

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700452

研究課題名(和文) 整形外科人工関節手術計画における統計アトラスを用いた関節部応力状態の高速予測

研究課題名(英文) Fast prediction method for stress state of joint components based on statistical atlas in preoperative surgical planning

研究代表者

鍵山 善之(KAGIYAMA, Yoshiyuki)

山梨大学・総合研究部・助教

研究者番号：30506506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、整形外科人工関節手術計画における統計アトラスを用いた関節部応力状態の高速予測である。本研究では、多様な骨とインプラントの位置において商用ソルバによる応力解析を行い、その結果を学習データセットとして応力状態予測アトラスを構築した。20例を学習データセットとした実験の結果、予測値の平均誤差は正解値の20%未満となったことから、有効性を確認できた。また、他の評価基準とのバランス調整を行う手術計画アトラスも構築した。45例での実験の結果、1つ以上の評価値で整形外科医基準の四分位範囲の1.5倍による外れ値を取った計画数は、最適化前16例に対し、最適化後2例となり、十分な性能を確認できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to predict the stress state of a bone and an implant with statistical atlas for total hip replacement. We generated a prediction atlas of the stress state of a pelvis and an implant with various spatial relations. This prediction atlas is corresponded to position of the implant and implanted pelvis with predicting the stress of them. In the experiment, we performed leave-one-out cross validation with 20 candidates and obtained the results that average difference of stress state did not exceed 20% of original value. We also constructed a planning atlas with various criteria to ensure the best-balance of them. In the evaluation with 45 patients, the number of the plans which obtained at least one criterion, considered as an outlier according to 1.5 times the interquartile range based on the surgeon's plan, were 16 and 2 cases in the single implant plan and the optimal plan, respectively. We considered that these showed a usefulness of the proposed methods.

研究分野：医用画像解析、バイオエンジニアリング

キーワード：コンピュータ支援外科 有限要素解析 統計アトラス 手術計画 人工関節

1. 研究開始当初の背景

近年、高齢化の進行に伴い、関節部をインプラント、人工関節部品に置換する整形外科手術の術数が大きく増加しており、国内外で計算機支援外科関連の研究開発が進められている。既に術中支援システムについては、手術中にインプラント位置姿勢の誘導を行う手術ナビゲーションシステムや整形外科医に代わり骨切り、掘削等の作業を行う手術ロボットが開発され、商用システムとして利用されている。これらのシステムの利用には、事前に骨内に埋入設置されるインプラントの位置姿勢を決める手術計画が必要とされ、高い計画精度が求められる。

(1) 術後のインプラントの緩みや脱落を防止するには、手術計画においてインプラントと骨の応力状態を考慮して調整することが望ましいが、それが可能なシステムは一部の研究用のものに限定されていた。また、商用ソルバによる三次元有限要素解析では、プリポストを含め多大な処理時間がかかる他、その結果を元にインプラントの位置姿勢を変更する手間を考えると、容易にそうした評価を個々の患者の手術計画立案に導入することは難しい状況であった。

(2) 手術計画においては、応力状態だけでなく、関節可動域や左右の脚長を揃えるための脚長差など考慮すべき複数の評価基準が存在し、それらのバランスを考慮しながら、手術計画の調整を行う必要がある。しかし、一部の評価基準はトレードオフの関係にあり、全ての評価基準のバランスを取りながら、整形外科医が対話的に計画の調整を行うのは難しい場合が存在し、それを支援するシステムが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、前述の問題点を解決し、応力状態も含めた手術計画を容易に行えるようにするために、骨のセグメンテーション等に用いられている統計アトラス手法を応用して、以下の目的で研究を行った。

(1) 多様な骨とインプラントの位置関係で応力解析を行い、その解析結果を学習データセットとした、骨及びインプラントの応力状態を簡易予測する統計アトラスの開発(以後、応力状態予測アトラス)

(2) 整形外科医の手術計画における骨とインプラントの位置関係及び様々な臨床評価基準を学習データセットとした、最適手術計画を立案する手術計画アトラスの開発(以後、手術計画アトラス)

3. 研究の方法

本研究では、パイロットスタディとして人工股関節全置換術を対象として各手法の研

究開発を行った。人工股関節は、図1のように骨盤側がソケット、大腿骨側がボールとなる球関節になっており、それぞれ骨盤側インプラント(カップ、インサート)と大腿骨インプラント(ヘッド、ステム)に全置換される。応力状態予測アトラスの構築には、骨盤側インプラントであるカップとカップが埋入される骨盤を用いることとした。手術計画アトラスには、脚長差や関節可動域の測定に大腿骨側インプラントが必要のため、骨盤、大腿骨、全インプラントを対象とした。以下にそれぞれのアトラスの構築方法及び応力状態予測、手術計画バランス最適化手法を示す。

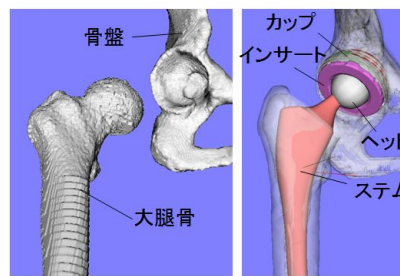


図1 股関節と人工股関節部品

(1) 骨盤及びカップの応力状態予測アトラスを構築にあたり、まず学習データセットの作成を行う。これまでに我々が提案したカップ手術計画自動立案法により、カップの設置可能位置を多数生成し、それぞれにおいてカップ及びカップの埋入設置された骨盤の三次元有限要素モデル(カップ骨盤結合モデル)を商用ソルバにより応力解析を行い、得られた応力値を内包したカップ骨盤結合モデルを生成し、これらを学習データセットとする。次に部分最小二乗回帰(PLSR)を用いた応力状態予測を行う。学習データのカップ骨盤形状とそれに対応する応力値からPLSモデルを構築して、未知のカップ骨盤形状における応力値を推定する(図2)。入力データはカップ、骨盤の結合した四面体メッシュモデルであり、出力は応力状態予測値となる。

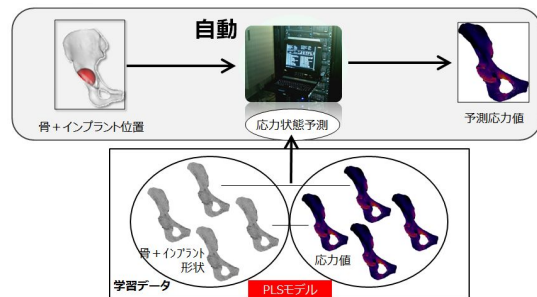


図2 PLSモデルを用いた応力状態予測。

(2) 手術計画アトラスは、単一インプラントと設置対象となる骨との位置関係や単一インプラントで評価される臨床評価値だけでなく、複数のインプラントを組合せ評価される臨床評価基準も含めて、人工股関節全体のバランス最適化を行う。最適化には、最大

事後確率 (maximum a posteriori, MAP) 推定を用いる。多数の学習データセットにおける整形外科医計画における各評価基準を解析することで、その評価基準がどの程度あれば、正常であるかをモデリングする。まず、図 3 (左) のように各評価基準のヒストグラムを作成し、平均 0, 分散 1 の半ガウス関数にマッピングすると、評価基準の値に対応する非適合度値 (図 3 (中央) の横軸の水色の数字) が小さいほど最適状態に近いことを示す。この非適合度を全評価基準に対して計算し (図 3 (右)), 最も非適合度の 2 乗和が小さくなるものを探索し、手術計画を最適化する。人工股関節全体で評価される評価基準は、骨盤側インプラントであるカップと大腿骨側インプラントであるステムの骨内設置位置姿勢の影響を強く受ける。ステムは、大腿骨内の狭小な隙間 (髓腔) に設置されるため、位置姿勢の再調整が難しいが、カップは骨盤ソケット内を掘削して設置するため、多様な設置可能性を持ち、再調整がステムに比べ容易である。そこで、臨床評価基準に加え、カップ及び骨盤の位置関係も含めた最適化を行う。

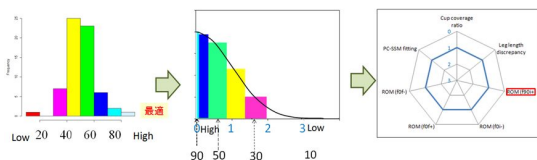


図 3 学習データセットに基づく各評価基準の非適合度計算。左: 評価基準のヒストグラム, 中央: ヒストグラムの半ガウス関数へのマッピングと非適合度計算, 右: 全評価値の非適合度レーダーチャート。

4. 研究成果

(1) 応力状態予測アトラスについては、人工股関節全置換術における骨盤側インプラント、カップと骨盤の応力状態予測の性能評価実験を実施した。対象は、二次性変形性交換折衝を罹患した女性骨盤で、カップ自動手術計画法により位置姿勢を決定したカップ骨盤結合モデル 20 個とし、leave-one-out 交差検定を実施した。学習データとなるカップ骨盤結合モデルの応力状態解析では、立位状態を想定して体軸方向に 1.5kN を加えた。拘束条件は、骨盤上部の仙腸関節部及び骨盤下部の恥骨結合部を完全拘束とした。モデルの応力解析時に使用した各モデルの物性値は縦弾性率を骨盤は 15GPa, カップは 110GPa, ポアソン比は共に 0.3 とした。学習に使用したデータは 4 面体メッシュで分割し、要素数は約 13 万個であった。解析に使用した商用ソルバには、くいと社 optishape-ts を、プリポストプロセッサには、SIEMENS 社の FEMAP Ver. 10.0.2 を使用した。応力状態予測に用いた計算機は、Windows Server 2008, Intel Xeon 3.33GHz, メモリ 24GB であった。応力状態予測アトラスによる応力値予測結果を正確となる商用ソルバでの算出値と

比較したところ、平均誤差は $18.5 \pm 5.3\%$ となった。提案アトラスでの応力状態予測時間は約 1 分となった。図 4 には応力状態予測の平均誤差が 18.1% となった典型例を示す。また、図 5 に平均誤差が 35.9% と最大になった例を示す。

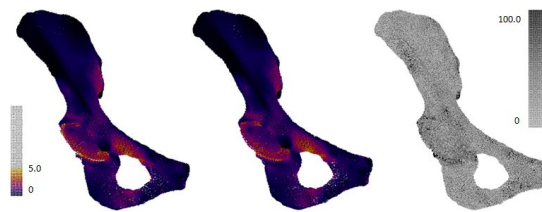


図 4 提案法による予測応力状態典型例。左: 正解応力状態, 中央: 予測応力状態, 右: 応力値の誤差マップ (百分率)。

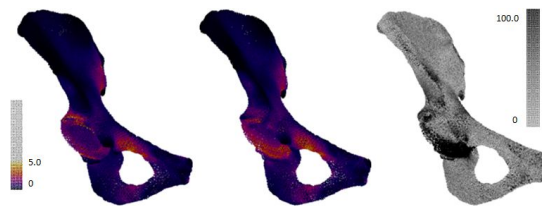


図 5 提案法による予測応力状態誤差最大例。左: 正解応力状態, 中央: 予測応力状態, 右: 応力値の誤差マップ (百分率)。

性能評価実験において、9 割以上のカップ骨盤結合モデルで商用ソルバによる正解値との誤差が約 10 から 20% 以内に収まっていたことから、適用した要素数が約 13 万の精細なモデルに対しても提案アトラスが有効に機能していることが確認できた。1 つのカップ骨盤結合モデルに対して、応力状態予測にかかる時間が約 1 分となり、従来の商用ソルバでは整形外科医の対話的操作が必要となるプリポストプロセスだけで 20 分ほどかかっていたことと比較すると大幅に短縮することができた。図の典型例では、応力状態予測誤差をグレースケールで示したマップにおいても、誤差の大きい領域に偏りは見られず、コンター表示による可視化確認するにあたっては商用ソルバとほぼ遜色のない結果が得られたと考えられる。一方で図に示す誤差最大例では、カップの輪郭が接する骨盤ソケットの縁付近で大きな誤差が生じていた。これは、適用したカップ骨盤結合モデルにおけるカップの位置が、学習データセットに用いたモデルにおけるカップ位置から離れており、外挿的予測となったことが原因と考えられる。

このように多くのカップ骨盤結合モデルにおいて、ユーザがコンター表示の可視化確認をするには、充分な予測精度で応力状態を予測できていたことから、高速簡易予測手法として提案アトラスが有効に機能することが確認できた。提案アトラスによる予測計算モジュールを並列化すれば、今後インプラントの位置姿勢調整時にほぼリアルタイムで

応力状態を予測し，そのモデル上に可視化表示することが可能になると考えられる．また，学習データの生成は必要になるものの，他のインプラント手術にも容易に適応可能であることから，今後は提案アトラスを用いて，応力解析のための対話的作業なしに操作中のインプラント及び骨の応力状態を確認できるようになることが期待できる．これにより術前の手術計画において，不適切な応力状態となる手術計画を簡単に除外でき，より低侵襲で安全な手術が実現されると考えられる．

(2) 手術計画アトラスについては，人工股関節全置換術における骨盤側インプラント(カップ，インサート)，大腿骨側インプラント(ヘッド，ステム)の全インプラントを対象に評価実験を行った．学習データセットは，整形外科医により立案された手術計画におけるカップ骨盤設置の適合性パラメータ，人工関節固定性，関節機能に関わる評価基準5種を用いた．同種のインプラントシステムを使用した人工股関節全置換術患者45例に適用したところ，1つ以上の評価基準で整形外科医計画での値を基準とした四分位範囲の1.5倍による外れ値を取った計画数は，提案アトラスによる最適化前が16例，提案アトラスによる最適化後が2例となった．最適化により，最適化前に比べ全評価基準のバランスを取ることのできた典型例を図6に示す．最適化により，43例で全評価基準が整形外科医計画の取り得る範囲に調整され，バランスの取れた手術計画が立案されていることが確認できたことから，提案アトラスの有効性を示せたと考えられる．整形外科医計画において1つ以上の評価基準で外れ値を取った5症例についても，全評価基準で外れ値を取らない手術計画を立案できたことから，今後提案アトラスによる手術計画手法により，バランス調整の難しい症例について計算機が整形外科医の手術計画立案を自動支援できるようになることが期待される．



図6 手術計画最適化典型例．左：最適化前，中央：最適化後，右：整形外科医計画．

< 引用文献 >

N Sugano, T Nishii, H Miki, H Yoshikawa, Y Sato, S Tamura, Mid-term results of cementless total hip replacement using a ceramic-on-ceramic bearing with and without computer navigation, J. Bone Joint Surg. Br., Vol. 89, No. 4, 2007, pp.455-460

N Nakamura, N Sugano, T Nishii, A Kakimoto and H Miki, A comparison between robotic-assisted and manual implantation of cementless total hip arthroplasty, Clin. Orthop. Relat. Res., Vol. 468, No. 4, 2010, pp.1072-1081

RV O'Toole, B Jaramaz, AM DiGioia, CD Visnic, RH Reid, Biomechanics for preoperative planning and surgical simulations in orthopaedics, Comput Biol Med., Vol. 25, No. 2, 1995, 183-191

AB Lennon, JR Britton, RF MacNiocail, DP Byrne, PJ Kenny, PJ Prendergast, Predicting revision risk for aseptic loosening of femoral components in total hip arthroplasty in individual patients - a finite element study, J Orthop Res., Vol. 25, No. 6, 2007, 779-788

鍵山善之，菅野伸彦，高尾正樹，佐藤嘉伸，菅野伸彦，西井孝，赤澤堅造，多田幸生，田村進一，吉川 秀樹，人工股関節手術計画における3次元骨盤形状に基づくカップ自動設置計画法，生体医工学，46巻4号，2008，437-450

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 2件)

鍵山 善之，音丸 格，高尾 正樹，中本 将彦，菅野 伸彦，多田 幸生，水口 義久，富山 憲幸，佐藤 嘉伸，人工股関節全置換術における関節機能に基づく三次元手術計画自動立案システム“AutoImPlan”，計測自動制御学会論文集，査読有，49巻，2013，78-85

多田 幸生，鍵山 善之，音丸 格，横田 太，人工股関節全置換術のための手術計画自動立案システム，システム制御情報学会誌，査読有，57巻，2013，101-107

[学会発表](計 5件)

鍵山 善之他 9名，人工股関節自動手術計画システム実用化に向けた関節機能バランスを考慮した最適化と性能評価 - 関節機能統計モデルを用いた脚長差・関節可動域・適合性調整 - ，第23回日本コンピュータ外科学会大会，2014年11月8日，大阪大学(大阪府吹田市)

鍵山 善之他 4名，人工股関節カップの有限要素解析学習データに基づく応力状態予測アトラスの構築，日本機械学会山梨講演会，2014年10月18日，山梨大学(山梨県甲府市)

鍵山 善之他 7 名, 人工股関節手術における骨盤側インプラントカップの応力状態予測アトラス, 第 33 回日本医用画像工学会大会, 2014 年 7 月 25 日, 東京慈恵会医科大学 (東京都港区)

鍵山 善之, 最大事後確率推定に基づく人工股関節手術計画自動立案システム, システム制御情報学会 SFA 研究分科会第 15 回研究例会, 2013 年 8 月 28 日, 大阪大学中之島センター (大阪府大阪市), 招待講演

Yoshiyuki Kagiya 他 5 名, Optimization of surgical planning of total hip arthroplasty based on computational anatomy, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (第 52 回日本生体医工学会大会と併催), 2013 年 7 月 5 日, Osaka International Convention Center (Osaka city, Osaka prefecture, Japan), 招待講演 (平成 25 年度日本生体医工学会研究奨励賞, 阪本研究刊行助成賞, 阿部賞受賞)

〔その他〕

ホームページ等

応力状態を含む人工股関節統計アトラスモデル構築プロジェクトページ

<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/ito/tha/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鍵山 善之 (KAGIYAMA, Yoshiyuki)

山梨大学・総合研究部・助教

研究者番号: 30506506

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

高尾 正樹 (TAKAO, Masaki)

佐藤 嘉伸 (SATO, Yoshinobu)

音丸 格 (OTOMARU, Itaru)

横田 太 (YOKOTA, Futoshi)

中西 裕紀 (NAKANISHI, Yuki)