



大腿部への微弱振動印加による膝関節位置覚への影響

Effect on knee joint position sense of applying weak vibrations to the thigh

大木郁人¹⁾, 橋本悠希¹⁾²⁾

Fumihito OKI and Yuki HASHIMOTO

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

2) JST さきがけ (〒102-0076 東京都千代田区五番町 7, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 関節の位置覚の低下は、高齢者の転倒の危険因子の一つである。体性感覚系では、機械受容器に閾値以下の振動を加えることで、触覚感度が向上することが知られている。本研究では、若年健康者 20 名を対象に、大腿部に加えた微弱な振動が膝の関節位置覚に及ぼす影響について検証した。膝の関節位置覚は、目標とする膝関節角度と実験参加者が再現した膝関節角度との絶対誤差によって評価した。結果、元々の関節位置覚の精度が低い群に対して、大腿部への振動が有効であることが示唆された。

キーワード: 確率共鳴, 関節位置覚, バランス能力

1. 序論

近年、先進国の高齢化の進展に伴い、転倒問題の重要性は増してきている。転倒は、加齢によるバランス能力の低下と関連することが報告されている[1]。転倒の動作要因に、椅子やベットからの起立動作がある[2]。そのため、現在まで、起立動作を補助する様々な技術が検討されてきた。

従来の起立動作を支援する技術は、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。しかし、転倒は筋力の低下だけでなく、関節位置覚等の体性感覚機能の低下も要因であることが示唆されている[4]。

体性感覚機能を高める手法の一つに、確率共鳴がある。確率共鳴は、非線形系における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出率が向上する現象である。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。例えば、指先や足裏への振動刺激の適用が、それらの触覚感度を向上させることが報告されている[5]。

本稿では、確率共鳴を大腿部に適用することで膝関節位置覚を向上させる手法を提案する。大腿部の皮膚伸張の感覚が膝関節位置覚に関与することが知られている[6]。よって、大腿部に微弱な振動を与えることにより、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、膝の関節の調節能力が強化されると考えられる。提案手法の効果を検証するため、健康な成人を対象とし、目標角度に膝を伸展する精度について実験を行った。

2. 実験

本実験では、大腿部前部への微弱振動の印加による膝関節位置覚の精度への影響を検証する。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う。

2.1 実験装置

振動提示装置を図 1 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る。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。

関節角度を計測するために、ゴニオメータ (追坂電子機器社:OE-G2AX) を用いた。ゴニオメータは、無線で PC と通信しており、サンプリング周波数は 200 [Hz] に設定された。また、振動強度の決定のため、加速度センサ (Kionix 社:KXR94-2050) を使用した。加速度センサの値は、マイクロコントローラ (Arduino 社 : Arduino Uno SMD R3) を通じて PC に送信された。

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

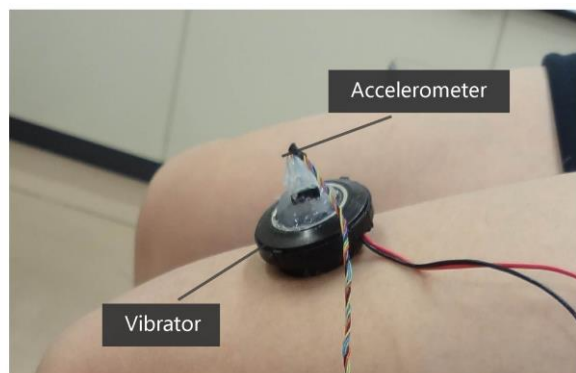


図 1: 振動提示装置

ず、実験参加者は、アイマスクとヘッドホンをし、椅子に座った。振動子は、実験参加者の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。実験者は、振動強度を変化させ、実験参加者ごとの知覚閾値を決定した。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 実験手順

実験の概要図を図 2 に示す。本実験は、健康な 20 代男性 20 名に対して行った。実験参加者の不要な動きを抑えるため、体幹と利き足の力を抜くように指示した。また、実験参加者にアイマスクとヘッドホンをさせ、足のつかない台の上に裸足で座らせた。以下に、実験の手順を示す。

- (1) 実験参加者は、膝を目標角に伸展する。
- (2) 実験参加者は、膝の伸展が目標角に達すると、実験者の指示を受け、その関節角を 3 秒間保持する。
- (3) 実験参加者は、膝を初期位置に戻し、3 秒間待機する。
- (4) 実験参加者は、膝の伸展を開始し、目標角を再現する。
- (5) 実験参加者は、関節角度を再現したら、実験者に再現したことを伝え、関節角度を 3 秒間保持する。
- (6) 実験参加者は、膝を初期位置に戻す。

実験者は、この手順を振動なし、1 T、0.75 T、0.5 T、0.25 T の 5 つの振動強度条件についてランダムな順で行った。また、記憶効果を防ぐため、これらの振動強度条件の間に、ダミーの目標角を用いて実験を行った。実験は、5 つの振動強度条件とその間のダミー角度での施行で計 9 回を 1 セットとして、3 セット行った。また、1 セット終わるごとに 5 分間の休憩をとった。目標角は、座位状態から 30 度膝を伸ばした角度に設定された。これは、起立動作時の膝の関節角を想定したものである。また、ダミー角度は、座位状態から 50 度膝を伸ばした角度に設定された。

2.4 解析方法

解析には、それぞれの振動強度について、目標角と再現

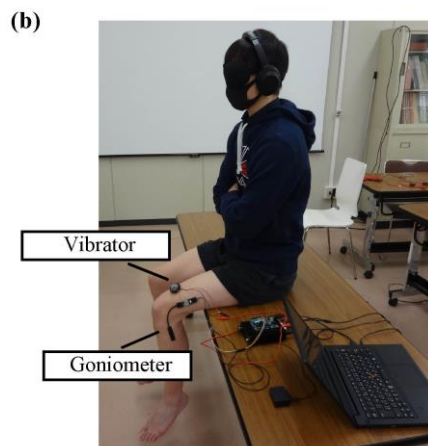
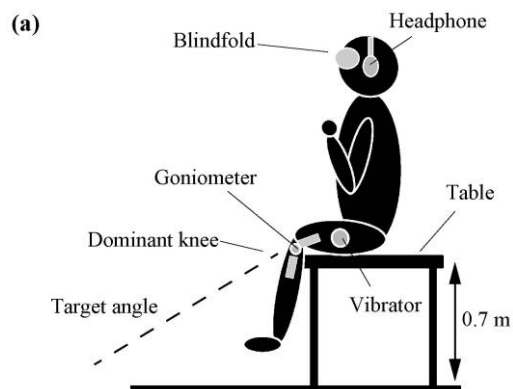


図 2: (a) 実験の概略図, (b) 実験の様子

した角度の絶対誤差の 3 回分の中央値を用いた。また、Smirnov Grubbs の棄却検定を行い、有意水準 0.05 でかけ離れた値をもった実験参加者のデータは外れ値として棄却した。

実験参加者を振動なしの条件で、絶対誤差の値が小さかった上位 9 名と下位 10 名に分けた。これは、元々の関節位置覚の精度が高い群と低い群に分けて、本手法の効果を分析するためである。

2.5 結果

図 3 に実験結果を示す。横軸は振動強度、縦軸は目標角と再現した角度の絶対誤差である。絶対誤差が小さいほど、膝関節位置覚の精度が高いことを表している。多重比較を行った結果、元々の膝関節位置覚の精度が低い群に関して、0.5 T ($p < 0.05$) のとき、振動なし条件に対する有意差が認められた (対立仮説: 振動なし条件 ≠ 振動条件)。表 1、表 2 に多重比較の結果を示す。

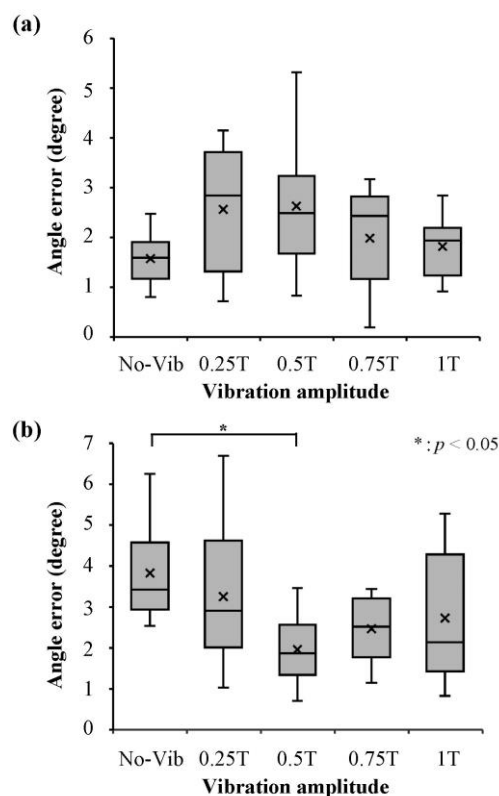


図 3: (a) 元々の膝関節位置覚の精度が高い群の実験結果, (b) 元々の膝関節位置覚の精度が低い群の実験結果

表 1: 元々の膝関節位置覚の精度の高い群の検定結果

Dunnet test	F - statist ics	p value
No-Vib - 0.25 T	2.1277	0.1236
No-Vib - 0.5 T	2.2689	0.0920
No-Vib - 0.75 T	0.8808	0.7912
No-Vib - 1 T	0.5217	0.9583

表 2: 元々の膝関節位置覚の精度の低い群の検定結果

Dunnet test	F - statist ics	p value
No-Vib - 0.25 T	-1.000	0.7126
No-Vib - 0.5 T	-3.250	0.0080
No-Vib - 0.75 T	-2.367	0.0728
No-Vib - 1 T	-1.915	0.1859

3. 考察

元々の膝関節位置覚の精度が高い群に関して、振動なし条件と 4 つの振動条件のいずれも膝関節位置覚の精度の有意な改善を検出できなかったため、仮説を支持することはできなかった。また、全体として、振動の印加によって膝関節位置覚の精度が悪化する傾向がみられた。したがって、微弱な振動の印加は、元々の膝関節位置覚の精度が高い群にとって、関節位置の把握を阻害する可能性が考えら

れる。

元々の膝関節位置覚の精度が低い群に関して、振動の印加によって、全体として位置覚の精度は向上する傾向がみられた。また、振動なし条件に対して、0.5 T の振動条件で関節位置覚の精度が有意に改善した。したがって、元々の関節位置覚の精度が悪い集団に対して、本手法が有効である可能性が示唆される。

4. 結論

本稿では、微弱な振動を大腿部前部へ印加することで、膝関節位置覚を強化する手法を提案した。本手法の有効性を検証するため、膝関節を伸展する精度を検査した。結果、振動の印加によって、元々の膝関節位置覚の精度が低い群に対して、提案手法の有効性が示唆された。

今後は、高齢者等の体性感覚機能の低下した対象者に対して、検証を行う予定である。また、バランス機能の改善を評価する予定である。

謝辞

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

参考文献

- [1] Maki, B. E., Holliday, P. J., and Topper, A. K. (1994). A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population. *Journal of gerontology*, 49(2), M72-M84.
- [2] Yang, F., Bhatt, T., and Pai, Y. C. (2009). Role of stability and limb support in recovery against a fall following a novel slip induced in different daily activities. *Journal of biomechanics*, 42(12), 1903-1908.
- [3] Hiyama, Takahiro, Yusuke Kato, and Tsuyoshi Inoue. "Sit-to-stand assistance system based on using EMG to predict movement." 2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). IEEE, 2017.
- [4] Lord, S. R., Clark, R. D., and Webster, I. W. (1991). Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *Journal of gerontology*, 46(3), M69-M76.
- [5] Collins, J. J., Imhoff, T. T., and Grigg, P. (1996). Noise-enhanced tactile sensation. *Nature*.
- [6] Edin, B. B. (2001). Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans. *The Journal of physiology*, 531(1), 289-297.