様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月　 ３ 日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2021
課題番号：２０Ｋ２０１６２

研究課題名（和文）Development of multiscale forward finite element musculoskeletal model for rehabilitation and artificial prosthesis design

研究課題名（英文）Development of multiscale forward finite element musculoskeletal model for rehabilitation and artificial prosthesis design

研究代表者

舒　利明（SHU, LIMING）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任講師

研究者番号：３０８３８２０６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究より、患者個別マルチスケール全身有限要素筋骨格（FE-MS）モデルを開発されました。運動中の筋・靭帯の張力が計算できると同時に、関節の軟部組織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、床反力を予測するアルゴリズムを開発され、FE-MSモデルと統合されました。 従来手法より、高精度と高効率性が見出されました。

研究成果の学術的意義や社会的意義
This research provides a deterministic way to insight into the relationship between physical behavior and tissue state, which significantly provided a fundamental understanding of human biomechanics and help treat musculoskeletal disease.

研究成果の概要（英文）：The whole body multi-scale finite element musculoskeletal (FE-MS) model of humans has been developed with the function of subject-specific.(1) An algorithm for the prediction of ground reaction force was developed and integrated with the FE-MS model. A super accuracy has been found in comparison with conventional approaches.(2) It has been applied to the clinical field and used to understand the effect of lower limb alignment on multi-scale dynamics from knee and body levels.(3) A wearable motion capture system has been developed for synchronously acquiring the kinematics and EMG of humans.

研究分野：生体医工学関連

キーワード：筋骨格モデル　有限要素　膝関節

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

Musculoskeletal diseases, such as osteoarthritis and tendinopathy, impose a substantial burden on individuals and health care systems. It was reported there are around 25.3 million patients suffering from knee osteoarthritis in Japan. As a community of scientists and clinicians, we have been largely ineffective in managing MS diseases, as current prevalence, incidence, and socioeconomic burden are at alarming levels and projected to increase sharply in the coming decades. We have a limited understanding of how physical behavior, i.e., whole-body mechanics, influences tissue state, and this could intensify our failure to cure these prevalent and harmful diseases.

The failure to effectively treat MS disease is frustrating for scientists and clinicians. A wealth of epidemiologic data detailing risk factors for many MS diseases has been realized, e.g., increased age, female sex, body mass, prior joint trauma, and joint structural deformity. Studies also explored the effects of loading on structure and biology at the tissue and sub-tissue levels. Integrating experimental results with the whole body-, tissue-, and cell-level computational models, and using these models to modulate physical behaviors influencing MS tissue health could be expected as an efficient approach in the treatment of MS disease.

２．研究の目的

The purpose of this research is to develop a multiscale musculoskeletal digital twin to deterministically predict the individualized biofeedback and use it to link the physical behavior and tissue mechanobiology, which could be widely used in the design of rehabilitation and artificial prosthesis. This proposal provided a deterministic way to insight into the relationship between physical behavior and tissue state, which will significantly provide a fundamental understanding for human biomechanics and help treat MS disease.

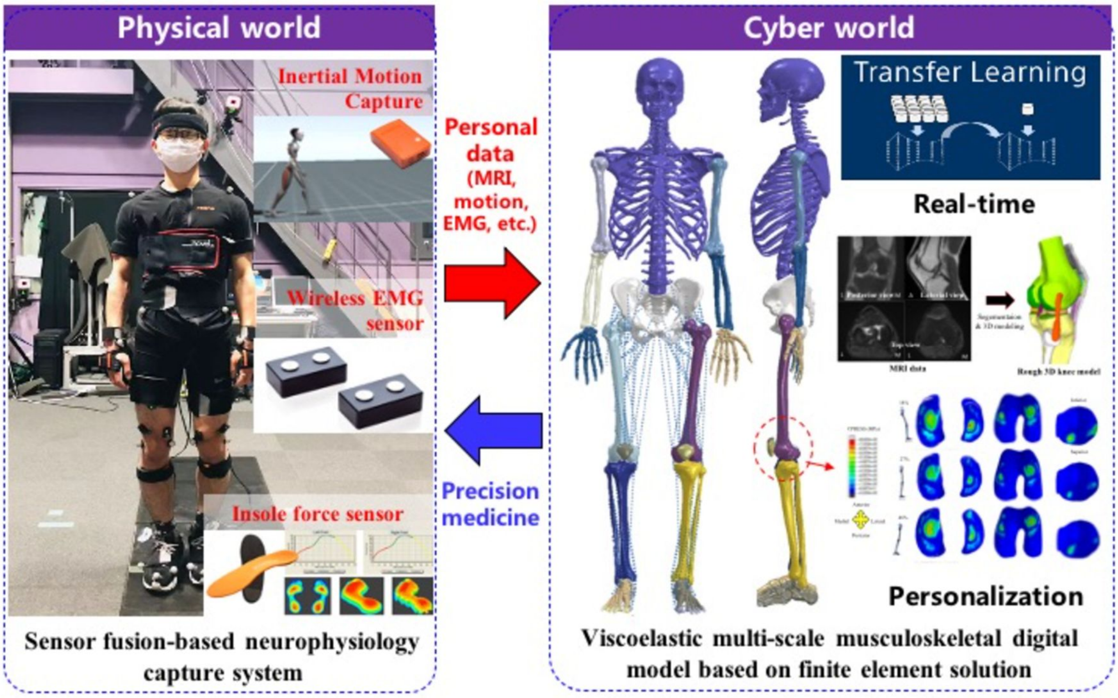
３．研究の方法

In this study, a musculoskeletal digital twin by incorporating the wearable motion capture system and the physics-based finite-element musculoskeletal human model for provide the deterministic platform in multiscale orthopedic biomechanics, as shown in Fig.1. The wearable motion capture system included the inertia motion capture system (Xsens Awinda, Xsens Co. Ltd., Netherlands) and insole force sensor (Pedar system, Novel Co. Ltd., Germany), which used to acquire the kinematics, axial ground reaction force, and foot-ground contact trajectory. It is known the foot-ground contact moments, lateral-medial contact force, and anterior-posterior contact force are essential inputs in the musculoskeletal model, which cannot be measured by the insole force sensor. In this study, an optimization-based model was developed with the constraint of the measured foot-ground contact trajectory and axial ground reaction force. Additionally, a whole-body finite element-based musculoskeletal model was developed in finite element environment (Abaqus, Dassault system) with python-based program based on our previous studies.

４．研究成果

The predicted ground reaction forces and moments presented good agreement ($r2>0.95$) with experimental results during gait cycle with different speed. Additionally, the muscle activation, knee joint kinematics and contact forces (RMSE: 0.28 body weight, r2: 0.90) were also compared with the data from CAMS knee dataset. The contact mechanics and stress were also simultaneously predicted during the simulation. This study has presented an integral workflow for multiscale orthopedic biomechanics from construction of wearable motion capture system and subject-specific musculoskeletal digital model, which can be widely used in the orthopedic field.

The integrated computational framework was used to analyze the knee loading during the normal, varus, and valgus gaits. The framework can work with only motion inputs. The ground reaction forces and moments were successfully predicted and then used as input for further dynamics analysis. The prediction accuracy of the muscle-tendon force optimization results was acceptable. Consequently, the knee joint loading prediction accuracy is guaranteed on some level. It is found that the varus and valgus gait will surely introduce higher knee joint load and muscle load. The metabolic energy efficiency may also be influenced because of the restricted knee motion ability.


Physical world
Inertial Motion Capture
Wireless EMG sensor
Insole force sensor
Sensor fusion-based neurophysiology capture system
Personal data (MRI, motion, EMG, etc.)
Precision medicine
Cyber world
Transfer Learning
Real-time
MRI data
Rough 3D knee model
Personalization
Viscoelastic multi-scale musculoskeletal digital model based on finite element solution

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計7件（うち査読付論文　7件／うち国際共著　5件／うちオープンアクセス　6件）

1．著者名 Shu Liming、Hashimoto Sho、Sugita Naohiko	4．巻 49
2．論文標題 Enhanced In-Silico Polyethylene Wear Simulation of Total Knee Replacements During Daily Activities	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Annals of Biomedical Engineering	6．最初と最後の頁 322～333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10439-020-02555-4	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 Shu Liming、Li Shihao、Sugita Naohiko	4．巻 6
2．論文標題 Systematic review of computational modelling for biomechanics analysis of total knee replacement	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Biosurface and Biotribology	6．最初と最後の頁 3～11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/bsbt.2019.0012	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 Hua Xijin、Shu Liming、Li Junyan	4．巻 5
2．論文標題 Multiscale modelling for investigating the long-term time-dependent biphasic behaviour of the articular cartilage in the natural hip joint	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Biomechanics and Modeling in Mechanobiology	6．最初と最後の頁 10-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10237-022-01581-6	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 Cui Yangyang、Xiang Dingding、Shu Liming、Duan Zhili、Liao Zhenhua、Wang Song、Liu Weiqiang	4．巻 15
2．論文標題 Incremental Element Deletion-Based Finite Element Analysis of the Effects of Impact Speeds, Fall Postures, and Cortical Thicknesses on Femur Fracture	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Materials	6．最初と最後の頁 2878～2878
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma15082878	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 Shu Liming、Yamamoto Ko、Yoshizaki Reina、Yao Jiang、Sato Takashi、Sugita Naohiko	4．巻 141
2．論文標題 Multiscale finite element musculoskeletal model for intact knee dynamics	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Computers in Biology and Medicine	6．最初と最後の頁 105023～105023
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compbiomed.2021.105023	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 Shu Liming、Sato Takashi、Hua Xijin、Sugita Naohiko	4．巻 49
2．論文標題 Comparison of Kinematics and Contact Mechanics in Normal Knee and Total Knee Replacements: A Computational Investigation	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Annals of Biomedical Engineering	6．最初と最後の頁 2491～2502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10439-021-02812-0	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 Shu Liming、Yao Jiang、Yamamoto Ko、Sato Takashi、Sugita Naohiko	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 104311～104311
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compbiomed.2021.104311	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

〔学会発表〕　計5件（うち招待講演　0件／うち国際学会　4件）

1．発表者名 L.Shu, J. Yao, and N. Sugita
2．発表標題 How does normal knee works in the gait cycle: A finite element musculoskeletal investigation
3．学会等名 Global 3DExperience Modeling & Simulation Virtual Conference（国際学会）
4．発表年 2020年

１．発表者名
Li S., Shu, L., and Sugita, N

２．発表標題
A Subject-Specific Finite-Element Musculoskeletal Model for Analysis of Lower Limb Biomechanics

３．学会等名
The 42nd Annual Meeting of the American Society of Biomechanics（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
李　世豪，舒　利明，姚 江，　杉田　直彦

２．発表標題
下肢バイオメカニクスを解析するための有限要素ベース患者個別筋骨格モデル

３．学会等名
日本臨床バイオメカニクス学会

４．発表年
2020年

１．発表者名
Shu, L., Abe, N., and Sugita, N,

２．発表標題
Important of posterior tibial slope on joint dynamics of intact and ACL deficient knee: a multiscale musculoskeletal analysis

３．学会等名
11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Shu L., Yao J., N. and Sugita N.,

２．発表標題
How does normal knee work in the gait cycle: A finite element musculoskeletal investigation

３．学会等名
Global 3DExperience Modeling & Simulation Virtual Conference（国際学会）

４．発表年
2021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

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			
英国	University of Cambridge			
米国	Dassault Systemes Simulia Corp.			
中国	Tsinghua University			