

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246025

研究課題名(和文) 三次元骨・関節モデル再構築システムによるプロアクティブバイオメカニクスの展開

研究課題名(英文) Three-dimensional Model Reconstruction of Bone and Joint and Its Application to Proactive Biomechanics

研究代表者

田邊 裕治 (Tanabe, Yuji)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60143020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,600,000円

研究成果の概要(和文)：人工膝関節インプラントの三次元的設置位置評価のための基準座標構築法の「標準」の確立を目指して、三次元下肢アライメント評価システムにおける座標系自動構築法を変形性関節症(Osteoarthritis :OA)によって強い変形を伴う膝(OA膝)に適用し、その有用性を検討した。本研究では構築された座標系の各軸(X, Y, Z軸)の方向が妥当なものであるかどうかという観点から、座標系自動構築法で得られる結果の再現性を調べた。そして、大腿骨では内外反方向と内外旋方向で、脛骨では内外旋方向で、従来法により決定された軸とのずれ(角度差10°以上)が大きいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional coordinate system in femur and tibia is usually constructed through manual operation, and therefore artificial errors, namely inter- and intra-observer errors could be expected. The method of fully automatic construction of the three-dimensional coordinate system was established in the previous study using the principal component analysis. The method demonstrated highly reliable and reproductive results when applied to healthy subjects. The objective of this study was to apply such method to the subjects suffered from knee osteoarthritis (OA) so as to clarify its feasibility and reliability. The results were summarized as significantly large differences between the automatic construction and the other methods in varus-valgus and internal-external rotation direction for femur and in internal-external rotation direction for tibia. The causes of such discrepancies were probably due to the presences of the osteophytes and the large joint surface deformation in knee OA.

研究分野：材料力学，生体力学

キーワード：バイオメカニクス 変形性関節症 三次元下肢アライメント評価システム 三次元骨・関節モデル 自動骨座標系再構築

1. 研究開始当初の背景

(1) 整形外科の臨床(診断や治療)では CT 画像や MR 画像から三次元的に再構築される骨・関節形状モデル(以下、骨モデル)の利用頻度が年々増加している。この骨モデルの活用例として大腿骨・脛骨間あるいはインプラント・大腿骨(または脛骨)間の相対位置評価があり、その評価は骨モデルに構築された座標系に基づいて行われる^{①②}。しかし、これまでに座標系の構築には統一された方法が無く、個々に定義された特徴点を用いて座標系を構築していることから、得られた結果の定量的な相互比較が出来ない状況にあった。また、従来の座標系決定は手動操作が多く、検者間誤差や検者内誤差などの人為的な誤差が介入し易いために再現性が低いことも問題となっていた。

(2) (1)の問題の解決法として我々の研究グループは脛骨・大腿骨骨形状コンピュータモデルの座標系自動構築法を以前に提案した^③。そこでは健常者の大腿骨・脛骨に対してこの手法を用いて作成した座標系の有用性を従来の座標構築法の一つである International Society of Biomechanics (以下 ISB)^④との比較から検討し、構築された座標系の再現性の高さを決定された各軸の方向の妥当性という観点から確認した。しかし、骨に変形を有する変形性膝関節症(Osteoarthritis :OA 以下、膝 OA)での有用性の検証は未着手であった。当該の手法が膝 OA に対しても有用であると確認することは、その高い再現性がもたらす臨床的意義、すなわち人工膝関節インプラントの三次元的設置位置評価のための基準座標構築法の標準の確立に繋がるものと考えられた。

2. 研究の目的

(1) 先行研究で提案した座標系自動構築法を OA 膝に対して適用すること。

(2) 構築された座標系の各軸(X, Y, Z 軸)の方向が妥当なものであるかどうかを検証すること。

3. 研究の方法

(1) 対象：人工膝関節置換術(Total Knee Arthroplasty :TKA)適用の進行期膝 OA 症例 25 名(62-82 歳, 平均 73.8 歳)右 25 膝とし、対象の CT 画像データから大腿骨および脛骨モデルを作成した。骨モデルの作成には三次元画像再構築ソフトウェア(ZedView; LEXI Co., Ltd)を用いた。

(2) 座標系の比較：(1)で作成した骨モデルに自動座標系構築プログラム^③(以下、本法)を使用し座標系を自動構築した(次の①を参照)。次に自動構築された座標系上に従来法(次の②を参照)の座標軸を構築することで本法により決定された各座標軸(X, Y, Z

軸)が適切なものであるかどうかを検討した。従来の座標系の構築には座標系構築ソフト(Model Viewer : LEXI Co., Ltd)を用い、整形外科医 1 名が参照点デジタイズを行った。

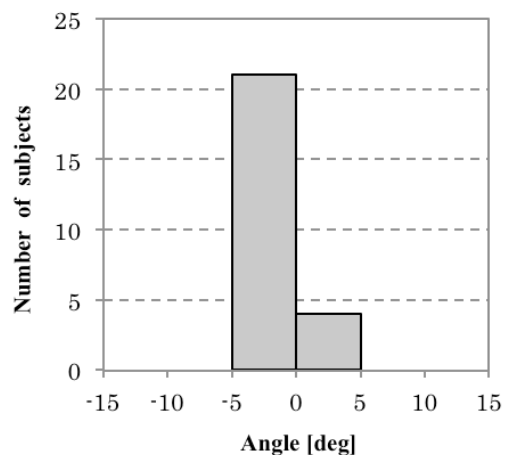
① 自動座標系構築法：先行研究で考案された自動座標構築法は骨モデルに対する座標系構築の全自動化を実現している。大腿骨では骨モデルに対し主成分分析を行い、探索用仮座標系を構築する。仮座標系から輪郭を抽出し、骨頭、内外側顆の球近似を行う。得られた 3 点の球中心より大腿骨座標系を構築する。脛骨では腓骨も含めた骨モデルに対し主成分分析を行い、長軸方向を第一主成分ベクトルとする探索用仮座標系を構築する。そして、第一主成分ベクトルに垂直な複数のスライス画像から脛骨の輪郭を抽出して図心を算出し、すべての図心に最も近い直線を最小自乗近似で求めこれを Z 軸とする。Z 軸に垂直なスライス画像のうち脛骨の面積が最大となっているものを抽出、脛骨の輪郭を楕円により近似して表し、脛骨座標系を構築する。

② 従来の座標構築法：従来の座標構築法として大腿骨では ISB^④を用いた。また、脛骨における ISB は足関節用の座標であり脛骨評価用の座標がないため脛骨では従来法として我々の座標構築法を用いた。

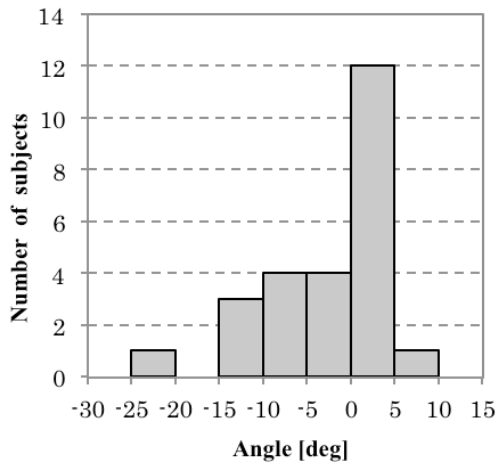
4. 研究成果

(1) 大腿骨の屈曲進展(X 軸周り)、内外反(Y 軸周り)、回旋(Z 軸周り)方向の角度のずれに関する比較結果を図 1(a)~(c)に示す。屈曲伸展方向では 10° 以上の差は認められなかった。しかし内外反方向では 10° 以上の差を認めたモデルが 5 例、全体の 20%であった。また内外旋方向では 10° 以上の差を認めたモデルが 4 例、全体の 16%であった。

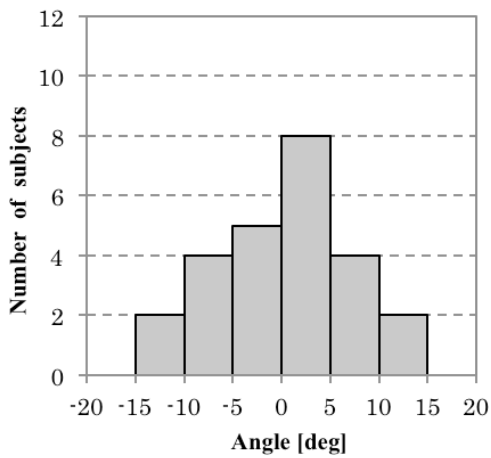
(2) 脛骨の比較結果を図 2(a)~(c)に示す。屈曲伸展方向、内外反方向では 10° 以上の差を認めなかった。回旋方向においては 10° 以



(a) Flexion-extension (+; Flexion)



(b) Valgus-varus (+; varurs)

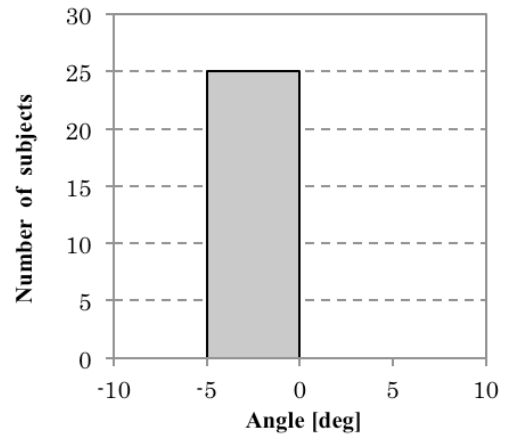


(c) Rotation (+; External)

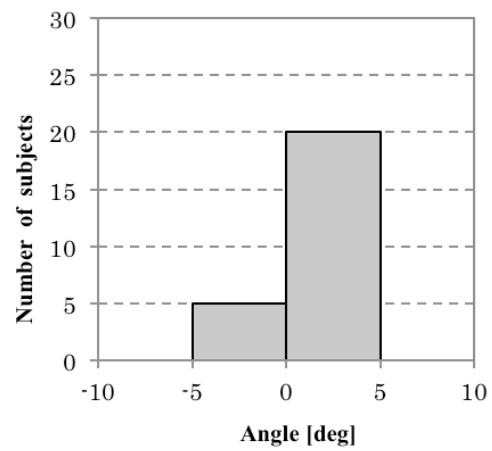
図 1 大腿骨に対する自動座標構築法と従来法 (ISB) による角度のずれ. (a) 屈曲-進展, (b) 内-外反, (c) 内-外旋

上の差を認めたモデルが 20 例, 全体の 80% であった. 大腿骨では屈曲進展, 脛骨では屈曲進展, 内外反方向で従来法との差が 10° 以内であったが, 大腿骨, 脛骨いずれにおいても回旋方向で従来法と 10° 以上の差を認めた.

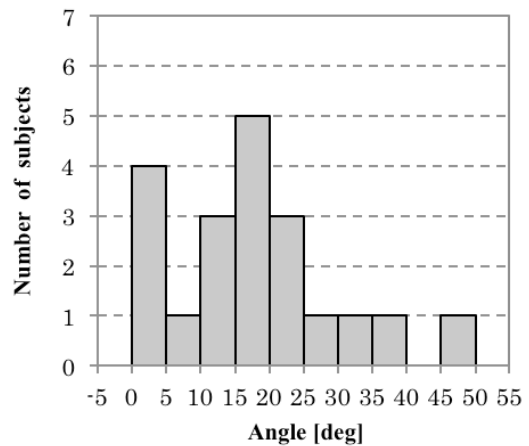
(3) 骨座標構築は手動で行われるため検者間, 検者内の誤差が問題である. さらに膝 OA では, 関節面変形により参照点の認識が健常骨より困難になりさらに再現性は低下すると考えられる. 本手法は同一モデルに対して常に同じ座標軸が構築される高い再現性を有しており, 膝 OA に対しても大腿骨では屈曲伸展方向, 脛骨では屈曲伸展, 内外反方向ではすべてのモデルで従来法と 10° 以内という軸のずれ (角度差) に収まっており, 大腿骨内外反方向で 80%, 内外旋方向で 84%, 脛骨内外旋方向で 20% のモデルで適切な軸 (X, Y, Z 軸) が構築された. 今後さらに最適な軸を探索する手法の確立によって膝 OA に対しても再現性の高い有用な軸構築を行えるこ



(a) Flexion-extension (+; Flexion)



(b) Valgus-varurs (+; varurs)



(c) Rotation (+; External)

図 2 脛骨に対する自動座標構築法と従来法 (ISB) による角度のずれ. (a) 屈曲-進展, (b) 内-外反, (c) 内-外旋

とが期待できる.

(4) 課題として今回従来法と 10° 以上の差を生じるモデルの存在を認めた大腿骨内外反, 内外旋方向, 脛骨内外旋方向の軸探索精度の向上があげられる. 本研究で従来法と

10°以上の差を認めた骨モデルを調べたところ、膝 OA にみられる関節面変形と骨棘の発生を認めた。これら関節面変形と骨棘が軸探索の障害の原因だと考え、本法の大腿骨座標構築プロセス毎にその影響を調べたところ、参照点探索のための主成分分析において既に誤差を増大させていることが分かった。したがって、骨棘・関節面変形は主成分分析のアルゴリズムに影響しており、これらの影響を極力排除した座標軸構築法が必要である。また、脛骨について調べた結果、主成分分析に問題はなく、最大横断面積部における楕円近似に誤差の原因があると考えられた。OA 膝に対する軸決定精度の向上のためには、大腿骨では主成分分析による仮座標構築時の軸方向の補正、脛骨では骨横断面で楕円近似していた部位（最大面積の横断面）をより関節面変形の影響を受けにくい腓骨最近位位置にするなどが必要であり、今後の課題である。

<引用文献>

- ① Sato T, Koga Y, et al., Quantitative 3-Dimensional analysis of preoperative and postoperative joint lines in total knee arthroplasty. *J. Arthroplasty*, 22, 2007, 560-568
- ② 解晨, 笹川圭右 他 : 脛骨骨形状コンピュータモデルの座標系自動構築法, *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, 31, 2010, 333-340
- ③ Kai S, Sato T, et al., Automatic construction of an anatomical coordinate system for three-dimensional bone models of the lower extremities - Pelvis, femur, and tibia, *J. Biomech.*, 47, 2014, 1229-1233
- ④ Wu G, Siegler S, et al., ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion part 1 : ankle, hip, and spine, *J. Biomech.*, 35, 2002, 543-548

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 15 件)

- ① Kobayashi K, Kai S, 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, *J. Biomech. Sci. Eng.*, 査読有, 9, 2014, 13-17
DOI:10.1229/jbse.13-00162
- ② Mochizuki T, Sato T, Blaha JD, Tanifuji O, Kobayashi K, Yamagiwa H, Watanabe S, Matsueda M, Koga Y, Omori G, Endo N, Kinematics of the knee after unicompartmental arthroplasty is not the same as normal and is similar to the kinematics of the knee with osteoarthritis, *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 査読有, 22, 2014, 1911-1917
DOI:10.1007/s00167-013-2767-6
- ③ 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, 2014, 131-135
- ④ 坂本 信, 春日 勇人, 坂井 幸子, 小林 公一, 遠藤 英昭, マイクロ CT を用いた三次元歯軸の評価, *臨床バイオメカニクス*, 査読有, 35, 2014, 99-104
- ⑤ 坂本 信, 小林 公一, 関節接触応力の理論モデルの解析, *臨床バイオメカニクス*, 査読有, 35, 2014, 387-394
- ⑥ Pramudita JA, Shimizu Y, Tanabe Y, Ito M, Watanabe R, Tensile properties of porcine skin in dorsal and ventral regions, *J. Jap. Soc. Exp. Mech.*, 査読有, 14, 2014, s245-s250
DOI:10.11395/jjsem.14.s245
- ⑦ Pramudita JA, Kikuchi S, Tanabe Y, Numerical analysis of vehicle occupant response during rear impact using a human body model, *Applied Mech. Mat.*, 査読有, 566, 2014, 480-485
DOI:10.4028/www.scientific.net./AMM.566.480
- ⑧ Yoshimura N, Akune T, Fujiwara S, Shimizu Y, Yoshida H, Omori G, Sudo A, Nishikawa Y, Yoshida M, Shimokata H, Suzuki T, Muraki S, Oka H, Nakamura K, Prevalence of knee pain, lumbar pain and its coexistence in Japanese men and women: The longitudinal cohorts of motor system organ (LOCOMO) study, *J. Bone Miner. Matb.*, 査読有, 32, 2014, 524-522
DOI:10.1007/s00774-013-0522-1
- ⑨ Ishijima M, Nakamura T, Shimizu K, Hayashi K, Kikuchi H, Soen S, Omori G, Yamashita T, Uchio Y, Chiba J, Kubota M, Kurosawa H, Kaneko K, Intra-articular hyaluronic acid injection versus oral non-steroidal anti-inflammatory drug for the treatment of knee osteoarthritis: A multi-center, randomized open-label, non-inferiority

trial, Arthritis Res. Ther., 査読有,
16, 2014, 18
DOI:10.1186/ar4446

- ⑩ Tanishi N, Yamagiwa H, Hayami T, Mera H, Koga Y, Omori G, Endo N, Usefulness of urinary CTX-II and NTX-I in evaluating radiological knee osteoarthritis: The Matsudai knee osteoarthritis survey, J. Orthop. Sci., 査読有, 19, 2014, 429-436
DOI:10.1007/s00776-014-0535-1
- ⑪ Kai S, Sato T, Koga Y, Omori G, Kobayashi K, Sakamoto M, Tanabe Y, Automatic construction of an anatomic coordinate system for three dimensional bone models of lower extremity-pelvis, femur and tibia, J. Biomech., 査読有, 47, 2014, 1229-1233
DOI:10.1016/j.jbiomech.2013.12.013
- ⑫ Mochizuki T, Sato T, Blaha JD, 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, J. Orthop. Sci., 査読有, 19, 2014, 451-456
DOI:10.1007/s00776-014-0536-0
- ⑬ 古賀 寛, 大森 豪, 膝関節の運動機能診断の基礎 -変形性膝関節症における運動機能, 関節外科, 査読有, 33, 2014, 57-60
- ⑭ 中村 亮介, 志賀 優太, 林 豊彦, 渡辺 聡, 大森 豪, 関節鏡画面を用いた鏡視下手術支援システムの開発 -前十字靭帯再建における大腿骨骨孔位置の精度-, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 35, 2014, 113-120
- ⑮ 大森 豪, 半月板切除後の長期予後, 臨床スポーツ医学, 査読有, 31, 2014, 1130-1133

[学会発表] (計 22 件)

- ① プラムディタ ジョナス, 菊地 俊輔, 湊 泉, 田邊 裕治, 後面衝突事故時の頸部傷害リスクに及ぼす頸椎アライメント个体差の影響, 2015 年バイオメカニクスワークショップ新潟(新潟県新潟市), 2015 年 3 月 14 日
- ② 藤田 涼平, 田邊 裕治, プラムディタ ジョナス, 繰り返し圧縮-ねじり荷重下における上腕骨遠位端骨折の内固定材料の力学的評価, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会(新潟県柏崎市), 2015 年 3 月 8 日
- ③ 進藤 直哉, 田邊 裕治, プラムディタ ジョナス, 膝蓋骨-膝蓋腱-脛骨結節複合体の衝撃応答, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会(新潟県柏崎市), 2015 年 3 月 8 日
- ④ 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下肢アライメントの 3 次元評価法, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会(新潟県柏崎市), 2015 年 3 月 8 日
- ⑤ 渡辺 恭司, プラムディタ ジョナス, 田邊 裕治, 椎体間運動による椎間関節包の変形挙動の解析, 第 27 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会(新潟県新潟市), 2015 年 1 月 10 日
- ⑥ 風間 清子, 春日 勇人, 坂本 信, 小林 公一, 回内・回外に伴う橈骨関節の生体内運動解析, 第 27 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会(新潟県新潟市), 2015 年 1 月 9 日
- ⑦ 森清 友亮, 春日 勇人, 風間 清子, 坂本 信, 小林 公一, 田邊 裕治, 中手指関節の接触挙動の生体内解析, 第 27 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会(新潟県新潟市), 2015 年 1 月 9 日
- ⑧ 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関節アライメントの 3 次元評価法, 第 27 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会(新潟県新潟市), 2015 年 1 月 9 日
- ⑨ 小森 元博, 田邊 裕治, プラムディタ ジョナス, ウシ緻密骨の破壊靱性に及ぼす温度の影響, 第 27 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会(新潟県新潟市), 2015 年 1 月 9 日
- ⑩ プラムディタ ジョナス, 日本人身体特性を有する乗員モデルの開発と後面衝突解析への応用, 第 4 回 Humanetics CAE テクニカルフォーラム(東京都), 2014 年 12 月 3 日
- ⑪ 風間 清子, 春日 勇人, 坂本 信, 小林 公一, 回内・回外における橈骨-尺骨間運動の三次元生体内解析, 第 41 回日本臨床バイオメカニクス学会(奈良県奈良市), 2014 年 11 月 21 日
- ⑫ 春日 勇人, 風間 清子, 坂本 信, 小林 公一, MRI を用いた中手指関節における接触領域および関節運動の三次元生体内解析, 第 41 回日本臨床バイオメカニクス学会(奈良県奈良市), 2014 年 11 月 21 日

- ⑬ 水谷 都, 川上 健作, 坂本 信, 定方美恵子, 小林 公一, 車いすハンドル高さ
と降坂移送をする介助者および上肢負担
に関する検討, 第 41 回日本臨床バイオメ
カニクス学会 (奈良県奈良市), 2014 年 11
月 21 日
- ⑭ 田中 翔太, 志賀 優太, 林 豊彦, 渡
辺 聡, 佐藤 卓, 小林 公一, 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 (奈良県奈良市),
2014 年 11 月 21 日
- ⑮ 安本 拓矢, プラムディタ ジョナス,
田邊 裕治, ドライブレコーダ映像に基づ
いた乗員頭部の運動解析, 自動車技術会
2014 年秋季大会 (宮城県仙台市), 2014
年 10 月 24 日
- ⑯ 風間 清子, 春日 勇人, 坂本 信, 小林
公一, 回内・回外時の橈骨-尺骨間運動の
3 次元生体内解析, 第 42 回日本放射線技
術学会秋季学術大会 (北海道札幌市), 2014
年 10 月 9 日
- ⑰ 春日 勇人, 風間 清子, 坂本 信, 小林
公一, MRI を用いた中手指関節における接
触領域の生体内解析, 日本機械学会 2014
年度年次大会 (東京都), 2014 年 9 月 10
日
- ⑱ 大内 翼, プラムディタ ジョナス, 田
邊 裕治, 後面衝突事故解析のための女性
乗員マルチボディモデルの開発, 日本機械
学会 2014 年度年次大会 (東京都), 2014
年 9 月 10 日
- ⑲ 風間 清子, 春日 勇人, 坂本 信, 小林
公一, 前腕の回内・回外に伴う橈骨-尺骨
運動の三次元生体内解析, 日本機械学会
2014 年度年次大会 (東京都), 2014 年 9
月 10 日
- ⑳ 坂本 信, 春日 勇人, 坂井 幸子, 小林
公一, 遠藤 英昭, 三次元歯軸の自動決定
法に関する研究, 日本機械学会 2014 年度
年次大会 (東京都), 2014 年 9 月 10 日
- ㉑ 坂本 信, 春日 勇人, 坂井 幸子, 小林
公一, 遠藤 英昭, 主成分分析を用いた三
次元歯軸の自動決定, 日本実験力学学会
2014 年度年次講演会 (兵庫県姫路市),
2014 年 8 月 30 日
- ㉒ Pramudita JA, Kikuchi S, Minato I,
Tanabe Y, Effect of cervical spine
alignment on neck injury risk during
rear-end impact: Numerical study using
neck finite element model, The

International Crashworthiness (ICRASH)
Conference 2014, Sarawak, Malaysia,
2014 年 8 月 25 日

[図書] (計 4 件)

- ① 大森 豪, メディカルレビュー社, 痛み
の診療 -ベストプラクティス (変形性膝
関節症), 2014, 160
- ② 渡辺 聡, 大森 豪, 全日本病院出版会,
Monthly Book Orthopaedics (膝関節内骨
折に対する鏡視下治療), 27 巻, 5 号, 2014,
230
- ③ 大森 豪, 日本医事新報社, 変形性膝関
節症の運動療法ガイド (変形性膝関節症の
診断 2. 画像所見), 2014, 226
- ④ 大森 豪, 日本医事新報社, 変形性膝関
節症の運動療法ガイド (変形性膝関節症の診
断 3. 鑑別診断), 2014, 226

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件) (該当無し)

○取得状況 (計 0 件) (該当無し)

[その他]

ホームページ等 (該当無し)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田邊 裕治 (TANABE, Yuji)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 60143020

(2) 研究分担者

プラムディタ ジョナス (PRAMUDITA,
Jonas)
新潟大学・自然科学系・助教
研究者番号: 50615458

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

小林 公一 (KOBAYASHI, Koichi)
新潟大学・医歯学系・准教授
研究者番号: 70296317

坂本 信 (SAKAMOTO, Makoto)
新潟大学・医歯学系・教授
研究者番号: 80215657

(3) 連携研究者 (該当無し)