

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K15570

研究課題名(和文) 磁気インピーダンスセンサを応用した高精度の生体振動評価装置の構築

研究課題名(英文) Construction of highly sensitive evaluation device of mechanical vibration in a living body using magneto-impedance sensor

研究代表者

中村 のぞみ (Nakamura, Nozomi)

名古屋大学・医学部附属病院・助教

研究者番号：30444409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁気インピーダンス(MI)センサは、微弱な生体振動をナノテスラレベルの磁界変動として検出できた。3軸MIセンサと3軸加速度センサを組み合わせることにより、地磁気や加速度の偏位から、リアルタイムに生体の位置や姿勢の数値化が可能となった。  
また、サーボモータの動きをマイコンのArduinoで制御し、尺骨神経刺激による母指内転筋の回転運動を模倣できる回転運動試験機を開発した。この試験機に3軸MIセンサなどを統合したモーションセンサを搭載し、生体振動を客観的に評価できる生体振動評価装置を構築した。この装置を用いることにより、母指内転筋運動の理論的な解析など、新たな用途が拓かれた。

研究成果の概要(英文)：A magneto-impedance (MI) sensor was capable to detect faint mechanical vibration in a living body as magnetic field fluctuation at the nanoscale level. Combination of a triaxial MI sensor with a triaxial acceleration sensor enabled to determine the position and posture of a living body in real time from the deviation of the geomagnetism and acceleration. We also developed a rotary motion testing machine, which consisted of a servomotor and its microcontroller system, Arduino, and could imitate the rotational motion of adductor pollicis muscles. A motion sensor integrating a triaxial magnetic sensor and a magnetic sensor was attached to this testing machine. Thereby, an evaluation device of vibration in a living body was constructed. By using this device, new applications such as the theoretical analysis of adductor pollicis muscle movements, have been developed.

研究分野：麻酔学

キーワード：磁気センサ 磁気インピーダンスセンサ 微細振動 生体振動 生体振動評価装置 Arduino  
サーボモータ モーションセンサ

## 1. 研究開始当初の背景

臨床麻酔では、気管挿管や術野の不動化のため十分な筋弛緩を得る必要があり、術後には呼吸筋などの収縮能力が完全に回復されている必要がある。そのため、筋弛緩を正確に把握することが望まれる。この目的で、尺骨神経への刺激による母指内転筋収縮の4連反応比(TOF)などを、加速度センサにより簡単に測定できる筋弛緩モニターが用いられている。しかしながら、TOF比0.9以上の「筋弛緩の十分な回復」を診断する上では信頼できないという欠点が指摘されるなど問題点もあり、その改善が要望されていた。

一方、生体磁気計測は、1960年代にジョセフソン効果・超伝導量子干渉素子(SQUID)を利用した生体磁気計測機器が製作されて以来、超伝導でのみ計測されると言われる。しかし、このSQUID測機器の中心部は超低温を要求し、生体活動が行われる温度環境とは決定的な隔りがある。このため生体磁界計測装置の小型化や簡易化が、容易には進展しない。そこで我々は、常温で作動する磁気センサを高感度化し心磁図の計測を行ってきた。

この磁気センサこそ、日本(名古屋大学)発の技術である磁気インピーダンス(MI: Magneto impedance)効果を利用したMIセンサである。このMIセンサと磁性体や磁石を利用すれば、筋弛緩モニターのみに留まらず、より広範な生体振動を計測し評価する装置の開発が可能となる背景が揃っていた。

## 2. 研究の目的

麻酔時の筋弛緩度の評価には、神経刺激による指振動を加速度センサを用いて計測している。この方法は簡便ではあるが、指振動に対しての感度が高くなく、また複雑な振動・反射や微妙な動きを精度良く検出することは難しい。

本研究では、携帯電話磁気コンパスとしても使用される常温作動パルス励起型MIセン

サを応用し、筋弛緩モニターの性能の向上を目指すとともに、生体に固定した小磁石の動きを電気刺激後に連続的に計測し、神経筋反応の機能を評価するための高精度な生体振動評価装置を開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

まず、MIセンサ技術を導入し、共同研究企業製の単一チャンネル、または2チャンネル差動型の磁界センサ計測システムを構築することを目指した。健常被験者の指にサマコバ磁石を固定し尺骨神経を刺激したり、フェライト磁石を顔面に貼付し顔面神経を刺激することにより、母指内転筋や眼輪筋の収縮振動の検証試験を行った。また、呼吸運動モニターとしての利用を探索するため、腹部にMIセンサを固定し振動磁界を計測した。

当初検討した1軸MIセンサや2個の1軸MIセンサで構成された2軸MIセンサよりも、3軸MIセンサや、加速度センサや角速度センサ(ジャイロセンサ)と統合したモーションセンサの方が、高精度な生体振動評価装置の検出素子センサとして有用性が高いと判断されたので、途中からこれらを用いて本格的検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 1軸MIセンサの検討

最初にMIセンサによる独自の1軸差動型磁界計測システムを構築した。このシステムにより、生体の振動(運動)の方向が一定である場合には、ナノテスラレベルの磁界変動を計測することができ、自発呼吸と努力呼吸を識別することができた。また、フェライト磁石を顔面に貼付することにより、顔面神経刺激による眼輪筋の微動を計測する磁石磁場方式のアルゴリズムを開発した。

一方、筋弛緩モニターが対象とする尺骨神経刺激による母指内転筋収縮の場合には、MIセンサは従来の検出素子である加速度セン

サと比較し、母指の微動検出に関して、感度、検出限界の点で優位性を有していた。そこで、母指装着 MI センサによる、環境磁場方式の母指微動検出アルゴリズムを開発した。

しかしながら、本質的に3次元的な運動である母指内転筋収縮の場合には、1軸 MI センサの1次元システムや、2個の1軸 MI センサによる2次元システムでは、正確な計測が困難であることは判明した。その他の生体振動についても同様であった。

## (2) 3軸 MI センサの検討

そこで、ハード・ソフトのオープンな統合開発環境であるマイクロコントローラの Arduino を用いて、入手可能な3軸 MI センサの性能を検証した。

図1はパルス電流 30mA、パルス幅 200  $\mu$ s、パルス間隔 500ms の4連電気刺激による母指内転筋収縮時の磁気変化を、3軸 MI センサで計測した実験の概要図である。微小な回転であったが、ローパスフィルター処理を行うと、Y軸とZ軸成分では明瞭な4連ピークが観察され、最小のX軸成分でもはっきりと4連ピークが認められた(図2)。

このように明瞭に母指内転筋収縮に伴う磁気変化が追従できた。しかし、磁気データのみでは、余程条件を限定しない限り位置・姿勢(基準からの距離あるいは角度)情報を取得することはできなかった。すなわち、位置・姿勢情報の取得には、磁気データに加え重力方向のデータが必要であった。これが、3軸磁気センサと3軸加速度センサ、更には3軸角速度センサが統合されたモーションセンサが登場した理由である。

そこで3軸 MI センサと3加速度センサ及び3軸角速度センサを一つのモジュールに組み込んだモーションセンサ(図3中の赤い円盤状センサ)を用いて実験を行った。

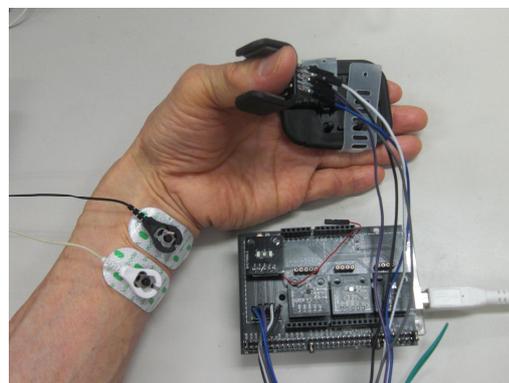


図1 電気刺激による4連母指内転筋収縮の計測

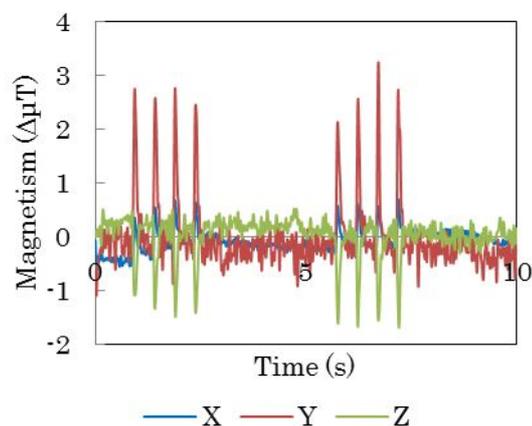


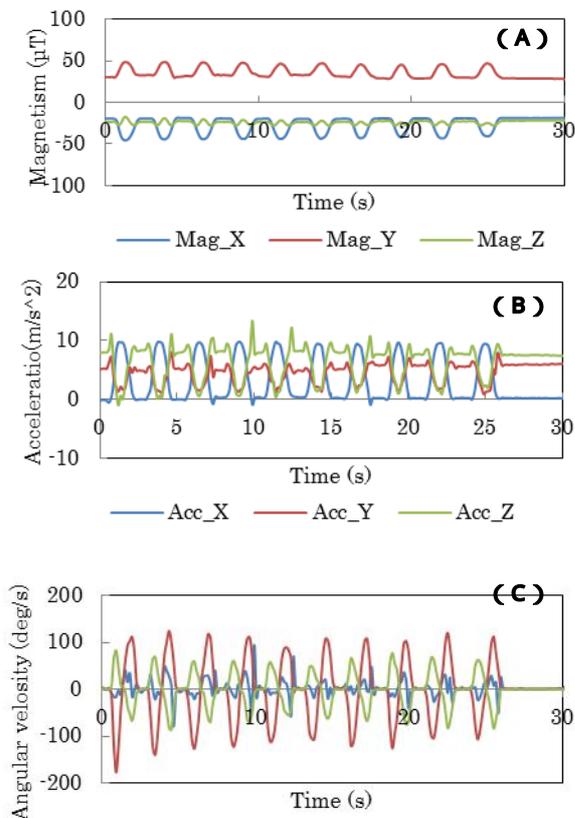
図2 4連母指内転筋収縮時の磁気変化

モーションセンサを左腕手首に装着して随意屈伸運動を行い、3軸方向の磁気、加速度、角速度を計測し、その結果を Android 端末に表示した実験の概要図が図3である。いずれの3軸成分も運動に伴う明瞭な変動を捉えることができた(図4)。それぞれのデータは、目的に応じたアルゴリズムを適用すれば、運動を評価することができる。

以上の結果より、3軸 MI センサは3軸加速度センサと組み合わせることにより、小型であるだけでなく、方位、傾きや動きを同時に検出でき、体動による地磁気や加速度の偏位から、リアルタイムに姿勢の数値化が可能であり、体表面に直接接触させる必要がなく、携帯性にも優れており、高精度生体振動評価装置用のセンサとして有用性が高いことが判明した。



**図3 モーションセンサによる左腕随意屈伸運動の計測**



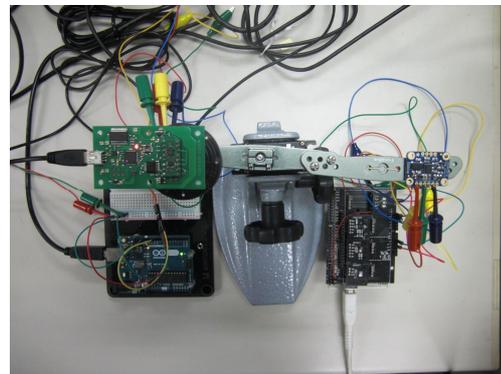
**図4 磁気 (A)、 加速度(B)、 角速度(C)の変化**

(3) 生体振動評価装置の構築

3軸 MI センサあるいはモーションセンサを用いれば、生体振動を計測することができる。しかし、計測値を解析し、生体振動を評価するアルゴリズムを開発するためには、様々な条件下で繰り返し実験を行い計測データを収集する必要がある。しかし、繰り返し実験はたとえ被験者が健常者であっても

容易ではなく、再現性も保証されない。従って、被験者を代替して、尺骨神経刺激による母指内転筋収縮のような運動を模倣できる回転運動試験機があれば有用である。

そこで、サーボモータの動きをArduinoで制御する回転運動試験機を開発した。この試験機に3軸 MI センサあるいはモーションセンサを搭載し、生体振動を評価する生体振動評価装置(図5)を構築した。これにより、母指内転筋収縮のような神経筋反応を、被験者を代替して各種の条件で反復試験し、理論的に解析することが可能となった。



**図5 生体振動評価装置の外観**

(4) モーションセンサの展開

(2) で取り上げた3軸 MI センサ、3加速度センサ、3軸角速度センサを組み込んだモーションセンサは、磁気、加速度、角速度の3軸成分のデータを出力するが、位置・姿勢データそのものではない。位置・姿勢のデータは得るためには、例えば角度データへの変換の演算が必要であった。

ところで、並進(直線)運動の強度の指標が力であるのに対し、母指内転筋収縮のような回転運動の強度の指標はトルク(力のモーメント)である。そして、トルクと比例関係を示す物理量は角加速度である。従って、モーションセンサの出力データを回転運動の評価指標として利用するためには、角度データに変換するだけでは不十分で、時間で1次微分して角速度に、更に2次微分して角加

速度に変換する必要がある。演算過程が増えれば増える程、データ処理速度が遅くなるだけでなく、誤差が加わり精度が低下することは避けられない。

本研究ではMI センサを中心に実験を行い、検討を加えてきた。しかし、モーションセンサには、時間の1次微分で角加速度を与える角速度を計測する角速度センサも含まれている。そして、磁気や加速度にはそれぞれ、地磁気や重力加速度といった環境成分が存在するのに対し、角速度のベースはゼロであるため、**図4**が示すように、角速度センサのSN比は、磁気センサや加速度センサのSN比に比較して良好であった。すなわち、回転運動に伴う変動を計測する上で優位性がある。以上の2点から、回転運動の評価には角速度センサのデータを利用する方が、適切かつ有効であることが示唆された。

なお、モーションセンサの進歩は著しく、今回実験に使用したものでは、各3軸センサチップがモジュール上に個別に搭載されていた。一方、現在主流のモーションセンサでは、3軸のホール素子磁気センサ、加速度センサ、角速度センサが1チップに統合されている。そして、角度変換演算回路を搭載したモジュールを使用した実験では、ロール・ピッチ・ヨー角といった角度データが瞬時に算出され、生体のモーションをリアルタイムでディスプレイ上に表示することが可能であった。これらは、新たな用途を拓くツールとして大いに期待できる。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中村 のぞみ (NAKAMURA, Nozomi)  
名古屋大学・医学部附属病院・助教  
研究者番号：30444409

### (2)研究分担者