



## 前庭電気刺激を用いた着座姿勢における疑似歩行感覚の生起

小山大嘉<sup>1)</sup>, 青山一真<sup>2,3)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>, 葛岡英明<sup>1,2)</sup>, 雨宮智浩<sup>1,2)</sup>

Taiga OYAMA, Kazuma AOYAMA, Takuji NARUMI, Hideaki KUZUOKA, Tomohiro AMEMIYA

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,  
{oyama,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 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1,  
{aoyama,amemiya}@vr.u-tokyo.ac.jp)

3) 東京大学先端科学技術研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

**概要:** 視触覚刺激などの多感覚刺激によって着座姿勢のままでも擬似的な歩行感覚を提示する手法が提案されている。中でも前庭感覚は加速度を受容する感覚であり、歩行感覚の向上に重要な役割を果たしている。しかしながら、先行研究では座席型前庭感覚ディスプレイのような機械刺激が用いられており、大掛かりなデバイスが必要であった。そこで本研究では前庭電気刺激 (GVS) で前庭感覚を刺激することを提案する。本稿では疑似歩行体験中に乳様突起部に歩行周期と同期した交流 GVS と noisy GVS の刺激をアンケートを行った結果、歩行周期と同期した交流 GVS により歩行感覚が向上することを明らかにした。

**キーワード:** 疑似歩行感覚, 前庭電気刺激, バーチャルリアリティ, No Motion VR

### 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 空間内を移動する感覚を提示する方法は様々なものが提案されている。広さに制約のある現実空間を用いて広さに制約のない VR 空間内を移動するための手法として、トレッドミルを使う方法 [1] や、ユーザに提示する視覚情報をユーザが気づかない程度に操作することで VR 空間を現実空間の大きさに圧縮するリダイレクテッドウォーキング [2] などが挙げられる。こうした手法は VR 空間を歩き回ることには有効ではあるが、空間的あるいは身体的にユーザの歩行が困難な場合には適用することができなかった。

そのようなユーザに対して、着座姿勢のまま擬似的な歩行感覚を提示する手法について様々な研究がなされてきた。北崎ら [3] は視覚情報と同期した足底への触覚刺激により、加藤 [4] らは足底に摩擦を提示することにより、それぞれ歩行感覚を向上させられることを明らかにした。また、雨宮ら [5] は、椅子型の前庭感覚ディスプレイでリフト方向とヨー方向の前庭感覚刺激を歩行周期と同期させて与えることで、歩行感覚が向上することを明らかにした。海野ら [6] は、リフト・ロール・ピッチ運動の前庭感覚ディスプレイにヨー回転運動を加えることによって、直線だけではなく旋回歩行感覚が向上することを明らかにした。

これらの研究から、前庭感覚を歩行周期と同期させて刺激することによって、着座姿勢においても疑似歩行感覚を高めることが可能であると考えられる。しかし、これらの椅子型の前庭感覚ディスプレイは、実際に身体揺動を起こすため、違和感のない前庭感覚提示が実現できる一方で、大

掛かりや機構を必要とするために高コスト化・巨大化しやすく、導入費用や設置場所の点において課題がある。これらとは対照的なアプローチとして、感覚器官への刺激によって歩行の際の前庭感覚刺激を表現する手法が考えられる。

ユーザの感覚器官に前庭感覚を提示する手法として、本研究では前庭電気刺激 (GVS) に注目した。GVS とは、頭部などに設置した電極から流した電気で加速度感覚を受容する器官である前庭を刺激することによって前庭器官に加速度が発生した時と同様の作用を人工的に生成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して前庭感覚が提示できるため、低コストでの実装が可能で、大型の装置を必要としない [7, 8]。しかし、GVS を着座姿勢で使用することで疑似歩行感覚が向上され得るかは未だ解明されていない。GVS で疑似歩行感覚を提示しようとする場合、GVS を歩行周期に合わせて提示することが有効と考えられる。その方法はいくつか考えられるが、本研究では以下の 2 種類の刺激方法を用いる。1 種類目として歩行周期に合わせて電極の向きを交互に切り替える方法について検討することとし、まず歩行周期に合わせた前庭電気刺激で誘発された身体揺動により歩行感覚が向上するかどうかを検証した。なお、GVS では、電極の配置に応じて 3 軸の加速度が提示できる。本研究では歩行に伴う頭部の左右方向の動揺に着目し、左右方向の加速度を提示する GVS を用いることとする。また、2 種類目の刺激方法として、noisy GVS (nGVS) に着目する。nGVS とは、前庭電気刺激として微弱なノイズ電流を流す刺激であり、nGVS により前庭感覚への入力情報の信頼性を低下させることで VR 酔いが

表 1: 電気刺激条件

| 条件名         | 刺激                       |
|-------------|--------------------------|
| without GVS | 電気刺激なし（電極装着）             |
| with nGVS   | 最大振幅 0.3mA のガウス分布に従う GVS |
| with GVS    | 周期 1.4s, デューティ比 50%の矩形波  |

減少することが報告されている [9]。よって振幅が加速度感覚の知覚閾値以下の nGVS を提示することで VR 酔いが減少するの検証も行う。

これらを踏まえ、本研究では、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いた着座姿勢での疑似歩行体験中に歩行に同期した交流 GVS と nGVS の 2 種類の前庭電気刺激を行い、その際の歩行感覚の変化について検証を行う。

## 2. 実験

### 2.1 目的

本実験の目的は、HMD を用いた着座姿勢での疑似歩行体験中に、歩行に同期した交流 GVS と nGVS の 2 種類の前庭電気刺激によって歩行感覚が向上するかどうかを検証することである。本実験では、実験参加者が椅子に座った状態で HMD、振動子付きサンダルを装着させ、HMD で VR 空間を歩行する映像を提示する。その際、振動子によって足底に歩行と同期した触覚を提示するとともに、左右の乳様突起上に配置した電極から電気刺激を行い、疑似歩行感覚を提示した。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（倫理審査番号 2 1-11 5）。

### 2.2 実験方法

実験参加者は 10 名（男性 9 名、女性 1 名）であり、平均年齢は 23.6 歳であった。実験は参加者内計画で行い、条件として表 1 に示す 3 条件の電気刺激を設定した。with nGVS 条件では  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 0.15mA$  に従うホワイトガウスノイズ ( $2\sigma$  以上の信号は  $2\sigma$  に設定) を用いた。GVS により誘発される加速度感覚の知覚閾値は 0.3mA から 0.4mA である [8] ことから、この刺激では加速度誘発は知覚されない。また with GVS 条件での電流値は、実験前に 0.5mA から 0.1mA ずつ電流を流していき、各参加者が加速度を知覚した最小の電流値を用い、その電流値と逆向きの電流値の矩形波を用いた。それぞれの条件における刺激は 4 回ずつ行うこととし、参加者毎に全 12 試行を行った。順序効果を防ぐために無作為な順番になるように参加者ごとに順序を割り付けて行われた。

実験参加者は着座姿勢で HMD (HTC VIVE Cosmos Elite) を装着し、20 秒間の映像と足底振動の刺激の提示を受けた。疑似歩行に用いる VR 環境のシーン作成と提示には Unity2019 を用い、図 1 のような映像を提示した。松本ら [10] の実験で計測された VR 体験中の平均歩行速度である 1.32m/s を移動速度とした直線歩行映像を作成して利

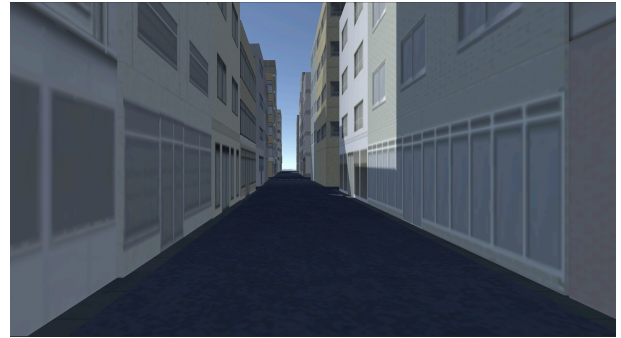


図 1: 疑似歩行体験時に HMD に表示される映像の例



図 2: 実験の様子

用した。参加者はボイスコイル型振動子 (Vibro-Transducer Vp416) を踵部分に装着したサンダルを装着し、疑似歩行中はアンプ LP-168S で増幅処理を経た歩行音を 1 歩行周期が 1.4 秒 [11] となるように左右の足底に交互に提示した [12]。また、電気刺激用のゲル状の電極を左右の乳様突起上に装着した。実験中、実験参加者は耳栓を装着し、足音や装置の動作音などを遮断した。参加者は疑似歩行中は背もたれにもたれかからず、できるだけ姿勢を変えることなくまっすぐ進行方向を向くよう指示された。20 秒の疑似歩行体験の後、把持しているコントローラでシーン上に出てくるアンケートに回答させた。以上の操作をすべての条件に対して行った。必要であれば適宜休憩を実施した。実際の実験の様子は図 2 の通りである。

### 2.3 試行後のアンケート

各試行における疑似歩行終了後のアンケートでは、表 2 の 6 つの質問に 0~100 の Visual Analogue Scale (VAS) で回答させた。なお、Q1 から Q4 は実際の歩行の際に感じる感覚を 100、全く感じないを 0 とする基準を設け、Q5 と

表 2: 質問項目

|                   |   |
|-------------------|---|
| Q1(SelfMotion)    | 体全体が前に進んだ感覚がした (I felt that my whole body was moving forward)   |
| Q2(Walking)       | 前に歩いた感覚がした (I felt like I was walking forward)  |
| Q3(LegAction)     | 足が地面につくような感覚がした (I felt like my feet were striking the ground)  |
| Q4(Telepresence)  | 実際にその場にいる感覚がした (I felt like I was actually there in the scene)  |
| Q5(Cybersickness) | 吐き気やくらくらするなどの乗り物酔いに似た不快感があった (I had symptoms similar to motion sicknesses such as nausea and lightheadedness) |
| Q6(Acceleration)  | 体が左右に揺れた感覚がした (I felt like my body swayed from side to side)  |

Q6 は強く感じるを 100, 全く感じないを 0 とする基準を設けた。なお, Q1 から Q4 に関しては北崎ら [3] の研究をもとにし, Q5 と Q6 は新たに追加した質問である。Q5 に関しては Simulator Sickness Questionnaire(SSQ)[13] の項目が多いため今回は 1 つの質問を VAS で聞くこととした。

2.4 実験結果

それぞれの条件, 設問への回答結果は図 3 のようになった。アンケートの各設問への回答に対して GVS 刺激条件を要因とする反復測定の一元配置分散分析を実施した結果, Q1 から Q6 のすべてにおいて主効果に有意差が認められた (いずれも  $p < 0.05$ )。また下位検定として Tukey 検定を行ったところ, Q1,Q2 において without GVS 条件と with GVS 条件の間に有意差が, Q4,Q5,Q6 において without GVS 条件と withnGVS 条件の間及び without GVS 条件と with GVS 条件の間に有意差がそれぞれ認められた ( $p < 0.05$ )。

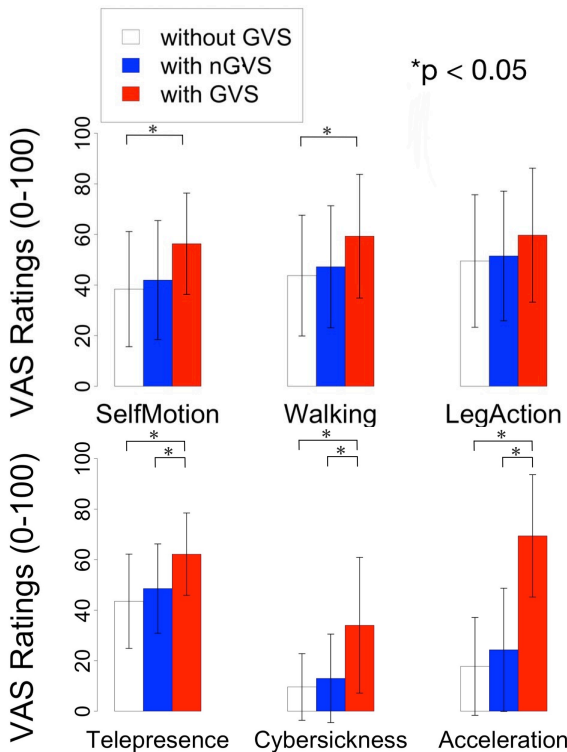


図 3: GVS 刺激条件に対する各 VAS 評定値

3. 考察

図 3 のアンケートの結果より, SelfMotion, Walking, Telepresence の項目で, with GVS 条件の VAS 評定値が without GVS 条件の VAS 評定値よりも有意に大きかった。これらのことから, 一般的な歩行周期に近い交流 GVS は歩行感覚を向上させ得ると判断できる。これらの要因として, 前庭刺激の周期が歩行周期と同期していた事が挙げられる。歩行周期と同期した足底振動は歩行感覚を向上させるが, 歩行のリズムのような周期性がない足底振動では向上しないことが報告されている [3][14]。よって前庭刺激も歩行周期のような周期性を有することが重要であると考えられる。また, 1.0Hz 以下の周波数を持った GVS によって, 視野の中心を回転中心とした回旋運動が知覚されることが報告されている [15]。本実験で用いられた周波数は 0.714Hz であり, 実験後の自由記述コメントで, 視界の僅かな揺れは本物の歩行に近い感覚があったというものがあった。この視界の変化も歩行感覚向上に寄与したと考えられる。

しかし, Cybersickness の項目も without GVS の値より with GVS の値の方が有意に大きかった。これは歩行感覚と VR 酔いに負の相関があることを報告した先行研究 [5] と一致しなかった。この要因として, 雨宮らの先行研究は上下方向や回転方向に機械的な前庭刺激を行っていたのに対し, 本実験では GVS により左右方向に加速度を生起させていた事, GVS では重心移動に伴う体性感覚情報などが再現されない事が考えられる。上下方向やヨー方向に加速度を発生させる GVS の刺激方法 [16] も報告されているため, 今後の使用を検討する。

with nGVS 条件と without GVS 条件の間で有意に差がある項目は無かった。特に, nGVS は前庭感覚の信頼性を下げ, VR 酔いの低減に効果があると予想されたが, 実験結果では VR 酔いの指標と統計的な有意差は認められなかった。nGVS によって VR 酔いが減少しなかった原因として, 等速直線の歩行映像はそもそも VR 酔いが起こりにくいことが考えられる。旋回運動や加速, 減速を伴った歩行においては nGVS が VR 酔い軽減に有効である可能性があるため, 今後より酔いやすい VR 環境で追加の検証をおこなっていく。また, VR 酔いの質問として SSQ を用いず, 1 つの質問にまとめてしまったことも原因の 1 つと考えられる。

また, 本実験では歩行感覚の評価を主観評定のみで行った。主観評定のみでは意識にのぼらない変化を汲み取るこ

とは難しいため、雨宮ら [14] が行った胸部への触覚刺激への反応時間から身体近傍空間の変化を測定する手法などの客観的な指標を用いて歩行感覚を測定することを検討していきたい。

#### 4. おわりに

本論文では着座姿勢における疑似歩行感覚の向上を目的として、乳様突起部への GVS を用いた前庭感覚への刺激が歩行感覚へ与える影響を検証した。実験の結果、歩行周期と同期した交流の GVS により歩行感覚が向上することが明らかになった。今後の実験では、VR 酔いの軽減、さらなる歩行感覚向上を目指し、方向を変えた GVS や客観的指標を用いて調査する。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 21H04883,22H03628 の助成を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] H. Iwata, "Walking about virtual environments on an infinite floor," in *Proc. IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 286–293, 1999.
- [2] S. Razzaque, Z. Kohn, and M. C. Whitton, "Redirected Walking," in *Proc. Eurographics 2001*, Eurographics Association, 2001.
- [3] M. Kitazaki, T. Hamada, K. Yoshiho, R. Kondo, T. Amemiya, K. Hirota, and Y. Ikei, "Virtual Walking Sensation by Prerecorded Oscillating Optic Flow and Synchronous Foot Vibration," *i-Perception*, vol. 10, no. 5, pp. 1–14, 2019.
- [4] G. Kato, Y. Kuroda, K. Kiyokawa, and H. Takemura, "Force rendering and its evaluation of a friction-based walking sensation display for a seated user," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 24, no. 4, pp. 1506–1514, 2018.
- [5] T. Amemiya, M. Kitazaki, and Y. Ikei, "Pseudo-Sensation of Walking Generated by Passive Whole-Body Motions in Heave and Yaw Directions," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 80–86, 2020.
- [6] M. Unno, Y. Vibol, T. Amemiya, M. Kitazaki, and Y. Ikei, "Yaw-rotational Vestibular Stimulation for Virtual Turning Walking," vol. 27, no. 1, pp. 29–32, 2022.
- [7] T. Maeda, H. Ando, T. Amemiya, N. Nagaya, M. Sugimoto, and M. Inami, "Shaking the world: Galvanic vestibular stimulation as a novel sensation interface," in *Proc. ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies*, 2005.
- [8] 青山一真, 安藤英由樹, 飯塚博幸, and 前田太郎, "前庭電気刺激における逆方向不感電流を用いた加速度感覚の増強," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 19, no. 3, pp. 315–318, 2014.
- [9] S. Weech, T. Wall, and M. Barnett-Cowan, "Reduction of cybersickness during and immediately following noisy galvanic vestibular stimulation," *Experimental Brain Research*, vol. 238, no. 2, pp. 427–437, 2020.
- [10] 松本直司, 清田真也, and 伊藤美穂, "街路空間特性と歩行速度の関係," *日本建築学会計画系論文集*, vol. 74, no. 640, pp. 1371–1377, 2009.
- [11] K. Yamaoka, R. Koide, T. Amemiya, M. Kitazaki, V. Yem, and Y. Ikei, "Rendering of Walking Sensation for a Sitting User by Lower Limb Motion Display," in *International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*, 2019.
- [12] T. Amemiya, Y. Ikei, and M. Kitazaki, "Remapping Peripersonal Space by Using Foot-Sole Vibrations Without Any Body Movement," *Psychological Science*, vol. 30, no. 10, pp. 1522–1532, 2019.
- [13] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, "Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness," *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993.
- [14] 雨宮智浩, 池井寧, 広田光一, and 北崎充晃, "歩行を模擬した足底振動刺激による身体近傍空間の拡張," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 21, no. 4, pp. 627–633, 2016.
- [15] 永谷直久, 杉本麻樹, 新居英明, 前田太郎, 北崎充晃, and 稲見昌彦, "前庭感覚電気刺激による視覚への影響," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 10, no. 4, pp. 475–484, 2005.
- [16] K. Aoyama, H. Iizuka, H. Ando, and T. Maeda, "Four-pole galvanic vestibular stimulation causes body sway about three axes," *Scientific Reports*, vol. 5, p. 10168, 2015.