

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：84506

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K19860

研究課題名（和文）変形性膝関節症患者に対する足部振動刺激の提示が歩行修正に及ぼす効果の検証

研究課題名（英文）Investigation of the effect of vibrotactile stimulation of the foot on gait modification in people with knee osteoarthritis

研究代表者

戸田 晴貴（Toda, Haruki）

兵庫県立福祉のまちづくり研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70828665

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ウェアラブルなデバイスを用いて足部に振動刺激を与えることで、歩行を無意識に修正することができるか検証した。本研究では、母趾爪に振動刺激を与える手法を採用した。本研究の結果、膝関節の内側負荷に関連する立脚期における身体重心の左右移動の変動は、振動なしの時に大きい人ほど振動刺激により減少させることができた。また、身体重心の左右移動を制御するための関節間協調が低い人ほど協調性が高くなる結果が得られた。振動刺激の効果は計測室外での自然な環境でも確認することができた。振動なし時に変動の大きい人に対して振動刺激を与えることで、前額面上での歩行指標の制御を変化させることができる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果から、健常者においても歩行中の変動性が大きく、関節間協調が低い対象者に対しては母趾爪への振動刺激を与えることで無意識に歩行を修正できることが明らかになった。この結果は、あらかじめ振動刺激の適応を検討する必要があることを示唆している。母趾爪への刺激は、裸足や一般的な靴を履いている時でも可能であり環境の制約を受けにくい。そのため、臨床現場で活用しやすい手法であると考えられる。先行研究において、高齢者は歩行変動が大きくなっていることが報告されている。本研究の成果は、高齢者など歩行の変動が大きい人に対してもウェアラブルかつ即時的に歩行を修正し転倒予防につなげる、といった応用も期待される。

研究成果の概要（英文）：This study examined that vibrotactile stimulation of the foot using a wearable device could be used to unconsciously modify gait. This study used a method of applying vibrotactile stimulation of the hallux nail. The results of this study showed that the variability in the lateral shift of center of mass motion during the stance phase of gait could be reduced by vibrotactile stimulation in people who had greater variability without the stimulation. In terms of joint kinematics, the stimulation affected the segmental coordination for controlling the lateral shift of the center of mass in people with high motor noise and a low synergy index during the single-stance phase. The effects of vibrotactile stimulation were also confirmed in a natural environment in outside of the laboratory. It was suggested that vibrotactile stimulation could change the gait index on the frontal plane in people who had large variability without the stimulation.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：歩行 振動刺激 変動性 関節間協調 UCM解析 身体重心 モーションキャプチャ 変形性膝関節症

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

変形性膝関節症(以下、膝 OA)患者における歩き方の修正は、膝関節内反モーメントの低減に有効であることが明らかとなっている。先行研究では、口頭指示や視覚的フィードバックにより歩き方の修正を行っている。特に、歩行中のつま先の進行方向角度を変更する toe-in や toe-out といった手法は、足圧の移動をコントロールすることで、膝関節の力学的負荷の低減を図っている。また体幹の左右への側屈角度を修正することでモーメントを低減する手法もある。しかし、先行研究で用いられたこれらの手法は、常に歩き方を意識しながら歩行する必要があり、日常生活場面で実施することが難しい。また意識的に歩き方を変えることで、関節間の運動協調が損なわれる可能性がある。

近年、母趾爪への振動刺激により、歩行中の足底感覚提示に利用できる可能性があることが報告されている。ウェアラブルな装置で歩行中に振動刺激が与えられるようになれば、対象者が歩き方を意識することなく、廊下や屋外など生活環境で歩き方を修正することができる可能性がある。それにより、膝 OA 患者の日常生活場面における力学的負荷を減らし、膝 OA の進行予防に寄与することが期待される。

### 2. 研究の目的

- (1) 母趾爪への振動刺激が歩行時の時空間パラメータや運動学的、運動力学的パラメータに影響するか検討する。
- (2) 母趾爪への振動刺激が歩行中の膝関節内側の力学的負荷と関連する身体重心の左右移動を制御するための関節間協調に影響するか検討する。
- (3) これらの効果が計測室外の廊下での歩行でも認められるか確認する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 振動システム

振動システムは、バイブレータ(LD14-002;日本電産コパル株式会社,東京)、マイクロコントローラ(mbed LPC11U24FHI33/301, NXP Semiconductors, Eindhoven, the Netherlands)、圧力センサ(FSR 400 Short, Interlink Electronics, Camarillo, CA, USA)から構成された(図1)。バイブレータの駆動には、マイクロコントローラに接続されたハプティックモーターライバ(DRV2605, Texas Instruments, Dallas, TX, USA)を使用した。圧力センサーが母趾球の接地を検出すると、母趾爪に貼付したバイブレータが周波数150Hzの正弦波がほぼ時間遅れなしで発生した。振動の振幅は、Windows タブレット上で動作する自作アプリケーションのグラフィカルユーザーインターフェースを使用して調整された。

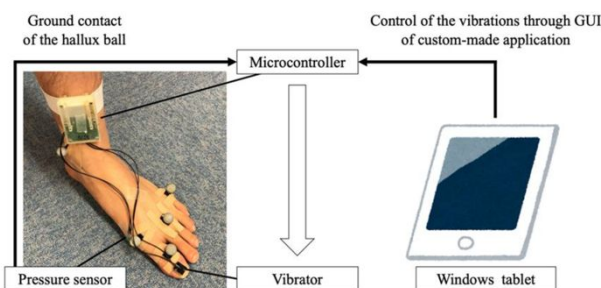


図1: 振動システムの概要(Toda, et al., Applied Science, 2020より引用)

#### (2) 計測

若年者を対象にし、計測室内における振動介入の効果検証を行なった。歩行計測には、カメラ15台の光学式モーションキャプチャシステム(Vicon MX and Vicon T, Vicon Motion Systems, Oxford, UK)と9枚の床反力計(BP400600-2000PT, AMTI, Watertown, MA, USA)を使用した。対象者の身体の57箇所に14mmの反射マーカを貼付した。計測は、裸足で上記の振動システムを両足に装着して行った。振動の強度は、あらかじめ“振動を感じることができる最も弱い強度”に調整した。その後、振動ありとなしの2条件で歩行を行った。計測の順番はランダムとした。

#### (3) 分析

歩行中の運動学的、運動力学的パラメータの計算には、DhaibaWorks(<https://www.dhaibaworks.com/>)を使用した。対象者のT-pose時のマーカ座標と体重から作成したデジタルヒューマンモデルに歩行中に計測されたマーカ座標を最適化計算でfittingした後、モデルの身体重心位置と関節角度を算出した。関節モーメントは、逆運動力学計算を使用して算出した。算出されたデータは、床反力鉛直成分のデータを使用し

て右足の立脚期を抽出した。

#### 運動学的、運動力学的パラメータへの影響

抽出されたデータから歩行速度、立脚期時間、身体重心位置、床反力、関節角度、関節モーメントのピーク値及び変化量を算出した。これらの値の5歩行周期分の加算平均及び変動係数((標準偏差/平均値)×100)を算出した。振動刺激ありとなしの時に差が認められるか検討した。さらに、振動刺激の効果が振動なし時の状態に影響を受けるかを確認するために、変動係数においては振動の有無による変化量を算出し振動なし時の値との関連を検討した。

#### 身体重心の左右移動を制御するための関節間協調への影響

関節間協調の評価にはUnControlled Manifold(UCM)解析を使用した。デジタルヒューマンモデルの各体節の角度から右足関節位置を起点とし身体重心の左右位置を定義するための幾何学モデルを作成した。幾何学モデルから重心の左右移動の制御に影響しない体節角度の組み合わせであるUCMを算出した。10歩行周期分の角度データからUCMに沿った変動である $V_{UCM}$ とUCMに直交する変動である $V_{ORT}$ を算出した。最終的に、 $V_{UCM}$ と $V_{ORT}$ からシナジー指数を算出した。振動刺激ありとなしの時に、 $V_{UCM}$ 、 $V_{ORT}$ 、シナジー指数に違いが認められるか検討した。さらに、振動刺激の効果が振動なし時の状態に影響を受けるかを確認するために、これらの指標において振動の有無による変化量を算出し振動なし時の値との関連を検討した。

#### (4) 計測室外での評価

本計測の参加者は、約30mの廊下を快適な歩行速度で歩行した。全身の各体節に対して合計13個の慣性計測装置(MTw, Xsens Technologies, Enschede, Netherlands)を貼付した。振動の強度は、あらかじめ“振動を感じる事ができる最も弱い強度”に調整した。その後、振動ありとなしの2条件で歩行を行った。計測の順番はランダムとした。

### 4. 研究成果

#### (1) 運動学的、運動力学的パラメータへの影響

振動あり時と振動なし時を比較した結果、運動学的、運動力学的パラメータに有意な差は認められなかった。一方で、振動刺激の効果は、振動なし時において変動性が大きい人ほど変動が小さくなり、安定性が向上することが明らかになった(図2)。特に、膝関節内側の力学的ストレスに関連する身体重心の側方移動の安定性を向上させることができた。一方で元々歩行変動が小さい人に対して振動刺激を与えるとノイズとなり、歩行を不安定にする可能性があることが示唆された。これらの結果から、事前に適応を検討することで、母趾爪への振動刺激を用いた歩行修正を行うことができる可能性が明らかになった。

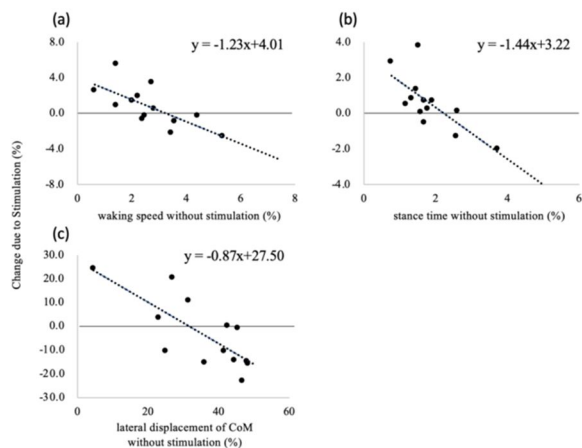


図2：歩行速度(a)、立脚時間(b)、重心左右移動(c)に対する振動なし時の変動と変化量の関連 (Toda, et al., Applied Science, 2020 より引用)

#### (2) 身体重心の左右移動を制御するための関節間協調への影響

$V_{UCM}$ は振動刺激による有意な違いは認められなかったが、大きな効果量があった。よって、振動刺激により関節間協調が改善する傾向が認められた。 $V_{ORT}$ とシナジー指数は振動なし時の状態の影響を受けていた。つまり、 $V_{ORT}$ が大きくシナジー指数が低い人は母趾爪の振動刺激により、 $V_{ORT}$ が小さくなり結果としてシナジー指数が高くなった(図3)。よって、母趾爪への振動刺激は身体重心の側方移動を不安定にする体節運動が大きい人に対してより効果的であることが明らかになった。

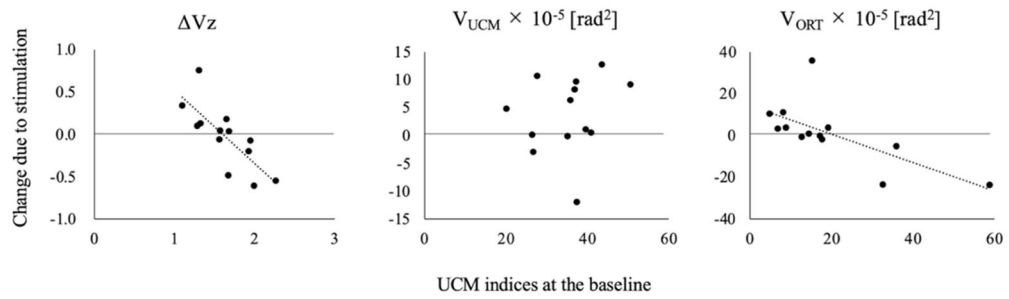


図3：UCM 指標に対する振動なし時の値と変化量の関連 (Toda, et al., J. Biomech., 2022 より引用)

(3) 計測室外での評価

振動刺激により股関節の可動範囲が約7%増加した。また重心の側方移動量が減少し、変動性も減少した。よって、計測室外の歩行においてこれまで計測してきた計測室内でのデータと同様の結果が認められることを確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Toda Haruki, Maruyama Tsubasa, Tada Mitsunori	4. 巻 2
2. 論文標題 Indoor vs. Outdoor Walking: Does It Make Any Difference in Joint Angle Depending on Road Surface?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 119 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fspor.2020.00119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toda Haruki, Hashimoto Yuki, Tada Mitsunori	4. 巻 10
2. 論文標題 Vibrotactile Stimulation of Nail of Hallux during Walking: Effect on Center-of-Mass Movement in Healthy Young Adults	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 4562 ~ 4562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10134562	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toda Haruki, Hashimoto Yuki, Ibara Takuya, Tada Mitsunori	4. 巻 141
2. 論文標題 Effect of vibrotactile stimulation of the hallux nail on segmental coordination: A secondary analysis using uncontrolled manifold analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 111234 ~ 111234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiomech.2022.111234	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Haruki Toda, Mitsunori Tada, Yuki Hashimoto
2. 発表標題 Effect of Vibro-Tactile Stimulation to Toenail on Control of Center of Mass During Walking
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------