

令和元年6月18日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16463

研究課題名(和文)膝深屈曲動作の動力学に関する基礎研究

研究課題名(英文)Basic research of a dynamics on deep knee flexion

研究代表者

福永 道彦 (Fukunaga, Michihiko)

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：90581710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、膝深屈曲動作を解析できる力学モデルの作成を目指した。まず、大腿の裏側とふくらはぎの間に生じる接触力について、測定値のばらつきがきわめて大きいことから解析の入力値として利用しにくかったという問題を、身体測定情報と身体姿勢情報を説明変数として推定する方法で回避した。また、モデル解析の入力値となる筋力を出力値とし、測定可能な関節角度と外力のみを入力値とする下肢・膝統合モデルを作成し、大腿膝蓋関節と各関節面の詳細形状を含む総合的なモデルにより、膝深屈曲動作を対象にした結果を得ることができた。さらに、生理学的な膝回旋運動がハムストリングス筋力の影響によるものである可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が開発した膝関節の運動解析モデルは、大腿膝蓋関節と大腿脛骨関節の両方を含み、詳細な関節面形状を扱えるという特徴に加え、入力値がすべて測定可能な値である。従来の、入力値が別のシミュレーションの結果であり、そこで使われた仮定や条件が解析モデルとマッチするかの保証がなかった問題が解消された。特に、これまで報告が少なかった、膝深屈曲の条件における関節運動や筋張力を推定できるモデルである点に新規性がある。筋冗長性問題が研究開始当初の見込みより重要であり、課題を残したものの、近い将来には、アジア・アラブ地域の生活様式に適合した深屈曲が可能な人工膝関節の開発に主要な役割を果たせることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to develop a mathematical simulation model of a total knee to analyze the motion with deep knee flexion. Traditional protocol to analyze the knee kinematics or kinetics was using two simulation models. First one is a simple model of a lower limb to estimate the muscle forces, and second one is the three-dimensional knee model which needs the muscle forces as input data. There were some mismatches between the two models, because the first model required the data of joint motions as determining parameters. We combined these models as a single model which includes the three-dimensional knee shape. All the input data to be required, joint angles and external forces, were able to be measured. As a result, we could analyze the deep knee flexion by the total knee model including patellofemoral and tibiofemoral joints with the detailed articular surfaces considering thigh-calf contact force.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス 人工膝関節 膝深屈曲動作 大腿下腿接触力 力学モデル解析

1. 研究開始当初の背景

膝深屈曲動作は、日本を含むアジア・アラブの諸地域の日常生活においてしばしば見られるものである。ベッドや椅子のない生活様式においては、床上に直接座ったり臥するために、正座や胡坐のような座位姿勢のほか、それらの姿勢に至る座り込みやそこからの立ち上がり動作も頻繁に行われる。さらに、このような生活様式をもたない欧米地域においても、入浴、ガーデニング、靴下の着脱などにおいては膝深屈曲動作が行われる。このことから、深屈曲が可能な人工膝関節の開発には国際的な期待が寄せられている。しかるに、膝の深屈曲中の力学的な状況については、限定的な情報しか得られていないのが現状であり、設計評価はもちろんのこと、それ以前にどのような理念のもとに新型人工関節を設計すればいいのかすら、手探りの状況が続いている。

膝まわりの力を in vivo で測定することは困難であり、運動についても新型人工膝関節を対象にはできないことから、シミュレーションが必要である。しかし、大腿膝蓋関節や詳細な関節面形状を含む三次元の総合的な膝の力学モデルはこれまでに作成されていない。我々は、このようなモデルを開発するためには、後述する大腿下腿接触力の問題、および下肢二次元モデルと膝三次元モデルを併用することによる齟齬の問題を解決する必要があると考え、研究を実施した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、膝深屈曲動作を対象にできる力学モデルを作成することである。また、モデル解析に使用する重要なパラメータである大腿下腿接触力のばらつきを測定可能な情報で正規化することである。

3. 研究の方法

(1) 大腿下腿接触力のばらつきを抑える

大腿下腿接触力、すなわち膝深屈曲時に太ももの裏側とふくらはぎの間が生じる接触力は、膝深屈曲時の力学に多大な影響を与えるが、測定値のばらつきがきわめて大きく、単純な平均値を使用するだけでは解析の意味が薄まってしまう。我々は、測定実験の経験から、力のばらつきが被験者の脚の太さと、測定時の上体の姿勢に依存していると考え、身体測定情報と姿勢の両方のパラメータを用いて大腿下腿接触力を推定（正規化）することを試みた。

(2) 下肢・膝関節統合力学モデルの作成

従来、膝関節運動の解析モデルは、筋力（または、関節負荷や接触点位置）を入力値としてきた。これらの情報は基本的には測定不可能であるため、測定可能な身体動作や外力を入力値として、下肢全体の力学モデルを用いて推定される。しかるに、下肢モデルは一般に二次元であり、膝関節運動は三次元であるという齟齬が生じる。さらには、関節周りの筋力のモーメントアーム長などのパラメータが膝関節運動に依存するために、「関節運動が分からないと筋力が分からないが、筋力が分からないと関節運動が分からない」というジレンマにつきあたる。特に膝深屈曲では膝関節運動が無視できないほど大きくなることから、膝関節モデルが力学的に収束しないような入力値を取ってしまう可能性が考えられた。そこで本研究では、図1に示すような、下肢モデルと膝関節モデルを統合し、測定可能なデータのみを入力値として、筋力を出力値として膝関節運動を解析できるモデルの作成を目指した。

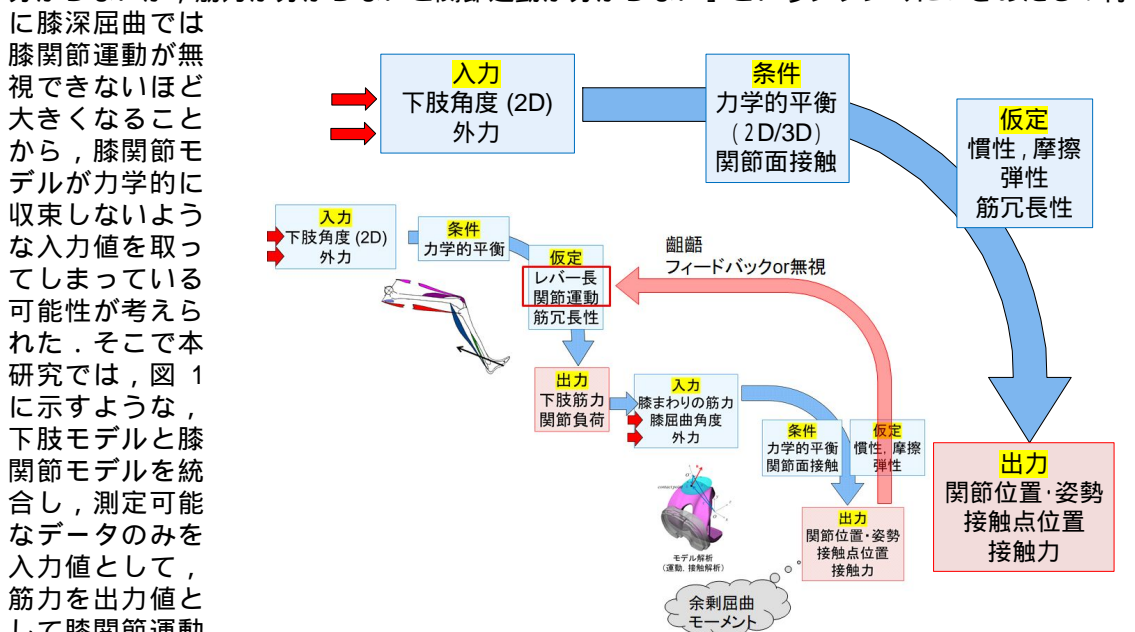


図1 下肢モデルと膝関節モデルの統合

4. 研究成果

(1) 大腿下腿接触力のばらつきを抑える

結果として、身体測定情報と身体姿勢情報の両方を説明変数とした多重回帰式によって、図2に示したとおり、推定誤差をおよそ半分に低減することができた。また、身体測定情報と身体姿勢情報の片方だけでは誤差があまり低減せず、両方を用いることが必要であることが分かった。

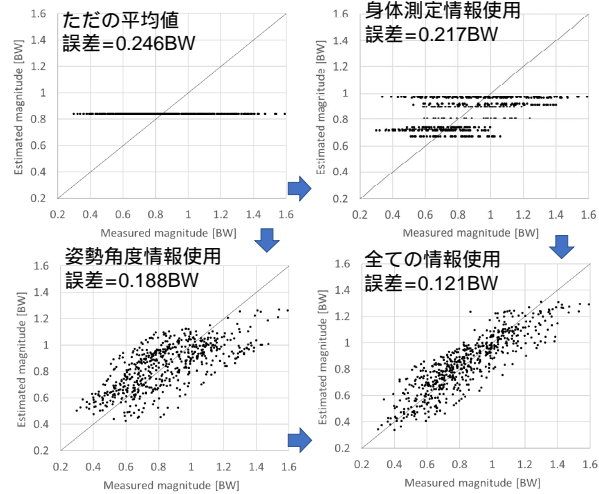


図2 大腿下腿接触力の推定誤差の低減

(2) 下肢・膝関節統合力学モデルの作成

膝関節の力学モデルを改良し、外力による関節モーメントを入力して筋力を出力できる形にした。その結果、大腿膝蓋関節と大腿脛骨関節の詳細な形状を含む総合的な膝モデルとしては初めて、膝深屈曲動作を対象にして解析を行うことができた。このとき、統合モデルでは余剰屈曲モーメントがゼロになるよう筋力を調節しており、単純な下肢二次元モデルの結果と異なるものになった(図3)。この挙動は、脛骨の前後方向運動による大腿四頭筋モーメントアーム長の変化と整合が取れており、また脛骨の接触点軌跡(図4)が安定したことからも、妥当であると考えられる。

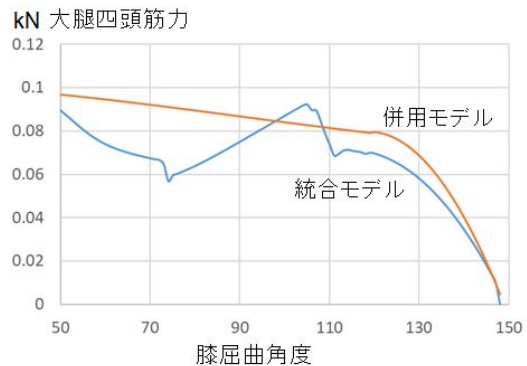


図3 併用モデルを統合モデルに改良したときの大腿四頭筋力

本研究を進めるにあたり、改めて筋冗長性問題に突き当たった。具体的には、in vivo でみられる脛骨の screw home movement がシミュレーションでは再現できず(図4)、ハムストリングスに含まれる4筋の分配を変更することによって脛骨の回旋を調整できた。このことから、生理学的な脛骨の回旋運動がハムストリングス筋力に依存すると考えられたが、この運動はあくまで付随的なものであり、妥当な分配比率を解析的に求めることは難しかった。モデルをさらに改良する上で、筋冗長性問題の解決は避けて通れない課題である。

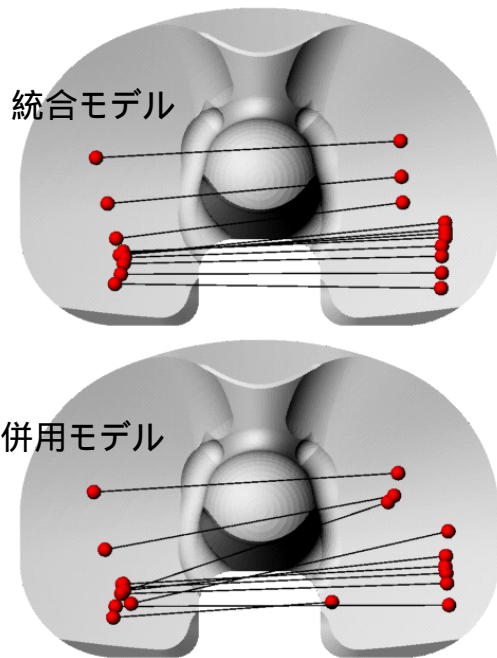


図4 脛骨側の接触点軌跡

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

梶原登雲子, 福永道彦, 長嶺隆二, 脛骨内旋の大腿膝蓋関節接触バランスへの影響のモデル解析, 臨床バイオメカニクス, 査読有, Vol. 39, 2018, pp.111-115.

Michihiko FUKUNAGA, Fumiya AYAKA, Kentaro MORIMOTO, Kuniyuki ITO, Ryuji NAGAMINE, A 3D model analysis of patellofemoral joint: effect of anterior translation and internal rotation of tibia, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有, Vol. 12, No. 4, 2017, pp.1-9.

DOI: 10.1299/jbse.17-00247

Michihiko FUKUNAGA, Kentaro MORIMOTO, Tomoko KAJIWARA, Kuniyuki ITO, Estimation of thigh-calf contact force during deep knee flexion, using both anthropometric and motion measurements, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有, Vol. 11, No. 4, 2016, pp.1-8.

DOI: 10.1299/jbse.16-00253

〔学会発表〕(計13件)

Yuki KAWAGOE, Tomoko KAJIWARA, Michihiko FUKUNAGA, Model Analysis of Artificial Knee Joint: Comparison of Cruciate Retaining Type and Posterior Stabilized Type, 11th Biomedical Engineering International Conference, 2019.

川越雄貴, 梶原登雲子, 福永道彦: 膝蓋骨形状と脛骨の回旋が大腿膝蓋関節に与える影響, 日本機械学会九州支部九州学生会第49回学生員卒業研究発表講演会, 2018.

福井林賢, 福永道彦: 膝深屈曲を再現できる筋力駆動型シミュレータの製作, 日本機械学会九州支部九州学生会第49回学生員卒業研究発表講演会, 2018.

福永道彦: 膝深屈曲動作を解析する三次元モデルの開発, 第57回日本生体医工学会大会, 2018.

川越雄貴, 梶原登雲子, 福永道彦: P S型およびC R型人工膝関節の三次元モデル解析, 第39回バイオメカニズム学術講演会, pp. 124-127, 2018.

Michihiko FUKUNAGA, Tomoko KAJIWARA, Kuniyuki ITO, Ryuji NAGAMINE, Model analysis of medial/lateral contact balance of patellofemoral joint, Annual Meeting of Orthopaedic Research Society, 2018.

Michihiko FUKUNAGA, Tomoko KAJIWARA, Yuki KAWAGOE, Ryuji NAGAMINE, Effectt of the rotational alignment of a tibial component to the patellofemoral joint, 8th World Congress of Biomechanics, 2018.

Michihiko FUKUNAGA, Yuki KAWAGOE, Tomoko KAJIWARA, Ryuji NAGAMINE, Effect of Patellar Shape to the Kinematics of Tibiofemoral and Patellofemoral Joint: Model Analysis, 31st Annual Congress of International Society for Technology in Arthroplasty, 2018.

梶原登雲子, 森本健太郎, 伊藤邦之, 福永道彦, 長嶺隆二: 脛骨の前方移動が大腿膝蓋関節に与える影響の三次元モデル解析, 日本生体医工学会九州支部講演会, 2017.

伊東浩司, 尾道貴則, 福永道彦: 身体パラメータと関節角度を用いた大腿下腿接触力の推定, 第38回バイオメカニズム学術講演会, 2017.

Tomoko KAJIWARA, Kuniyuki ITO, Michihiko FUKUNAGA, Ryuji NAGAMINE, A 3D Model Analysis of Patellofemoral Joint: Effect of Patellar Geometry and Tibial Rotation, 30th Annual Congress of International Society for Technology in Arthroplasty, 2017.

伊藤邦之, 森本健太郎, 梶原登雲子, 福永道彦: 膝関節運動に十字靭帯が及ぼす影響の三次元モデル解析, 生体医工学シンポジウム2016, 2016.

森本健太郎, 伊藤邦之, 梶原登雲子, 福永道彦: 三次元モデルを用いた大腿膝蓋関節の動作解析, 第37回バイオメカニズム学術講演会, 2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.en.oita-u.ac.jp/fukunaga/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

(2) 研究協力者

該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。