



足の甲への振動触覚刺激による歩行感覚の生成

Generating Walking Sensation by Vibrotactile Stimulation to the Foot-instep

伊藤充¹⁾, 小川勇¹⁾, 雨宮智浩²⁾

Mitsuru ITO, Isamu OGAWA, and Tomohiro AMEMIYA

1) 三菱電機株式会社 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1,

Ito.Mitsuru@dr.MitsubishiElectric.co.jp, Ogawa.Isamu@ah.MitsubishiElectric.co.jp)

2) 東京大学 情報基盤センター (〒113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では, 足の甲への振動触覚刺激による歩行感覚を調査した. 足底への振動刺激は, 着座状態か立位状態の際条件で歩行感覚を生じることが知られているが, 足と地面によってアクチュエータに加えられる圧力が刺激を減衰させる課題がある. この課題を解決するため, 足底ではなく足の甲に刺激を与えるために, 片足につき 2 つのアクチュエータを備える触覚デバイスを試作した. 足底歩行刺激の設計理論に基づいた我々のシステムは, 刺激の知覚とエネルギー効率において優れている. 予備実験では, 参加者は足の甲に装着された触覚デバイスを体験し, 足の甲で知覚された触覚の見かけの動きが歩行感覚を高めたと報告した.

キーワード: 移動感覚, 歩行感覚, 触覚, 振動触覚

1. はじめに

歩行中に起こるような感覚を模擬した振動触覚刺激は, 足の裏に適用することで, 着座状態でも身体近接空間を拡張し, 移動感覚を生じさせる [1]. 従来の移動表現のための触覚刺激による移動感覚表現は, 主に足裏への振動刺激に依存しているため [2, 3], 地面や足裏からの圧力によってアクチュエータが圧迫されることにより振動刺激が抑制されるという重大な課題を有している. この課題に対し, 足の甲への触覚刺激は, このようなアクチュエータの圧迫による振動抑制の問題を完全に解決し, 足裏の感覚の知覚を妨げない利点を持つ [4]. したがって, 足の甲への歩行触覚システムは, 消費電力に対して触覚伝達のエネルギー効率に優れており, デバイスの装着中に自然な姿勢を維持しつつ, 様々な身体動作の状況で動きの感覚を生み出すことができる手法であると考えられる. しかし, これまでの研究では, 足の甲への触覚刺激によって引き起こされる移動感覚については未だ調査されていない.

本論文では, 足の甲と足の裏に触覚デバイスを使用し歩行感覚を調査する. 予備実験では, 参加者は足の甲に装着された歩行触覚デバイスを体験し, 足の甲で知覚された触覚の流れが歩行感覚を高めたと報告した.

2. 触覚刺激とデバイス

図 1(a) および (b) は, 足の甲および足底の条件でのアクチュエータ配置を示す. 図 2 は足の甲と足底のアクチュエータ配置を示す. 足の甲および足底の条件でのアクチュエータ間の距離は, それぞれ 10 cm および 13 cm として設定された. 足の甲におけるアクチュエータの配置は, 二点識別閾値 [5] を超える距離で決定され, 足底の条件の前後のセグメントに対応する. 触覚信号 S は, 振動周波数の搬送波と刺激時間の変調信号によって以下のように振幅変調される.

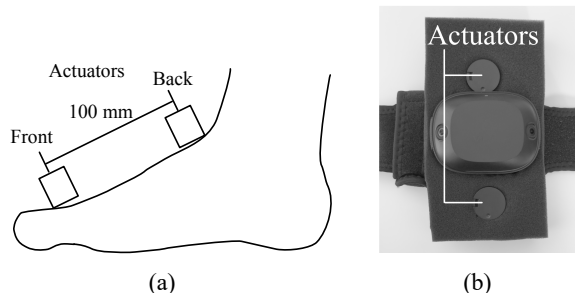


図 1: アクチュエータの配置および触覚信号. (a) 足の甲の条件におけるアクチュエータ配置の側面図. (b) 足の甲に装着されたデバイスの外観.

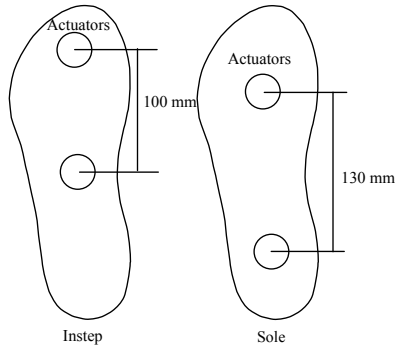


図 2: 足の甲および足底の条件におけるアクチュエータ配置の底面図.

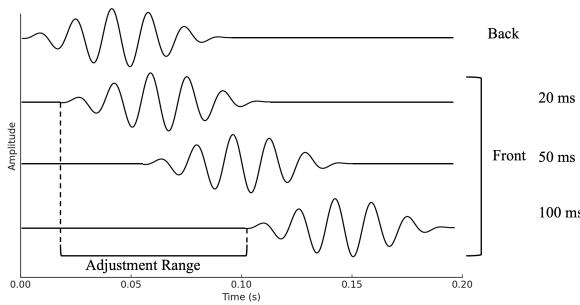


図 3: 足の前後における触覚信号提示のタイミング (刺激持続時間: 100 ms). 刺激間開始間隔 (ISOI) は 20 ms、50 ms、および 100 ms である.

$$S(t) = [1 + M \sin(2\pi f_m t)] \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

ここで、 f_m および f_c はそれぞれ変調周波数および搬送周波数を表す。 M は触覚刺激の調整強度に応じて調整される 0 から 1 の範囲の定数である。振動刺激条件は、先行研究に基づいて決定された [1].

図 3 は、片足の二つのアクチュエータにおける触覚信号と駆動タイミングを示す。 f_c は 60 Hz、 f_m は 2.5 Hz および 5 Hz が使用された。単一振動の非ゼロ振幅の持続時間は 100 ms および 200 ms であった。歩行の周期は 100 ステップ/分として提示された。足底および足の前部に与えられる刺激の開始時間は、「刺激間開始間隔」(ISOI) として決定された。歩行感覚の調査では、触覚の見かけの動きを考慮して、ISOI は 20 ms、50 ms、および 100 ms が使用された [5].

刺激は、足の前後方向の順序で二点に提示された。足に対する二つの触覚刺激は、足の後部の後に前部に提示された。触覚刺激の強度は、明確に触覚閾値を超えるように設定された。触覚デバイスは、片足に二つのアクチュエータ (639897, Foster Electric) で構成された。合計で四つのアクチュエータが両足に配置された。

3. 実験

3.1 手続き

11 人の健康な有償ボランティア (年齢: 平均 22.6 歳, 標準偏差 1.9 歳) が実験に参加した。研究に含まれる全ての個々の参加者からインフォームドコンセントが取得された。この研究は、東京大学大学院情報理工学系研究科倫理委員会 (UT-IST-RE-231017) の承認を受けた。実験は座位で行われた。参加者には、足に歩行を模倣した触覚刺激が 5 秒間提示され、その後アンケートに回答するよう求められた。アンケートでは、参加者は「私は歩いていると感じた」という質問に対して、Visual Analog Scale (VAS) を使用して ±50 の範囲で回答した。さらに、「刺激を別々に感じた」という質問に対して “はい” (1) または “いいえ” (0) を選択するよう求められた。20 ms、50 ms、100 ms の 3 つの ISOI と、100 ms と 200 ms の 2 つの刺激持続時間が使用された。各 ISOI で 8 つの刺激がランダムに参加者に提示された。

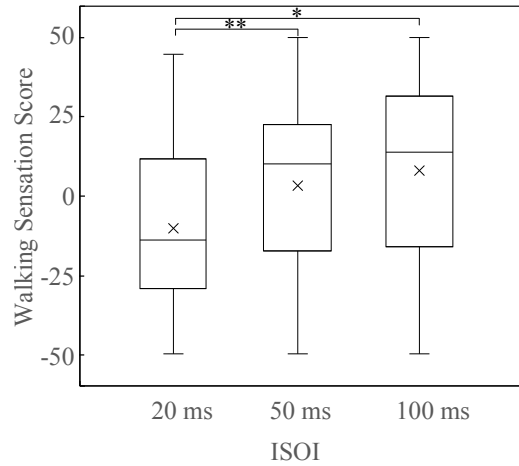


図 4: 歩行感覚スコア (VAS) および識別率. 足底の条件の VAS (* $p < .05$, ** $p < .01$).

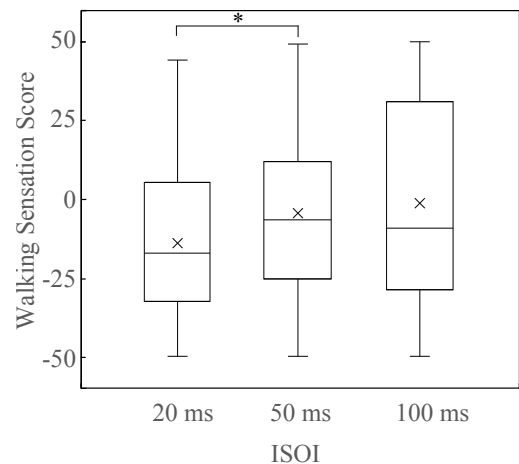


図 5: 歩行感覚スコア (VAS) および識別率. 足の甲の条件の VAS (* $p < .05$, ** $p < .01$).

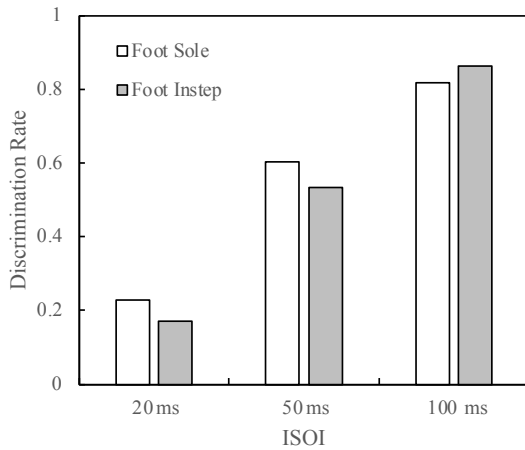


図 6: 歩行感覚スコア (VAS) および識別率. 二点刺激の識別率 (刺激持続時間: 100 ms).

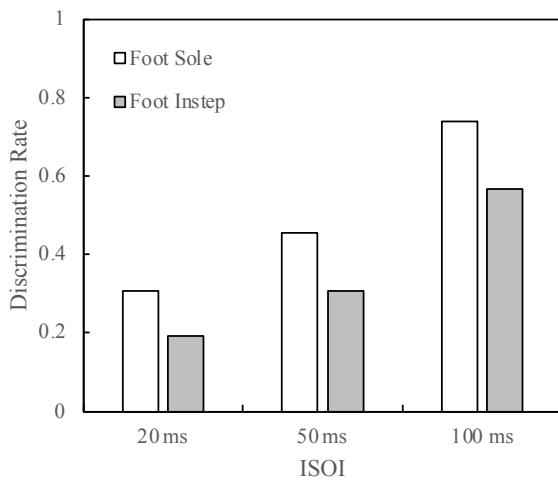


図 7: 歩行感覚スコア (VAS) および識別率. 二点刺激の識別率 (刺激持続時間: 200 ms).

3.2 結果

図 4 および 5 は VAS の回答の結果を示す. 足の甲の条件では, ボンフェローニ補正を用いた対応のある t 検定の結果, 最も低い歩行感覚スコアは 20 ms の ISOI 条件であり, 50 ms の条件で VAS スコアが向上した ($p < .05$). 図 6 および 7 は, 足の前方と後方の 2 点の触覚刺激の識別率の結果を示す. 3 つの ISOI の中で最もチャンスレベルに近い条件は 50 ms の条件であった. これらの結果は, 足の甲で知覚される触覚の流れが歩行感覚を強化することを示唆しているが, 甲の刺激から得られる歩行感覚は足底の条件よりも低かった.

4. むすび

本研究では, 足の甲への振動触覚刺激を使用して歩行感

覚を調査した. 足と地面によってアクチュエータに加えられる圧力が刺激を減衰させ課題を解決するため, 足の甲に触覚刺激を提示する, 片足につき 2 つのアクチュエータを備える触覚デバイスを試作した. 歩行刺激は, 足底歩行刺激の先行研究の設計理論に基づき設計された.

予備的な実験の結果, 足の甲の歩行感覚のスコアは, 足底の条件よりも低かったが, 足底の条件と同様に, 刺激開始時間が 20 ms の条件に対し 50 ms の条件でスコアが有意に向上した. 足の甲と足底のどちらの条件も, 刺激開始時間が 100 ms の条件では, 50 ms の条件に対しスコアは有意に向上しなかった.

追加の予備的な実験として, 5 名の参加者に対し, 足の甲のアクチュエータ間の距離を 10 cm から 5 cm に変化させた条件で歩行感覚が変化するかどうかの質問を行った. 足のサイズが 22 cm 程度の複数の参加者は, アクチュエータ間距離が 5 cm の条件の方がより実際の歩行感覚に近いとし, 10 cm の条件は足首とつま先の普段の位置で振動を感じ通常の歩行感覚と比べ違和感があると報告した. また, 参加者はアクチュエータの間隔が 5 cm の条件でも触覚の流れを知覚できると報告した.

実験後のアンケートでは, 全ての参加者が足の甲に装着された触覚デバイスの体験時に, 足の甲で知覚された触覚の見かけの動きが歩行感覚を高めたと報告した.

参考文献

- [1] Amemiya, T., Ikei, Y., Kitazaki, M.: Remapping peripersonal space by using foot-sole vibrations without any body movement. *Psychological Science* 30(10), 1522-1532 (2019)
- [2] Nakamura, J., Matsuda, Y., Amemiya, T., Ikei, Y., Kitazaki, M.: Virtual walking with omnidirectional movies and foot vibrations: Scene-congruent vibrations enhance walking-related sensations and ground material perceptions. *IEEE Access* 9, 168107-168120 (2021)
- [3] Terziman, L., Marchal, M., Multon, F., Arnaldi, B., Lécuyer, A.: The King-Kong Ef-fects: Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step. In: 2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), pp. 19-26. IEEE (2012)
- [4] Iijima, Y., Uchida, M., Hachisu, T., Hashimoto, Y.: Enhancement of range of creation of foot sole tactile illusion by vibration stimulation of the foot instep. In: 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 31-36. IEEE (2019)
- [5] Kirman, J. H.: Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration. *Perception & Psychophysics* 15(1), 1-6 (1974)