



足首腱電気刺激による リダイレクテッドウォーキングの知覚閾値拡大

太田貴士¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 青山一真²⁾, 雨宮智浩³⁾, 鳴海拓志^{1,4)}, 葛岡英明¹⁾

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {ota, matsumoto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 群馬大学情報学部 (〒 371-8510 群馬県前橋市荒牧町 4-2, aoyama@gunma-u.ac.jp)

3) 東京大学情報基盤センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp) 4) JST さきがけ

概要: 実空間よりも広い VR 空間内を自然な歩行感覚を維持しながら移動できる手法であるリダイレクテッドウォーキング (RDW) の応用の幅を広げるには, 知覚閾値の拡大が必要である. 本研究では, 立位時の重心移動を引き起こすことが知られている足首腱電気刺激を RDW に応用することで RDW の知覚閾値を拡大させられると仮説を立て, 足首腱電気刺激が RDW の視覚操作の知覚閾値に及ぼす影響を調べた. 実験により, ユーザが認識できる強度の足首腱電気刺激が RDW の知覚閾値を拡大する可能性が示唆された.

キーワード: リダイレクテッドウォーキング, 経皮電気刺激, 腱電気刺激, 知覚閾値

1. はじめに

近年, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の普及が進み, バーチャルリアリティ (VR) は技能訓練, ゲーム, メタバースなど様々な分野で活用されるようになった. 一般的な VR コンテンツでは, ユーザは実空間よりもはるかに広大な VR 空間で活動するため, VR 空間を移動するための VR ロコモーション手法が必要とされる. VR ロコモーション手法には, コントローラのボタンやスティックの操作により視点を移動させるような身体動作を伴わない手法から, 何らかの身体動作を伴う手法まで様々なものがある. 身体動作を伴う VR ロコモーション手法は, 大きく 3 種類に分類され, トレッドミルや低摩擦のプラットフォーム上での歩行運動に応じて VR 空間での視点を移動させる Repositioning system, 腕振りや足踏みなどのその場でできる歩行運動を模した動作に応じて VR 空間での視点を移動させる Proxy gesture, 実空間でのユーザの位置と姿勢に変換を加えて VR 空間でのユーザ視点に反映することで実空間よりも広い VR 空間での移動を可能にする Redirected walking (RDW) がある [1]. RDW は, 実際の歩行動作を伴うため自然な歩行感覚が得られるという点と, HMD 一式さえあれば他に特別なハードウェアを必要としないという点で優れており, 高い没入感を必要とする VR アプリケーションにとって有望な VR ロコモーション手法である. 違和感や酔いの少ない RDW を実現するためには, ユーザに知覚されない範囲で実際の位置・姿勢と VR 空間での位置・姿勢を変換する必要があり, その限界値は知覚閾値と呼ばれている. 知覚閾値が大きいほど, 広さの限られた実空間内でユーザが違和感なく移動できる VR 空間は広がる. よって, RDW において視点変換の知覚閾値を拡大することは 1 つの重要な

関心事となっている. 本研究では, 立位時の重心移動を引き起こすことが知られている足首腱電気刺激を RDW に応用することで RDW の知覚閾値を拡大させられると仮説を立て, その検証をおこなった.

2. 関連研究

2.1 リダイレクテッドウォーキング

RDW は, 実空間におけるユーザの位置や姿勢に変換を加えたものを, VR 空間でのユーザの位置や姿勢とすることで, 実空間よりも広い VR 空間の歩行を可能にする VR ロコモーション手法である. 位置や姿勢の変換の度合いはゲインと呼ばれ, 変換の手法が異なる様々な種類のゲインがある. 主要なゲインに, 並進移動ゲイン, 回転ゲイン, 曲率ゲインの 3 種類がある. 並進移動量操作は, 実空間での並進移動量に並進移動ゲイン (g_T) をかけることで, VR 空間での並進移動量を拡大・縮小する操作である. 回転量操作は, 実空間での回転量に回転ゲイン (g_R) をかけることで, VR 空間での回転量を拡大・縮小する操作である. 曲率操作は, 実空間での半径 r の円上の移動に対して曲率ゲイン ($g_C = \frac{1}{r}$) をかけることで, VR 空間では直線上に移動しているように知覚させる操作である.

これらの RDW におけるゲインには, ユーザに知覚されない操作量の限界があり, この限界量は知覚閾値と呼ばれている. 知覚閾値が大きいほど広さの限られた実空間内でユーザが体験できる VR 空間は広がるため, 知覚閾値を拡大することは RDW の研究における重要な関心事である. 一般に, 曲率ゲインの知覚閾値は, 二肢強制選択法 (Two-alternative forced choice, 2AFC) を用いた心理物理学実験により計測される [2]. 実験参加者は曲率ゲインが適用さ

れた状態で VR 空間上を直進するように歩行する。(曲率ゲインが適用されているため、このとき実空間では曲がった経路に沿って歩くこととなる。) この体験について、実空間における歩行経路が右曲がりであるか左曲がりであるかを 2AFC で回答する。この手法では、ユーザが視覚操作を知覚できない場合には 2AFC の回答はチャンスレベル (右と左が 50% ずつ) となり、視覚操作を知覚できる場合には 2AFC の回答は右あるいは左のどちらかに偏ると想定して、2AFC の回答がどちらかに偏り始めるときの曲率ゲインを知覚閾値とする。慣例的に右あるいは左の回答が 75% となる曲率ゲインを知覚閾値とされており、先行研究では曲率ゲインの知覚閾値は $g_c = \pm 0.045$ と報告されている [2].

2.2 腱電気刺激

腱電気刺激とは、皮膚表面からの電気刺激により腱に存在するゴルジ腱器官を刺激することで、Ib 反射と呼ばれる抑制性の反射運動を引き起こし、筋が伸長するような力覚を発生させる技術である。この技術を応用した様々なインタフェースとして、手首の腱電気刺激を利用して腕が手の甲から押される感覚を提示する力覚インタフェース [3] などが提案されている。足首の腱への電気刺激についても研究されており、足首に位置する 4 つの腱である前脛骨筋腱、アキレス腱、長腓骨筋腱、長母趾屈筋腱への電気刺激によって、主観的な身体傾斜感覚や刺激部位と反対方向への重心移動が誘発されることが報告されている [4].

3. 実験

3.1 目的

本研究では、足首の内側を走る長母趾屈筋腱と外側を走る長腓骨筋腱への電気刺激の組み合わせにより、左右方向への重心移動が誘発されるという先行研究 [4] の知見を踏まえて、曲率ゲインを用いた RDW に足首腱電気刺激を適用することで、その重心移動効果により実空間の経路の曲がり方が自然に感じられ、曲率ゲインの知覚閾値が拡大されるのではないかと仮説を立てた。

本実験の目的は、足首腱電気刺激の RDW への応用に際して、以下の 3 点を調査することである。1) 足首腱電気刺激は RDW における知覚閾値をどの程度拡大するか。2) 足首腱電気刺激は RDW の知覚閾値拡大に関して残効があるか。3) 電気刺激強度によって知覚閾値拡大効果は異なるか。

3.2 実験参加者と実験環境

実験参加者は大学生・大学院生 4 名 (男性: 4 名) であった。4 名全員が VR を体験したことがあり、視力もしくは矯正視力は正常であった。図 1 に実験の様子を示す。実験は 4m 四方以上の広さのある実験室で行われた。実験参加者は、バックパック PC を背負い、HTC Vive Pro Eye を装着し、両足の足首に先行研究 [4] と同じ構成の電気刺激装置を接続した状態で、曲率ゲインを用いた RDW を体験した。

3.3 実験条件

本実験では、曲率ゲインを適用した RDW における視覚操作の知覚閾値に足首腱電気刺激が及ぼす影響を調べるた

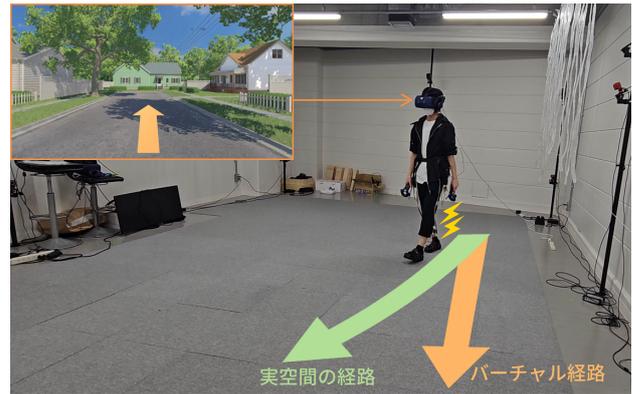


図 1: 実験の様子

め、実験参加者は、異なるゲイン条件と電気刺激条件の組み合わせで RDW を体験した。9 段階のゲイン条件 (g_c : $-0.2, -0.1, -0.05, -0.025, 0, +0.025, +0.05, +0.1, +0.2$), 3 種類の電気刺激条件 (LEFT: 左足の外側と右足の内側を刺激し右方向への重心移動を生起する, NONE: 刺激無し, RIGHT: 左足の内側と右足の外側を刺激し左方向への重心移動を生起する。図 2 を参照。) の組み合わせそれぞれにつき 4 試行, すなわち 108 ($= 9 \times 3 \times 4$) 試行を 1 セットとして、2 日に分けて 4 セットを実施した。電気刺激の波形は Duty 比 50% の 80Hz 両極矩形波であった。

本実験では、足首腱電気刺激の残効を調べるために 2 種類のシャッフル手法、電気刺激の強度により知覚閾値拡大効果が異なるかを調べるために 2 種類の電気刺激強度を設定し、すべての実験参加者がシャッフル手法と刺激強度の組み合わせで計 4 セットの試行を体験するようにした。シャッフル手法には、試行をランダムな順番にする Shuffle と、電気刺激条件が同じ試行をまとめる Block の 2 種類を設定した。電気刺激強度は、電流刺激による痛みを感じない最大の電流値に設定する Perceptible と、電気刺激を知覚できない最大の電流値に設定する Imperceptible の 2 種類とした。すなわち、実験参加者が行う 4 セットの試行群は、Shuffle-Perceptible, Shuffle-Imperceptible, Block-Perceptible, Block-Imperceptible の 4 手法で行われた。これらの 4 セットの体験順序は参加者間でカウンターバランスを取った。

3.4 実験手法

実験参加者は、電気刺激条件に応じた電気刺激を提示された状態で、ゲイン条件に応じた曲率ゲインが適用された RDW で VR 空間中を直進するように歩行した。その後、「左右のどちらに実空間における歩行経路は曲げられたか」という質問に左か右の二肢強制選択で回答した。なお、実空間における歩行経路が曲げられた方向が分からない場合は右あるいは左のどちらかに回答が偏らないようランダムに回答するように指示した。実験参加者は、実験開始前に VR 酔いの程度を計測する Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) に、実験終了後に SSQ, VR 環境におけるプレゼンスを計測する Igroup Presence Questionnaire (IPQ), 実験

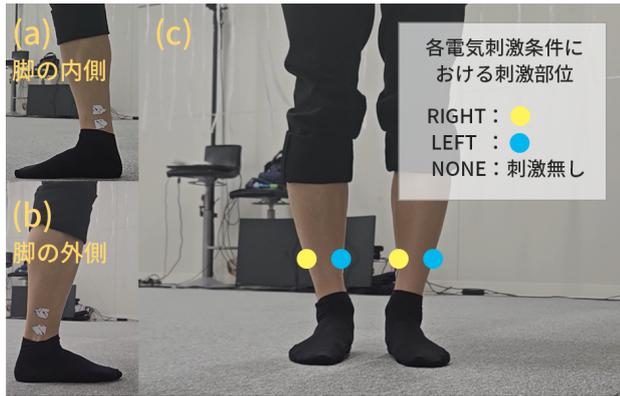


図 2: 足首腱電気刺激における刺激部位。(a) : 脚の内側を走る長母趾屈筋腱の直上への電極配置。(b) : 脚の外側を走る長腓骨筋腱の直上への電極配置。(c) : 各電気刺激条件における刺激部位。

における体験についての口頭のインタビューに回答した。

4. 結果

4.1 電気刺激強度

Imperceptible 条件における調整後の電気刺激強度の参加者間平均 ± 標準誤差は左足の長腓骨筋腱直上が 1.08 ± 0.11 mA, 長母趾屈筋腱直上が 0.53 ± 0.09 mA, 右足の長腓骨筋腱直上が 1.13 ± 0.18 mA, 長母趾屈筋腱直上が 0.65 ± 0.13 mA であった。Perceptible 条件においては左足の長腓骨筋腱直上が 1.93 ± 0.33 mA, 長母趾屈筋腱直上が 1.00 ± 0.25 mA, 右足の長腓骨筋腱直上が 1.95 ± 0.43 mA, 長母趾屈筋腱直上が 1.03 ± 0.23 mA であった。

4.2 知覚閾値

表 1 に、それぞれのシャッフル手法と電気刺激強度調整手法の組み合わせにおける、各電気刺激条件での知覚閾値を示す。Psignifit¹を用いて、各ゲイン条件において実空間の経路が曲げられた方向を「右」と回答した回数を累積ガウス関数にフィッティングし、そのフィッティング結果の累積ガウス関数における、割合が 25%, 50% (主観的等価点, PSE), 75% となるゲインの値を取得し、25%~75% の区間を RDW の視覚操作を知覚できない範囲 (閾値範囲) とした。25% の閾値と 75% の閾値は、それぞれ左方向と右方向に実空間の経路を曲げる視覚操作の知覚閾値である。感覚強度曲線を用いた閾値推定では、実験参加者ごとに閾値を求めてその平均値を算出するという解析手法が一般的だが、本研究では多くのシャッフル手法と電気刺激調整手法について広く調べたため、各条件におけるデータ数が少なく一般的な解析手法では正常な推定が困難である。よって、全参加者の 2AFC の回答をまとめて累積ガウス関数によるフィッティングを行い知覚閾値を推定した。

¹<https://uni-tuebingen.de/en/fakultaeten/mathematisch-naturwissenschaftliche-fakultaet/fachbereiche/informatik/lehrstuehle/neuronale-informationsverarbeitung/research/software/psignifit/>

表 1: 各シャッフルおよび電気刺激手法における知覚閾値

(a) Shuffle-Imperceptible の場合			
	RIGHT	LEFT	NONE
25%	-0.0765	-0.0706	-0.0987
50% (PSE)	-0.0017	0.0007	-0.0185
75%	0.0798	0.0735	0.06163
閾値範囲	0.1564	0.1441	0.1603
(b) Shuffle-Perceptible の場合			
	RIGHT	LEFT	NONE
25%	-0.0931	-0.0611	-0.0795
50% (PSE)	0.0025	0.0415	0.0258
75%	0.0981	0.1440	0.0743
閾値範囲	0.1911	0.2050	0.1538
(c) Block-Imperceptible の場合			
	RIGHT	LEFT	NONE
25%	-0.0428	-0.0567	-0.0424
50% (PSE)	0.0158	0.0017	0.0311
75%	0.0744	0.0601	0.1046
閾値範囲	0.1172	0.1168	0.1470
(d) Block-Perceptible の場合			
	RIGHT	LEFT	NONE
25%	-0.0814	-0.0703	-0.0664
50% (PSE)	0.0036	0.0218	0.0006
75%	0.0743	0.1139	0.0651
閾値範囲	0.1557	0.1841	0.1314

Imperceptible 条件 (表 1 (a), (c)) においては、足首腱電気刺激による顕著な知覚閾値拡大効果は確認されなかった。むしろ、閾値範囲は電気刺激無し条件 (NONE 条件) よりも電気刺激あり条件 (RIGHT 条件, LEFT 条件) の方が小さいため、知覚閾値以下の電気刺激により曲率ゲインの知覚閾値が縮小されることが示唆された。

Perceptible 条件 (表 1 (b), (d)) においては、NONE 条件と比較して、RIGHT 条件で 25% の閾値が拡大され、LEFT 条件で 75% の閾値が拡大される傾向が確認された。すなわち、左方向の重心移動を引き起こす足首腱電気刺激 (RIGHT 条件) は、左方向に実空間の経路を曲げる視覚操作の知覚閾値を拡大させ、右方向の重心移動を引き起こす足首腱電気刺激 (LEFT 条件) は、右方向に実空間の経路を曲げる視覚操作の知覚閾値を拡大させる可能性が示唆された。

また、Shuffle 条件と Block 条件でその知覚閾値拡大効果の傾向に大きな違いは確認されなかった。もし、足首腱電気刺激の残効があると仮定すると、Shuffle 条件では後の試行の知覚は前の試行の電気刺激条件の影響を受けるため、Shuffle 条件の知覚閾値拡大効果は Block 条件の閾値拡大効果ほど顕著に観察されないと考えられる。そのため、この結果から本実験のようなユースケースにおいては足首腱電

表 2: SSQ の結果

(a) 実験開始前				
	Nausea	Oculo..	Disori..	Total
平均	2.39	7.58	5.22	6.08
標準誤差	1.56	3.20	3.66	2.91
(b) 実験終了後				
	Nausea	Oculo..	Disori..	Total
平均	11.93	22.74	19.14	21.04
標準誤差	5.02	5.55	5.85	4.41

表 3: IPQ の結果

	G Pres..	S Pres..	Involve..	Realism
平均	4.25	4.08	2.69	2.31
標準誤差	0.56	0.33	0.31	0.52

気刺激の残効は無視できるものであることが示唆された。

4.3 SSQ

表 2 に実験開始前と実験終了後の SSQ の結果を示す。実験終了後の Total の平均が一般的な VR 酔いのボーダーラインである 20 を超えていることより、本実験手法は VR 酔いになりやすいことが示唆された。

4.4 IPQ

表 3 に IPQ の結果を示す。General Presence (G Pres..) の平均は 4 以上であることより、本研究の実験は一定の没入感を保って行われたことが示唆された。

5. 考察

5.1 足首腱電気刺激の知覚閾値拡大効果について

Perceptible 条件において、左方向の重心移動を引き起こす足首腱電気刺激 (RIGHT 条件) は、左方向に実空間の経路を曲げる視覚操作の知覚閾値を拡大させ、右方向の重心移動を引き起こす足首腱電気刺激 (LEFT 条件) は、右方向に実空間の経路を曲げる視覚操作の知覚閾値を拡大させる可能性が示唆された。これより、適用したいゲインに応じて電気刺激の条件 (RIGHT 条件または LEFT 条件) を切り替えることで、全体的な RDW の閾値範囲を大幅に拡大できることが期待される。本研究は実験参加者が 4 名と限定的であるため、得られた結果を一般化することはできないが、RDW に足首腱電気刺激を併用することの有効性が示唆された。

5.2 足首腱電気刺激の残効について

Shuffle 条件と Block 条件で知覚閾値拡大効果に顕著な違いが確認されなかったことより、本実験のように 10 秒間程度の刺激提示と 20 秒間程度 (2AFC の回答と次の試行の開始位置への移動にかかる時間) の刺激の停止を繰り返すようなユースケースにおいては、足首腱電気刺激の残効による効果は現れないことが示唆された。ただし、本実験は実験参加者が 4 名であったため、より多くの実験参加者の実験

による再検証が必要である。また、本研究では試行の間隔が約 20 秒程度であったが、より短い間隔で足首腱電気刺激を用いた RDW を使用する場合に残効が生じないかについては、さらなる検証が求められる。

5.3 足首腱電気刺激の強度について

足首腱電気刺激条件の強度によって知覚閾値拡大効果が異なることが示唆された。上述の通り Perceptible 条件では、足首腱電気刺激が知覚閾値を拡大するという結果が得られたが、Imperceptible 条件では、足首腱電気刺激のある条件で閾値範囲が小さくなった。Imperceptible 条件で閾値範囲が小さくなったのは、感覚受容器にノイズを加えることで微弱な信号が知覚されるようになる現象である確率共鳴によるものと考えられる。知覚閾値以下の電気刺激がノイズとして足首の体性感覚の精度を向上させるように働き、感覚統合における体性感覚の相対尤度の向上と視覚の相対尤度の低下が引き起こされ、RDW の視覚操作の影響が下がって閾値範囲が縮小されたと考えられる。

6. おわりに

本研究では、RDW の知覚閾値拡大という目的のもと、足首腱電気刺激を RDW に応用するにあたり基礎的な検討を行った。4 名の実験参加者を対象とした実験により、足首腱電気刺激が RDW の知覚閾値を拡大する可能性が示唆された。今後は、本実験により得られた知見をもとに実験手法を再考して、より多くの実験参加者を対象に実験を行い、RDW における足首腱電気刺激の有効性を示したい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (22K17929, 21H03477, 21H04883, 22H03628) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] N. Nilsson, S. Serafin, F. Steinicke, R. Nordahl: Natural Walking in Virtual Reality: A Review, Computers in Entertainment, Vol. 16, No. 2, pp. 1-22, 2018.
- [2] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, M. Lappe: Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 16 No. 1, pp. 17-27, 2010.
- [3] A. Takahashi, K. Tanabe, H. Kajimoto: Haptic interface using tendon electrical stimulation with consideration of multimodal presentation, Virtual Reality & Intelligent Hardware, Vol. 1, No. 2, pp. 163-175, 2019.
- [4] N. Takahashi, T. Amemiya, T. Narumi, H. Kuzuoka: Sensation of Anteroposterior and Lateral Body Tilt Induced by Electrical Stimulation, Frontiers in Virtual Reality, Vol. 3, 2022.