



# 大腿後面への微弱振動印加による皮膚伸張知覚への影響

Effect of weak vibration applied to posterior of thigh on skin stretch perception

清水太陽, 橋本悠希

Hiroaki SHIMIZU, Yuki HASHIMOTO

筑波大学 システム情報工学研究群 知能機能システム学位プログラム  
(〒305-8573 茨城県つくば市 天王台 1-1-1, sec@iit.tsukuba.ac.jp)

**概要:**我々は大腿部に微弱振動を印加することで皮膚伸張知覚感度を高め、膝関節位置覚の精度を向上させる手法の確立に取り組んでいる。大腿前面への微弱振動印加による位置覚向上効果は既に報告されていることから、大腿後面に関しても同様の効果が生じる可能性がある。そこで本稿では、大腿後面への微弱振動印加によって位置覚に与える影響を検証し、その結果を報告する。

**キーワード:** 体性感覚, 確率共鳴現象

## 1. 序論

近年、転倒予防の重要性が高まってきている。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]。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きている。

従来の転倒予防を行う技術は、動力の増強に焦点を当てている[2]。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[3]。特に、膝関節位置覚の低下は、バランス能力の低下に影響を与える[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[5]。確率共鳴は、微弱な振動や電気刺激を雑音として用いることで、ヒトの感覚系にも適用することができる。雑音には主に、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、微弱な振動の印加によって指先や足裏の触覚感度を向上させた例がある[6][7]。

本研究室では、大腿部の皮膚の伸張が関節の位置覚に関与することに着目し、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する手法を提案している[8][9]。これは、大腿部の皮膚感覚に確率共鳴を応用することにより、膝を曲げ伸ばす際の皮膚伸張の感覚フィードバックが増加し、関節の位置覚が強化される

という仮説に基づく。先行研究では、大腿前面への微弱振動印加による影響を検証している。

そこで、膝の伸展により大腿部の前面と後面の皮膚の伸び縮みが反対向きに起こることに着目し[10]、大腿後面への振動印加によって膝関節位置覚に与える感覚フィードバックは、前面への印加によるものと異なるフィードバックを提供すると仮説を立てた。この仮説を明らかにすることを目的とし、大腿後面への微弱振動印加による皮膚伸張知覚および膝関節位置覚への影響を検証する。(図 1)

本稿では、大腿後面への微弱振動の印加が皮膚伸張の知覚感度に与える影響の検証結果を報告する。

## 2. 実験

本実験は、大腿後面への微弱振動の印加による皮膚伸張の知覚への影響を検証した。皮膚伸張の感度は、大腿部上に配置した接触子の動く方向の知覚によって評価した。最適な振動強度を明らかにするため、複数の振動強度で実験を行った。実験参加者は、健康な若年男性 9 名 (年齢  $22.2 \pm 1.5$  歳) であった。また、実験参加者の利き足は全員右足であった。

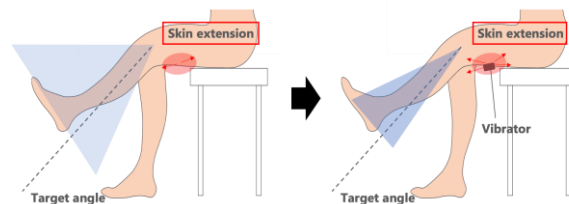


図 1: 提案手法の概要

2.1 実験装置

振動提示装置を図 2 に示す。大腿部への振動提示には、振動子 (Acoupe Laboratory:Vp210) を使用した。振動子は、実験参加者の大腿後面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) を通し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った。これは、下肢の関節付近が 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。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) に基づいて設定した。皮膚伸張刺激を行う装置を図 3, 実験の概要図を図 4 に示す。リニアアクチュエータ (ORIENTAL MOTOR:DRLM28G-03A1P-K) には、ロードセル (SPARK FUN:TAL221) 及び接触子を配置し、モータードライバー (ORIENTAL MOTOR:LRD507-K) で駆動した。接触子は、半径 4 [mm] のプラスチック製の円筒の先端にゴム製のボードが取り付けられた構成となっている。垂直方向の調整は、刺激中に皮膚と接触子が滑らないようにするため[11]に、0.25 [N] となるように三脚によって手動で行われた。

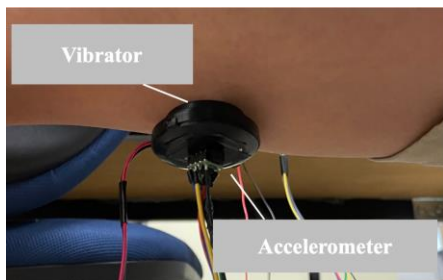


図 2: 振動提示装置

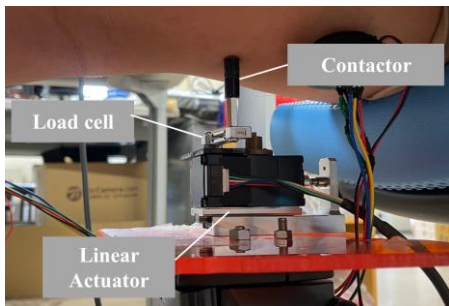


図 3: 皮膚伸張提示装置

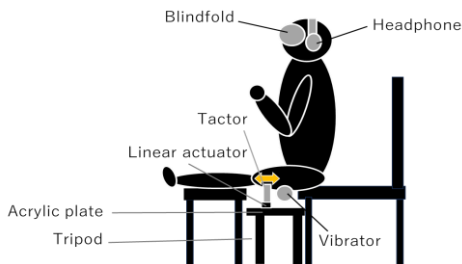


図 4: 実験セットアップ

2.2 知覚閾値の決定

初めに、各実験参加者の知覚閾値を決定した。まず、実験参加者はアイマスクとヘッドフォンをし、椅子に座った。下肢を伸展した状態にするため、椅子と同様の高さがある台に下腿を乗せた。振動子は、実験参加者の利き足の大腿後面に取り付けられた。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した。振動強度は、実験参加者ごとの知覚閾値をもとに決定した。この際、極限法を用いて上昇系列、下降系列を 2 回ずつ繰り返し、その平均値を知覚閾値とした。以降、簡単のため、知覚閾値を 1 T と表現する。

2.3 手順

実験参加者は、大腿部に両面テープで接触子を取り付け、ヘッドフォンとアイマスクを着用し、椅子に座る。接触子は、膝側に対して順方向と逆方向の 2 方向に移動する。また、接触子は、変位 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 [mm], 速度 0.25 [mm/s] の 5 種類の刺激条件で移動する。振動強度は、振動なし, 0.25T, 0.5 T, 0.75 T, 1 T の 5 つを使用した。実験の手順を以下に示す。

- 1) 実験者の合図の後、接触子が移動する。
- 2) 参加者は皮膚の伸びが「順方向」、「逆方向」であったかを強制二択で回答する。
- 3) 回答後、接触子は刺激開始位置に戻り、(1)に戻る。

実験は、各振動強度かつ刺激条件に対し、順方向、逆方向のそれぞれ 2 回ずつの移動について検証し、全 100 試行について回答を得た。20 試行ごとに休憩をおこなった。得られたデータの解析には、それぞれの振動強度ごとの正答率を用いた。

2.4 結果

図 5 に実験結果を示す。横軸は振動強度、縦軸は正答率を表す。振動なし条件を対照群とし、Steel 法による多重比較を実施した結果、0.5T( $p < 0.05$ ), 0.75T( $p < 0.01$ )の振動を印加したとき、有意差が認められた。表 1 に検定の結果を示す。

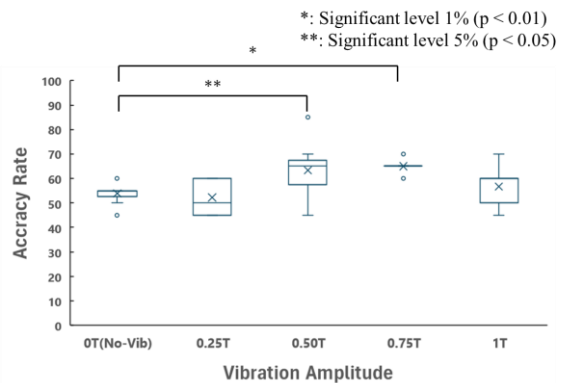


図 5: 各振動強度に対する正答率

表 1: 振動なしを対照群とした各振動強度の多重比較  
検定結果

Steel test	t-statistics	p value
No vib – 0.25T	0.507	0.963
No vib – 0.50T	2.468	0.047
No vib – 0.75T	3.713	0.001

### 3. 考察

本研究では大腿後面への確率共鳴現象の適用により、皮膚伸張の知覚感度が向上するという仮説を立てた。これに対し、0.5T または 0.75T の振動を印加することで皮膚伸張の知覚感度を向上できることが示された。これは、大腿前面に 0.5T から 0.75T 付近の振動の印加をすることにより知覚感度が向上するという先行研究[9]と一致し、大腿前面と後面という部位の違いにかかわらず確率共鳴現象により知覚感度が向上することが示唆された。また大腿前面に振動を印加した実験では、振動なしの条件で70%以上の正答率があった高感度群に対して知覚感度が向上せず、難易度が適切でなかったと考察された。しかし、本実験では被験者全体に対して知覚感度の向上が示され、適当な実験条件であったと考える。

### 4. 結論

本実験では、大腿後面への微弱振動の印加による皮膚伸張の知覚への影響を検証した。結果、0.5T と 0.75T の振動印加により、皮膚伸張の知覚感度を向上できることが示された。今後は、大腿後面および両面への微弱振動印加による膝関節位置覚の改善を評価する。これらを検証することで、部位による感覚フィードバックの違い、および相乗効果について明らかにする。

### 参考文献

- [1] World Health Organization. (2021, April 26). "Falls": <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>
- [2] 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)
- [3] Rubenstein, L. Z., Robbins, A. S., et al.: The value of assessing falls in an elderly population: a randomized clinical trial; Annals of internal medicine, 113(4), 308-316 (1990)
- [4] McChesney, John W. et al.: 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] Benzi Roberto, Alfonso Sutura, et al.: The mechanism of stochastic resonance; Journal of Physics A: mathematical and general, 14(11), 453 (1981)
- [6] 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)
- [7] Kudoh, S., Obara, A., et al.: Enhancement of plantar tactile sensitivity by wearable stabilization device based on stochastic resonance for fall prevention; Journal of Robotics and Mechatronics, 25(6), 888-896 (2013)
- [8] Edin, Benoni B.: Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans; The Journal of physiology, 531(1), 289-297 (2001)
- [9] 大木郁人, 橋本悠希: “大腿部への微弱振動印加による感覚機能の向上が運動機能に与える影響”, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究群修士論文,(2023)
- [10] Jiyoung Choi, Kyunghi Hong.: 3D skin length deformation of lower body during knee joint flexion for the practical application of functional sportswear, Applied Ergonomics, 48, 186-201 (2015)
- [11] Gleeson, B. T., Horschel, S. K., et al.: Design of a fingertip-mounted tactile display with tangential skin displacement feedback; IEEE Transactions on Haptics, 3(4), 297-301 (2010)