ヘテロコア型光ファイバ神経網による知的構造体に関する研究

Studies on hetero-core fiber optic nerve sensors for smart materials

05D5102 西山 道子 指導教授:渡辺 一弘 教授

SYNOPSIS

This thesis presents a novel smart nerve sensor based on hetero-core structured optical fiber embedded with a sensing structure and wearable clothes. A sensing nerve pad-structure has been described to discuss how smart materials could be devised intended for monitoring large deformation in terms both of the curvature and the direction of bending. The result showed that the proposed pad-structures were sufficiently sensitive to the given curvature and directions for deformation with a sufficient linearity of sensor characteristics. The hetero-core embedded pad sensors were successfully perceptive with typical sensitivities of 0.066 and 0.153 dB/mm. On the other hand, unconstrained and wearable motion analysis system is described in which entire body posture and motion can be monitored using hetero-core optic fiber sensors with their significant performances in terms of the sensitivity, stability and the reproducibility. The performance characteristics of embedded hetero-core fiber sensors are presented for the analysis of wearable motion sensors in the form of a sensing jacket, a wristband, and a gait system. In addition, the multipoint optical intensity-based measurement with tandem connection by means of monitoring time-differentiation in optical loss. The use of hetero-core sensors can make it possible that a simple optical intensity-based measurement combined with a time-differentiation method could be facilitated for the multipoint measurement because the hetero-core technique has a low insertion loss and a sizable loss change in the tandem usage. Addressing multi-sensors has been successfully demonstrated including one displacement sensor and two contact sensors which are located along a single transmission line in real-time basis.

Keywords: fiber optic sensor, hetero-core, optical intensity-based, deformation, unconstrained, multipoint measurement

1. 序論

近年,光ファイバを構造物と一体化し,人間の神経のよ うにその3次元形状の変形を知覚する光ファイバセンサ 神経網の研究開発が行われている.これは、光ファイバが 軽量,柔軟で,耐腐食性,耐電磁誘導性といった特徴をも つため有用性があると考えられている. 伝播光をファイバ 伝送路中に導光させながら検知できるインライン光ファ イバセンサは,構造体で同一ファイバ伝送路中に多点で配 置できるため利用価値が高い. 中でも, Fiber Bragg Grating(FBG)センサは、そのセンサ部に周期的な屈折率格 子を設け、その格子間隔の微小変化から生じるBragg波長 のシフト量から、センサ部に付与された歪み量/温度を計 測できるため,現在までに多くの研究がなされている[1]. 歪 み量はμε単位という微小量を計測できる反面,温度の変化 でも波長シフトが生じてしまうため温度変動に対する補 償が必要となり、いかに対象となる計測量のみを取り出す かという問題がある^[1-3].また,FBGセンサはそのBragg波 長変化を捉えるスペクトル計測であるため,計測器に波長 フィルタ,スペクトラムアナライザなどが必要となり,コ スト効率を上げるのが困難であると考えられる.更に,多 点で配置する場合、波長分割多重(WDM)と時分割多重 (TDM) をそれぞれ用い、または組み合わせて単一光フ ァイバ伝送路上に複数センサポイントを配置する技術が 提案されている^[4].しかしWDM手法は,波長空間で離れ て配置されたFBGセンサをスペクトル計測する必要があ り、TDM手法ではOTDRを用いた後方レーリー散乱という 微弱な光を利用するために, 計測安定性に平均化時間を数 秒~数十秒要してしまいリアルタイム性に欠く.

そこで本研究では、知的構造体のための光ファイバ神経 網の実現のためヘテロコア型光ファイバセンサ^[6-8,11,12]を 採用した。ヘテロコア型光ファイバセンサは、センサ部に 付与された緩やかな変形に対して光損失を生じ、原理的に 温度依存性はないと考えられる.また、光強度ベースで簡 便な計測装置構成による数十〜数百Hz程度のリアルタイ ム計測を実現する.シングルモード(SM)ファイバで構 成されるため、センサ部以外の伝送路は外部からの変形な どの影響を受けにくく、そのセンサ感度は、ヘテロコア部 の挿入長、ヘテロコア部に変形を付与の設置方法で容易に 調整できるといった、知的構造体のための光神経網の可能 性を有している.本論文の目的は、ヘテロコア技術を応用 して、従来の光センシング技術にない実用的かつ機能的な 知的構造体の実現可能性を示すことである.本研究では知 的構造体の具現化として、面形状変形を効率的に捉えるシ リコーン製光神経パッド構造シェイプセンサ、柔軟な構造 体である衣服に適用したウェアラブルモーションキャプ チャを提案し、その性能を実験的に評価した.更に知的構 造体ではセンサを多点で設置する必要性があるため、リア ルタイムでかつ単一伝送路上に複数点センサを配置し、一 括でセンサ信号を取得できる新たな測定手法を提案する.

本論文でその研究成果を全6章で構成し報告する.第1 章では序論として研究背景と意義を述べ,第2章から本論 に入る.第2章ではヘテロコア型光ファイバセンサの特徴 と計測システムについて,第3章では光神経パッド構造シ ェイプセンサの提案,第4章では光神経モーションキャプ チャの開発,第5章では光強度の時間微分変化による新た な多点計測手法の提案をし,第6章で結論としてまとめる.

2. 実験装置構成

ヘテロコア型光ファイバセンサは、Fig.1 に示す通り, 伝送路であるコア径 9μmのSM光ファイバに,センサ部と なるコア径 5μmのSMファイバを 1~2mm程度挿入し融着 して作製される. 伝播光はSM伝送をしながらヘテロコア



Fig.1 Experimental setup for hetero-core smart nerve real-time sensing system using LD-PD measurement.



Fig.2 Schematics of pad-structure sensing nerves. (a) 4-sensors were directly adhered on the surface of the silicon pad and properly located at distanced 4-sites in a single layer. (b) Sensors were concentrically located and laminated in three layers. (c) Pad deformation given by linear displacement by means of clamping.



Fig.3 Variation losses of (a) A, B, C and D sensors with the displacement for the pushing displacement of 0-deg. for Fig.2(a) pad experiment and (b) B sensor with the displacement 1-11 mm for 0, 45 and 90 degs pushing directions for Fig.2(b) pad experiment.

部の境界面で一部光がクラッド層へリークするが、そのま まほぼSM伝送を維持しながら伝送路に再度伝播する.こ のコア径の組み合わせによるヘテロコア型光ファイバセ ンサは、ヘテロコア部に付与される変形に対して単調な損 失特性が得られることが分かっている^[7].本研究で用いた 実験装置構成をFig.1 に示す.LD(波長 1.31µm,出力 0dBm)からの入射光は光カプラで16分岐され、それぞれ にヘテロコア型光ファイバセンサを有するSMファイバ伝 送路に接続される.その伝送路終端にPDを設け、ヘテロ コア部に付与された変形から生じた光損失を計測する.本 実験は、光強度ベースのリアルタイム計測を実現するため、 このような簡便な装置構成を採用している.

3. 光神経パッド構造シェイプセンサ

Fig.2 に構造体の面変形を捉える光神経パッド構造シェ イプセンサエレメントの構成図を示し、2種類の構成を提 案する. ヘテロコア型光ファイバセンサは、伝送路方向に 対する曲率を感知するため、センサ部を45°刻みで角度を 持たせて4ヶ所敷設することで,面に与えられた変形方向 と変形量の検知が可能となる. Fig.2(a)に示す構成は, 2mm 厚のシリコーンシートを対角線7cmの正八角形に加工し, そのシリコーンシート上に、ヘテロコア型光ファイバセン サを 0°, 45°, 90°, 135°と角度を与えてシリコーン接着剤 で敷設した. センサ間で光神経パッド変形時の外乱の影響 を受けにくくするため,各センサを一層構造の面内で距離 を置いて設置している.しかし、Fig.2(a)の構造ではヘテロ コアセンサを光神経パッドの中心に配置していないこと から、センサの感度を十分に引き出せていないと考えられ るため, Fig.2(b)に示す構造では, 各へテロコアセンサを パッドの中心に配置できるよう多層状に配置し,シリコー ン接着剤を正八角形の型に流し込みへテロコア型光ファ イバセンサを組み込みながら接着剤を硬化させた.実験で の光神経パッド変形付与方法は, Fig.2(c)に示すようにパッドの両端を掴み, 側部から押し込むように変位を与える.

Fig.3 に光神経パッドの変形特性を示す.Fig.3(a) は,Fig.2(a)の構造における光神経パッドの特性である.変 形の付与方向とセンサの配置方向が一致しているセンサ Aの場合がもっとも感度が高く,変形方向と 90°をなすセ ンサCに感度はほとんどなく,変形方向に対して 45°なす ように配置されたセンサB,Dは若干の感度をもっている. この結果から,変形方向に対する角度に従った感度を得た ため,本提案の設置手法を用いて面状で変形方向と変形量 を検知できることが示唆された^[8].

Fig.3(b)は、Fig.2(b)の構造における光神経パッドのセン サBの各変形方向に対する応答特性を示す.Fig.2(b)のよ うにヘテロコアセンサをパッドの中心に配置した結果、セ ンサ感度を向上できる.Fig.3(b)から、センサBの配置方 向は変形方向45deg.と一致したときに最大感度を持つが、 変形方向と45°をなす変形方向90deg.は、変形方向0deg. に対して低感度となっている.これは、シリコーン接着剤 の硬化ムラの影響で、変形付与時にヘテロコア部に与えら れるシリコーンから圧力がパッドの上面側と下面側で異 なり、その結果ヘテロコア部に与えられる変形が、多層中 のセンサ配置場所により異なっていたためと考えられる.

4. 光神経ウェアラブルモーションキャプチャ

従来のモーションキャプチャはカメラによる非接触式 ^[9],あるいは加速度計,角速度ジャイロセンサを直接身体 に取り付ける接触式^[10]があるが,いずれも身体の自然な 動きを妨げかねない拘束性の高い手法であった.それに対 し,本研究で提案する光神経センサは,衣類の繊維と同じ ように扱えるよう細径,柔軟でありかつ軽量な光ファイバ を使ったヘテロコア型光ファイバセンサであるため,着衣 しただけで動作計測可能な,拘束性の低いウェアラブルモ





Fig.4 Periodic real-time responses of sensor-A and -B located at the positions of the shoulder and pectoralis major with the motion of abduction/adduction.

Fig.5 Responses of the hetero-core sensor directly embedded at the elbow site of the sensing jacket when the arm was flexed (a) with wrinkles in the jacket and (b) without wrinkles.

ーションキャプチャを実現できる.本研究では,肩,腕, 手首などの上半身と,歩行時の足の屈曲と接地のモーショ ンキャプチャ実験を行った.

4.1 上肢におけるモーションキャプチャ

肩の動き計測のためのセンサ設置方法は、内転/外転 (体面に対して水平に腕を動かす)と伸長/屈曲(体面に 対して垂直に腕を動かす)を判別できるように, Fig.4 に 示すように肩の上(Sensor-A)と三角筋付近(Sensor-B) の2箇所に設置し、腕をまっすぐに下ろした状態でヘテロ コア部に緩やかな曲げが与えられるようにヘテロコア部 を中心に2点固定した. Fig.4 に肩の内転/外転の動きに 対するSensor-AとSensor-Bのリアルタイム応答特性を示す. Fig.4 に示す内転/外転の(I)~(III)の動きに対して Sensor-Aのみが周期的に感度をもっているが、それに対し てSensor-Bは感度がほとんど見られない. 更に、伸長/屈 曲の動きに対しても、Sensor-A、Bはどちらも異なる感度を 得た.したがって、提案する設置方法で2箇所ヘテロコア センサを配置することで、それらの応答の相対値から、内 転/外転と伸長/屈曲の 4 方向の動きを捉えられること が示された[11].

4.2 着衣のシワによる計測精度への影響

人間の日常生活において,衣類には動作時に関節部にシ ワが入り計測誤差が生じることが懸念されるため,そのシ ワがセンサ感度に及ぼす影響を検討した. 肘屈曲動作の屈 曲角度に対するヘテロコア型光ファイバセンサの光損失 の特性をFig.5 に示す.実験は、腕をまっすぐに伸ばした 状態を 0°とし、30°刻みで 0°⇒120°⇒0°と屈曲するサイク ルで5回計測した.自然な状態とシワを伸ばした状態で行 い, それぞれFig.5(a), (b)に示す結果となった. これらの特 性から分かる通り,自然な状態で肘屈曲を行うと,角度に 対してヘテロコアセンサの感度特性は得られるが,計測再 現性誤差が大きくなる. それに対し、シワを伸ばしながら 計測した場合は、計測再現性が格段に向上しているのが分 かる. 60°以上の屈曲角度では損失差が比較的大きいため, 自然な状態でも計測可能であるが、30°の計測分解能以上 は難しく、また0°~30°までの浅い角度では誤認識する. 誤差の原因は着衣のシワにより初期ファイバ固定点位置 がずれ、ヘテロコア部が関節位置からずれ、感度が計測毎 に変わったためと考えられる[12].

4.3 歩行動作計測

歩行動作計測を人体への拘束の少ない状態で行うため, 光ファイバを衣類に埋め込みその衣類を装着するだけで 動きを捉えられる装置構成とした.膝屈曲の計測では,膝 関節の足側面にセンサを1箇所敷設する.ここで,膝の上



部,下部に相当するところで、ヘテロコア部がその固定点 間の中心に位置するように光ファイバを敷設することで、 膝の屈曲時にセンサ部であるヘテロコア部に曲げが与え られるように調節した.足の接地の検知には、圧力がセン サ部の曲げに変換されるように、予めセンサ部に小切片を 添えて光ファイバを固定する.これにより、足接地時にセ ンサ部に急激な曲率が入り光損失を生じる.Fig.6は、歩 行動作計測システムにおける、各ヘテロコア型光ファイバ センサの光損失の時間変化を示している.足の接地時に約 4~5dBと伝播光損失が急激に生じており、また膝屈曲時 では、0.3dB以内で時間に対して緩やかに生じているのが 分かる.また、膝屈曲時の最大感度に若干バラつきが見ら れるのは、衣類のシワの影響であると推察される.本実験 結果から、十分に周期的な膝と足の接地の動きとなる歩行 動作を捉えられることが示唆された^[12].

5. 光強度の時間微分による多点計測

光ファイバ神経網は、その変形自由度が高い動きを検知 するためセンサ点数の増大する.そのため、単一ファイバ 伝送路上にセンサを複数点タンデム接続した多点実時間 計測技術が望まれる.そこで本研究では、光強度ベースで 計測できるヘテロコア型光ファイバセンサを単一伝送路 上に多点配置し、各センサの光損失の時間微分変化の違い を利用して、数十 Hz 程度のリアルタイムで単一線路中の 複数センサを一括で測定する手法を提案する.本実験では、 光損失が緩やかに変化する変位センサと、急激に変化する 接触センサにヘテロコア型光ファイバを応用し製作した. そして、この変位、接触センサを単一伝送路で3点タンデ ム状に接続して光損失の合計を実時間計測し、その光損失 の時間微分値からセンサ信号を捉える実験を行った.



Fig.7 Experimental setup for multi-point measurement consisted of hetero-core displacement/contact sensors with tandem connection.

Fig.7に示す通り、ヘテロコア型光ファイバ変位センサ、 接触センサ A, B を, 単一線路上にタンデム状に接続し, その伝送路の光損失を計測する.また光損失の時間経過を 計測しながら、光損失の時間微分値を算出する.変位セン サと接触センサに与えられる移動量と移動速度を正確に 制御するため、ステッピングモータで制御される自動ステ ージを用いた.変位センサはヘテロコア部を中心として2 点ファイバ伝送路をステージに固定し,そのステージ間の 最大移動量 5mm とした. また接触センサ A, B は, 上下 に動作する自動ステージで押下され,その接触時にセンサ に付与される最大移動量を 1mm とした. 最大移動量に対 するヘテロコア型光ファイバ変位センサ,接触センサ A, Bの光損失量はそれぞれ約1.6 dB, 0.4dB, 1.0dBとなるよう Fig.8 に、変位/接触センサの合計の光損失と光損失の時 間微分のリアルタイム応答特性を示す.変位センサ,接触 センサA, Bをそれぞれ速度 2.5 [mm/s], 12.5 [mm/s]で, 自動ステージによって交互に動作させた. Fig.8(a)から, 光損失値のみではどのセンサが動作しているか判別でき ない. しかし,Fig.8(b)から分かる通り,光損失の時間微分 値に着目するとセンサの判別が可能となる.ここで,光損 失の時間微分値の閾値を3 [dB/s],とすると、変位センサ と接触センサを,更に7[dB/s]とすると,接触センサA, Bを判別できる.この結果から、1つの変位センサと複数 個の接触センサを光強度ベースのリアルタイム計測で判 別できることが分かった. また,接触センサ A, B のよう に複数の接触センサを設置するには,接触センサの感度を 変えて、かつ変位センサの時間微分値と混同しない感度を 持たせる必要がある. ヘテロコア光ファイバセンサは変位 計測の再現性が高く,接触センサA,Bのように感度を調 整することが可能であるため,他の光ファイバセンサより 本手法に適している.

6. 結論

本研究では、ヘテロコア型光ファイバ神経網による知的 構造体の研究として、自由度の多い構造物にヘテロコア型 光ファイバセンサ応用し実用化を目指した研究を行い、そ の新規性、有用性を実験的に明らかにした.まず、構造体 の面形状変形を捉える光神経パッド構造シェイプセンサ の開発を行った.経年劣化の少ないシリコーン素材で作ら れる平面状のパッドにヘテロコア型光ファイバセンサを 3 点もしくは4点、その面内で角度をもたせて配置し、シ リコーン製パッドの変形量と変形方向が検知できる光神 経シェイプセンサエレメントである.敷設された各センサ は変形方向に従った感度を得ることができ、センサの相対 感度から変形方向がわかる面形状変形を十分に捉えられ ることが示唆された.また、パッド上で距離を置いて敷設 する場合と層状で面内の同一位置で敷設する場合で、変形 方向をより正確に捉えたい場合と感度を上げたい場合と、





それぞれ特徴的な特性を得る結果となった.次に,光神経 モーションキャプチャシステムの開発では,ヘテロコア型 光ファイバセンサを柔軟な構造体とも言える衣類に埋め 込みそれを着衣するだけで,人の動きを捉えることができ る拘束性の低い計測技術を実現した.上肢,歩行動作の無 拘束計測の実現性を示し,また衣類のシワの影響も検討し た.最後に,光神経網による知的構造体の実現に必要と考 えられる多点計測技術において,光強度ベースで単一伝送 路上に多点でセンサを配置し,光強度の時間微分に着目し 一括で複数のセンサ信号を捉える計測手法を提案した.光 損失の時間変化が緩やかなセンサを1箇所と,急激な損失 変化をもつセンサを複数個所設置できることを実験的に 示し,ヘテロコア型光ファイバセンサの柔軟な感度調整能 力を活かした多点計測技術の有用性を示した.

本研究では、ヘテロコア型光ファイバセンサが知的構造 体として、様々な構造体の特徴に合わせて光神経的役割を 付加できること実験的に示し、他の光センシング技術に持 ち得ない柔軟な知覚能力が知的構造体に効果的に活かせ ることを示した.そのため、ヘテロコア光ファイバ神経網 は、建物や車などの構造物から、人間の日常動作といった、 様々な分野で自由度の高い動きを捉える知的構造体のた めの光神経ネットワークと成り得ると言える.

参考文献

[1] A. D. Kersey, et al., J. Lightwave Technol., 15(1997) pp.1442-1463.

- [2] B. Guan, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 12(2000) pp.675-677.
- [3] R. Romero, et al., Appl. Opt., 44(2005) pp.3821-3826.
- [4] L. C. G. Valente, et al., IEEE Sensors J., 3(2003) pp.31-35.
- [5] Y. Chiang, et al., Appl. Opt., 41(2002) pp.1661-1667.
- [6] K. Watanabe, et al., IEICE trans., E83-C (3) (2000) 309-314.
- [7] H. Sasaki, et al., in Proc. SPIE, 5579(2004) pp. 136-143.
- [8] M. Nishiyama, et al., Sens. Actuators A, 136(2007) pp.205-211.
- [9] B. Peterson, et al., Med. Biol. Eng. Comput. 34(1996) pp.149-154.

[10] H. Dejnabadi, et al., IEEE Trans. Biomed. Eng. 53(2006) pp.1385-1393.

- [11] M. Nishiyama, et al., Trans. SICE, 43(2007) pp.1075-1081.
- [12] M. Nishiyama, et al., in Proc. SPIE, 6529(2007) 65291Y.