



足首の腱電気刺激による多方向への身体傾斜感覚提示

高橋希実¹⁾, 雨宮智浩^{1,2)}, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明^{1,2)}, 廣瀬通孝³⁾, 青山一真^{2,3)}

Nozomi TAKAHASHI, Tomohiro AMEMIYA, Takuji NARUMI, Hideaki KUZUOKA, Michitaka HIROSE, and Kazuma AOYAMA

- 1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {nozomi,narumi,kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)
- 2) 東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {amemiya,aoyama}@vr.t.u-tokyo.ac.jp)
- 3) 東京大学先端科学技術研究センター (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, hirose@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: バーチャルリアリティ (VR) 技術の発展によって VR 空間内での多様な地形 (平地や山, 室内, 階段等) の体験が可能になった一方で, これらの体験は現実空間の平坦な床面上で行われることが多く, 地面の傾斜についての視覚と体性感覚の不一致により体験への没入感が損ねられてしまうという問題がある. この問題の解決策として, 本研究では脚部の腱に対する電気刺激により身体傾斜感覚を提示する手法を提案する. 腱への電気刺激により刺激部の関節角の知覚が変化することが知られており, 身体を支える部位である足首にバーチャルな関節角を知覚させることで身体のバーチャルな傾斜感覚を提示できると考えられる. 本稿では足部の前後左右方向の運動に関わる腱である前脛骨筋腱, アキレス腱, 長趾屈筋腱, および長腓骨筋腱に電気刺激を行い, 刺激中の足圧中心および頭部位置の計測と身体の傾斜感覚についてのアンケートを行った結果, 電気刺激により刺激位置とは反対方向に身体の主観的な傾斜感覚が生じることを明らかにした.

キーワード: 腱電気刺激, 固有感覚, 神経刺激インタフェース, バーチャルリアリティ

1. はじめに

近年, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の価格の低下に伴いバーチャルリアリティ (VR) 技術の普及が進んでいる. 広大な VR 空間を構築することが可能であるという HMD の利点を生かすため, VR 空間内を移動する様々な手法が提案されているが[1], 中でも VR 空間内における身体の位置と姿勢を現実空間と一対一対応させる手法は実際の歩行などによって VR 空間内を直観的に移動することが可能であり, 高い没入感を得られるという点で優れている. 一方で, この手法では VR 空間内の地形情報をユーザに正確に提示することができないという問題点がある. 例えば野外を模した VR 空間の地形が多くの傾斜を含むのに対し, ユーザの体験はほとんどの場合室内の平坦な床面上で行われるため, 地面の傾斜についての視覚と体性感覚の不一致により体験に対するユーザの没入感を損ねてしまう恐れがある.

この問題を解決するため, これまでに起立状態にあるユーザに対して VR 空間内の地形情報を提示する手法についての様々な研究がなされてきた. 特に, アクチュエータにより現実空間の形状を変化させることで VR 空間の地形を

再現する装置が多く提案されている. 例えば, Schmidt らの開発した靴型デバイスである Level-ups[2]は靴底の高さをアクチュエータによって調節することで VR 空間内の高低差をユーザの足下に提示することができる. また, Je らの開発した Elevate[3]は VR 空間内の地形をピンアレイによって再現し, ユーザは実際にその上を歩行することができる. これらの装置は VR 空間内の地形を正確に再現することができる一方で, 大掛かりな機構を必要とするために装置が高額化・巨大化しやすく, コストや安全性の面で課題がある. これらとは対照的なアプローチとして, 感覚器への直接刺激によって地形の変化により得られる感覚と同等の感覚を提示する手法が考えられる. 特に, 足首の関節角は地形情報の検知に非常に重要な役割を果たしている. 代表的な地形である斜面について考えた場合に, 斜面上では地面の傾斜角の分だけ足首の関節角が変化する. このことから, VR 空間内の地面の傾斜に合わせたバーチャルな足首の関節角をユーザに知覚させることで, 地形を物理的に再現することなく地形情報の提示をすることが可能であると考えられる.

ユーザにバーチャルな関節角を知覚させる手法として,

本研究では腱に対する経皮電気刺激に注目した。経皮電気刺激とは皮膚上に設置したゲルや皿状の電極から受容器や神経に微弱な電流を印加することで様々な感覚を生じさせる技術のことであり、小型の電流制御装置と電極のみを使用するため、低コストでの実装が可能である。梶本ら[4]は肘の腱に対する経皮電気刺激によって刺激部が押される方向に運動錯覚が生じたことを報告しており、これをゴルジ腱器官が刺激されたことによる現象であることを示唆している。ゴルジ腱器官は筋腱の伸張を検知する器官であることから、足首の腱に対して同様の刺激を行うことでユーザに足首のバーチャルな関節角を知覚させ、地面の傾斜感覚を提示することができると考えられる。

一方で、足首の腱に対する電気刺激によって実際に足首の関節角の感覚が提示され得るかは未だ明らかにされていない。そこで、本研究では足首の腱に対する電気刺激の効果について検証を行う。足首付近には多数の腱が存在するが、特に足部の前後左右方向の運動に関わる腱として、本研究では前脛骨筋腱、アキレス腱、長趾屈筋腱、および長腓骨筋腱に注目する。図1はこれらの腱の位置を示している。また、これらの腱に対する電気刺激によって関節角の感覚が惹起された場合に、それによって足の関節角度が反射的に変化し、身体動揺が誘発されると考えられる。このことから、本研究では刺激対象とした4種類の腱に対して電気刺激を行い、その際の姿勢の変化および姿勢知覚について検証を行う。

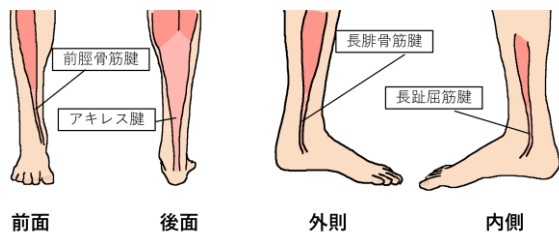


図 1: 刺激対象の腱の位置

2. 方法

刺激対象としたそれぞれの腱上に閉眼状態で電気刺激を行い、刺激中の足圧中心と頭部位置の変化の計測、およびアンケートを用いた主観的な身体傾斜感覚の調査を行った。なお、本実験は東京大学倫理審査研究委員会の承認を得た実験プロトコルに従って実験を行った。

2.1 実験方法

実験参加者は12名（男性11名、女性1名）であり、平均年齢は23.1歳であった。刺激条件は表2に示す5条件とした。図2に各条件において刺激を行う電極の位置を示す。それぞれの条件による刺激は10回ずつ行うこととし、参加者毎に全50試行を無作為な順番で行った。各試行では参加者にロンベルグ姿勢で起立してもらい、その状態で15秒間足圧中心および頭部位置の計測を行った。計測の開始後と終了前のそれぞれ5秒間は電気刺激を行わず、間

の5秒間のみ該当する刺激条件の提示を行った。腱に対する電気刺激を行う条件においては、電流値を上限4mAとした上で参加者の痛覚閾値を超えない最大値に設定し、周波数80Hzの交流矩形波による刺激を行った。計測の終了後に、身体の傾斜感覚についてのアンケートに回答してもらった。

表 2: 刺激条件

条件名	刺激対象 (左足)	刺激対象 (右足)
無刺激	なし	なし
前刺激	前脛骨筋腱	前脛骨筋腱
後刺激	アキレス腱	アキレス腱
左刺激	長趾屈筋腱	長腓骨筋腱
右刺激	長腓骨筋腱	長趾屈筋腱



図 2: 各刺激条件における電極位置

2.2 足圧中心および頭部位置の計測

足圧中心の計測にはバランス Wii ボード（任天堂株式会社）を使用した。計測中は参加者にボードの上に立つてもらうことで足圧中心の2次元座標を記録した。頭部位置の計測にはPOLHEMUS G4（Polhemus, Inc.）を使用した。センサを参加者の頭頂部に固定することで、頭部位置の3次元座標を記録した。これらの計測の周波数は10Hzであった。

2.3 計測後のアンケート

各試行における計測終了後のアンケートでは以下の2つの質問に1~7の7段階で回答してもらった。

- Q1. 左右方向に身体が傾く感じがしましたか？(1:左方向へ大きく傾く感じがした, 4:どちらともいえない, 7:右方向へ大きく傾く感じがした)
- Q2. 前後方向に身体が傾く感じがしましたか？(1:前方向へ大きく傾く感じがした, 4:どちらともいえない, 7:後方向へ大きく傾く感じがした)

2.4 データ解析

1人の参加者につき、足圧中心と頭部位置のそれぞれについて150個×50試行分の時系列データが得られた。参加者間、および参加者内の異なる試行間における初期位置

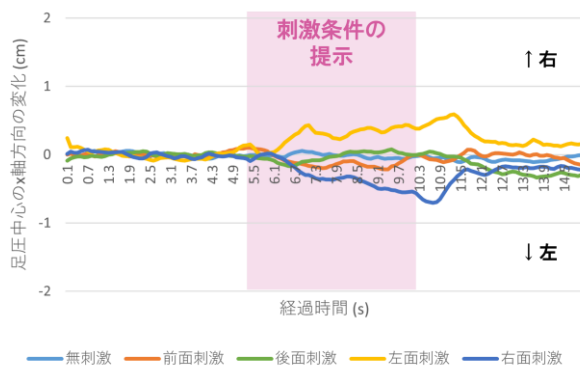
のずれによるデータのばらつきを無くすため、各試行の最初から 5 秒間の足圧中心および頭部位置の平均を計算し、これを時系列データから減算することでベースライン補正を行った。さらに、参加者内の同じ刺激条件による 10 試行の加算平均をとり、得られた時系列データをその条件における計測値とした。

3. 結果

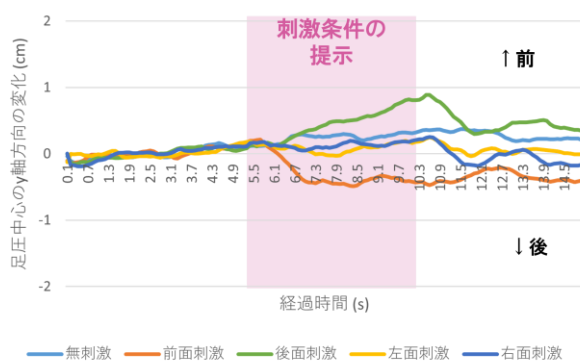
実験の結果については足圧中心および主観的な身体傾斜感覚に限定する。

3.1 足圧中心

図 3 は足圧中心の時系列変化の参加者間平均を示している。この結果に対し、刺激条件の提示中における足圧中心の前後左右方向の最大変位について無刺激条件を対照群とした Steel の方法を用いて多重比較を行ったところ、後方向への最大変位が足首前面の刺激によって無刺激条件と比較して有意に増加した ($p < 0.05$)。その他の刺激条件および最大変位の方向においては有意な差は見られなかった。



(a) x 軸方向の足圧中心の時系列変化



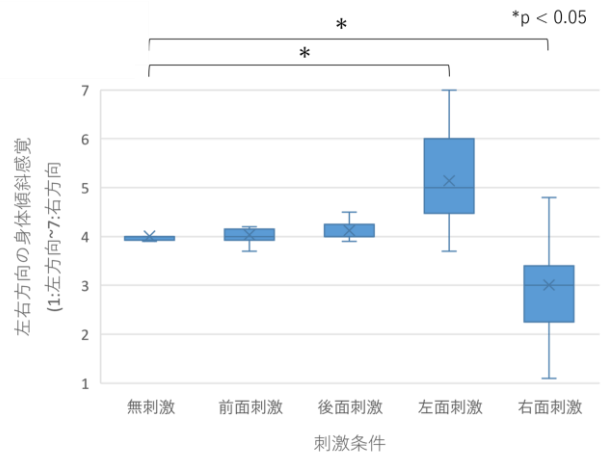
(b) y 軸方向の足圧中心の時系列変化

図 3: 足圧中心の時系列変化

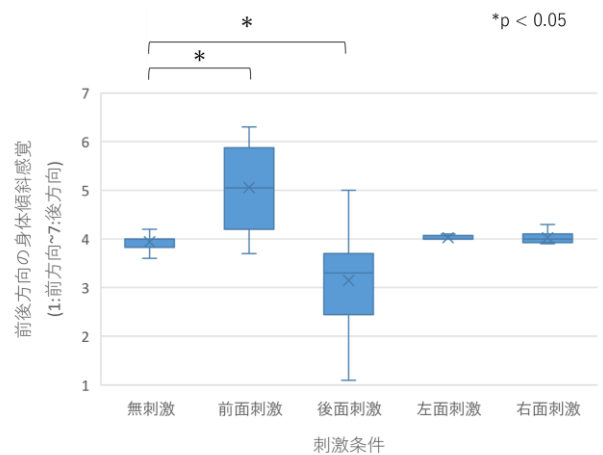
3.2 アンケート

図 4 はアンケートによって得られた主観的な身体傾斜感覚の参加者間平均を示している。この結果に対して無刺激条件を対照群とした Steel の方法による多重比較検定を

行ったところ、足首の前面、後面、左面、および右面の腱への刺激によってそれぞれ後方、前方、右方、左方への主観的な身体傾斜感覚が生じることが明らかになった (いずれも $p < 0.05$)。



(a) 左右方向の身体傾斜感覚



(b) 前後方向の身体傾斜感覚

図 4: 主観的な身体傾斜感覚

4. 考察

図 3,4 より電気刺激によって刺激された腱の反対方向へ実際の身体動揺と主観的な身体傾斜感覚が惹起されたことから、足首の腱への経皮電気刺激は足首の関節角を制御する骨格筋の張力の感覚を惹起し、反射的な関節角の変化とそれに伴う身体動揺を誘発したと考えられる。以下では主観的な身体傾斜感覚と足圧中心の変化の結果に対する考察を述べる。

4.1 主観的な身体傾斜感覚

アンケートの回答結果 (図 4) から、足首の腱に対する電気刺激によって刺激部とは反対方向に主観的な身体傾斜感覚が生じることが明らかになった (いずれの方向についても $p < 0.05$)。先行研究において、腱電気刺激による運

動錯覚は刺激された腱につながる筋の伸長方向に生じることが知られており[4], アンケートによって確認された身体傾斜感覚の方向と一致している. このことから, 足首の腱に対する電気刺激においても先行研究と同様に運動錯覚が生じていると考えられる. 今回の実験では直立状態で刺激が行われており, 足部が床面に固定されていたため, 生じた運動錯覚が前後左右方向の身体傾斜感覚として解釈されたと思われる.

4.2 足圧中心の変化

実験の結果, 足首前面に対する腱電気刺激によって足圧中心の後方への最大変位が有意に増加することが明らかになった ($p < 0.05$). 腱の内部に存在するゴルジ腱器官は筋の収縮に伴う腱の持続的な伸張を検知し, その筋の緊張を抑制する Ib 抑制を起こすことが知られている[5]. また, 梶本ら[4]は腱への電気刺激により生じる運動錯覚がゴルジ腱器官によるものであることを示唆しており, 本実験において確認された足圧中心の変位増大も電気刺激によりゴルジ腱器官が刺激され, Ib 抑制を起こすことで対応する筋の弛緩方向に身体が動いた結果生じたものであると考えられる.

4.3 今後の展望

今回の実験では足首の腱への電気刺激によって前後左右方向への主観的な身体傾斜感覚と身体動揺が誘発された. 一方で, 本手法が床面の傾斜の知覚にどのような影響を与えるかは明らかになっていない. したがって今後の実験では角度を調整可能な床面上で同様の刺激を行い, これによって床面の傾斜知覚が変化し得るかどうかを検証する.

5. 結論

本論文では, 腱への電気刺激を用いて VR 空間と現実空間の地形の差異によって生じる違和感を軽減することを目指し, 足首付近の腱に対する電気刺激が足圧中心および頭部位置の時系列変化と主観的な身体傾斜感覚に与える

影響を検証した. 実験の結果, 足首の腱に対する電気刺激によって刺激位置とは反対の方向に身体の主観的な傾斜感覚および身体動揺が生じることが明らかになった. 今後の実験では足首の腱に対する電気刺激が地面の傾斜知覚に与える影響についても調査し, 最終的にはユーザに地面の傾斜感覚を提示することで VR 空間と現実空間の地形の差異により生じる違和感を軽減する電気刺激手法の実現を目指す.

謝辞 本研究は JST さきがけ (JPMJPR19J1), JSPS 科研費 基盤研究 A (21H04883) の支援を受けて遂行された.

参考文献

- [1] Boletsis, C. (2017). The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 24.
- [2] Schmidt, D., Kovacs, R., Mehta, V., Umaphathi, U., Köhler, S., Cheng, L. P., & Baudisch, P. (2015, April). Level-ups: Motorized stilts that simulate stair steps in virtual reality. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2157-2160).
- [3] Je, S., Lim, H., Moon, K., Teng, S. Y., Brooks, J., Lopes, P., & Bianchi, A. (2021, May). Elevate: A Walkable Pin-Array for Large Shape-Changing Terrains. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-11).
- [4] Kajimoto, H. (2013, April). Illusion of motion induced by tendon electrical stimulation. In *2013 World Haptics Conference (WHC)* (pp. 555-558). IEEE.
- [5] Chalmers, G. (2002). Strength training: do Golgi tendon organs really inhibit muscle activity at high force levels to save muscles from injury, and adapt with strength training?. *Sports biomechanics*, 1(2), 239-249.