



Atlas-based Automated Surgical Planning for Total Hip Arthroplasty

Otomaru, Itaru

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2012-03-25

(Date of Publication)

2012-04-19

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5486

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005486>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名	音丸 格		
論文 題目	Atlas-based Automated Surgical Planning for Total Hip Arthroplasty (人工股関節全置換術における統計アトラスに基づく手術計画自動立案)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	多田 幸生
	副査	教授	貝原 俊也
	副査	教授	有木 康雄
	副査		
要 旨			
<p>コンピュータ支援整形外科手術の分野では surgical CAD/CAM という概念が提唱されており、術前段階では CAD システムを用いて手術計画が立案され、術中段階では手術ロボットや手術ナビゲーションといった CAM システムを用いることでその手術計画が正確に再現される。CAM システムの精度向上にともない、術前段階で適切な手術計画を立案することの重要性が高まってきている。これまでに対話操作型手術計画立案システムが提案されているものの、手術計画の質が外科医の主観に依存する上、操作に不慣れた外科医にとって負担が大きい問題がある。この問題を解決する方法のひとつは手術計画立案を自動化することである。これまでに熟練外科医へのインタビューに基づいてマニュアルで定義したアルゴリズムによる方法が提案されているが、この方法ではアルゴリズム定義に試行錯誤を要する上、熟練外科医の暗黙的知識が表現できないため、性能が不十分の場合がある。本研究では、試行錯誤なしに熟練外科医の手術計画立案方針を自動的にモデリングすることを目的とし、多数の熟練外科医計画を学習データセットとして入力することで手術計画立案方針の統計的傾向を表現する「統計アトラス」を作成し、この統計アトラスを用いることで手術計画を自動立案するアルゴリズムを構築している。本研究の対象は人工股関節全置換術で、人工股関節は大腿骨側インプラント(ステム)と骨盤側インプラント(カップ)からなっており、本論文の主な部分はステム手術計画立案手法とカップ手術計画立案手法それぞれの提案である。</p> <p>まず第2章において、基礎的検討として、ステムを対象としてマニュアルで定義されたアルゴリズムに基づく手術計画自動立案を行なっている。ステム手術計画は3次元大腿骨形状上で定義され、最適なサイズ・位置・角度を求める最適化問題として定式化される。ステム手術計画立案ではステムが大腿骨の内部(髄腔)に強固に固定されていることが重視されるため、髄腔とステム表面間の距離値に基づいて接触度を評価する評価関数を定義し、接触度が最大となるサイズ・位置・角度を探索している。提案手法を7症例に適用したところ、熟練外科医計画との誤差は、平均位置誤差1.9 mm、平均角度誤差2.5 deg.であった。また、選択サイズが熟練外科医と異なる症例は7症例中1症例のみであった。このことから本手法は一定の性能を有すると考えられる。</p> <p>第3章では統計アトラスに基づくステム手術計画立案の方法を提案している。ステム手術計画立案において髄腔-ステム表面間の距離値が重要な要素であるので、本手法では、多数の熟練外科医計画における髄腔-ステム表面間距離値のパターンを測定し、距離値パターンの平均的傾向を求め、それを「統計的距離値分布マップ(Statistical-DM)」と呼んでいる。そして、ステムがあるサイズ・位置・角度であるとき、その距離値パターンと statistical-DM の差異が最小となる手術計画を求めている。第2章で提案された手法(以下、従来手法)と本章の手法(以下、提案手法)を40症例に適用したところ、熟練外科医計画との平均サイズ・位置・角度誤差はそれぞれ、従来手法で0.8±0.6, 5.5±2.2 mm, 4.7±2.9 度、提案手法で0.5±0.6, 3.6±2.0 mm, 3.5±2.1 度であった。特に位置・角度では、提案手法は従来手法に比べ有意に誤差が小さかった。このことから、提案手法は従来手法よりも高い性能を持つと考えられる。さらに、提案手法のサイズ誤差は、臨床研究で報告されている外科医間のサイズ選択のばらつきよりも小さかった。このため提案手法は、熟練外科医に近い性能を有する可能性があると考えられる。</p> <p>第4章では統計アトラスに基づくカップ手術計画立案の方法を提案している。カップ手術計画立案では次の2つの要素が考慮される。(1) 骨盤に対するカップの相対的位置関係が適切であり、病気で変形する前の正常な股関節が実現されること、(2) 骨盤を掘削してカップを設置した際に一定の骨残厚が確保され、カップが骨盤を突き破らないこと。これらの要素をモデリングするため、提案手法では2種類の統計アトラスを構築している。1つ目は「骨盤-カップ結合統計形状モデル(PC-SSM)」で、骨盤形状バリエーションと手術計画バリエーションの統計的關係を記述している。2つ目は「統計的骨残厚マップ(SM-BT)」</p>			

氏名	音丸 格
	<p>で、これは statistical-DM を骨残厚に応用したもので、カップが設置されたときの骨残厚の統計的パターンを表現している。手術計画立案では、まず、患者の骨盤3次元形状にPC-SSMを当てはめ、その骨盤3次元形状におけるカップ手術計画を予測している。次に、それを初期パラメータとして、初期パラメータ近傍で骨残厚パターンにおけるSM-BTとの差異が最小となる手術計画を探索している。マニュアルで定義されたアルゴリズムに基づく従来手法と提案手法を28症例に適用したところ、熟練外科医計画との平均サイズ・位置誤差は、それぞれ、従来手法で2.1 mm, 4.3 mm, 提案手法で1.4 mm, 3.9 mmであった。特にサイズ誤差において改善が見られたことから、提案手法は従来手法に比べ高い性能を有すると考えられる。</p> <p>第4章で提案されている手法では3次元骨盤形状を入力する必要がある。現時点では3次元CT画像の撮影が一般的でない施設・国が多いため、第5章では、2次元単純X線画像を入力として利用できるように提案手法を拡張している。これは、Zheng らが提案する2D-3D 骨盤形状再構成手法を用いて単一の股関節2次元X線画像から3次元骨盤形状を推定し、得られた3次元骨盤形状に対して第4章の方法を適用するものである。単純X線画像と3次元CT画像の両方が利用可能な症例6症例を用いて、X線画像から推定した骨盤形状と3次元CT画像から再構成された骨盤形状それぞれに対して手術計画立案を行なった。熟練外科医計画との平均サイズ・位置誤差はそれぞれ、X線画像の場合で2.3±1.5 mm, 4.4±0.7 mmであった。3次元CT画像の場合で1.0±1.1 mm, 3.6±0.8 mmであった。3次元CT画像の場合と比べると、6症例中5症例で選択サイズ誤差が1サイズ(2.0 mm)以内であったため、提案手法は適切なサイズ推定において一定の有用性を有すると考えられる。ただし、現時点では適用症例数が少ないため、多症例の評価が必要と考えられる。</p> <p>第6章ではステム手術計画とカップ手術計画のそれぞれから得られるものをバランス良く組み合わせる方法について論じている。まず、熟練外科医計画における脚長差・関節可動域といった複数の関節機能値の統計的分布を表す「関節機能正常度アトラス」を構築する。第3章・第4章で出力される手術計画を網羅的に組み合わせることで候補を生成し、「正常度」の合計値が最も高い候補を最適なステム計画・カップ計画の組み合わせとして選択する。提案手法を8症例に適用し、股関節機能値を熟練外科医計画と比較した結果、組み合わせた手法におけるカップ被覆率・脚長差・関節可動域平均値はそれぞれ、90.3±10.0%, 0.9±0.3 mm, 41.4±9.8度であった。一方、熟練外科医計画ではそれぞれ、87.8±5.8%, 3.5±3.4 mm, 43.1±10.0度であった。これらの結果から、提案手法はカップ被覆率・関節可動域では同程度、脚長差では熟練外科医よりも高い性能を発揮していると考えられる。</p> <p>以上のように、本研究は人工股関節全置換術を対象として統計アトラスに基づく手術計画自動立案法を定式化したものである。従来手法は熟練外科医へのインタビューに基づくため、言語化されない暗黙的知識が表現されないという問題があるのに対し、本手法では統計アトラスによって明示的知識も暗黙的知識もまとめてモデリングされることから、本研究は、熟練外科医の専門知識を定量的に表現するための有用な方向性を示していると考えられる。</p> <p>このように本論文は整形外科における手術計画を自動立案するアルゴリズムを構築すると共に、熟練者の専門知識を定量的に表現することについて重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の音丸格は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>

論文内容の要旨

氏 名 _____ 音丸 格 _____

専 攻 _____ 情報知能学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Atlas-based Automated Surgical Planning for

Total Hip Arthroplasty

人工股関節全置換術における統計アトラスに基づく

手術計画自動立案

指導教員 _____ 多田 幸生 教授 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

1. はじめに

コンピュータ支援整形外科手術の分野では、surgical CAD/CAM という概念が提唱されている。Surgical CAD/CAM では、術前段階には CAD システムを用いて手術計画が立案され、術中段階には手術ロボットや手術ナビゲーションといった CAM システムを用いることで、手術計画が正確に再現される。CAM システムの精度向上にともない、術前段階で適切な手術計画を立案することの重要性が高まってきている。これまでに、対話操作型手術計画立案システムが提案されているものの、手術計画の質が外科医の主観に依存する上、操作に不慣れな外科医にとって負担が大きい問題がある。この問題を解決する方法のひとつは、手術計画立案を自動化することである。これまでに、熟練外科医へのインタビューに基づいてマニュアルで定義したアルゴリズムによる方法が提案されている。しかしながら、この方法ではアルゴリズム定義に試行錯誤を要する上、熟練外科医の暗黙的知識が表現できないため、性能が不十分の場合がある。

本研究の目的は、試行錯誤なしに熟練外科医の手術計画立案方針を自動的にモデリングすることである。この目的を達成するため、本研究では多数の熟練外科医計画を学習データセットとして入力し、手術計画立案方針の統計的傾向を表現する「統計アトラス」を構築する。そして、この統計アトラスを用いることで手術計画を自動立案するアルゴリズムを構築する。本研究では、人工股関節全置換術を対象とする。人工股関節は、大腿骨側インプラント(ステム)と骨盤側インプラント(カップ)からなる。そのため本研究では、ステム手術計画立案手法とカップ手術計画立案手法をそれぞれ提案する。

2. マニュアルで定義されたアルゴリズムに基づくステム手術計画立案

基礎的検討として、ステムを対象として、マニュアルで定義されたアルゴリズムに基づく手術計画自動立案を行なう。ステム手術計画は3次元大腿骨形状上で定義され、最適なサイズ・位置・角度を求める最適化問題として定式化される。ステム手術計画立案では、ステムが大腿骨の内部(髓腔)に強固に固定されていることが重視されるため、髓腔とステム表面間の距離値に基づいて接触度を評価する評価関数を定義する。そして、そして、接触度が最大となるサイズ・位置・角度を探索する。

提案手法を7症例に適用したところ、熟練外科医計画との誤差は、平均位置誤差 1.9 mm、平均角度誤差 2.5 deg.であった。また、選択サイズが熟練外科医と異なる症例は7症例中1症例のみであった。このことから、本手法は一定の性能を有すると考えられる。

3. 統計アトラスに基づくステム手術計画立案

前章で述べたように、ステム手術計画立案において髓腔-ステム表面間の距離値は重要な要素である。本手法では、多数の熟練外科医計画における髓腔-ステム表面間距離値のパターンを測定し、距離値パターンの平均的傾向を求める。これを「統計的距離値分布マップ」

(Statistical-DM)」と呼ぶ。そして、ステムがあるサイズ・位置・角度であるとき、その距離値パターンと statistical-DM の差異が最小となる手術計画を求める。

第2章で提案された手法（以下、従来手法）と本章の手法（以下、提案手法）を40症例に適用したところ、熟練外科医計画との平均サイズ・位置・角度誤差はそれぞれ、従来手法で 0.8 ± 0.6 , 5.5 ± 2.2 mm, 4.7 ± 2.9 度、提案手法で 0.5 ± 0.6 , 3.6 ± 2.0 mm, 3.5 ± 2.1 度であった。特に位置・角度では、提案手法は従来手法に比べ有意に誤差が小さかった。このことから、提案手法は従来手法よりも高い性能を持つと考えられる。さらに、提案手法のサイズ誤差は、臨床研究で報告されている外科医間のサイズ選択のばらつきよりも小さかった。このため提案手法は、熟練外科医に近い性能を有する可能性があると考えられる。

4. 統計アトラスに基づくカップ手術計画立案

カップ手術計画立案では、2種類の要素が考慮される。

1. 骨盤に対するカップの相対的位置関係が適切であり、病気で変形する前の正常な股関節が実現されること。
2. 骨盤を掘削してカップを設置した際に一定の骨残厚が確保され、カップが骨盤を突き破らないこと。

これらの要素をモデリングするため、提案手法では2種類の統計アトラスを構築する。1つ目は「骨盤-カップ結合統計形状モデル (PC-SSM)」である。これは、医用画像処理において臓器・骨格形状のバリエーションを統計表現するために広く用いられている「統計形状モデル」を応用したもので、骨盤形状バリエーションと手術計画バリエーションの統計的関係を記述する。2つ目は「統計的骨残厚マップ (SM-BT)」である。これは、第3章で述べた statistical-DM を骨残厚に応用したもので、カップが設置されたときの骨残厚の統計的パターンを表現する。手術計画立案ではまず、患者の骨盤3次元形状に PC-SSM を当てはめ、その骨盤3次元形状におけるカップ手術計画を予測する。それを初期パラメータとして、初期パラメータ近傍で、骨残厚パターンにおける SM-BT との差異が最小となる手術計画を探索する。

マニュアルで定義されたアルゴリズムに基づく従来手法と提案手法を28症例に適用したところ、熟練外科医計画との平均サイズ・位置誤差はそれぞれ、従来手法で2.1 mm, 4.3 mm, 提案手法で1.4 mm, 3.9 mmであった。特にサイズ誤差において改善が見られたことから、提案手法は従来手法に比べ高い性能を有すると考えられる。

5. カップ手術計画自動立案の2次元単純X線画像への適用

第4章で提案されている手法は3次元骨盤形状を入力する必要があるため、3次元CT画像を必要とする。しかしながら、人工股関節全置換術における3次元CT画像の撮影が一般的でない施設・国が多いため、現時点では提案手法の有用性は限定的である。そこで、2次

元単純X線画像を入力として利用できるように提案手法を拡張する。この目的を達成するため、Zhengらが提案する2D-3D骨盤形状再構成手法を用いる。これは、骨盤3次元形状の統計形状モデルを利用することで、単一の股関節2次元X線画像から3次元骨盤形状を推定する手法である。この方法を用いることで3次元骨盤形状が得られるため、手術計画立案は第4章と同一の方法を適用することができる。

単純X線画像と3次元CT画像の両方が利用可能な症例6症例を用いて、X線画像から推定した骨盤形状と3次元CT画像から再構成された骨盤形状それぞれに対して手術計画立案を行なった。熟練外科医計画との平均サイズ・位置誤差はそれぞれ、X線画像の場合で 2.3 ± 1.5 mm, 4.4 ± 0.7 mmであった。3次元CT画像の場合で 1.0 ± 1.1 mm, 3.6 ± 0.8 mmであった。3次元CT画像の場合と比べると、6症例中5症例で選択サイズ誤差が1サイズ(2.0 mm)以内であったため、提案手法は適切なサイズ推定において一定の有用性を有すると考えられる。ただし、現時点では適用症例数が少ないため、多症例の評価が必要と考えられる。

6. 統計アトラスに基づく股関節機能最適化

本章では、脚長差・関節可動域といった複数の関節機能がバランスよく実現された手術計画を立案する方法を示す。第3章・第4章で出力される手術計画を網羅的に組み合わせる候補を生成し、最適なステム計画・カップ計画の組み合わせを選択する。この目的を達成するため、熟練外科医計画における関節機能値の統計的分布を表す「関節機能正常度アトラス」を構築する。股関節機能値はそれぞれ単位・スケールが異なるが、このアトラスによって、ある関節機能値が0-1の「正常度」に正規化される。手術計画立案では、「正常度」の合計値が最も高い候補を選択する。

提案手法を8症例に適用し、股関節機能値を熟練外科医計画と比較した。その結果、提案手法におけるカップ被覆率・脚長差・関節可動域平均値はそれぞれ、 $90.3 \pm 10.0\%$, 0.9 ± 0.3 mm, 41.4 ± 9.8 度であった。一方、熟練外科医計画ではそれぞれ、 $87.8 \pm 5.8\%$, 3.5 ± 3.4 mm, 43.1 ± 10.0 度であった。これらの結果から提案手法は、カップ被覆率・関節可動域では同程度、脚長差では熟練外科医よりも高い性能を発揮していると考えられる。

7. おわりに

本研究では、人工股関節全置換術を対象として統計アトラスに基づく手術計画立案を行なった。達成点は、統計アトラスに基づいて手術計画自動立案を定式化したことである。従来手法は熟練外科医へのインタビューに基づくため、言語化されない暗黙的知識が表現されない問題があるのに対し、本研究では、統計アトラスによって、明示的知識も暗黙的知識もまとめてモデリングされる。このことから、本研究は、熟練外科医の専門知識を定量的に表現するための有用な方向性を示していると考えられる。課題は、本研究における

(氏名： 音丸 格 NO. 4)

性能評価は、自動手術計画立案結果と熟練外科医が術前に立てた手術計画との比較であり、実際に手術で設置された結果との比較を行っていない点である。そのため、術後に撮影されたCT画像からインプラントサイズ・設置位置姿勢を復元し、本研究の手術計画との誤差を比較する手法を確立する必要があると考えられる。

今後、本研究を他の人工股関節インプラントや、人工股関節全置換術以外の他の手術に拡張する。最終的には、術後CTを用いた評価方法を確立することで、本研究の臨床的有用性を評価する。