

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24592288

研究課題名(和文)人工膝関節置換術前後の関節動態解析による高屈曲時における膝蓋大腿関節の機能解明

研究課題名(英文)Function of patellofemoral joints in deep flexion with motion analysis before and after TKA

研究代表者

日垣 秀彦(Higaki, Hidehiko)

九州産業大学・工学部・教授

研究者番号：00238263

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)：超高分子ポリエチレン製の膝蓋骨コンポーネントは輪郭像を利用したイメージマッチング法を用いた動態解析が困難であったが、本研究では、人工関節全置換術後における膝蓋骨コンポーネント置換後の残存骨部に対して、X線動画像とCTより作成した投影シミュレーション画像間の画像相関を利用した動態解析手法を用いることで膝蓋骨コンポーネントの動態解析を行った。動態解析結果より、膝蓋腱付着部位間距離の計測やコンポーネント間の接触位置を算出することで、膝蓋骨の動態も考慮した人工膝関節の設計を行った。

研究成果の概要(英文)：The patellar component in the artificial knee joints are made of ultra-high molecular weight polyethylene, we can't analyze using image matching by shape of implants. We analyzed patellar component using image correlation between X-ray images and computer simulation image. We analyzed patellar component using image correlation between X-ray images and computer simulation image targeting residual bone part after replacement of a patellar component. We evaluated distance of site of attachment of the patellar tendon and contact points between each components by result of motion analysis. We have developed artificial knee joints that were consideration of the patellar motion.

研究分野：整形外科学

キーワード：全人工膝関節置換術 動態解析 イメージマッチング 高屈曲

1. 研究開始当初の背景

人工膝関節全置換術 (Total knee arthroplasty, TKA) 後では可動域の低下やポリエチレンインサートの摩耗などの問題があり、これらの解明を行うため、*in vivo* バイオメカニクスの領域において、人工膝関節、生体膝関節の動態解析が求められている。これまでの研究により、人工関節と生体関節を対象としたイメージマッチングによる人工関節全置換膝や健全生体膝を対象とした動態解析例を報告している (Higaki H et al., 2006; 濱井敏 他, 2008; 日垣秀彦 他, 2009; 下戸健 他, 2010)。人工膝関節を対象とした動態解析手法はコンポーネントの輪郭像の一部を利用したウィンドウ解析技術を提案している。金属製の大腿骨コンポーネントや脛骨コンポーネントは X 線動画撮影時に明瞭な輪郭像を得ることができるため、本解析手法が有用である。しかし、多くが超高分子ポリエチレン製の膝蓋骨コンポーネントは X 線動画撮影時に明瞭な輪郭像を得ることができないため生体内での評価は困難であった。膝蓋骨は、スムーズな深屈曲動作や膝の安定性などに不可欠な部位であり、人工膝関節の更なる改良のためには大腿脛骨関節の動態・機能評価だけでなく、膝蓋骨コンポーネントも考慮した膝蓋大腿関節の動態・機能評価も重要であるといえる。そこで、TKA 後に残された膝蓋骨部位に着目し、生体関節を対象とした動態解析技術を用いて膝蓋骨の動態解析を行うことで、膝蓋骨コンポーネントの動態・機能評価を行うことができると考えた。さらに、TKA 前後で各骨の相対座標系を同様にし、動態・機能評価を行うことで骨相対アライメントが示す動態や腱の緊張度の違いについて評価を行うことができ、術後評価に有用な情報が得られると考えた。

2. 研究の目的

大腿骨・脛骨コンポーネントに対してはインプラントの輪郭像、生体関節および膝蓋骨コンポーネントに対しては画像相関を用いたウィンドウ解析手法を適用することにより、TKA 前後の被験者を対象に膝蓋大腿関節の動態解析を行うことを目的とした。結果より、膝蓋グループと膝蓋骨および膝蓋骨コンポーネントの相対位置および姿勢や、腱の付着部位間距離の計測による腱の緊張度などをパラメータに、生体膝における高屈曲のメカニズムの解明や高屈曲可能な人工膝関節に求められる最適形状を解析した。

3. 研究の方法

(1) 生体膝関節を対象とした動態解析手法

TKA 前の被験者に対し、CT 撮影を行った。撮影により得られた CT 画像データをコンピュータ上で再構築を行い、骨密度情報を含んだグレースケール 3 次元モデルの構築を行った。このグレースケール 3 次元モデルをコン

ピュータ上の任意の空間に配置し、線源および投影面の相対関係を FPD 撮影時と同様の条件にすることで、6 自由度に変化可能な投影シミュレーション像を作成した。この投影シミュレーション像を X 線動画像に対して画像相関を用いたイメージマッチングをすることにより、生体膝関節の動態解析を行った。

(2) 人工膝関節を対象とした動態解析手法

FPD 撮影より得られた X 線動画像から大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントの輪郭を抽出した 2 値化画像を作成する。被験者に置換されている人工膝関節と同機種同サイズの人工膝関節製品の 3 次元形状をコンピュータ上で再構成を行った。再構成により得られた 3 次元形状データをコンピュータ上で任意の空間に配置し、線源および投影面の相対関係を FPD 撮影時と同様の条件にすることで、6 自由度に変化可能な投影像を作成した。この投影像を大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントの輪郭を抽出した X 線動画像に対し、排他的論理和を利用したイメージマッチングを行うことにより、人工膝関節の動態解析を行った。

(3) 生体関節を対象とした動態解析手法の膝蓋骨コンポーネントへの応用

TKA 後の膝蓋骨コンポーネントの動態解析手法を図 1 に示す。TKA 前に撮影した CT 画像データを用いて投影シミュレーション像を作成した。この投影シミュレーション像を TKA 後に撮影した X 線動画像上の膝蓋骨に対してイメージマッチングを行うことにより、膝蓋骨コンポーネントの動態解析を行った。この際、膝蓋骨コンポーネント置換後の残存骨部を利用した動態解析を行うため膝蓋骨前面にウィンドウを設け、ウィンドウ内でのイメージマッチングを行った。

これらの手法は人工膝関節、ブタの膝関節を対象に精度検定を行い、整形外科領域の動態解析において有用な平均誤差 0.26mm, 0.30deg 以内に収まっていることを確認している (表 1)。

①6 自由度運動の評価

各対象動作における脛骨から見た大腿骨・膝蓋骨の相対関係を、6 自由度運動として右膝の座標系に変換しそれぞれ評価を行った。脛骨および大腿骨における相対座標系の定義は Andriacchi TP の研究グループにおける文献 (Andriacchi TP et al., J Biomec Eng, 1998) と同様となるように定義した。膝蓋骨における相対座標系の定義は、図 2 に示すように膝蓋骨の重心を原点 0、膝蓋骨内側を点 A および外側を点 B、膝蓋骨遠位を点 C および近位を点 D とする。このとき、2 直線 AB および CD が原点 0 を通り直交し、かつ 2 直線上の距離 L と M の和が最大となる軸をそれぞれ X 軸および Z 軸と定義し、Z 軸と X 軸の外積を Y 軸と定義した。TKA 後において人工膝関節の置換位置を推定することで、TKA 前後で同様の相対座標系を用いて 6 自由度運動の評価の評価を行った。

②膝蓋腱の機能評価

各対象動作における膝蓋腱附着部位間距離の変位量を解析することで評価した。膝蓋腱の膝蓋骨と脛骨に対する腱附着部位の位置定義は CT 画像を基に膝蓋骨下極点 E および脛骨粗面の膝蓋腱附着部位中央点 F を定義した (図 3)。解析方法は、膝蓋骨と脛骨における 6 自由度運動の結果を基に、コンピュータ上で膝蓋骨および脛骨の空間位置と姿勢を再現し、点 EF 間の距離を計測することで、各対象動作における変位量解析を行った。

③コンポーネント間の最接近位置による運動評価

膝蓋骨コンポーネントと大腿骨コンポーネントにおける 6 自由度運動結果を基にコンピュータ上で膝蓋骨コンポーネントと大腿骨コンポーネントの空間位置と姿勢を再現し、コンポーネント間の最接近位置を計測し、軌跡として評価した。

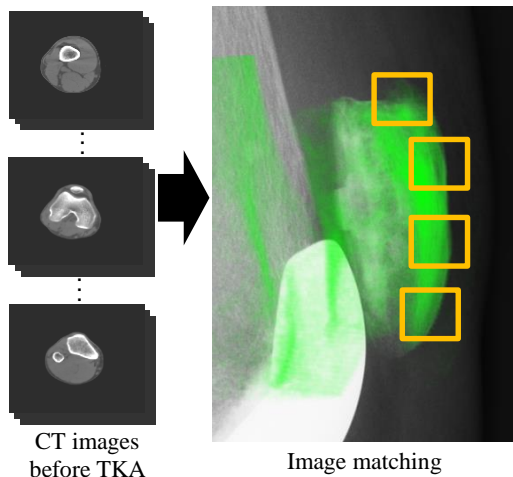


図1 膝蓋骨コンポーネントを対象とした動態解析手法

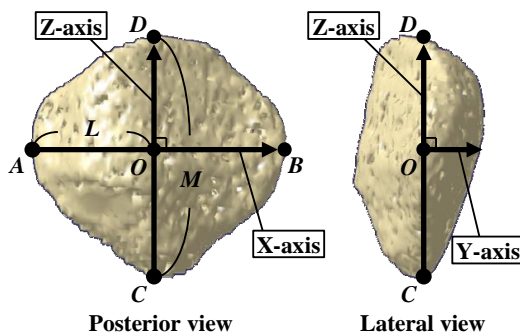


図2 膝蓋骨における相対座標系

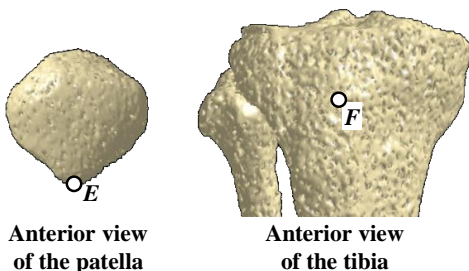


図3 膝蓋腱附着部位の位置定義

表1 動態解析手法の精度検定結果

RMSE	Translation[mm]		Rotation [deg]
	In-plane	Out-of-plane	
femur	0.11	0.11	0.27
tibia	0.15	0.10	0.30
patella	0.18	0.09	0.13
femoral component	0.11	0.26	0.19
tibial component	0.13	0.18	0.22

4. 研究成果

(1) スクワット動作を対象とした TKA 前後の動態解析

①6 自由度運動結果

対象は TKA 前後の 4 名 4 膝とした。スクワット動作における 6 自由度動態解析結果を、大腿骨の屈曲角度に対する他 5 自由度および膝蓋骨が示す 6 自由度で評価し、特徴的な結果が得られた被験者の 2 自由度の結果を図 4 に示す。大腿骨の最大屈曲角度は、TKA 前では約 95.3deg、TKA 後では約 113.1deg であった。膝蓋骨の最大屈曲角度は、TKA 前では約 28.2deg、TKA 後では約 47.5deg を示した。大腿骨の内旋/外旋における回転運動結果より、TKA 前では、初期姿勢から膝屈曲角度約 86.6deg までは約 7.1deg の内旋運動を示し、膝屈曲角度約 86.6deg 以降では約 2.6deg の外旋運動を示した。TKA 後では、初期姿勢から膝屈曲角度約 88.8deg まで約 6.0deg の内旋運動を示し、膝屈曲角度約 88.8deg 以降では約 2.6deg の外旋運動を示した。膝蓋骨の内側/外側傾斜における回転運動結果より、TKA 前では、初期姿勢から膝屈曲角度約 80.5deg までは約 5.2deg の内側傾斜を示し、膝屈曲角度約 80.5deg 以降では約 5.1deg の外側傾斜を示した。TKA 後では初期姿勢から大きな回転運動は確認できなかった。

②膝蓋腱の機能評価

スクワット動作時における膝蓋腱附着部位間距離の変位量解析結果を図 5 に示す。TKA 前後で膝蓋腱附着部位間距離に大きな変化は見られず、スクワット動作に伴う膝蓋腱附着部位間距離の大きな変位も確認できなかった。

③コンポーネント間の最接近位置による運動評価

スクワット動作時における膝蓋骨コンポーネントと大腿骨コンポーネントの最接近点の軌跡を図 6 に示す。全姿勢で 2 点の最接近点が確認でき、膝蓋骨コンポーネントでは最接近点が摺動面に収まっており、最接近点の大きな変位は確認できなかった。大腿骨コンポーネントでは最接近点が膝蓋グループに収まっており、屈曲に伴う下方変位が確認できた。

この 3 項目の結果における 6 自由度運動結

果において同じ回転軸を持つ膝蓋骨の内側/外側傾斜および大腿骨の内旋/外旋の回転運動の結果より、TKA 前では膝蓋骨と大腿骨が同様の運動傾向を示し、TKA 後では膝蓋骨と大腿骨が異なった運動傾向を示した。このことから、TKA 前では膝蓋大腿関節面の形状適合により、膝蓋骨は大腿骨に拘束され同様の運動傾向を示したと考えられ、TKA 後では膝蓋大腿関節面がコンポーネントの点接触になるため、膝蓋骨が大腿骨に拘束されずに異なった動態を示したと推察できる。膝蓋腱付着部位間距離の結果において、TKA 前後ともに膝蓋腱は長さを保ったままスクワット動作をしていることが確認でき、膝蓋腱が緊張状態にあると考えられる。コンポーネント間の最接近点の軌跡より、最接近点が膝蓋骨コンポーネントの摺動面内、大腿骨の膝蓋グループに収まっていた。このことから、人工膝関節の設計において、膝蓋グループの形状を考慮する必要があると考えられる。

以上のことより、TKA 後に残された膝蓋骨部位を利用することで、解析困難だった膝蓋骨コンポーネントの動態解析を行うことができたと考えられる。さらに、膝蓋腱付着部位間距離の変位量解析やコンポーネント間の最接近点などの評価ツールを用いることにより、術後評価や人工膝関節の最適形状の

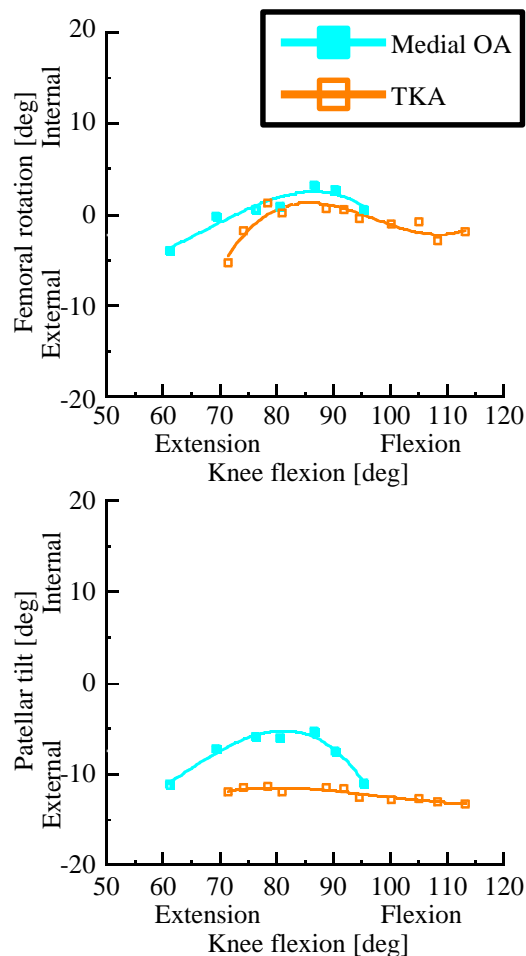


図4 スクワット動作における脛骨から見た大腿骨の内外旋運動および膝蓋骨の内外側傾斜運動

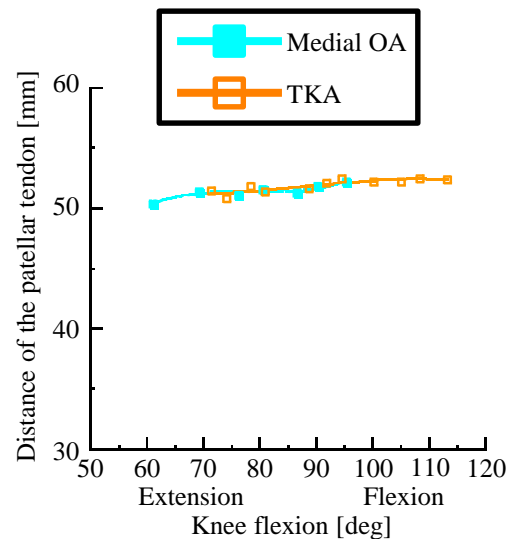


図5 スクワット動作における膝蓋腱付着部位間距離の変位

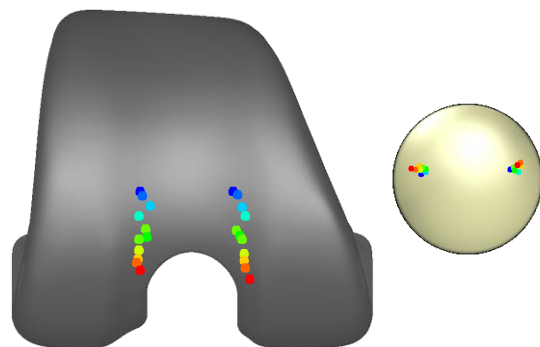


図6 スクワット動作における膝蓋骨コンポーネントと大腿骨コンポーネントの最接近点の軌跡

解析を行うことができると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- (1) Rotational alignment of the tibial component affects the kinematic rotation of a weight-bearing knee after total knee arthroplasty, Nakahara H, Okazaki K, Hamai S, Kawahara S, Higaki H, Mizu-Uchi H, Iwamoto Y, 査読有, The Knee, doi: 10.1016/j.knee.2015.01.002, 2015年1月
- (2) Continuous Sagittal Radiological Evaluation of Stair-Climbing in Cruciate-Retaining and Posterior-Stabilized Total Knee Arthroplasties Using Image-Matching Techniques, Hamai S, Okazaki K, Shimoto T, Nakahara H, Higaki H, Iwamoto Y, 査読有, The Journal of Arthroplasty, doi: 10.1016/j.arth.2014.12.027, 2015年1月
- (3) 人工膝関節全置換術前後におけるスクワット動作時の動態解析, 池部 恰, 日垣 秀彦, 石川 篤, 下戸 健, 中西 義孝, 西松 和穂, 白石 善孝, 石丸 雅巳, 三浦 裕正,

- 査読有, 臨床バイオメカニクス, Vol. 35, pp. 155-162, 2014年10月
- (4) Kinematic analysis of healthy hips during weight-bearing activities by 3D-to-2D model-to-image registration technique, Hara D, Nakashima Y, Hamai S, Higaki H, Ikebe S, Shimoto T, Hirata M, Kanazawa M, Kohno Y, Iwamoto Y, 査読有, BioMed Research International, Vol. 28, pp206-212, 2014年11月
- (5) Does knee stability in the coronal plane in extension affect function and outcome after total knee arthroplasty?, Nakahara H, Okazaki K, Hamai S, Okamoto S, Kuwashima U, Higaki H, Iwamoto Y, doi:10.1007/s00167-014-3122-2, 査読有, Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2014年6月
- (6) Three-dimensional motion analysis of the patellar component in total knee arthroplasty by the image matching method using image correlations, Ishimaru M, Shiraishi Y, Ikebe S, Higaki H, Hino K, Onishi Y, Miura H, 査読有, Journal of Orthopaedic Research, 32(5), pp619-626, 2014年5月
- (7) 6自由度動態解析手法を用いた跪き動作時における健常膝蓋骨の機能評価, 白石善孝, 石丸雅巳, 三浦裕正, 旦垣秀彦, 石川篤, 池部怜, 西松和穂, 中西義孝, 田代泰隆, 岩本幸英, 査読有, 臨床バイオメカニクス, Vol. 34, pp. 225-232, 2013年11月
- (8) No influence of coronal laxity and alignment on lift-off after well-balanced and aligned total knee arthroplasty, Hamai S, Miura H, Okazaki K, Shimoto T, Higaki H, Iwamoto Y, 査読有, Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 22(8), pp. 1799-1804, 2013年4月
- (9) CT画像に基づくX線動画像シミュレーションを用いた健常膝蓋骨の動態解析, 白石善孝, 下戸健, 旦垣秀彦, 石川篤, 中西義孝, 田代泰隆, 石丸雅巳, 三浦裕正, 岩本幸英, 原利昭, 査読有, 臨床バイオメカニクス, Vol. 33, pp. 185-192, 2012年10月
- [学会発表] (計 81件)
- (1) kinematic Analysis of stair-climbing in cruciate-retaining And posterior-stabilized total knee Arthroplasties, S. Hamai, H. Higaki, Y. Iwamoto, 他4名6番目, The 61th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, MGM Grand Hotel (Nevada), 2015年3月
- (2) TKA・THA前後の動態解析技術, 旦垣秀彦, 第41回日本臨床バイオメカニクス学会, 奈良県新公会堂(奈良), 2014年11月
- (3) ゴルフスイング時における生体膝および生体股関節の動態解析, 旦垣秀彦, 王亦峰, 岩本幸英, 他7名1番目, 第25回バイオフィロンティア講演会, とりぎん文化会館(鳥取), 2014年10月
- (4) Kinematic Analysis of Stair-Climbing in Cruciate-Retaining and Posterior-Stabilized Total Knee Arthroplasties, Satoshi Hamai, Higaki Hidehiko, Yukihide Iwamoto, 他3名5番目, 2014 International Society for Technology in Arthroplasty, 京都ホテルオークラ(京都), 2014年9月
- (5) ゴルフスイング時における健常膝関節を対象とした動態解析, 小島崇嗣, 旦垣秀彦, 岩本幸英, 他7名3番目, 2014年度年次大会, 東京電機大学(東京), 2014年9月
- (6) Evaluation of the in vivo impingement between components during stair-climbing in implanted knee, H. Yamashita, T. Shimoto, H. Higaki, 他6名3番目, 7th World Congress of Biomechanics, Hynes Convention Center (Boston), USA, 2014年7月
- (7) 動態解析から見た人工膝関節置換術後のスポーツ活動における問題点, 濱井敏, 旦垣秀彦, 他5名7番目, 第127回西日本整形・災害外科学会学術集会, ホテルニューオータニ博多(福岡), 2014年6月
- (8) Kneeling動作時におけるPS型およびCR型人工関節全置換膝を対象とした動態解析, 王亦峰, 旦垣秀彦, 岩本幸英, 他6名3番目, 九州支部第67期総会・講演会, 九州工業大学(福岡), 2014年3月
- (9) 人工膝関節全置換術前後における膝蓋骨を含めた跪き動作時の動態解析, 山崎脩平, 旦垣秀彦, 三浦裕正, 他8名4番目, 九州学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 九州大学(福岡), 2014年3月
- (10) CR型TKAの動態解析と臨床成績, 三浦裕正, 旦垣秀彦, 他4名6番目, 第44回日本人工関節学会, 沖縄コンベンションセンター(沖縄), 2014年2月
- (11) 後十字靭帯温存型人工膝関節の階段昇り動作時におけるキネマティクス解析, 濱井敏, 旦垣秀彦, 岩本幸英, 他4名6番目, 第44回日本人工関節学会, 沖縄コンベンションセンター(沖縄), 2014年2月
- (12) Motion analysis of patellofemoral joints before and after total knee arthroplasty, S. Ikebe, H. Higaki, H. Miura, 他5名2番目, The 15th International Conference on Biomedical Engineering, National University of Singapore (Singapore), 2013年12月

- (13) Evaluation of the in vivo impingement between components in cruciate-retaining and posterior-substituting total knee arthroplasty, T. Shimoto, H. Higaki, Y. Iwamoto, 他 5 名 3 番目, The 15th International Conference on Biomedical Engineering, National University of Singapore (Singapore), 2013 年 12 月
- (14) 人工膝関節のデザインと動態解析, 三浦裕正, 日垣秀彦, 他 4 名 6 番目, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会, 神戸国際会議場 (神戸), 2013 年 11 月
- (15) 後十字靭帯温存型人工膝関節の階段昇り動作におけるキネマティクス解析, 濱井敏, 日垣秀彦, 岩本幸英, 他 4 名 6 番目, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会, 神戸国際会議場 (神戸), 2013 年 11 月
- (16) 人工膝関節全置換術前後におけるスクワット動作時の動態解析, 池部怜, 日垣秀彦, 三浦裕正, 他 6 名 2 番目, 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会, 神戸国際会議場 (神戸), 2013 年 11 月
- (17) 人工関節全置換術前後における膝蓋大腿関節を対象とした跪き動作時の動態解析, 池部怜, 日垣秀彦, 三浦裕正, 他 6 名 3 番目, 第 24 回バイオフロンティア講演会, 同志社大学 (京都), 2013 年 11 月
- (18) イメージマッチングを用いた 6 自由度動態解析による膝キネマティクスの評価, 白石善孝, 三浦裕正, 日垣秀彦, 他 5 名 8 番目, 第 36 回日本生体医工学会中国四国支部大会, 愛媛大学 (愛媛), 2013 年 10 月
- (19) PS 型人工膝関節におけるコンポーネント間のインピンジメント評価, 佐藤祐喜, 日垣秀彦, 岩本幸英, 他 4 名 5 番目, 2013 年度年次大会, 岡山大学 (岡山), 2013 年 9 月
- (20) Post-cam mechanism and impingement of the anterior tibial post during stair-climbing in posterior-stabilized total knee arthroplasty, Hamai S, Higaki H, Iwamoto Y, 他 5 名 4 番目, The 59th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, Henry B. Gonzalez Convention Center (USA), 2013 年 7 月
- (21) 後十字靭帯置換型人工膝関節における階段昇り動作時のポストカム機構と前方インピンジメントの機能, 濱井敏, 日垣秀彦, 岩本幸英, 他 5 名 7 番目, 第 86 回日本整形外科学会学術総会, リーガロイヤルホテル広島 (広島), 2013 年 5 月
- (22) TKA 前後のイメージマッチング動態解析技術, 日垣秀彦, 第 7 回日本 CAOS 研究会, 大和屋本店 (愛媛), 2013 年 3 月
- (23) 人工膝関節全置換術前後における膝蓋大腿関節の動態解析, 池部怜, 日垣秀彦, 三浦裕正, 他 4 名 2 番目, 九州支部 66 期総会・講演会, 九州産業大学 (福岡), 2013 年 3 月
- (24) 6 自由度動態解析手法を用いた Stair-climbing 動作における健常膝蓋骨の機能評価, 白石善孝, 日垣秀彦, 岩本幸英, 他 6 名 6 番目, 第 25 回バイオエンジニアリング講演会, つくばセンター (茨城), 2013 年 1 月
- (25) 深屈曲動作時における人工関節置換膝と健常生体膝の動態の比較, 西松和穂, 日垣秀彦, 他 7 名 3 番目, 第 25 回バイオエンジニアリング講演会, つくばセンター (茨城), 2013 年 1 月
- (26) 後十字靭帯置換型人工膝関節における階段昇り動作時のポストカム機構と前方インピンジメント, 濱井敏, 日垣秀彦, 岩本幸英, 他 3 名 5 番目, 第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会, 幕張メッセ (千葉), 2012 年 11 月
- (27) 6 自由度動態解析手法を用いた跪き動作時における健常膝蓋骨の機能評価, 白石善孝, 三浦裕正, 日垣秀彦, 他 7 名 4 番目, 第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会, 幕張メッセ (千葉), 2012 年 11 月
- (28) 生体関節における 6 自由度動態解析手法を用いた変形性関節疾患患膝の機能評価, 池部怜, 日垣秀彦, 他 7 名 2 番目, 第 23 回バイオフロンティア講演会, 弘前文化センター (弘前), 2012 年 10 月
- (29) 1 方向 X 線動画像を用いた深屈曲動作における健常膝蓋骨の機能評価, 白石善孝, 三浦裕正, 日垣秀彦, 他 6 名 4 番目, 第 23 回バイオフロンティア講演会, 弘前文化センター (弘前), 2012 年 10 月
- (30) PS 型人工膝関節における階段昇り動作時のポストカム機構と前方インピンジメント, 濱井敏, 日垣秀彦, 岩本幸英, 他 5 名 7 番目, 第 18 回 Fukuoka Knee Society, レソラ N T T 夢天神ホール (福岡), 2012 年 10 月
- (31) 画像相関を利用したイメージマッチング法による膝蓋骨三次元動態解析, 石丸雅巳, 日垣秀彦, 三浦裕正, 他 4 名 6 番目, 第 4 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会, 沖縄コンベンションセンター (沖縄), 2012 年 6 月
- [その他]
ホームページ等
<http://www.ip.kyusan-u.ac.jp/J/kougaku/tm/higaki/>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
日垣 秀彦 (HIGAKI, Hidehiko)
九州産業大学・工学部・教授
研究者番号: 00238263