

令和 4 年 8 月 29 日現在

機関番号：31310

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K19877

研究課題名(和文)日常生活における足関節の随意運動制御の役割 ～リズム運動機構に着目して～

研究課題名(英文) Voluntary motor control focusing on bilateral rhythmic movements of the ankle joint in daily life

研究代表者

沼田 純希 (Numata, Atsuki)

東北文化学園大学・医療福祉学部・助手

研究者番号：20780464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、歩行に関わる両側下肢のリズム運動制御の特徴を明らかにすることを目的とした。一定間隔の提示音に合わせて反応ボタンを押す同期タッピング課題を用い、両側肢の位相の異なるタップ課題における時間的な精度の特徴を検証した。その結果、下肢の逆位相性運動では、片側および同位相性の運動に比べ繰り返し運動の時間的な安定性が保たれた。一方、手指では位相条件間の差が無く、この安定は下肢に特有の現象であった。さらに、音や触覚による感覚情報を除いても、下肢の逆位相性運動における安定性が保たれた。歩行に類似した下肢の逆位相性運動は、リズムの安定を保つことに特化した機能を有し、上肢とは異なる神経制御の関与が推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、手指に比べて、歩行運動のような自動的な要素が強い下肢を対象として、足関節の随意的なリズム運動に着目し、両側足関節を用いたその運動制御について、運動学的・神経生理学的手法を用いて多角的に解明することを特徴とした。それにより、随意的なリズム制御機構に着目した新たな機能評価・リハビリ技術を提案することが出来ると考える。さらに本研究は、リハビリ領域のみならず、福祉やスポーツ領域での応用につながると考えられる。今後は、今回得られた知見を基に、小脳疾患やパーキンソン病患者の下肢リズム制御の特徴を明らかにし、時間処理機能に着目した新たな歩行リハビリの技術展開を目指す予定である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to clarify the characteristics of rhythmic motor control of bilateral lower limbs involved in walking. Using synchronized finger- and foot-tapping tasks in which participants press the reaction button in synchrony with the tones presented at fixed inter-stimulus intervals (ISIs), the accuracy and temporal stability of tap timing depending on the movement phase of both limbs were investigated. As a result, in the antiphase movement of the lower limbs, the temporal stability was significantly higher than that of unilateral and in-phase movement, but not in the finger-tapping task. Furthermore, the temporal stability of the lower limbs in the antiphase movement was preserved even if the auditory information by sound stimulus and tactile feedback by tapping were excluded. The preserved temporal synchronization for antiphase movement for the lower limbs, but not finger-tapping, may be due to the neural mechanisms underlying locomotion.

研究分野：理学療法学

キーワード：リズム運動制御 足関節運動 タッピング課題 歩行リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

ヒトのリズムに関する時間処理過程については、一定間隔の繰り返し音に同期させ指でボタンを押す同期タッピング課題を用いた様々な研究が行われている。近年では、時間処理過程における小脳や大脳基底核といった脳領域の重要性が示され、脊髄小脳変性症やパーキンソン病患者を対象とした研究により運動の稚拙さと時間処理能力の関連性が報告された(Matsuda et al., 2015; Tokushige et al., 2018)。

研究代表者は理学療法士として中枢神経疾患に対するリハビリテーション(以下、リハビリ)に従事する中で、対象者の歩行リズムの調整能力に着目してきた。ヒトの歩行は、中枢性パターン発生器(CPG)や筋紡錘・皮膚・関節からの求心性情報により、大部分が脊髄レベルで自動的に制御されている。現状の歩行障害に対するリハビリでは、この自動的制御の知見に基づいた一定速度での歩行練習が行われることが多い。しかし、多様な社会環境で自立して歩行するためには、混雑した歩道をゆっくり歩く、点滅する信号で素早く渡りきるなど、状況に応じて歩行リズムを調整する能力が必要となる。つまり、中枢神経疾患に対する歩行リハビリには、リズム運動制御の随意的要素を十分に考慮することが重要である。

歩行に関わる下肢関節の中で、足関節は大脳の運動関連領域からの強い支配を受け、随意的要素を強く反映する。歩行に関わる随意的なリズム制御について、両側足関節で検討した報告は少なく、随意的な両側下肢のリズム運動パターンの特徴と、それに関わる中枢神経系の役割は十分に検討されていない。

両側性の運動位相に着目した研究では、上肢では、両側肢を逆方向に動かす逆位相性の運動(antiphase movement)が、運動速度の増大に伴って、同位相性の運動(in-phase movement)に変化する相転移現象(phase transition)が知られている(Haken et al., 1985)。一方、下肢では、それが生じない(Riek and Carson, 2001)など、上肢とは異なる運動制御動態を示す可能性が報告されている。また足部のリズム生成の制御に関しては、片側のみを対象とした報告(Khaslavskaja and Sinkjaer, 2005; konoike et al., 2015)や脊髄レベルでの報告が多い(Hiraoka et al., 2014)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、歩行に類似した両側下肢の逆位相性のリズム運動制御について、運動学的・神経生理学的手法を用いて解明することとした。そのために、上肢と下肢のリズム運動パターンの特徴、下肢のリズム生成に対する感覚情報の有無による影響、下肢のリズム生成に関わる大脳皮質運動野の制御機構について検討することとした。これらを明らかにすることで、社会的自立を目指す歩行リハビリにおける、随意的なリズム制御機構に着目した新たな機能評価・リハビリ技術を提案することが出来ると考えた。

【研究1：同期タッピング課題による上下肢のリズム運動制御の差異】

研究1の目的は、同期タッピング課題を用い、両側下肢の随意的なリズム運動パターンの特徴を明らかにすることとした。両側性運動の特徴を明らかにするため、in-phase および antiphase の位相条件に加え、片側での運動条件(unilateral)を実施した。さらに、上肢での手指タッピング課題のパフォーマンスと比較することで、下肢におけるリズムカルな運動制御の特徴について検討した。より歩行に近い下肢の antiphase movement において、他の位相条件と比較して特異的にテンポが安定した、より同期精度の高い運動パターンを示す可能性が考えられた。

【研究2：下肢のリズム生成に対する感覚入力の有無による影響】

リズムの安定は運動出力だけではなく、感覚情報の影響を受けて生成された可能性が考えられた。反復運動によるリズム生成に関わる感覚情報として、音刺激による聴覚情報および、タッピング動作遂行に伴う手指指腹や足底からの触覚フィードバックの2つが考えられた。研究2では、繰り返し提示される音刺激および足底でのボタン押しで生じる触覚情報を除いたタッピング課題を設定した。感覚入力の有無が、両側下肢の位相が異なる同期タッピング課題中のリズム制御に与える影響について検討することを目的とした。

【研究3：電気刺激を用いた感覚付与が下肢のリズム生成に与える影響】

パーキンソン病においては、聴覚や視覚情報による外部入力によってリズム運動のパフォーマンスが改善することが知られている。そこで、研究3では音に同期した電気刺激(electrical stimulation: ES)を用いて感覚情報量を増加させ付与することで、テンポを予測する手がかりとしてリズム運動の精度・安定性を改善しリズム生成が促進されるか否かを検討した。これにより、リズム運動制御に障害を呈する中枢神経系疾患患者に対する理学療法の基礎的知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

【研究1：同期タッピング課題による上下肢のリズム運動制御の差異】

健康成人男女20名を対象に、手指または足部による同期タッピング課題を行った。対象者は

安楽な座位姿勢で、一定間隔で提示される音刺激に同期して反応ボタンをタップした。音刺激間隔 (interstimulus intervals: ISIs) は 500 ~ 4800 ms の間で 9 種を設定し、それぞれ 110 回提示した。タッピング動作は、利き側だけの片側運動 (unilateral)、両側が同位相性の運動 (in-phase)、両側が逆位相性の運動 (antiphase) の 3 種の位相条件で行った。音とタッピング動作のタイミングを記録し、音とタッピングの同期誤差 (タッピング動作の時間的精度の指標、synchronizing error: SE) および連続するタップの時間間隔 (タップの時間的安定性の指標、inter-tap interval: ITI) を算出した。以上の算出データについて、ISIs および位相条件間で比較検討を行った。

【研究 2: 下肢のリズム生成に対する感覚入力の有無による影響】

対象は健康成人男女 33 名 (下記の 3 課題に 11 名ずつ割付) とした。研究 1 で用いた足部タッピング課題について、(生体内のリズム生成を促進すると思われる) 感覚情報を除いた影響を検討するため、課題中の 25 回目で提示音が消え、それまでに学習したテンポを保ちタップを継続する同期-継続課題 (synchronization-continuation task: S-C task)、足部が浮いた状態でタップ様の運動を行う疑似タッピング課題 (air-tapping task)、S-C task と air-tapping task の複合課題 (air-tapping 中に音が消えタップを継続する) (Mixed-task) の 3 種のタッピング課題を行った。S-C task では反応ボタンを用いて、air-tapping task および Mixed task では足関節に装着した電子角度計による足関節角度の計測から、それぞれ ITI を算出した。各課題について、ISIs および位相条件間で ITI の比較検討を行った。

【研究 3: 電気刺激を用いた感覚付与が下肢のリズム生成に与える影響】

対象は健康成人 11 名とし、研究 2 の Mixed-task を行った。全ての対象者について、音刺激提示中に音に同期した ES を提示した条件と、ES のみの条件の 2 種で実施した。研究 1・2 の結果を踏まえ、運動位相は antiphase 条件で行った。電子角度計による足関節角度の周期変化から ITI を算出し、ISIs および刺激条件間で比較した。

4. 研究成果

【研究 1: 同期タッピング課題による上下肢のリズム運動制御の差異】

研究 1 では、同期タッピング課題のパフォーマンスに対する音刺激間隔および運動位相の影響が、手指タッピング課題と足部タッピング課題で異なることが示された。健康成人では、負の同期誤差 (negative asynchrony: NA) と呼ばれる、音の提示よりも少し早くボタンをタップする傾向があることが知られている。これは、指から体性感覚野への感覚フィードバックが到達する時間とされる。一方、この NA は ISIs の延長により減少し、3600 および 4800 ms の長い ISIs では、音の提示よりもタップが顕著に遅くなる反応的な delayed peak の出現が報告されており (Mates et al., 1994; Matsuda et al., 2015)、本研究の結果からも同様の傾向を認めた。ただし、この現象は上肢で著明であったが、下肢では明確な出現が認められず NA が保たれた。また、足部タッピング課題における antiphase 条件では、ITI の変動が他の位相条件に比較して有意に低値を認め、リズム運動における高い時間的安定性を示した。一方、手指タッピング課題では位相条件間の差を認めず、antiphase 条件でのリズムの安定は下肢に特有の現象と考えられた。以上の結果は、時間的同期に関わる運動制御が上肢と下肢で異なることを示唆した。

【研究 2: 下肢のリズム生成に対する感覚入力の有無による影響】

感覚情報を除いたことにより ITI は目標となる ISIs から誤差が生じ、変動も増大した。この傾向は 3 種の課題に共通して ISIs が延長するほど著明となったが、air-tapping task よりも S-C task と Mixed task で顕著であったことから、タップ間隔の精度および変動には聴覚情報の影響がより優位であることが示唆された。具体的には、S-C task では unilateral 条件で antiphase 条件に比べて ITI の平均値が有意に延長し、ITI を長く見積もっていた。また、S-C task および Mixed task では、antiphase 条件では他の位相条件に比較して ITI の変動が有意に低値を示し安定した。一方、air-tapping task では位相条件間の差を認めなかった。これらの antiphase 条件における安定を示す結果は研究 1 から一貫しており、下肢の逆位相性の運動 (antiphase movement) 時には、感覚情報に依存せずリズムを安定させる制御機構の存在が示唆された。

【研究 3: 電気刺激を用いた感覚付与が下肢のリズム生成に与える影響】

ES のみの条件では、音刺激に ES を併用した条件に比較して ITI の平均値が有意に低く、タップ間隔を短く見積もる結果を示した。一方、ITI の変動に感覚刺激条件間の差を認めなかった。よって、ES のみでは ISIs を記憶するのに不十分であった可能性が考えられた。ただし、聴覚情報と ES では刺激提示から知覚するまでの時間など感覚モダリティに応じた違いがあることから、刺激提示設定 (刺激タイミング、持続時間、強度) については今後の検討課題となった。

【結論】

本研究の結果より、両側下肢が逆位相性の運動 (antiphase movement) では片側運動や同位相性の運動に比較して時間的安定性が有意に高く、これは下肢に固有の特徴であることが示唆された。さらにこの逆位相性運動は、感覚情報に依らずリズムの安定性が保たれたことから、自律的な下肢のリズム生成に寄与することが示された。本研究で用いた両側下肢の同期タッピング課題は、対象者の歩行に関わるリズム運動制御能力を評価するツールとして活用できる可能

性が期待される。

開始当初に予定していた経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation : TMS) 法および運動関連脳電位 (movement-related cortical potential : MRCP) の非侵襲的技法による検討については、COVID-19 の感染拡大による影響から実験を進行できない状況が生じたため、協力者を募っての実験を十分に進めることが出来なかった。今後は、本研究の結果を踏まえた課題設定から神経生理学的手法による脳機能計測を行うことで、下肢のリズム制御に関わる運動関連脳領域 (大脳皮質、大脳基底核、小脳など) を明らかにしたい。さらに、パーキンソン病や小脳疾患を対象とした検討により運動関連脳領域の関与を明らかにするとともに、これらの神経疾患患者の歩行リハビリにおける評価・治療への本研究課題の応用可能性を検討していく。

【主な成果公表 (5 . 主な発表論文等 , に含まれないもの)】

〔学会発表等〕(計2件)

- 1) 沼田純希, 寺尾安生, 尾張望美, 柿崎千穂, 菅原憲一, 宇川義一, 古林俊晃. 両側下肢の運動の違いに着目した同期 Tapping 課題の検討 (第34回日本大脳基底核研究会 発表(2019.8))
- 2) Numata A, Owari N, Kakizaki C, Sugawara K, Terao T, Ugawa Y, Furubayashi T. Temporal processing between in-phase and antiphase movements during bilateral finger and foot tapping tasks. *Clinical Neurophysiology*.130 (2019) e221. (第49回日本臨床神経生理学学会学術大会にて座長推薦を受け *Clinical Neurophysiology* 誌に抄録が掲載された)

〔学位論文〕

神奈川県立保健福祉大学大学院保健福祉学研究科 博士後期課程 学位論文
「歩行動作に関わる下肢のリズム運動制御機構の解明」(2021.3)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Numata Atsuki, Terao Yasuo, Owari Nozomi, Kakizaki Chiho, Sugawara Kenichi, Ugawa Yoshikazu, Furubayashi Toshiaki	4. 巻 84
2. 論文標題 Temporal synchronization for in-phase and antiphase movements during bilateral finger- and foot-tapping tasks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Human Movement Science	6. 最初と最後の頁 102967 ~ 102967
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.humov.2022.102967	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 沼田純希, 寺尾安生, 尾張望美, 柿崎千穂, 菅原憲一, 宇川義一, 古林俊晃
2. 発表標題 下肢の同期タッピング課題における感覚入力の違いがリズム形成に与える影響
3. 学会等名 第25回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Numata Atsuki, Owari Nozomi, Kakizaki Chiho, Sugawara Kenichi, Terao Yasuo, Ugawa Yoshikazu, Furubayashi Toshiaki
2. 発表標題 Temporal processing between in-phase and antiphase movements during synchronized finger and foot tapping tasks
3. 学会等名 World Confederation of Physical Therapy congress 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沼田純希, 寺尾安生, 尾張望美, 柿崎千穂, 菅原憲一, 宇川義一, 古林俊晃
2. 発表標題 下肢の同期タッピング課題における運動位相と感覚フィードバックの違いがリズム制御へ与える影響
3. 学会等名 第49回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沼田純希, 寺尾安生, 尾張望美, 柿崎千穂, 菅原憲一, 宇川義一, 古林俊晃
2. 発表標題 下肢の同期タッピング課題における運動位相の違いが提示音消失後のリズム保持能力に与える影響
3. 学会等名 第24回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沼田純希, 寺尾安生, 菅原憲一, 宇川義一, 古林俊晃
2. 発表標題 電気刺激による体性感覚情報が下肢のリズム形成に与える影響
3. 学会等名 第51回日本臨床神経生理学会学術大会
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
研究協力者	寺尾 安生 (Terao Yasuo) (20343139)	杏林大学・医学部・教授 (32610)	
研究協力者	菅原 憲一 (Sugawara Kennichi) (90280198)	神奈川県立保健福祉大学・保健福祉学部・教授 (22702)	
研究協力者	宇川 義一 (Ugawa Yoshikazu) (50168671)	福島県立医科大学・医学部・教授 (21601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	古林 俊晃 (Furubayashi Toshiaki) (80583963)	東北文化学園大学・健康社会システム研究科・教授 (31310)	

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