

平成30年6月25日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16444

研究課題名(和文)力発揮特性に応じた筋骨格シミュレーションモデルの構築

研究課題名(英文) Development of a musculoskeletal model reflecting force generation characteristics of a subject

研究代表者

鈴木 雄太 (SUZUKI, Yuta)

大阪市立大学・都市健康・スポーツ研究センター・講師

研究者番号：90747825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、力発揮特性に応じた筋骨格シミュレーションモデルを構築することであった。筋骨格モデルで用いる生理的横断面積や筋線維長などの筋パラメータを推定するために、筋力測定装置を用いて下肢関節の等尺性および等速性伸展トルクを測定した。筋骨格モデルを用いて筋力測定をシミュレートし、測定された関節トルクとシミュレーションにより算出された関節トルクの差が最小になるように筋パラメータを最適化した。推定した筋パラメータを用いてスクワットジャンプ動作をシミュレートし、被験者のジャンプ動作と比較した。本研究の結果から、本システムにより運動中の筋張力の推定精度を高める可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a musculoskeletal model reflecting force generation characteristics of a subject. We measured isometric and isokinetic joint extension moments of lower limb joints to estimate the muscles' parameters, such as physiological cross-sectional areas and fiber lengths, used in the musculoskeletal model. For estimation of muscles' parameters, the motions of joint moment measurements were simulated, and the parameters were optimized to minimize differences between measured and calculated joint moments. Vertical squat jump motions were simulated using the estimated parameters. The results of this study suggest that the developed system could improve estimation accuracy of muscle forces during sport motions.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：跳躍動作 関節トルク 筋骨格モデル シミュレーション 最適化

1. 研究開始当初の背景

これまでの多くのバイオメカニクスの研究では、身体各部を剛体とみなす剛体リンクモデルを用いて算出された関節トルクから身体運動のメカニズムを検討してきた。しかし、関節トルクは筋が関節まわりに発揮した正味のトルクであるため、その結果から適切なトレーニングやリハビリテーションプログラムを設計することは困難である。このため、特に近年では筋骨格モデルを用いて運動中の筋の発揮張力を推定する研究が数多く行われている。

一方、筋骨格モデルを用いる場合、生理的横断面積や筋線維長などの筋パラメータが被験者とモデルの間で大きく異なると、各筋の力発揮特性が実際と大きく異なってしまうため、被験者に間違った情報をフィードバックしてしまう危険性がある。これまでの研究では筋パラメータを屍体標本(死亡年齢はおよそ70~90歳)の測定をもとに決定していることが多い(Winters ら, 1990; Ward ら, 2009 など), 特にスポーツ科学で分析対象となることが多い青少年やアスリートの場合は、筋パラメータが実際とは大きく異なる可能性が高い。正確な筋パラメータを測定するには、CTやMRIを用いる方法がある(Martin ら, 1989; Garner ら 2001), これらの方法では膨大な画像の分析に多大な時間を要するため、多くの被験者を対象とすることは困難である。そこで、筋力測定装置で測定した力発揮特性をもとに筋パラメータを推定できれば、簡易に被験者の特性に合わせた筋骨格モデルを構築できるため、動作改善に重要な情報を容易に得ることができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、被験者の力発揮特性を考慮した筋骨格シミュレーションモデルを構築するとともに、このモデルを用いて垂直跳における筋張力を推定した際の精度を検討することである。

3. 研究の方法

(1) データ収集

本研究では、関節角度および角速度と下肢3関節(股関節、膝関節、足関節)で発揮された関節トルクとの関係から、下肢筋群の出力特性に応じたパラメータを推定する。そこで、男子学生10名を被験者とし、筋力測定装置(Cybex)を用いて股関節、膝関節、足関節の等尺性および等速性伸展トルクを測定した。

次に、下肢筋力測定を行った被験者にスクワットジャンプを行わせた時の動作を3次元自動動作解析装置(VICON-MX T10 system, 150Hz)で測定するとともに、下肢のEMG(Delsys, Trigno Wireless System, 2000Hz)を計測した。測定したEMGは、10Hzのハイパスフィルタでアーチファクト成分を除去し、

整流後に10Hzのローパスフィルタで包絡線を算出した。得られた包絡線から以下の手順で各筋の活動開始および終了時点求めた。まず跳躍動作中の最大値を求め、その10%の大きさを基準値とした。そして跳躍動作開始後、包絡線が最初に基準値よりも大きくなった時点活動を開始時、その後基準値よりも小さくなった時点活動を終了時とした。

(2) 筋骨格モデル

本研究では、身体を4つのセグメント(足部、下腿、大腿、体幹)と6つの筋腱複合体(大臀筋(GLU)、ハムストリングス(HAM)、広筋群(VAS)、大腿直筋(REC)、ヒラメ筋(SOL)、腓腹筋(GAS))からなる筋骨格モデルでモデル化した(図1)。筋モデルには、収縮要素、並列弾性要素、直列弾性要素からなるHillタイプモデルを用いた。このモデルにおいて、収縮要素が発揮する張力は、最大筋張力、筋の長さ、力関係および速さ、力関係と活性度により決定される。

本研究では、推定された各筋の最大筋張力や筋線維長などの筋パラメータの妥当性を検討するために、以下の2つのモデルを用いた。モデル1では、筋パラメータを先行研究をもとに決定した(Ward ら, 2009)。なお最大張力は、各筋の生理的横断面積により決定し、単位面積当たりの張力は60N/cm²とした。モデル2では、後述の方法で被験者毎に推定した筋パラメータを用いた。また、筋骨格モデル内の各部の質量や慣性モーメントは、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて被験者毎に設定した。

(3) 筋パラメータの推定

筋骨格モデルを用いて筋力測定時の動作をシミュレートし、各関節トルクの誤差が最小となるように筋パラメータを最適化することで各被験者の筋パラメータを推定した。

(4) 跳躍動作のシミュレーション

シミュレーション開始時の各部の角度は、各被験者のスクワットジャンプ動作の開始時の値を用いた。シミュレーション開始時の各収縮要素の活性度は、初期姿勢を維持する関節トルクを発揮するように設定した。また、

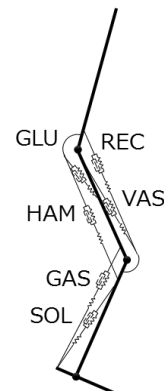


図1 筋骨格モデル

跳躍動作中の収縮要素の活性度の変化は，筋の興奮ダイナミクスにより決定した（Hatze, 1981；Bobbert et al., 1999）. したがって，シミュレーションにおける制御変数は各収縮要素の活動開始および終了の時間となる．そして身体重心の最高到達高が最大となるように各収縮要素の活動開始および終了の時間を最適化により求めた．最適化には遺伝的アルゴリズムを用いた．

4. 研究成果

(1) 筋パラメータの推定

図2は，モデル1およびモデル2を用いて下肢筋力測定をシミュレートした時の関節角度と関節トルクとの関係を測定値とともに典型例で示したものである．モデル1では，発揮された関節トルクはいずれの関節角度においても測定値より小さく，特に足関節が背屈位ではその差が大きかった．一方，モデル2では，いずれの関節角度においても発揮された足関節底屈トルクは測定値と同程度であった．

表1は，モデル1およびモデル2における各筋の最大張力を示したものである．最大筋張力はいずれにおいてもモデル1よりもモデル2で大きく，その差は特にGLUとHAMで大きかった．

(2) 跳躍動作のシミュレーション

図3は，被験者，モデル1およびモデル2の平均動作を示したものである．動作時間は被験者では 0.28 ± 0.04 秒，モデル1では 0.32

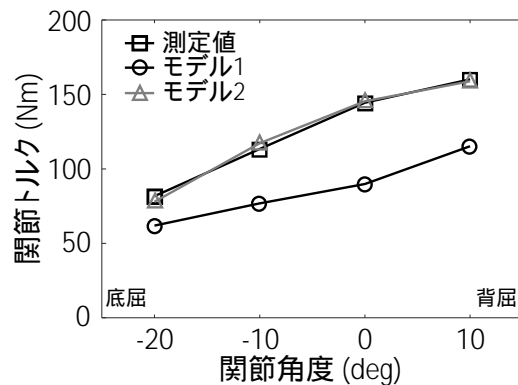


図2 足関節角度と関節トルクとの関係

表1 各筋の最大張力

(N)	モデル1	モデル2	比
GLU	4008	9526 ± 2864	2.38
HAM	4140	10208 ± 1967	2.47
VAS	8688	13939 ± 2423	1.60
REC	1620	3887 ± 680	2.40
SOL	6216	8685 ± 2518	1.40
GAS	3696	4516 ± 1384	1.22

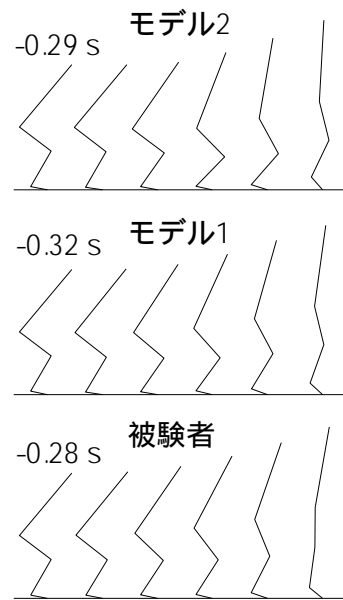


図3 跳躍動作のスティックピクチャ

± 0.03 秒，モデル2では 0.29 ± 0.04 秒であり，モデル2では被験者と同程度であったのに対し，モデル1では被験者よりも長かった．跳躍高は，被験者で 0.34 ± 0.05 m，モデル1で 0.13 ± 0.09 m，モデル2で 0.35 ± 0.05 mであり，モデル2では被験者と同程度であったが，モデル1では被験者よりも小さかった．

(3) 筋張力推定結果の評価

図4は，被験者，モデル1およびモデル2の各筋の活動時間を示したものである．グラフは各筋の活動開始から終了までの時間を示している．各筋の活動時間は，モデル1，モデル2とも被験者とは異なるパターンを示した．各筋の活動時間はモデル1よりもモデル2で短い傾向にあったが，これは各筋の最

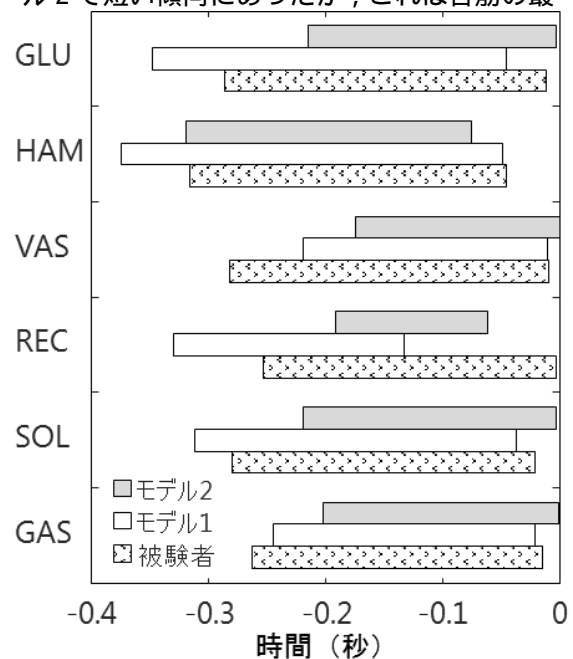


図4 各筋の活動時間

大張力がモデル2で大きかったためと考えられる。

以上の結果より、男子学生を対象とした場合、屍体標本の測定をもとに決定された筋パラメータでは、単位面積当たりの張力を $60\text{N}/\text{cm}^2$ と仮定した場合でも最大張力を過小評価している可能性が示唆された。藤井と森脇(1992)は、モデル内の最大筋張力の相対的な大きさが変化した場合、最大跳躍高を得るための動作が大きく変化することを報告している。本研究の結果では、屍体標本の測定をもとに決定された最大筋張力と推定された最大筋張力の差は筋により様々であった。したがって、屍体標本の測定をもとに決定された筋パラメータを用いて推定された筋張力の解釈には、十分な注意が必要であると考えられる。

一方で、被験者の力発揮特性から推定された筋パラメータを用いた場合でも、各筋の活動は被験者のものとは異なるパターンを示した。この原因としては、本研究では下肢の代表的な筋群のみからなるモデルを用いたことや筋活動の制御アルゴリズムの影響などが考えられる。本研究の方法により筋張力の推定精度が向上したと期待されるが、特に身体のモデリングや筋活動の制御アルゴリズムは今後検討すべき課題である。

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 1 件)

Suzuki Y., Kobayashi Y., Takizawa M.: Effects of Joint Moments on Horizontal and Vertical Velocities of Body Mass Center during Jumping in Different Directions. International Journal of Sport and Health Science, in press, 2018. 査読有

[学会発表](計 6 件)

Suzuki Y., Murata M., Kobayashi Y., Takizawa M.: Muscle contributions to body mass center velocity during vertical and forward jumping. June 2017, Cologne, Germany

Suzuki Y., Takizawa M., Kobayashi Y., Murata M.: Difference in work output of lower limb muscles during horizontal and vertical jumps. Orthopaedic Research Society 2017 Annual Meeting, March 2017, San Diego, USA

鈴木雄太, 村田宗紀: 垂直跳における下肢関節トルクがエネルギーの発生、変換、伝達へ及ぼす影響. 第24回日本バイオメカニクス学会大会, 2016年9月, 立

命館大学

Suzuki Y., Murata M., Kobayashi Y., Takizawa M.: Effects of muscle forces on horizontal and vertical velocities of the body mass center during forward and vertical jumping. The 21st annual Congress of the European College of sport science, July 2016, Vienna, Austria

Suzuki Y., Takizawa M., Kobayashi Y.: Effects of Muscle Architectural Properties on Vertical Jump Motion. Orthopaedic Research Society 2016 Annual Meeting, March 2016, Orlando, Florida, USA

鈴木雄太: 異なる方向への跳躍動作における身体重心速度に下肢関節トルクが及ぼす影響. 大阪体育学会第54回大会, 2016年3月, 和歌山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 雄太 (SUZUKI, Yuta)

大阪市立大学・都市健康・スポーツ研究センター・講師

研究者番号: 90747825