

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K08921

研究課題名（和文）モーションセンサからの位置情報を利用する神経筋反応評価アルゴリズムの開発

研究課題名（英文）Development of neuromuscular response evaluation algorithm using position information from motion sensors

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） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：手術中における筋弛緩のモニタリングや、神経筋反応の状況を的確に把握することは、周術期における患者の安全管理において極めて重要である。1軸の磁気センサ（有線）を母指先端近くに装着し、尺骨神経刺激時の運動をモニタする方法を考案して予備研究を行った。本研究ではこの発明考案に基づく試作器を使用して、手術中の麻酔深度評価だけでなく、人体の関節運動の最大検出条件や多数の計測を比較するための標準化法を探索した。また複数の及び複数軸の磁気センサに必要な計測器としての仕様や、計測された磁気信号の解析方法についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

患者の周術期における安全管理のためには、その個別状況に応じ患者の神経筋反射を正確に評価することが非常に有益である。例えば、手術中では筋弛緩薬の追加投与や気管チューブ抜管のタイミングの決定などに、また手術後では脳神経障害合併症の予知のための情報となる。そこで、地磁気を検知する小型のモーションセンサを脳波や筋電図などと併用しこの目的のために利用できれば、安全性を高める新たな医療機器となる。さらに運動性評価アルゴリズムを個別の状況に応じて作成できれば、周術期関係だけでなく、日常のリハビリや介護などの機器としても広い応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：Monitoring muscle relaxation and accurately understanding the state of neuromuscular response during surgery are critically important for ensuring patient safety during the perioperative period. We conducted a preliminary study by devising a method that involves attaching a single-axis magneto sensor (wired) near the tip of the thumb to monitor movement during ulnar nerve stimulation. In this study, using a prototype device based on this invention, we explored not only the evaluation of anesthesia depth during surgery but also the standardization methods for comparing the maximum detection conditions of joint movements and multiple measurements of the human body. Additionally, we examined the specifications required for measuring devices utilizing multiple and multi-axis magneto sensors, as well as the methods for analyzing the measured magneto signals.

研究分野：麻酔

キーワード：モーションセンサ 磁気センサ 加速度センサ 神経筋反応 筋弛緩モニター

1. 研究開始当初の背景

患者の周術期における安全管理のためには、それぞれの状況に応じて、患者の神経筋反応を正確に評価することが非常に有益である。例えば手術中の麻酔では、安全に手術を実施する上で、神経筋反応による筋弛緩状態の正確な把握は、筋弛緩薬投与とその追加投与、また気管の挿管・抜管のタイミングを決定するためにも重要な情報である。

術後には術後合併症の予防が必要であるが、術後合併症の中には、脳神経機能の障害から運動系機能の異常として顕在化するものが含まれる。従って、神経筋反応の集合である体動の微妙な変化からその兆候が予知できれば、早期の対策を講じることが可能となり、術後の良好な経過へと繋がる。

これらの観点から、神経筋反応を正確に評価できる装置や方法は、患者の周術期管理にとって貴重である。筋弛緩モニターは既に臨床で繁用されている一例である。しかし、測定の数分近くの場合に測定不能であったり、母指内転筋収縮の四連反応(Train of four)の比(TOF比)が0.9以下では、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ており、その改善が強く要望されている。また、脳神経機能の異変による運動機能障害の診断、予知、予防に向けた研究は、周術期のみ限定されることなく、大型検査機器などを駆使して、医療全般で精力的に取り組まれている。

一方、最新のMEMS技術により製造される3軸地磁気センサと3軸加速度センサから構成される小型のモーションセンサは、方位だけでなく傾きや動きをリアルタイムに検出することができる。あらかじめ固定カメラを設置する光学的モーション・キャプチャー方式に勝る利点があるため、電子コンパスとしてカーナビゲーションなどに広く利用されている。そこで、携帯性に優れウェアラブルなモーションセンサを活用し、脳波や筋電図で生理的機能状態を確認しながら、上述の問題点を解決したり、神経筋反応の異変を検知する原理となるアルゴリズムが開発できれば、学術的にも臨床的にも利用価値が高い。

2. 研究の目的

一個のモーションセンサを使えば、人体の特定部位の動きの位置情報が得られ、複数個使用すれば、複数点から構成される人体の運動に関する位置情報が得られる。筋弛緩モニタリングにおける尺骨神経刺激時の母指内転筋収縮は前者の、脳神経機能異常の検出のための四肢運動機能評価は後者の、典型的な適用例である。そこで初年度は、一個つの1軸モーションセンサ仕様の磁気センサ出力の情報から、電気刺激時の母指内転筋収縮の強度を客観的に評価するアルゴリズムを開発する。そして次年度と第3年度は、高度な運動機能評価への応用を図る。異常な神経筋反応の検出を念頭に、複数のモーションセンサから得られる位置情報を想定し、神経筋反応の顕在化である人体の運動を、客観的に評価する方法を検討する。これまでのモーションセンサの利用は、乗り物の分野が多く、人体に関してはスポーツやリハビリテーション分野に限定されてきた。そこで、神経筋反応評価への本機器の展開は大きな意義がある。

筋弛緩モニタリングには、操作性に優れた加速度感知型筋弛緩モニター(AMG)が繁用されている。しかし、AMGは検出素子に1軸加速度センサを用いているため、重

力の影響を受けないように、計測対象の母指が正確に水平方向に動くように保持したり、母指の初動位置が、患者の体位によって偏位しないようにする必要がある。モーションセンサを構成する3軸磁気センサを母指内転筋収縮の評価へ適用できれば、感度と精度が向上するだけでなく、1軸加速度センサを素子とする現行AMGに比べ、位置の制約を受けないという機器使用上の利点があり、優れた筋弛緩モニターの実現が期待される。そこで本研究では、1軸の磁気センサで構成されるモーションセンサの特性を詳しく把握し、将来の3軸磁気センサ仕様での筋弛緩モニター製作のために必要な基盤的情報を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

TOF モニターを想定し、電気刺激を与えながら関節運動（回転する母指運動）を評価する装置を、1軸の磁気センサを使用し製作した（図1）。この装置は電気刺激回路を内蔵し、さらに地磁気を計測可能な1軸小型磁気センサで構成されている。電気刺激回路としては、単一刺激を50-200 Hz 範囲で連続に印加できるので、テタヌス刺激や麻酔評価のための Train of Four (TOF) 相当の刺激が可能である。この機器の磁気信号は、以下の入出力関係で動作する。

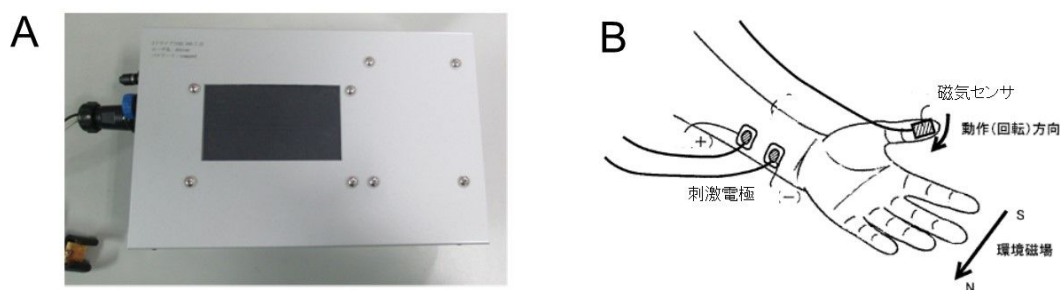


図1. (A) TOF モニタを想定し、1軸磁気センサを使用して試作した電気刺激用の回転運動計測装置。(B) 被検者への取り付け計測例。尺骨神経部に設置された刺激電極 (+、-) と母指部に設置された地磁気を感度良く検出できる小型磁気センサ。

出力 (Z) から母指の運動する程度を評価するとき、関節の回転角度 Y (rad) と母指の回転面と環境磁場とがなす角度を X (rad) であるとき、これらパラメータの関係は、

$$Z = 2.8 \times \cos X \times \cos Y$$

と表される。

また、 $\theta = 0$ 、則ち使用する磁気センサの向きと、環境磁界の向きとが平行の場合の磁気センサ出力を F とすると、

$$Z = F \times \cos \theta,$$

$$\theta = \arccos(Z / F)$$

の関係がある。

センサ取付部が回転前、すなわち $Y = 0$ のときの磁気センサ出力 が $Z = Z_0$ の時、

$$Y = \arccos(Z / Z_0)$$

となる。この関係を用いて、磁気センサの出力を回転角度 Y に時系列的に変換する。Y = 0 の時の磁気センサ出力 Z_0 は、事前にキャリブレーションを行うことにより値を決定しておく。

図の機器は PC と USB ケーブルで繋ぎ、機器の磁気計測データは Tera Term で読み取ることができる。TOF モードも搭載しており、電気刺激時の磁気センサ出力のピーク値をモニター上に表示する。

4 . 研究成果

麻酔時の母指の初期位置のずれは、母指の回転運動方向には起こり難く、実際には手首回転方向であった。そこで、研究方法に記載した環境磁界と磁気センサの出力関係について検討した。 D (μT) を地磁気を主体とする (麻酔時などの) 磁気センサ計測場の環境磁場の強度、 X (rad) を母指の回転面と環境磁場とがなす角度、 Y (rad) を手首の回転面上での軸からの方位角とする。さらに β (rad) を手首の回転角と母指の回転軌道面とのなす角度とし、ハンドアダプターで固定されている特性から一定値に維持できるので、磁気センサの出力 Z (μT) は、

$$Z = D \times \cos \beta \times \cos X \times \cos Y \quad (1)$$

の関係で表すことができた。

仰角 X が一定の条件下で感度補正を行う為には、初期位置を定める必要があったので、センサ出力値 Z を環境磁場強度 D で除した相対磁場強度 W 初期位置 (初期の方位角) の指標として用いることを考案した。

$$W = Z / D \quad (2)$$

であり、またこれらの関係から、

$$W = \cos \beta \times \cos X \times \cos Y \quad (3)$$

として磁気計測器出力を表すことができた。

磁気センサの出力 Z を最大にするために、手首の回転面上での軸からの方位角 Y (rad) の最適角度を考察するために、(1)式について Y での偏微分式を考えた。その式では $\cos X = 1$ と $\cos Y = 1$ の条件が最大値である。この条件を満たす時、いろいろなデータ (異なる個体や、同一個体でも異なる計測シリーズ) を比較するためには、標準化係数 (K) を導入する必要があることが分かった。標準化係数 (K) は、

$$K = \cos \beta / \{(Z_{\max} / D)^2 - W^2\} \quad (4)$$

として表すことができた。 Z_{\max} は、手首を回転面内で移動させたときの Z の最大値である。この標準化係数の導入は、今回使用した計測システムの設計時に想定した機器内部でのデータ処理法とも互換性があった。このように、本研究を通じ1軸磁気センサをTOFモニタなどの生体の回転運動の評価に利用する場合、磁気センサ出力を最大活用するための細かな条件が明らかとなってきた。

また、本機器に搭載されたTOFモードでは、ベースラインとピーク値を数値比較してピーク検出するので、刺激以外で少しの体動が検出されても加速度計算に無視できない程度の影響を与えることが分かった。そこで改善するためには、刺激の情報も組み込み、体動やノイズと電気刺激反応のパターンを認識して、その影響を分離する手法の導入が有効と考えられた。今後、これらの知見を応用して、3軸磁気センサを搭載したモーションセンサをTOFなどの神経反応・筋運動性評価へ適切に使用する指標を検討したい。

研究協力者達は、現在流通する3軸磁気センサを使用し、試験的計測を行った。磁気センサをBluetoothでPCへ接続し、磁気センサ部分を振動スピーカの設置された机の上に置き、交流電流負荷による磁界変化を測定したところ、ノイズ成分が大きかった。今後、地磁気を利用して磁気センサ移動から生体運動 (角度) を検出する目的においては、適した計測対象の選定や高分解能磁気センサの必要性が示唆された。

本研究の運動だけでなく、その他の生体機能研究を支援するために、マルチチャンネル信号の時間空間変化について、研究協力者達は深層学習の利用を検討した。現在、広帯域のマルチチャンネル電位記録に関して、基本的なパターン分類に足る深層学習ネットワークが市販のソフトウェア

パッケージを利用して作製できている。今後の発展的研究において、学習のために有効なラベル付けと必要とされる磁気センサデータの質と量を検討したい。本研究の主題である TOF モニター信号出力のパターン認識などへの応用開発を期待する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------