiber less than about 1 m, both spatial information and polarization recovery are degraded as the length becomes long. On the other hand, for a longer optical fiber, both spatial information and polarization recovery are improved due to modal scrambling. In case of an optical fiber with larger core diameter, a sharp image is reconstructed and modal scrambling arises sufficiently because of high modal density.

1. はじめに

現在、主として用いられている光ファイバー通信では情報をパルス符号化し、極細径のコアを有するシングルモード光ファイバーにより伝送を行っている。そこでは、単一モードのみを使うことによって光パルスの広がりをなくし高速な伝送を実現しているが、光のもつ並列性は利用されておらず、またコア直径が10 μm程度以下であるため高精度の加工・位置決めなどの要求からコスト的問題が存在する。それに対し、光学画像を直接にマルチモード光ファイバーを通して伝送する方法が、これまでに何度か提案され、実験も試みられている¹⁻⁵⁾。通常、マルチモード光ファイバーに入射された画像情報を含んだ光波は、モード分散による歪みを受け、出射後は画像として認識できなくなる。しかし、その出射光の位相共役光を作り、再び同一の光ファイバーを通過させると、モード分散が補正され元の画像を得ることができると、これまでに提案されている画像の直接伝送は、この

ような位相共役波の性質を用いており、一方向に画像を伝送させるために種々の手法がとられている。これまでのところ、Ogasawaraら⁵⁾により同一の長さ・コア径をもつ2本の光ファイバーを金属製のパイプの中に固定し、直線上に伸ばして配置することで一方向の伝送に成功したという報告などがあるが、全く同一の長さ・コア径・配置形状の長い光ファイバーを用意することは困難であることは明らかであり、Ogasawaraらの報告でも光ファイバー長は $L=100$ mmに留まっている。マルチモード光ファイバー中の光波の伝搬においてはモード分散のほかにもモード結合の問題も存在し、それが一方向の直接画像伝送を妨げている原因のひとつと考えられる。本論文では、一方向直接画像伝送における問題点を明らかにする目的で、比較的簡単に実現できる往復画像伝送実験⁶⁻¹²⁾を行い、マルチモード光ファイバー中の画像伝送の特性を調べた。特に往復伝送される画像の光ファイバー中でのモード結合依存性に関心を持ち、コア径と長

さの異なるマルチモード光ファイバーを用いて、往復伝送後の画像の再構成の状態を観測し、さらにモード結合の強さを評価するため偏光度の測定も行った。往復伝送については Yariv や Tomita らにより理論的に解析されており⁷⁻¹¹⁾、その理論と実験結果を比較することで考察を行った。

2. 往復伝送による画像・偏光状態の再構成

Fig. 1 に位相共役鏡 (PCM) を用いた光ファイバーの往復伝送実験の概略を示す。光ファイバーに入射した光波 $\mathbf{E}^{(1)}$ を光ファイバーの $2N$ 個の導波モードを用いて

$$\mathbf{E}^{(1)} = \sum_{n=1}^N [a_{xn}^{(1)} \mathbf{e}_{xn} + a_{yn}^{(1)} \mathbf{e}_{yn}] = \begin{pmatrix} a_{x1}^{(1)} \\ \vdots \\ a_{xN}^{(1)} \\ a_{y1}^{(1)} \\ \vdots \\ a_{yN}^{(1)} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{A}_X^{(1)} \\ \mathbf{A}_Y^{(1)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表す⁷⁻¹¹⁾。ここで \mathbf{e}_{xn} は n 番目の x 偏光横導波モード、 \mathbf{e}_{yn} は同じく n 番目の y 偏光横導波モードであり、 $a_{xn}^{(1)}$ 、 $a_{yn}^{(1)}$ はその複素振幅である。また $\mathbf{A}_X^{(1)}$ 、 $\mathbf{A}_Y^{(1)}$ はこの複素振幅を各偏光成分ごとに縦に N 個ずつ並べた列ベクトルである。伝達損失のない理想的な光ファイバーと、入射光の完全な位相共役光を発生する理想的な位相共役鏡を考えると、光ファイバーを往復した光波 $\mathbf{E}^{(4)}$ は位相共役光の反射効率を r として、 $\mathbf{E}^{(4)} = r(\mathbf{E}^{(1)})^*$ となり、光ファイバー入射時の状態が再構成される。しかし、BaTiO₃ 単結晶などを位相共役鏡として用いた場合、異常光線成分のみを強く反射するため、完全な位相共役鏡とはならず、光ファイバーを往復後の光波 $\mathbf{E}^{(4)}$ は光ファイバーのコア径・長さ・配置形状などに依存するモード結合の影響を受けることになる。Yariv らの解析にしたがえば、このときの光波 $\mathbf{E}^{(4)}$ は

$$\mathbf{E}^{(4)} = m M' C M^* (\mathbf{E}^{(1)})^* \quad (2)$$

となる。ここで M は光ファイバーの往路における散乱行列であり、

$$M = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

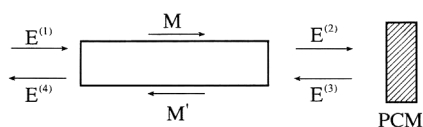


Fig. 1. Schematic diagram of image transmission in a multimode optical fiber.

で表される。ただし M_{xx} などは $N \times N$ の小行列であり、その各要素は $M_{ij} = m_{ij} \exp(i\phi_{ij})$ の形で与えられる。 M' は復路での散乱行列であり、 $M' = M^t$ の関係がある。ここで t は行列の転置を表す。また式(2)中において $*$ は複素共役をとることを意味する。 C は

$$C = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

であり、BaTiO₃ 単結晶などを位相共役鏡として用いる場合に x 偏光のみを強く反射することを示す。ただし、 I は $N \times N$ の単位小行列である。もし光ファイバー中での損失とモード結合を無視できるならば、モード分散のみを考慮して散乱行列 M の対角要素は $(M_{xx})_{nm} = \exp(i\beta_{xn}L)$ 、 $(M_{yy})_{nm} = \exp(i\beta_{yn}L)$ となり、非対角要素はすべてゼロである。ただし β_{xn} 、 β_{yn} は各偏光の n 番目のモードの伝搬定数であり、 L は光ファイバー長である。このとき明らかに

$$M' C M^* = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

であり、入射光波の x 偏光成分のみが回復される。一方、光ファイバーのモード結合が無視できないときには

$$M' C M^* = \begin{pmatrix} M'_{xx} M_{xx}^* & M'_{xx} M_{xy}^* \\ M'_{yx} M_{xx}^* & M'_{yx} M_{xy}^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

となり、光ファイバー往復後の画質は劣化する。

ところで、モード結合が十分に強く起きている場合には、モード間のランダム結合を仮定すると、散乱行列の各要素を

$$M_{ij} \cong \frac{1}{\sqrt{2N}} \exp(i\phi_{ij}) \quad (7)$$

と書くことができる⁷⁾。さらに位相 ϕ_{ij} が $-\pi \sim +\pi$ にわたってランダムに分布していると仮定すれば

$$\begin{aligned} (M'_{xx} M_{xx}^*)_{ij} &= (M'_{xx})_{ik} (M_{xx})_{kj}^* \\ &= (M_{xx})_{ki} (M_{xx})_{kj}^* \\ &\cong \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{k=1}^N \exp\{i[(\phi_{xx})_{ki} - (\phi_{xx})_{kj}]\} \\ &= \begin{cases} 1/2 & \text{for } i=j \\ O(1/\sqrt{N}) & \text{for } i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (8a)$$

が得られる。同様にして

$$(M'_{yx} M_{xy}^*)_{ij} \cong \begin{cases} 1/2 & \text{for } i=j \\ O(1/\sqrt{N}) & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (8b)$$

$$(M'_{xx} M_{xy}^*)_{ij} \cong O(1/\sqrt{N}) \quad (8c)$$

$$(M'_{yx} M_{xx}^*)_{ij} \cong O(1/\sqrt{N}) \quad (8d)$$

である。この結果モード結合が十分に強く起きている場合には光ファイバーを往復した光波 $\mathbf{E}^{(4)}$ は

$$E^{(4)} \cong \frac{1}{2} r(E^{(1)})^* + V \quad (9)$$

となり、入射光波 $E^{(1)}$ に比例した成分をもつことが説明される。ここで V はノイズ成分を示す。詳しい解析¹²⁾によれば、ノイズは光波 $E^{(1)}$ の光ファイバー入射時に励起された x 偏光モードに含まれる偏光ノイズと、全モードにわたってほぼ一様に分布する無偏光ノイズに分けられるが、偏光ノイズはモード結合が十分に強いときには無視することができる。また式(9)の右辺第1項と第2項のパワーはほぼ等しいので、往復後の光波 $E^{(4)}$ の約半分のパワーが入射光 $E^{(1)}$ の再構成に使われることがわかる。このように1つの偏光成分のみを位相共役鏡で反射させる場合、往復後の光波 $E^{(4)}$ は光ファイバー中のモード結合の影響を強く受ける。このため光波 $E^{(4)}$ から光ファイバー中のモード結合の強さを評価することが可能となる。これに対し、2つの偏光成分とともに位相共役鏡で反射する実験も行われている¹²⁾。その場合、光ファイバーを往復した光波 $E^{(4)}$ はモード結合の結果生じるノイズが少なく、入射光 $E^{(1)}$ が偏光も含めて良好に再構成される。しかし本研究の目的はモード結合の影響を調査することにあるので、2つの偏光成分を反射する方法は採用していない。

3. 実験装置

往復伝送による画像の再構成の実験配置を Fig. 2 に示す。位相共役鏡としてフォトリフラクティブ結晶であるチタン酸バリウム (BaTiO₃) 単結晶を自己励起型で用いている。光源は半導体レーザー励起の YAG レーザーの第2高調波 (波長 532 nm) であり、出射したビームを $\lambda/2$ 板と偏光子で BaTiO₃ 単結晶に対して異常光線になるよう直線偏光させ、これを x 偏光と定義した。また、 x 偏光と垂直な直線偏光成分を y 偏光と定義する。その後空間フィルター SF とレンズ L1 ($f=300$ mm) でビーム径を拡大し、スライド T で画像を入力する。光ファイバーへの入射に使用したレンズ L2 は $f=35$ mm である。実験結果は光波 $E^{(1)}$ の入射条件によって大きく変化するが、今回の実験では、光波 $E^{(1)}$ が光ファイバーの入射端中心に焦点を結ぶように入射レンズの位置を設定した。光ファイバー出射光 $E^{(2)}$ を BaTiO₃ 単結晶中に集光するために使用したレンズ L3 は $f=35$ mm と $f=80$ mm の2つのレンズによって構成した。使用したマルチモード光ファイバーはステップインデックス型で、コア径は 200 μm と 800 μm の2種類である。長さはそれぞれ $L=0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5$ m の

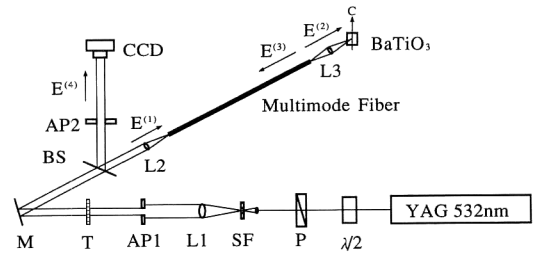


Fig. 2. Experimental arrangement for image transmission in a multimode optical fiber.

ものを用意した。長さが $L=0.1, 0.2, 0.5, 1$ m の光ファイバーは直線状に伸ばして配置したが、 $L=2.5$ m のものは直径 30 cm に巻いた状態で用いた。使用したすべての光ファイバーの臨界開口数は $NA_c=0.2$ であるが、実験ではアパーチャー AP1 の開口直径を変化させて、光ファイバーへの入射開口数が $NA=0.04, 0.07, 0.14$ の場合について行った。光ファイバー往復後の光波 $E^{(4)}$ はビームスプリッター BS で反射され、CCD (charge coupled device) 素子上に直接結像される。なお出射光 $E^{(4)}$ の検出は、アパーチャー AP2 の開口直径を AP1 と等しくし、入射と同じ開口数で検出を行った。また光ファイバーを一度通過することによる偏光の解消と、光ファイバーを往復することによる偏光の回復実験も行った。この偏光解消・回復実験では、それぞれ Fig. 2 の BaTiO₃ 単結晶と CCD の位置でストークスパラメータを測定することによって偏光度を定量的に求めた。

4. 結果と考察

4.1 偏光解消実験

光ファイバーを通過することによる偏光解消の実験結果を Fig. 3, Fig. 4 に示す。Fig. 3 は光ファイバーのコア径が 200 μm 、Fig. 4 はコア径が 800 μm の場合である。縦軸は光ファイバーを通過した光波 $E^{(2)}$ の偏光度 $p = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} / s_0$ (ただし、 s_{0-3} はストークスパラメータ)、横軸は光ファイバー長である。また入射開口数が $NA=0.07, 0.14$ のデータは2回の測定の平均値であるが、 $NA=0.04$ のデータは1回の測定値である。この Fig. 3, Fig. 4 から、本実験に用いた光ファイバーでは、光ファイバーが長くなるにしたがって、コア径・入射開口数にかかわらずモード結合による偏光解消が進むことがわかる。またコア径が 800 μm の光ファイバーではコア径 200 μm の光ファイバーに比較し、光ファイバーが短い領域での偏光解消が大きいこともわかる。これは

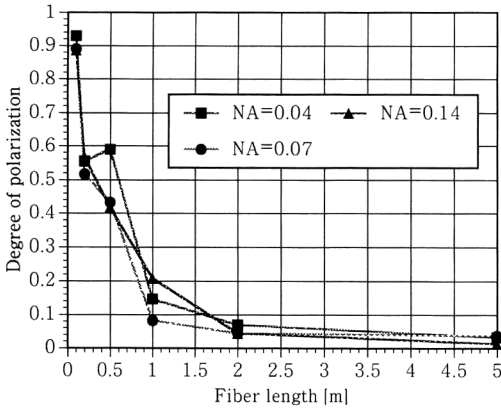


Fig. 3. Degree of polarization after passing through a multimode optical fiber with core dia. $\phi=200\ \mu\text{m}$.

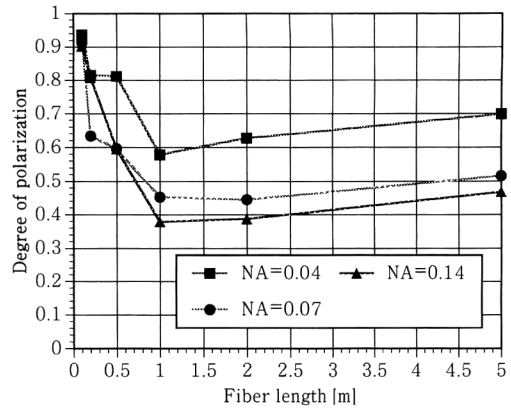


Fig. 5. Degree of polarization after round-trip propagation (fiber core dia. $\phi=200\ \mu\text{m}$).

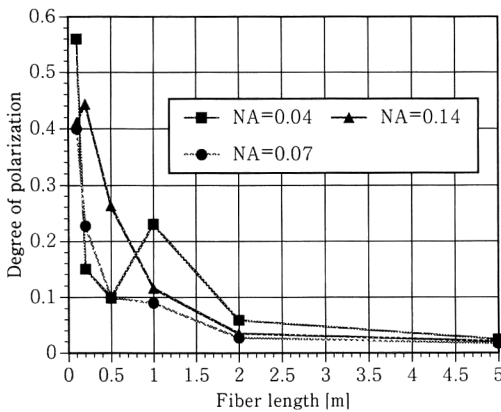


Fig. 4. Degree of polarization after passing through a multimode optical fiber with core dia. $\phi=800\ \mu\text{m}$.

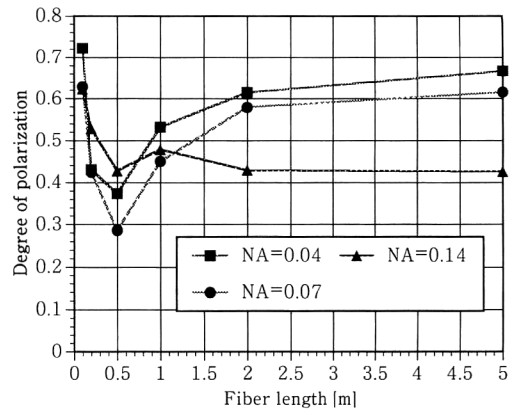


Fig. 6. Degree of polarization after round-trip propagation (fiber core dia. $\phi=800\ \mu\text{m}$).

800 μm の光ファイバーのほうが入射開口数当たりのモード数が多いことに起因すると考えられる。

4.2 偏光の回復実験

Fig. 5, Fig. 6 に光ファイバーを往復し、アパーチャー AP 2 を通過した光波の偏光度 p を示す。光ファイバーが極端に短く ($L=0.1, 0.2\ \text{m}$)、モード結合の影響が小さいとみなせるとき、光ファイバー往復後の偏光度 p が高い理由は式 (5) から明らかである。一方、光ファイバー長が長くなるにつれて、モード結合によって発生する無偏光ノイズの影響により、偏光度 p の回復は一度悪化する ($L=0.5\ \text{m}$)。しかし光ファイバー長がモード結合が十分強く起きる長さ ($L=2.5\ \text{m}$) になると偏光度 p の回復がよくなる。また光ファイバーが長い場合には、入射開口数が小さいほど偏光度 p が高くなることもわかる。これは式 (9) からわかるように光波 $\mathbf{E}^{(4)}$ の約 1/2

のパワーが入射光 $\mathbf{E}^{(1)}$ の再構成に使われ、さらに入射開口数が小さい場合には、この再構成された光波がアパーチャー AP 2 をすべて通過するのに対し、無偏光ノイズ成分は光ファイバーの臨界入射開口数全体にわたってほぼ一様に出射されるため、その大部分がアパーチャー AP 2 でカットされるためである。Fig. 5, Fig. 6 はアパーチャー AP 2 を通過した光波の偏光度 p の回復を示すものであるが、本実験では入射光が x 偏光であるため、偏光の回復という意味では、偏光度 p だけでなく $s_1/s_0=(I_x-I_y)/(I_x+I_y)$ の値も 1 に近い値に回復する必要がある。ここで I_x は x 偏光強度、 I_y は y 偏光強度である。Fig. 7, Fig. 8 にそれぞれコア径が 200 μm と 800 μm での s_1/s_0 の測定結果を示す。今回の測定では s_1/s_0 の値も偏光度 p と同じ傾向で回復している。

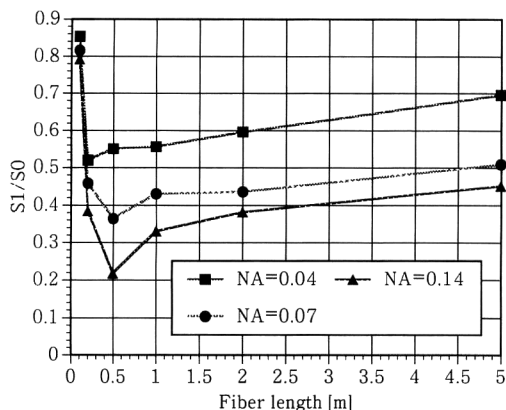


Fig. 7. Parameter s_1/s_0 after round-trip propagation (fiber core dia. $\phi=200 \mu\text{m}$).

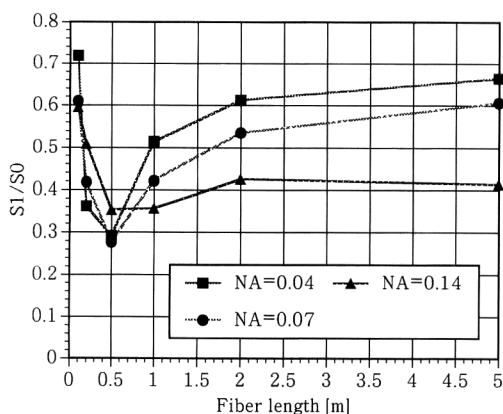


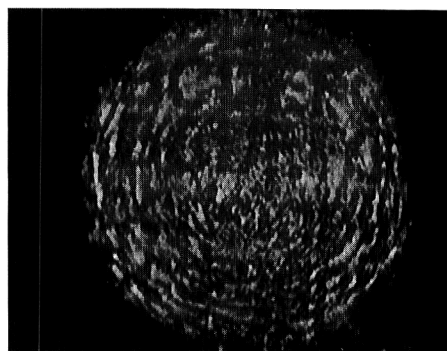
Fig. 8. Parameter s_1/s_0 after round-trip propagation (fiber core dia. $\phi=800 \mu\text{m}$).

4.3 画像の回復

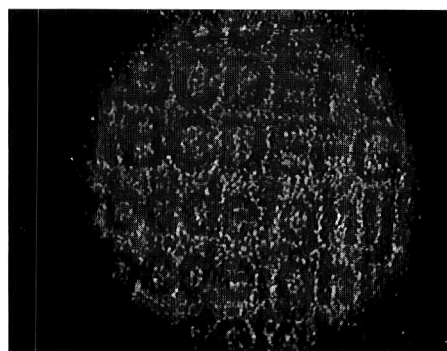
Fig. 9 にコア径 $800 \mu\text{m}$ の光ファイバーを往復し、スクリーン S 上に再構成されたスライド T の画像を示す。入射開口数は $\text{NA}=0.07$ であり、光ファイバー長は上から $L=0.2, 0.5, 5 \text{ m}$ である。Fig. 9(a) と Fig. 9(b) を比較すると、偏光度 p の回復の結果 (Fig. 5 と Fig. 6) と同様に、再構成画像も光ファイバー長とともに画質が一度悪化することがわかる。この原因はモード結合により生じる偏光・無偏光ノイズの影響である。特に偏光ノイズ成分は x 偏光をもつため、偏光度 p の悪化には関与しないが、再構成画像の空間構造を乱すため画質の劣化に影響を及ぼす。さらに光ファイバーが十分長い場合には、偏光度 p の場合と同様に再構成画像の画質は回復する。例えば Fig. 9(c) では式 (9) から予想されるとお



(a)



(b)

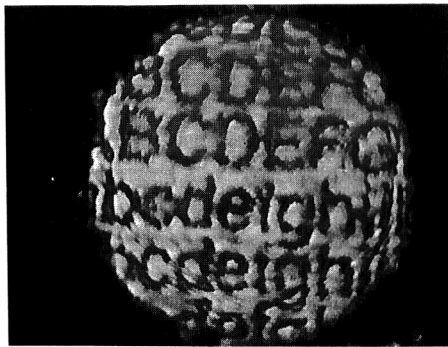


(c)

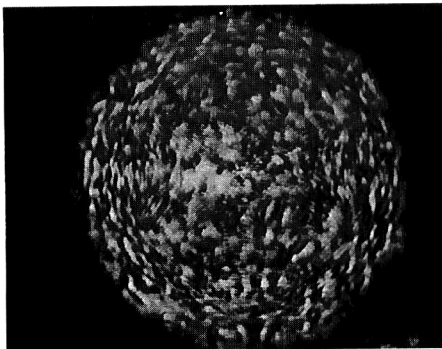
Fig. 9. Reconstructed image at $\text{NA}=0.07$ for a multimode optical fiber with core dia. $\phi=800 \mu\text{m}$, (a) Fiber length $L=0.2 \text{ m}$, (b) Fiber length $L=0.5 \text{ m}$, (c) Fiber length $L=5 \text{ m}$.

り、無偏光ノイズの作り出すスペckルパターンとスライド T で入力したアルファベットの画像が重なった状態となっており、良好な画像が得られている。

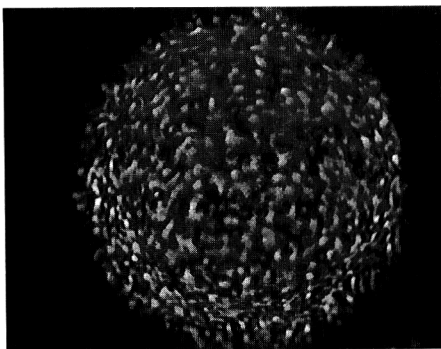
Fig. 10 にコア径を $200 \mu\text{m}$ とした場合の再構成画像を示す。光ファイバー長は上から $L=0.1, 0.5, 5 \text{ m}$ である。入射開口数は Fig. 9 と同様に $\text{NA}=0.07$ である。Fig. 9(a) と Fig. 10(a) を比較すると、Fig. 9(a) の方が



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Reconstructed image at $NA=0.07$ for a multimode optical fiber with core dia. $\phi=200 \mu\text{m}$, (a) Fiber length $L=0.1 \text{ m}$, (b) Fiber length $L=0.5 \text{ m}$, (c) Fiber length $L=5 \text{ m}$.

シャープな画像が得られている。この結果はコア径が $800 \mu\text{m}$ の光ファイバーがより多くの伝搬モードをもつことから容易に想像がつく。ところで Fig. 10(c) は Fig. 9(c) と比較すると画像の回復がよくない。これはコア径の小さな光ファイバーはコア径の大きい光ファイバーと比べると開口数当たりのモード数が少ないことによる。

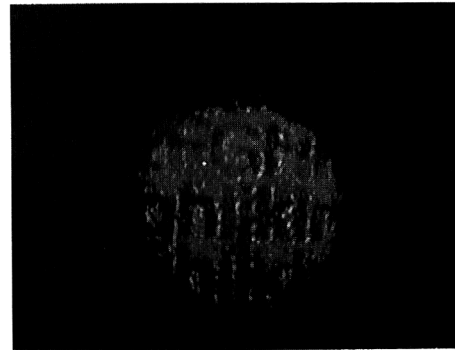


Fig. 11. Reconstructed image at $NA=0.04$ for a multimode optical fiber with core dia. $\phi=800 \mu\text{m}$ and length $L=5 \text{ m}$.

つまり往復伝送の理論では均等なエネルギー分配とランダムな位相分布で特徴づけられるモード結合が仮定されるが、この状態はモード密度が高い光ファイバーの方が生じやすいと考えられる。したがって Fig. 10(c) の状態ではランダムなモード結合が十分に起きていないことが推測される。ここで Fig. 3, Fig. 4 はモード結合による偏光解消の様子を示してはいるが、式(8)で表されるような各モード間のランダム結合がどの程度進んでいるのかまでは正確に表現できないということに注意が必要である。

Fig. 11 にコア径が $800 \mu\text{m}$ 、長さが $L=5 \text{ m}$ の光ファイバーで入射開口数を $NA=0.04$ とした場合の往復伝送結果を示す。これを $NA=0.07$ の場合の Fig. 9(c) と比較すると $NA=0.04$ の場合の方がよりコントラストのよい画像が得られることがわかる。このように入射開口数が小さい方が良好な画質が得られるのは偏光の回復と同様の理由で説明できる。

5. おわりに

本研究では、 BaTiO_3 単結晶を位相共役鏡として用いて往復画像伝送実験を行い、往復伝送後の偏光度や再構成画像のモード結合への依存性を調査した。また、予備実験として光ファイバーを一度だけ通過した後の偏光度の測定も行い、使用した光ファイバーにおいては長さに伴い急激にモード結合による偏光解消が起きること、またコア径が大きい光ファイバーの方が偏光解消が大きく、モード結合が起きやすいことが明らかになった。一方、往復伝送実験による偏光度の回復は、理論から予想されるとおり、光ファイバーが極端に短い場合には良好であるが、光ファイバーが長くなると一度悪化し、さらにモード結合が十分に強く起こる程度の長さあるいは状

態になると再び良好になるという結果が得られた。また、同じ条件で観測された再構成画像の画質の光ファイバー長依存性も、偏光度の回復と定性的に一致することが見いだされた。なお、光ファイバーへの入射開口数が小さい場合ほど偏光度の回復や画質が良好になること、コア径が大きい光ファイバーを用いた方がよりシャープな再構成画像が得られることなど、理論と矛盾しない実験結果が得られた。またモード密度が高い光ファイバーの方が、往復伝送の理論で仮定される各モードへの均等なエネルギー分配とランダムな位相分布をもつモード結合の状態に達しやすいことを実験的に示した。

本実験で用いたマルチモード光ファイバーでは、1 m程度の長さになるとモード結合の影響が非常に強いことが明らかになり、有意義な長さの一方直接伝送を実現するにはモード分散だけでなく、モード結合の影響も補正できる方法が必要であると考えられる。

文 献

- 1) A. Yariv: "Three-dimensional pictorial transmission in optical fibers," *Appl. Phys. Lett.*, **28** (1976) 88-89.
- 2) A. Gover, C. P. Lee and A. Yariv: "Direct transmission of pictorial information in multimode optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 306-311.
- 3) M. Fukui and K. Kitayama: "Real-time restoration method for image transmission in a multimode optical fiber," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 977-979.
- 4) S. Fukushima and T. Kurokawa: "Parallel interconnection through an optical fiber using phase conjugation mirror acceptable optical data pattern," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 613-618.
- 5) T. Ogasawara, M. Ohno and K. Karaki: "One-way image transmission with a pair of multimode optical fibers and a phase-conjugate mirror," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2435-2437.
- 6) G. J. Dunning and R. C. Lind: "Demonstration of image transmission through fibers by optical phase conjugation," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 558-560.
- 7) K. Kyuma, A. Yariv and S.-K. Kwong: "Polarization recovery in phase conjugation by modal dispersal," *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 617-619.
- 8) A. Yariv, Y. Tomita and K. Kyuma: "Theoretical model for modal dispersal of polarization information and its recovery by phase conjugation," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 809-811.
- 9) Y. Tomita, R. Yahalom and A. Yariv: "Theory of polarization and spatial information recovery by phase conjugation," *J. Opt. Soc. Am. B*, **5** (1988) 690-700.
- 10) Y. Tomita, R. Yahalom and A. Yariv: "Fidelity of polarization and spatial information recovery using a fiber-coupled phase conjugate mirror," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 1017-1019.
- 11) Y. Tomita, R. Yahalom, K. Kyuma, A. Yariv and S.-K. Kwong: "Polarization and spatial information recovery by modal dispersal and phase conjugation: Properties and applications," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 315-338.
- 12) I. McMichael, P. Yeh and P. Beckwith: "Correction of polarization and modal scrambling in multimode fibers by phase conjugation," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 507-509.