

振動刺激による緊張性振動反射を利用した下肢アシストの可能性

乾 啓生 (信州大学), ○秋山 靖博 (信州大学), 岡本 正吾 (都立大学)

Gait Assist using Tonic Vibration Reflex Caused by Vibration Stimuli

Hiraku INUI (Shinshu University), ○Yasuhiro AKIYAMA (Shinshu University), and Shogo OKAMOTO (Tokyo Metropolitan University)

Abstract: A novel assistive device using external stimuli was designed. We explored the effect of tonic vibration reflex on walking. Experiments assessed ankle dorsiflexion via this reflex in the tibialis anterior muscle. Optimal vibration stimulation was found at the muscle's stopping point during static and walking tests. As the next step, the effect of stimuli on gait motion should be explored.

1. 緒言

近年の世界的な高齢化の進行やそれに伴う介護人材の不足から、高齢者の自立生活の重要性はより高くなっている。このような現状への対応として装着型歩行アシストデバイスが有用であると考えられる。現状装着型歩行アシストデバイスは、アクチュエータ型アシストデバイスと無動力型デバイスの2種類に大別できる。アクチュエータ型はアクチュエータでアシスト箇所にトルクを印加する一方、無動力型デバイスはばねの弾性力などを用いる、装着者自身の力をアシスト部位に伝達する、等の方法でアシストをする。アクチュエータ型はアシスト力が高いが重量や電源などの制限が多い、無動力型は重量や電源などの時間的拘束は少ないが、アシスト力がアクチュエータ型に比べて低い。この問題を解決するために、軽量で効果の高い新たな装着型歩行アシストデバイスの開発、そして実用化が求められている。

新しい装着型歩行アシストデバイスの歩行補助の方法として、外部刺激に着目した。アシスト力を直接加えることで歩行を補助する既存の装着型アシストデバイスとは異なる、装着者自身の動作を誘導することで歩容を改善するデバイスの開発を目標とした。背屈運動を促進する外部刺激として振動刺激に着目した。振動刺激によって緊張性振動反射を引き起こし、足関節の背屈運動に大きく関わる前脛骨筋を収縮させることで足関節を背屈させて床と足のクリアランスを増加させることを目的としている。

本研究の目的は緊張性振動反射が実際の歩容に与える影響を解明することである。そのための基礎的検討として前脛骨筋での緊張性振動反射による、足関節の背屈運動の検証を行った。

2. 緊張性振動反射を用いたアシストの原理

歩行機能を向上させる刺激として振動刺激に着目した。筋肉に振動刺激を与えることで緊張性振動反射を発生させ、それにより足関節の底背屈トルクを発生させ、歩行を補助する。

緊張性振動反射とは、筋腱に機械的振動刺激を加えることで筋紡錘体が発火し、脊髄が筋活動を錯覚することで活動が伝達され、刺激される筋に反射性収縮を起こす反射である[1]。人間の腱に約100 Hzの機械的振動を加えると、筋紡錘のIa線維の活動により筋の不随

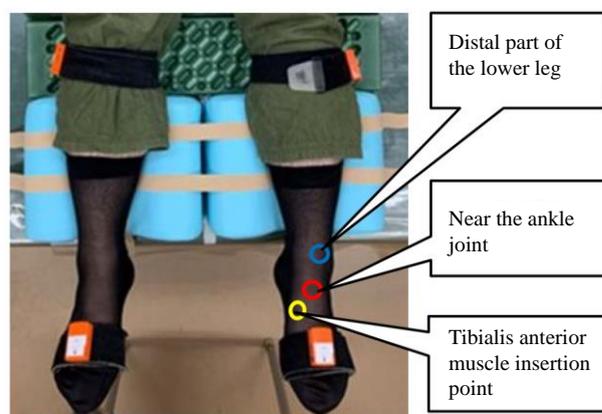


Fig. 1 Measurement posture and points of stimuli

意的な収縮と拮抗筋の弛緩が起こる。この反応は1秒以内に現れ、2—5秒で最大になりその後は維持される。この反応の強さには個人差があるが、新生児から70歳以上の100人の被験者で全く反応がない人はいないことが報告されている[2]。しかし、振動が強すぎると不快感や離脱反応が生じることがあり、振動数の増加も反応を増大させる。また、200 Hzの高周波振動は筋や腱の動きとの同期が少ない[3]。本研究では、足関節背屈筋である前脛骨筋に緊張性振動反射を発生させる実験を行った。

3. 実験

3.1 装置

前脛骨筋に振動刺激を加え緊張性振動反射による歩行補助を行う新しい装着型アシストデバイスの開発するため、前脛骨筋へ加える振動刺激の有効な刺激位置の特定と運動中の足関節への緊張性振動反射の効果を検証するための実験を行った。振動刺激を加えることで装着者の動作を誘導するために、デバイスによる振動刺激を加える適切な部位を実験で決定する静止状態実験と、振動刺激を運動状態で加えた際の効果を検証する運動状態実験を行った。

振動波形はマイコン(Arduino)によって生成された150 Hzの矩形波をローパスフィルタと差動増幅回路で

正弦波に変換したものをを用いた。振動刺激は、アンプ（ノースフラットジャパン社製 FX-AUDIO- FX502J）を用いて増幅した波形をボイスコイルモータ（アクーヴ・ラボ社製 Vp408, 6 V 750 mA）を介して刺激部位に与えた。ボイスコイルモータは靴下の上からベルクロのバンドで固定した。計測を行わない反対の脚にもダミーのモータを取り付け左右で重さの差がない様にした。

本実験で使用した計測装置は慣性センサ式モーションキャプチャ（MVN, Movell 社製）とビデオカメラである。慣性センサ式モーションキャプチャは下半身のみ装着してサンプリング周波数 100 Hz で計測し、足関節の底背屈方向の関節角度を取得した。

振動を加える刺激位置は事前実験から前脛骨筋停止部、下腿下部、足関節付近の 3 か所とした。具体的な計測の様子と刺激位置を Fig. 1 に示す。被験者は男子大学生 4 名とした。被験者をそれぞれ A, B, C, D とする。

被験者ごとの体格や姿勢による結果のばらつきを抑えるため、足の位置を脚部用枕で固定した。この時、脚部用枕の高さによって足にかかる力を緩和するためクッションを使用して大腿や下腿を支え自然な姿勢を維持できるようにした。

本実験は信州大学ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会の許可（許可番号 360）のもとで行われた。

3.2 静止状態実験

静止状態実験では被験者が全身をリラックスした状態で机の上に横になり、前脛骨筋に振動刺激を与え、筋活動を出来るだけ抑えることで、緊張性振動反射による足関節の背屈運動を引き起こす。

刺激位置にボイスコイルモータを配置し、ベルクロのバンドで固定した。1 回の計測の所要時間は 20 s で、計測開始から 5 s を経過したときに振動刺激を与えた。15 s の振動刺激の間、足関節の関節角度を計測した。

各刺激位置で計測を 3 回ずつ行い、3 か所全ての刺激位置での計測終了後、最初に計測した刺激位置で再度計測を 3 回行った。静止状態実験の計測は合計で 12 回行った。

3.3 運動状態実験

足関節底背屈運動中に前脛骨筋に振動刺激を加えることで緊張性振動反射による運動変化を計測する運動状態実験を行った。刺激位置は事前実験から前脛骨筋停止部に決定した。

計測条件は振動がある状態での背屈運動と振動が無い状態での背屈運動の 2 種類で行った。計測は条件毎に 3 回行い、計 12 回計測した。

被験者は静止状態と同様に机の上に横になり、脚部用枕で足を固定した状態で行った。被験者間の底背屈運動を一定にするために、足へ特に力を入れていない

状態の足関節の底屈状態で足先が板に触れる角度から -6 deg の角度にストレッチボードを傾け、底背屈運動の底屈方向の下限とした。底背屈運動は 60 bpm のメトロノームの 1 拍ごとに底屈と背屈を交互に行う運動を行わせた。

実験は運動状態の被験者に静止状態実験と同様に振動刺激を 20 s 与えその間の足関節の底背屈方向の関節角度を計測した。振動なしの状態でも振動ありの状態と同じように振動させずにボイスコイルモータを装着したまま、底背屈運動を行い計測した。

3.4 データ解析

静止状態実験においては刺激開始時の関節角度を刺激前の関節角度とし、変化量を示すためにこの関節角度を 0 deg として扱った。関節角度の時系列データは 5 次の移動平均で平滑化を行った。関節角速度の時系列データには 51 次の移動平均で平滑化を行った。

緊張性振動反射の反応は数秒間の足関節の背屈運動から、背屈状態の維持に切り替わることが知られている。本実験の計測結果ではその転換点を角速度 0.2 deg/s と定めた。角速度が 0.2 deg/s 以下になる時間とその時の関節角度を比較することで、刺激位置ごとの緊張性振動反射による足関節の背屈運動を比較した。

さらに、歩行補助デバイスの開発と言う観点から、歩行周期をおよそ 1 s としてその半分である 1 歩分の 0.5 s と 1 周期分の 1 s 時点でも刺激位置の比較をした。

運動状態でも静止状態実験と同様に 5 次の移動平均を用いて平滑化した。また、足関節 1 往復毎の p-p 値を取得し、1 計測から 10 回分の p-p 値を取得した。振動ありと振動なしの 2 条件の実験を条件毎に 3 回計測したので、条件毎に 30 個の p-p 値を各被験者で取得した。

4. 実験結果と考察

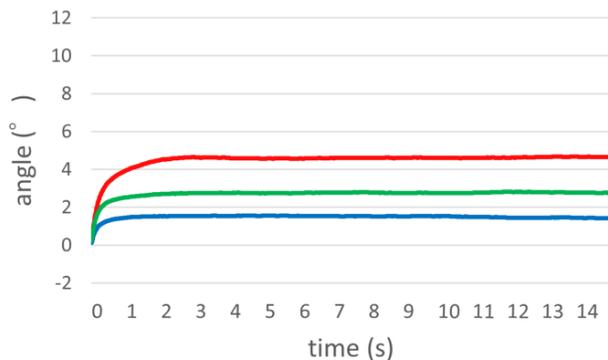
4.1 代表的な波形

足関節角度および角速度の代表的な時系列パターンを Fig. 2 に示す。刺激開始時点を 0 s とした。

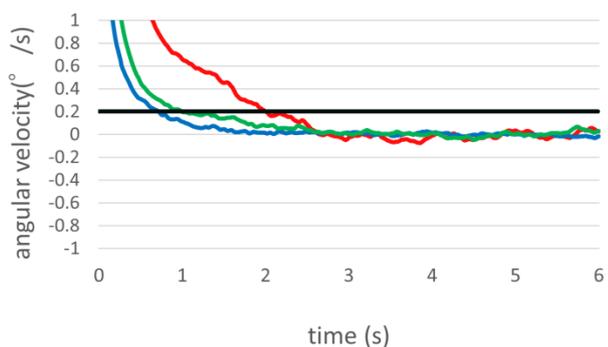
4.2 結果

計測結果から得られたデータを以下に示す。静止状態実験の足関節底背屈運動の角速度が 0.2 deg/s 以下になる時間とその時間の関節角度を Fig. 3 に示した。全ての被験者が時間経過と共に角速度が 0 に近づくことから、角速度で緊張性振動反射による関節角度の評価をするタイミングを決定した。

Fig. 3 から時間と関節角度が大きい群と小さい群に二分した。角速度 0.2 deg/s となった際に角度が大きい刺激位置の方が緊張性振動反射で得られる足関節の背屈運動は大きいと考えられる。大きい群には前脛骨筋停止部が 4 つ、下腿下部が 4 つ、足関節付近が 1 つのデータが含まれている。



(a) Joint angle



(b) Joint angle velocity

Fig. 2 Typical pattern of ankle joint angle and angle velocity (subject B)

振動刺激開始時から 0.5 s と 1.0 s 経過時の足関節の背屈方向の関節角度の変化を Fig. 4 に示した. 歩行周期は約 1 s なので歩行中に緊張性振動反射による足関節の背屈運動が床とのクリアランスに影響を及ぼすには, 1 s 以内で足関節が背屈している必要がある. そのため, 評価時間を 1 歩分の 0.5 s から 1 周期分の 1 s の間での関節角度で評価した. 時間経過によって関節角度が低下することはなかった.

運動状態実験を Fig. 5 に示した. 被験者 4 人の振動あり状態と振動なし状態の足関節の背屈方向の関節角度の p-p 値の箱髴図を被験者毎に比較すると被験者ごとに個人差はあるが, 振動の有無による違いは全体的に見られなかった.

4.3 考察

Fig. 3, Fig. 4 から足関節付近への刺激では関節角度が小さいものも多く, 下腿や前脛骨筋停止部への刺激と比べて緊張性振動反射を得るための効果的な刺激位置とは言えない. 下腿と停止部を比較すると, Fig. 3 では両方とも角度が大きい群に同数存在し, Fig. 4 では下腿の方が大きい計測結果が多いが, 停止部に比べて小さい計測結果も多く, 個人差が激しい刺激位置と言える. Fig. 4 では停止部は全ての計測結果で関節角度が 1 deg 以上を示しており, 下腿と比較して個人差が少ない. そのため, 前脛骨筋停止部が最も緊張性振動反射を起こす刺激位置として有効な位置だと考えられる.

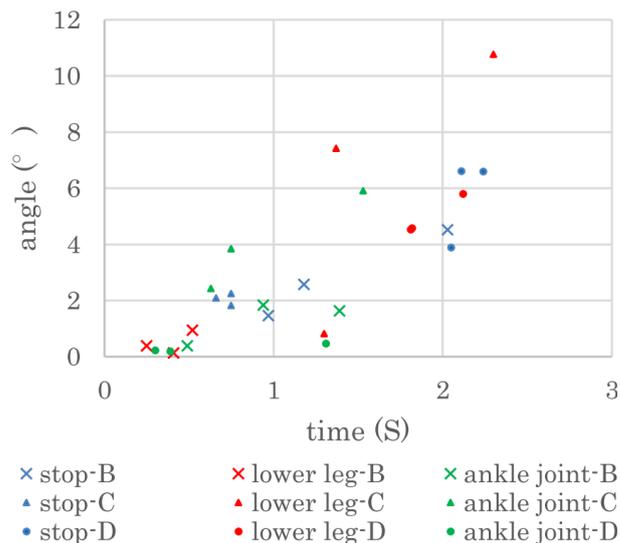


Fig. 3 Time and joint angles on angle velocity became < 0.2 deg/s

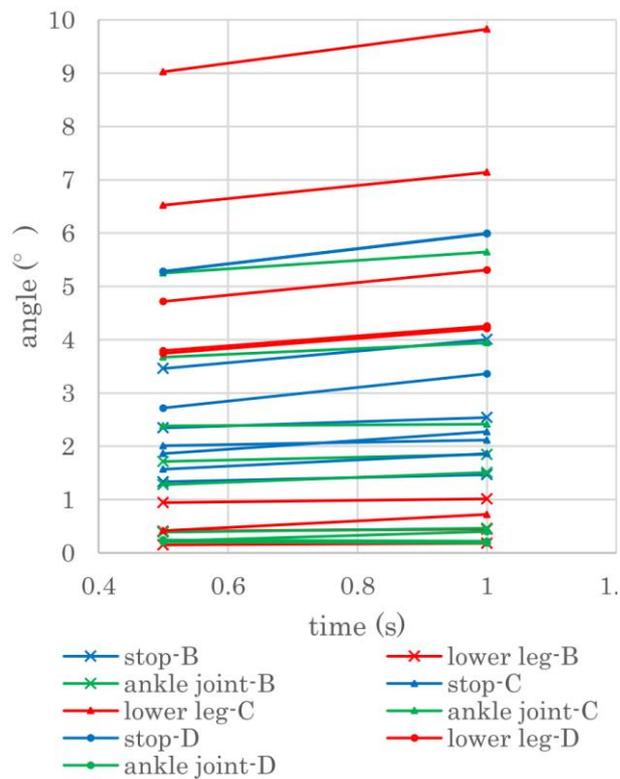


Fig. 4 Joint angles at 0.5 sec and 1.0 sec

5. 結論と課題

静止状態実験では前脛骨筋への振動刺激による緊張性振動反射によって足関節が背屈するのを確認した. また, 緊張性振動反射による足関節の関節角度変化量を計測する方法を発見した. 運動状態実験では運動状態中に振動刺激を加えることで足関節の底背屈運動に対しての変化を観測することは出来なかった. 現在の被験者と計測方法では前脛骨筋停止部が最も緊張性振動反射を引き起こす有効な刺激位置と言える.

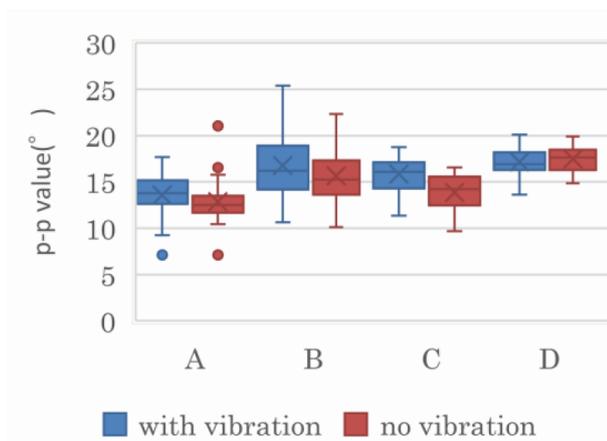


Fig. 5 p-p value of ankle angle (n=30)

今後は計測方法の改善に加えて、被験者、サンプル数を増やしデータの信頼性を高めていく必要がある。また今回の実験では得られなかった筋電のデータを取得し、被験者の運動状態での緊張性振動反射の確認と振動の有無による違いを調べるために更なる精度の向上が必要である。

以上の結果から外部刺激を用いた装着型歩行アシストデバイスの開発の一助になると考える。

参考文献

- [1] Danwen Li and Kazuo Kiguchi, "Ankle joint motion change induced by vibration stimulation on the Tibialis anterior muscle during continuous motion," IEEE 2020 International Symposium on Community-centric Systems (CcS), (2020)
- [2] Patricia Romagure, Jean-Pierre Vedel, and Simone Pagni, "Effects of tonic vibration reflex on motor unit recruitment in human wrist extensor muscles," Brain Research, vol. 602, no. 1, pp. 32-40(1993)
- [3] Bernard J Martin and Hee-Sok Park, "Analysis of the tonic vibration reflex: influence of vibration variables on motor unit synchronization and fatigue," European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, vol. 75, pp. 504-511(1997)