

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420009

研究課題名(和文) 膝関節のキネマティクスと接触メカニクスの統合評価システム

研究課題名(英文) Integrated system for evaluation of kinematics and contact mechanics of knee joint

研究代表者

小林 公一 (Kobayashi, Koichi)

新潟大学・医歯学系・准教授

研究者番号：70296317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：膝関節キネマティクスと接触メカニクスを評価するため、被曝がなく、MRIデータに対するセグメンテーションが不要な手法として、MRIから得られたボリュームデータをレンダリングしてX線画像とイメージマッチングし、骨の空間位置を測定する方法を確立した。また、単純X線撮影に比べ簡便、高速、低被曝かつ低ひずみで長尺撮像が可能であるという特長を有するスロットラジオグラフィ用いた立位下肢アライメント評価法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the kinematics and contact behavior at the knee joint, a novel 2D to 3D image matching technique utilizing MRI volume rendering of the knee was established. This technique can eliminate both the laborious task of contour extraction from bone in MR images and the radiation dose issue. Also, an assessment system for 3D weight-bearing alignment of the lower extremities using a slot radiography system was developed. This system produces high-speed full length X-ray imaging of the lower extremities while reducing patient exposure and small image distortion compared with conventional x-ray systems.

研究分野：工学

キーワード：生体力学 生体工学 医用画像 生体関節 キネマティクス MRI ラジオグラフィ

1. 研究開始当初の背景

年齢とともに骨や筋肉が弱ったときや、スポーツ動作などにより過大な負荷がかかったとき、関節に障害を生じ日常生活に支障を来すことがある。このような関節障害の発生要因を解明し、より効果的な予防法および治療法を開発するためには、関節の3次元配列(アライメント)の変化と荷重伝達機構の詳細な理解が必要不可欠である。

関節の動的および静的なアライメント変化を生体内で直接的に解析・評価する方法として、2次元のX線画像にCTスキャンもしくはMRIスキャンデータから構築した3次元骨・軟骨形状モデルをイメージマッチングすることで関節の空間位置を再現する手法が提示されてきた。これらの手法は高精度であるが、CTに関しては骨組織の描出能に優れるものの放射線による被曝の問題がある。MRIについては、被曝は無いものの骨組織単独の描出が不可能なので、骨形状モデルを再構築するためには周囲の軟部組織との境界を手動でセグメンテーションする必要があり、これに多大な労力を要している。また、モデルの形状精度もCTから再構築した場合に比べ低いという問題がある。

また、近年従来法である単純X線撮影に比べ簡便、高速、低被曝かつ低ひずみで長尺撮像が可能であるという特長を有するスロットラジオグラフィ(以下SRと表記)が普及しており、これを用いたアライメント評価法を確立することでより臨床的有用性が向上することが可能となる。

2. 研究の目的

本課題では、以下に述べる目的について研究を実施した。

(1) 被曝がなく、MRIデータに対するセグメンテーションが不要な手法として、MRIから得られた関節のボリュームデータをそのままレンダリングしてX線画像とイメージマッチングし、骨の空間位置を測定する方法を確立する。

(2) スロットラジオグラフィを用いた立位下肢アライメント評価法を開発する。

(3) キネマティクス(骨の空間位置データ)から軟骨領域同士の重複量を求め、これを変位境界条件として有限要素解析をシームレスに行い接触圧力を算出する手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) MRIボリュームデータのレンダリングによるイメージマッチング法

膝関節疾患既往歴のないヒト切断肢の膝関節3体を用いた。MRIボリュームデータを得るためMRI装置を用いて3D Gradient Echo法により撮像した。ボリュームデータに対して、前後方向をx軸、上下方向をy軸、左右方向をz軸に設定した(図1)。つづいて、CT装置を用いて撮像スライスデータから

モデリングソフトウェアを用いて大腿骨と脛骨の表面骨形状モデルを構築した。

MRIボリュームデータのレンダリングはX線焦点(視点)と画像平面を構成する各ピクセルを結ぶ直線(視線またはレイ)がボリュームデータを通る際、視線上のボクセル値に対して次の計算を行うことで行った(図2)。

$$I_{(x,y)} = \frac{\sum_i (1-\alpha)v_i}{L}$$

ここで、 $I_{(x,y)}$ は画像平面の座標(x,y)におけるピクセル値、 $\alpha$ は透過度、 $v_i$ はボクセル値、 $L$ は視線によるボリュームデータの通過距離である。カメラ校正により予め撮像空間を規定した上で、フレームに固定した切断膝を2方向X線撮影し、式(1)で求めたレンダリング像と重ね合わせることで大腿骨と脛骨それぞれの3次元位置を求め、脛骨に対する大腿骨の相対位置を算出した。相対位置の真値を得るため、同じ2方向X線画像に大腿骨と脛骨のCT表面骨形状モデルをイメージマッチングして3次元位置を決定し、脛骨に対する大腿骨の相対位置を求めた。

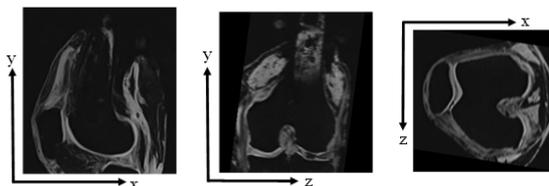


図1 Local coordinate system for MRI volume data.

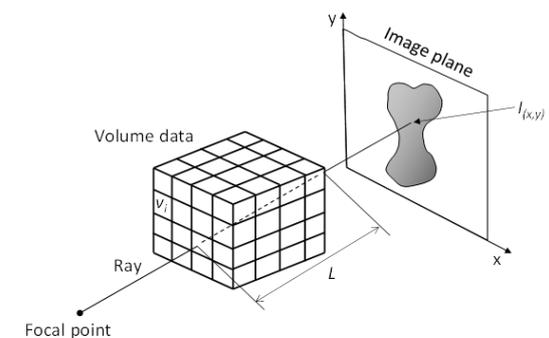


図2 Perspective view model for volume rendering.

(2) SRを用いた立位下肢アライメント評価法

固定焦点からX線が照射される従来法と異なり、SRではX線照射野をスリット状に絞り、X線源と受光部であるFlat Panel Detectorを同時並行移動させながら大視野画像を作成する。これにより、X線源の移動方向(上下方向)では平行、左右方向では扇形のX線が照射される。この装置で2方向撮影を行うため、本研究では左右に60°回転する回転台を用いて正面と右斜角位置または正面と左斜角位置をそれぞれ設定した(図3)。3次元空間においてX線焦点と画像平面の位置

を規定するため、鋼球マーカ 72 個を配したアクリル製の校正フレームを正面、右斜角および左斜角位置で撮像した。そして、同じ高さにあるマーカと投影点を結ぶ直線が一点に収束する点を焦点とした。続いて、決定した焦点から正面、右斜角および左斜角位置にある校正フレームの各マーカの投影点を計算し、それぞれの実投影点との誤差が最小となる位置を校正フレームの 3 次元位置と規定した。この結果を基に回転台を固定し、仮想的に 2 方向から撮影する撮像モデルを構築した (図 4)。

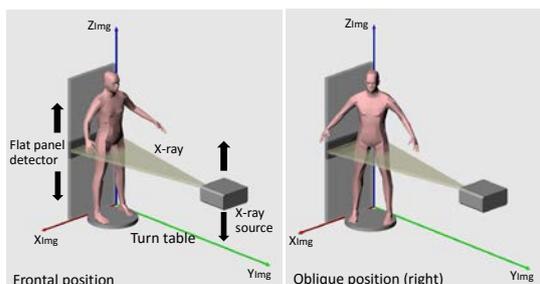


図 3 Biplanar slot radiography using turn table.

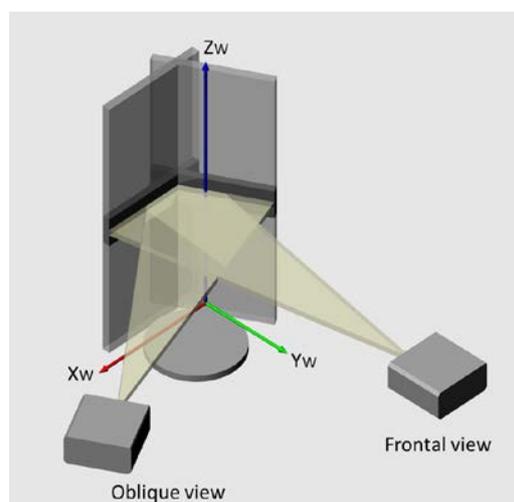


図 4 Virtual biplanar radiography model.

この手法の誤差を検証するため、モデル大腿骨とモデル脛骨を用いて、伸展位、回旋位および内反位を設定し、2 方向撮影を行った。自作プログラムにより 2 方向の SR 画像と、CT データから再構築した 3 次元骨形状モデルを配置し、3 次元骨形状モデルの投影像を 2 方向 SR 画像に手で重ね合わせることでワールド座標系における 3 次元骨形状モデルの位置を決定した。そして、脛骨に対する大腿骨の相対位置を算出し、3 次元測定機から求めた相対位置と比較した。さらに、人工膝関節の大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントを用いた実験を行った。大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントをポリウレタン製支持具により固定し、正面と右射角および正面と左射角でそれぞれ 2 方向 SR 撮影した。次に人工関節マーカの指示手順に従い、大腿骨コンポーネントをモデル大腿骨

に、脛骨コンポーネントをモデル脛骨に設置し、同様に正面と右射角および正面と左射角で 2 方向 SR 撮影した。そして、前述のように自作プログラムにより 2 方向の SR 画像と、それぞれの 3 次元形状モデルを重ね合わせることでワールド座標系における骨形状モデルおよび人工関節コンポーネントの位置を決定した。そして、脛骨コンポーネントに対する大腿骨コンポーネントの相対位置、大腿骨に対する大腿骨コンポーネントの相対位置および脛骨に対する脛骨コンポーネントの相対位置をそれぞれ決定した。

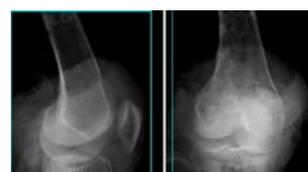
### (3) キネマティクスデータを用いたシームレス有限要素解析

キネマティクスデータからシームレスに有限要素解析を実施するため、並列演算が可能な画像処理ユニット (Graphic Processing Unit : 以下 GPU と表記) を援用した。まず初期段階として、GPU を用いて MRI ボリュームデータをレンダリングし、キネマティクスデータの取得に必要な X 線画像とのイメージマッチングが可能か検討した。

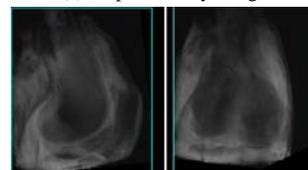
## 4. 研究成果

(1) MRI ボリュームデータのレンダリングによるイメージマッチング法の精度検証

図 5 に大腿骨の 2 方向 X 線画像 (同図 (a)) と MRI ボリュームデータのレンダリング像 (同図 (b)) ならびに両者を重ね合わせた一例を示す (同図 (c))。X 線画像とレンダリング像における骨形状輪郭は良好に対応しており、重ね合わせが可能であることが分かる。図 6 は脛骨に対する大腿骨の相対位置の推定誤差である。回転パラメータの最大誤差は y 軸回りで  $-1.7 \pm 6.6^\circ$ 、並進パラメータの最大誤差は x 軸方向において  $-2.1 \pm 9.4 \text{ mm}$  であった。



(a) Bi-plane x-ray image



(b) Rendering of volume data



(c) Overlap of x-ray and rendering images

図 5 Image matching of bi-plane x-ray image and rendering of MRI volume data.

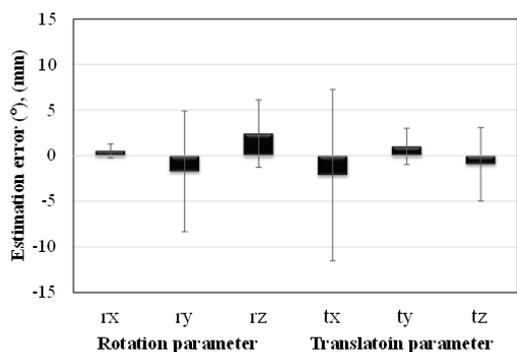


図6 Estimation errors in 6DOF parameters of relative position between femur and tibia (n=3).

(2) SR を用いた立位下肢アライメント評価法の精度検証

図7に伸展位において2方向SR画像と3次元骨形状モデルを重ね合わせた一例を示す。正面像と斜角像ともに3次元骨形状モデルとSR画像は良好に一致した。表1に各姿勢における正面像と右斜角像または正面像と左斜角像を用いて6自由度パラメータを推定した結果の平均誤差と標準偏差を示す(内外側方向:M-L, 前後方向:A-P, 遠近位方向:P-D)。伸展位での平均誤差と標準偏差の最大値は並進で-0.5 mm, 1.1 mm, 回転で-0.9°, 0.7°であった。回旋位での平均誤差と標準偏差の最大値は並進で0.4 mm, 0.8 mm, 回転で0.5°, 0.7°であった。内反位での平均誤差と標準偏差の最大値は並進で0.6 mm, 0.7 mm, 回転で-0.4°, 0.6°であった。

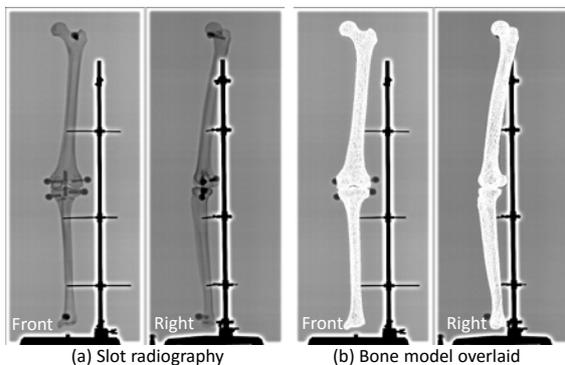


図7 Result of image matching for femur and tibia.

表1 Mean ± SD for errors in relative position.

(a) Extension				
	Translation, mm		Rotation, °	
	Front/Left	Front/Right	Front/Left	Front/Right
M-L	-0.5±0.5	-0.2±0.8	0.2±0.7	0.3±0.6
A-P	0.3±1.1	0.1±0.4	0.7±0.4	-0.6±0.3
P-D	-0.4±0.9	-0.2±0.6	-0.9±0.7	-0.2±0.6

(b) Axial rotation				
	Translation, mm		Rotation, °	
	Front/Left	Front/Right	Front/Left	Front/Right
M-L	-0.3±0.6	0.1±0.4	-0.2±0.3	0.5±0.6
A-P	0.0±0.8	0.1±0.7	-0.1±0.6	-0.3±0.2
P-D	0.3±0.7	0.4±0.7	0.2±0.5	0.1±0.7

(c) Varus deformity

	Translation, mm		Rotation, °	
	Front/Left	Front/Right	Front/Left	Front/Right
M-L	0.0±0.2	0.2±0.5	-0.4±0.3	-0.2±0.4
A-P	0.3±0.7	0.0±0.5	0.2±0.4	-0.1±0.3
P-D	0.1±0.5	0.6±0.2	0.1±0.6	-0.2±0.3

(3) SR を用いた人工膝関節アライメントと設置位置評価法の精度検証

図8(a), (b), (c)に2方向SR画像に大腿骨コンポーネントおよび脛骨コンポーネント, 大腿骨と大腿骨コンポーネントおよび脛骨と脛骨コンポーネントを重ね合わせた結果を示す。いずれの場合においても3次元形状モデルとSR画像は良好に一致した。表2(a), (b), (c)にそれぞれの場合における6自由度パラメータの推定結果(平均誤差と標準偏差)を示す。ここで, 前節と同様にM-Lが内外側方向, A-Pが前後方向, P-Dが遠近位方向であることを示している。脛骨コンポーネントに対する大腿骨コンポーネントの相対位置の平均誤差と標準偏差の最大値は並進で-0.5 mm, 1.1 mm, 回転で-0.9°, 0.7°であった。大腿骨に対する大腿骨コンポーネントの相対位置の平均誤差と標準偏差の最大値は並進で-0.8 mm, 0.7 mm, 回転で-0.5°, 0.5°であった。脛骨に対する脛骨コンポーネントの平均誤差と標準偏差の最大値は並進で0.6 mm, 0.7 mm, 回転で0.7°, 0.4°であった。

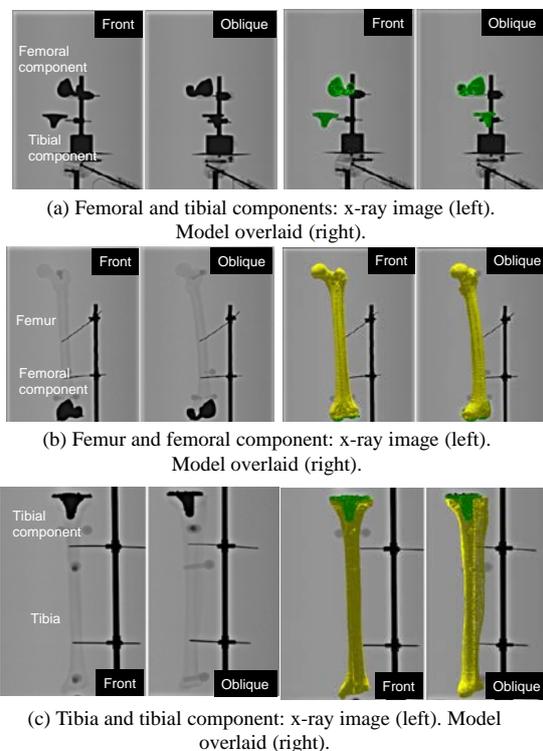


図8 Result of image matching for artificial knee joint.

表 2 Mean ± SD for errors in relative position.

(a) Femoral and tibial components

	Translation, mm		Rotation, °	
	Front/Left	Front/Right	Front/Left	Front/Right
M-L	-0.2±0.5	0.3±0.8	0.0±0.6	0.4±0.5
A-P	0.8±0.5	-0.5±0.9	0.9±0.4	0.3±0.5
P-D	0.9±0.3	-0.6±0.8	0.3±0.5	0.3±0.2

(b) Femur and femoral component

	Translation, mm		Rotation, °	
	Front/Left	Front/Right	Front/Left	Front/Right
M-L	-0.3±0.2	0.6±0.4	0.3±0.3	-0.2±0.4
A-P	-0.5±0.3	0.1±0.7	-0.5±0.5	0.0±0.2
P-D	-0.6±0.3	-0.8±0.5	0.2±0.5	0.2±0.5

(c) Tibia and tibial component

	Translation, mm		Rotation, °	
	Front/Left	Front/Right	Front/Left	Front/Right
M-L	0.8±0.7	0.2±0.6	0.6±0.3	0.3±0.4
A-P	0.6±0.5	0.6±0.7	0.6±0.4	0.7±0.4
P-D	0.2±0.4	0.6±0.3	0.6±0.4	0.6±0.4

(4) キネマティクスデータを用いたシームレス有限要素解析

図9にGPUを援用してMRIボリュームデータをレンダリングし、X線画像と重ねた結果を示す。これよりX線画像と十分比較可能なイメージマッチングにより骨の空間位置を規定できることが分かった。また、レンダリングに要する時間は1画像あたり1秒以下であり、(1)に示した手法(1画像あたり20秒程度)に比べ大幅に短縮された。また、1方向のX線画像のみならず、2方向画像の同時レンダリングも実現した。有限要素解析については、関節軟骨を線形弾性体とした静的解析を想定した場合について検討を行っている。

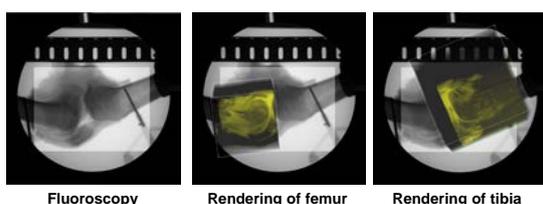


図9 Comparison of fluoroscopic and rendered images.

(5) 結果の総括および今後の展望

本研究課題で提示したMRIボリュームデータのレンダリングによるイメージマッチング法は、MR画像から表面骨形状モデルを構築する際に必要なスライスごとの骨輪郭のセグメンテーション作業が不要で被曝が無いという特長を有するため臨床的インパクトが大きい。また、今後普及が予想されるスロットラジオグラフィを用いた3次元立位下肢アライメント評価法についても有用性が高い。今後、キネマティクスデータとのシームレス有限要素解析により関節軟骨接

触応力を解析することで、下肢関節の生体力学モデル構築へ展開が期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

①高橋匠, 岡庭大祐, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 佐藤卓, 大森豪, 古賀良生, 2方向スロットラジオグラフィによる立位3次元下肢アライメント評価法. 臨床バイオメカニクス, 査読有, 37巻, 2016 (掲載決定).

②Nishio K, Omori G, Koga Y, Kobayashi K, Sakamoto M, Tanabe Y, Tanaka M, Arakawa M, Three-dimensional dynamic analysis of knee joint during gait in medial knee osteoarthritis using loading axis of knee. Gait & Posture, 査読有, Vol.42, No.2, 127-132, 2015.

DOI: 10.1016/j.gaitpost.2015.04.018.

③Mochizuki T, Sato T, Blaha JD, Tanifuji O, Kobayashi K, Yamagiwa H, Watanabe S, Koga Y, Omori G, Endo N, The clinical epicondylar axis is not the functional flexion axis of the human knee. Journal of Orthopaedic Science, 査読有, Vol.19, No.3, 451-456, 2014.

DOI: 10.1007/s00776-014-0536-0.

④Mochizuki T, Sato T, Tanifuji O, Kobayashi K, Yamagiwa H, Watanabe S, Koga Y, Omori G, Endo N, Unicompartmental knee arthroplasty cannot restore the functional flexion axis of a living knee to normal. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 査読有, Vol.23, No.12, 3736-3742, 2015.

DOI:10.1007/s00167-014-3296-7, 2015.

⑤Kobayashi K, Shin K, Sakamoto M, Tanabe Y, Tokunaga K, Minato I, Sato T, Koga Y Image registration method for assessing 3D hip alignment and implant position during standing posture. Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有, Vol.9, No.2, Paper No.13-00162, 2014.

DOI: 10.1299/jbse.13-00162.

⑥Shin K, Sato T, Koga Y, Omori G, Kobayashi K, Sakamoto M, Tanabe Y, Automatic construction of an anatomical coordinate system for three-dimensional bone models of the lower extremities - Pelvis, femur, and tibia. Journal of Biomechanics, 査読有, Vol.47, No.5, 1229-1233, 2014.

DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.12.013.

⑦小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 佐藤卓, 大森豪, 古賀良生, MRIボリュームデータのレンダリングによる膝関節の3次元位置推定法. 臨床バイオメカニクス, 査読有, 35巻, 131-135頁, 2014.

[学会発表] (計15件)

①岡庭大祐, 高橋匠, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 2方向スロットラジオグラフィによ

る立位3次元下肢アライメント評価法. 日本機械学会 北陸信越支部 第53期総会・講演会, 2016.3.5, 信州大学(長野県長野市).

② 小林公二, 高橋匠, 岡庭大祐, 坂本信, 田邊裕治, 2方向スロットラジオグラフィと3次元形状モデルによる下肢アライメント評価法. 日本機械学会第28回バイオエンジニアリング講演会, 2016.1.9, 東京工業大学(東京都目黒区).

③ 谷藤理, 望月友春, 佐藤卓, 小林公二, 村山敬之, 古賀寛, 渡邊聡, 大森豪, 古賀良生, 1方向X線透視画像を用いたイメージマッチング法(インプラントを有さない膝). 第42回日本臨床バイオメカニクス学会, 2015.11.14, ソラシティカンファレンスセンター(東京都千代田区).

④ 村山敬之, 佐藤卓, 谷藤理, 渡邊聡, 小林公二, 望月友春, 山際浩史, 古賀良生, 大森豪, 遠藤直人, 一方向透視画像を用いた3次元運動解析: 前十字靭帯損傷例の健側膝と健常膝の比較. 第42回日本臨床バイオメカニクス学会, 2015.11.14, ソラシティカンファレンスセンター(東京都千代田区).

⑤ 田中翔太, 林豊彦, 棚橋重仁, 渡邊聡, 佐藤卓, 小林公二, 古賀良生, 大森豪, 大腿骨遠位成長軟骨と3次元下肢荷重線との位置関係. 第42回日本臨床バイオメカニクス学会, 2015.11.14, ソラシティカンファレンスセンター(東京都千代田区).

⑥ 望月友春, 谷藤理, 古賀良生, 佐藤卓, 有海明央, 藤井俊英, 小林公二, 山際浩史, 大森豪, 遠藤直人, 変形性膝関節症に伴う3次元立位下肢アライメント変化・大腿骨内変形の特徴. 第42回日本臨床バイオメカニクス学会, 2015.11.14, ソラシティカンファレンスセンター(東京都千代田区).

⑦ 高柳雅欣, 古賀良生, 谷藤理, 田邊裕治, 坂本信, 小林公二, 森清友亮, 小郷原一貴, 下肢変形に及ぼす大腿骨負荷に影響についての力学的検討. 第42回日本臨床バイオメカニクス学会, 2015.11.14, ソラシティカンファレンスセンター(東京都千代田区).

⑧ Kobayashi K, Takahashi T, Okaniwa D, Sakamoto M, Tanabe Y, Biplanar Slot-Scan Digital Radiography for Evaluation of Three-Dimensional Lower Extremity Alignment with the Use of Bone Surface Models. ATEM'15, JSME-MMD, October 4-8, 2015, ロアジュールホテル豊橋(愛知県豊橋市).

⑨ Kobayashi K, Sakamoto M, Tanabe Y, Omori G, Koga Y: Validation of Image Registration Technique for In Vivo Evaluation of Tibiofemoral Articular Contact, 7th World Congress of Biomechanics, 2014.7.6-11, Boston, USA.

⑩ Sakamoto M, Kobayashi K: Estimation of Contact Stress on Joint Surface Using the Axisymmetric Mechanical Model, 7th World Congress of Biomechanics, 2014.7.6-11, Boston, USA.

⑪ 田中翔太, 志賀優太, 林豊彦, 渡邊聡, 佐藤卓, 小林公二, 古賀良生, 大森豪. MR画像を用いた大腿骨遠位成長軟骨の厚さ分布, 第41回日本臨床バイオメカニクス学会, 2014.11.22, 奈良県新公会堂(奈良県奈良市).

⑫ 小林公二, 坂本信, 田邊裕治, 一方向透視X線画像とMRIボリュームデータによる膝関節位置推定法. 第26回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2014.1.12, 東北大学(宮城県仙台市).

⑬ 坂本信, 小林公二, 関節モデルの弾性接触理論解析, 第26回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2014.1.12, 東北大学(宮城県仙台市).

⑭ 小林公二, 坂本信, 田邊裕治, 佐藤卓, 大森豪, 古賀良生, MRIボリュームデータのレンダリングによる膝関節キネマティクス測定, 第40回日本臨床バイオメカニクス学会, 2013.11.23, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市).

⑮ 坂本信, 小林公二, 解析モデルによる関節の接触応力解析. 第40回日本臨床バイオメカニクス学会, 2013.11.23, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 公一 (KOBAYASHI, Koichi)

新潟大学・医歯学系・准教授

研究者番号: 70296317

### (2) 研究分担者

坂本 信 (SAKAMOTO, Makoto)

新潟大学・医歯学系・教授

研究者番号: 80215657

田邊 裕治 (TANABE, Yuji)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 60143020

大森 豪 (OMORI, Go)

新潟医療福祉大学・健康科学部・教授

研究者番号: 70283009

### (3) 連携研究者

該当者なし