

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06118

研究課題名(和文)筋音による歩行中の粘弾性調節機構の解明

研究課題名(英文)Control mechanism of muscle stiffness and viscosity in walking

研究代表者

内山 孝憲(Uchiyama, Takanori)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：50243324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：歩行中の筋の粘弾性を推定するための計測・解析システムを構築した。トレッドミルを歩行しているときに、脛とふくらはぎの筋に電気刺激を与えて、皮膚表面の振動(筋音)を計測した。この信号から歩行による振動と、随意筋音を取り除いて、誘発筋音のみを抽出した。電気刺激を入力とし、誘発筋音を出力とするシステムを仮定し、システム同定法を適用して、伝達関数を求めた。伝達関数から、筋のステイフネス(弾性)と粘性を推定した。その結果、脛の筋のステイフネスは、踵接地時にもっとも大きく、遊脚期に小さいことを明らかにした。また、ふくらはぎの筋のステイフネスは、歩行速度に対して線形に増加することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The researcher proposed the novel method to measure and estimate muscle stiffness in walking using electrically evoked mechanomyogram and system identification technique. The participant walked on a tread mill and electrical stimulation was applied to the tibias anterior muscle, gastrocnemius, and soleus muscles. The measured signal consisted of evoked and voluntary mechanomyograms, and vibration of walking. The electrically evoked mechanomyogram was extracted and the transfer function from the electrical stimulation to the evoked mechanomyogram was identified using a singular value decomposition method. The tibias anterior muscle stiffness was largest at heel contact and smallest at swing phase. The gastrocnemius and soleus muscle stiffness increased as the walking velocity increased. This implies that the muscle stiffness can store kinetic energy as elastic energy and release the elastic energy in walking.

研究分野：生体計測

キーワード：筋音 歩行 ステイフネス システム同定

1. 研究開始当初の背景

ヒトは、二足歩行を行う他の動物と異なっており、スムーズで安定した二足歩行を行うことができる。ヒトらしいスムーズで柔軟な歩行をロボットで実現しようとする、膨大な計算が必要である。ヒトは、アクチュエータである筋肉自体が有する特性、つまり粘弾性を活かして、膨大な計算をすることなく、スムーズで柔軟な歩行を実現していると考えられている。従来、筋肉の粘弾性は、手足を固定された状態で、機械的な摂動を加えてその応答から推定されていた。しかし、これでは立位などに姿勢が限定され、運動時の粘弾性の調節機構を調べることができなかった。

2. 研究の目的

歩行を対象として、筋肉の粘弾性を推定する方法を確立し、スムーズで安定しているヒトの歩行中の粘弾性の調節機構を明らかにする。具体的には、1歩行周期の様々なタイミングで筋肉の粘弾性を推定し、歩行速度と粘弾性の関係を調べる。また、履物と筋の粘弾性の関係および歩行速度と筋の粘弾性の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

歩行中の任意の時間において、電気刺激を与えて筋音を計測するシステムを構築した。計測される筋音には、(1)歩行の巨視的な振動、(2)足を動かす筋収縮による筋音(随意筋音)、および(3)電気刺激によって誘発された信号が含まれる。歩行の巨視的な振動は、電気刺激を与えないときの振動を計測し、これを電気刺激を与えたときの筋音から減算して取り除いた。次に、随意筋音を電気刺激をトリガとして筋音を同期加算平均して取り除いた。以上の手順によって、電気刺激による誘発筋音のみを抽出した。

抽出した信号にシステム同定法を適用して、入力が電気刺激で出力が誘発筋音のシステムの伝達関数を同定した。伝達関数から固有周波数と減衰係数を求めた。

(1)前脛骨筋については、踵接地時、立脚期および遊脚期の粘弾性を解析した。筋音の計測には、加速度センサを用いた。

(2)履物の影響を調べるために、運動靴の他にスリッパとベルトで固定したスリッパを履いて歩行したときの粘弾性を推定した。電気刺激を与えるタイミングは、爪先離地時とした。これは、スリッパのように脱げ易い履物では、遊脚期に脱げないように足関節を緊張させることが期待されるからである。筋音の計測には加速度センサを用いた。

(3)腓腹筋(外側腓腹筋と内側腓腹筋)とヒラメ筋については、蹴り出すときに力を発揮する筋であるので、歩行速度を2, 3, 4, 5km/hに変化させて、歩行速度と粘弾性の調節の関

係を調べた。電気刺激は、蹴り出し時期である1歩行周期の40%で与えた。筋音の計測には、コンデンサマイクロフォンを用いた。

4. 研究成果

(1)前脛骨筋に電気刺激を与えて、加速度センサを用いて計測した誘発筋音のシステムは、踵接地時と立脚期では6次であった。一方、遊脚期には8次であった。誘発筋音の計測値と同定した伝達関数で求めた近似を図1に示す。(a)は踵接地時、(b)は立脚期、(c)は遊脚期を示す。いずれも同定した伝達関数によって近似できた。

機械系は、バネ・マス・ダンパでモデル化することができ、バネ・マス・ダンパのモデルは1つの固有周波数を持ち、伝達関数は2次である。したがって、6次の伝達関数には固有周波数が3つあり、8次の伝達関数には固有周波数が4つある。複数の固有周波数の内、最も低いものが筋の収縮方向を表す。筋の収縮方向の固有周波数は、高いものから順に、踵接地時(14.7Hz)、立脚期(9.8Hz)、遊脚期

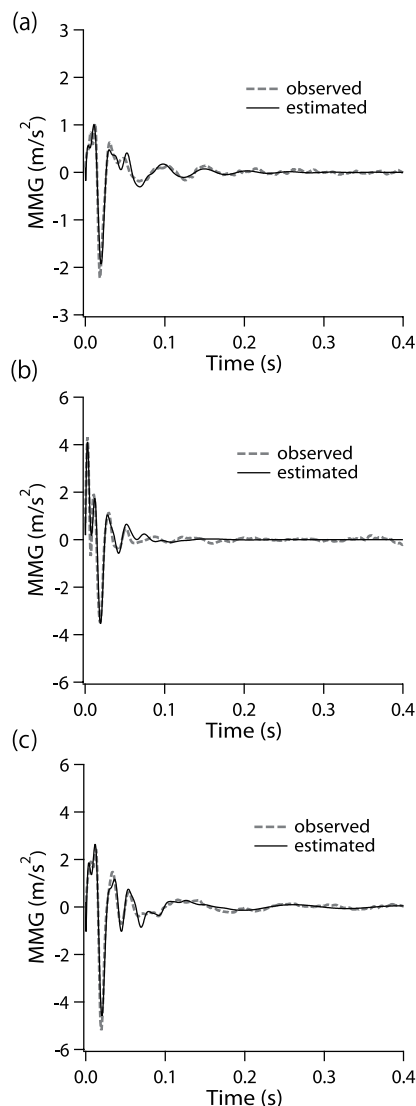


図1 誘発筋音の計測値と近似 (a)踵接地, (b)立脚期, (c)遊脚期

(7.2Hz)であった。安静時には4.1Hzであることから、本研究で開発した方法によって、初めて歩行中には筋のスティフネスが高くなっていることを明らかにした。

誘発筋音の固有周波数は、筋の活動レベルが高いほど高くなることが報告されている。また、歩行時の筋の活動レベルは、踵接地時に立脚期よりも高いことが報告されている。これらのことから、踵接地時の高い筋活動によって、固有周波数が高くなったと考えられる。

(2)履物と固有周波数の関係については、対象者によって高い固有周波数と低い固有周波数が推定される履物が異なった。低い固有周波数は、5名ではベルトで固定したスリッパを履いたときであった。しかし、1名はスリッパを履いたときであり、もう1名は運動靴を履いたときであった。高い固有周波数は、3名ではスリッパを履いたときであり、4名は運動靴を履いたときであった。履物と筋活動レベルについては、6名がスリッパを履いたときに最も高い筋活動レベルを示した。筋の活動レベルは、脱げやすいスリッパで筋が緊張していることを示す。

筋が緊張しているにも関わらず、スリッパで固有周波数が最も高くならなかったのは、筋のスティフネスは、筋の活動レベルだけではなく、筋の長さにも依存することによると考えられる。筋を剛体を考えれば、筋の長さが短く、太くなるとスティフネスは大きくなる。一方、長く細くなればスティフネスは小さくなる。対象者によって、履物に対して、固有周波数が一定の変化を示さなかったのは、履物に対する適応方法に違いがあるためであると考えられる。

歩行は個人を特定可能な情報を有している。つまり個人差が大きい運動であるので、履物による適応方策を調べるには、スティフネスだけではなく、関節角度や筋活動レベルと合わせて、総合的な解析が必要である。

(3)コンデンサマイクロフォンで計測される筋音は、マイクロフォンの駆動回路に含まれるハイパスフィルタの伝達関数(1次)が含まれるため、バネ・マス・ダンパの2次の伝達関数の組み合わせに1次の伝達関数を加えた奇数次の伝達関数で記述される。本研究では、外側腓腹筋、内側腓腹筋とヒラメ筋のいずれについても、全ての歩行速度で3次の伝達関数を同定した。外側腓腹筋について誘発筋音と同定した伝達関数による近似を図2に示す。パネルは(a) 2km/h, (b) 3km/h, (c) 4km/h, (d) 5km/hの歩行速度を示す。いずれの歩行速度でも、誘発筋音を同定した伝達関数を用いて近似できた。

外側腓腹筋(LG)、内側腓腹筋(MG)およびヒラメ筋(SO)の固有周波数は、表1に示すように歩行速度が増加するに連れて増加した。歩行では、運動のエネルギーと位置エネルギー

を交互に変換すると考えられていた。本研究の結果は、歩行速度が増加するに連れて筋のスティフネスが増加することを示しており、走行と同様に運動エネルギーの一部は弾性エネルギーとして蓄えられ、それを蹴り出し時に放出することで効率良く歩行していることを示すものである。

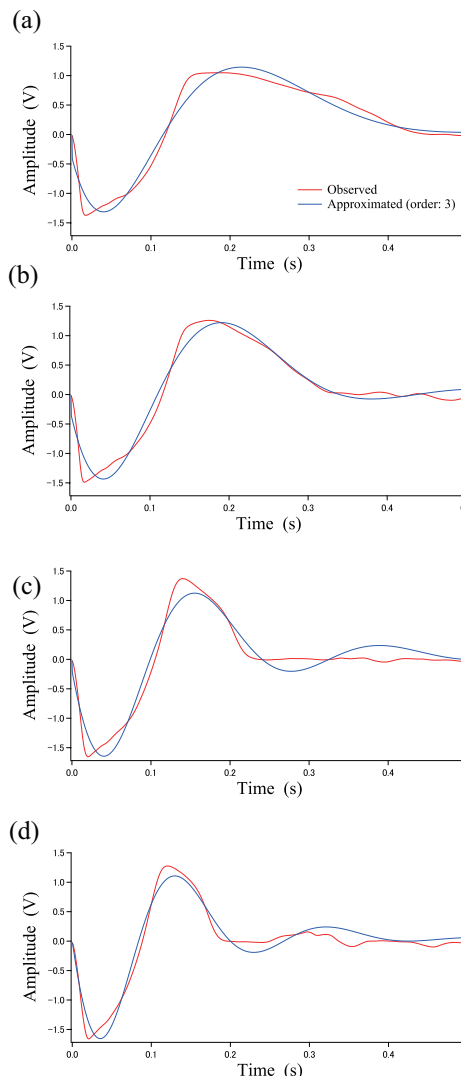


図2 外側腓腹筋の誘発筋音と近似
(a) 2km/h, (b) 3km/h, (c) 4km/h, (d) 5km/h

表1 歩行速度と固有周波数(Hz)

| | MG | LG | SO |
|--------|-----|-----|-----|
| 2 km/h | 2.6 | 3.0 | 2.9 |
| 3 km/h | 3.4 | 3.3 | 3.1 |
| 4 km/h | 3.7 | 4.1 | 4.5 |
| 5 km/h | 4.5 | 5.0 | 5.2 |

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 内山 孝憲, 朝重大喜, System identification of velocity mechanomyogram measured with a capacitor microphone for muscle stiffness estimation, 査読有, Journal of Electromyography and Kinesiology, 査読有, 33 卷, 2017, 57-63
DOI: 10.1016/j.jelekin.2017.01.009
- ② 府川 友彦, 内山 孝憲, System identification of evoked mechanomyogram to clarify lower limb muscle stiffness in treadmill walking, Advanced Biomedical Engineering, 査読有, 5 卷, 2016, 1-6
DOI: 10.14326/abe.5.1
- ③ 内山 孝憲, 齊藤海仁, 新庄克也, Muscle stiffness estimation using a system identification technique applied to evoked mechanomyogram during cycling exercise, Journal of Electromyography and Kinesiology, 査読有, 25 卷, 2015, 847-852
DOI: 10.1016/j.jelekin.2015.09.005
- ④ 府川 友彦, 内山 孝憲, トレッドミル歩行中における前脛骨筋の弾性推定, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 51 卷, 2015, 542-544
DOI:10.9746/sicetr.51.542

[学会発表] (計 11 件)

- ① 福森 大地, 内山 孝憲, Stiffness estimation of the medical gastrocnemius muscle in toe walking, 第 57 回日本生体医工学会大会, 2018
- ② 森田 梨紗子, 内山 孝憲, 堀 豊, 状態空間モデルマッチングによる筋力学モデルのパラメタ集合同定, 計測自動制御学会第 5 回制御部門マルチシンポジウム, 2018
- ③ 内山 孝憲, 加藤 崇弘, 小指外転筋の筋電と筋音を用いたシステム同定, 第 60 回自動制御連合講演会, 2017
- ④ 内山 孝憲, 堀 豊, 鈴木 健太, Estimation of tibialis anterior muscle stiffness during the swing phase of walking with various footwear, 39th Ann. Int. Conf. of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2017
- ⑤ 松江 悠斗, 内山 孝憲, Medial gastrocnemius muscle stiffness dependent on gait speed, 第 56 回日本生体医工学会大会, 2017
- ⑥ 齊藤海仁, 内山 孝憲, Estimation of muscle stiffness during one cycle of pedaling exercises using system identification, 第 55 回日本生体医工学会大会, 2016

- ⑦ 鈴木 健太, 内山 孝憲, Influence of footwear on stiffness of tibialis anterior muscle during walking, 第 55 回日本生体医工学会大会, 2016
- ⑧ 加藤 崇弘, 内山 孝憲, System identification of mechanomyogram in voluntary contraction of abductor digiti minimi muscle, 第 55 回日本生体医工学会大会, 2016
- ⑨ 府川 友彦, 内山 孝憲, System identification of evoked mechanomyogram in treadmill walking, 生体医工学シンポジウム, 2015
- ⑩ 内山 孝憲, 大塚 俊一, Estimation of dorsiflexion torque using a Kalman filter, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 2015
- ⑪ 府川 友彦, 内山 孝憲, トレッドミル歩行中における前脛骨筋の誘発筋音図のシステム同定, 第 54 回日本生体医工学会大会, 2015

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等
https://www.bi.appi.keio.ac.jp/?page_id=9

6. 研究組織

(1) 研究代表者
内山 孝憲 (UCHIYAMA, Takanori)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号 : 50243324

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者