

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870090

研究課題名(和文) 歩行様運動中の機能的磁気共鳴画像(fMRI)取得方法の開発

研究課題名(英文) Fixation Method and Image Acquisition for fMRI during stepping

研究代表者

五月女 康作(Saotome, Kousaku)

筑波大学・サイバニクス研究センター・研究員

研究者番号：80608795

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)：下肢屈伸運動中のfMRIを取得するための体幹固定方法と撮像条件に取り組んだ。頭部の速度計測においては体幹固定を施すと有意に速度が減少した。また実際のfMRIの撮像では、脳賦活map上でモーションアーチファクトに起因して描出される負の賦活領域を減らすことができ、すべてのケースにおいて運動野の描出に貢献できた。しかしながら十分な効果を示さなかったケースもあり、改善が必要である。また頭部の動きの影響が少ない撮像条件の改良においては、理論的にはデータ収集タイミングと頭部の動きの少ないタイミングを合致させることができたが被験者撮影において実現することはできなかったためさらなる検討の余地が必要であった。

研究成果の概要(英文)：The trunk fixation method and data acquisition parameters for functional MRI during stepping were investigated. The measurements of head velocities during stepping by using motion capture system and fMRI acquisitions were performed to twelve healthy volunteers. The head velocity during stepping decreased statistically significant difference by using the trunk fixation method. Moreover, the motor areas of the legs were represented on fMRI activation map in every case and the deactivation areas, which caused by motion artifact, were smaller in some cases. However, the trunk fixation method could not reduce deactivation areas in other cases. We could theoretically moderate the image acquisition parameters to match the data acquisition time with the smaller head velocity time. Further investigations need in future work.

研究分野：磁気共鳴画像

キーワード：機能的磁気共鳴画像 モーションアーチファクト ステッピング 固定方法

### 1. 研究開始当初の背景

機能的磁気共鳴画像 (fMRI : functional magnetic resonance imaging) を用いた手の運動制御に関わる脳活動は現在までに多くの研究がなされてきており多角的な解明が成されてきている。一方で、下肢運動のための運動制御に関わる脳機能解剖は過去にいくつか研究がされてきているものの、未だ十分な解明がされていない。下肢運動に関わる従来の研究の多くは単関節特に足関節の背屈を運動タスクとして選択しており、多関節運動をタスクとした検討は極めて少ない。その大きな弊害となっているのが、屈伸運動のような多関節のダイナミックな運動タスクでは、頭部を入念に固定しても、下肢に連動した過度な頭部の動きが生じてしまうことが知られている (Hollnagel, et al.2011, Mehta, et al. 2009.)。このような背景が多関節運動中の脳活動の解明に取り組む研究者の間で重大な問題となっており、具体的な解決策は見いだされていない。

この問題を解決するためには、2つの取り組みが考えられる。一つは下肢運動に耐えうる頭部の固定方法を構築すること。一つは撮像方法を工夫すること、である。

まず、頭部の固定においては過度に固定すると被験者は痛みを感じてしまい、この痛みが脳活動に与える影響は、fMRI の結果を観察するうえで弊害となってしまうことを念頭に置かなければいけない。したがって、頭部を固定する以外に体幹の動きを抑制することで結果的に頭部の動きを減らすことができるのではないかと考えた。

次に撮像条件については、我々は先立って下肢運動中の頭部の動きをモーションキャプチャで被験者1名にて測定したところ、頭部の動きが大きい時間帯と静止する時間帯があることが分かった。この静止する時間帯を利用してこの時間帯だけに画像データを収集することで動きの影響が少ないデータセットを構築することができるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、下肢多関節運動中のfMRIを実現するために、①頭部の動きを減らすための体幹固定方法の有用性を頭部の速度の計測と脳賦活 map の評価によって明らかにすること、②動きの影響を受けにくいfMRI撮像方法に取り組む、ことである。

### 3. 研究の方法

すべての計測および撮像は筑波大学附属病院の倫理委員会の承認を得た。

#### ① 体幹固定方法の構築

今回用いた体幹固定方法を図1に示す。先立って検討していた方法に加えて、頸部への負荷を軽減させるための肩パッドの設置や足底と床との摩擦を軽減させるためのスリッピングボードを加えた。

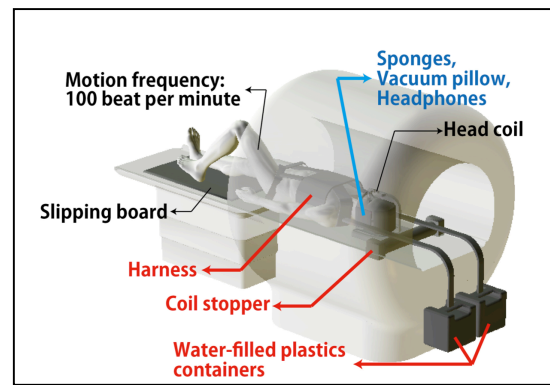


図1 体幹固定方法

通常行われるスポンジ、ヘッドフォンや吸引枕での頭部の固定に加えて、体幹固定として、体幹にハーネスを付けてそれを水で満たしたポリタンク2個で牽引した。頸部への負荷を無くすために肩パッドを入れて肩がヘッドコイルに圧接するようにした。ヘッドコイルが動かないように自作のストッパーを用いた。足底と寝台との摩擦を減らして滑らかな動きを実現するためにスリッピングボードを下肢の下に敷いた。

#### ② 下肢屈伸運動中の頭部速度および膝関節角度の計測

この測定はMR室内ではなく、モーションキャプチャ (MAC3D system, Motion Analysis Corp.) が設置されている実験室にて行った。寝台およびヘッドコイルはMR装置と同じものを使用した。この研究には健常ボランティア12名 (23.2歳±2.5歳、男性12名) が参加した。上記の体幹固定をしない場合とした場合において、30秒間両下肢屈伸運動 (ステッピング) を行い、モーションキャプチャにて頭部の速度と膝関節角度を計測した。運動のタイミングはメトロノームで聴覚的に指示した。なお頭部の固定はいずれの場合も施した。30秒間の測定データのうち、初めと終わりの5秒間ずつを省き、20秒間のデータを有効とした。頭部の速度の絶対値の平均とその分散を求めて、体幹固定をしていない場合とした場合を比較した。

また両下肢屈伸運動において、左膝関節が伸展している状態から屈曲を経て再度伸展するまでの一連の動きを図2が示すように6フェーズにわけて、それぞれのフェーズにおける頭部の速度を計算した。ここでは頭尾方向 (+) と尾頭方向をわけて算出した。

#### ③ 下肢屈伸運動中 fMRI の撮像

②と同じ被験者がfMRI撮像にも参加した。体幹固定をした場合としていない場合において、下肢屈伸運動をタスクとしたfMRIを撮像した。撮像はブロックデザイン (rest 2.5秒間+task 2.5秒間を4セット) を用いて、運動のタイミングをスクリーンに呈示して視覚的に指示した。画像解析にはSPM8と

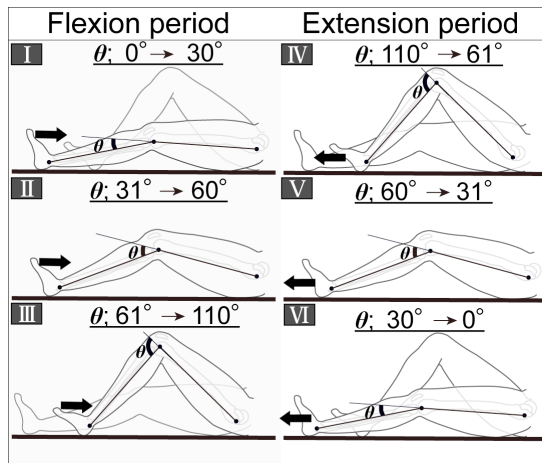


図2 左膝関節角度のフェーズ

左下肢の膝関節角度 ( $\theta$ ) を計測して、屈曲開始から伸展終了までを屈曲初期 (I)、屈曲中期 (II)、屈曲終期 (III)、伸展初期 (IV)、伸展中期 (V)、伸展終期 (VI) の6フェーズに分けた。

MRIcon を用いて、正の賦活 (activation) を示す領域 (暖色系) と負の賦活 (deactivation) を示す領域 (寒色系) を描出した。得られた賦活 map を図3に示すように分類した。分類にあたっては fMRI の解析にたけている研究協力者の協力を仰いだ。使用した装置は Achieva3.0T-TX (PHILIPS 社製) で 32ch-SENSE Head Coil を用いた。

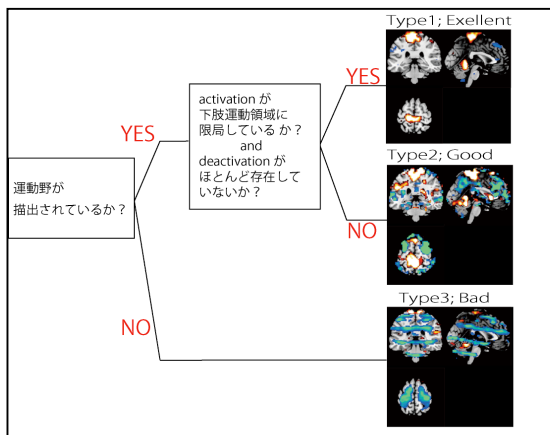


図3 脳賦活 map の分類

被験者12名から得られた脳賦活 map を3Type (Excellent, Good, Bad) に分類した。

#### ④ 動きの影響を受けにくい撮像条件の検討

②で得た膝関節角度と頭部の速度の結果から頭部の速度が小さいフェーズだけで fMRI のデータ収集をできる撮像条件を設定して、まずは被験者1名 (27歳, 男性) で撮像を試みた。

#### 4. 研究成果

##### ① 体幹固定の構築

先行研究において頸部の痛みを訴えたケ

ースがあったため、今回は頸部への負荷を軽減するために肩パッドを設置した。②および③の測定後、被験者へのアンケートにおいて、頸部の痛みを訴えたケースはなかった。

##### ② 下肢屈伸運動中の頭部速度および膝関節角度の計測

下肢屈伸運動中の頭部速度を表1に示す。体幹固定をしていない場合に比べて体幹固定をした場合には速度の絶対値の平均および分散がともに有意に減少した。これは体幹固定が有用であることを示している。体幹固定をした場合の絶対値の平均に SD を足した値は約 9 mm/sec となり、これを③で用いた fMRI の撮像条件の1スライス撮像するときの有する時間 (約 60msec) 中に動く量に換算すると約 0.54mm となり、目標の 1mm を下回った。

また左膝関節角度の各フェーズにおける頭部の速度の平均を図4に示す。伸展から屈曲時、および屈曲から伸展時の一連の動きのなかで、いずれにおいても 31-60° (フェーズ II, V) のときに頭部の速度が比較的小さくなることが分かった。

##### ③ 下肢屈伸運動中の fMRI の撮像

賦活 map の分類結果を図5に示す。体幹固定していない場合では、Excellent, Good, Bad はそれぞれ2, 4, 6例であった。一方、体幹固定をした場合には、それぞれ3, 9, 0例であった。すなわち、体幹固定をした場合には体幹固定をしなかったときに半数を占めた Type3; Bad をゼロにすることができた。一方で Excellent を十分に増やすことには繋がらなかった。その結果、運動野の賦活を認めるが deactivation を軽度含む Good 例を増やした結果になった。②の結果も含め、これらの結果は、今回用いた体幹固定が下肢屈伸運動中の fMRI を撮像するにおいて、頭部の速度を減らすために、および賦活 map において運動野の描出精度を高めるために有用ではあったが、完全ではなかったことを示す結果であると考えられる。一方で体幹を固定することで頭部の速度を減らすことができることを裏付けた研究であり、このような報告は今までにない。今後体幹固定のさらなる改良を進める上で、これ以上の頭部および体幹の固定は被験者への不快や痛みにつながる可能性があるため、今後は今回用いた固定方法に加えて、「さらに固定する」のではなく、下肢から体幹へ伝わる動きを「逃がす」作用を担うセッティングが必要ではないかと考えた。たとえば臀部の下に回転テーブルのような構造物を置くことなどのセッティングを試みて可能な限り被験者に負担が及ばない効果的なセッティングを考案していくことを今後の検討課題とする。

Measurements	harness	conventional
Absolute mean (mm/sec)	5.91 ± 2.87*	7.61 ± 3.50
Variance (mm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )	8.21 ± 3.67**	9.81 ± 4.59

Values are means ± standard deviation;  
\* P < 0.05 \*\* P < 0.01

表 1 下肢屈伸運動中の頭尾方向の頭部速度の絶対値の平均 (mm/sec) と分散 (mm<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>)  
ハーネスを使った体幹固定をした場合には頭部固定だけの場合に比べて、有意に絶対値の平均および分散が減少した (p < 0.05, 0.01)。

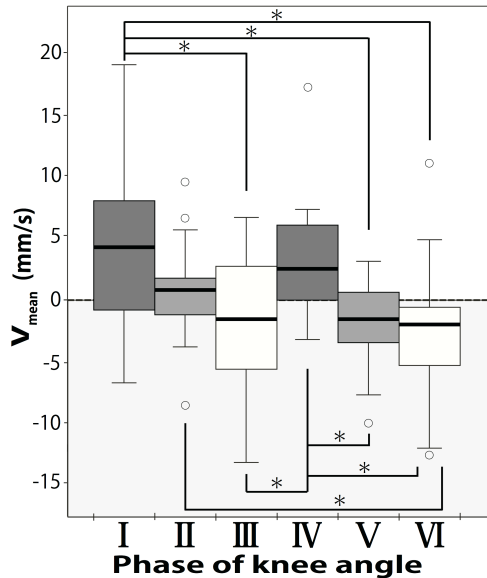


図 4 左膝関節角度の各フェーズにおける頭部速度の平均  $V_{mean}$  (mm/sec) の箱ひげ図  
屈曲初期 (I) と伸展初期 (IV) においては、他のフェーズに比べて有意に正 (+) に大きかった。また屈曲終期 (III) と伸展終期 (VI) においては他のフェーズに比べて有意に負 (-) に大きかった。さらに屈曲中期 (II) および伸展中期 (V) においては、他のフェーズに比べて有意に小さかった。各アスタリスクは p < 0.05 を示す

④ 動きの影響を受けにくい撮像条件の検討

結果②により、頭部の速度が小さい膝関節角度のフェーズが明らかになった。このフェーズのときだけにデータ収集をして、動きの少ないデータセットの構築を目的として図 6 のように撮像条件を変更した。屈伸運動の周期の倍数になるように TR を 4200ms に設定し、さらに倍数の数で 1 TR をセグメント化した (図 6)。被験者 1 名に対して試行した。その結果、従来は撮像音が連続的に鳴っていたのに比べて、データ収集時 (図 6 の白枠時) のみに断続的に鳴るようになった。

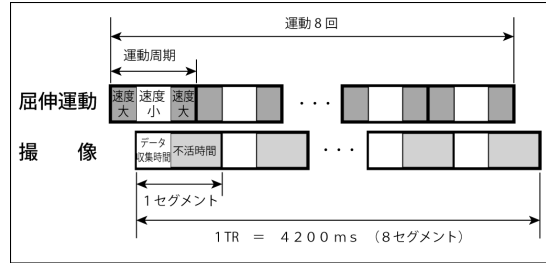


図 6 膝関節運動周期に合わせた TR のセグメント化

膝関節屈伸運動の周期を屈曲初期から屈曲終期または伸展初期から伸展終期までを 1 周期とし、合計 8 周期分の時間に TR を調節した (4200ms)。さらに TR を 8 セグメントに分けて、データ収集時間と頭部の速度が小さいフェーズの時間が揃うように屈伸運動と撮像開始のタイミングを調整した。

被験者はこの断続的でリズムカルな撮像音につられてしまい、視覚的にスクリーンに呈示された運動のタイミングにあわせることができなくなってしまった。その結果、得られた脳賦活 map は図 3 が示す分類の Type-3 に相当した。被験者への運動タイミングの呈示方法を工夫して再度試みたが結果は同様

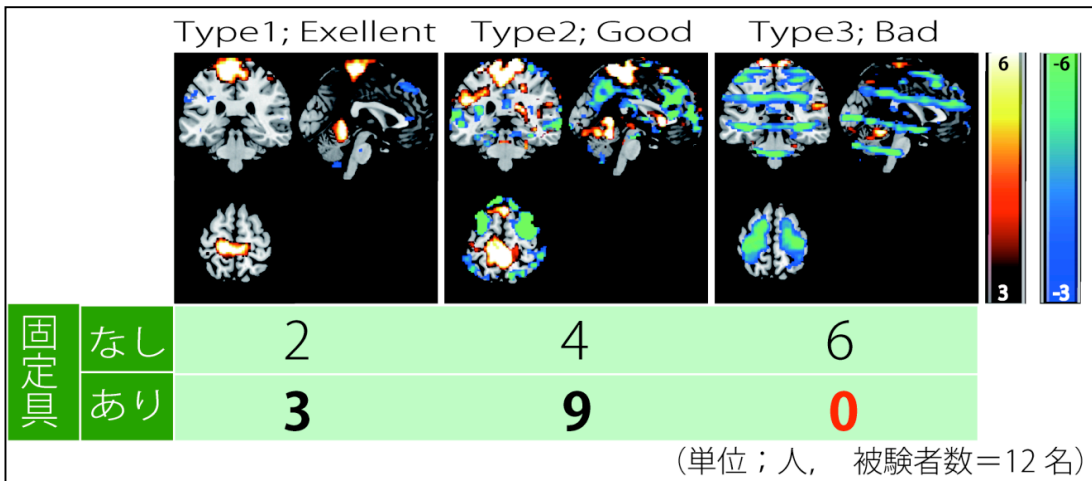


図 5 賦活 map の分類結果  
体幹固定具なし、ありの場合の Type 1, 2 および 3 に分類された人数をそれぞれ示す。暖色系は正 (+) の賦活領域を示し、寒色系は負 (-) の賦活領域を示す。

であった。また頭部の速度が小さいフェーズの時間が予想よりも短かったことが、撮像条件をさらに改良するうえで弊害となり、動きの少ないデータセットを構築するという目的を達成することができなかった。今後は引き続き断続的な撮像方法での取得に加えて、撮像時間を高速化することなどで動きの影響が少ないデータセットの取得に取り組む。

#### 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 2 件)

1. A Head Fixation Method for fMRI During Bending and Stretching of Feet, K Saotome, A Matsushita, H Kadone, Y Sankai, K Nakai, A Matsumura, SMRT 22th Annual Meeting, Milano, Italy, 11-16 May 2014
2. ステッピング中 fMRI 用固定具の有用性検証 五月女康作, 松下 明, 門根秀樹, 中井 啓, 山海嘉之, 松村 明, 第71回日本放射線技術学会総会学術大会, 横浜, 4月16-19日, 2014年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.first.ccr.tsukuba.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

五月女 康作 (Kosaku Saotome)

筑波大学サイバニクス研究センター・研究員

研究者番号：80608795