

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K02072

研究課題名（和文）FBGセンサを挿入した生体情報を計測可能な繊維製品の装着法の最適化

研究課題名（英文）Optimization of installing methods for textile products with inserted FBG sensors capable of measuring biological information

研究代表者

児山 祥平（Shouhei, Koyama）

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号：30777818

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光ファイバ型ひずみセンサで橈骨動脈のひずみを計測する最適な条件を検証した。その結果、脈動点から橈骨動脈の方向に $\pm 5\text{mm}$ 以内の場所に、 $10\sim 15\text{kPa}$ の圧力で設置すれば高S/N比の脈動ひずみ信号が計測可能であった。また、生体へのセンサ装着方法として、リボン布に光ファイバを周期 $50\text{mm}$ の波状に設置したリストバンドを開発し、これにより、手首が動作によりその周囲長が変化しても伸縮性のあるリストバンドが追従することでセンサが脈動点に設置され続けることが確認された。以上より、最適なセンサ設置位置およびセンサを装着できる繊維製品の開発が達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体情報を知るためには生体から発せられる信号を計測する必要があり、生体と常に付着する衣服は生体情報センサとして最も有効である。生体情報であるバイタルサインのうち脈拍数や血圧は循環器の情報であり、血糖値も重要なサインである。そこで、手首の脈動ひずみから循環器の情報を測定するためのセンサ開発として、最適なセンサ設置方法およびセンサを含む繊維製品の開発を進めた。本研究の結果、最適なセンサ設置条件が明確になりセンサを含む繊維製品化が開発されたことから、日々の生体情報を容易に計測することが可能となり、健康寿命延伸に貢献できることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Optimal installing conditions for measuring radial artery strain with an optical fiber type strain sensor were verified. The experimental results showed that when the sensor was installed within  $\pm 5\text{ mm}$  in the direction of the radial artery at from the pulsation point a pressure of  $10\text{--}15\text{ kPa}$ , a pulsation strain signal with a high signal-to-noise ratio was measured. As an installation method of the sensor to the body, a wristband was developed in which an optical fiber sensor was embedded on a ribbon fabric in the form of a wave with a period of  $50\text{ mm}$ . This wristband was elastic and could follow the movement of the wrist as it moved. Therefore, the sensor could be always installed at the pulsation point. From these results, the optimal sensor installation point and the development of a textile product to which the sensor can be installed have been achieved.

研究分野：家政学および生活科学関連

キーワード：スマートテキスタイル 生体情報 FBGセンサ 最適装着法

### 1. 研究開始当初の背景

我が国において、高齢者人口がピークに達し現役世代人口が急激に減少していく「2040年問題」が存在する。この対処法として、厚生労働省から全世代型社会保障の実現に向けて高齢者が社会で活躍できる「健康寿命延伸プラン」が提唱されている。近年ではマラソンなどの運動をする人や食事制限で健康に留意する人が多いが、総務省から発表された「世界各国における運動量や体に関するデータを本人にレポートするサービスの認知度の割合」では、我が国での認知度は50%を下回り、80%以上のアジア・欧米各国から比較すると極端に低い。すなわち、健康意識の高まりと生体情報を計測する手段の間にギャップがあると言え、これは脈拍数・血圧・血糖値などを同時かつ連続的に計測可能なウェアラブルセンサが存在しないことが原因である。

FBG センサを脈動点に設置して計測された信号から血圧や血糖値が算出可能と示されているが、FBG センサが挿入された繊維製品での計測や、手首の状態による脈動点の位置、脈動によるひずみが計測可能な範囲については検証されていない。そのため、FBG センサを挿入する繊維製品に必要な特性に加え最適な装着方法も不明である。これが明確になれば、繊維製品として自然な形で簡単に装着でき、連続的に生体情報を計測できるウェアラブルセンサの開発につながる。このセンサが実現すると「日々の運動・食事制限を実施」「血圧や血糖値などを連続的に計測し日中の推移を知る」「健康状態が良好になったことを知り次回の運動・食事制限への意欲の向上」のような健康志向を高める好循環を生みだし、「健康寿命延伸プラン」の達成につながる。

### 2. 研究の目的

手首の脈は心臓の収縮を生体表面で検知できる部分である。そのため、脈動をひずみとして検知することで心臓を中心とする循環器による脈拍数・血圧・血糖値を含む生体情報を計測できる。本研究では光ファイバ型のひずみセンサである Fiber Bragg Grating (FBG) センサを挿入した繊維製品の開発と共に手首の橈骨動脈の脈を打つ部分への最適な装着方法を明確にする。その際、手首の動きと橈骨動脈の脈動点の位置関係、FBG センサの最適な設置条件や繊維製品への導入方法を検証する。これらを明確にすることでカフレスでの血圧計測と非侵襲の血糖値計測を同時かつ連続的に実施可能な新たなスマートテキスタイルとして高血圧や糖尿病患者の苦痛を和らげ、国民の健康寿命を延伸させる貢献が可能である。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成させるため下記の4つの項目を検証する。

#### (1) 手首の状態による脈動点位置の3次元的な変位長の検証

手首は関節部分であるため、左右への曲げ・ひねり、手の平方向での曲げや反らしなど複数の動作状態に変化する。このとき、手首を伸ばした状態を基準として、各動作により脈動点の位置が3次元的にどの方向にどれくらい変位するかを明確にする。例として左右へ曲げた際に脈動点が左右に5mmずつ変化するならFBGセンサで検知可能な範囲を10mmに設定すれば全ての左右の曲げ状態で信号を計測可能となる。また、手首を反らした際に脈動点が生体表面側に変位するなら、FBGセンサとの距離が短くなるためより大きなひずみを検知可能となり、計測に最適な状態となる。

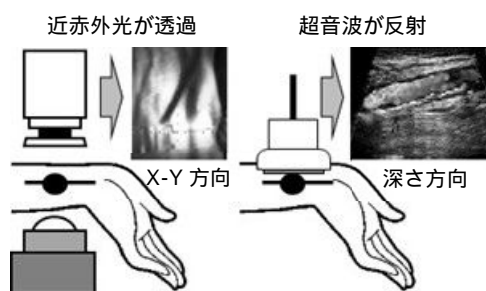


図1 脈動点位置検出画像(左:橈骨動脈可視化装置, 右:超音波断層画像計測装置)

このように、手首の動作状態による脈動点の変位を把握することで、生体に取り付けるFBGセンサの検知可能な長さおよび計測に最適な手首状態が明確になる。この実験では、手首内部のX-Y平面方向を橈骨動脈可視化装置で、Z方向(生体内部への方向、脈動点の深さ)は超音波断層画像計測装置を使用して脈動点の位置を計測する(図1)。

#### (2) FBG センサの生体への設置圧力と計測される信号の大きさの関係の検証

FBG センサを同一の点に装着しても設置圧力により計測される信号の振幅値が大きく変動する。そこで、最適な範囲内に設置されたFBGセンサで計測される信号と設置圧力との関係を検証する。設置圧力が高いと生体内部方向にFBGセンサが沈み込むため脈動点までの距離が短くなり信号の振幅値が大きくなるが、設置圧力が高すぎると動脈が押し潰され、脈動によるひずみを正確に計測できない。そこで、FBGセンサを繊維製品(面ファスナー固定型のリストバンド)の内部に挿入して手首に設置し、同時に脈動点に設置されるFBGセンサと異なる場所に別の圧力センサを設置する。面ファスナーによりリストバンドの巻き付け長を変化させると、FBGセンサにかかる設置圧力も変化する。ここで信号の振幅値が最も大きく計測されたときの圧力を最適な設置

圧力として明確にする。また、この状態でのリストバンドの巻き付け長と被験者の手首の周囲長の比を取り、各被験者の最適設置圧力と手首への巻き付け割合を検証し、簡単に最適な状態で設置可能な指標を明確にする。

### (3) . 各手首状態における脈動のひずみを検知可能な範囲の検証

FBG センサはひずみセンサであるため、計測信号の振幅が最大となる点が理想的な計測点となる。しかし、通常の計測において理想的な計測点を特定することは技術を要するため、簡単に計測可能な範囲を明確にする必要がある。そこで、脈動のひずみを複数の FBG センサを橈骨動脈方向と平行および交差方向に数 mm 間隔で配置 (図 2) して、各手首状態で脈動のひずみを全ての FBG センサで同時に計測する。脈動点の中心部で計測された信号を基準として全計測信号を検証して、中心部からの距離により信号内の振幅値の大きさがどの程度減少するかを検証する。ここで、FBG センサの配置間隔の条件や手首状態を変更することで、各手首状態において「脈動点の中心部の 50% の振幅値を計測可能な範囲は脈動点から mm 以内」という範囲を把握して、FBG センサの最適な設置範囲を明確にする。

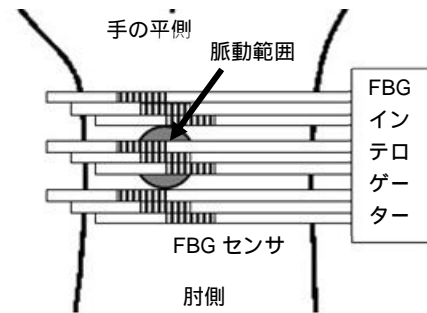


図.2 FBG センサの多点同時計測 (3×3 の場合)

### (4) . FBG センサを挿入する繊維製品に求められる伸縮特性の検証

FBG センサが挿入された繊維製品の伸縮特性について、伸縮性が高い編物は手首にフィットし手首と編物間のずれは少ない反面、編物の伸縮により FBG センサが編物内部で光ファイバの軸方向にずれることがある。一方、伸縮性が低い織物では、織物内部で FBG センサがずれない反面、手首が動作することで織物と手首間でずれることがある。よって、最適な条件で繊維製品を手首に取り付けた状態で、手首を左右への曲げ・ひねり・手の平方向への曲げ反らしを数十回実施し、初期状態で計測された FBG センサの信号から振幅値がどの程度減少したかにより、脈動点と FBG センサのずれの影響を検証する。繊維製品として編物ではたて編地の編成方向と平行な方向に FBG センサを挿入し、織物では緯糸として挿入する。繊維製品となる編物や織物は自作可能であるため伸縮特性を自在に変更させて実験を行い、最適な伸縮特性を明確にする。最適な特性の繊維製品でセンサ装着部を作製し、これを使用して被験者の脈動ひずみ信号を計測し生体情報の算出精度を検証する。

## 4 . 研究成果

### (1) . 手首の状態による脈動点位置の 3 次元的な変位長の検証結果<sup>[1]</sup>

手首を曲げるまたは後方に反ることにより手首の角度を 30 度ずつ変化させた状態で、橈骨動脈可視化装置により X-Y 方向への脈動点の移動距離、超音波断層画像計測により生体表面から橈骨動脈までの距離 (深さ方向) の変化を計測した。その結果、X-Y 方向については手首をどのように変化させても脈動点の位置が変化することはほぼ無かった。一方、脈動点の深さ方向については後方に反る角度が大きくなるほど橈骨動脈が生体表面に近づくことが確認され、90 度後方に反る形状が最も生体表面に近づいた。これらの各手首角度の状態での脈動ひずみを FBG センサで計測したところ、後方に反る角度が大きくなるほど上向きで大きなピークが計測された。つまり、脈動ひずみをより大きなひずみとして計測していることが認められ、高感度で計測できることが示された。

### (2) . FBG センサの生体への設置圧力と計測される信号の大きさの関係の検証結果<sup>[1]</sup>

FBG センサを被験者の橈骨動脈点に設置するとともに、FBG センサと干渉しない隣の部分に小型圧力センサを設置した。両センサを手首に押し付けるように他方の手の指で押し込むことで FBG センサの設置圧力をかけながら脈動ひずみ信号を計測した。このとき、設置圧力が小さい場合には脈動ひずみ信号のピークが縦軸方向において + 側 (上向き) の信号が計測され、圧力が大きくなるにつれて信号ピークが長くなることが示された。しかし、さらに圧力を大きくすると信号ピーク長さが減少して消失してしまい、その後は縦軸方向において - 側 (下向き) の信号が計測された。以上より、FBG センサの設置圧力によって計測される信号形状が大きく影響することが示された。

この原因として、脈動時にかかるひずみの大きさと信号のベースラインとなる設置圧力の関係が考察された。上向きの信号とはベースラインよりも脈動時にかかるピーク点が多いことを示し、言い換えると設置圧力よりも脈動時にかかるひずみが大きいこととなる。一方、設置圧力が大きい場合には設置している時点で FBG センサがひずんだ状態となるためにベースラインが上昇し、設置圧力が大きいことで動脈が生体内部方向に沈められるため脈動ひずみの大きさ自体も小さくなる。以上より、FBG センサを設置するには最適な圧力値が存在することが明らかとなった。

この最適設置圧力値を調査するために、同様の実験において設置圧力を 0, 5, 10, 15, 20 kPa の 5 条件で 6 名の被験者について検証した。その結果、10 - 15 kPa で最もピーク長さが長くなる信号計測される傾向が示された。これは、収縮期血圧値に近い結果であり、最適設置圧力値は

収縮期血圧と関係していると考察された。

### (3) . 各手首状態における脈動のひずみを検知可能な範囲の検証結果<sup>[2]</sup>

橈骨動脈の脈動ひずみが計測可能な範囲を検証するため、6つのFBGセンサを5mm間隔で2×3の長方形となるような位置に配置した。6つのFBGセンサは気泡緩衝材に圧力計と共に設置され、手首を気泡緩衝材に乗せた際に全てのFBGセンサに同一の圧力がかかるようにした。このとき、手首の設置圧力は(2)で判明した10～15kPaとした。

6つのFBGセンサで橈骨動脈の脈動ひずみが同時計測された。なお、計測時間は60秒間として被験者8名で30回ずつ計測した。60秒間の信号波形に出現する脈動に対応したトップピークとボトムピークの長さの平均が算出され、6点のFBGセンサの位置から2×3の平均脈動ひずみ値が求められた。この値で最も大きい値を示した場所を脈動ひずみ点として基準測定点に設定した。2×3の各平均脈動ひずみ値は基準点を1として正規化された。6つのFBGセンサで30回の計測された信号では基準点となる位置が異なったため、基準点を中央部に配置した3×5のマトリックスで解析された。基準点を中央部に設置して30回の測定結果をそれぞれ3×5のマトリックスに当てはめ、各測定点での脈動ひずみ測定可能回数等が検証された。

その結果、脈動点から±5mmずつ腕方向に離れた点では脈動点に近い信号が計測された。これらの測定点は橈骨動脈が存在する方向であり、脈動ひずみ信号が計測されやすいことが判明した。一方、手首の周囲長方向に脈動点から±5mm離れた点では小さい信号ではあるが脈動ひずみ信号が計測できた。FBGセンサの長さが10mmであったため、センサの端面が脈動点上に存在することが考察された。そのほかの測定点では脈動ひずみ信号の計測が困難であることも示された。よって、脈動ひずみ信号は橈骨動脈上に脈動点から±5mmの範囲でFBGセンサを設置すれば計測できることが示された。

### (4) . FBGセンサを挿入する繊維製品に求められる伸縮特性の検証結果<sup>[3]</sup>

橈骨動脈の脈動ひずみは心臓の拍動が動脈を伝搬してきたものであり、循環器の生体情報を含んでいる。しかし、手首は関節でありその関節が動くと周囲長が変化する。周囲長が変化してもFBGセンサが脈動点に設置し続けるためには、FBGセンサが埋め込まれた繊維製品にはその周囲長変化に対応できる伸縮性が求められる。繊維製品には伸縮性が存在するが、光ファイバは伸縮性が皆無である。そこで、光ファイバを波の形状で繊維製品へ挿入することを考案した。波の周期が短いほど伸縮性が高くなる一方で、光ファイバを通過できる光量が少なくなる(光損失が大きい)。そこで、最適な波の周期長とサイクル回数を検証した。その結果、周期長30mm未満の場合は光損失が大きく、脈波信号が計測できなかったが、周期長30mm以上では脈動ひずみ信号の計測が可能であった。その中で、光ファイバをまっすぐな状態で計測された信号とほぼ同等の信号が計測されたのは周期長50mm以上の場合であった。周期長70mm以上でも脈動ひずみ信号は計測されたが、繊維製品の伸びは周期長50mmの方が長かった。周期長50mmかつサイクル回数4回で、手首の周囲長約200mmに対応した伸縮性があり橈骨動脈ひずみを計測できる繊維製品が開発された。

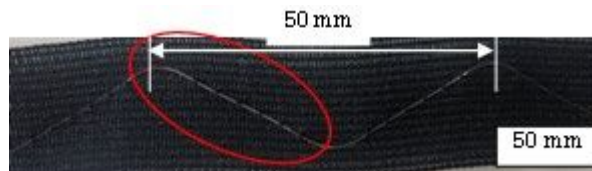


図.3 周期長50mmでFBGセンサが挿入されたリストバンド

- [1] Shouhei Koyama, Tatsuya Yoda, Influence of wrist dorsiflexion angle on the measurement signal of radial artery strain with FBG sensor, CLEO-PR 2022/ISOM'22/ODF'22, CThP17E-04, Sapporo, Japan, 2022.
- [2] Shouhei Koyama, Tatsuya Yoda, Masashi Yamamoto, Soushi Shiokawa, Kaito Kane, Michal Martinka, Verification of Optimal Installation Point of FBG Sensor for Pulsation Strain Measurement, IEEE Sensors Journal, vol.23, Issue.16, pp. 18183 - 18192, 2023.
- [3] Shouhei KOYAMA, Yuya OHNO, Yuki HASEDA, Yuuki SATOU, Hiroaki ISHIZAWA, Verification of embedding conditions for FBG sensor into textile product for the development of wearable healthcare sensor, Technology and Healthcare, Vol.30, No.4, pp. 787-798, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koyama Shouhei, Ohno Yuya, Haseda Yuki, Satou Yuuki, Ishizawa Hiroaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Verification of embedding conditions for FBG sensor into textile product for the development of wearable healthcare sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Technology and Health Care	6. 最初と最後の頁 787 ~ 798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/THC-202800	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koyama Shouhei, Yoda Tatsuya, Yamamoto Masashi, Shiokawa Soushi, Kane Kaito, Martinka Michal	4. 巻 23
2. 論文標題 Verification of Optimal Installation Point of FBG Sensor for Pulsation Strain Measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 18183 ~ 18192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2023.3289966	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tatsuya Yoda, Shouhei Koyama
2. 発表標題 Verification of radial artery strain detection area using by FBG sensor
3. 学会等名 Asian Textile Conference 16 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shouhei Koyama, Tatsuya Yoda
2. 発表標題 Influence of wrist dorsiflexion angle on the measurement signal of radial artery strain with FBG sensor
3. 学会等名 CLEO-PR 2022/ISOM'22/ODF'22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺平大亮, 矢野郁也, 兎山祥平
2. 発表標題 手首加圧力の均一化にむけた補助材の圧縮特性の検証
3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部シンポジウム&若手研究発表会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 依田達哉, 兎山祥平, 古田みいこ
2. 発表標題 光ファイバ型ひずみセンサの設置条件による計測信号波形への影響
3. 学会等名 2021年度繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関