

ヘテロコア光ファイバ加速度計に関する研究

Studies on hetero-core optical fiber accelerometer

19D5201 門倉 美幸 指導教員：西山 道子 准教授

Abstract

This thesis proposes a semicircular hetero-core optical fiber triaxial accelerometer composed only of fibers. We realized a fiber optic accelerometer with low transverse sensitivity by adjusting the position of the hetero-core fiber sensor into a semicircular shape. A triaxial accelerometer was fabricated using three uniaxial hetero-core optical fiber accelerometers, which were orthogonally arranged each other. The measurement error mainly based on the transverse sensitivity was reduced by using a 3×3 sensitivity matrix compared to the sensitivities in the primary axis. The sensitivity in the low-frequency range was successfully improved by placing weight at the center of the semicircular arc of the optical fiber. For structural health monitoring, a multimodal sensing system composed of the fiber optic accelerometer and a liquid detection sensor, whose temporal waveforms in the optical loss could be discriminated successfully. The obtained results in this thesis have successfully demonstrated the fiber optic accelerometer in practical usage.

Keywords: optical fiber sensor, hetero-core optical fiber, triaxial accelerometer, multimodal measurement

1. 序論

産業機械や機器が発する振動を追跡することは、故障の早期発見にとって不可欠である。これまでに、ガスタービンやポンプなどの回転機器設備の故障診断や潜在的な損傷検出のために、振動センサや加速度計を用いた振動モニタリングが提案されている^{[1][2]}。振動モニタリングを行うことにより、振動の振幅や周波数、強度の変化を測定することで機械や機器のアンバランス、緩み、ミスアライメントやベアリングの摩耗を故障前に発見することができる。このような振動情報を取得することにより、機器や構造物の故障や損傷を早期に発見することによって重大な事故を未然に防ぎ、損害を抑えることが可能である。

振動情報の取得には、振動センサや加速度計が用いられており、静電容量型や圧電型の電気センサが幅広く用いられている^{[3][4]}。航空宇宙分野などにおける機器や機体は温度変化が激しく生じる過酷な環境下で使用され、さらに電子機器の集積密度が高いため、電磁干渉の影響を考慮した機器配置の設計が必要である。一方、光ファイバセンサは、小型、細径、軽量、柔軟といった機械的な特徴に加え、光ファイバに石英ガラスが用いられていることから、電磁干渉や化学腐食に耐性を有しており、電気式の代替センサとして開発されてきている^[5]。光ファイバ加速度計には、ファイバブラッググレーティング (FBG)^[6]、ファブリ・ペロー干渉^[6]、ヘテロコア構造^{[7][8]}に基づくセンサが提案されている。これらの光ファイバセンサを加速度計に応用するには、光ファイバ自体を梁とした構造や、加速度印加時に生じるわずかな歪を検知する機構を有する構造が挙げられる。光ファイバを梁として扱う構造では、光ファイバのみで構成されるシンプルな構成である一方、全ての方向にたわみが生じ、加速度の印加方向を特定することが困難である。また、歪を検知する機構を有する構造では加速度の印加方向の特定は可能であるが、光ファイバ以外の機構を有する必要があるため、複雑な構成になる。

本論文の目的は、コストパフォーマンスが高く、光ファイバのみで構成され、1軸方向に高い感度を有するヘテロコア光ファイバ加速度計の実現と3軸加速度計としての有用性、及びマルチモーダル計測への応用の実現可能性を示すことである。本研究では、光ファイバの剛性を利用したシンプルなセンサ構成で、3方向の加速度を検知するために振動方向が検知可能な両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計を提案し、3軸加速度計としての性能を実験的に評価した。また、飛行機や宇宙機の機体やビルや橋梁といった大型構造物の損傷検出を行う際には低

周波数領域におけるモニタリングが必要となるため、低周波領域における感度向上を目指し、両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバに付加質量を設置した加速度計の提案をする。さらに、ヘテロコア光ファイバセンサの時間応答周波数の違いに着目したマルチモーダル計測への応用を提案する。本研究では、時間応答周波数が明らかに異なる加速度と液体付着を同時に検出するために、ヘテロコア光ファイバ加速度計と液体検知センサをファイバ1ライン上にタンデムに設置し、得られた実時間応答から、それぞれの情報を抽出可能な手法を提案する。

本論文でその研究成果を全6章にまとめ構成した。第1章では序論である研究背景、研究目的を述べ、第2章では振動モニタリング技術について述べる。第3章では提案3軸加速度計の構成及び性能評価、第4章では提案加速度計の低周波数領域における感度向上のための提案、第5章ではマルチモーダル計測への応用システムの提案をし、第6章で結論としてまとめる。

2. 両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ3軸加速度計

2.1. センサ構成

Fig. 1にヘテロコア光ファイバセンサの構成を示す。ヘテロコア光ファイバは、伝送路ファイバにコア径9 μm のシングルモード (SM) 光ファイバにヘテロコア部と呼ばれるコア径3 μm のSM光ファイバ小切片を1mm挿入・融着して作製される。ヘテロコア部に緩やかな曲げが生じた際に伝搬光が漏洩し、曲率変化に対して鋭敏に光損失変化が生じる。本研究では、曲率変化に対する光損失変化に高い線形性を有し、高感度であるコア径の組み合わせとセンサ長を採用した。また、ヘテロコア光ファイバセンサはLEDとPDを用いた光強度ベースの計測が可能であるため、コストパフォーマンスが高い計測システムである。

Fig. 2に両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ1軸加速度計の構成を示す。ヘテロコア部を含む光ファイバを曲率半径Rが15mmになるように半円状にし、振動印加

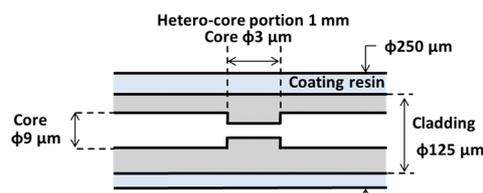


Fig. 1 Structure of a hetero-core fiber optic sensor.

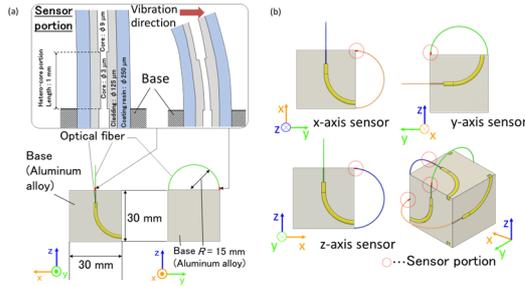


Fig. 2 Configuration of a semicircular curved hetero-core optical fiber (a) uniaxial and (b) triaxial accelerometer.

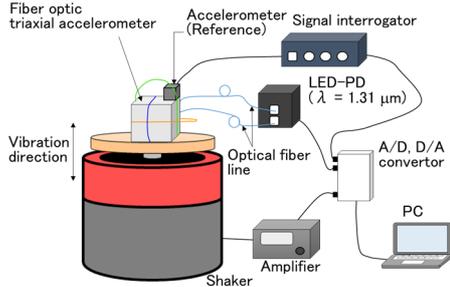


Fig. 4 Experimental setup for evaluating mechanical vibration.

時に最も曲率変化が生じる固定端にヘテロコア部が位置するように光ファイバをアルミニウム合金の固定台に接着剤(シアノアクリレート)で接着した。光ファイバが固定されたアルミニウム合金の固定台に振動が印加されると、光ファイバ自体が振動子となることでたわみ、ヘテロコア部に曲率変化が生じ光損失変化として加速度を測定することができる。また、3軸加速度計として機能させるために、1軸光ファイバ加速度計の半円が直交するように3本のセンサを立方体の固定台に設置した。本研究では、光源に中心波長 1.31 μm の LED と受光部に PD を用いて光損失値として計測を行った。

2.2. 強制変位特性

提案するヘテロコア光ファイバ加速度計のヘテロコア部における静的な変位量に対する特性を明らかにするために、強制変位実験を行った。本実験で用いた実験装置構成図を Fig. 3 (a) に示す。光ファイバ半円の円弧中心部を固定し、提案する光ファイバ加速度計の固定台を変位ステージ台に設置し、ヘテロコア部に変位を与える。本実験では、3方向(面内せん断変形、面外曲げ変形、面内圧縮変形)に対して変位を与えた。

Fig. 3 (b) に与えた変位量に対する光損失応答の結果を示す。全ての变形において、変位量に対して線形的な光損失変化が生じていることが確認された。変位に対する提案光ファイバ加速度計の感度は、面内せん断変形において 4.1 dB/mm、面外曲げ変形において 1.1×10^{-1} dB/mm、面内圧縮変形において -2.4 dB/mm であり、面内せん断変形方向に最も高い感度を有していた。以上の結果より、光ファイバ半円の变形方向に感度差を有していることを明らかにした。また、振動が印加されたことによって生じる光ファイバの半円のたわみ量は比例の関係があるため、本実験で得られた特性から、提案光ファイバ加速度計は加速度に対して線形な光損失が生じることが示唆された。

2.3. 周波数および加速度振幅応答特性

提案光ファイバ加速度計の動的な特性を明らかにするために、周波数及び加速度振幅応答特性実験を行った。本実験で用いた実験装置構成図を Fig. 4 に示す。加振器に提案光ファイバ3軸加速度計と参照用加速度計を設置し、各加速度計に振動を印加した。周波数応答特性実験では 10-

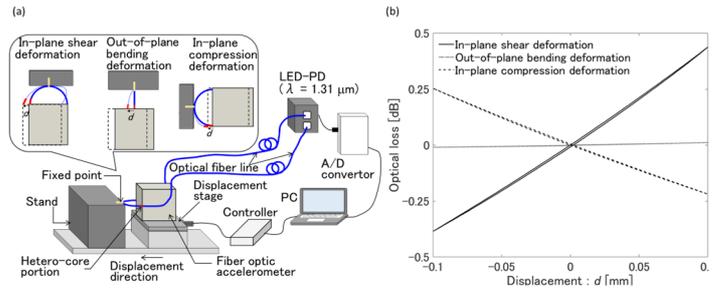


Fig. 3 (a) Experimental configuration and (b) response to optical loss variation for the forced displacement experiment.

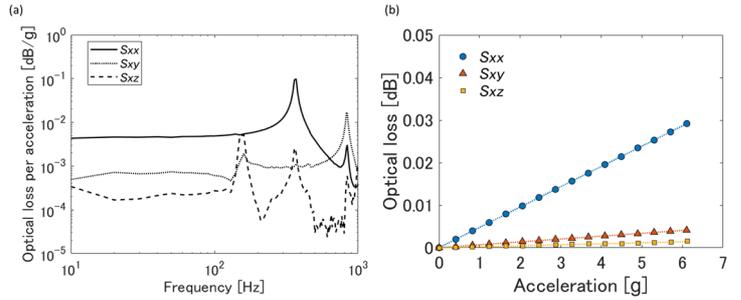


Fig. 5 (a) Frequency response characteristics and (b) amplitude characteristics in acceleration.

1000 Hz の周波数範囲で 10 Hz 刻みで掃引し、正弦波振動を印加した。また、振幅応答特性実験では提案加速度計の計測周波数範囲内で抽出された 80 Hz の一定周波数で加速度を増加させて実験を行った。それぞれの実験でのサンプリングレートは 10 kHz とした。

周波数応答特性の結果を Fig. 5 (a) に示す。センサの感度は $S = S_{ij} (i, j = x, y, z)$ を用いて表される。第一添え字はセンサの出力軸、第二添え字は加速度の印加方向を示している。ここでは、x軸加速度計の結果を示しており、青色、オレンジ、黄色のプロットはそれぞれ、光ファイバ半円に対して面内せん断変形、面内圧縮変形、面外曲げ変形方向に加速度を印加した際の応答実験の結果である。y, z軸においても同様の特性が得られた。それぞれの変形方向に対する共振周波数は、面内せん断変形方向において 370–380 Hz、面内圧縮変形と面外曲げ変形方向においては 140–170 Hz であった。100 Hz 以下の周波数範囲では、面内せん断変形方向に最も高い感度を有していることが明らかになり、他の2方向の振動に対しては面内せん断変形方向よりも感度が低いことが明らかになった。そのため、面内せん断変形方向が本提案加速度計の検知する主方向であり、他の2方向は横感度と定義できる。また、共振周波数よりも低い周波数範囲では感度が安定していることから、曲率半径 R が 15 mm の提案光ファイバ加速度計ではおよそ 10–90 Hz の範囲で加速度計として使用可能であることが示唆された。y, z軸方向の周波数応答特性に関しても同様の周波数で共振が生じていることが確認された。

加速度振幅応答特性の結果を Fig. 5 (b) に示す。全ての变形方向の加速度に対して、光損失変化が高い線形性が有していることが確認された。また、面内せん断変形、面内圧縮変形、面外曲げ変形方向のそれぞれの感度は 4.8×10^{-3} 、 6.8×10^{-4} 、 2.3×10^{-4} dB/g であった。本実験では、6.1 g まで実験を行ったが、2.2 節で述べた変位で線形性を有している範囲に相当する加速度範囲までは線形性を有していることが考えられる。

2.4.3 軸加速度計性能評価

提案光ファイバ加速度計を3軸加速度計として用いる場合、振動の印加方向により感度差が生じているが、横感度を有していることから誤差の要因になると考えられる。

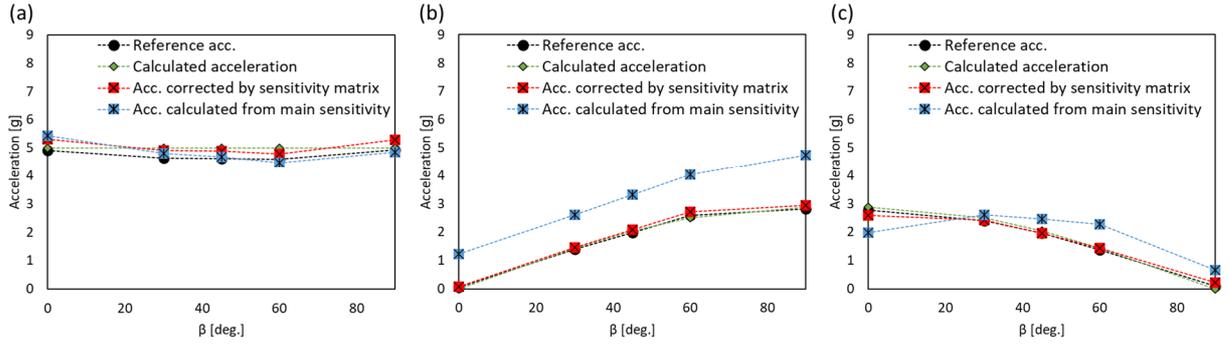


Fig. 6 Conversion results of the proposed hetero-core optical fiber accelerometer for (a)x-, (b)y-, and (c) z-axis in 80 Hz mechanical vibration.

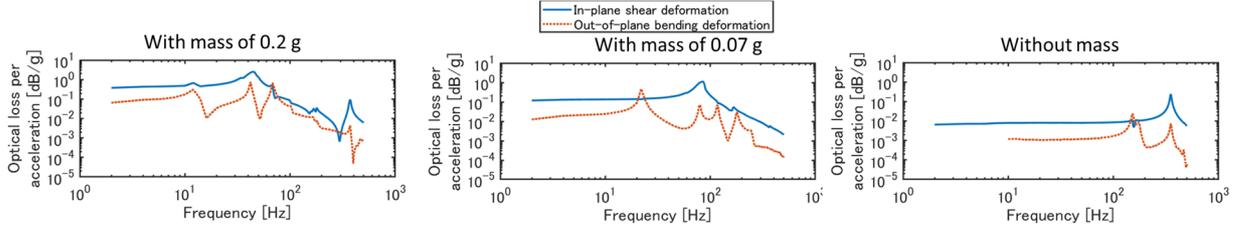


Fig. 7 Frequency response characteristics of the in-plane shear deformation and the out-of-plane bending deformation with 0.2 g, 0.07g, and without mass.

一方で、各印加方向において加速度に対して光損失変化が高い線形性を有しているため、本研究では横感度を考慮した 3×3 感度マトリクスを用いて光損失から加速度の算出を行った。提案光ファイバ 3 軸加速度計の出力信号 $O_i (i = x, y, z)$ とセンサに印加される加速度 $a_i (i = x, y, z)$ の関係は校正行列である 3×3 感度マトリクス A を用いて次のように表される。

$$\begin{pmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}, \text{ with } A = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

また、感度マトリクス A は周波数特性から得られた 90 Hz 以下の平均感度から算出される。算出された感度マトリクスは次のように表される。

$$A = \begin{pmatrix} 4.65 & -0.673 & 0.228 \\ 2.40 & 7.29 & -1.36 \\ -0.617 & 2.78 & 5.52 \end{pmatrix} 10^{-3} \text{ dB/g}. \quad (2)$$

光損失から加速度を算出するには、式(2)で示す感度マトリクスの逆行列を出力信号 O に掛け合わせることで算出可能である。本実験では、主軸感度で換算した場合と感度マトリクスで換算した場合を比較することで感度マトリクスの有効性を調査した。また、提案光ファイバ 3 軸加速度計の各軸に加速度が印加されるように、提案光ファイバ 3 軸加速度計の y 軸回りで 30 度回転させ、 x 軸回りで 0, 30, 45, 60, 90 度回転させて加振器で振動を印加した。

Fig. 6 (a), (b), (c) に x 軸回りの回転角度に対する参照用加速度計の加速度値、提案光ファイバ 3 軸加速度計の出力値である光損失から主軸感度で換算した加速度値と感度マトリクスを用いて換算した加速度値の x, y, z 軸の加速度計の応答を示している。 x 軸の提案光ファイバ 3 軸加速度計の加速度値は、主軸感度での換算と感度マトリクスで換算した加速度値とも参照用加速度計とほぼ同程度の加速度値を示していることが確認された。一方で、 y, z 軸の換算結果では、どちらも主軸感度で換算した場合よりも、感度マトリクスで換算した加速度値の方が良く補正されており、参照用加速度計の加速度値と比較した場合の誤差が小さい傾向にあった。 y, z 軸の主軸感度での換算結果の誤差が大きくなっているのは、 x 軸の加速度計と比較し、横感度の影響が大きいと考えられる。したがって、横感度が考慮された感度マトリクスを用いた換算が有用であることが示唆された。

3. 低周波領域における両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計の感度向上

機体などの大型建造物の損傷診断のために、提案光ファイバ加速度計の低周波領域における感度向上を目的とし、これまでのセンサ構成に加え、光ファイバの印加加速度に対するたわみ量をより増加させるために、光ファイバ半円の円弧中心部に付加質量を設置する構造を提案する。付加質量の違いによる周波数応答特性を評価するために、付加質量 0.2 g, 0.07 g, 付加質量なしの 3 種類の加速度計を作製した。2–500 Hz の周波数範囲で、2 Hz 刻みで掃引し、Fig. 4 で示した実験構成装置で実験を行った。

Fig. 7 に付加質量が設置された提案光ファイバ加速度計の面内せん断変形、面外曲げ変形方向に振動を印加した際の周波数応答特性を示す。3 種類全ての加速度計で 2 章で述べた提案光ファイバ加速度計と同様に、面内せん断変形方向の方が低周波領域で感度が高いことが確認された。面外曲げ変形方向における第一共振点は、付加質量 0.2 g, 0.07 g, 付加質量なしでそれぞれ 12 Hz, 22 Hz, 152 Hz であり、面内せん断変形方向における第一共振点は 44 Hz, 86 Hz, 350 Hz であった。加速度計として使用可能な周波数範囲である、感度が安定している領域とし、面外曲げ変形方向の共振周波数以下の周波数領域での面内せん断変形方向の周波数応答特性から感度の平均を算出し、感度および横感度の評価を行った。付加質量 0.2 g と 0.07 g においては、2–10 Hz の周波数範囲で評価を行った。付加質量なしにおいては、面内せん断変形方向については 2–90 Hz の範囲で評価を行ったが、面外曲げ変形方向は感度が低く、低い周波数帯域では計測が行えなかったため、10–90 Hz の周波数範囲で評価を行った。平均感度は、付加質量 0.2 g が 4.4×10^{-1} dB/g, 付加質量 0.07 g が 1.3×10^{-1} dB/g, 付加質量なしが 8.1×10^{-3} dB/g であった。また横感度は付加質量 0.2 g, 付加質量 0.07 g, 付加質量なしでそれぞれ 25, 15, 15% であった。従来の低周波振動モニタリングのための振り子型ヘテロコア光ファイバ加速度計と比較すると、共振周波数 20.4 Hz に対して計測可能周波数範囲がおよそ 1–10 Hz の加速度計の感度が 1.3×10^{-1} dB/g であった^[7]のに対し、付加質量 0.2 g の提案光ファイバ加速度計は感度がおよそ 3.4 倍向上した。以上の結果より、光ファイバと付加質量のみの簡素なセンサ構成で低周波数領域において感度が向上

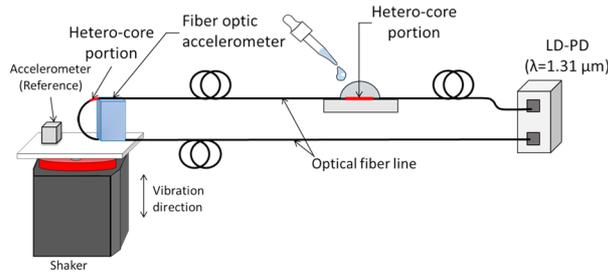


Fig. 8 Experimental configuration for acceleration and liquid detection.

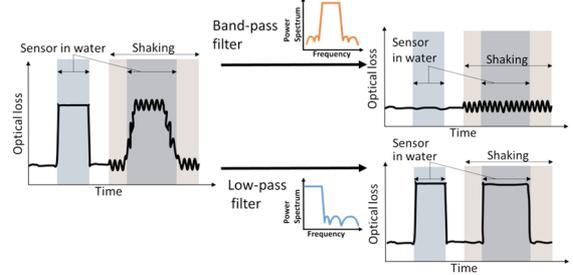


Fig. 9 Information differentiation method.

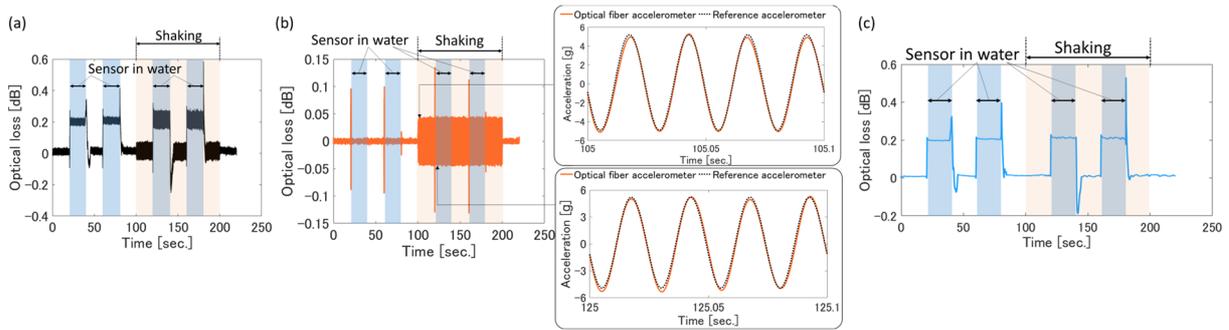


Fig. 10 (a) Real-time response of total optical loss, (b) band-pass filtered signal and (c) low-pass filtered signal in the multimodal measurement experiment.

可能であることが示唆された。

4. センサの時間応答周波数の違いに着目したマルチモーダル計測への応用

光ファイバ 1 ライン上に複数のセンシング機能を付与するために、時間応答周波数の異なるセンサを Fig. 8 に示すようにタンデムに接続し、Fig. 9 に示すように、取得した光強度波形から周波数フィルタを施すことで信号を抽出し測定する手法を提案する。本実験では、ロケットを対象とし、ロケットエンジンの振動と液体の漏洩検知を想定し、加速度と液体検知のセンサを単一伝送路上に 2 点タンデムに接続し、光損失の実時間応答を取得した。振動は比較的高い周波数かつ提案光ファイバ加速度計の計測周波数範囲である 10–90 Hz のバンドパスフィルタを施し信号の抽出を行う。また、液体検知は時間経過に対して光損失変化が緩やかであると考えられるため、5 Hz をカットオフ周波数としたローパスフィルタを施し抽出を行った。

Fig. 10 (a), (b), (c)にそれぞれ、光損失の合計実時間応答、バンドパスフィルタを施した信号、ローパスフィルタを施した信号を示す。Fig. 10(a)に示すように、光損失の合計値の応答では、振動を加えた際に 0.05 dB 程度の光損失が生じ、液体が付着した際に約 0.2 dB の光損失が生じ、振動と液体付着の両方が生じた場合には 0.2 dB を基準に ± 0.05 dB 程度の光損失変化が生じていた。Fig. 10 (b)に示された、バンドパスフィルタが施された信号に着目すると、印加された振動による光損失変化の成分のみ抽出されていた。振動のみと振動と液体付着が同時に生じた際も、参照加速度計と同様の加速度値を示していた。また、Fig. 10 (c)に示された、ローパスフィルタを施した信号に着目すると、振動による信号成分は除去されており、液体付着による光損失値のみ抽出できていることが確認された。以上の結果より、センシング対象の時間応答周波数が異なるヘテロコア光ファイバセンサをタンデム接続し、得られた光損失の合計実時間応答に周波数フィルタを施すことで 2 種類の信号を識別し、本実験で行った時間応答周波数の違う情報であれば同時に検出可能であることが示唆された。

5. 結論

本研究では、光ファイバのみのシンプルなセンサ構成で、3 軸加速度を検知するために 1 軸方向に高い感度を有する

両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計を提案し、実用化を目指した研究を行い、加速度計の基本性能評価を行った。その結果、面内せん断変形方向に高い感度を有し、他の 2 方向は低い感度を有していることが示唆された。この横感度の低い 1 軸両端固定支持梁構造ヘテロコア光ファイバ加速度計を 3 本用いて、3 軸加速度計を作製し、横感度を考慮した 3×3 感度マトリクスを用いて換算することで、誤差が低下したことが確認され、3 軸加速度計としての有用性が示された。また、曲げ梁構造の光ファイバに微小な付加質量を追加することで、低周波領域における感度向上に成功した。さらに、時間応答周波数の違いに着目した異種センサで構成されるマルチモーダル構造ヘルスマonitoringを想定し、本提案の加速度計と液体漏洩検知センサを統合し、時間応答スペクトルで 2 種類のセンサ応答を検出できるマルチモーダル計測システムを提案した。

本研究では、曲げ方向に感度対称性を有しているヘテロコア光ファイバセンサに対して、簡便な光ファイバの曲げ梁構造を導入したことによって、梁構造の曲げ変形に対して 1 方向に高い感度を有するセンサを実現した。さらに、微小な曲げ歪を取得することを要求される加速度計の実現のために、ヘテロコア光ファイバの配置の最適化を行ったことで光ファイバ加速度計の実現可能性が大きく開かれた。また、LED 光源による低カップリング効率での光強度計測を実験的に明らかにし、コストパフォーマンスが高い光ファイバ加速度計を提案した。本研究成果は、光ファイバのみの最も簡素な構成での加速度計における設計指針を明らかにし、これまでの光ファイバ加速度計でなし得なかった光ファイバ加速度計の産業応用への実現性を明らかにした。

参考文献

- [1] R. Yan, et al, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 9, pp.3130–3139 (2009).
- [2] B. Djaidir, et al, J. Theor. Appl. Mech., vol. 55, no. 2, pp. 393–406 (2017).
- [3] A. Utz, et al, IEEE Sens. J., vol. 18, no. 16, pp. 6533–6539 (2018).
- [4] S. Trivedi, et al, IEEE Sens. J., vol. 21, no. 19, pp. 21979–21988 (2021).
- [5] A. Cusano, et al, Sens. Actuator A Phys., vol. 110, no. 1–3, pp. 276–281 (2004).
- [6] S. Wu, et al, J. Light. Technol., vol. 36, no. 11, pp. 2216–2221 (2018).
- [7] H. Yamazaki, et al, Sensors, vol. 18, no. 8, p. 2528 (2018).
- [8] A. Matsuo, et al, IEEE Sensors J., vol. 21, no. 20, pp. 22464–22471 (2021).