

ヘテロコア光ファイバセンサによる触覚センシングに関する研究

Studies on tactile sensing based on Hetero-core fiber optic sensors

15D5202 山崎 大志

指導教授：渡辺 一弘 教授

SYNOPSIS

This paper represents a novel technical approach for tactile sensing like human skin using hetero-core fiber optics. Hetero-core fiber optic sensors have a possibility to detect a variety of tactile information because they are highly sensitive to macro-bending and can measure in real time, in addition to some features as fiber optic sensors such as immunity to electromagnetic interference and chemical corrosion, implantability to composite materials, and passive sensor elements. A tactile sensor element based on a transmission-type hetero-core fiber was experimentally proved to measure contact force up to 5 N and discriminate tactile impressions of objects in terms of hardness and roughness by assessing temporal changes in sensor responses. Moreover, a reflection-type hetero-core optical fiber was found to perform as an artificial mechanoreceptor which responded to deformations on soft materials and furthermore detected both static and dynamic contacts with localized sensing area within few millimeters in diameter. As a result, it has been successfully confirmed that the hetero-core fiber optic sensors can be used as an artificial nerve device for tactile perception like human skin.

Keywords : hetero-core fiber optics, tactile sensing, tactile impression, mechanoreceptor

1. 研究背景

人が他者やモノ、環境に対して感性をもつのは、五感を始めとした様々な感覚器官が外界のあらゆる情報を感じ取れるからである。特に触覚は、全身の皮膚に備わる感覚であり、圧力や振動、温度だけでなく、触れた対象の形状、硬軟感、摩擦、粗さ感など、多種多様な質感情報を感じ取ることができる^[1]。このような触覚の工学的再現を目指す触覚センシングは、特に昨今のロボティクス分野やバーチャルリアリティ分野の急速な発展に伴い、これまで人の手で行われてきた面品質検査や触診のロボット代行や、物体認識・操作に優れたヒューマノイドロボット、知覚機能をもつ人工義手など、さまざまな分野で応用が期待されている^[2-6]。一方で、人の触覚の豊かさは、皮膚の内部に点在する数種類の機械受容器が異なる空間分解能と周波数応答性によって皮膚に生じるあらゆる物理的インタラクションを感知することで成立している。また物理的接触を前提とする触覚にとって、皮膚のもつ弾性は触れた対象へのダメージを軽減できる上、皮膚が対象に密着することで安定した接触ができる点で不可欠な性質といえる。そのため、人の皮膚感覚を再現する触覚センサには、センサ性能だけでなく柔軟な構造的性質が要求される^[7]。

構造物を知覚化するセンサ技術の一つに光ファイバセンシングがある。光ファイバセンサは、電気的センサに比べて耐腐食性や耐電磁誘導性に優れており、さらにファイバ特有の細径、柔軟な構造をもつことから、神経のように構造物に埋め込める光神経デバイスとして提案されてきた。これまでもロボット皮膚などの構造物に実装可能な触覚センサとして、Fiber Bragg Grating(FBG)やマイクロバンドを応用した光ファイバ式触覚センサが報告されているが、これらのセンサ技術の多くは静的な接触圧や構造物全体の変形量を計測対象としており、人が皮膚を通して感じ取る繊細かつ多様な触覚情報に対するセンシング性能は未だ実現できていない。また温度補償やセンサの頑健性、製造コストなどの面で課題が多く、未だ実用的とはいえない。一方で、ヘテロコア光ファイバセンサ^[8]は、コア径の異なる光ファイバを組み合わせることで緩やかな曲率に対する鋭敏な光損失変化を可能にしたマクロバンドセンサである。このセンサは、原理的にセンサ部における温度依

存性は極めて低い上、LED光源を用いた光強度ベースでの計測方式により低コストで数kHz以上のリアルタイム計測が実現できるため、耐環境性に優れた静的または動的な触覚情報を感知する光ファイバ式触覚センシングの実現が期待できる。

本研究の主旨は、ヘテロコア光ファイバセンサを用いて人工的な触覚神経のように構造物を知覚化する新たな光ファイバ式触覚センサを開発することである。本論文ではその研究成果を全6章にまとめて構成した。第1章では、本研究の背景及び意義を述べた。第2章では、皮膚の触覚メカニズム、及びこれまでの触覚センサ開発事例を紹介した。第3章では、伝送型ヘテロコア光ファイバを用いた小型触覚センサ素子を提案し、なぞり・押し込みの2動作による質感評価方法、及び構造物への埋め込み時に生じる課題について論じた。第4章では、ヘテロコア光ファイバに

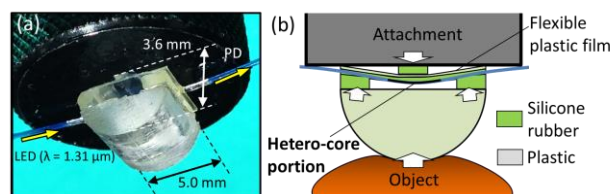


Fig. 1. (a) An appearance and (b) a schematic drawing of a tactile sensor based on transmission-type hetero-core fiber optic sensor.

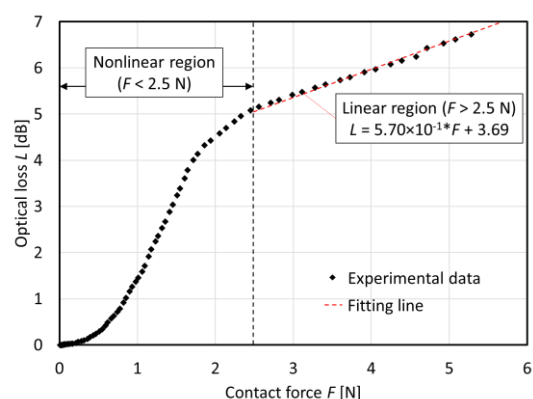


Fig. 2. Optical loss of the tactile sensor as a function of contact force vertically applied.

終端反射構造を組み合わせることで、埋め込まれた構造物の変形量を感知する光ファイバ式機械受容器を提案し、その受容器のセンサ性能を明らかにした。第5章では、4章で提案した機械受容器を柔軟な人工指に埋め込み、接触位置の空間分解能及び周波数応答性、更に硬さや表面形状に対する応答性を確かめた。第6章では、研究を要約した結論を述べ、ヘテロコア光ファイバセンサが触覚センシングを行う光神経システムとして有用であることを示した。

2. ヘテロコア光ファイバ触覚センサによる質感評価

2.1 ヘテロコア光ファイバ触覚センサ

ヘテロコア光ファイバセンサによる触覚検出性能を確かめるために、伝送型ヘテロコア光ファイバに小型な三点曲げ機構を備えた触覚センサ素子を提案し、質感に対する応答性を検証した。Fig. 1 にヘテロコア光ファイバ触覚センサの構造を示す。本センサは伝送型ヘテロコア光ファイバセンサを $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$ のシリコンゴム及びプラスチック製の筐体に内蔵しており、素子中の三点曲げ機構によって上下方向に加わる力を検知する。センサ素子の下部に設けられたプラスチック製の接触部は、なぞり動作時に対象との引っ掛かりを減らすために接触面が滑らかな半円柱状とした。センサ部の光損失変化は、伝送路両

端に接続された波長 $1.31\ \mu\text{m}$ の LED 光源とフォトダイオードにより計測した。Fig. 2 に本センサに 5.3 N 以下の荷重を与えた際の光損失変化を示す。本センサは 0.01 N 程度の接触力に対して感度を示し、 $1\text{--}2\text{ N}$ の範囲で感度が 3.13 dB/N と最も高い。Fig. 2 から分かるように、光損失値は接触力に対して単調増加するため、センサ応答から接触力の大きさを特定することができる。検出対象である質感のうち、粗さと硬軟はそれぞれなぞり動作と押し込み動作に関する⁹⁾。そこで接触対象に対して作製したセンサ素子でなぞり動作、押し込み動作を行なった際の光損失変化から、質感の検出性能を検証した。

2.2 なぞり動作による表面形状検知

表面の凹凸や粗さに対する応答性を確かめるため、凹凸のある表面にセンサをなぞらせたときの光損失変化を計測した。本実験では、凹凸の高さと間隔に着目し、高さ $10, 100\ \mu\text{m}$ の突起を 1 mm 間隔で配列したプラスチック製シートと、繊維間隔が異なる2つの布を対象とした。Fig. 3(a) に示すように、センサ素子は対象に一定量押し下したまま表面上を速度 1.0 mm/s で走査させた。また対象は突起の列及び布地の凹凸面がセンサの進行方向と平行となるように設置した。Fig. 3(b) に突起のあるプラスチックシートをセンサの移動距離に対する光損失変化を示す。Fig. 3(b)

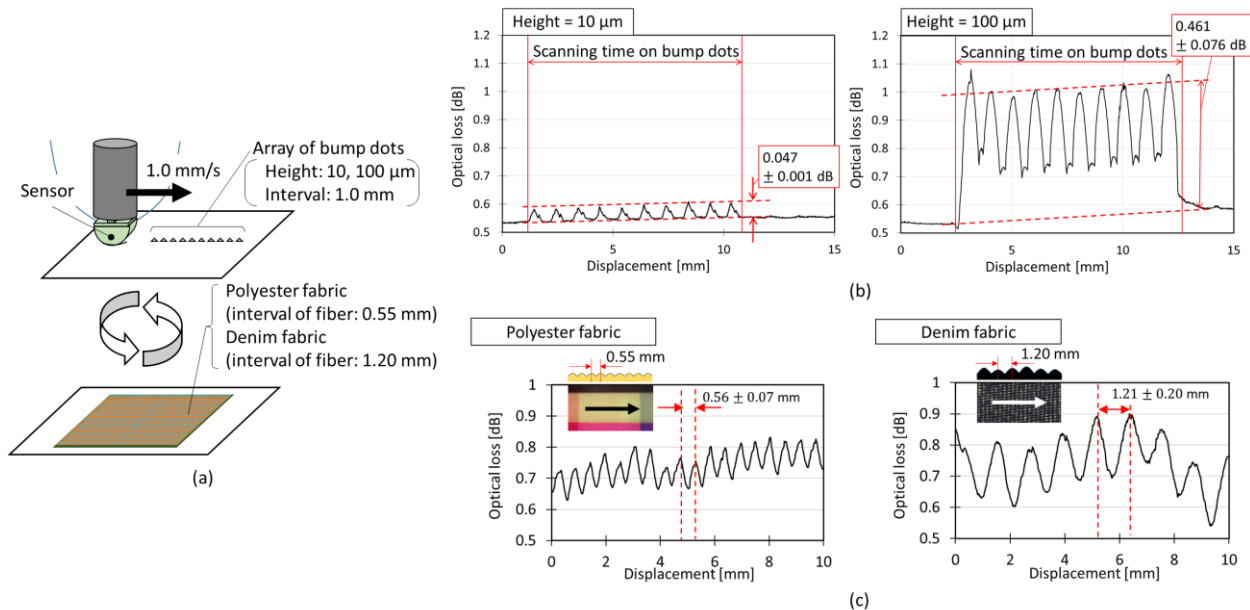


Fig. 3. (a) Experimental setup for the sensor scanning on tested surfaces, (b) optical loss changes during scanning action in case of the dot-arrayed surfaces with heights of 10 and $100\ \mu\text{m}$, and (c) those in case of polyester fabric and denim fabric with a fiber interval of 0.55 mm and 1.20 mm , respectively.

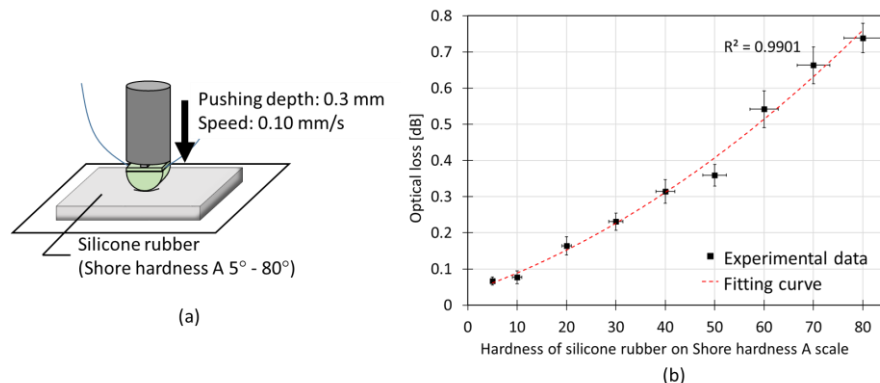


Fig. 4. (a) Experimental setup for the sensor pressing onto silicone rubbers with a hardness in the range from 5 to 80 in Shore hardness A scale, and (b) optical loss increments as a function of hardness of tested silicone rubbers.

から分かるように、光損失値は突起の上をなぞったときにピークが生じている。そのピーク値は、突起の高さ 10, 100 μm に対してそれぞれ平均 0.047 dB, 0.461 dB 程度であり、凹凸の高さに応じてピーク値が増加していることが確認された。Fig. 3(c) にセンサを異なる布の表面になぞらせたときの移動量に対する光損失変化を示す。Fig. 3(c) から分かるように、それぞれの布の繊維間隔 0.55 mm, 1.20 mm に応じて、それぞれ平均 0.56 mm, 1.21 mm の周期的な光損失変化が確認された。光損失応答に見られる周期性のばらつきは対象となる布の形状が崩れていたためである^[10]。

2.3 押込み動作による硬軟識別

物体の硬軟に対するセンサの識別性能を確かめるため、硬度の異なる 9 種類のシリコンゴムにセンサを押し込んだときの光損失変化を計測した。シリコンゴムはショア硬度 A5°- 80°で厚さ 3 mm のものを用意した。本実験において、Fig. 4(a) に示すように、センサはシリコンゴムに対し速度 0.10 mm/s で垂直に押下し、押込み量 0.30 mm での光損失値を計測した。Fig. 4(b) にシリコンゴムに対してセンサを押下した時に生じた光損失増加量を示す。Fig. 4(b) から分かるように、シリコンゴムの硬度が高くなるほど、一定の押込み量における反発力が大きくなることで光損失増加量が増大した。したがって、押込み時に得られる光損失増加量をもとに対象の硬軟を判別することは十分可能であるといえる。

押込み動作によって認識される物体の機械的性質は、押込みを加えた後に生じる応力緩和現象を分析することで更に詳細なものとなる。そこで、アクリル樹脂や鶏肉、ウレタン樹脂、粘土といった組成の異なる物体に対して押込み動作を行い、得られた応力緩和曲線を弾性要素と粘性要素を組み合わせた粘弾性モデルに照らして分析した^[10]。結果として、それぞれの組成に応じた粘弾性特性をすることができたため、本センサにより硬軟よりも詳細な機械的性質を識別可能であることが示唆された。

3. ヘテロコア光ファイバ式機械受容器による人工皮膚への触覚付与

3.1 ヘテロコア光ファイバ式機械受容器

前述したヘテロコア光ファイバ触覚センサは、質感に対する検出性能を示すことはできたが、素子の大きさや伝送路の配線が構造物への埋め込みを制限し、特に皮膚のような弾性素材への埋め込みには不向きであった。そこで、終端反射構造と組み合わせたヘテロコア光ファイバセンサを皮膚内部に分布する機械受容器とみなし、柔軟な構造物の変形量をもとに触覚情報を感知する光ファイバ式機械受容器を考案した。Fig. 5(a) に提案する機械受容器の構造を示す。この機械受容器は、ヘテロコア光ファイバセンサを伝送路部で切断し、切断面を垂直研磨した後断面に反射膜を被覆したものである。先端部はセラミック製のフェルールとエポキシ樹脂で補強され、先端部に加わる接触力がフェルール付け根のヘテロコア部に伝わりやすくしている。このような反射型の構造にすることで、これまでの伝送型光ファイバセンサのようにセンサ部付近で伝送路の配線方法を気にせず、またヘテロコア部周辺に曲げ機構を設けず接触力の検知が可能となったため、これまでより小型なセンサ素子が実現した。Fig. 5(b), (c) に機械受容器を指先状の柔軟物（以下、人工指と呼ぶ）に埋め込んだ例を示す。この人工指は、およそ人間の差し指の先と同形状であり、プラスチック製の爪部及び基礎部とシリコンゴム製の皮膚部で構成されている。人工指はプラスチック

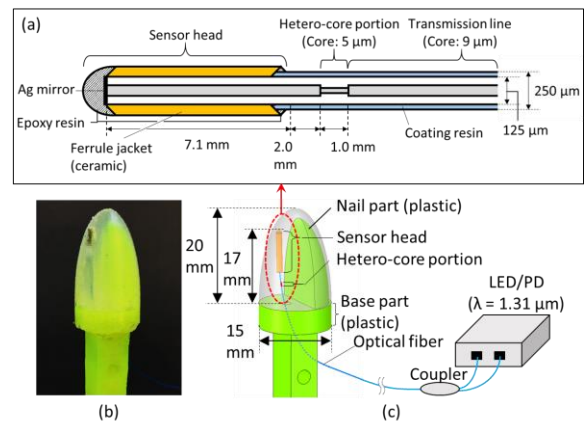


Fig. 5. (a) Schematic drawing of the hetero-core fiber optic mechanoreceptor, and (b) and (c) show the photo and the schematics of a finger-shaped end effector consisting of the proposed mechanoreceptor.

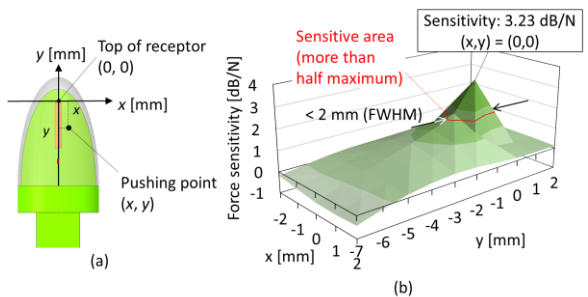


Fig. 6. Force sensitivity distribution of the finger-shaped end effector, which was pressed on the surface with a depth of 1.0 mm. (a) depicts geometrics of the end effector and (b) shows the force sensitivity distribution.

製の基礎部に機械受容器を挿入固定した後、指先の型にはめてシリコンゴムを成型して作製される。人工指内部の機械受容器は、物体の接触による皮膚部の機械変形に追従してヘテロコア部が曲がることで接触を感知する。ヘテロコア部の光損失変化は、光ファイバカプラを介して接続されたLED光源とフォトダイオードにより計測される。

3.2 接触力に対する応答の局所性

機械受容器による接触力の検出可能域を確かめるため、機械受容器を埋め込んだ人工指の表面に直径 1 mm の短針を深さ 1 mm まで押下し、押下した位置における光損失の変化率を計測した。本実験では、接触力に対する感度を計測するため、押下時に針が受ける接触力をフォースゲージで計測した。Fig. 6 に人工指表面における光損失値の増加率分布を示す。Fig. 6(b) から分かるように、機械受容器の感度は、機械受容器の先端部の位置に相当する $(x, y) = (0, 0)$ で 3.23 dB/N と最も高く、その点を中心として直径 2 mm 以上離れた位置では感度が半分以下に低下した。この結果から、柔軟体中に機械受容器を 2 mm 離して隣接すれば同様の分解能で接触位置を区別でき、人間の指先の空間分解能である 2 mm に相当する空間分解能をもつことが示唆された^[11]。

3.3 振動検出性能

機械受容器の振動に対する検出性能を評価するため、作製した人工指表面に正弦波振動を与えた際の光損失変化を計測した。Fig. 7(a) に示すように、人工指をオーディオスピーカーの振動板に接触させることで、人工指に振動を付与した。振動板は外部から正弦波の交流電圧信号を入力

することで正弦振動させた。入力信号の周波数は 50 Hz - 1 kHz までとした。本実験構成では、振動板の共振特性が人工指の接触状態によって変わるため振動板の振幅と位相を特定することは難しい。そこで入力信号と機械受容器の光損失応答をそれぞれ計測し周波数スペクトルを比較した。入力信号と機械受容器の光損失応答は、サンプリング周波数 4 kHz で同時に計測した。Fig. 7(b.1), (b.2), (b.3) に、入力信号の設定周波数 50 Hz, 100 Hz, 1 kHz の時の入力信号波形及び光損失応答をそれぞれ示す。それぞれの結果から分かるように、機械受容器の光損失値は位相遅れがあるものの入力信号波形に近い応答をした。入力信号の周波数 1 kHz において入力信号・光損失応答ともに波形が崩れているのは、サンプリング周波数が不足しているためである。Fig. 7(c.1), (c.2), (c.3) から分かるように、入力信号と光損失応答の周波数スペクトルを比較すると、それぞれ 49.2 Hz, 99.8 Hz, 987.2 Hz において共通の第一ピークが観測された。Fig. 7(c.1), (c.2) の光損失応答を見ると、第一ピーク以外に高調波成分が現れるが、これらは人工指に埋め込まれた機械受容器の非線形応答性によるものである。また Fig. 7(c.3) の光損失応答において、50 Hz 付近に入力信号には存在しないピークが現れるのは、LED 光源とフォトダイオードを含めた機械受容器の計測部で生じたリップル雑音が原因であると考えられる。しかし、いずれのノイズ要因も入力信号の主成分に当たる第一ピークに比べ非常に小さい。従って、50 Hz - 1 kHz の範囲において人工指が受ける振動を機械受容器が検出できることが判明した^[11]。人間の皮膚が感知できる振動は 1 kHz 以下とされているため、本機械受容器は人間が皮膚を通じて感じる周波数帯域の触覚情報に対して感受性をもつといえる。

4. 結論

本研究では、耐環境性と構造物への実装性に優れ、人工的な感覚神経としての実用可能性を秘めたヘテロコア光ファイバセンサを用い、構造物に人間の皮膚のような触知

覚を与える触覚センシングの実現性について、硬さや表面粗さといった質感情報に対するセンシング性能と構造物への実装実現性の観点で検証を行なった。まず伝送型ヘテロコア光ファイバセンサを用いた触覚センサ素子は、三点曲げ機構により、接触力に基づく硬さ、粗さといった質感情報に対して検出性能を有することが実験的に明らかになったが、構造物への埋め込みには不向きであった。そこでヘテロコア光ファイバに終端反射構造を組み合わせた光ファイバ式機械受容器を考案し、柔軟な構造物に埋め込むことで構造物の変形をもとに触覚情報を感知するという方法で、柔軟な構造物に触知覚を与えることに成功した。以上の結果をもって、ヘテロコア光ファイバセンサが様々な触覚情報に対して検出性能を有し、構造物を知覚化する光神経デバイスとしても有用であることが示された。

参考文献

- [1] 永野光 他, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.16, no.3, pp.343-353 (2011).
- [2] 下条誠 他, 触覚認識メカニズムと応用技術—触覚センサ・触覚ディスプレイ【増補版】, S&T 出版, pp.191-222 (2014).
- [3] L. Qin, et al., Sens. Actuators A, vol.264, pp.133-140 (2017).
- [4] H. Xie, et al., IEEE Sensors J., vol.14, issue 9, pp.3283-3291 (2014)
- [5] S. Raspopovic, et al., Sci. Transl. Med., vol.6, issue 222, pp.222ra19 (2014).
- [6] J. M. Romano, et al., IEEE Trans. Robot., vol.27, issue 6, pp.1067-1079 (2011).
- [7] R. S. Dahiya, et al., IEEE Trans. Robot., vol.26, no.1, pp.1-20 (2010).
- [8] K. Watanabe, et al., IEICE Trans. Electron., vol.E83-C, no.3, pp.309-314 (2000).
- [9] S. J. Lederman, et al., Cognitive Psychology, no.19, pp.342-368 (1987).
- [10] H. Yamazaki, et al., Sens. Actuators A, vol.247, pp.98-104 (2016).
- [11] H. Yamazaki, et al., IEEE Sensors J., vol.17, issue 16, pp.5123-5129 (2017).

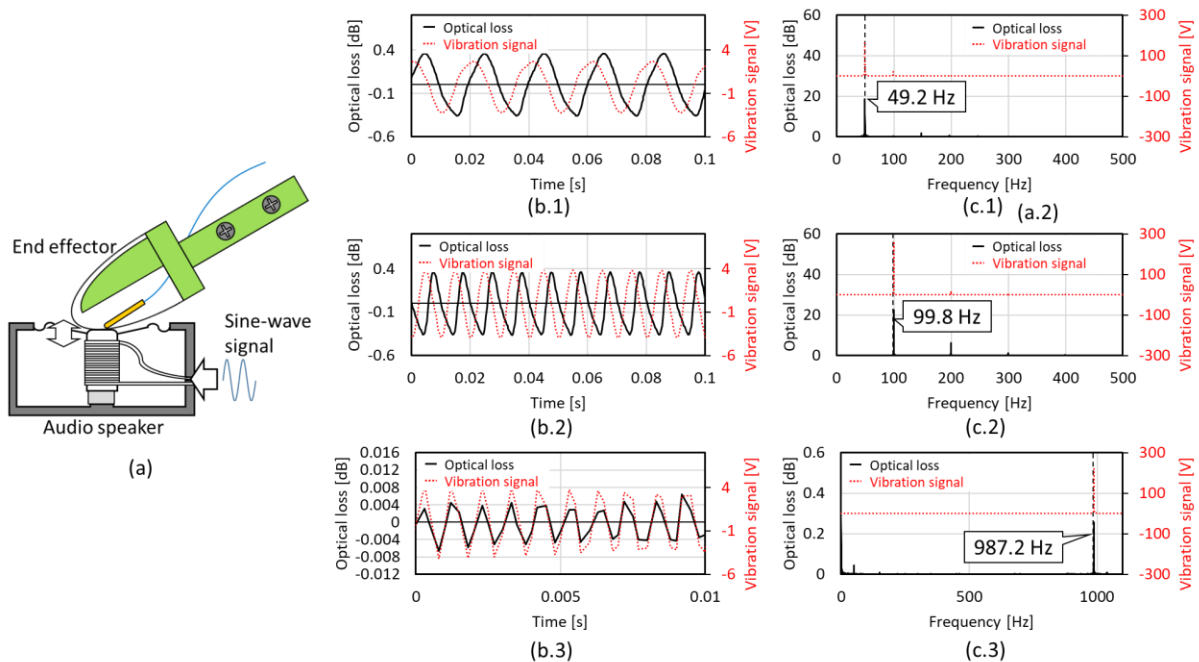


Fig. 7. Responses to vibration from 50 Hz to 1 kHz of the finger-shaped end effector. (a) illustrates the geometric relation between the end effector and audio speaker providing sine-cured vibration, (b.x) and (c.x) show time responses and frequency spectra of the optical losses and the set vibration signals when the audio speaker driven by set frequencies of 50 Hz (x=1), 100 Hz (x=2), and 1 kHz (x=3).