

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05874

研究課題名（和文）パーソナライズド人工関節の実現に向けた人間の筋骨格・有限要素解析統合モデルの構築

研究課題名（英文）Unified Model of Human Musculo-skeletal Analysis and Finite Element Analysis towards Personalized Artificial Joint

研究代表者

山本 江 (Yamamoto, Ko)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：20641880

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：人工膝関節置換術後の運動予測を目的とし、筋骨格・人工関節統合モデルを構築した。運動中の筋・靭帯の張力が計算できると同時に、人工関節のコンポーネント間の接触面積や応力分布についても計算が可能となった。モデルによるシミュレーション結果と人工関節を実際に装着した被験者の計測結果とを比較することで、妥当性を検証した。また、有限要素解析に基づいて、運動に関わる人工関節の形状パラメータの因子を抽出し、形状を設計する手法を提案した。さらに、人工関節を装着すると運動がどのように変化するのかを術前にシミュレーションするために、被験者の膝関節の制御の仕組みを関節の粘弾性として推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、患者個人の特徴に合わせた人工関節の設計論の基盤技術であり、超高齢社会において重要となる quality of lifeの向上に寄与する。同時に、個人の身体の力学パラメータの推定技術や、体の動かし方の特徴を粘弾性として抽出し運動の予測に用いる技術は、術前の予測シミュレーションだけでなく、スポーツのトレーニングやロボットの制御にも応用できるものである。さらに、本研究で用いた有限要素解析と筋骨格モデルの統合技術は、柔らかい材料の有限要素解析と硬い材料の力学計算の統合計算ともみなすことができ、これは近年注目されているソフトロボットの運動解析や制御にも応用できる技術である。

研究成果の概要（英文）：This study developed a unified model of human musculo-skeletal system and artificial joint to predict human motions after the knee replacement surgery. This model allows us to compute the muscle and ligament forces during a motion, and to compute the stress distribution between the components of the artificial knee joint. The validity of the model was verified by comparing simulation results with measurement data of an actual patient. Based on the finite element analysis, dominant parameters of the artificial knee geometry were extracted, which were applied to a design method of an artificial knee shape. Moreover, a method to estimate a patient's motion control of the knee joints as the joint viscoelasticity was proposed to predict the patient motion after the knee replacement.

研究分野：ロボティクス

キーワード：デジタルヒューマン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高齢社会において、高齢者の自立した生活の実現をサポートすることが医学および工学に求められている。その中でも、基本的な移動機能である歩行機能を維持することはQOLの向上に必要不可欠である。例えば、変形性関節症や関節リウマチによる痛みは高齢者の歩行を困難にする。これに対し、医療分野では損傷を受けた骨の一部を切除し金属製の関節インプラントに置き換える人工関節置換術が行われ、国内の人工関節置換術の件数は過去10年間で約2倍に増加している。人工関節置換術は高度な技能を要する手術であり、申請者の研究グループをはじめとして手術支援ロボットの研究も多く行われている。

一方で、手術に使用される関節インプラントの多くは欧米人向けに設計されており、体格の違う日本人にはインプラントが適合しない場合が多い。インプラント形状の不適合は以下のような問題の原因となる。

1. 関節に過大な負荷(応力)が生じインプラントの摩耗につながる。
2. 左右の脚長の違いなど運動全体に悪影響を与える。
3. 場合によっては再手術が必要になる。特に、高齢者にとって手術の負担は大きく、再手術が行えない場合も少なくない。

以上から、患者個人の身体的特性に合わせたパーソナライズド人工関節の実現が求められている。そのためには、インプラント形状によって関節部や運動全体にどのような影響が生じるかを力学的に解析する技術が必要となる。従来、そのような解析には人間の関節を模擬した試験機が用いられてきたが、運動は2次元平面内に限定され体全体を考慮できない、患者個人の身体的特性を試験機に反映できない、といった課題がある。

一方、ロボット工学やバイオメカニクスの分野では人間の全身筋骨格モデルを用いた力学解析の研究が行われてきた。研究代表者は、筋骨格モデルに神経振動子と呼ばれる歩行制御器を加えることで、人間のような自然な歩行動作をシミュレーションする研究に取り組んできた。また、筋骨格モデルに個人の特性を反映させる研究も行われている。

2. 研究の目的

本研究では、人間の全身筋骨格モデルに関節インプラントの応力解析モデルを統合したシミュレーションモデルを構築することで、パーソナライズド人工関節の設計に必要な解析を可能にする。関連研究として、片脚を対象として筋骨格モデルと膝関節の骨の応力解析を行う統合モデルに関する研究がある。本研究はこれを全身モデルへと拡張し、骨だけでなく関節インプラントも考慮した応力解析を行うものである。解析結果を設計へとフィードバックすることで、個人の身体特性に合わせた最適なパーソナライズド人工関節インプラントの設計を目指す。

3. 研究の方法

本研究では膝関節のインプラントを対象として筋骨格モデルと有限要素解析の統合モデルを構築する。

- (1) 有限要素解析用ソフト Abaqus を用いて、まず右脚のみの統合モデルを構築する。歩行の運動をモーションキャプチャした結果を用いて、筋張力、筋活動度を推定すると同時に、人工関節インプラントに加わる応力を解析する。
- (2) 全身筋骨格モデルでは、モーションキャプチャによる運動計測結果から個人の身体的パラメータを推定する技術と運動を個人の特性に合わせたものに変換するアルゴリズムを実装することで、個人に合わせたシミュレーションを可能にする。
- (3) 解析結果を基に、関節インプラント形状を最適化する

4. 研究成果

(1) 右脚の筋骨格・人工関節統合モデル

右脚の膝関節に人工関節を装着した場合を想定し、有限要素解析用ソフト Abaqus を用いて筋骨格・人工関節統合モデルを構築した(図1)。このモデルは、骨盤をベースリンクとし、股関節、足首関節はそれぞれ3自由度球面関節として表現している。一般的な筋骨格モデルでは、膝関節を1自由度回転関節として表現することが多いが、実際には、人工関節の大腿骨側と脛骨側の2つのコンポーネントの複雑な面接触と靭帯による拘束によって大腿骨と脛骨の相対的な運動が決まる。そこで、本モデルでは膝関節を1自由度ではなく6自由度関節として表現し、膝関節の複雑な運動を再現した。また、これにより運動中の筋張力だけでなく膝関節の靭帯に加わる張力が計算できる。さらに、人工関節の2つのコンポーネント間の接触を有限要素法で計算し、接触面積や応力分布についても計算することが可能となった。

このモデルによるシミュレーション結果と、人工関節を実際に装着した被験者の動きを計測した結果とを比較することで、モデルの妥当性を検証した(図2)。膝関節内の人工関節の動きをX線透視装置で計測した詳細データとそのシミュレーションによる予測結果がよく一致したことから、構築したモデルは人工関節を装着した場合の運動を再現していることが検証できた。

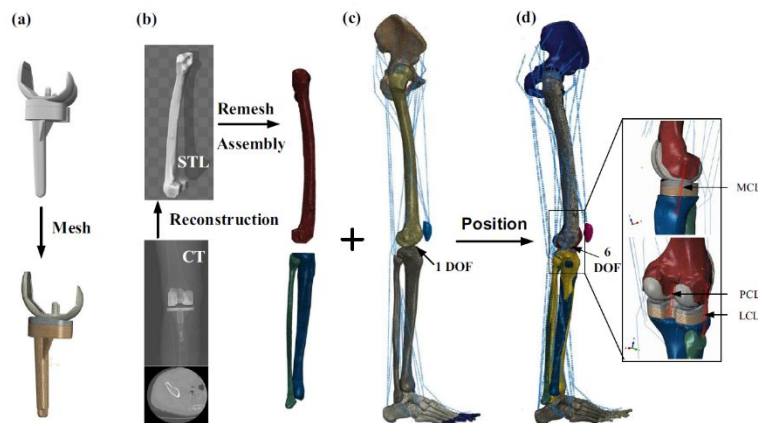


図 1：右脚の筋骨格・人工関節統合モデル

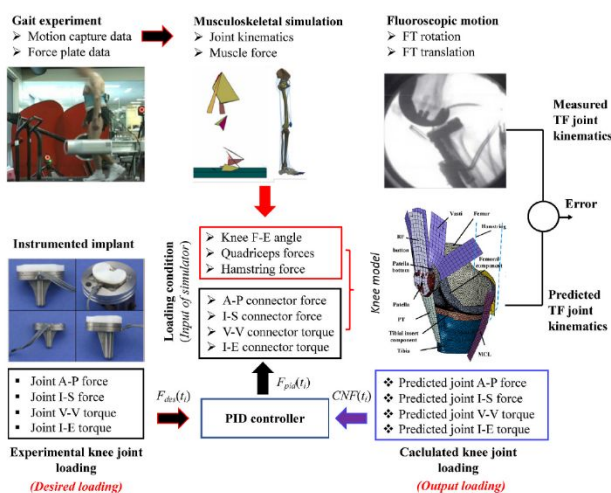


図 2：構築したモデルの妥当性の検証

(2) 人工関節の設計手法

有限要素解析に基づいて、運動に関わる人工関節の幾何学的形状パラメータの因子を抽出し、形状を設計する手法を提案した（図 3）。また、実際の被験者の MRI 画像データを基に筋骨格・人工関節統合モデルをパラメタライズし、そのシミュレーション結果を用いることで被験者固有の特徴を反映した人工関節を設計した。個別要素技術として、被験者の力学パラメータ（各身体部位の質量などのパラメータ）を推定する手法も開発した。

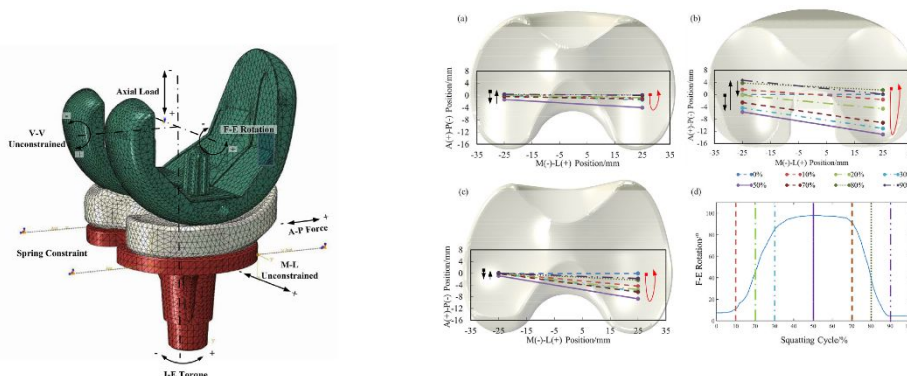


図 3：人工関節の幾何学的形状パラメータの因子抽出

(3) 術前運動予測のための膝関節の粘弾性推定

人工関節を装着すると運動がどのように変化するかを術前にシミュレーションするために、被験者の膝関節の制御の仕組みを関節の粘弾性として推定する手法を開発した。具体的には、被験者のモーションキャプチャ計測結果から、全身の筋骨格モデルを用いて膝関節の粘弾性を推定する手法や、重心のバランスを維持するための最適な関節粘弾性を求める手法を開発した。

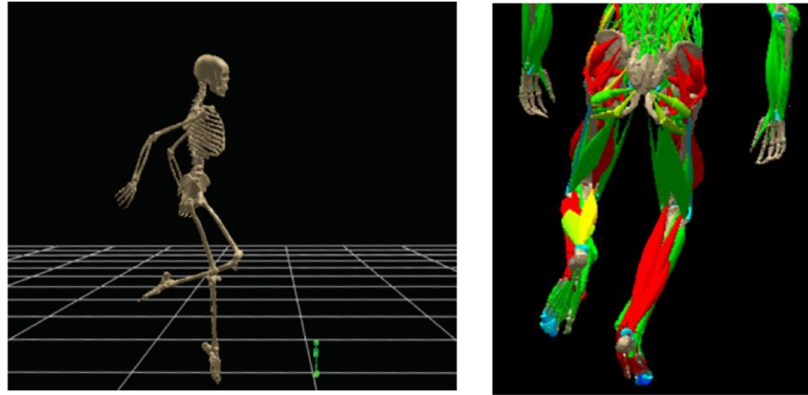


図4：全身筋骨格モデルにおける膝関節粘弾性推定

【主な研究業績】

1. Shu, L., Yao, J., Yamamoto, K., Sato, T., & Sugita, N. (2021). In vivo kinematical validated knee model for preclinical testing of total knee replacement. *Computers in Biology and Medicine*, 132(March), 104311.
2. Shu, L., Yamamoto, K., Kai, S., Inagaki, J., & Sugita, N. (2019). Symmetrical cruciate-retaining versus medial pivot prostheses: The effect of intercondylar sagittal conformity on knee kinematics and contact mechanics. *Computers in Biology and Medicine*, 108(March), 101-110.
3. Shu, L., Yamamoto, K., Yao, J., Saraswat, P., Liu, Y., Mitsuishi, M., & Sugita, N. (2018). A Subject-Specific Finite Element Musculoskeletal Framework for Mechanics Analysis of a Total Knee Replacement. *Journal of Biomechanics*.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Liming Shu, Jiang Yao, Ko Yamamoto, Takashi Sato and Naohiko Sugita	4. 巻 132
2. 論文標題 In vivo Kinematical Validated Knee Model for Preclinical Testing of Total Knee Replacement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers in Biology and Medicine	6. 最初と最後の頁 1 - 8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combiomed.2021.104311	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 該当する

1. 著者名 Liming Shu, Ko Yamamoto, Shin Kai, Junichi Inagaki, and Naohiko Sugita	4. 巻 108
2. 論文標題 Symmetrical Cruciate-Retaining versus Medial Pivot Prostheses: The Effect of Intercondylar Sagittal Conformity on Knee Kinematics and Contact Mechanics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers in Biology and Medicine	6. 最初と最後の頁 101-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.combiomed.2019.03.005	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 Liming Shu, Ko Yamamoto, Jiang Yao, Prabhav Saraswat, Yao Liu, Mamoru Mitsuishi, Naohiko Sugita	4. 巻 77
2. 論文標題 A Subject-Specific Finite Element Musculoskeletal Framework for Mechanics Analysis of a Total Knee Replacement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 146-154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2018.07.008	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 該当する

1. 著者名 Ko Yamamoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Resolved Multiple-Viscoelasticity Control for a Humanoid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 44-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2017.2728864	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 Ko Yamamoto	4. 巻 81
2. 論文標題 Control Strategy Switching for Humanoid Robots Based on Maximal Output Admissible Set	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 17-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2016.03.010	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 山本江, 志鷹拓哉	4. 巻 34
2. 論文標題 ヒューマノイドのリミットサイクル型コントローラにおける最大出力許容集合と運動遷移制御	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 331-339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.34.331	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 Ko Yamamoto	4. 巻 31
2. 論文標題 Humanoid Motion Analysis and Control based on COG Viscoelasticity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 341-354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2016.1270853	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 山本江	4. 巻 35
2. 論文標題 ヒューマノイドの構造可変性を陽に考慮した粘弾性分配制御	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 160-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.35.160	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13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Shu Liming, Ko Yamamoto, Naohiko Sugita and Mamoru Mitsuishi
2. 発表標題 What kinematics and contact mechanics differences between standard and medial pivot prosthesis: an explicit finite element analysis based on gait cycle
3. 学会等名 the XXVI Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Liming, N. Sugita, J. Yao, K. Yamamoto, and M. Mitsuishi
2. 発表標題 Comparison of knee joint mechanics in concurrent finite element musculoskeletal model of the healthy and mobile bearing prosthesis knee
3. 学会等名 World Congress of Biomechanics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武藤優哉, 山本江
2. 発表標題 ヒューマノイドの重心ダイナミクスに基づく力学パラメータ同定
3. 学会等名 第23回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉瑶, 舒利明, 山本江, 杉田直彦, 光石衛
2. 発表標題 有限要素法を用いた人工膝関節脛骨インサート矢状面のパラメータの感度解析
3. 学会等名 第26回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shu Liming, Ko Yamamoto, Naohiko Sugita and Mamoru Mitsuishi
2. 発表標題 What kinematics and contact mechanics differences between standard and medial pivot prosthesis: an explicit finite element analysis based on gait cycle (accepted)
3. 学会等名 XXVI Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ko Yamamoto
2. 発表標題 Robust Walking by Resolved Viscoelasticity Control Explicitly Considering Structure-Variability of Humanoids (accepted)
3. 学会等名 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Liming Shu, Naohiko Sugita, Prabhav Saraswat, Jiang Yao, Reina Yoshizaki, Ko Yamamoto, Mamoru Mitsuishi
2. 発表標題 A concurrent patient-specific musculoskeletal and finite element modeling framework for predicting in vivo kinematics and contact mechanics of total knee
3. 学会等名 Science in the Age of Experience (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ko Yamamoto
2. 発表標題 Resolved COG Viscoelasticity Control of a Humanoid
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山本江
2. 発表標題 筋骨格モデルと有限要素モデルのHybridモデル構築による解析シミュレータの開発
3. 学会等名 第11回日本CAOS (Computer Aided Orthopaedic Surgery)研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉崎れいな, 舒利明, 山本江, 杉田直彦, 光石衛
2. 発表標題 カスタム人工膝関節全置換術のための筋骨格モデルに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉崎れいな, 舒利明, 山本江, 杉田直彦, 光石衛
2. 発表標題 カスタム人工膝関節設計のための筋骨格解析モデルに関する研究
3. 学会等名 関東学生会第56回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Liming Shu, Ko Yamamoto, Reina Yoshizaki, Naohiko Sugita, Mamoru Mitsuishi
2. 発表標題 Individualized Musculoskeletal Finite Element Model Construction for Predicting in Vivo Kinetics of Total Knee Replacement
3. 学会等名 第25回日本コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山本江
2. 発表標題 ヒューマノイドの構造可変性を陽に考慮した重心粘弾性分解制御
3. 学会等名 第34回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学 山本江 http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/member/yamamoto/index-j.html

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

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