

運動速度と筋張力を用いたスクワット運動の特性推定に関する研究

A Study on Characteristic Estimation of Squat Exercise Using Exercise Velocity and Muscle Force

○学 井下 和哉^{*1}, 木澤 悟^{*2}, 小林 義和^{*2}, 齊藤 亜由子^{*1}

Kazuya INOSHITA^{*1}, Satoru KIZAWA^{*2}, Yoshikazu KOBAYASHI^{*2} and Ayuko SAITO^{*1}

^{*1} 工学院大学 Kogakuin University

^{*2} 秋田工業高等専門学校 National Institute of Technology (KOSEN), Akita College

A squat is an exercise in which the knee is repeatedly flexed and extended from an upright position. It has been reported that a decrease in the velocity of the center of gravity of the body is one of the causes of falls during standing up motion in the elderly. Clarifying the contribution of each muscle to exercise speed during squatting requires quantification of the relationship between exercise speed and lower limb muscle forces, which is useful for evaluating motor function. Therefore, in this study, we construct a squat model that estimates the velocity of the center of gravity using lower limb muscle forces that contribute to hip and knee flexion and extension, and ankle dorsiflexion and plantarflexion. Furthermore, by applying the proposed method to squats with different stance widths, we verify the contribution of each muscle to the motion velocity.

Key Words : Lower muscle force, Musculoskeletal analysis, OpenSim, Squat, Velocity

1. 結 言

スクワット運動は、直立した状態から膝関節の屈曲、伸展を繰り返す運動である。下半身の筋力トレーニングとして代表的に行われている運動の一つであり、特別な器具がなくても簡単に行えることから、筋力トレーニング初心者にも人気が高い。スクワット運動では主に、大腿四頭筋や大殿筋、ハムストリングスなどの筋肉を効果的に鍛えることが出来る。

スクワット運動を行うことで、筋力や筋肉量が増加するだけでなく、基礎代謝が上がることやダイエットの効果も期待できる。トレーニングを行うことで足腰が強化され疲れにくくなるだけでなく、基礎代謝が上がることで、冷え性の改善にも効果的である⁽¹⁾。

高齢者における立ち上がり動作中の転倒原因に関しては、身体重心速度の低下が要因の一つとして報告されており⁽²⁾、関節パワーなどの力学的パラメータと身体重心速度との関係を定量化することは運動機能の評価に寄与する⁽³⁾。しかし、関節パワーは任意の関節を動かす筋の仕事率を表すのみであり、各筋の筋張力の状態を詳細に表すことはできない。各筋の運動速度への貢献を明らかにし、運動機能の評価へ役立てるためには、スクワットにおける運動速度と下肢筋張力との関係を定量的に示すことが必要である。

そこで本研究では、股関節・膝関節の屈曲伸展、足関節の背屈底屈に貢献する下肢筋張力を用いて身体重心速度を推定するスクワットモデルを構築し、下肢の運動と身体重心速度との関係を定量的に示すための解析を行う。さらに、スタンス幅の異なるスクワットに対し提案手法を適用することにより、それぞれのスタンス幅における各筋の運動速度への貢献について検証する。

2. 計測実験

歩行計測の参加者は 20 歳の成人健常男性 1 名（身長 1.71m, 体重 63kg）である。歩行計測実験は秋田工業高等専門学校において実施し、本実験については臨床実験に関する秋田工業高等専門学校ヒト倫理審査委員会、工

学院大学ヒトを対象とする研究倫理審査委員会の承認を得るとともに、あらかじめ被験者に十分な説明を与え、同意を得た。

計測においては、光学式三次元動作解析装置（Vicon 社製，Bonita10）と床反力計（Kistler 社製，9286）2 枚を用いた。光学式三次元動作解析装置，床反力計のサンプリング周波数は共に 100 Hz である。計測前，Plug-in Gait lower body マーカセットを参照して参加者の下肢に 16 個の反射マーカを貼付した。

スクワットのスタンス幅は左右足の第 2 中足骨頭間の距離とし，参加者は肩峰幅をスタンス幅としたノーマルスクワットと肩峰幅の約 1.5 倍をスタンス幅としたワイドスクワットを行った。爪先の向き（内外旋方向）は第 2 中足骨頭と踵骨の後方最突点を結ぶ直線が左右足で平行になるように指示した。本実験においては，バーベルを使用せず，自重のみの負荷でスクワット運動を行った。踵が浮かない状態で，可能な限り下降するよう指示した。運動時間はメトロノーム 60 bpm に合わせて下降に 1 秒，上昇に 1 秒かけるものとした。1 回の計測につき 5 回のスクワット運動（下降，上昇を繰り返し 5 回）を行うこととし，各スクワットを 3 回ずつ計測した。

3. 筋張力推定

3・1 解析条件

筋張力の推定においては OpenSim 3.3 を使用し，下肢筋群の解析に有用な gait2392 モデルを用いた⁽⁴⁾。スケーリングにおいては，gait2392 標準モデルの各骨の質量分布を維持したままスケーリング後の質量が被験者の質量に一致するように，Preserve mass distribution (PMD) の設定を ON とした。筋骨格モデルの拡大縮小倍率 (Scale Factor) は三軸すべての方向に対して，式(1)に示すように gait2392 標準モデルの身長 1.80 m に対する被験者の身長倍となるように設定した。マーカの重みづけ (Static Pose Weights) は標準設定のままとした。

$$Scale\ Factor = \frac{participant's\ height[m]}{1.80[m]} \quad (1)$$

次に，スクワット運動中の実測マーカの動きを再現した運動学データを生成するため，逆動力学解析を行った。さらに，運動学データと床反力の実測データとの動的整合性をとるための Residual Reduction Algorithm (RRA) を実行し，最後に静的最適化計算によって下肢筋張力を得た。

3・2 結果

静的最適化計算によって得られた下肢筋の筋張力の推定結果の一例を図 1, 2 に示す。図 1, 2 はスクワット運動に関与の大きい大腿直筋，大腿二頭筋長頭の結果を示しており，図 1 はノーマルスクワットにおける筋張力，図 2 はワイドスクワットにおける筋張力示している。

大腿直筋，大腿二頭筋長頭は共に，両足においてワイドスクワットの最大筋張力がノーマルスクワットよりも大きい傾向であり，大腿二頭筋長頭ではワイドスクワットにおいて一定時間最大筋張力を保持している様子が確認できた。

4. スクワットモデル

4・1 モデルの構築

推定した下肢筋張力の結果より，それぞれのスクワット運動に貢献している可能性がある下肢筋張力を用いてスクワットモデルを構築する。下肢筋張力を用いたスクワットモデルを式(2)に示す。

$$V_{cog} = aF_{gmax_l} + bF_{psoas_l} + cF_{rectfem_l} + dF_{vasint_l} + eF_{bifemLH_l} + fF_{semimem_l} + gF_{semiten_l} + hF_{sar_l} + iF_{grac_l} + jF_{gasmed_l} + kF_{sol_l} + lF_{tibant_l} + m \quad (2)$$

ここで， V_{cog} は身体重心速度の上下方向成分， F_{gmax_l} ， F_{psoas_l} ， $F_{rectfem_l}$ ， F_{vasint_l} ， $F_{bifemLH_l}$ ， $F_{semimem_l}$ ，

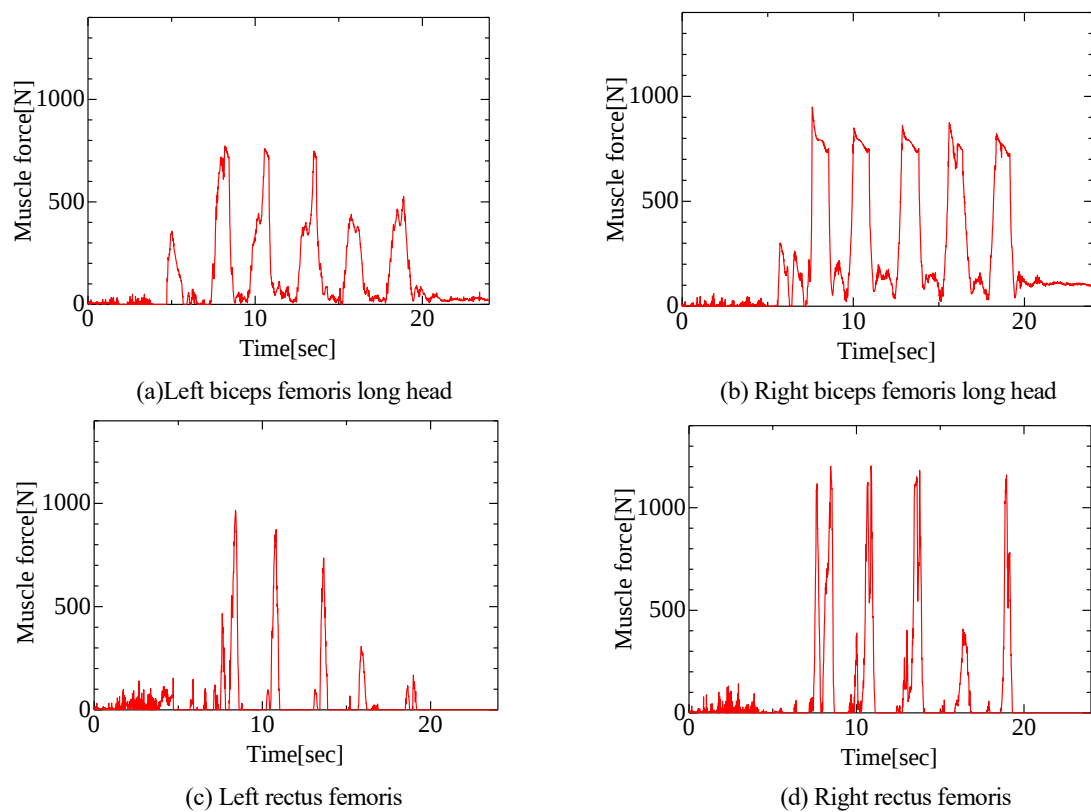


Fig.1 Estimated muscle forces during normal squat

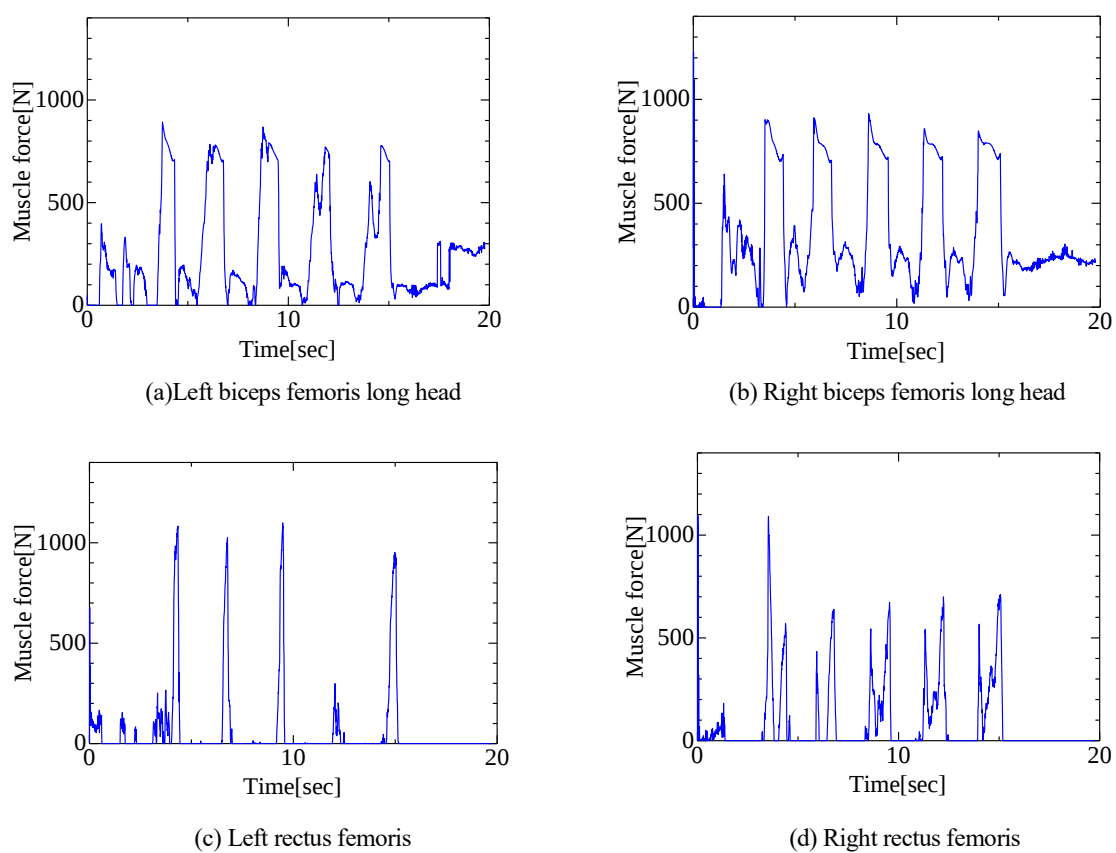


Fig.2 Estimated muscle forces during wide squat

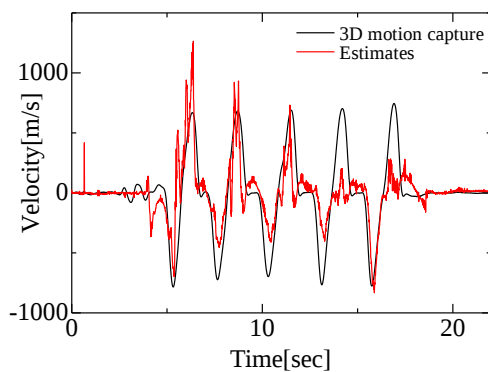
$F_{semiten_l}$, F_{sar_l} , F_{grac_l} , F_{gasmed_l} , F_{sol_l} , F_{tibant_l} は左脚の大臀筋, 腸腰筋, 大腿直筋, 中間広筋, 大腿二頭筋長頭, 縫工筋, 恥骨筋, 半腱様筋, 半膜様筋, 腓腹筋, ヒラメ筋, 前脛骨筋である. $a\sim l$ は各筋張力に関するパラメータである. $a\sim l$ は筋張力から速度への単位変換を行う役割を果たすため, 単位は $m/N \cdot s$ である. m はオフセットであり, 単位は m/s である.

三次元動作解析装置より得られた身体重心速度と, OpenSim により得られた左右の下肢筋張力を用いて $a\sim m$ のパラメータを同定し, これらのパラメータと下肢筋張力をモデルへ適用することにより身体重心速度を推定する. 未知パラメータの同定には, カルマンフィルタアルゴリズムを用いる. カルマンフィルタは構成した状態方程式と観測方程式を用いて, 一時刻前までの情報と現時刻において取得した情報をもとに, 最適なシステムの状態を推定するフィルタである.

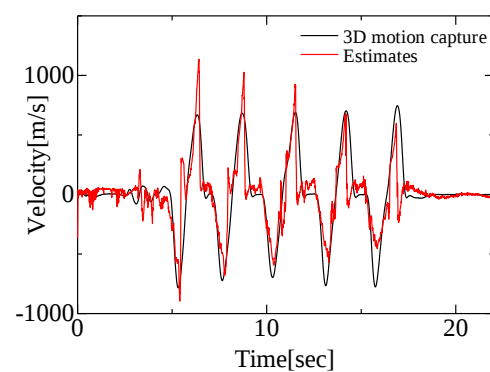
4・2 モデルを用いた重心速度推定結果

下降, 上昇を5回含む計測1回分の計測情報を用いて, モデルにより推定した各スクワットにおける身体重心速度の結果を図3, 4に示す.

図3より, ノーマルスクワットの全時間区間において, 右脚の筋張力を用いたモデルの推定結果は概ね三次元動作解析装置から得られた重心速度に近い値であることが確認できた. しかし, 左脚の筋張力を用いたモデルの推定結果は, 4回目と5回目の上下動において三次元動作解析装置から得られた重心速度と大きく異なる結果であった. 図1より, ノーマルスクワットの4回目と5回目の上下動において, 大腿直筋, 大腿二頭筋長頭の筋張力

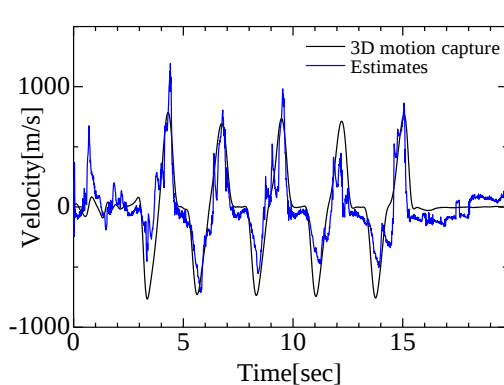


(a) Results obtained using left lower limb muscles forces

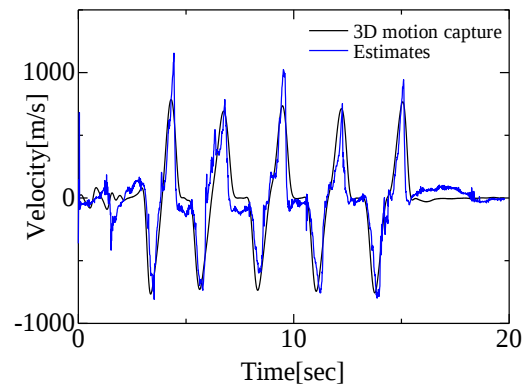


(b) Results obtained using right lower limb muscles forces

Fig.3 Estimation results during normal squat



(a) Results obtained using left lower limb muscles forces



(b) Results obtained using right lower limb muscles forces

Fig.4 Estimation results during wide squat

は 1～3 回目の上下動よりも小さい値であり、スクワット運動において大きな筋張力を発生させるこれらの筋の筋張力が小さいことが速度の推定精度に影響を及ぼした可能性が考えられる。本結果は、4 回目と 5 回目の上下動において、主に大腿直筋、大腿二頭筋長頭以外の筋が上下動の速度に貢献していた可能性を示唆している。

図 4 より、ワイドスクワットにおいては左右の脚どちらの筋張力を用いたモデルの推定結果も概ね三次元動作解析装置から得られた重心速度に近い値で推定することができた。図 2 より、ワイドスクワットにおいては 1～5 回目の上下動すべてにおいて大腿直筋、大腿二頭筋長頭の筋張力が同様の大きさであり、そのため 1～5 回目の上下動すべてにおいて速度推定の精度が良好であった可能性が考えられる。一方で、ワイドスクワットは計測開始後 3 秒間の静止立位区間においても推定速度が変化していることが確認できる。ワイドスクワットは静止立位時においても足幅が広い姿勢を保つために下肢の内外転に貢献する筋が筋張力を一定程度発生させていたため、モデルを用いた推定速度が静止立位時においても変化してしまったことが考えられる。

以上より、提案モデルでは 1～5 回目の上下動において筋肉の使い方が同様である場合のみ精度の良い速度推定が可能であるが、異なる筋肉の使い方スクワットを行った場合は速度推定の精度に影響を及ぼすことが示唆された。

5. 結言

本研究では、健常成人男性の 2 種類のスクワット運動を解析対象とし、OpenSim を用いて下肢筋張力を推定した。さらに下肢の運動と身体重心速度との関係を定量的に示すために速度推定を行った。提案モデルを用いた速度推定の結果より、各筋の運動速度への貢献について検証した。提案モデルを用いることで左右の筋肉の使い方の違いを確認することは可能であるが、提案モデルはスクワットに貢献する主な筋の筋張力を和で表した簡易モデルであり、スタンス幅の違いによる筋の使い方の違いを考慮してモデルを改良することで、より精度の良い速度推定が可能になると考えられる。

文 献

- (1) 辻忠, 運動選手の基礎代謝量と蛋白栄養について, 体育学研究, 14 巻 5 号 (1970) pp. 117.
- (2) 鈴木景太, 運動習慣のある高齢者の転倒と身体・認知・精神機能との関連, Japanese Journal of Health Promotion and Physical Therapy Vol.7, No.4 (2018), pp.171-175.
- (3) 齊藤亜由子, 奈良雄斗, 宮脇和人, 歩行動作における下肢関節パワーを用いた身体重心速度の推定に関する研究, 日本機械学会論文集, 85 巻 877 号 (2019), DOI: 10.1299/transjsme.19-00245.
- (4) Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E. and Thelen, D. G.: OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.54, No.11 (2007), pp. 1940-1950.