



振動強度を変化させた振動刺激による膝関節固有感覚への影響

The effect of vibratory stimulation with varying vibration intensity on knee joint proprioception

遠藤圭悟¹⁾, 廣川暢一¹⁾, Modar Hassan¹⁾, 鈴木健嗣¹⁾

Keigo ENDO, Masakazu HIROKAWA, Modar HASSAN and Kenji SUZUKI

1) 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, endo@ai.iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 固有感覚の機能低下は感覚フィードバックを減少させ運動機能に制限を生じる。固有受容器にตอบสนอง周波数での定常振動を加えることで筋の伸長方向への運動錯覚を引き起こし、関節位置覚やバランス機能が向上することが知られている。本研究では、膝関節角度に基づき振動強度を変化させた振動刺激が膝関節固有感覚に及ぼす影響について検討した。その際の膝関節位置覚の変容を報告する。

キーワード: 振動刺激, 運動錯覚, 固有感覚

1. はじめに

リハビリテーション分野では、感覚フィードバックと運動制御の統合が不足し、筋力回復後も運動機能が制限されることがある [1]。固有受容覚は、筋や腱の受容器が、力覚、位置覚などの複合的な身体情報を脳へ伝達する感覚であり、運動や姿勢の制御に重要な役割を果たしている。このため、つまずきやすなり動作は固有感覚の機能低下により起因するという報告も見られ [1]、高齢者の転倒事故等の予防に向け固有感覚の機能を高めることが求められる。固有受容器を直接刺激することで刺激神経筋機構の促進を図る手法としては PNF (Proprioceptive Neuromuscular Facilitation) が挙げられるが、専門家を必要とするため、実施環境が限定される。

環境制限の少ない賦活化手法として、運動刺激がある。Goodwin らや上里らは皮膚上からの振動刺激が、刺激された筋の伸張方向への運動錯覚が生じることを示している [2][3]。こうした振動刺激による運動錯覚を利用したニューロリハビリテーション研究が進められ、Ozvar [5] らやFerrari [6] らは筋への定常振動刺激によるバランステストや関節伸展性の即時的向上を確認している。

しかしながら、これら研究にて用いられる振動刺激は異なり、最適な周波数や振幅の組み合わせは未だ確立されていない。加えて能動運動に応じて振動条件を変化させた研究例は現在確認されていない。本研究では、関節運動中の筋の運動状態に基づき、振動強度を変化させる機能的振動刺激について考える。これより、固有受容覚機能を賦活させる振動刺激の特性を明らかにする。

2. 提案手法

図 1 に提案する機能的振動刺激の概要図を示す。これは、関節運動に伴って変化する求心性神経の発火頻度と、振動強度の変化による発火頻度を対応させることで、固有受容覚に基づく身体操作への介入を目的とする手法である。図 2 にシ

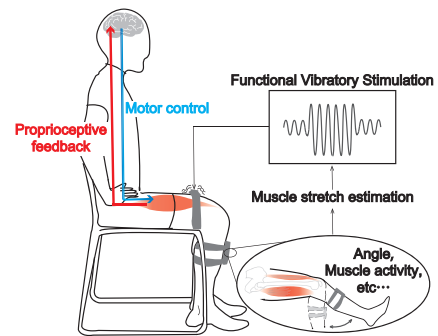


図 1: 提案手法の概要

ステム構成を示す。振動刺激では、機器からの電気信号を、振動子を用いて機械運動に変換することで対象へ提示する。

本研究にて提案する機能的振動刺激とは、筋長、関節角度、筋活動といった対象の運動状態に変化する要素により、振動刺激の振幅 A や周波数 λ を変化させる振動刺激である。図 3 に実際開発した機器を示す。コントローラには ESP32-DevKitC を使用し、IMU (BOSCH 社, BNO055) から得られた姿勢情報に基づき、デジタル発振器 (ANALOG DEVICES 社, AD9833)、およびデジタル可変抵抗 (ANALOG DEVICES 社, AD8400)、オーディオアンプ (東芝, TA7368P) により、ボイスコイル (アークヴ・ラボ, バイプロトランスデューサ Vp2 シリーズ) に提示する振動刺激の周波数、および振動強度を、リアルタイムに制御する。上記および電源用バッテリーは、Stratasys 社製の 3D プリンタを用いて作成したケースに配置され、伸縮性バンドにより使用者の四肢に装着できる。ここでは、膝関節の伸展・屈曲運動時、機器の位置が変化するのを防ぎ、かつ使用する対象の膝蓋骨周囲の個体差に対応するため、固定力のある伸縮性のバンドを利用する。図 3 に実際に開発した機器を示す。

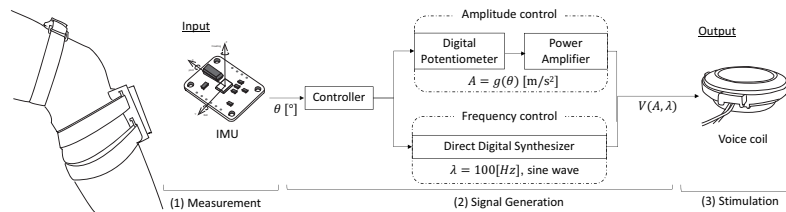


図 2: システム構成

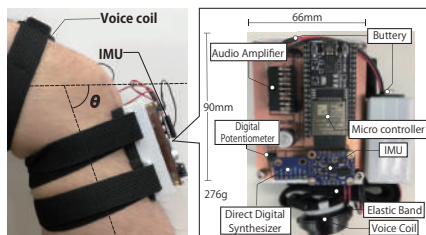


図 3: 開発した機能的振動刺激提示機器

3. 実験

3.1 実験手順

運動状態に基づく機能的振動刺激が固有受容覚に及ぼす影響を明らかにするため、膝関節の位置覚に基づく角度制御実験を行った。健常者 9 名を実験参加者とし、機器を膝関節周辺に装着した状態で (a) 安静 (Control), (b) 定常振動刺激 (SVS), (c) 機能的振動刺激 (FVS) の 3 条件の振動刺激を提示した。各条件前後に、関節位置覚測定を行った。実施順はランダムとし、2 日以上 (2~3 日) の間隔を設けた。(a) 安静条件では、測定間に 1 分間の安静、(b) 定常刺激条件では、1 分間の一定振幅の振動刺激、(c) 機能的振動刺激では、椅座位にて膝関節伸展運動を 1 分間行ってもらい、運動状態に基づく機能的振動刺激を提示した。

3.2 結果

実験結果を図 4 に示す。グラフの縦軸は、条件前後での実験対象者 9 名の計測角を表す。結果より、(a) 安静条件では実験参加者のうち 6 名、(b) 定常振動刺激では 4 名、(c) 機能的振動刺激では 5 名で介入前後の関節角誤差が減少した。

4. 考察

結果より、安静条件で関節角誤差が減少する実験参加者が最も多かったことがわかる。また、定常振動刺激と機能的振動刺激では、角度誤差が増加するという結果となった。この結果は先行研究と異なり、本実験で提示した振動強度が、不十分であったと考察する。今回、機能的振動刺激では、振動強度を $3 \text{ [m/s}^2\text{]}$ から $26 \text{ [m/s}^2\text{]}$ で変化させた。また、定常振動刺激では、 $26 \text{ [m/s}^2\text{]}$ を用いた。この振動強度が、固有受容覚の賦活に不十分であった可能性を考慮し、今後は提示可能な振動強度を増加し、異なる振動条件を検証する。

加えて本実験では実験参加者は健常者であった。今後は、脳卒中患者や運動失調症患者などの固有受容覚の機能低下が見られる方々を対象として、機能的振動刺激の効果を確

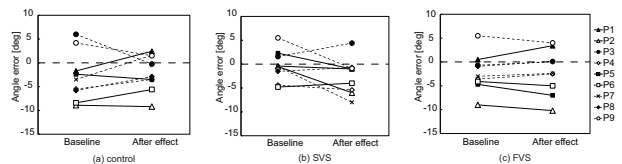


図 4: 各条件における前後での関節角誤差

認していきたい。

5. おわりに

本研究では、運動状態に基づく機能的振動刺激を提示する装着型機器を提案した。本手法では、筋の運動状態から振動強度を変化させた機能的振動刺激を使用者に提示する。実験結果より、機能的振動刺激の介入により、固有受容感のうち関節位置覚の向上が確認された。向上効果には個人差が見られたものの、運動状態に基づく機能的振動刺激が固有受容覚に介入し、その感覚を賦活させる可能性を示唆する結果が得られた。今後は異なる振動強度による検討や脳卒中患者や運動失調患者を対象として研究を進めてゆく。

参考文献

- [1] N. Bologniet.al: The sensory side of post-stroke motor rehabilitation, *Restorative Neurology and Neuroscience*, Vol. 34, No. 4, pp. 571-586, 2016.
- [2] G. M. Goodwin, et.al: Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception?, *Science*, Vol. 175, No. 4028, pp. 1382-1384, 1972.
- [3] 神里 巖, et.al: 振動刺激による運動錯覚が固有感覚機能に及ぼす影響, *理学療法科学*, Vol. 33, No. 3, pp. 385-388, 2018.
- [4] 本多 正計, et.al: 振動刺激条件の相違が運動錯覚の誘発と知覚量に及ぼす影響, *TVRSJ*, Vol.19, No.4, pp. 457-466, 2014.
- [5] G. B. Özvar, E. Ayvat, M. Kılınç: Immediate Effects of Local Vibration and Whole-body Vibration on Postural Control in Patients with Ataxia, *The Cerebellum*, Vol. 20, No. 1, pp. 83-91, 2021.
- [6] F. Ferrari, et.al: Proprioceptive Augmentation With Illusory Kinaesthetic Sensation in Stroke Patients Improves Movement Quality in an Active Upper Limb Reach-and-Point Task, *Frontiers in Neurobotics*, Vol. 15, article 610673, 2021.