

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11445

研究課題名（和文）歩行時における下肢関節の関節面接触力と関連する動作因子の解明

研究課題名（英文）Motion factors related to joint contact force of the lower extremity during gait

研究代表者

井上 恒（Inoue, Koh）

香川大学・創造工学部・講師

研究者番号：90624205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：筋骨格モデルでヒトの歩行動作を分析した結果、立脚期の膝関節伸展の維持は膝関節面接触力を低減させる動作方略として有効であると示された。また、方略の提案から主観を排除するため、全身の運動情報から同接触力を推定する機械学習モデルを構築した。推定に寄与する身体部位を抽出した結果、下肢と上肢が挙げられ、上記方略の有用性が支持された。また、上肢の運動から、接触力の推定や接触力を変化させる可能性が推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、関節における傷害や疾病によって生涯にわたる歩行の継続が阻害されるリスクの低減に貢献する。学術的には、研究者の経験に基づいてシミュレーション的に提案された動作方略が、実際のヒトの歩行動作で実現可能か検証している。そして、方略の選定において研究者の主観によらない機械学習による網羅的な調査を行い、上記方略の有用性や別の方略の可能性を示している。また、筋骨格モデルでの分析から、同手法の限界を示すと共に、改善方法の提案と実証実験に至っている。

研究成果の概要（英文）：The analysis of human walking motion with a musculoskeletal model revealed that extending the knee joint during the stance phase is an effective strategy for reducing knee joint contact force. To eliminate subjectivity in proposing strategies, a machine learning model was developed to estimate contact force based on whole-body motion information. The visualization technology identified the lower and upper extremities as the body parts that significantly contributed to the estimation. The result of the lower extremity supports the validity of maintaining the knee joint angle as a strategy. Moreover, it is suggested that the estimation of contact force and the potential for modifying it could be inferred from the motion of the upper limbs.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：歩行 筋骨格モデル 関節面接触力

1. 研究開始当初の背景

日本を含む高齢社会が進む先進国において、健康寿命の延長や生活の質(QOL)の向上は重要な課題となっている。この課題に対して身体活動や運動が効果をもたらすことが認められている。特に、日常生活における基本的な動作であり、運動の代表的存在でもある歩行は、生涯にわたって持続することが重要な身体活動と言える。

しかし、加齢や過度な活動の蓄積などによって下肢関節に疾患やトラブル(軟骨の減少など)が発生して運動機能に支障をきたすと、歩行などの身体活動は持続不能となる。これにより、健康寿命は短縮すると共に、QOLは悪化する。このように身体活動における運動機能に障害をもたらし得る関節負荷は、バイオメカニクス的(生体力学的)に分析、評価することが有効である。関節を圧縮する力(関節面接触力)は関節負荷に対する有用な指標の一つである。例えば、歩行中の膝関節の関節面接触力は体重の約2.8倍となっている。この関節面接触力が大きいほど、関節疾患やトラブルが生じるリスクは増大する。一般的には、体重や歩行速度を減少させることが関節面接触力を減少させる方法とされている。一方、歩行動作の観点から、膝関節の関節面接触力を軽減するための方略(歩き方など)がシミュレーション的に検討されている。

しかし、歩行における関節負荷を軽減するための方略という観点において、以下の疑問が残る。

先行研究において膝伸展が有効であると提案されているが、実際のヒトの動作では膝以外の関節運動も変化して、提案通りに関節面接触力が減少しない可能性がある。また、上記の方略は、研究者の経験に基づくとはいえ、主観的に選定された方略であり、関節面接触力と各種動作パラメータとの関連が網羅的に明らかにされた上での合理的な選択ではない。

2. 研究の目的

歩行時の関節面接触力を減少させるには体重を減少させることが有効なのは明らかであるが、即時的な効果を得ることは難しく、減量失敗の可能性もある。また、関節疾患などのリスクを下げるためとはいえ、健常者において歩行速度を低下させることは日常生活での不便さをもたらす可能性があると共に、身体活動量を低下させてしまう懸念もある。そこで、本研究は、現在シミュレーション的に提案されている膝関節面接触力を低下させる歩行動作の方略が、実際にヒトの歩行動作において有効か検討することを目的とした。また、研究者の経験や主観に基づく方略の他に、機械学習を利用して、関節面接触力と関連する動作要因を全身の運動データから網羅的に検討することを目的とした。

3. 研究の方法

既存動作方略の有効性を以下の方法で検証した。歩行時の立脚初期における膝関節屈曲角度を減少させることが、膝関節面接触力を減少させる方略として提案されている。公開されている歩行動作のデータベースを利用して、個人間データにおいて関節角度と関節面接触力に関連があるか検証した。この検証では、筋骨格モデル(力学モデルと最適化計算)を用いて、モーションキャプチャデータと床反力から各筋の筋張力を推定した。そして、筋張力から関節面接触力を算出した。

その後、上記の検証結果に基づいて歩行実験を行い、膝関節角度を変化させた際の関節面接触力への影響を個人内でも検証した。被験者に異なる関節角度で歩行をさせ、上記と同じ方法で関節面接触力を算出した。また、このとき、下肢筋群の筋電図を測定し、筋骨格モデルの筋張力と比較した。

しかし、上記歩行実験において、推定筋張力と筋電図の変化の仕方に一貫性がみられない場合があり、個人内の変化を検証するには既存の筋張力推定技術について改善の必要性がみられた。そこで、筋骨格モデルによる推定に、筋電図データを反映させることとした。この際、静的な状態で関節角度 - 筋電図 - 筋張力の関係式を構築した。

次に、関節面接触力を減少させる動作方略を網羅的に検討するため、機械学習を利用した分析を行った。歩行データベースで提供される全身のモーションキャプチャデータを用いて関節面接触力の最大値を推定する学習モデルを構築した。その後、可視化技術によって学習モデルでの予測に大きく寄与する特徴量を抽出することで、関節面接触力に関連の強い動作要因の検討を行った。

4. 研究成果

公開歩行データベースを用いて個人間の分析を行った。膝関節面接触力は立脚期において概ね二峰性の波形を示すが、先行研究において立脚後期の値の妥当性に疑念が報告されており、本分析では立脚初期のピークを対象とした。分析可能だった182名分のデータにおいて、立脚初期の膝屈曲角度と関節面接触力には相関があり、屈曲角度が減少するほど関節面接触力が減少した。また、屈曲角度の減少に伴い、大腿四頭筋の張力が減少していた。これらの結果は先行研究においてシミュレーション的に提案されている動作方略およびその効果の内容と一致した。ただし、屈曲角度が 10° を下回る伸展状態で歩行する被験者では、大きな関節面接触力が算出

された。これは、ハムストリングスの張力が増大することでもたらされていた。

次に、異なる膝屈曲角度で歩行する実験を行い、個人内でも同方略が有効か検証した。8名の被験者に、通常、通常よりも伸展、通常よりも屈曲の3種類の膝屈曲角度を口頭で指示して歩行を行わせた。その結果、筋骨格モデルによる分析では、個人間データと同様に膝伸展に伴い関節面接触力が減少した。したがって、筋骨格モデルでの分析上、膝を伸展させる動作方略は個人内においても有効であると示された。しかし、屈曲角度の変化に伴う筋電図の変化が、筋骨格モデルが示す筋の活動度合いの変化と一致しない被験者が複数存在した。これは、屈曲角度を変化させることに対して不慣れであったため、屈筋 - 伸筋間の共収縮が生じたと推察される。したがって、これらの被験者では、実際の関節面接触力および筋張力の値は筋骨格モデルによる推定とは異なることが示唆された。

筋骨格モデルによる筋張力の推定をより正確に行うため、筋電図による補正手法を検討した。表面筋電図は関節角度の影響を受けてしまうため、関節角度 - 筋電図 - 筋張力の関係式を構築した。関節角度を固定した静的な状態で筋の張力発揮を行わせ、筋電図を被験者に視覚的にフィードバックすることで対象の筋のみが活動する状態で測定を行った。得られたデータに対して2次曲面をフィッティングし、関節角度 - 筋電図 - 筋張力の関係式を得た。この静的な状態での関係式から筋の活動度合いを求め、それをHillタイプ筋モデルに反映させることで歩行時の動的な筋張力を推定した。また、筋電図と張力発揮には、電気 - 力学的遅延がある。関節角度 - 筋電図 - 筋張力の関係式を構築する際の測定データから、相互相関係数を求めることで電気 - 力学的遅延時間を算出し、筋の活動度合いに反映させた。これにより、従来よりも妥当性の高い筋張力の推定値を得る手法提案に至った。

歩行データベースで提供される全身のモーションキャプチャデータを用いて関節面接触力の最大値を推定する学習モデルを構築した。学習モデルには畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network, CNN) を用いた。Grad-CAMによって、学習モデルでの予測に大きく寄与する特徴量を持つマーカを抽出したところ、同側下肢が最も注目されており、次に同側上肢が挙げられた。これらの結果から、下肢だけでなく上肢に関連する関節運動も関節面接触力に影響すると推察される。下肢については、先行研究で動作方略として提案されており、上述のヒトの実際の歩行データでの検証と併せて、その妥当性が示された。上肢についても、その運動が膝関節面接触力を推定する有用なパラメータとなることが示された。また、上肢の運動を変化させることが膝関節面接触力を減少させる動作方略になる可能性が見出された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Murabayashi Mai、Mitani Takuya、Inoue Koh	4. 巻 4
2. 論文標題 Development and Evaluation of a Passive Mechanism for a Transfemoral Prosthetic Knee That Prevents Falls during Running Stance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Prosthesis	6. 最初と最後の頁 172-183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/prosthesis4020018	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 -

1. 著者名 Suwa Satoshi、Inoue Koh、Matsuoka Ryo	4. 巻 1
2. 論文標題 Analysis Method for Motion Factors Related to Joint Contact Forces at the Knee during Walking Using Grad-CAM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA)	6. 最初と最後の頁 1324-1328
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/APSIPAASC55919.2022.9980268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitani Takuya、Inoue Koh、Takahashi Satoru	4. 巻 1
2. 論文標題 Muscle force estimation during gait using Angle-EMG-Force relationship	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)	6. 最初と最後の頁 Accepted
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Mitani Takuya、Inoue Koh
2. 発表標題 Relationship Between the Joint Angle and the Contact Force at the Knee During Walking
3. 学会等名 EJEA Conference 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 歩行立脚期における膝関節角度が下肢筋活動に与える影響
3. 学会等名 第42回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 諏訪聡、三谷拓也、松岡諒、井上恒
2. 発表標題 CNNを用いた歩行時膝関節面の力学的負荷に関する動作因子解析の考察
3. 学会等名 電子情報通信学会 SIPシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 筋電図を用いた歩行時の筋張力推定手法の検討
3. 学会等名 令和3年度四国体育・スポーツ学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉井海里、三谷拓也、井上恒、石田涼太
2. 発表標題 歩行時の膝関節における関節摩耗リスクの評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 歩行中の関節面接触力を減少させる動作方略の検討
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会第26回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 諏訪聡、松岡諒、三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 深層学習を用いた歩行時膝関節面の力学的負荷に関する動作因子の検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitani Takuya、Inoue Koh
2. 発表標題 Muscle force estimation based on Angle-EMG-Force relationship and electromechanical delay
3. 学会等名 XXIX Congress of International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉井海里、三谷拓也、井上恒、石田涼太
2. 発表標題 歩行時の膝関節における軟骨摩耗リスクの評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 関節角度 - 筋電図 - 張力関係構築による歩行中の下肢筋張力推定
3. 学会等名 四国体育・スポーツ学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 筋電図 - 筋張力関係構築による歩行中の筋張力推定
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 筋電図 - 張力関係を用いた歩行中の下肢筋張力推定
3. 学会等名 日本義肢装具学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 歩行中の関節面接触力を減少させる動作方略の検討
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitani Takuya、Inoue Koh
2. 発表標題 Relationship Between the Joint Angle and the Contact Force at the Knee During Walking
3. 学会等名 EJEA Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 歩行立脚期における膝関節角度が下肢筋活動に与える影響
3. 学会等名 バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 諏訪聡、三谷拓也、松岡諒、井上恒
2. 発表標題 CNNを用いた歩行時膝関節面の力学的負荷に関する動作因子解析の考察
3. 学会等名 電子情報通信学会 SIPシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 筋電図を用いた歩行時の筋張力推定手法の検討
3. 学会等名 四国体育・スポーツ学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上恒
2. 発表標題 関節負荷を軽減する歩行動作の検討
3. 学会等名 日本機械学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田涼太、三谷拓也、井上恒
2. 発表標題 階段昇段における足部接地位置が膝関節負荷に与える影響
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	松岡 諒 (Matsuoka Ryo) (40780391)	北九州市立大学・国際環境工学部・准教授 (27101)	

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
---------	---------