

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12791

研究課題名(和文) 直立姿勢の神経制御解明を目指す足関節と下腿筋のスティフネス推定法の開発

研究課題名(英文) Stiffness estimation of ankle joint and leg muscles during quiet standing

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：下腿の筋である腓腹筋および前脛骨筋に電気刺激を与えて、そのときの圧力中心(重心を床面に投影した点)の揺らぎを計測した。電気刺激を入力とし、圧力中心の揺らぎを出力とする伝達関数を同定して、筋および足関節の弾性を推定する方法を開発した。開発した方法を、静止立位時に適用し、腓腹筋の弾性が30から80N/mであること、また前脛骨筋の弾性も同程度であること、足関節の弾性は800 Nm/rad程度であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立位は人に特徴的で基本的な姿勢であり、その維持には下肢筋の活動と弾性が深く関わっている。下肢筋の活動は筋電図を用いて知ることができるものの、弾性を立位で計測する方法は存在しなかった。本研究では、立位時の下肢筋の弾性を推定する方法を開発した。本研究で計測した立位姿勢を維持しているときの圧力中心の動揺は、老化やパーキンソン病などの疾病によって応答が変化することが知られており、これらと姿勢維持のためのアクチュエータである筋および関節の弾性の関係を明らかにすることができる。

研究成果の概要(英文)：The center of pressure (COP), which is a vertical projection of the center of gravity, was measured using a force plate. We developed the method to estimate the muscle and ankle stiffness using an electrical stimulation and a system identification technique. The electrical stimulation was applied to the medial gastrocnemius muscle and the tibialis anterior muscle. The electrical stimulation was regarded as an input of the system. The electrically induced COP fluctuation was extracted and the fluctuation was regarded as an output of the system. The transfer function was identified and its natural frequencies were used to estimate the muscle and ankle stiffness. The stiffness of the medial gastrocnemius was 30 to 80 N/m and that of the tibialis anterior muscle also showed similar values. The ankle stiffness was approximately 800 Nm/rad.

研究分野：生体工学

キーワード：腓腹筋 前脛骨筋 弾性 システム同定

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

立位姿勢は人に特徴的な姿勢であるにも関わらず、その制御メカニズムは未解明のままであった。立位姿勢の維持には、下腿の筋が発揮する力だけではなく、弾性も関わっている。しかし、立位姿勢を維持しているときの下腿の筋の弾性を調べる方法は存在しなかった。

### 2. 研究の目的

直立姿勢における足関節の弾性および下腿筋の弾性を推定する方法を開発し、圧力中心の位置および変位の向きと、筋活動および弾性の関係を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究の原理は、直立姿勢を維持しているときに電気刺激を与えてその応答から弾性を推定するものである。具体的には、対象者を床反力計の上に立たせて、目的の筋に電気刺激を与えて圧力中心の変位を計測した。これから、電気刺激による圧力中心の変位のみを抽出し、電気刺激を入力とし、圧力中心の変位を出力とする伝達関数を同定した。伝達関数からステイフネスを推定した。ヒトが直立姿勢を維持しているとき、重心は常に動揺しており、重心を床に投影した圧力中心も動揺している。本研究では、前後方向の圧力中心の変位を対象とした。圧力中心の前後方向の変位はゆっくりした基線の動揺に高い周波数が重畳している。このため、電気刺激を与えても電気刺激による足圧中心点の変位のみを抽出することが難しい。

#### (1) 腓腹筋と足関節の弾性の推定

直立姿勢を維持しているときの動揺（本質的変位）をモデル化して取り除いた。具体的には、電気刺激を与えないで計測した圧力中心の変位を自己回帰モデルで近似してカルマンフィルタを構成し、このカルマンフィルタを用いて電気刺激を与えて計測した圧力中心の変位を平滑化した。平滑化した動揺を、電気刺激を与えたときの本質的変位とした。電気刺激を与えたときの足圧中心点の変位から引いて、電気刺激による変位を求めた。次に、電気刺激を入力とし、電気刺激による変位を出力とする伝達関数を同定した。伝達関数の固有周波数から、弾性を推定した。

#### (2) 腓腹筋の弾性と圧力中心の位置と速度の関係

電気刺激を与えたときの圧力中心の位置と速度で圧力中心の揺らぎ分類して弾性を推定した。また、弾性と筋の弾性は筋の活動度に依存することから、筋活動の指標として筋電図を計測した。

#### (3) 前脛骨筋の弾性と圧力中心の位置と速度の関係

前脛骨筋についても腓腹筋と同様に力中心の位置と速度で圧力中心の揺らぎ分類して弾性を推定した。また筋電図を計測した。

#### (4) 視覚のフィードバックと筋の弾性電気刺激を与えたときの圧力中心の位置と速度で圧力中心の揺らぎ分類して弾性を推定した。また筋電図を計測した。

視覚のフィードバックの効果調べるために、閉眼およびVRゴーグルに歩行時の映像を提示したときの弾性を調べた。

### 4. 研究成果

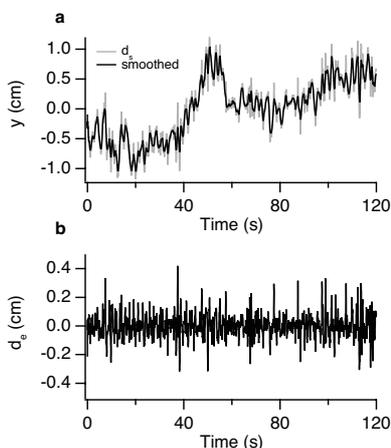


図1 電気刺激による揺らぎの抽出

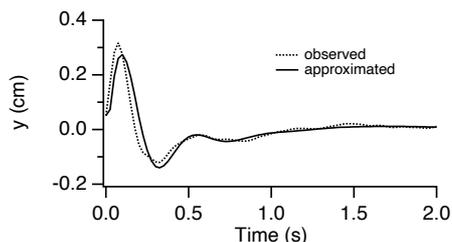


図2 計測値と近似値

#### (1) 腓腹筋と足関節の弾性の推定

腓腹筋に電気刺激を与えたときの圧力中心の動揺を図 1a に灰色の実線で示す。基線のゆっくりとした揺らぎに、電気刺激によるパルス状の揺らぎが重畳していた。これをカルマンフィルタで平滑化した信号を図 1a に黒色の実線で示した。パルス状の揺らぎを取り除くことができた。平滑化した信号を取り除いて、図 1b に示す電気刺激による圧力中心の揺らぎを抽出した。抽出した信号からは基線の揺らぎ、つまり人が立っているときの本質的変位を取り除くことができた。抽出した信号を、電気刺激を基準として同期加算平均して、システム同定に用いる信号を得た。その信号を図 2 に点線で示す。同定した伝達関数を用いて計算した応答の近似値を図 2 の実線で示した。同定した伝達関数によって応答を良好に近似できた。腓腹筋の弾性は 30 N/m 程度であった。また足関節の弾性は 800 Nm/rad 程度であった。

#### (2) 腓腹筋の弾性と圧力中心の位置と速度の関係

電気刺激を与えたときの圧力中心の位置と速度で応答を分類して、圧力中心の位置と速度に対する腓腹筋の弾性の関係を調べた。その結果を図 3 に示す。本実験では、弾性は図 2 の場合よりやや大きく、56 N/m から 76 N/m であった。また、弾性は、黄色で示すように、圧力中心の位置が平衡点より前にあり、負の速度のとき、つまり後方向に倒れる速度のときに大きかった。

筋電図では、図 3 に示した弾性を推定した時刻の 0.3 秒前の圧力中心の位置と速度に対する筋電図の RMS 値の分布が類似した。しかし、弾性を推定した時刻の 0.1 秒前および同時刻の筋電図の RMS 値は、圧力中心の位置が平衡点より前にあり、前方向に倒れる速度のときに大きかった。

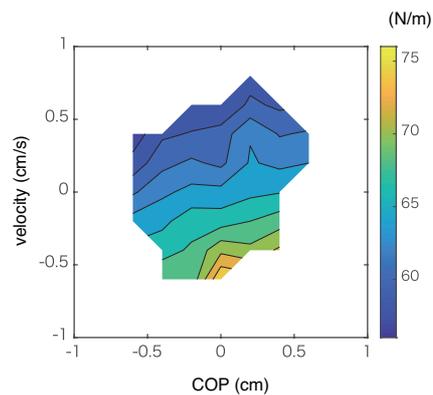


図 3 COP の位置と速度と腓腹筋の弾性の関係

#### (3) 前脛骨筋の弾性と圧力中心の位置と速度の関係

前脛骨筋では、圧力中心の位置が平衡点より後にあり、正の速度のときに弾性が大きかった。これは、前脛骨筋が腓腹筋の拮抗筋であることを考慮すると、腓腹筋における弾性と圧力中心の位置と速度の関係に対応する。弾性の大きさは、腓腹筋と同程度かやや広い範囲で変動した。筋電図については、RMS 値の圧力中心と速度に関する分布が一致する応答は得られなかった。

#### (4) 視覚のフィードバックと筋の弾性

閉眼時の腓腹筋の弾性は開眼時より大きかった。また筋電図の RMS 値も大きかった。VR ゴーグルに歩行時の映像を提示した場合には、腓腹筋の弾性は閉眼時よりさらに大きかった。筋電図も同様に閉眼時よりさらに大きかった。これらのことは、腓腹筋の弾性には筋活動が支配的であることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takanori Uchiyama, Gai Kondo	4. 巻 9
2. 論文標題 Relationships among electromyogram, displacement and velocity of the center of pressure, and muscle stiffness of the medial gastrocnemius muscle during quiet standing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 138 ~ 145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14326/abe.9.138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takanori Uchiyama, Eiki Hamada
2. 発表標題 Relationship between medial gastrocnemius muscle stiffness and the angle between the rearfoot and floor
3. 学会等名 The 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology SocietyThe（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Aoki, Takanori Uchiyama
2. 発表標題 Relationship between the position and velocity of the center of pressure and stiffness of the tibialis anterior muscle during quiet standing
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakiyo Oda, Takanori Uchiyama
2. 発表標題 Dependency of the medial gastrocnemius muscle and ankle joint stiffness on the dorsiflexion angle
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuki Ishii, Takanori Uchiyama
2. 発表標題 Stiffness estimation of the vastus lateralis muscle in quiet standing
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanori Uchiyama, Masakiyo Oda
2. 発表標題 Estimation of knee joint natural frequency during quiet standing
3. 学会等名 IUPESM World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

足関節と下腿の筋の粘弾性の解析 <a href="https://www.bi.appi.keio.ac.jp/?page_id=1830">https://www.bi.appi.keio.ac.jp/?page_id=1830</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------