

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23700206

研究課題名(和文) 骨関節を対象とした統計動態モデルに基づく自動3次元動態解析システム

研究課題名(英文) Automated 3D kinematic analysis system for bone joint based on statistical motion models

研究代表者

山崎 隆治 (Yamazaki, Takaharu)

大阪大学・臨床医工学融合研究教育センター・特任准教授(常勤)

研究者番号：40432546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：人工関節を含めた関節の正確な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、また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。従来の方法として、X線透視画像と関節のCADモデルを用いた2次元/3次元画像位置合わせ技術による解析手法があったが、画像の輪郭抽出処理や、位置合わせの際の初期点推定に多くのマニュアル作業が介在し、解析者は多大な労力を必要とした。そこで本研究では、関節の統計動態モデルに基づく自動3次元動態解析システムの開発を行った。システムの評価を行ったところ、解析労力を大幅に削減し、精度と自動化において臨床でも十分に運用可能なことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Accurate 3D kinematic analysis for bone joint is very important for understanding the complexity of joint mechanics and for evaluating the outcome of surgical procedures. To achieve 3D kinematic analysis of bone joint, 2D/3D registration techniques, which use X-ray fluoroscopic images and computer aided design (CAD) model of the bone joint, have been applied to clinical cases. However, in previous study, spurious edges and noises from the edge detection of the bone joint silhouette were erased manually, and initial pose setting for each X-ray image also needed intensive manual operations. In this study, therefore, we developed automated 3D kinematic analysis system for the bone joint based on statistical motion models. In order to validate the developed system, in vivo experiments were performed. The results showed that the estimation accuracy and stability was sufficient in clinical application, and the feasibility and effectiveness of the developed system was demonstrated.

研究分野：画像解析

キーワード：画像処理・認識 生体工学 情報工学 骨関節 3次元動態 統計動態モデル 知識モデル 自動解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 関節外科領域において、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、精密な骨関節病態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、手術計画支援といった医学応用において非常に重要である。これまでに、骨関節の正確な動態解析手法として、X線動画像を用いた“2次元/3次元画像位置合わせ技術”の適用によって、対象モデルの位置と姿勢を推定し[1-7]、動きを含めた3次元動的な動態計測・解析手法が提案、実施されている。しかしながら、報告されている計測・解析手法では、解析処理に莫大な時間と労力を要し、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次元動態解析については未だ研究・開発段階であり、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)の改善を含め、骨関節3次元動態解析の自動化および高精度化を実現したシステム開発が急務となっている。

(2) 欧米においては、人工膝関節を対象として、X線透視装置より得られる連続X線画像を用いた3次元動態解析手法[1-3]が報告されており、その動態が徐々に明らかにされ現在も計測および解析が精力的に行われている。国内においても、近年、人工膝関節を含めた各種関節の正確な3次元動態解析の重要性が認識され、様々な計測・解析手法が提案されている[4-7]。これらの手法は、2次元/3次元画像位置合わせ技術をベースとしており、主に精度改善や安定性の向上という点に関して、積極的に研究が取り組まれているが、一方で計測・解析の時間や労力を軽減するシステムの開発、すなわち、システムの自動化という観点からは研究が行われていない。2次元/3次元画像位置合わせ技術は、一般的に、“対象モデルの形状”や“画像のノイズ”、“位置合わせの際の初期値”にその精度や安定性が影響されるが、特に画像ノイズの削除や初期値の適切な操作(いずれも多くの場合この処理にマニュアル操作が必要となる)が、時間や労力を増大させる主要因となっており、動態解析データの高速・量産化や通常の画像診断・治療応用へのボトルネックとなっていた。人工膝関節の動態解析だけに限っても数多くのインプラントデザインや様々な対象動作(歩行、スクワット、階段昇降など)が存在し、さらに1動作あたりに得られる連続X線画像は膨大な数であることから、現状では詳細なデータを高精度でかつ短時間に計測・解析することは困難となっている。さらに画像ノイズに関しては、解析対象が人工関節ではなく骨関節となった場合、X線投影画像のコントラストや鮮鋭度の低下により、ノイズ削減処理の時間や労力が増加し、結果として動態解析には膨大な時間を要することになる。

(3) このような背景のもと、本研究代表者は、今後他の人工関節(股関節、肘関節など)や人工関節に置換されていない骨関節への応用を考えると、動態解析システムの自動化は必須であり、その第一ステップとして人工膝関節を対象にシステムの自動化・高精度化の研究を行ってきた。画像ノイズの問題に関しては、統計学的アプローチによるロバスト推定法を導入することで、自動的に安定かつ高精度な推定を実現したが[6]、位置合わせにおける初期値の操作に関しては、半自動的な手法にとどまり未だ問題となっていた。一方で、これまでに多大な時間と労力をかけて得られた様々なデザインの人工関節や各種動作における動態解析データが着実に蓄積され、これら動態データは個々の特性が凝縮された貴重な3次元データと位置づけることができる。そこで本研究代表者は、これら貴重な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、これらの統計動態モデルを利用することで、位置合わせにおける初期値の操作を全く行うことなく完全自動化できないかとの着想に至った。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。また骨関節統計動態モデル自身は、新たに計測・解析されたデータを追加していくことで(つまり学習させることで)より信頼性の高い統計動態モデルを生成することができ、システムの性能(精度と自動化)を限界まで向上させることができるのではないかとこの発想に至り、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から、本研究の目的は、2次元のX線動画像を用いて、従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術に“骨関節統計動態モデル”を構築・導入することにより、骨関節の高精度かつ自動化を実現する3次元動態解析システムを開発することである。実施内容としては、これまで大量の動態データが蓄積された人工膝関節を対象に、骨関節統計動態モデルの表現形式、正規化法を開発し、骨関節統計動態モデルの構築を行う。具体的には、人工膝関節の統計動態モデルを、各人工膝関節デザイン別、各種動作別に統計的に解析し、平均動態とバラツキを推定するモデリング法を開発する。また開発した手法を拡張し、これまでのシステムで時間と労力をかけて得られた多部位の人工関節(股関節や肘関節)や人工関節に置換されていない骨関節(膝関節)の一部動態データに対しても、汎用的な統計動態モデル構築として可能なモデリング法を開発する。最終的に構築した骨関節統計動態モデルを、2次元/3次元画像位置合わせ技術を用いた関節3次元動態解析システムに応用し、システムの自動化と高精度化を実現する。

3. 研究の方法

(1) 骨関節統計動態モデルの表現形式・正規化法の開発とモデル構築

第一ステップとして人工膝関節を対象とし、従来の関節3次元動態解析システムによって時間と労力をかけて得られた大量の精密な動態データを用いて、骨関節統計動態モデル構築する。

これら大量の解析データは、人工膝関節を構成する2つのコポーネント部分、すなわち大腿骨コポーネントおよび脛骨コポーネントごとに蓄積されており、基準座標系における各6自由度のデータ(3つの並進運動パラメータと3つの回転運動パラメータ)をもつ(計12自由度のデータとして蓄積)。具体的には、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、これまで蓄積された関節動態データは、撮影画像の収集レート等必ずしも撮影条件が統一されたものではなく、各関節運動も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。当初は実験的に、同一デザイン機種、同一動作に焦点を絞り、開発した表現形式、正規化法により人工膝関節の統計動態モデルを構築する。

構築した人工膝関節統計動態モデルの標準(平均)動態とバリエーションを分析し、その妥当性(統計動態モデルの記述精度)を検証する。本研究では、2次元/3次元画像位置合わせの際に“適切な初期値”が得られているかという観点で統計動態モデルの記述精度の検証を行う。同様に、人工膝関節のデザイン別、動作別に手法の検証を行い、必要が生じれば統計動態モデリング法の改良および関節統計動態モデルの構築を行う。

(2) 骨関節統計動態モデルを応用した関節自動3次元動態解析システムの開発

(1)で構築した人工膝関節統計動態モデルを、従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術を用いた関節3次元動態解析システムに導入し、自動化・高精度化システムのプロトタイプを完成させる。関節自動3次元動態解析システムの自動化の達成度を評価するため、評価用データとしてこれまで解析した大量の人工膝関節動態データを使用し、臨床要求精度(1mm、1°以内)を満たす解析データの自動化率を求める。

(3) 骨関節X線動画像データベースの構築

(1)で開発した骨関節統計動態モデルの表現法、正規化法他関節(人工股関節、人工肘関節、膝関節)への利用・有効性を検証するために、各関節について少なくとも20例以上のデータ収集が必要であり、各関節のX線動画像の収集および3次元動態解析を含め

たデータベースの整備を行う。

(4) 骨関節統計動態モデルの拡張と改良

(1)で開発した骨関節統計動態モデルの表現法・正規化法を、人工股関節、人工肘関節、膝関節に適用し、統計動態モデルの記述精度を検証する。必要が生じれば汎用的な統計動態モデリング法に改良、関節統計動態モデルの構築を行う。

(5) 骨関節統計動態モデルを応用した関節自動3次元動態解析システムの評価と改良

(2)で開発したプロトタイプシステムにより新たに解析された人工膝関節の動態データは、より正確な統計動態モデルを生成するための学習データとなり得、これまでの大量データと合せた学習用データを用いて、one-leave-out 交差検定により学習機能の評価を行う。また、他の関節を含めた関節自動3次元動態解析システムへの拡張および自動率を限界まで向上させるシステムの改良を行う。

4. 研究成果

(1) 骨関節統計動態モデルの表現形式・正規化法の開発とモデル構築

骨関節統計動態モデルの構築は、第一ステップとして人工膝関節を対象とし、従来の関節3次元動態解析システムによって時間と労力をかけて得られた大量の精密な動態データを利用した。まず、同一デザイン機種(各機種について20例)、スクワット動作(荷重下屈曲動作)を対象として、大腿骨・脛骨コポーネントの基準座標系における各6自由度のデータから、関節動態の多様性を効率よく記述する手法(平均動態とパラツキを推定するモデリング法)を開発した。本手法によって構築した統計動態モデルの記述精度を、2次元/3次元画像位置合わせの際の“適切な初期値”が得られているかという観点で検証したところ、十分に自動解析が可能な精度であることが確認された。また、人工膝関節の他のデザイン機種についても十分に応用が可能であった。動作については、スクワット動作の他、椅子からの立ち座り動作、歩行動作を対象に統計動態モデルの構築を一部試みた。

(2) 骨関節統計動態モデルを応用した関節自動3次元動態解析システムの開発

構築した骨関節統計動態モデルを従来の2次元/3次元画像位置合わせ技術に導入したプロトタイプシステムを用いて、人工膝関節のスクワット動作を対象に、自動解析の評価実験を行った。臨床要求精度(1mm、1°以内)を満たす範囲では、約70%の自動化率(100枚の画像のうち70枚の画像)で解析が可能であり、ほぼ当初の目標が達成された。

(3) 骨関節X線動画像データベースの構築

人工膝関節以外の他の関節（人工股関節、人工肘関節、膝関節）データにおいて、目標とする 20 例以上のデータを収集、解析することができ、データベースの整備を含めて当初の目標を十分クリアすることができた。

(4) 骨関節統計動態モデルの拡張と改良

骨関節統計動態モデルの表現法・正規化法の改良を行い、人工膝関節のデザインや動作（スクワット動作、椅子からの立ち座り動作、歩行動作）だけでなく、他の関節（人工股関節、人工肘関節、膝関節）にも応用可能な汎用的な関節統計動態モデルの構築法を開発した。具体的には、関節の相対的な動きをモデリングする手法、および時間で正規化した絶対的な動きをモデリングする手法を開発した。本手法によって構築した関節統計動態モデルの記述精度を検証したところ、十分に自動解析が可能な精度を有していることが確認された。

(5) 骨関節統計動態モデルを応用した関節自動 3 次元動態解析システムの評価と改良

改良手法によって構築された人工膝関節の統計動態モデルを、2 次元/3 次元画像位置合わせ技術に導入したシステム（プロトタイプを拡張・改良したシステム）を用いて、関節自動 3 次元動態解析の性能評価を行ったところ、臨床要求精度（1mm、1° 以内）を満たす範囲では、80%以上の自動化率（100 枚の画像のうち 80 枚以上の画像）で動態解析が可能となり、当初目標としていた性能以上の成果が得られた。また、更なる改良により、特に人工膝関節については、条件により 90%以上の自動化率で動態解析が実行できる可能性が示された。

(6) 得られた成果のインパクト、今後の展望など

従来の 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る関節 3 次元動態解析システムでは、位置合わせの際の初期値を、各フレームごとに手間と労力をかけて適切に操作する必要があったが、骨関節統計動態モデルの構築と導入により、初期値操作を全く必要としないシステムの自動化および精度・安定性の向上が期待された。

骨関節統計動態モデルの構築、および X 線撮影と同時に動態解析結果が自動出力されるシステムの実現は、直ちに精密な診断や治療戦略を可能とするため、これまでの関節外科領域の検査方法・診療体系を大きく変える可能性があると考えられる。

<引用文献>

[1] Banks SA, et al: Accurate measurement of three-dimensional knee replacement kinematics using single-plane fluoroscopy. IEEE Trans Biomed Eng 43: 638-649, 1996

[2] Zuffi S, et al: A model-based method for the reconstruction of total knee replacement kinematics. IEEE Trans Med Imag 18: 981-991, 1999

[3] 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

[4] 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

[5] 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

[6] 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

[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

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

T. Yamazaki, K. Futai, T. Tomita, Y. Sato, H. Yoshikawa, S. Tamura, K. Sugamoto, "3D kinematics of mobile-bearing total knee arthroplasty using X-ray fluoroscopy" International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.10 Issue 4 pp.487-495 2015 (査読有)
DOI: 10.1007/s11548-014-1093-x

N. Shimizu, T. Tomita, T. Yamazaki, H. Yoshikawa, K. Sugamoto, "In Vivo Movement of Femoral Flexion Axis of a Single-Radius Total Knee Arthroplasty" The Journal of Arthroplasty, Vol.29 Issue 12 pp.2407-2411 2014 (査読有)
DOI: 10.1016/j.arth.2013.12.001

M. Tamaki, T. Tomita, T. Yamazaki, H. Yoshikawa, K. Sugamoto, "Factors in High-Flex Posterior Stabilized Fixed-Bearing Total Knee Arthroplasty Affecting In Vivo Kinematics and Anterior Tibial Post Impingement During Gait" The Journal of Arthroplasty, Vol.28 Issue 10

pp.1722-1727 2013 (査読有)
DOI: 10.1016/j.arth.2012.09.006

〔学会発表〕(計 55 件)

T. Sakai, J. Koyanagi, T. Yamazaki, M. Takao, T. Nishii, N. Sugano, H. Yoshikawa, K. Sugamoto, “Kinematic analysis of heels-down squatting after total hip arthroplasty” The 28th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery, Fukuoka, Japan, 25-28 June, 2014

山崎隆治, 亀井亮吾, 岡田俊之, 菅本一臣, 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 3 次元動態解析の自動化」日本放射線技術学会・第 70 回総会学術大会, パシフィコ横浜, 4. 10-13. 2014

T. Yamazaki, T. Tomita, Y. Sato, H. Yoshikawa, K. Sugamoto, “Accurate 3D measurement of normal knee kinematics using dynamic flat-panel detector images” The 27th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery, Heidelberg, Germany, 26-29 June, 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 隆治 (YAMAZAKI, Takaharu)

大阪大学・臨床医工学融合研究教育センター・特任准教授 (常勤)

研究者番号: 40432546