

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01552

研究課題名(和文)変形性膝関節症に対する高精度膝関節解析と3次元筋骨格モデルによる研究

研究課題名(英文)High-Accuracy Analysis and Three-Dimensional Musculoskeletal model for Knee Osteoarthritis.

研究代表者

畠山 和利 (Hatakeyama, Kazutoshi)

秋田大学・医学部附属病院・理学療法士

研究者番号：50748291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、筋骨格モデルをAnyBodyで再構築すること、変形性膝関節症患者の歩行時膝関節動態を3D to 2D registration法を用いて評価し、3次元筋骨格モデルで生体内力を解析することである。再構築した新しい筋骨格モデルはスムーズな脊柱可動性を有しており、精度が高いモデルであると考えられた。また、トレッドミルを用いて変形性膝関節症患者歩行時の膝関節透視画像を撮像した。取得したデータから3D to 2D registration法を用いて、歩行時膝関節動態を詳細に解析することができた。更に取得したデータを3次元筋骨格モデルに適合させ、筋張力を算出することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関節の動きは大まかに捉えることができるが、皮膚の下の骨の動きを詳細に評価することは非常に難しかった。近年CTから作成した3次元の骨モデルと透視画像を一致させ関節内の骨の動きを詳しく立体的に評価できる3D to 2D registration法が報告され、動きを詳細に解析できるようになった。また、動作中の筋力は実測できず、工学的手法を用いて算出する方法がとられている。今回は、Registrationにて詳細な動きを解析した後、筋骨格モデルという計算方法を応用させ、歩行中の筋力を測定した。更なる病態把握や予防に寄与したい。

研究成果の概要(英文)：This study is a detailed evaluation using the 3D to 2D registration method and to calculate muscle strength using a 3D musculoskeletal model. The purpose of this study was (1) to reconstruct the musculoskeletal model using the AnyBody Modeling System, (2) to evaluate the movement of the knee joint during walking in patients with osteoarthritis using the 3D to 2D registration method, and (3) to analyze with a three-dimensional musculoskeletal model. The new 3D musculoskeletal model divides the thoracic spine and has smooth spinal mobility. Fluoroscopic images were taken during treadmill walking in patients with knee osteoarthritis. Using the 3D to 2D registration method, we were able to analyze the movement of the knee joint in detail from the fluoroscopic image. In addition, the muscle strength of the patients with knee osteoarthritis during walking was calculated using a three-dimensional musculoskeletal model.

研究分野：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：変形性膝関節症 3D to 2D registration 3次元筋骨格モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

変形性膝関節症の病態は軟骨変性を基盤とし、単純 X 線で変化を認める破綻が完成すると治療は困難となる。治療には多数のエビデンスが報告されており、最近では再生医療により早期段階での進行を予防できる可能性が出ている。変形性膝関節症の発症には年齢、性別、遺伝要因、体重、筋力、アライメント、外傷など複数の要因が関与し、筋力や体重に影響を与える運動療法も進行の予防に一助を与えると考えられる。

近年高精度の膝関節運動解析が可能となり、詳細な膝関節内運動動態が報告されている。しかしリハビリテーション領域は多様な介入方法が存在し、標準的な治療法は未だ確立されていない。これは 1) 動作時の筋力を実測できないこと、2) 一般的に普及している動作解析は精度が低いことが挙げられる。これまで我々の研究グループは、脊椎疾患や脳卒中、脊髄損傷など様々な分野に工学的手法を取り入れ、臨床研究を続けてきた。3次元全身筋骨格モデル(図1)[1][2]や動作シミュレーションモデルの構築もその1つである。通常、動作解析装置は動作を計測し、関節角度や速さを把握する。しかし生体各筋の活動量把握は不可能である。我々の作成した3次元全身筋骨格モデルは計測データを取り込み、様々な動作で発揮している筋活動を算出できる。また人それぞれ異なる関節可動域や腹腔内圧、動作加速度などを考慮し、より正確な値を算出している。本モデルの報告[1]は systematic review にも取り上げられ、詳細なモデルと高い評価を得た[3]。これに動作計測の正確さが追及できれば、より生体に近似した症例毎の筋活動を詳細に把握することができ、リハビリテーション領域の標準的治療法の確立に大きく寄与すると考える。

一方、近年高精度な関節運動の計測方法として 2D/3D registration 法が提唱された。これは、CT による 3次元骨モデルと透視画像上の骨輪郭を適合させることで、3次元での骨運動を正確に算出する計測方法である。実際に透視画像を使用するため、高い精度で計測できることが報告されている。そこで我々は、個人毎の生体内の現象を正確に把握するため、3次元全身筋骨格モデルと 2D/3D registration 法の融合を考えた。これにより動作時の生体内の現象を正確に算出可能と考える。

### 2. 研究の目的

変形性膝関節症患者の歩行時膝関節動態を 2D/3D registration 法を用いて評価し、3次元筋骨格モデルで解析することで、筋活動など生体内の現象を正確に算出することである。現在われわれが作成した 3次元全身筋骨格モデルは詳細な解析が可能な反面、解析時間が非常に長い欠点がある。筋骨格モデルを作成したプラットフォームを世界的に汎用されている AnyBody Modeling System をベースに作り替えることにより解析時間の短縮が望める。そこで本研究の目的は、筋骨格モデルを AnyBody Modeling System で再構築すること、変形性膝関節症患者の歩行時膝関節動態を 2D/3D registration 法を用いて評価し、3次元筋骨格モデルで解析することである。

### 3. 研究の方法

#### 3次元全身筋骨格モデルの再構築および精度検証

本モデルの作成は、健康な成人男性を対象に撮像された下肢 CT, MRI DICOM data を使用した。Materialise 社製 MIMICS を用いて CT DICOM data を読み込み、下肢の骨形状を 3次元抽出した。筋骨格モデルは、AnyBody Modeling System (AnyBody Technology, Denmark) を使用し 3次元抽出した骨格を基に作成し、胸椎を分割させた。MRI 断層画像より各筋を抽出し、筋の走行を再現した。筋の走行を忠実に再現するため、wrapping 法を適用した。さらに歩行時の股関節における関節間力実測データを利用し、構築した筋骨格モデルの精度検証を行った。

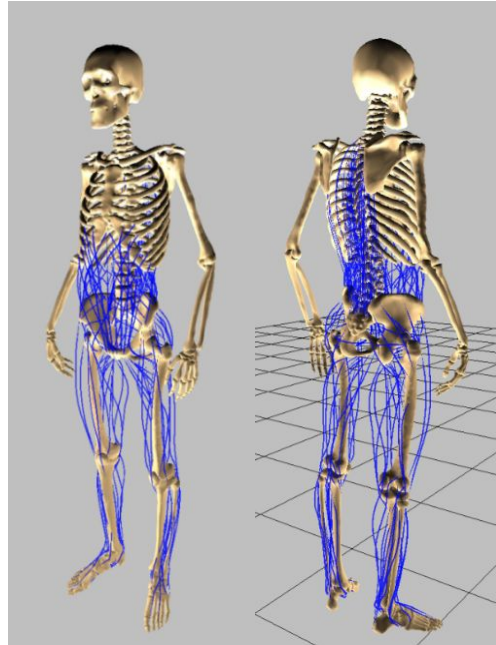


図1 3次元全身筋骨格モデル

動作データを取り込み、筋力や筋活動量を算出可能である。



図2 トレッドミル歩行

透視にてトレッドミル歩行中の膝関節骨運動を撮影した。

変形性膝関節における歩行時の 2D/3Dregistration による膝関節動態解析および 3 次元筋骨格モデルによる筋張力の解析

CT を利用した 3 次元骨モデルと側方透視を合成させた 2D/3Dregistration 法を用いて膝関節の詳細な関節動態を測定した (図 2). フラットパネル検出器と透視スクリーンの中にトレッドミルを設置し, 対側の膝関節が重ならないようにした. 事前に CT を撮影し, CT DICOM データを用いて大腿骨, 脛骨, 腓骨の骨皮質を Mimics(Materialise 社)により 3 次元骨モデルを作成した. 作成した 3 次元骨モデルに対し, 3D-Alinger を用いて局所座標系を埋設した. 大腿骨と脛骨の 3 次元位置と方向を Banks らの 3D to 2D registration 法により算出した. JointTrack を用いて透視画像に局所座標埋設を行った 3 次元骨モデルの輪郭を重ね合わせ, 位置を算出した. トレッドミル歩行上で透視撮影中の歩行状態を 3 次元動作解析装置 OptiTrack を用いて関節の座標位置を測定した. 測定した関節座標データと registration 法から導き出したデータを 3 次元筋骨格モデルに反映させ, 筋活動量を算出した.

#### 4. 研究成果

ベースとなるソフトウェアを AnyBody に移行し, 3 次元全身筋骨格モデルの再構築を行った (図 3). AnyBody Modeling System を使用した胸椎が分割された高い精度のモデルが完成した. 股関節間力実測値と歩行時の一データから算出した推定値の平均二乗誤差は  $0.208 \times BW$ , 相関係数は 0.950 であった. 非常に誤差を低減したモデルを作成することができた. 今回作成したモデルは過去に報告されている歩行時の人工関節置換術後の実測値と非常に近似しており, 精度が高いモデルであると考えられた.

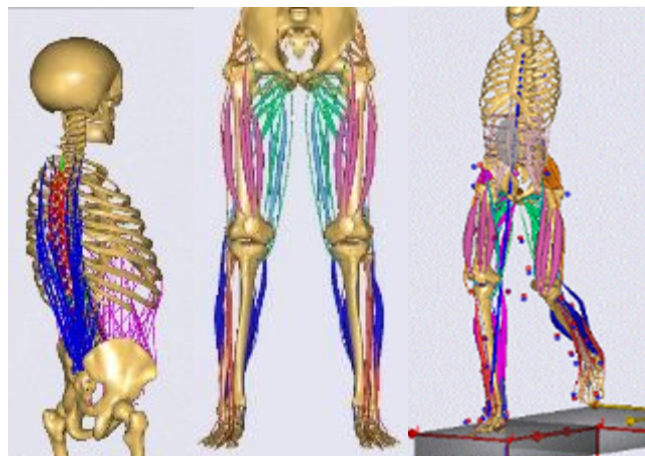


図 3 再構築した 3 次元全身筋骨格モデル

AnyBody modeling system にて再構築した

対象は変形性膝関節症例 3 例 (Kellgren-Lawrence 分類), 健康成人 2 例であり, 3D to 2D registration

法にて解析を行った. Registration (図 4) の結果, 下腿回旋量に変化がみられた (図 5). 筋骨格モデルから算出した結果, 外側広筋の筋張力は健康者で  $4.64 \pm 0.3N/Kg$ ,  $4.08 \pm 0.5N$  と同程度であった. 筋活動量は 13.5%, 22.4% と差が認められた. 初期変形性膝関節症者の筋張力自体はさほど変化しておらず, 関節の不安定性を補うために筋活動量が増加しているものと考察した. 今後更なる検討を加え, 変形性膝関節症の進行予防の一助としたい.

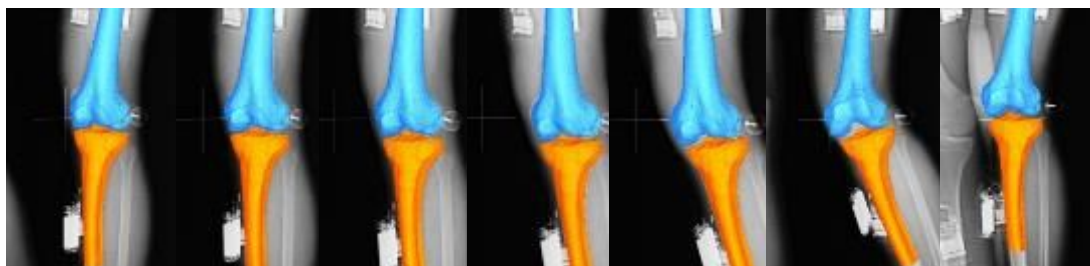


図 4 歩行中の膝関節関節動態

3D to 2D registration 法にてトレッドミル歩行中の詳細な膝関節骨運動を解析した.

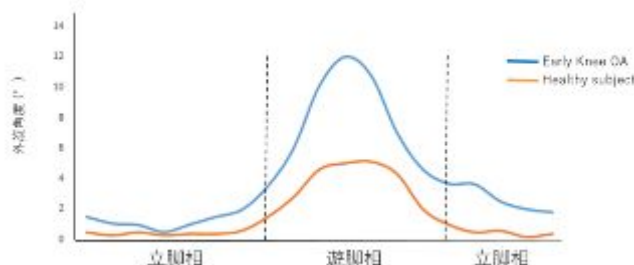


図 5 歩行時の骨運動

## 文献

- [1] Hatakeyama K., Shimada Y., Miyakoshi N., Matsunaga T., Iwami T., Ohtaka K., Sato M., Chida S., Watanabe M. Construction and Validation of a Novel Three-Dimensional Trunk Musculoskeletal Model. *Akita J. Med.*, 37(3-4), 2011, 135-142.
- [2] T.Yoshikawa, Y.Shimada, N.Miyakoshi, T.Matsunaga, K.Hatakeyama, T.Iwami, Motion Analysis of Anterior Inclination of the Trunk while Standing Using a New Three-dimensional Musculoskeletal Model Combining the Trunk and Lower Limbs, *Jpn. J. Compr. Rehabil. Sci*, Vol.4,No.12, 2013, 17-21.
- [3] Jaejin Hwang, Gregory G. Knapik, Jonathan S. Dufour & William S. Marras, Curved muscles in biomechanical models of the spine: a systematic literature review. *Ergonomics*, 2016, DOI: 10.1080/00140139.2016.1190410
- [4] Banks, S. A. et al.; Accurate measurement of three-dimensional knee replacement kinematics using single-plane fluoroscopy. *IEEE Trans Biomed Eng.* 43: 1996, 638-49.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryo Higuchi, Akira Komatsu, Jumpei Iida, Takehiro Iwami and Yoichi Shimada	4. 巻 14
2. 論文標題 Construction and validation under dynamic conditions of a novel thoracolumbar spine model with defined muscle paths using the wrapping method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 18-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1299/jbse.18-00432	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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hatakeyama, K., Tsukamoto, H., Suzuki, K., Chida, S., Watanabe, M., Takahashi, Y., Kagami K., Suda, T., Okura, K., Kikuchi, H., Saito, K., Matsunaga, T., Iwami, T., and Shimada, Y.
2. 発表標題 Knee kinematics of gait for patients with knee osteoarthritis using the 2D/3D registration method.
3. 学会等名 RehabWeek 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hatakeyama, K., Kijima, H., Iwami, T., Komatsu, A., Saito, K., Watanabe, M., Takahashi, Y., Okura, K., Suda, T., Kikuchi, H., Higuchi, R., Suzuki, K., Igarashi, Y., Matsunaga, T., Shimada, Y.
2. 発表標題 Effects of Muscle Resistive Training on Acetabular Dysplasia by Finite Element Analysis.
3. 学会等名 The 13th International Society of Physical and Rehabilitation Medicine（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, K., Komatsu, A., Hatakeyama, K., Iida, J., Iwami, T., Shimada, Y.
2. 発表標題 Validation of the hip contact force for a novel lower extremity musculoskeletal model.
3. 学会等名 The 30th IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsurumiya, K., Hayasaka, W., Igarashi, Y., Komatsu, A., Tsukamoto, H., Suda, T., Iwami, T., Shimada, Y.
2. 発表標題 A Novel Quantification Method for Gait Assessment in Knee Osteoarthritis Patients.
3. 学会等名 The 30th IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠山和利, 鈴木恒太郎, 樋口諒, 渡邊基起, 高橋裕介, 大倉和貴, 須田智寛, 菊池耀, 市川兼之, 巖見武裕, 斉藤公男, 松永俊樹, 島田洋一
2. 発表標題 3次元筋骨格モデルの再構築
3. 学会等名 第37回東北理学療法学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木恒太郎, 畠山和利, 小松瞭, 飯田純平, 巖見武裕, 島田洋一
2. 発表標題 新たな三次元筋骨格モデルの開発と関節間力の検証
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木恒太郎, 樋口諒, 小松瞭, 畠山和利, 巖見武裕, 飯田純平, 島田洋一
2. 発表標題 三次元筋骨格モデルにおける下肢筋走行の再構築と精度検証.
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠山和利
2. 発表標題 下肢伸展拳上が脛骨前方引き出しに与える影響
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畠山和利
2. 発表標題 寛骨臼形成不全症では股関節回旋筋力増強が大腿骨頭求心力を改善させる
3. 学会等名 第55回日本リハビリテーション医学会学術集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畠山和利
2. 発表標題 寛骨臼形成不全症における股関節周囲筋筋力が臼蓋応力に与える影響
3. 学会等名 第6回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018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	巖見 武裕  (Iwami Takehiro)  (10259806)	秋田大学・理工学研究科・教授   (11401)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	島田 洋一  (Shimada Yoichi)  (90162685)	秋田大学・医学系研究科・教授       (11401)	