

平成 30 年 6 月 30 日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26350537

研究課題名(和文) 骨関節統計動態モデルを用いた高度関節機能診断・手術支援システム

研究課題名(英文) Advanced joint function diagnosis and surgical assisted system using bone joint statistical motion models

研究代表者

山崎 隆治 (Yamazaki, Takaharu)

埼玉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40432546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：人工関節を含めた骨関節の正確な3次元動態を把握することは、精密な関節機能や手術手技の評価、新しい人工関節開発のための基礎データの取得等に非常に重要である。特に、骨関節に対する治療(もしくは手術)の方針・意思決定の際には、関節の形態や解剖学的構造だけでなく運動・動態機能を正確に診断する必要がある。そこで本研究では、術後成績の不良な人工関節や疾患(病態)のある骨関節の統計動態モデル(病態統計動態モデル)を構築し、それらを従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術に基づく3次元動態計測法に導入することにより、これまでの臨床になかった高度な関節機能診断・手術支援システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Accurate 3D kinematic analysis for bone joint including artificial implant is very important for understanding the complexity of joint mechanics and for evaluating the outcome of surgical procedures. In particular, for determine of treatment strategy in the bone joint, it is necessary to accurately diagnose not only the joint anatomical structure but also the joint function (kinematics). In this study, we have developed the bone joint statistical motion models with disease, and incorporated the diseased models into 3D kinematic analysis method based on conventional 2D/3D registration techniques. In this way, we achieved an advanced joint function diagnosis and surgical assisted system using bone joint statistical motion models.

研究分野：画像解析

キーワード：画像処理・認識 情報工学 骨関節 3次元動態 統計動態モデル 機能診断 手術支援 機械学習

1. 研究開始当初の背景

(1) 整形外科領域において、術後の人工関節や骨関節の正確な3次元動態を定量的に把握することは、精密な骨関節機能診断や手術手技の評価、人工関節開発用の基礎データの取得といった医学応用において非常に有用な情報を提供する。特に、骨関節に対する治療（もしくは手術）の方針・意思決定の際には、関節の形態や解剖学的構造だけでなく運動・動態機能を正確に診断することが重要である。

これまでに、骨関節に対する正確な3次元動態の計測・解析手法として、X線動画像を用いた2次元/3次元画像位置合わせ技術の適用により、対象モデルの位置と姿勢を推定する手法[1-7]が、国内外を含めて数多く提案されている。いずれの手法（アルゴリズム）においても、特に人工膝関節については、臨床適用可能な動態解析精度に達しているが、計測・解析処理に莫大な時間と労力（マニュアル操作）を必要とし、現時点においても決して実用的であるとは言えない。また、人工関節に置換されていない骨関節の精密な3次元動態計測・解析については、精度、解析時間（主にマニュアル処理による多大な労力と手間）の改善の必要性を含め、少なからず課題を残している。したがって、これまでの臨床では、多大な時間をかけて解析した術後の人工関節3次元動態データの利用法として、“デザインや手術方式に依存した関節機能の術後確認”や“人工関節を開発するための基礎データ”に活用することが多く、術前の骨関節3次元動態データを含めて、日常臨床における関節機能診断や手術支援といった医学利用（医療の意思決定への応用）には至っていなかった。

(2) 本研究代表者は、これまでに、骨関節の正確な3次元動態を、マニュアル操作を必要とせず、自動かつ高精度に計測・解析する手法の開発を行ってきた[8,9]。この研究では、これまでに時間と労力をかけて解析した骨関節の動態データ（主に人工膝関節の動態データ）を、各デザイン別や動作別に分けた“骨関節統計動態モデル”として表現し、従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術に導入・利用した。ここで骨関節統計動態モデルとは、骨関節の標準的な（平均な）動きとそのバリエーション（バラツキ）を意味する。本手法は、正常な動き（術後成績の良い人工関節や健康な骨関節）のみを対象に適用されたが、自動かつ高精度な計測を達成する上で、骨関節統計動態モデルの構築・利用が極めて有望なアプローチであると実感した。

このような経緯を踏まえ、本研究代表者はこれまでの研究成果をさらに発展させ、術後成績の不良な（健康な関節運動機能を有しない）人工関節や疾患（病態）のある骨関節を対象とした統計動態モデルを構築・利用することにより、正常・病態機能兆候の発見など

今までの臨床になかった高度な関節機能診断・手術支援システムの開発ができるのではないかとこの着想に至り、本研究を実施する動機となった。

2. 研究の目的

研究開始当初の背景より、本研究の目的は、X線動画像を用いた2次元/3次元画像位置合わせ技術によって計測・解析された骨関節3次元動態データの中で、術後成績の不良な人工関節や疾患（病態）のある骨関節の統計動態モデル（病態統計動態モデル）を構築・利用し、これまでの臨床になかった高度な関節機能診断・手術支援システムの開発を行うことである。

実施内容としては、これまでの正常な骨関節動態データに加え、高度な関節の機能診断・手術の意思決定に役立てるために、術後成績の不良な（健康な関節運動機能を有しない）人工関節や疾患（病態）のある骨関節の3次元動態を計測・解析し、それら多数の症例データから統計動態モデル（病態統計動態モデル）の表現形式、正規化法、利用法を開発する。実際には、2次元/3次元画像位置合わせ技術により計測された3次元動態データを、手術方式（人工関節の設置状態や靭帯切除の有無など）や疾患（変形性関節症や靭帯損傷など）ごとに分類し、統計的に解析、平均動態とバラツキを推定するモデリング法の開発や、解析結果の関連性などをモデル化する。開発した病態統計動態モデルを用いて、既に人工関節置換が行われている対象者に対しては、動態計測・解析の結果から、中・長期における関節機能の状態や再手術の可能性などの予測性能を明らかにする。また、人工関節置換のない対象者に対しては、疾患の可能性の有無、手術の必要性や方式などの予測性能を明らかにする。

最終的に、各病態統計動態モデルの構築とそれを利用した高度関節機能診断・手術支援システムの開発・実装において、様々な関節における異なる手術方式や疾患ごとの統計動態モデルに対応できるよう、対象関節部位に依存しない汎用的な動態計測・解析システムを構築する。

3. 研究の方法

(1) 骨関節医用画像データベースの整備

これまでの既存のデータベースに加えて、今後も多数の症例データが見込まれる、人工膝関節、人工股関節、膝関節を対象として、研究分担者や研究協力者とともに、骨関節医用画像の取得、データベースの整備を行う。人工膝関節および膝関節については、X線動画像による動態データ（歩行、スクワット動作）、CT画像による形態データをそれぞれ50～100例以上収集し、CT画像に対しては関節領域を分離・抽出処理したデータを使用する。人工股関節については、X線動画像による動態データを30例以上収集する。当初は、人

人工膝関節と膝関節を対象に開発を行う。

(2) 骨関節 3次元動態解析と解析結果の分類・手術情報との関連付け

それぞれ(1)で取得したデータに対して、従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術[3]、およびこれまでに開発した骨関節統計動態モデルに基づく自動計測・解析手法[8,9]を併用しながら、人工膝関節、膝関節の精密な3次元動態解析を行う。その際、正常・健常な関節動態以外のバリエーションを含む関節のデータ(すなわち、術後成績の不良な人工関節や疾患のある関節)に対しては、前述の手法のみでは解析が不十分となるため、そのようなデータについては、時間をかけマニュアル操作もまじえて丹念に結果を確認しながら解析を行う。

次に、動態解析結果の分類を行う。まず、膝・股関節の専門医師(研究協力者)の協力のもと、正常・健常な関節動態解析データとそれ以外の解析データの2クラス(正常クラスと異常クラス)について、人工膝関節、膝関節ともに分類を行う。さらに解析データの増加により、異常クラスの中で、人工膝関節については手術方式(人工関節の設置状態や靭帯切除の有無など)、膝関節については疾患(変形性関節症や靭帯損傷など)ごとに分類する。手術方式、疾患ごとに分類できるだけのデータ収集が進んでいない場合は、当面、2クラス(正常クラスと異常クラス)のみに分けて研究を進める。

以上のクラス分けを、人工膝関節については、短期・中期・長期データ(術後3~5年、術後5~10年、術後10年以上の動態解析データ)ごとに行い、臨床スコア・手術情報(再手術の有無など)と関連付けし、膝関節については、手術の有無、手術方式など関連付けしておき、対象者ごとにデータベース化する。

(3) 病態統計動態モデルの構築・利用法の開発

(2)でクラス分けされた、異常クラスの関節動態解析データを使用して、多数の個体間の関節動態の変化・傾向を定量的に記述するために、統計解析(主成分分析、正準相関分析など)を行い、関節動態の多様性を効率よく表現するための方法(表現形式)を開発する。また、関節運動は同一速度とは限らないために、それら動態データを最適に正規化する手法を開発する。開発した表現形式、正規化法により、病態統計動態モデルを構築し利用法を検討する。

(4) 高度関節機能診断・手術支援システムの開発

(3)で構築したモデル(病態統計動態モデル)を、これまでに開発した正常・健常な骨関節統計動態モデルとともに、2次元/3次元画像位置合わせ技術に導入・実装する。また、各クラス間を識別する手法としてサポート

ベクタマシンなどの機械学習法を用い、高度関節機能診断・手術支援システムのプロトタイプを完成させる。また、交差検定によりシステムの精度評価を行う。具体的には、人工膝関節の対象者に対しては、関節動態の異常の有無、中・長期における関節機能の状態や再手術の可能性、膝関節の対象者に対しては、疾患の可能性の有無、手術の必要性や方式の予測性能を確認する。

(5) 異なる関節への応用のためのデータベースの整備、病態統計動態モデルの改良と拡張

人工膝関節と膝関節の他、人工股関節に対してもX線動画像による動態データベースの整備を進め、人工股関節の3次元動態解析および、解析結果の分類(正常・異常のクラス分け)や手術情報との関連付けを行い、データベースを拡張する。また、(3)で開発した手法を改良し、人工股関節に対しても適用できるように手法を拡張する。

(6) 統計動態モデル・プラグインシステムの開発と評価

様々な統計動態モデルに対応できるよう、対象関節部位に依存しない汎用的な動態計測・解析システムを組み込み、プラグイン型高度関節機能診断・手術支援システムの開発と評価を行う。

4. 研究成果

(1) 骨関節医用画像データベースの整備
骨関節医用画像データベースの整備については、特に、人工膝関節と膝関節を対象に、X線動画像による動態データ(スクワット動作など)CT画像による形態データを取得し、最終的に人工膝関節は100症例以上、膝関節は60症例程度のデータをそれぞれ収集することができた。

(2) 骨関節 3次元動態解析と解析結果の分類・手術情報との関連付け

それぞれの取得したデータを用いて、従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術、および骨関節統計動態モデルに基づく自動計測・解析手法を併用しながら、人工膝関節、膝関節の精密な3次元動態解析と、解析結果の分類を行った。人工膝関節と膝関節の両関節において、人工膝関節は手術方式(人工関節の設置状態や靭帯切除の有無など)、膝関節は疾患(変形性関節症や靭帯損傷など)ごとに分類できるだけの十分なデータ数が得られなかったため、最終的に2クラス(正常クラスと異常クラス)のみに大きく分類して研究を進めた。

(3) 病態統計動態モデルの構築・利用法の開発

病態統計動態モデルの構築は、人工膝関節、膝関節の各々に対して前述(2)の異常クラス

の関節動態解析データを使用し、関節動態の多様性を効率よく記述する手法(平均動態とバラツキを推定するモデリング法)を開発した。

(4) 高度関節機能診断・手術支援システムの開発

構築した人工膝関節および膝関節に対する病態統計動態モデルを、正常・健常な骨関節統計動態モデルとともに、2次元/3次元画像位置合わせ技術に導入・実装し、高度関節機能診断・手術支援システムのプロトタイプを開発した。特に、人工膝関節に関しては、症例数および動態解析データの大幅な増加により、様々なパターンの病態統計動態モデルの導入が可能となった。開発したプロトタイプシステムの性能評価を行ったところ、人工膝関節対象者に対しては、関節動態の異常の有無を識別でき、また、中・長期における関節機能の状態や再手術の必要性を予測できる可能性が示唆された。同様に、膝関節対象者に対しては、疾患の有無を識別できる可能性が示唆された。

(5) 異なる関節への応用のためのデータベースの整備、病態統計動態モデルの改良と拡張

人工股関節に関しては、X線動画による動態データベースの整備を進め、当初の予定であった30症例以上のデータを収集することができ、3次元動態解析および解析結果の分類(正常・異常のクラス分け)を行った。また、(3)で開発した人工膝関節および膝関節に対する病態統計動態モデルの構築法を、人工股関節にも適用可能な手法に改良・拡張を行い、汎用的な関節統計動態モデルの構築法の開発を行った。

(6) 統計動態モデル・プラグインシステムの開発と評価

様々な関節統計動態モデルに対応できるよう、対象関節部位に依存しない汎用的な動態計測・解析システムを組み込み、プラグイン型高度関節機能診断・手術支援システムの開発と評価を行った。

最終的に、人工膝関節対象者については、関節動態の異常の有無を高精度で識別でき、また、中・長期における関節機能の状態や再手術の必要性など、高い精度で予測できることが確認された。同様に、膝関節対象者に対しても、疾患の識別や手術の必要性の有無など、ある程度の精度で予測できる可能性があり、今後のさらなる計測・解析症例数の増加にともない、より高度な関節機能診断・手術支援が期待できる。人工股関節の対象者については、症例、解析データ数が30例程度にとどまったが、開発したシステムを用いた性能評価実験では、人工膝関節と同様に、関節動態の異常の有無を識別でき、中・長期における関節機能の状態や再手術の必要性など

ある程度予測できることが示唆された。

(7) 得られた成果のインパクト、今後の展望など

本研究は、骨関節の3次元動態を様々な疾患・症例ごとなどに分類し、病態統計動態モデルとして構築・利用するため、正常・健常な関節動態以外の様々なバリエーションの動きに対しても、迅速(自動的)かつ高精度に計測・解析が可能となる。

開発したシステムは、従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術に、正常な骨関節統計動態モデル、病態統計動態モデルを構築・導入するという一貫したモデルベースアプローチのため、計測・解析症例数の増加により、モデル性能が向上し、より高度な関節機能診断・手術支援が期待できる。

<引用文献>

- [1] Zuffi S, et al: A model-based method for the reconstruction of total knee replacement kinematics. IEEE Trans Med Imag 18: 981-991, 1999
- [2] Mahfouz MR, et al: A robust method for registration of three-dimensional knee implant models to two-dimensional fluoroscopy images. IEEE Trans Med Imag 22: 1561-1574, 2003
- [3] Yamazaki T, et al: Improvement of depth position in 2-D/3-D registration of knee implants using single-plane fluoroscopy. IEEE Trans Med Imag 23: 602-612, 2004
- [4] Kobashi S, et al: Fuzzy image matching for pose recognition of occluded knee implants using fluoroscopy. J Advanced of Computational Intelligence and Intelligent Informatics 9: 181-195, 2005
- [5] 小笠原政夫, 山崎隆治, 佐藤嘉伸, 他: 投影輪郭点に基づくロバスト2D/3D位置合わせによる人工膝関節の位置・姿勢推定. 電子情報通信学会誌, Vol.J90-D No.11 pp.3033-3042, 2007
- [6] Moro-oka T, et al: Dynamic activity dependence of in vivo normal knee kinematics. Journal of Orthopaedic Research 26: 428-434, 2008
- [7] Hirokawa S, et al: A 3D kinematic estimation of knee prosthesis using X-ray projection images: Clinical assessment of the improved algorithm for fluoroscopy images. Med and Biol Eng and Comput 46: 1253-1262, 2008
- [8] 亀井亮吾, 山崎隆治, 岡田俊之, 福田紀生, 菅本一臣, 吉川秀樹, 陳延偉, 富山憲幸, 佐藤嘉伸「2D/3D レジストレーションによる人工膝関節の動態解析自動化を目的とした動作モデルの利用」電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112 No.271 pp.49-54, 2012
- [9] 亀井亮吾, 山崎隆治, 岡田俊之, 福田紀生, 菅本一臣, 吉川秀樹, 陳延偉, 富山憲幸,

佐藤嘉伸「統計動態モデルを用いた人工膝関節の口バスト3次元動態計測」電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112 No.411 pp.19-24, 2013

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7件)

K. Wada, H. Mikami, D. Hamada, T. Yamazaki, T. Tomita, K. Sairyo, "Can intraoperative kinematic analysis predict postoperative kinematics following total knee arthroplasty? A preliminary study" The Journal of Medical Investigation, Vol.65 Issue 1.2 pp.21-26 2018 (査読あり)
DOI: 10.2152/jmi.65.21

橘優太, 前達雄, 松尾知彦, 富田哲也, 山崎隆治, 史野根生, 吉川秀樹, 中田研「OKC および CKC 動作中の ACL 不全膝の関節動態解析」日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会雑誌, Vol.42 No.3 pp.511-516 2017 (査読あり)

角野隆信, 富田哲也, 菅本一臣, 山崎隆治「FNK PS 型人工膝関節における生体内3次元動態解析と可動域の相関関係」日本臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.37 pp.261-265 2016 (査読あり)

〔学会発表〕(計 48件)

T. Yamazaki, T. Tomita, Y. Sato, H. Yoshikawa, K. Sugamoto, "Robust 3D kinematic analysis of total knee arthroplasty using statistical motion model" Proceedings of the 17th Annual Meeting of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery (CAOS-International), Aachen, Germany, 14-17 June, 2017

河野賢一, 富田哲也, 山崎隆治, 藤戸稔高, 二井数馬, 吉川秀樹, 田中栄, 菅本一臣「正常膝の深屈曲動作における生体内靭帯長変化」第90回日本整形外科学会学術総会, 仙台国際センター, 東北大学(川内キャンパス), 5. 18-21. 2017

K. Kono, T. Tomita, T. Yamazaki, T. Fujito, Y. Inou, K. Futai, S. Tanaka, H. Yoshikawa, K. Sugamoto, "In Vivo Three Dimensional Kinematics During Stair Motion In Single-Radius Total Knee Arthroplasty" Proceedings of the 16th Annual Meeting of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery (CAOS-International), Osaka, Japan, 8-11 June, 2016

6. 研究組織

(1)研究代表者

山崎 隆治 (YAMAZAKI, Takaharu)
埼玉工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 40432546

(2)研究分担者

佐藤 嘉伸 (SATO, Yoshinobu)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 70243219

(2) 研究分担者

菅本 一臣 (SUGAMOTO, Kazuomi)
大阪大学・医学系研究科・寄附講座教授
研究者番号: 40294061