



下腿部への微弱振動印加による足関節位置覚への影響

The effect of applying sub-threshold vibrations to the crus on ankle joint proprioception

羽原将貴¹⁾, 橋本悠希²⁾

Masataka HABARA 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 丁目 1 - 1, s2320782@u.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1 - 1, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 高齢者の転倒要因にバランス能力の低下が挙げられる。歩行時のバランス制御には足関節位置覚が影響する。体性感覚系では機械受容器に閾値以下の微弱振動を印加することでその感度を向上できる。本稿では、転倒の危険因子である関節位置覚の向上を目的とし下腿部に微弱振動を提示することで足関節の調節能力を向上させる手法を提案する。下腿部への微弱振動印加による足関節位置覚への影響を検証した結果、振動印可によって足関節位置覚が改善する傾向がみられた。

キーワード: 力覚・体性感覚, 感覚・知覚, 医療, ユーザインターフェース

1. 序論

高齢者の転倒問題の解消は、高齢化が進む先進国で重要性を増している。厚生労働省の令和 3 年人口動態調査では、令和 3 年度の高齢者の転倒・転落・墜落による死亡数が 9,509 人と報告されている [1]。さらにそれらを原因とする死者数は年々増加傾向にある。高齢者の転倒は骨折や頭部外傷等の大怪我に繋がりがやすく、介護が必要な状態に陥ること、再発を恐れた生活の質の低下を引き起こすことがあるため、高齢者の転倒リスクを抑える手法の重要性は高い。

高齢者の転倒リスクは歩行変化によって増加する。高齢者の歩行は歩行時の関節角度の年齢的变化、バランス能力の変化、筋力の変化などの要因で変化する [2]。高齢者の歩行変化の要因のうち、歩行時の関節角度やバランス能力は固有感覚（関節位置覚）の影響を受ける。図 1 は片足立ちの揺れと位置覚精度の関連を示している。縦軸の「体位関係の認識誤差の合計」は実際の関節位置と認識している関節位置のずれの大きさ（位置覚精度）を表し、「重心動揺

の総軌跡長」はバランス制御の精度を表す。「体位関係の認識誤差の合計」が大きければ位置覚精度が低く、「重心動揺の総軌跡長」が大きければバランス制御が不安定であることを示す。図 1 から体位関係の認識誤差の合計と重心動揺の総軌跡長のあいだには正の相関があることがわかる。位置覚精度が低ければ低いほどバランス制御が不安定になることを示している。したがって、関節位置覚の減少と転倒リスクの増加は相関関係にあり、低くなった関節位置覚を高めることができれば転倒リスクを減少し、転倒防止に貢献できると考える。

固有感覚はバランス能力と関連があるが、立位姿勢バランス制御において、下肢の位置認識は複数の関節からの情報の統合が関与しており、特に足関節と股関節の位置が膝関節の位置と角度を決定しバランス制御に影響を及ぼす [3]。Amy S.N.Fu らは足関節位置覚の精度と、バランス能力の精度の関係を示しており [5]、足関節位置覚を向上させることでバランス能力の向上を図ることができる。また転倒要因ではバランス制御能力の低下に加えて足関節位置覚の低下によるつま先の地面への引っ掛かりがあげられることから我々は足関節の位置覚を向上させることでバランス制御能力の向上に加えてつま先の引っ掛かりによる転倒を予防できると考える。

1.1 転倒リスクの低減予防方法とその課題

転倒リスクの低減手法として Light-Touch Contact [6] や感覚の代替 [10]、サポータ [11] などが挙げられる。これらの手法はそれぞれ腕の自由度が制限され、代替できる表現に限界があり、改善する場面も限られるといった問題点が指摘されている。そのため人の動きを制限することなく、環境に左右されにくい、感覚機能を向上させる手法によって転倒予防へ貢献することが求められている。

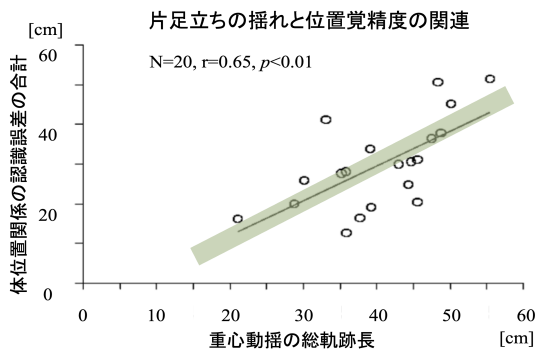


図 1: 片足立位時の重心動揺の総軌跡長と体位関係の認識誤差の合計 [3]

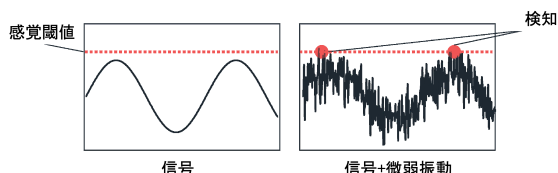


図 2: 確率共鳴現象

固有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 [7]。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を用いる。図 2 に確率共鳴現象の概念図を示す。確率共鳴現象を応用した例として、大木らは微弱振動の印加によって大腿部の皮膚感度を向上させ、体性感覚機能を強化し、触覚感度の向上によって体性感覚機能が強化されることを示唆した [8][9]。また、千鳥らは足根管に電気刺激を印加し、確率共鳴現象の適用によって足関節位置覚誤認角度が有意に減少することを示唆した [14]。

本稿では、下腿部へ確率共鳴現象を適用することで足関節近傍の皮膚感度を向上させ、皮膚感度の向上によって足関節位置覚を強化する手法を提案する。

本研究では、確率共鳴現象によって足関節の調節能力が強化されるという仮説に基づく。足関節付近の皮膚に振動を印加した時、調節能力が強化されるかを検証するため、足関節位置覚の精度を計測・評価する。

2. 関連研究

大木らは、感覚機能が低下した実験参加者の大腿部に知覚閾値強度の振動を印可し確率共鳴現象を適用することで膝関節近傍の皮膚感度を向上させた。関節付近の皮膚は関節の動きによって変形するため皮膚感度が向上することで関節の動きを検出しやすくなった。その結果、関節位置覚が向上する可能性が示唆されたが、下腿部などバランス制御に関わる他の部位への振動刺激による確率共鳴現象の適用は成されていない。

3. 提案内容

本研究は高齢者の転倒の危険因子である関節位置覚の向上を目的とし下腿部に微弱振動を提示することで足関節の調節能力を向上させる手法を提案する。下腿部に振動を提示するのは足関節に直接装置を取り付けると歩行時の足の動きを阻害する可能性があるからである。したがって足関節付近で動きに影響の少ない箇所である下腿部を狙う。振動提示部位は足関節付近であることが望ましいため先ほどの動きの阻害を考慮し内果上方 10cm の箇所に定める。足関節における位置覚の精度とバランス制御の関連はすでに示されており、足関節の位置覚の精度が高ければ胴体バランスを制御しやすいため重心動揺を抑え、転倒リスクを抑

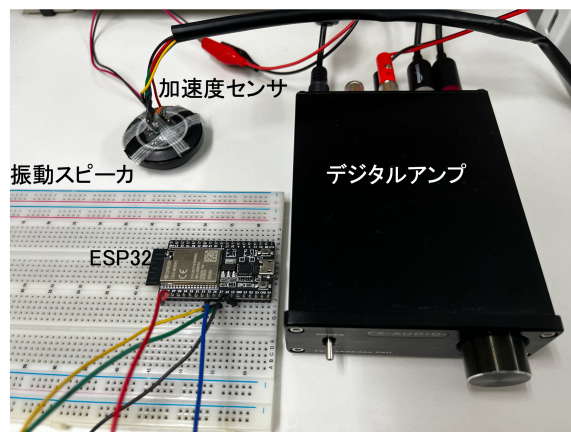


図 3: 振動提示装置

えることができる。さらにつま先の引っ掛かりによる転倒を防ぐことができるため転倒リスクを抑えられる。

3.1 振動提示装置

本研究で使用する振動刺激提示装置は図 3 のとおりである。振動提示に振動スピーカを使用し、振動印加部位の振動強度を計測するために三軸加速度センサを振動スピーカに接続している。また、この装置はパソコンから出力される振動波形をデジタルアンプで増幅し、振動スピーカで振動を出力する。三軸加速度センサで計測されたデータは ESP32 によって読み取られ、結果をパソコンに出力する。

4. 実験概要

4.1 振動強度の決定方法

確率共鳴現象を適用する際、振動閾値に近い振動強度が最も効果的であると一般的に考えられている。振動強度は強すぎると元の触覚を阻害してしまい、弱すぎると効果がなくなってしまうという特性がある。そのため、実験参加者ごとに極限法を用いて振動の知覚閾値 T (threshold) を測定する。実験時の振動強度の決定手順は以下に示す。

1. 実験参加者はリラックスした状態で机に座り、対象部位 (右足内果 10cm 上方) に振動子を両面テープで貼り付ける。
2. 実験参加者はヘッドホン (ホワイトノイズを提示) とアイマスクを装着、聴覚・視覚を遮断する。
3. 実験者は振動強度を最小値 (PC の音声ボリューム 1) に設定する。ボリュームは processing により制御し、0 から 200 まで調整可能である。
4. 実験参加者の対象部位の皮膚に振動を提示する。
5. 実験参加者に振動知覚の有無を二件法で回答してもらう。
6. 実験者は振動強度を上げる (PC の音声ボリュームを 1 ずつ上げる)。
7. 実験者は実験参加者に振動が知覚されるまで 6. を繰り返す。

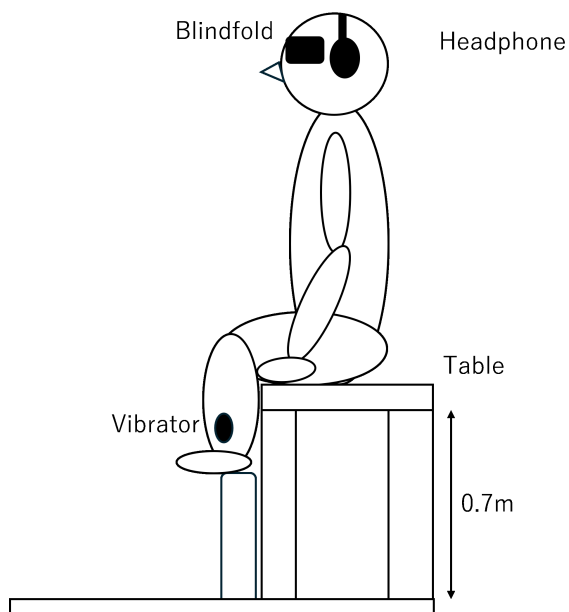


図 4: 足関節位置覚実験



図 5: 振動子取り付け位置

8. 実験者は実験参加者が振動を感じられたと回答した時の振動強度を記録する。
9. 実験者は振動強度を振動を感じられたと回答した時の2倍の大きさに上げる。
10. 実験者は振動強度を下げる (PC の音声ボリュームを1ずつ下げる)。
11. 実験者は実験参加者が振動を知覚できなくなるまで10. を繰り返す。
12. 実験者は実験参加者が振動を感じられなくなったと回答した時の振動強度を記録する。
13. 実験者は3. から12. を3回繰り返し、記録したすべての振動強度の平均値を計算し、振動閾値とする。

4.2 足関節位置覚実験

実験参加者ごとに測定した振動閾値を基準 T として、閾値の0.25倍 (0.25T), 0.5倍 (0.5T), 0.75倍 (0.75T), 1.0倍 (1.0T), 振動なし (0T) の5つの条件で実験を行う。確率共鳴現象による足関節付近の皮膚触覚感度の向上が、足関節位置覚に与える影響を評価する。

実験の手順を以下に示す。

1. 実験参加者は足置き台の上に裸足で右足を乗せ、机

の上に座り、膝を動かさないように机の縁にかけて固定する。

2. 実験参加者はアイマスクとヘッドフォン (ホワイトノイズを提示) を装着し、視覚と聴覚を遮断する。
3. 実験者は図5のように実験参加者の右足内果上方10cmに振動子を付け、極限法により知覚閾値を決定する。
4. 実験参加者は足を最大まで屈曲する。実験者はその時の角度を記録する。
5. 実験者の指示を受け、実験参加者は足を目標角 (参加者の足関節背屈最大角の6割) に屈曲する。
6. 実験参加者は足の屈曲が目標角に達すると実験者の指示を受け、足を指示を受けた角度で固定し3秒待機する。
7. 実験参加者は足を足置き台の初期位置に戻し、3秒待機する。
8. 実験参加者は足の屈曲を開始し、目標角を再現できたと感じたら、実験者に伝え、その足関節角を3秒保持する。実験者はその時の足関節角度を記録する。
9. 実験者の指示を受け実験参加者は、足を初期位置に戻す。

実験者は、この手順を振動強度条件 (振動なし, 0.25T, 0.5T, 0.75T, 1T) に対して行った。実験は、全振動強度条件を1周として、5周行った。1周における振動強度条件は全てランダムな順番で提示し、感覚順応を防ぐため1周ごとに1分間の休憩を取った。実験参加者は、健康な若年男性4名で過去3か月以内にねん挫等の負傷がない者とした。実験参加者に振動を提示する足は全て右足で統一した。これは健常者において利き足と非利き足において足関節位置覚に有意差がないためである [5]。

4.3 足関節位置覚実験評価

得られたデータの解析には、それぞれの振動強度について目標角と再現角の絶対誤差を用いた。振動無し条件と4つの振動有り条件それぞれで絶対誤差の平均値による比較を行った。また実験結果は Dunnett 検定で評価し、有意差の有無を確認した。

5. 結果・考察

実験結果は表1, 図6に示す通りである。表1では振動条件における足関節角度の再配置誤差を示しており、左列に振動条件, 中列に振動条件ごとの中央値, 右列に振動条件ごとの標準偏差を示している。図6では、振動条件と再配置誤差の箱ひげ図を示している。横軸は振動条件, 縦軸は各振動条件における再配置誤差を表す。

表1から振動無し条件 (0 T) を対照群とし、振動有り条件 (0.25, 0.5, 0.75, 1 T) と中央値と比較すると、振動有り条件ではそれぞれ再配置誤差が小さくなった。足関節角度の再配置誤差は値が小さいほど足関節位置覚の精度が高い。振動を提示することで足関節角度の再配置誤差が減少

表 1: 5 振動条件における足関節角度の再配置誤差

振動強度 (T)	平均値 (°)	標準偏差 (°)
0	1.3	0.6
0.25	0.9	0.6
0.5	0.7	0.6
0.75	0.7	0.6
1	0.9	0.7

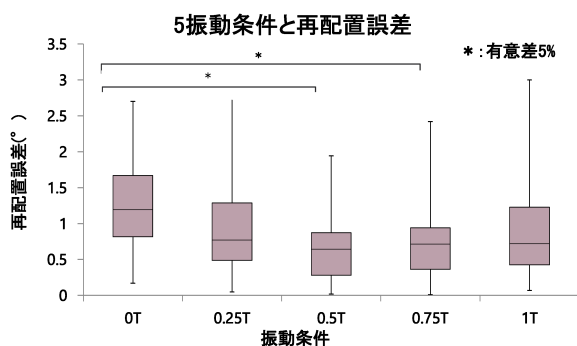


図 6: 足関節位置覚評価

したことから、振動提示によって足関節位置覚を向上できる可能性があるといえる。また、標準偏差を比較すると振動の有無によってデータの散らばり具合にほとんど変化がないことがいえる。図 6 より箱ひげ図が振動条件 0.5T を頂点とする山なりのグラフになった。このことから 0.5T の振動を印可することで最も効果的に足関節位置覚を向上できる可能性があるといえる。また、Dunnet 検定の結果、0T と 0.5T、0T と 0.75T のあいだで有意差が確認されたことから、0.5T と 0.75T の振動を印可することで足関節位置覚を有意に向上できる可能性が示唆された。足関節付近の下腿部へ微弱振動を印可したとき足関節位置覚が有意に向上できる可能性が示唆されたため、今後の実験で下腿部への微弱振動印加による足関節位置覚の向上がバランス能力へどのように影響するかを調べていく。本手法によって足関節位置覚の向上を図ることで高齢者の転倒問題の解消に貢献できる可能性が生まれた。

6. 結論

本研究では高齢者の転倒問題の解消のため、足関節付近の下腿部へ確率共鳴現象を適用することで足関節位置覚を強化する手法を提案した。振動無し条件と振動有り条件で足関節位置覚実験を行ったところ、中央値において振動無し条件と比較して振動有り条件では再配置誤差が小さくなった。また、Dunnet 検定の結果、0.5T と 0.25T において足関節位置覚が有意に向上する可能性が示唆された。下腿部への確率共鳴現象の適用によって足関節位置覚が向上したことで高齢者の転倒問題の解消に貢献できる可能性が生ま

れた。今後の実験では下腿部への微弱振動印加による足関節位置覚の向上がバランス能力へどのように影響するかを調べる。

参考文献

- [1] 厚生労働省. 令和 3 年 (2021) 人口動態統計 (報告書). <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/houkoku21/dl/all.pdf>. 2023.
- [2] 解良武士. 高齢者の転倒. 埼玉理学療法. vol.9, no.1, p7-13, 2002.
- [3] 川崎翼, 森岡周. 身体位置関係の認識と立位姿勢バランス能力の関連性. 理学療法科学. vol.24, no.2, p.257-262, 2009.
- [4] 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. vol.25, no.2,p171-182, 2016.
- [5] Amy S.N.Fu and Christina W.Y.Hui-Chan. Ankle Joint Proprioception and Postural Control in Basketball Players With Bilateral Ankle Sprains. The American Journal of Sports Medicine. vol.33, no.8, 2005.
- [6] Keisuke Shima, Koji Shimatani and Mami Sakata. A wearable light-touch contact device for human balance support. Scientific reports. vol.11, no.7324, 2021.
- [7] Benzi Roberto,Alfonso Sutera,et al. The mechanism of stochastic resonance. Journal of Physics A: mathematical and general, vol.14, no.11, p453, 1981.
- [8] 大木郁人, 橋本悠希. 大腿部への微弱振動印加が固有受容感覚に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会. vol.27, no.4, p361-368, 2022.
- [9] Collins,J.J.,Thomas T.Imhoff,et al.. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation. Physical Review. vol.56, no.1, p923, 1997.
- [10] Milosevic, M., McConville, K.M.V..Audio-visual biofeedback system for postural control. International Journal on Disability and Human Development. vol.10, no.4, p321-324, 2011.
- [11] T B Birmingham,J F Kramer,J T Inglis,C A Mooney,L J Murray,P J Fowler, S Kirkley. Effect of a neoprene sleeve on knee joint position sense during sitting open kinetic chain and supine closed kinetic chain tests. The American journal of sports medicine. vol.26, no.4, p562-6, 1998.
- [12] J J Collins, T T Imhoff, P Grigg. Noiseenhanced tactile sensation. Nature. vol.383, no.6603, p770, 1996.
- [13] 前野隆司. ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. 日本ロボット学会誌. vol.18, no.6, p772-775, 2000.
- [14] 千鳥司浩, 三上章允, 菅沼惇一. 遠隔からの確率共鳴刺激が足部の体性感覚に及ぼす影響. 理学療法科学. vol.24, no.3, p347-352, 2009.