



協調的な腕振り動作が運動錯覚による歩行感覚に与える 主体感への影響

Effects of Coordinative Arm Swing Movements on the Sense of Agency
in Walking Sensation Induced by Kinesthetic Illusions

成田叡賦¹⁾, 牛山奎悟¹⁾, 溝口泉¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Eifu NARITA, Keigo USHIYAMA, Izumi MIZOGUCHI and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {narita, ushiyama, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 運動錯覚は、実際の身体の動きを伴わずに運動感覚のみを提示することが可能であるが、運動に対する主体感が不脚している。そこで我々は、運動錯覚を用いた歩行感覚に着目し、協調的な腕振り動作を実動作として組み合わせることで運動錯覚に主体感を付与できるのではないかと考えた。本研究では、腕振り動作によって上腿と足首の前後への振動を切り替えるシステムを実装し、腕振り動作の有無で運動錯覚による歩行感覚に対する主体感に変化があるか調査した。
キーワード: 運動錯覚, 腱振動刺激, 主体感, 交互振動, 歩行感覚

1. はじめに

VR 体験において、運動錯覚は、実際の動きを伴わずに運動感覚を提示できる技術として有用である。運動錯覚とは、腱に対して低周波の振動刺激を与えることで生起する四肢の動きや位置のずれの錯覚である[1]。この錯覚は、刺激した筋の伸びる方向に生起する[2]。この技術を応用することで、大掛かりな装置や直接的な身体の駆動を必要とせずに、運動感覚のコンパクトな提示が可能となる。

しかしながら、運動錯覚は、あくまで刺激によって動かされているという受動的な感覚に留まり、主体感は不足している。主体感とは、自分の運動が自身によってコントロールされているという感覚であり、意図した運動によって生じると予測される感覚フィードバックと実際に結果として知覚された感覚フィードバックの誤差が少ない場合に生じるとされている[3]。これを実現するために、脳の運動イメージによる入力を用いたブレイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) [4]や、ユーザーが固定された状態で身体を動かそうとした際の力を入力とするシステム[5]が提案されている。これらの手法では、動かそうとする部位と錯覚が与えられる部位が一致している。

我々は、刺激部位ではなく、協調的に動きが生じる別の部位に着目し、提示される運動錯覚に実動作としてその動きを組み合わせることで、主体感が付与されるのではないかと考えた。例えば、歩行時には、脚の動きに対し腕振り

動作が協調的に生じる[6]。能動的な腕振り動作を歩行の運動指令として扱うことで、生じると予測される感覚が錯覚による受動的な脚の動きの感覚と結びつき、主体感が生じる可能性がある。

本研究では、運動錯覚による歩行感覚提示の際に、腕振り動作を組み合わせることで、主体感が向上するか検討する。被験者実験では、腕振り動作の入力によって歩行感覚が提示される場合と受動的に体験してもらう場合を比較し、心理評価を行った。

2. 関連研究

運動錯覚を利用した歩行感覚提示手法がいくつか提案されている[7][8][9]。Leonardis ら[7]は、振動を停止した際に生じる錯覚の残効である身体が元の位置に戻る感覚を利用して膝関節の伸展・屈曲を再現した。Duclos ら[8]は、歩行運動学に基づいて、足首、膝、ヒップ関節に関わる筋の伸長を時間的にマッピングした振動を与えることで歩行感覚を再現した。Tapin らの研究[9]によると、少なくとも膝と他の一つの関節（ヒップまたは足首）に振動を与えれば、良好な歩行感覚が得られると報告されている。

本研究では、膝と足首の関節に振動子を配置し、拮抗関係にある伸筋と屈筋の腱に対して交互に振動を与えることで、屈曲・伸展の運動錯覚を提示する。交互振動による運動錯覚は、単一の筋への振動と比較して生起する速度が

速いことが報告されている[10]. 交互振動による錯覚提示は、周期的な動きの再現に制限される一方で、歩行感覚の提示には適していると考えられる。

3. 実験

実験には、7名の被験者（全員男性、21～24歳）が参加した。

腕振り動作を入力として振動刺激を与える場合と一定周期で振動刺激を与える場合において、錯覚強度、歩行感覚のリアリティ、歩行感覚の自然さ、主体感について被験者に評価してもらった。

3.1 実験システム

システム全体の概略図を図1に示す。

振動子（Acoupe Lab Vp4 シリーズ Vp410）を膝と足首の腹側と背側に2個ずつ（計8個）配置し、サポータで固定した。信号生成ソフトウェア（Cycling '74 & M17 Max 8）によって70 Hzの正弦波を生成し、オーディオインターフェース（Roland, OCTA-CAPTURE）とオーディオアンプ（FX-AUDIO-FX202A/FX-36A PRO）を通し、腹側と背側の振動子を交互に切り替えて駆動した。

腕振り動作の検出は、HMD（Head Mounted Display, Meta Quest 3）とそのコントローラを用いた。被験者にHMDとコントローラを装着してもらい、腕振り動作が反対方向に切り替わる瞬間に振動を切り替えるよう設定した。なお、誤検出防止のため、矢状面におけるHMDとコントローラとの角度を計算し、一定の角度を動かさない限りは腕振り動作の切り替えを検出しないよう設定した。腕振り動作の検出に用いるコントローラは右側のみであるが、被験者には知らせず、両手に装着してもらった。実験中、被験者のコントローラの加速度、速度、位置について記録した。

3.2 実験条件

振動刺激を提示する身体部位は膝と足首である。振動子の位置を図2(a)に白色の丸で示す。刺激を提示する筋肉は、腹側が屈筋、背側が伸筋であり拮抗筋の対応関係にある。腹側に位置する振動子は伸展方向への運動錯覚を生起させ、背側に位置する振動子は屈曲方向への運動錯覚を生起させる。膝の伸展方向の錯覚は大腿四頭筋の腱（膝蓋腱）、屈曲方向の錯覚は大腿二頭筋の腱を刺激対象とした。また、足首の伸展方向の錯覚は前脛骨筋の腱、屈曲方向の錯覚は下脛三頭筋の腱（アキレス腱）を刺激対象とした。

図2(b)に示すように、腹側と背側の交互振動によって歩行感覚を提示した。先行研究の歩行運動学に基づいた時間的なマッピング[8]においては、足首伸展→足首屈曲、膝伸展→膝屈曲といった振動状態の遷移が示されている。しかしながら、腕振り動作を入力とする場合、腕振り動作の振幅や周波数にぶれが生じるため、振動駆動の複雑なマッピングを行うことは困難である。したがって、本研究では、図2(b)のように2状態を交互に遷移する手法を用いた。膝と足首で振動の駆動側が互いに逆になるよう設定した。すなわち足首屈曲、膝伸展→足首伸展、膝屈曲を交互に切り

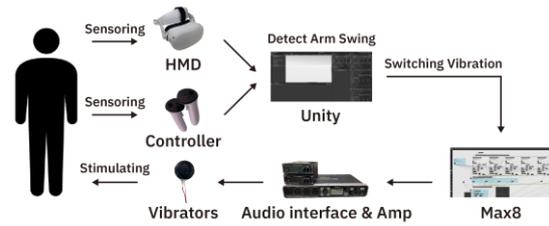


図1: システム概略図



図2: (a) 振動子の位置, (b) 腕振り動作を入力とした刺激条件

替えている。左右の脚においても、駆動側が互いに逆になるよう設定した。

Naitoらの研究[11]から、70 Hzでは強い運動錯覚が生起する条件として報告されていることを踏まえ、これを実験で使用する振動の周波数とした。

実験条件は、ユーザーの腕振り動作を入力として扱う条件（一致、不一致条件）、一定周期で歩行感覚が提示される条件（受動条件）の計3条件を設定した。図2(b)に示すように、腕振り動作を行う2条件は振動の駆動状態の遷移が逆になっている。一致条件は、右腕の振られる方向が後側から前側に切り替わる際、左足が前に出る感覚を想定し、不一致条件はその逆である。受動条件においては、1 Hz[8]で振動を切り替えるよう設定した。

3条件を1セットとし、3セット反復した計15試行の実験を行った。実験データは、反復した3つの値のうち中央値を用いた。試行の順序はランダム化された。

3.3 実験手順

振動子をサポータで配置した後、加速度センサ（Sparkfun, LIS331）を用いて較正を行った。各振動子の振動振幅は、70 Hzにおいて80 m/s²になるよう信号生成ソフトウェア上のボリュームを統制した。

各試行において、刺激時間は60秒間とした。すべての試行において、普段の歩行時の速さ、振幅で腕を振るよう被験者に指示した。腕の振り方については、上腕を動かすことを意識するよう指示した。試行間には30秒間の休憩を設けた。

刺激中、被験者には立位かつ閉眼を保ってもらった。実際の歩行時の姿勢に近づけるため、立位での体験とした。また、振動子の駆動音を遮断するために、ヘッドフォンを装着してもらいホワイトノイズを流した。

刺激後に、錯覚強度（1:まったく感じなかった, 9:とて

も強く感じた), 歩行感覚のリアリティ (1:歩行感覚として感じなかった, 9:現実の歩行感覚と同じように感じた), 歩行感覚の自然さ (1:とても不自然に感じた, 9:とても自然に感じた), 主体感 (1:外部から動かされているように感じた, 9:自分が動かしているように感じた) について 9段階で回答してもらった。

実験終了後に被験者からコメントをもらった。

4. 実験結果

評価の結果を図 3 に示す。各評価項目において Friedman 検定を用い, 多重比較には Bonferroni 補正が適用された。すべての検定において有意水準の p 値は 0.05 を用いた。統計的検定のソフトウェアは IBM SPSS Statistics を用いた。

錯覚強度 (図 3(a)) と歩行感覚の自然さ (図 3(c)) において, 条件間に有意差は見られなかった。

歩行感覚のリアリティ (図 3(b)) において, 受動条件と不一致条件 ($p = 0.015$) の間のみ有意差が認められた。

主体感 (図 3(d)) において, 受動条件と一致条件 ($p = 0.048$), 受動条件と不一致条件 ($p = 0.048$) の間で有意差が認められた。腕振り動作を行う場合のほうが, 受動的に体験する場合よりも主体感が高くなったように見える。

5. 考察

図 3(a)より, 腕振り動作を行う条件と受動条件の間で, 錯覚強度に大きな違いは見られなかった。本研究のセットアップでは, 刺激部位から離れた部位の能動運動が錯覚の増強に寄与しなかった可能性がある。

図 3(b)より, 歩行感覚のリアリティは, 不一致条件で増強される傾向にある。錯覚強度には有意な増加傾向が見られなかったため, リアリティの増加は腕振り動作による影響が強いと考えられる。被験者からは, 通常の歩行感覚とは異なり足を引きずっているような感覚であったとのコメントが得られた。立位により足が常に地面に固定されていたためと考えられるが, 今回の実験で用いた簡易的な振動提示においても歩行の動作として感じられる点は非常に興味深い。

不一致条件でのみ歩行感覚のリアリティに有意な増加傾向が認められたことについては, 腕振り動作に対する錯

覚生起の遅延か一致条件との区別ができていなかった可能性が考えられる。不一致条件において, 通常の歩行動作と同様に, 右腕が前に振られる際に左足が前に出たと仮定すると, 振動の切り替えに対して生起する錯覚は逆位相であった可能性が考えられる。これは, 拮抗する 2 つの筋への周波数の異なる振動刺激を用いた往復運動の錯覚の時間的特性の報告[12]と似ている。しかしながら, 不一致条件と一致条件の間に有意差が確認されなかったことから, 不一致条件においてのみ正しく歩行感覚が提示されたとは限らない。主体感の評価の結果も鑑みると, 不一致条件と一致条件の区別ができていなかった可能性が高い。

図 3(c)より, 歩行における腕と脚の動作方向の対応関係があるにもかかわらず, 一致条件と不一致条件の間で, 歩行感覚の自然さに大きな違いは見られなかった。評価項目では違いがみられなかった一方で, 3 人の被験者はその対応関係について言及したうえで自然さが異なるとコメントした。歩行速度や歩幅の違いなどの個人差によるものか調査する必要がある。また, 今回の実験では腕が先行して動くことで脚の動作が提示されている。一定周期の脚の動きが提示されている状態 (脚が先行して動いている状態) で, 被験者自身がそれに合わせて腕振り動作を行った場合についても調査する必要がある。

図 3(d)より, 腕振り動作は, 運動錯覚により提示した歩行感覚の主体感を向上させたことが示唆される。被験者からは, 腕振り動作を行うと自分で脚を動かしているように感じたとのコメントが得られた。脚を駆動させる直接的な運動指令ではないにもかかわらず, 腕振り動作を行うことで生じると予測された感覚に運動錯覚による脚の動きが含まれると解釈された可能性が考えられる。腕振り動作によって下肢の筋活動が生じたケースが報告されており[13], 上肢と下肢の機能的な結合が主体感の増強に寄与した可能性がある。今回の実験では, 腕振り動作の有無で比較を行ったが, ジョイスティック入力など組み合わせる動作によって効果に違いがあるか検証する必要がある。

一致, 不一致条件にかかわらず主体感が向上したことから, 腕振り動作が脚の動きに対して逆位相, 同位相であるかどうかによる影響は低かったと考えられる。VR 空間内における 1 人称視点のアバターの動きが, 錯覚による歩行

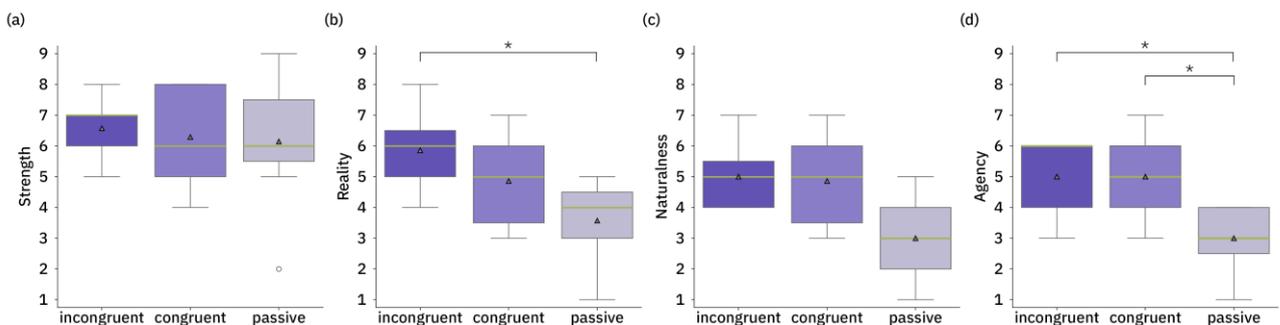


図 3: 条件ごと (不一致条件: incongruent, 一致条件: congruent, 受動条件: passive) の (a) 錯覚強度, (b) 歩行感覚のリアリティ, (c) 歩行感覚の自然さ, (d) 主体感の評価

感覚に対して逆位相, 同位相となる条件間で, 主体感に有意差が確認されなかったことが報告されている[14]. 歩行感覚の自然さにおいても有意差が見られなかったことから, 被験者がこれらの条件を十分に区別できていない可能性も考えられる. 今回の実験で用いた条件以外に, 錯覚の提示に遅延が生じる場合, どのような影響を与えるのか調査する必要がある.

6人の被験者から, 受動条件における振動の切り替えが普通の歩行よりも遅かったとのコメントが得られた. そのうち2人の被験者は, 歩行感覚のリアリティへの影響があったと回答した. 腕振り動作を行う条件と受動条件での歩行速度の統制については, 検討の余地がある.

6. 結論と今後の課題

本研究では, 刺激部位とは異なる身体部位の協調的な実動作を組み合わせることで, 運動錯覚の主体感を増強できるのではないかと考えた. 我々は腕振り動作を伴う歩行に着目し, 運動錯覚による歩行感覚提示において, 腕振り動作の有無で主体感に変化があるか心理評価を行った. 結果として, 脚の動きとの対応にかかわらず腕振り動作によって主体感が増強される傾向にあることが示唆された.

今後は, 歩行感覚を提示している状態で腕振り動作をそれに合わせてもらう場合や組み合わせる動作, 錯覚提示の遅延による効果の違いについて調査する.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957 の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. Matthews, "The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents," *Brain*, vol. 95, no. 4, pp. 705–748, 1972
- [2] O. White and U. Proske, "Illusions of forearm displacement during vibration of elbow muscles in humans," *Exp Brain Res*, vol. 192, no. 1, pp. 113–120, Jan. 2009
- [3] P. Haggard, "Sense of agency in the human brain," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 18, no. 4, pp. 196–207, Apr. 2017
- [4] M. Barsotti, D. Leonardis, N. Vanello, M. Bergamasco, and A. Frisoli, "Effects of Continuous Kinaesthetic Feedback Based on Tendon Vibration on Motor Imagery BCI Performance," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 105–114, Jan. 2018
- [5] S. Tanaka, K. Ushiyama, A. Takahashi, and H. Kajimoto, "Movement-Free Virtual Reality Interface Using Kinesthetic Illusion Induced by Tendon Vibration," in *Haptics: Science, Technology, Applications*, I. Nisky, J. Hartcher-O'Brien, M. Wiertlewski, and J. Smeets, Eds., Cham: Springer International Publishing, pp. 316–324, 2020
- [6] P. Meyns, S. M. Bruijn, and J. Duysens, "The how and why of arm swing during human walking," *Gait & Posture*, vol. 38, no. 4, pp. 555–562, Sep. 2013
- [7] D. Leonardis, A. Frisoli, M. Barsotti, M. Carrozzino, and M. Bergamasco, "Multisensory Feedback Can Enhance Embodiment Within an Enriched Virtual Walking Scenario," *Presence*, vol. 23, no. 3, pp. 253–266, Oct. 2014
- [8] C. Duclos, C. Kemlin, D. Lazert, D. Gagnon, J.-O. Dyer, and R. Forget, "Complex muscle vibration patterns to induce gait-like lower-limb movements: proof of concept," *J Rehabil Res Dev*, vol. 51, no. 2, pp. 245–251, 2014
- [9] A. Tapin, N. C. Duclos, K. Jamal, and C. Duclos, "Perception of gait motion during multiple lower-limb vibrations in young healthy individuals: a pilot study," *Exp Brain Res*, vol. 239, no. 11, pp. 3267–3276, Nov. 2021
- [10] J. P. Roll and J. P. Vedel, "Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography," *Exp Brain Res*, vol. 47, no. 2, pp. 177–190, Jul. 1982
- [11] E. Naito, H. H. Ehrsson, S. Geyer, K. Zilles, and P. E. Roland, "Illusory Arm Movements Activate Cortical Motor Areas: A Positron Emission Tomography Study," *J. Neurosci.*, vol. 19, no. 14, pp. 6134–6144, Jul. 1999
- [12] S. Tanaka and H. Kajimoto, "Measurement of the Transfer Function of Kinesthetic Illusion Induced by Antagonistic Tendon Vibration," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 125684–125691, 2023
- [13] J. B. Weersink, B. M. de Jong, D. M. Halliday, and N. M. Maurits, "Intermuscular coherence analysis in older adults reveals that gait-related arm swing drives lower limb muscles via subcortical and cortical pathways," *The Journal of Physiology*, vol. 599, no. 8, pp. 2283–2298, 2021
- [14] D. R. Labbe, K. Kouakoua, R. Aissaoui, S. Nadeau, and C. Duclos, "Proprioceptive Stimulation Added to a Walking Self-Avatar Enhances the Illusory Perception of Walking in Static Participants," *Front. Virtual Real.*, vol. 2, Jun. 2021