

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月10日現在

機関番号： 11301
 研究種目： 挑戦的萌芽研究
 研究期間： 2011 ～ 2012
 課題番号： 23656226
 研究課題名（和文） カテーテル形状検出のためのマルチコアファイバセンサの
 フィジビリティスタディ
 研究課題名（英文） Feasibility study of multicore fiberoptic sensors for detection
 of catheter configuration
 研究代表者
 松浦 祐司 （ MATSUURA YUJI ）
 東北大学・大学院医工学研究科・教授
 研究者番号： 10241530

研究成果の概要（和文）：

カテーテル形状を体外から把握することが可能なセンサの実現を目的として、複数のコアを有するマルチコア光ファイバを用いた形状センサの実現可能性についての検証を行った。これは導波路間のパワー結合が曲がり状態によって変化することを利用したものである。導波路結合理論およびビーム伝搬法を用いた理論的検討の結果、非対称導波路を用いたセンサにおいて、それらの光結合により、曲げの程度ならびに方向を判別可能な曲り形状センサの実現の可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

To develop a sensor that monitors configuration of catheter from the outside of human body, feasibility study was performed for sensors based on multicore-fiber with multiple optical cores. This sensor utilized that power coupling between optical waveguides changes by bending of the waveguides. Theoretical evaluations based on optical-power coupling theory and beam propagation method showed that asymmetric waveguides worked as an optical sensor. It was shown that this device detects both of radii and direction of waveguides' bending.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学 ・ 電子デバイス・電子機器

キーワード： 光デバイス・光回路

1. 研究開始当初の背景

カテーテルの誤挿入や迷入の防止および、内視鏡・カテーテル挿入時の先端位置を把握するためには、カテーテル形状を人体外からレントゲン撮影することが必要であるが、術中に頻りに撮影を行うことは被ばく量が大きく問題となる。もしカテーテル形状やそ

の先端位置を術者が手元でリアルタイムに把握することが可能になれば、安全性の面で大きなメリットとなる。カテーテルや内視鏡先端の位置をレントゲンを使用せずに体外から検出する方法としては、磁気位置センサを用いた手法が開発されている。これは外部に大きな検出器を必要とするうえ、MRI装置や周囲の電気機器から生じる地場歪みに

大きく影響を受け、位置精度が低くなることもある。

そこで本研究では、外部磁界や電界に影響を受けることがない光ファイバを用いたセンサを新規に開発することについて検討する。光ファイバセンサの他のメリットとしては、細径のセンサが実現可能なこと、およびプローブの長さ方向に連続的にセンサを配置することにより先端位置のみでなく、プローブ全長の形状を検出することができ、プローブの体内空間における状態把握が可能となることが期待できる。

光ファイバを曲がりやストレスなどのセンサとして利用した例としては、ファイバブラッググレーティング (FBG) を用いたものや、曲がり部の光漏洩を用いたものがあるが、本研究は光導波路間のモード結合に基づく全く新しいメカニズムをもち、温度などの環境に対する安定性や細径化の可能性において有利である。本研究の成果により今後、この原理を用いたセンサが実現されれば、低侵襲診断・治療のツールとして活用されることが期待され、医療分野への大きな貢献が期待される。

2. 研究の目的

カテーテルや内視鏡を人体内に挿入する際に、挿入方向や留置位置を正確に検出するための形状センサを複数のコアを有するマルチコア光ファイバを用いて実現可能かどうかの検証を行う。このセンサは、コア間の光結合がファイバ曲がりの方向に依存することを利用したものであり、ファイバ断面内の光パワーの移動量を検出することによりファイバの曲がり方向およびその曲げ半径を検出することが可能である。この原理を利用することによりきわめて細径なファイバセンサの実現が期待され、カテーテルのガイドワイヤとして用いることが可能である。

本研究で取り扱うマルチコアファイバは、通常はコア間のクロストーク（光エネルギーの移動）がないように設計し、それぞれのコアが独立して光を伝搬できるように設計されている。ファイバに曲がりが生じた際には、光漏洩が大きくなるためにクロストークが生じやすくなり、コア同士の間隔を広く、コア・クラッド間の屈折率差を大きくする必要があり。本研究ではこのマルチコアファイバの欠点を逆に利用することにより、高精度な形状センサを実現しようとする点が斬新であると言える。

しかし、これまでこのような試みをした例は申請者の知る限りはなく、微妙な曲がりも正確に検出するための独自の設計から始める必要がある。原理的には曲がりの方向と曲げ半径を検出することが可能なこのセンサをさらに長手方向に複数配置して形状センサとして動作させるためには、測定から得られる複数のデータを処理するための演算についても検討する必要があり、未踏のデバイスを実現するための大きなチャレンジが必要である。

3. 研究の方法

本研究のデバイスの原理は次の通りである。2つの導波路を近接して配置すると導波路間に結合が生じエネルギーの移行が行われる。導波路を曲げた場合は、導波路内での界分布が曲がりの外側に偏るために、外側に配置された導波路への結合が生じやすくなる。そこで直線状態では結合が生じないが、曲がりではわずかに結合が生じるように、コア間隔や屈折率差を設定することにより、曲がりを検出可能なファイバデバイスが得られる。

この原理自体は真新しいものではなく、導波路間の結合を利用した方向性結合器などにすでに用いられている。また曲がりによるコア間の結合は、通信用ファイバでは大きな問題となっている。しかし、この原理を形状センサデバイスに応用するというのは、斬新な着想といえる。

また、前述のように光ファイバを用いた形状センサとしていくつかの種類がすでに市販されている。しかし、これは曲がりによる光ファイバの損失増加という比較的曲がり鈍感な性質を利用するため、内側と外側の曲げ半径に大きな差を持たせる必要があり、その直径 1cm 程度と大きなものになってしまう。

一方、本デバイスは各種パラメータの設計により曲がりにきわめて敏感なものを実現することが可能であるため、数 mm といった細径なセンサを構築することができ、成功すれば新規の医療機器および医療技術の発展に大きく貢献することが期待できる。

4. 研究成果

光結合理論より二つの導波路間のパワー移行は z 方向に進む光に対して、入射側のパワーを $P_A(z)$ 、結合側のパワーを $P_B(z)$ として

以下の2式で表される.

$$P_A(z) = 1 - F \sin^2(qz) \quad (1)$$

$$P_B(z) = F \sin^2(qz) \quad (2)$$

ここで q ならびに, 結合効率 F は結合係数. と二つの導波路の伝搬定数差 δ を用いて,

$$q = \sqrt{K^2 + \delta^2} \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{1 + \left(\frac{\delta}{K}\right)^2} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\beta_B - \beta_A}{2} \quad (5)$$

と表される.

また結合側の導波路のパワーが最大になるまでの距離である結合長 L は, 次式で表される.

$$L = \frac{\pi}{2\sqrt{K^2 + \delta^2}} \quad (6)$$

(4)式より導波路間の強い結合には, 導波路間の伝搬定数差が小さいことが必要であることがわかる.

本研究で提案するファイバ型曲り形状センサの基本構造と等価屈折率分布を図1に示す. 直線状に配列したコア径に差を持たせ, 直線状態では結合が起こらず, 曲げることにより結合が起こるように設計する.

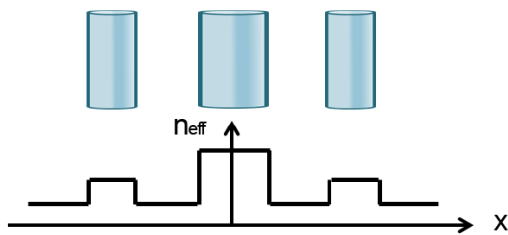


図1 センサの基本形状

曲げ状態における等価屈折率の概念図を図2に示す. 曲げを加えることにより等価屈折率に傾きが生じる. 曲げの外側ではコア間の伝搬定数差が小さくなるため結合が強くなる. 一方, 曲げの内側では, 曲げにより伝搬定数差が増大し結合が起こらない. このように, 3つのコアを形成することにより曲げの大きさと方向を同時に計測する.

計算にはビーム伝搬法 (BPM) を用いた. コア屈折率 1.494, クラッド屈折率 1.490, コア径 4.3/4.8/4.3 μm , コア間隔 6 μm のスラブモデルにおいて, 波長 1.064 μm の光を中心コア

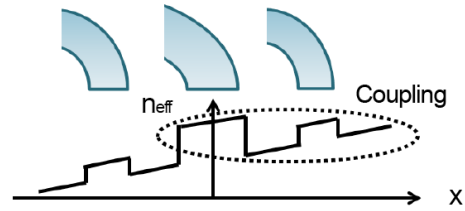


図2 曲がり時の結合の概念図

から入射した場合の一樣曲げ状態における伝搬光の様子をシミュレーションした. 図3に曲げ半径 80 mm の場合の電界分布を示す. $z=0$ の時点では, 中心コアのみに電界が集中しているが光が進行するにつれて曲げの外側のコアに電界が移行していく様子が分かる.

図4に導波路長に対する結合効率の変化を示す. 曲げに対して外側の導波路間のみで結合が起こり, 結合長は 6 mm であった. 各コアからの出射光強度のみで曲げ状態を一意的に決定するためには導波路長は結合長以下である必要がある.

導波路長を 6 mm とし, 曲げ半径に対する出射光強度の変化を計算した結果を図5に示す. 曲げ半径 80 mm 付近で結合効率は最大となり, 曲げ半径 80 mm 以上で結合効率が単調かつ緩やかに減少するのがわかる. 従って設計した導波路は曲げ半径 80 mm 以上で感度を有する曲り形状センサとして使用可能であることが確認できた.

実用を踏まえ, より長い結合長を有するセンサの設計を行なった. 表1に設計したセン

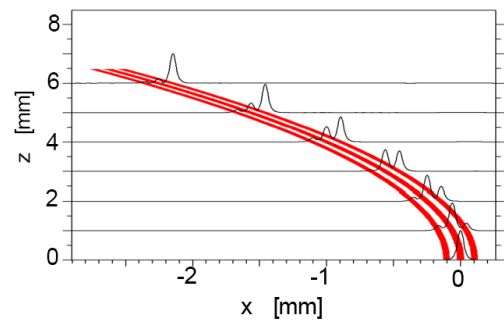


図3 曲がり導波路の電界分布

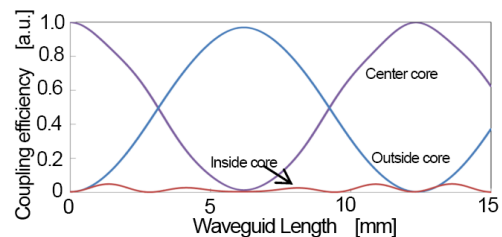


図4 曲がりによるパワー変化

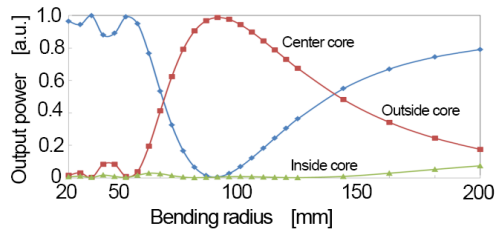


図5 曲がりによる出力変化

サの構造および特性をまとめる。長い結合長を実現するためにはコア間隔を広げることが有効であり、 $1.5\ \mu\text{m}$ の拡大により2倍以上の結合長が実現できた。また、最大結合曲げ半径はコア径差により微調可能であった。

図6に長尺センサ(導波路長14 mm)の曲げ半径に対する出射光強度の変化を示す。図より、結合効率はおよそ80mmで最大となるが、測定可能な曲げ半径の範囲は80~100 mmとなり、明らかに減少しているのが分かる。(6)式より、長い結合長を得るためには、を小さくする必要があるが、の減少は(4)式にしたがい結合効率を低下させる。この結果として結合する曲げの範囲が減少したものと考えられる。

コア径差をつけた非対称導波路間の光結合により、曲げの程度ならびに方向を判別可能な曲り形状センサを提案し、実現の可能性を示すことができた。今後は本センサ構造が有効な応用範囲を調査し、実用的なセンサの実現を目指す。

表1 センサの構造および特性

	Short sensor	Long sensor
Core diameter	4.3 / 4.8 / 4.3 μm	4.2 / 4.8 / 4.2 μm
Core interval	6 μm	7.5 μm
Coupling length	6 mm	14 mm
Bending radius at maximum coupling	80 mm	80 mm

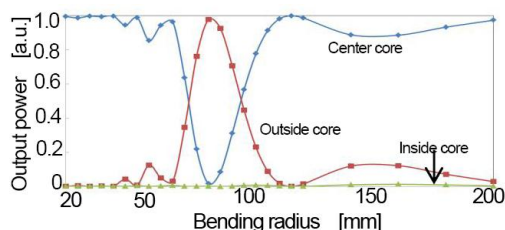


図6 曲がりによる出力変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Y. Takahashi, S. Kino, Y. Matsuura, Design and optimization of hollow-optical-fiber gas cell for infrared spectroscopy, Opt. Eng., 52, 1-5 (2013). 査読有 DOI: 10.1117/1.OE.52.1.013601
2. 松浦祐司, 医療用光ファイバーの基礎, 日本レーザー医学会誌, 31, 407-412 (2011). 査読有
3. 松浦祐司, 内視鏡下診断のための中空光ファイバ応用システム, レーザー研究, 39, 116-122 (2011). 査読有
4. 松浦祐司, 医療用中空光ファイバとその応用システム, 応用物理, 80, 1078-1081 (2011). 査読有

[学会発表] (計 2 件)

1. 松浦祐司, 中空光ファイバとその医療応用, 光波シンセシス研究会, 2013年02月28日, 仙台
2. 佐藤匠, 片桐崇史, 松浦祐司, 導波路間結合を利用した光ファイバ曲り形状センサの基礎的検討, 平成24年東北地区若手研究者研究発表会, 2012年3月9日, 仙台.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松浦 祐司 (MATSUURA YUJI)
 東北大学・大学院医工学研究科・教授
 研究者番号: 10241530

(2) 研究分担者

片桐 崇史 (KATAGIRI TAKASHI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 90415125

木野 彩子 (KINO SAIKO)
 東北大学・大学院医工学研究科
 ・教育研究支援者
 研究者番号: 30536082