

修士学位論文要約（令和4年3月）

## 慣性センサによる下肢関節モーメント推定のための足圧中心位置推定に関する基礎研究

正橋 遼

指導教員：渡邊 高志

### A Basic Study on Estimation of Center of Pressure for Estimation of Joint Moment by Inertial Sensors

Ryo MASAHASHI

Supervisor: Takashi WATANABE

This study focused on the lower limb joint moment as an evaluation index of rehabilitation. Optical motion analysis system and force plates are generally used for estimation of joint moment. However, the estimation method requires a high cost and has limitation of measurement environment. The purpose of this study is to develop estimation method with inertial sensors instead of optical motion analysis system. A method of estimating Center of Pressure (COP) during the stance phase using inertial sensors was studied for joint moment estimation using only inertial sensors. A method of estimating COP during the stance phase using artificial neural network was examined. From the result, COP estimation error was larger at around the midstance. Estimation error of joint moment using the estimated COP during the stance was larger for normal walking, and smaller for abnormal walking than that using estimated COP at the initial contact and measured values. It is necessary to improve estimation error of COP at the midstance for joint moment estimation.

#### 1. はじめに

リハビリテーションにおける歩行の分析・評価は、歩行異常によって生じた補償動作が歩行動作にどの程度影響を与えているかを把握し、効果的なリハビリテーション介入を行うために必要となる。歩行動作の評価指標の一つである下肢関節モーメントは、対象者の動作中の関節に働く筋群の作用を定量的に示すことが可能である<sup>1)</sup>。一般的な推定方法である3次元動作解析装置と床反力計を用いる方法は、計測装置が高価である、計測に広い空間が必要であるなど、大きな病院や研究機関といった場所での推定に限られている。我々の研究グループでは、慣性センサと床反力計を用いた関節モーメント推定法を提案し、リハビリテーション介入のための歩行評価として実現可能性を示した<sup>2)</sup>。この推定法では、下肢関節モーメント推定に必要な床反力作用点（足圧中心位置）を床反力計で計測するが、それに対する足部位置を直接計測することができない。そのため、床反力計で計測される初期接地時の足圧中心位置と慣性センサから推定した足部の傾斜角度を用いて、初期接地時の足圧中心位置の足部内での位置の推定を行っていた。本研究の最終的な目的は、床反力計を取り除き慣性センサのみを使用した歩行中の関節モーメント推定法の構築である。床

反力計を使用せずに関節モーメントを推定するためには、慣性センサ信号から立脚期中の床反力および足圧中心位置を推定することが考えられる。このうち、異常歩行時の足圧中心位置の足部内位置を慣性センサから推定している研究はほとんどなく、新しく推定方法を構築する必要がある。本研究では、関節モーメント推定において床反力計を不要とする方法の実現に向けて、慣性センサによる足圧中心位置推定法の構築を目的とした。

#### 2. 足圧中心位置の推定

先行研究法では、床反力計で足圧中心位置を計測し、初期接地時の足圧中心位置を足部位置に対応させた。本研究では、立脚期全時刻の足圧中心位置を推定する方法として、長・短期記憶(LSTM)ニューラルネットワークを用いた方法の検討を行った。LSTMモデルへの入力は立脚足部および立脚下腿部に装着された慣性センサにより計測された傾斜角度とし、足部傾斜角度を入力とした場合、下腿部傾斜角度を入力とした場合、足部と下腿部の傾斜角度2つを入力とした場合の3種類での検討を行った。推定方法の評価のため、3次元動作解析装置、慣性センサ、床反力計を用いて動作計測を行った。被験者は健康男性5名とし、3mの直線歩行を異なる歩行方法で行った。歩行

方法は通常歩行（歩行速度 3 段階（fast, normal, slow）、つま先接地歩行（足関節底屈大（PL）、底屈小（PS））とし、歩行路内に配置した床反力計に接地している区間を解析区間とした。足圧中心位置を推定する被験者 1 人を選択し、その被験者を除いた 4 人分の試行をモデルの学習に用いることとして、全ての被験者の足圧中心位置を推定した。

図 1 に各歩行条件における推定された足圧中心位置の参照値との RMS 差を示す。なお、足圧中心位置は踵に位置するとき 0、つま先に位置するとき 1 の値となるように正規化を行った。足圧中心位置の RMS 差は足部傾斜角度を入力とした場合に比較的小さい傾向が見られた。また、立脚期を歩行事象（初期接地（IC）、足底接地開始（FFs）、踵離地（HO）、つま先離地（TO））で分割し、各区間の RMS 差を算出した結果、FFs~HO での RMS 差が他の区間と比較し大きい結果となった。足底接地時の足圧中心位置推定に有効な推定モデルや入力パラメータについては、更なる検討が必要であると考えられる。

### 3. 下肢関節モーメントの推定

推定された足圧中心位置を用いて関節モーメントの推定を行い、先行研究法で決定した足圧中心位置から関節モーメントを推定した場合の RMS 差と比較を行った。本研究の方法では、足圧中心位置の推定モデルへの入力足部傾斜角度とした。図 2 に、通常歩行およびつま先接地歩行における関節モーメントの RMS 差を示す。通常歩行の場合は、先行研究の足圧中心位置推定を使用した場合と比較して、本研究の方法での RMS 差が大きい傾向が見られた。つま先接地歩行の場合では、本研究の方法での RMS 差が比較的小さい傾向が見られた。本研究の方法で、つま先接地歩行において関節モーメントの RMS 差が小さくなったのは、接地時の足部の変形による影響が考えられる。先行研究の方法では、初期接地時での足部の変形が大きいと、立脚期全時刻での関節モーメント推定に足圧中心位置推定誤差の影響が伝播する可能性が考えられる。本研究の方法では、各時刻で足圧中心位置を推定するため、初期接地時の足部の変形が関節モーメント推定に与える影響が小さくなり、RMS 差が小さくなったと考える。そのため、立脚期の各時刻で足圧中心位置を推定することは、つま先接地歩行時の関節モーメント推定に有効である可能性がある。また、推定された各関節の関節モーメント波形では、本研究の方法による股関節モーメント波形が参照値と比べ振動している傾向が見られた。股関節モーメントの推定では、遠位の関節モーメントの推定誤差や、足圧中心位置や傾斜角度をもとに計算された重心位置の推定誤差など、複数の誤差の影響があったために振動的な波形

となった可能性が考えられる。そのため足圧中心位置の推定精度が改善することで推定波形の振動が抑えられる可能性がある。

### 4. まとめ

本研究では、床反力計を不要とする関節モーメント推定方法の実現に向けて、慣性センサによる足圧中心位置推定法の構築を目的とした。立脚期中の足圧中心位置はニューラルネットワークを用いて推定を行った。推定された足圧中心位置は足底接地時に推定誤差が大きい傾向が見られた。推定された足圧中心位置を用いて関節モーメントを推定した結果、通常歩行時に推定誤差が大きく、つま先接地歩行時に推定誤差が小さい傾向が見られた。今後の課題として、足底接地時の足圧中心位置推定誤差の改善が必要である。

### 文献

- 1) 臨床歩行分析研究会，“関節モーメントによる歩行分析”，医歯薬出版株式会社，1997
- 2) 内藤望実，“慣性センサと床反力計による歩行立脚期の下肢関節モーメント推定法の研究”，東北大学大学院工学研究科修士学位論文，2019

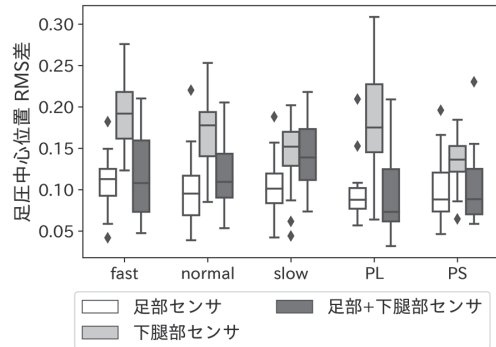


図 1 足圧中心位置の RMS 差

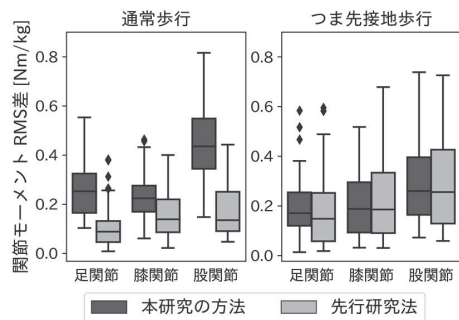


図 2 関節モーメントの RMS 差