

## 前脛骨筋の腱振動が下肢動作へ及ぼす影響

### Effect of tibialis anterior vibration on lift up lower leg motion

○ 山腰 健 (東理大) 小原 晃 (東理大) 竹村 裕 (東理大) 溝口 博 (東理大)

Takeshi YAMAKOSHI, Tokyo University of Science

Akira OBARA, Tokyo University of Science

Hiroshi TAKEMURA, Tokyo University of Science

Hiroshi MIZOGUCHI, Tokyo University of Science

**Abstract:** This paper presents the wearable device using small vibration for reducing the falling risk of person. Two kinds of motion illusion experiments are conducted to evaluate the proposed device. The motion illusion experiments results demonstrate that a knee height downs and a knee joint extends in the case of adding vibration to the tendon of tibialis anterior muscle. These experimental results suggest that the developed device have a potential to control the body motion by using the vibration stimulation.

**Key Words:** Somatic sensation, tendon, vibration stimulation

#### 1. はじめに

近年、様々な体性感覚現象を利用し視覚、聴覚、触覚等から多くの情報を提示する技術が開発されている。本研究では人が日常生活を営む上で欠かすことのできない動作である歩行に着目した。全身運動である歩行は、視覚、聴覚、触覚といった複数の体性感覚情報が統合した結果、非常に無意識の内に通常行われる。しかし1つの情報提示に欠如や遅延が発生した場合において、不安定な歩行に陥り、転倒の危険が伴うリスクのある歩行に遷移する。<sup>(1)</sup>このリスクを軽減する為に本研究では腱への刺激による運動錯覚を利用した転倒を予防する装置の開発を行う。

#### 2. 腱振動による運動錯覚

転倒の状況は複数存在し「滑る」「よろめく」「踏み外す」などがある。なかでも歩行においてトゥークリアランスの低下が転倒の状況で多いことが知られている。筋力の低下に伴い足関節が伸展状態となり、つま先が下がった状態で振り出された足先が障害物と衝突し、「つまずき」を発生させる。この「つまずき」を防ぐ為に我々は振動刺激を腱に付加することで足関節を屈曲させる手法を提案する。先行研究において Goodwin らは腱に 100[Hz]程度の振動刺激を付加すると、筋肉に反射運動が誘発され収縮すると報告している<sup>(2)</sup>。この時、刺激を与えている身体部位を固定し、筋肉の収縮を妨害すると、あたかも筋肉が伸展したかのような運動錯覚が誘発される。この運動錯覚のメカニズムは、筋肉が実際に伸展した時と同様に筋紡錘が興奮する為であると報告されている<sup>(3)</sup>。また腕の腱に振動刺激を付加し、他動的に運動させることで実際の伸展よりも、より伸展したような錯覚を誘発したという報告もある<sup>(4)</sup>。そこで本研究では振動刺激を前脛骨筋の足関節側の腱に付加する。前脛骨筋の筋紡錘機能を興奮させ足関節が伸展しているような錯覚を意図的に誘発し、トゥークリアランスを向上させることで、転倒防止を目指す。

#### 3. 実験装置の開発

本研究では足関節で運動錯覚を誘発するようなウェアラブル装置の開発を行った。構成は①Digital Audio Player(以下 DAP)を振動ノイズの発生源とし②パワーアンプ(以下 PAMP)にて入力信号を増大し③振動子を駆動させる、3つの要素から構成される。この DAP 内に音声データとして任

意の波形を保存することで、振動子より様々な種類の振動を生成することが可能である。本実験では 0~500Hz の周波数域を持つ疑似ホワイトノイズ(以下 WN)を採用した。本装置で WN を生成した振動子の片側最大振幅は 0.07[mm]となった。この振動ノイズを使用し、足関節での腱振動刺激が及ぼす下肢動作実験、及び腱振動刺激下での足の持ち上げ動作実験を行った。

#### 4. 実験

##### 4-1 下肢動作実験

ウェアラブル装置による下肢腱振動条件下において、足関節に運動錯覚反応が誘発するかを検証する。本実験では片方の足が完全に宙に浮くように、ある高さの台の端に片足立位姿勢をとり、浮いた足は脱力した状態にする。この姿勢において浮いた下肢の腱に振動子を張り付け振動刺激を付加することによって運動錯覚が誘発するか検証する。振動刺激を付加する部位は、足関節から約 6[cm]上方の前脛骨筋の遠位の腱とした。本実験は被験者の動作計測にモーションキャプチャシステム(以下 MC)を用いた三次元動作計測を行った。OptiTrack 社製のカメラを 10 台使用しサンプリング周波数 250[Hz]で取得した。計算パラメータは足関節角度とした。実験概要図を図 1(a)に示す。

##### 4-2 下肢持ち上げ動作実験

ウェアラブル装置による前脛骨筋の腱振動条件下において、下肢持ち上げ動作への影響について検証する。本実験では、被験者が自身の足を見ることができない状態での足の持ち上げ動作を指示する。<sup>(5)</sup>足の持ち上げ高さの基準として 3 種類(13[cm], 25[cm], 37[cm])の台を用意した。13[cm]の台は下肢関節が比較的伸展した状態である。25[cm]の台は下肢の関節角度が程よく屈曲した状態である。37[cm]の台は下肢の関節角度がかなり屈曲した状態となる。以上の台を使用し、左右の足で 6 回ずつ本動作を行ってもらう。そのうち振動刺激を付加するのは 3 回である。また実験毎に 3 種類の高さが、どの程度の高さであるか実際に足を台において確認してもらった。振動刺激を付加する部位、及び使用するノイズは 4-1 と同様である。本実験では下肢動作実験と同様に MC を用いて動作計測を行った。計測パラメータは足関節角度、膝関節角度、つま先高さ、膝高さとした。実験概要図を図 1(b)に示す。

## 5. 実験結果

### 5-1 下肢動作実験結果

本実験は書面に同意の得られた健常若齢者 7 名(年齢  $22.7 \pm 1.2$  歳)を対象に行った。MC で取得した足関節角度は各被験者において振動を付加していない状態の平均値を基準に、振動を付加した状態を正規化した。また振動による有意差の算出には有意差水準 5% の t 検定を用いた。結果を表 1 に示す。

### 5-2 下肢持ち上げ動作実験結果

本実験は書面に同意の得られた健常高齢者 10 名(年齢  $22.5 \pm 1.0$  歳)を対象に行った。MC のデータから算出した足関節角度、膝関節角度、つま先高さ、膝高さは各被験者の各高さにおける振動を付加しない状態の平均値を基準に、振動を付加した状態を正規化した。また振動による有意差の算出には有意水準 5% の t 検定を用いた。結果を表 2 に示す。

## 6. 考察

### 6-1 下肢動作実験結果

本実験では有意な差は得られなかった。Goodwin らの研究では偏心モータを利用し 100[Hz]程度の振幅 1[mm]の正弦波を筋肉の腱に与えた。本実験では 0~500[Hz]の周波数域を持つ WN を使用し、その振動振幅は最大で 0.07[mm]であった。結果を周波数と振動振幅から考察する。運動錯覚を誘発する振動の周波数は 10~220[Hz]程度の幅広い範囲で錯覚が発生することが分かっており、本実験で用いた WN もこれらの周波数を含むため周波数の違いによって錯覚が発生しないということは考えにくい。また本実験における若齢被験者は振動が付加されていることが知覚できたことから、知覚可能な振動刺激を与えるだけでは運動錯覚は誘発できず、ある程度の振幅が必要であると示唆された。

### 6-2 下肢持ち上げ動作実験

本実験では、ある台を目標高さとした場合、振動によって膝関節がより伸展するという結果を得た。関節の可動域の中程で影響を強く持つような神経信号に変化がもたらされたと推察される。腱刺激による運動錯覚は筋紡錘が興奮し筋肉が伸展しているような錯覚が誘発する。また、この錯覚が発生した為に筋肉を収縮させることから、本実験における振動刺激によって筋紡錘が興奮してはいるが、筋肉を収縮させるほどの興奮ではないと脳が判断していることが推察される。また有意な変化が現れたのは関節の可動域の中程であることから、筋紡錘が興奮している伸展位(目標の台の高さ 13[cm])では本来の信号の方が振動による興奮より支配的であり、逆に筋紡錘が興奮していない屈曲位(目標の台の高さ 38[cm])では振動による興奮が十分に小さいということが言える。これも振動による筋紡錘の興奮が十分に小さいということを支持する。そして関節可動域の中程では筋紡錘の興奮度合いから関節角度を推定している為に小さなノイズによってもその推定に伸展方向の誤差が出る。その為に足関節による目標高さへの調節ではなく、膝関節での調節を試みたことと示唆される。

## 7. おわりに

微小振動子を用いて転倒予防を目的に装置を開発し 2 つの実験を行った。下肢動作実験では運動錯覚を確認することができなかった。下肢持ち上げ動作実験では、関節可動

域の中程において足関節に伸展したような錯覚を起し、膝関節をより運動させるような動作へ変位させることができると示唆された。また筋紡錘を興奮させるためには被験者ごとに閾値が存在し、それを超えるような刺激を与える必要がある可能性が示唆された。本研究により適度な振動を付加すると動作に変化を与えることがわかった。これより振動の強弱を上手くコントロールすることで意図的に安全な動作に導くことができる可能性が示唆された。

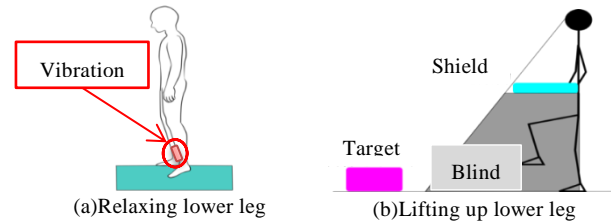


Fig.1 Experiment summary

Table 1 Degree of ankle joint in experiment of tendon reflex

Amplitude	Vibration	
	Off	On
Ave. (S.D.)	1.00 (0.03)	1.02 (0.13)
Max	1.07	1.65
Min	0.93	0.91

Table 2 Change of parameter by using vibration

Target height	13[cm]		25[cm]		37[cm]	
	Off	On	Off	On	Off	On
Toe height (S.D.)	1.00 (0.06)	1.00 (0.10)	1.00 (0.06)	0.98 (0.09)	1.00 (0.04)	1.00 (0.06)
Knee height (S.D.)	1.00 (0.02)	1.00 (0.03)	1.00 (0.02)	0.99* (0.04)	1.00 (0.02)	1.00 (0.03)
Ankle degree (S.D.)	1.00 (0.03)	1.00 (0.03)	1.00 (0.04)	1.02 (0.04)	1.00 (0.03)	1.01 (0.03)
Knee degree (S.D.)	1.00 (0.02)	1.00 (0.03)	1.00 (0.03)	1.01* (0.04)	1.00 (0.02)	0.99 (0.03)

T-test \*\*:P<0.01, \*:P<0.05

## 参考文献

- (1) Anat Kesler, Gregory Leibovich, et al "Shedding light on walking in the dark: the effects of reduced lighting on the gait of older adults with a higher-level gait disorder and controls", Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, Vol.2, p27, 2005.
- (2) Goodwin G.M., McCloskey D.I., Matthews P.B.C., "The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents", Brain, Vol.95, Issue.4, pp.705-748, 1972.
- (3) Burke, D., Lofstedt, L., Wallin, G.: The responses of human muscle spindle endings to vibration of noncontracting muscles; J Physiol (Lond), Vol.261, pp.673-693, 1976.
- (4) 友田達也, 上杉繁, 三輪敬之, 上腕への腱振動刺激と他動運動による過伸展錯覚の特性, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.3, pp.361-369, 2001.
- (5) 小林吉之, 高橋健, 長尾裕太, 藤本浩志, ヒトが知覚しているつま先高さを実際につま先高さとの誤差, バイオメカニズム学会誌, Vol.37, No.2, pp.121-125, 2013.