



大腿部への微弱振動印加によるバランス能力への影響

Effect of applying weak vibrations to the thigh on the ability to balance

大木郁人¹⁾, 橋本悠希¹⁾

Fumihito OKI, and Yuki HASHIMOTO

1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, h_oki@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 高齢化が進む現代において、転倒補助の重要性は高まってきている。本研究では、転倒の危険因子である関節位置覚の低下を緩和することを目的とし、大腿部に微弱な振動を提示することで膝関節の調整能力を向上させる手法を提案する。本稿では、大腿部への微弱振動の印加がバランス能力に与える影響の検証結果を報告する。さらに、体性感覚機能の低下と本手法の効果の関連を検証するため、疲労課題前後におけるバランス能力の検証結果を報告する。バランス能力は、開眼での片足立ちにおける重心動揺によって評価された。結果、疲労前後ともに振動を印加することでバランス能力が改善する傾向がみられた。

キーワード: 確率共鳴現象, バランス能力, 重心動揺, 膝関節位置覚

1. 序論

近年、転倒予防の重要性が高まっている。世界保健機関 (WHO) の報告書によれば、世界では年間推定 684,000 人が転倒による死亡事故を起こしており、その内 60 歳以上の成人の死亡率が最も高い[1]。また、高齢者における転倒は、骨折等の怪我や転倒への恐怖感を引き起こすため、後の生活の質に悪影響を及ぼすとされている[2]。したがって、高齢化が進む現代社会において、高齢者の転倒リスクを抑える技術の開発の重要性は増している。

従来の転倒予防技術は、動力の増強に焦点を当てている[3]。それらの技術は、加齢による筋力の低下を補うことを目的としている。一方、転倒は固有感覚機能の低下も要因であることが示唆されている。特に、膝関節の位置覚が低下は、バランス能力を低下させることが示唆されている[4]。そのため、感覚機能を高めることで高齢者の転倒を予防できる可能性がある。

感覚機能を高める手法の一つに、確率共鳴現象がある。確率共鳴現象とは、非線形系において、閾値未満の信号に雑音を印加することで、閾値未満の信号の検知率が向上する現象である。確率共鳴現象は、触覚にも適用することができ、雑音には微弱な振動刺激や電気刺激が用いられる。確率共鳴現象を応用した例として、微弱振動の印加によって指先の触覚感度を向上させた例がある[5]。

本研究では、大腿部の皮膚の伸張が関節の位置覚に関与する[6]ことに着目し、確率共鳴現象によって皮膚伸張

の知覚感度を高め、膝関節位置覚を強化し、バランス能力を高める手法を提案する。本研究で提案する手法は、制御系や駆動系を必要としないため、軽量かつ低コストで実現できる。また、既存のバランス能力を支援する装置と組み合わせが可能であるため、より効果の高い装置の開発につながると考えられる。本手法の概略図を図 1 に示す。

我々は前報[7]で、提案手法は体性感覚機能が低下した対象の膝関節位置覚を強化する可能性を見出した。本稿では、疲労と加齢が感覚機能の生理学的な低下に関して共通する[8]-[10]ことに着目し、大腿部に微弱な振動を与えた場合と与えない場合の疲労前後のバランス能力を評価した結果を報告する。

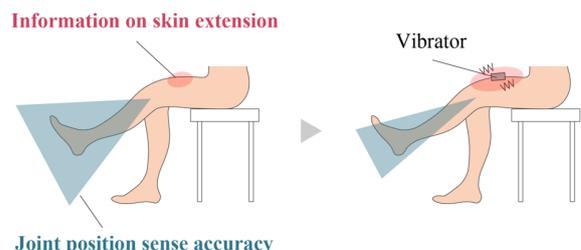


図 1: 提案手法の概略図

2. 実験

実験には健康な 5 名の参加者 (男性 5 名, 22 歳 ~ 25 歳) を募った. 実験参加者には, 疲労前後に腕を胸の前で組んだ状態で非利き足による片足立ち試験を実施した. その際, 実験参加者に複数の強度の振動を与えることで, 疲労前後において, 提案手法によりどの程度バランス能力が変化したか, また, より影響を及ぼす振動強度はあるかを検証した.

2.1 片足立ち試験の環境・装置

振動提示装置を図 2 に示す. 振動提示には, 振動子 (Acouve Laboratory: Vp210) を使用した. 振動子は, 実験参加者の大腿部前部に両面テープで貼り付けられた. これは, 膝関節の伸展時に伸張しやすい部位に振動を加えるためである. 振動子は, PC からオーディオアンプ (FX-AUDIO: FX202A/FX-36A PRO) を通じて増幅された波形を出力した. 使用した振動は, カットオフ周波数 300 Hz でローパスフィルタリング処理を行ったホワイトノイズである. これは, 皮膚感覚が 100 ~ 300 Hz の周波数に感度が高いことを利用し, 効率的に振動強度を決定するためである. また, 振動強度を設定するために, 加速度センサ (Kionix 社: KXR94-2050) を使用した. 加速度センサは, 使用する振動子の上に固定し, マイクロコントローラ (Arduino 社: Arduino Uno SMD R3) を通じて PC と通信を行った. 振動強度は, 各実験参加者の知覚できる最小の振動強度 (知覚閾値) に基づいて設定された.

バランス能力の計測系を図 2 に示す. バランス能力の評価には, 重心動揺計 (Nintendo: Wii Balance Board) を用い, サンプリング周波数 100 Hz で前後方向および内側・外側方向の重心移動を計測した.

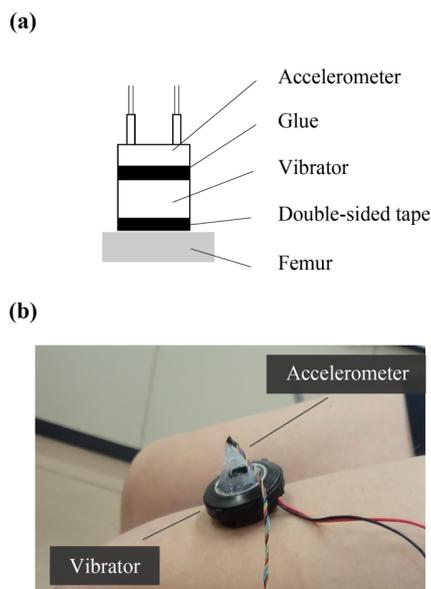


図 2: (a) 振動提示装置の構成図, (b) 実際の振動提示装置の様子

2.2 知覚閾値の決定

実験に先立ち, 各実験参加者の知覚閾値を決定した. まず, 実験参加者は, 視聴覚情報を遮断するためにアイマスクとホワイトノイズが流されたヘッドフォンを着用し, 椅子に座った. 振動子は, 実験参加者の非利き足の大腿部前部に取り付けられた. 利き足は, 実験参加者がボールを蹴るときに使う方の足と定義された. 知覚閾値は, 極限法を用いて上昇系列, 下降系列を 2 回ずつ繰り返し, その平均値を用いた. 以降, 知覚閾値を 1T と表現する.

2.3 片足立ち試験の実験手順

傾斜荷重歩行課題を行う前後に, 片足立ち試験[11]を実施した. はじめに, 実験参加者は大腿部に両面テープで接触子を取り付け, 重心動揺計の上に立つ. 実験参加者は, 非利き足で重心動揺計に 30 秒間立つように指示された. その際, 実験参加者は胸の前で腕を組み, 両手を肩に置くように指示された. 試行は計 12 回行われた. 12 回の試行は, 振動なし, 0.25T, 0.5T, 0.75T の 4 つの振動条件それぞれについて 3 回の試行で構成される. また, 試行の順序は無作為に設定された. 試行と試行の間には 30 秒の休息が与えられた.

2.4 傾斜荷重歩行課題

実験参加者に疲労を与えるため, 傾斜荷重歩行課題を実施した. 傾斜荷重歩行課題の環境の全体を図 4 に示す. 荷重にはバックパックを使用した. バックパックの重量は 12.8 kg に設定された. 歩行課題にはトレッドミルを使用した. テッドミルの速度は, 3.6 km/h に設定された. これらのパラメータは先行研究[12]と予備実験を基に設定された.

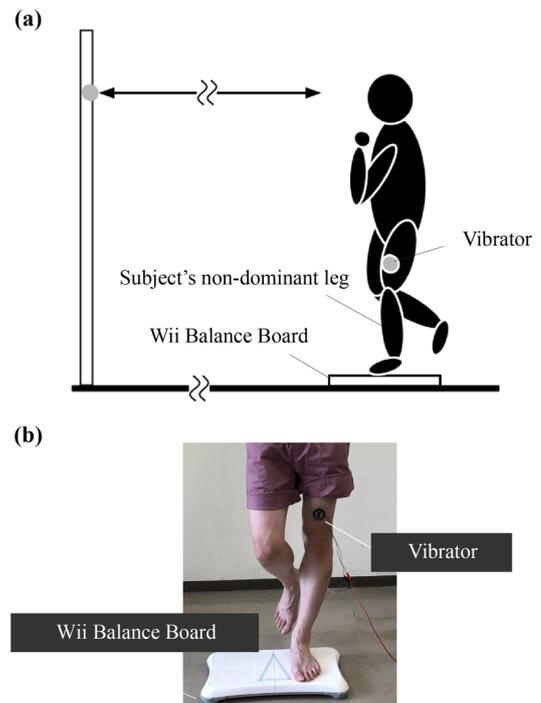


図 3: (a) 片足立ち試験の環境の概要図, (b) 実際の片足立ち試験の様子

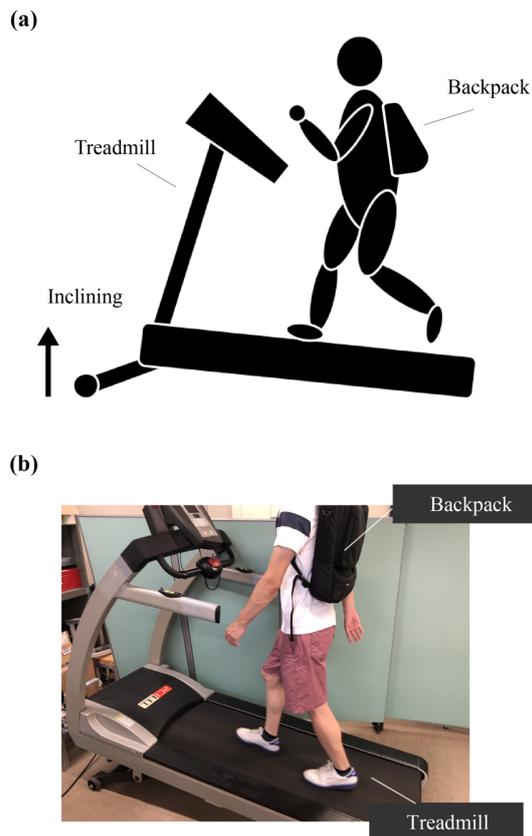


図 4: (a) 傾斜荷重歩行課題の環境の概要図, (b) 実際の傾斜荷重歩行課題の様子

実験参加者は、バックパックを装着し、30 分間の歩行を行った。その際、傾斜は 5 分ごとに 3° ずつ増加した。その後、1 分間のクールダウンを行い、その間は 0° の傾斜で歩いた。

2.5 結果

データの解析には、片足立ちの 30 秒間における初めの 5 秒間を削除し、25 秒間のデータを用いた。さらに、25 秒間の重心移動の左右幅と前後幅から求まる楕円面積を算出することで、バランス能力を定量化した。各実験参加者の結果は、各条件における 3 施行分の楕円面積の平均をとった値とした。振動の有無によるバランス能力への影響の差を検証するために、Steel 法を利用した多重比較を行った。統計解析は有意水準 5% で実施した。

疲労前の実験結果を図 5(a) に示す。横軸は振動強度条件である。縦軸は楕円面積の大きさであり、値が小さいほど片足立ちの揺れが小さいことを示している。多重比較の結果、いずれの条件間においても、統計的有意差はなかった (0.25T 条件: $p=0.531$, 0.5T 条件: $p=0.624$, 0.75T 条件: $p=0.265$)。

続いて、疲労後の実験結果を図 5(b) に示す。多重比較の結果、いずれの条件間においても、統計的有意差はなかった (0.25T 条件: $p=0.849$, 0.5T 条件: $p=0.194$, 0.75T 条件: $p=0.624$)。

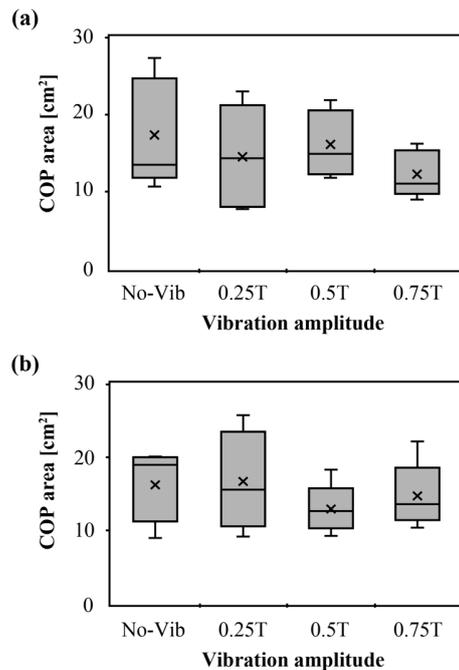


図 5: 片足立ち試験の結果. (a) 疲労前の重心動揺の楕円面積, (b) 疲労後の重心動揺の楕円面積.

3. 考察

本研究では、感覚機能の低下した対象に対して、大腿部への確率共鳴現象の適用によって疲労後のバランス能力が改善するという仮説を立てていた。そのため、傾斜荷重歩行課題で疲労を課す前後の片足立ちの重心移動を評価した。結果、疲労前後ともに振動を印加することでバランス能力が改善する傾向がみられた。したがって、大腿部への微弱な振動の印加はバランス能力の強化に有効である可能性が示唆された。今後、実験参加者数を増やし、傾向をみていく予定である。

疲労前のバランス能力は、0.25T 条件で 4 名、0.5T 条件で 3 名、0.75T 条件で 4 名が改善する結果となった。一方で、疲労後のバランス能力は、0.25T 条件で 1 名、0.5T 条件で 4 名、0.75T 条件で 2 名が改善する結果となった。したがって、確率共鳴現象によって感度の向上が促される要素が 2 要因以上あり、それらそれぞれの確率共鳴現象によって受ける影響が疲労前後で変化している可能性が考えられる。すなわち、今回、皮膚感覚の触覚感度を向上させることを目的とした振動が、筋紡錘などの他の感覚器にも作用している可能性がある。今後、これらの感覚器への影響があるか検証していきたい。

疲労前と疲労後の結果の関連について、疲労課題後にバランス能力が悪化した実験参加者は 5 名中 2 名であった。したがって、今回の疲労課題は体性感覚機能を悪化させるのに十分な疲労課題でなかった可能性がある。これは、今回、実験参加者が元々持つ体力や筋力を考慮せず、疲労課題の強度を統一して行ったことに起因すると考えられる。今後、実験参加者に蓄積される乳酸値や最大心拍数等を基

準とした内容の疲労課題を設定し、再度検討していく予定である。

4. 結論

本研究では、大腿部への確率共鳴現象の適用が膝関節位置覚を強化し、感覚機能の低下した対象のバランス能力が改善すると考え、バランス能力に対して定量的な評価を行った。具体的には、疲労が感覚機能の低下を引き起こすことに着目し、傾斜荷重歩行課題で疲労を課す前後の片足立ちの重心移動を評価した。結果、振動を印加することでバランス能力が改善する可能性が示唆された。今後は、実験参加者数を増やし傾向をみていく。

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR17J7), JST AIP-PRISM(JSMJCR1), 科研費(21H04909)の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] World Health Organization. (2021, April 26). "Falls": <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>
- [2] Ambrose, Anne Felicia, et al.: Falls and fractures: a systematic approach to screening and prevention; *Maturitas*, 82(1), 85-93 (2015)
- [3] A. J. Young and D. P. Ferris: State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons; *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(2), 171-182 (2016)
- [4] McChesney, John W., and Marjorie H. Woollacott: The effect of age-related declines in proprioception and total knee replacement on postural control; *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(11), 658-666 (2000)
- [5] Kurita, Yuichi, Minoru Shinohara, et al.: Wearable sensorimotor enhancer for fingertip based on stochastic resonance effect; *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(3), 333-337 (2013)
- [6] Edin, Benoni B.: Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans; *The Journal of physiology*, 531(1), 289-297 (2001)
- [7] 大木郁人, 橋本悠希: 大腿部への微弱振動印加による膝関節位置覚への影響; 第26回バーチャルリアリティ学会大会, 1E1-1 (2021)
- [8] Allman, B. L. & Rice, C. L.: Neuromuscular fatigue and aging: central and peripheral factors; *Muscle Nerve* 25(1), 785-796 (2002)
- [9] R Deschenes, M.: Motor unit and neuromuscular junction remodeling with aging; *Current Aging Science* 4(1), 209-220 (2011)
- [10] Nardone, A., Siliotto, R., Grasso, M. et al.: Influence of aging on leg muscle reflex responses to stance perturbation; *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 76(1), 158-165 (1995)
- [11] Berg, K., Wood-Dauphine, S. et al.: Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument; *Physiotherapy Canada*, 41(6), 304-311 (1989)
- [12] Moon, J., Pathak, P. et al.: Shoes with active insoles mitigate declines in balance after fatigue; *Sci Rep*, 10(1), 1951 (2020)