

平成23年5月31日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20591794

研究課題名(和文)

CT画像に基づくX線動画シミュレーションによる関節動態解析手法の開発

研究課題名(英文)

Development of motion analytic method using a simulation of X-ray images with joint CT images

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

研究成果の概要(和文)：

本研究では、関節疾患の診断におけるフルオロスコープ等のX線動画画像を対象に、3D-CTモデルとX線動画撮像環境を基に6自由度に変化するコンピュータシミュレーション画像を、画像相関法を用いイメージマッチングすることにより、正確な6自由度関節動態を解析する手法を開発した。さらに、関節動態のヘリカル軸表記や靭帯付着部間変位等の関節疾患診断に有効なツールを提案し、その有用性が確認された。

研究成果の概要(英文)：

A new natural joint motion analytic method with high accuracy has developed using a image matching method between a X-ray image and its computer simulation image with the CT images of bones. The expression of joint motion with helical axes and the relative motion of foot prints of the objective tendon has been proposed and the effectiveness is confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：外科系臨床医学

科研費の分科・細目：整形外科学

キーワード：関節病学、動態解析、イメージマッチング、バイオメカニクス、医用画像、コンピュータ支援診断

1. 研究開始当初の背景

膝関節は、日常生活動作を行う上で重要な部位であり、過度な運動や加齢などによる疲労、およびスポーツや交通事故などによる外傷により、変形性膝関節症や慢性関節リウマチ、膝関節靭帯損傷などの機能障害を起こす可能性が高く、機能障害を引き起こすと生活

の質に著しく影響を及ぼす。そのため、重度の症状の場合は、変形性膝関節症や慢性関節リウマチにおいては、除痛、可動性、および支持性のある関節機能を向上させる方法として、人工膝関節全置換術が多用されている。しかし、摩耗や可動域低下などの問題があり、その解明を行うため、*In vivo* バイオメカニ

クスの領域において人工膝関節全置換術後の動態解析が盛んに行われている (Banks SA et al., 2003; Yamazaki T et al., 2004; Hamai S et al., 2008). これらの研究などにより、深屈曲対応型や 15 年を超える長期成績を持った人工膝関節が開発されているが、更なる改良には、術前の生体膝関節における 6 自由度動態の検討が重要であることが認識されてきた。靭帯再建術においては、靭帯付着部位の位置定義や術式などに様々な見解があり、整形外科領域において議論がされている (Zantop T et al., 2005). そこで、生体膝関節の詳細な 6 自由度動態を解明することができれば、脛骨大腿骨間の靭帯付着部位間距離を測定することができ、靭帯再建術前後の機能評価などを行うことで、靭帯再建術に対し有用な情報をフィードバックすることが期待できる。これらのことから、生体膝関節の 6 自由度動態解析を行うことは、医療機器開発や整形外科領域の診断などにおいて重要な役割を占めると考えられるため、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

CT 画像を基とした 3 次元骨モデルから作成したグレースケール値を持つ投影シミュレーション像と、フラットパネルディテクター (Flat panel detector, FPD) から得られる 1 方向 X 線動画像を利用し、骨形態を用いるのではなく、2 画像間の画像相関を利用した 6 自由度動態解析技術の開発を目的とした。さらに、日本人特有の生活動作を考慮し、深屈曲動作、スクワット動作、Stair-climbing 動作および歩行動作に着目した生体膝動態解析を実施することで、関節動態のヘリカル軸表記や靭帯付着部間変位等の関節疾患診断に有効なツールとしての有用性を検討した。

3. 研究の方法

動態解析手法は図 1 に示すように、被験者から得られた CT 画像をコンピュータ上で再構築することにより、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で任意の空間に配置し、光源および投影面を FPD 撮影時と同様の条件とすることで、6 自由度に変化できる投影シミュレーション像を作成した。これを、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。この際、X 線動

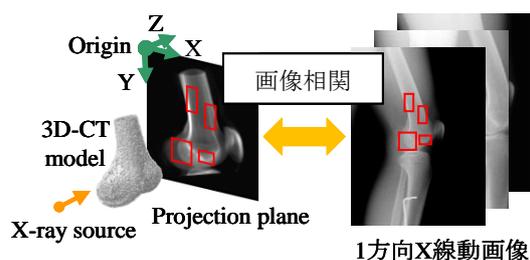


図1 生体膝関節を対象とした動態解析手法

画像では撮影時に軟部組織が変形し、イメージマッチング中のノイズとなるため、変形が小さい骨部に複数のウィンドウを設け、ウィンドウ内において解析を行った。

(1) 生体関節を対象とした 6 自由度動態解析手法の精度検定

対象には、ブタの大腿骨を採取したものをを用いた。CT 撮影の方法は、臨床応用と同様な条件となるようにスライス厚さを 1.0mm, CT 撮影の範囲は、膝関節を中心に約 200mm を撮影した。FPD 撮影は、ブタの大腿骨が 1 方向 X 線動画像の中央付近に位置するように、立位の状態で側面より FPD 撮影したものを初期姿勢とした。初期姿勢から FPD の平面センサーに対し、おおよそ水平方向と法線方向に並進運動、絶対座標系の各軸に重ならない任意の軸を中心に回転運動を与えて行い、それぞれに対し FPD 撮影を行った。これらすべての 1 方向 X 線動画像に対して動態解析シミュレーションを行うことで、それぞれの変位方向に対して、15 回ずつ繰り返し検定を行い、二乗平均平方根偏差 (Root mean square error, RMSE) を使用し精度を算出した。

(2) 日常生活動作を対象とした生体膝関節の動態解析

動態解析の対象動作として、日本人特有の生活動作を考慮し、深屈曲動作、スクワット動作、Stair-climbing 動作および歩行動作に着目した。深屈曲動作は、正座等の動作にあたり、スクワット動作は、床にしゃがみ込んだり立ち上がったたりする動作にあたる。Stair-climbing 動作および歩行動作は、日常生活において必要不可欠な動作であり、膝関節にはそれぞれ体重の約 4 倍、および約 2~3 倍と負担のかかる動作とされている。さらに、これらの動作は QOL に大きく関わった動作だと考えられる。本報では 1 例として、屈曲域の最も大きいスクワット動作について述べる。被験者は、成人男性 4 名の健常な 4 膝、平均年齢 29.8 ± 1.1 歳、平均体重 65.0 ± 8.4 kg を対象とした (被験者 A~D)。スクワット動作における CT 撮影の方法は、臨床応用と同様な条件となるようにスライス厚さを 1.0mm, CT 撮影の範囲は、膝関節を中心に約 200mm とし、解析対象側の膝関節を撮影した。FPD 撮影の方法は、臨床応用と同様な条件となるように、X 線源と平面センサー間において、解析対象側の膝関節付近が 1 方向 X 線動画像の中央付近に位置するように、最伸展位から被験者自身が曲げることができる最大屈曲位まで屈曲し、再び最伸展位に達するまでの過程を連続撮影した (図 2)。

動態解析の評価方法は、6 自由度運動の評価、ヘリカル軸を用いた膝関節運動の評価、膝十字靭帯の機能評価、および脛骨大腿骨間距離による膝関節運動の評価とし、計 3 項目における評価を行った。

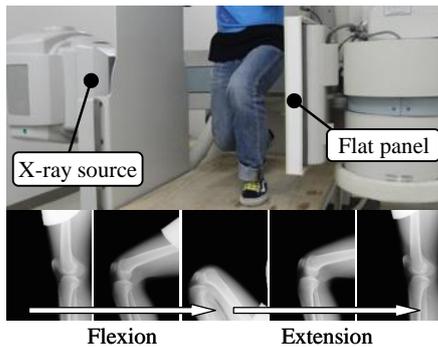


図2 スクワット動作におけるFPD撮影時および過程より得られた1方向X線動画像

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、図3に示すように、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。

②ヘリカル軸を用いた膝関節運動の評価

脛骨と大腿骨における6 自由度運動の結果を基に、脛骨に対する大腿骨の動態を1つの回転軸(ヘリカル軸)として算出し、ヘリカル軸の変位を軌跡として評価した。ヘリカル軸は、対象の動態を1つの回転軸として求めることができるため、ヘリカル軸周りの回転運動とヘリカル軸方向の並進運動として評価することができる。本研究では、屈曲/伸展、内転/外転、および内旋/外旋の内どの回転運動を主にしているかを評価対象とし、各対象動作における評価を行った。

③膝十字靭帯の機能評価

各対象動作における前十字靭帯(ACL)および後十字靭帯(PCL)の十字靭帯付着部位間距離の変位量を解析することで評価した。ACLに関しては、前内側部束(AM bundle)および後外側部束(PL bundle)の機能束ごとに分類し解析した。AM bundle および PL bundle と PCL の脛骨と大腿骨に対する靭帯付着部位の位置定義は、Zantop T の研究グループにおける文献(Zantop T et al., Oper Tech Orthop, 2005)を参考とし、解剖学的に同様となるようにそれぞれ定義した(図4)。解析方法は、脛骨と大腿骨における6 自由度運動の結果を基に、3次元CAD上で脛骨および大腿骨の空間位置と姿勢を再現し、図内の白点で示している付着部位中央間の距離をそれぞれ計測することにより、各対象動作における変位量解析を行った。

4. 研究成果

(1) 生体関節を対象とした6 自由度動態解析手法の精度

動態解析精度は、並進運動におけるおおよそ水平方向の平均誤差は0.84mm、おおよそ法

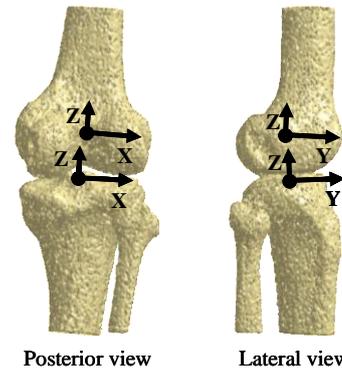


図3 脛骨および大腿骨における相対座標系の定義(右膝)

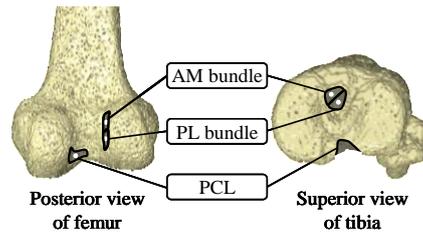


図4 AM bundleおよびPL bundleとPCL付着部位の位置定義(右膝)

線方向の平均誤差は0.17mm、任意の軸を中心に行った回転運動における平均誤差は0.29degであった。すべての変位において平均誤差が整形外科領域で有効とされる1.0mm、1.0deg以内に収まっているため、生体関節の動態解析手法として有用性があると考えられる。

(2) スクワット動作を対象とした生体膝関節の動態解析

①6 自由度運動の評価

スクワット動作における6 自由度動態解析結果を、屈曲/伸展に対する他5 自由度で評価し、特徴的な結果が得られた2 自由度を図5に示す。実線は最伸展位からの屈曲を示し、破線は最大屈曲位からの伸展を示している。被験者の最大屈曲角度は、約134~165degであった。前後方向の並進運動における結果においては、全被験者とも屈曲に伴う単調な後方変位、および伸展に伴う単調な前方変位が確認できた。さらに、最大屈曲角度が大きかった被験者BおよびDにおいては、屈曲角度約140deg以上の高屈曲位において、急激な約7mmの後方変位が確認できた。内旋/外旋の回転運動における結果では、全被験者とも屈曲に伴う外旋が確認でき、伸展においては、最伸展位直前の屈曲角度約30degから急激な内旋が確認できた。

②ヘリカル軸を用いた膝関節運動の評価

最大屈曲角度が最も小さかった被験者Aおよび最も大きかった被験者Dについて、スクワット動作を最伸展位からの屈曲および最大屈曲位からの伸展として評価し、ヘリカル軸の軌跡をそれぞれ図6および図7に示す。最伸展位からの屈曲における結果では、両被

験者ともヘリカル軸のメディアルピボットでの外旋運動傾向が確認できる。しかし、最大屈曲角度が最も小さかった被験者 A においては、屈曲角度約 110deg から最大屈曲位において、ヘリカル軸の不規則な変位が確認できた。さらに、最大屈曲角度が大きかった被験者 D においては、屈曲に伴うヘリカル軸の後方変位、および最大屈曲位におけるヘリカル軸の下方変位が確認できる。最大屈曲位からの伸展における結果では、最大屈曲角度が最も小さかった被験者 A においては、伸展においても不規則な変位が確認できた。最大屈曲角度が最も大きかった被験者 D においては、ヘリカル軸のメディアルピボットでの内旋運動傾向が確認できる。さらに、伸展に伴うヘリカル軸の前方変位および上方変位が確認できる。

③膝十字靭帯の機能評価

スクワット動作における膝十字靭帯付着部位間の変位量解析結果を、屈曲/伸展に伴う各靭帯について評価した (図 8)。実線は最伸展位からの屈曲を示し、破線は最大屈曲位からの伸展を示している。ACL 付着部位間距離の結果においては、AM bundle および PL bundle の両束において、全被験者とも靭帯付着部位間距離は屈曲に伴い接近し、伸展に伴い伸びる傾向が確認できた。最大屈曲角度が大きかった被験者 B および D においては、最大屈曲位において AM bundle および PL bundle

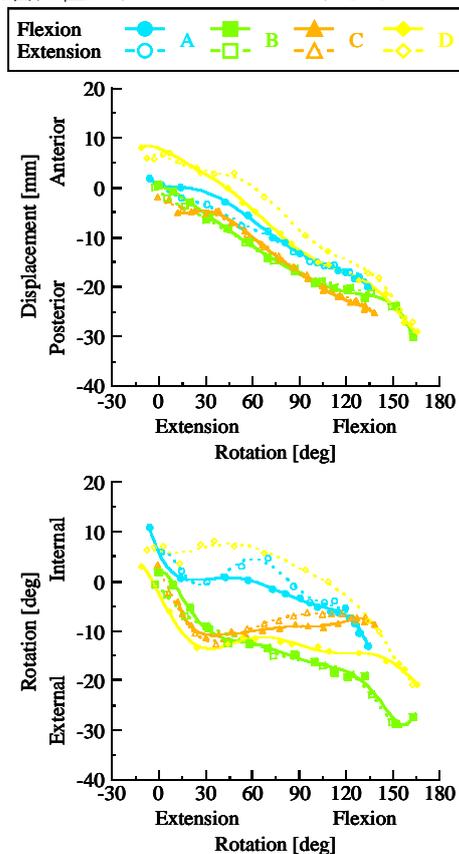


図5 スクワット動作における脛骨から見た大腿骨の前後運動と内外旋運動

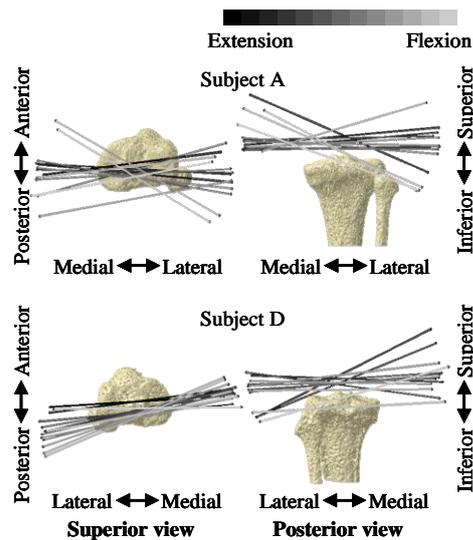


図6 最伸展位からの屈曲における脛骨から見た大腿骨のヘリカル軸変位

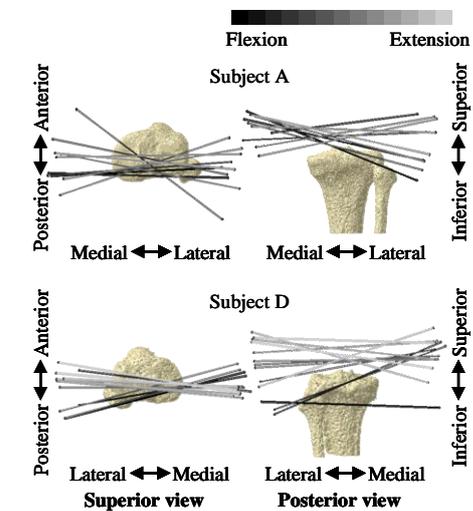


図7 最大屈曲位からの伸展における脛骨から見た大腿骨のヘリカル軸変位

付着部位間距離の急激な伸びが確認できた。さらに、全被験者とも、PL bundle は AM bundle に比べ絶対的変位量が大なる傾向が確認できた。PCL 付着部位間距離の結果においては、全被験者とも屈曲に伴い靭帯付着部位間距離は伸びる傾向が確認できた。さらに、最大屈曲角度が大きかった被験者 B および D においては、最大屈曲位において大きな変位が見られない傾向が確認できた。

これら 3 項目の結果における内旋/外旋の回転運動における結果から、全被験者とも屈曲に伴う外旋を確認することができた。これは、生体膝関節の生理的な動態とされており、屈曲動作に伴う外旋の運動メカニズムを示していると推察できる。さらに、伸展において最伸展位直前に急激な内旋が確認できた。これは、膝十字靭帯付着部位間距離の結果において、伸展に伴う ACL 付着部位間距離の伸びが確認できたことから、ACL の緊張により最伸展位直前で起こるとされている下腿

外旋、大腿内旋のスクリーホームムーブメントの動態を示していると推察できる。ヘリカル軸の結果から、最大屈曲角度が最も小さかった被験者 A において屈曲および伸展ともにヘリカル軸の不規則な変位を確認することができた。このことから、不安定な動態となっていることが考えられ、最大屈曲角度が最も小さかったと推察できる。ACL 附着部位間距離の結果から、PL bundle は AM bundle に比べ絶対的変位量が大きな傾向が確認できた。スクワット動作は、屈曲/伸展の可動域が最も大きいことから、AM bundle および PL bundle における変位量の違いを著明に確認することができた。このことから、ACL 再建術において 1 束ではなく 2 束の靭帯を用いることが重要であると推察できる。最大屈曲角度が大きかった被験者 D は、前後方向の並進運動における結果から、最大屈曲位において急激な後方変位が確認できた。ヘリカル軸の結果からは、屈曲に伴うヘリカル軸の後方変位、最大屈曲位における下方変位が確認でき、伸展に伴うヘリカル軸の前方変位および上方変位が確認できた。さらに、十字靭帯附着部位間距離の結果からは、最大屈曲位において ACL 附着部位間距離の急激な伸び、および PCL 附着部位間距離が大きな変位が見られない傾向が確認でき、PCL の緊張によりロールバックを引き起こし、顕著な亜脱臼ぎみの動態を示したと推察できる。さらに、ロールバックによる過剰な後方変位を抑制するた

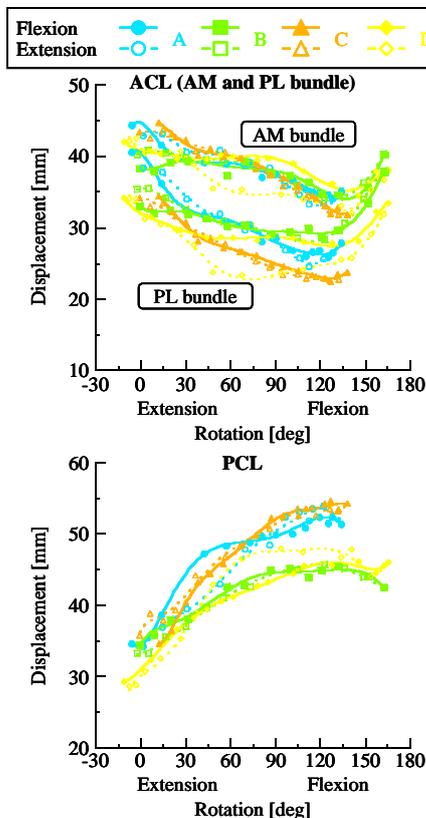


図8 スクワット動作を対象とした膝十字靭帯附着部位間距離の変位

め、ACL が急激な伸びを起こしていると推察できる。

以上のことより、本手法における生体関節を対象とした正確な 6 自由度動態解析技術を用いることで、生体膝における運動メカニズムや膝十字靭帯の機能的評価を定量化することが実現できていることから、関節動態のヘリカル軸表記や靭帯附着部位間変位等の関節疾患診断に有効なツールとしての有用性があると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 27 件)

- ① 健全生体膝を対象としたスクワット動作時における動態解析, 下戸健, 日垣秀彦, 白石善孝, 中西義孝, 濱井敏, 田代泰隆, 三浦裕正, 岩本幸英, 臨床バイオメカニクス, Vol. 31, pp.363-368, 2010年10月
- ② 健全生体膝を対象とした Stair-climbing 動作時における動態解析, 白石善孝, 日垣秀彦, 下戸健, 中西義孝, 田代泰隆, 三浦裕正, 岩本幸英, 臨床バイオメカニクス, Vol. 31, pp.357-362, 2010年10月
- ③ Knee kinematics in medial osteoarthritis during in vivo weight-bearing activities, Hamai S, Moro-Oka TA, Miura H, Shimoto T, Higaki H, Fregly BJ, Iwamoto Y, Banks SA, Journal of Orthopaedic Research, 27(12), pp.1555-1561, 2009年12月
- ④ 深屈曲動作時における生体膝の動態解析, 白石善孝, 日垣秀彦, 下戸健, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 臨床バイオメカニクス, Vol. 30, pp. 215-221, 2009年9月
- ⑤ 骨密度情報に基づく X線透過シミュレーションによる生体関節動態解析手法の開発, 日垣秀彦, 白石善孝, 下戸健, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会論文集 C 編, 75 巻, 755 号, pp. 148-154, 2009年7月
- ⑥ Three-dimensional knee joint kinematics during golf swing and stationary cycling after total knee arthroplasty, Hamai S, Miura H, Higaki H, Shimoto T, Matsuda S, Okazaki K, Iwamoto Y, J Orthop Res. 26(12), pp.1556-61, 2008年12月
- ⑦ ゴルフスイングおよびエアロバイク時における人工膝関節の動態解析, 濱井敏, 三浦裕正, 日垣秀彦, 下戸健, 松田秀一, 岩本幸英, 日本整形外科スポーツ医学会雑誌, 28(3), pp.191-196, 2008年11月
- ⑧ Kinematic analysis of kneeling in cruciate-retaining and posterior-stabilized total knee arthroplasties, Hamai S, Miura H, Higaki H, Matsuda S, Shimoto T, Sasaki K, Yoshizumi M, Okazaki K, Tsukamoto N, Iwamoto Y, J

Orthop Res. 26(4), pp.435-442, 2008 年 4 月

- ⑨Dynamic activity dependence of in vivo normal knee kinematics, Moro-Oka T, Hamai S, Miura H, Shimoto T, Higaki H, Fregly BJ, Iwamoto Y, Banks SA, J Orthop Res. 26(4), pp.428-434, 2008 年 4 月
〔学会発表〕(計 128 件)
- ①生体関節における 6 自由度動態解析手法を用いた stair-climbing 動作時の機能評価, 西松和穂, 白石善孝, 下戸健, 日垣秀彦, 中西義孝, 三浦裕正, 日本機械学会九州学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 大分, 2011 年 3 月 11 日
- ②生体関節における 6 自由度動態解析手法を用いたスクワット動作時の機能評価, 池部怜, 白石善孝, 下戸健, 日垣秀彦, 中西義孝, 三浦裕正, 日本機械学会九州学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 大分, 2011 年 3 月 11 日
- ③ヘリカル軸を用いた生体膝における深屈曲動作時の動態解析, 白石善孝, 岩尾光太郎, 下戸健, 日垣秀彦, 中西義孝, 田代泰隆, 濱井敏, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会第 23 回バイオエンジニアリング講演会, 熊本, 2011 年 1 月 8 日
- ④歩行動作時における健常生体膝の 6 自由度動態解析, 白石善孝, 岩尾光太郎, 下戸健, 日垣秀彦, 中西義孝, 田代泰隆, 濱井敏, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋, 2010 年 9 月 8 日
- ⑤スクワット動作時における健常生体膝の 6 自由度動態解析, 佐藤慎, 日垣秀彦, 下戸健, 白石善孝, 三浦裕正, 日本機械学会九州学生会第 41 回学生員卒業研究発表講演会, 宮崎, 2010 年 3 月 9 日
- ⑥深屈曲動作時における健常生体膝の 6 自由度動態解析, 白石善孝, 日垣秀彦, 下戸健, 岩尾光太郎, 濱井敏, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会第 20 回バイオフロンティア講演会, 和歌山, 2009 年 11 月 7 日
- ⑦健常生体膝を対象としたスクワット動作時における動態解析, 下戸健, 日垣秀彦, 白石善孝, 中西義孝, 濱井敏, 田代泰隆, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本臨床バイオメカニクス学会第 36 回日本臨床バイオメカニクス学会, 松山, 2009 年 10 月 16 日
- ⑧健常生体膝を対象とした Stair-climbing 動作時における動態解析, 白石善孝, 日垣秀彦, 下戸健, 中西義孝, 濱井敏, 田代泰隆, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本臨床バイオメカニクス学会第 36 回日本臨床バイオメカニクス学会, 松山, 2009 年 10 月 16 日
- ⑨生体膝を対象とした Stair-climbing 動作時における動態解析, 白石善孝, 日垣秀彦, 下戸健, 濱井敏, 中西義孝, 三浦裕正, 岩

本幸英, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 盛岡, 2009 年 9 月 15 日

- ⑩Analysis of natural knee joint motion in a computer simulation method using high-resolution X-ray images and CT images, Shiraishi Y, Higaki H, Hamai S, Shimoto T, Nakanishi Y, Miura H, Iwamoto Y, Fourth Asian Pacific Conference on Biomechanics, NZ, 2009 年 4 月 14 日
- ⑪エアロバイク使用時における人工関節置換膝の動態解析, 武井英二, 日垣秀彦, 下戸健, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会九州学生会第 40 回卒業研究発表講演会, 福岡, 2009 年 3 月 9 日
- ⑫スクワット動作時における健常生体膝の動態解析, 白石善孝, 福島辰巳, 日垣秀彦, 下戸健, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会第 21 回バイオエンジニアリング講演会, 札幌, 2009 年 1 月 24 日
- ⑬深屈曲動作時における生体膝の動態解析, 白石善孝, 日垣秀彦, 下戸健, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本臨床バイオメカニクス学会第 35 回日本臨床バイオメカニクス学会, 大阪, 2008 年 11 月 14 日
- ⑭ゴルフスイング時における人工関節置換膝の動態解析, 福島辰巳, 日垣秀彦, 白石善孝, 下戸健, 濱井敏, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会第 19 回バイオフロンティア講演会, 東京, 2008 年 9 月 24 日
- ⑮生体膝を対象とした深屈曲時における動態解析, 白石善孝, 福島辰巳, 日垣秀彦, 下戸健, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 横浜, 2008 年 8 月 5 日
- ⑯イメージマッチングによる PS 型人工関節置換膝の動態解析, 福島辰巳, 日垣秀彦, 白石善孝, 下戸健, 濱井敏, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 横浜, 2008 年 8 月 5 日

〔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