

人工股関節・人工膝関節置換術における術中操作の コンピュータ支援に関する研究

解

農*

Biomechanical Study on Computer Assisted Orthopedic Surgery for Total Hip Arthroplasty and Total Knee Arthroplasty

by Shin KAI

本研究の目的は、人工股関節・人工膝関節置換術の手術操作に対するコンピュータ支援法の開発を行い、術後成績の向上を図ることである。近年、超高齢化社会の到来や救命医療技術の進歩に伴い、高齢者等の生活の質を向上させることが喫緊の課題になっている。本研究が対象とする整形外科領域では、生活の質を低下させるものとして、骨粗鬆症や関節リウマチ等の関節の退化に起因する変形性関節症が挙げられる。その最終的な外科療法として、人工関節置換術が世界中で広く取り入れられ、その手術件数も増加傾向にある。本研究では、特に人工股関節と人工膝関節の両関節置換術を対象として、コンピュータによる支援を目指した。人工関節置換術において、最も重要なことはインプラントの設置位置である。つまり、多様な形態を呈する変形した関節に対して、インプラントの至適な設置位置を探索、決定することである。従来、人工関節置換術は、術前に撮影したX線画像を基に計画を立て、術中ではその計画に従って手術が行われてきた。しかし、術前計画を立てるためのX線画像は二次元情報でしかなく、しかも施術は執刀医の経験と主観的判断に基づいてなされる。そこで、本研究の先行研究で三次元下肢アラインメント評価システムが開発され、そ

の結果、コンピュータ支援による術前計画が可能になった。このシステムは、術前に下肢全長の二方向CR撮影を行い、撮像上の骨輪郭に対し、予め構築しておいたCT断面画像のレンダリングによる三次元骨形状コンピュータモデル(骨モデル)をイメージマッチングさせることで、三次元かつ機能位である立位の関節状態を解析できるシステムである。また、インプラントのCADモデルを骨モデルに設置することで、三次元的に術前計画を行うことも可能である。このシステムを利用して本研究では、設置位置を術中に再現する方法として、小型の手術ジグを開発し、手術中にジグおよび骨モデルのイメージマッチングを行い、その後モデル間の座標変換を行うという方法を考案した。また、座標変換では、設置した座標が定量化の基準であり、結果に大きく影響することから、骨モデルの座標系構築方法を自動化し、術中支援法の再現性向上を目指した。さらに本研究では、不正確なインプラント設置位置だけでなく、人工関節摺動面の摩耗に起因する合併症も術後成績を低下させると考えられていることから、摩耗に繋がる摺動面上に生じる応力の解析方法を開発し、日常動作中の人工股関節臼蓋ライナー摺動面の接触応力解析に適用した。

*新潟大学大学院自然科学研究科
〔新潟大学博士(工学) 平成22年3月24日授与〕
学位記番号 新大院博(工)第331号

本論文は全6章から構成されている。

第1章「緒論」では、研究の背景や目的、本論文の構成について述べている。

第2章「TKA 大腿骨側術中支援法の開発」では、TKA 術中における大腿骨コンポーネントの設置位置をコンピュータ支援する方法について述べている。従来の髓内ロッドに変わる新たな髓内ロッドを開発し、術中二方向フルオロ撮影像を用いて、骨モデルおよびロッドモデルのイメージマッチングを行った。これにより、術中での骨および髓内ロッドの挿入位置を把握できた。さらに骨モデル、インプラント CAD モデル、髓内ロッドモデルの間で座標変換を行うことで、髓内ロッドに対する術前計画の設置位置が算出でき、計画通りの骨切りを実現した。モデルボーンによる検証実験の結果では、従来の髓内ロッドより再現性が向上し、角度指示の追従性向上に繋がったことも確認された。

第3章「THA 大腿骨側術中支援法の開発」では、THA 術中における大腿骨ステムの設置位置をコンピュータ支援する方法について述べている。イメージマッチングおよび座標変換を行う手法は第2章と同様であるが、小型ジグとして、骨頭骨切り用のジグを製作した。また、イメージマッチングに用いる画像も被爆を無くした CCD カメラによる三方向撮影画像に置き換えた。モデルボーンによる検証実験の結果では、精度向上の必要性があるものの、臨床応用に繋がる可能性があることが確認された。

第4章「骨モデル座標系の自動構築」では、本研究で用いる下肢骨（骨盤・大腿骨・脛骨）のそれぞれの骨モデルに対する座標系構築を自動化し、その手法および検証実験について述べている。構築に用いる参照点を自動で探索するために、骨の特徴を利用し、モデルを形成する三次元点データに対して主成分分析や輪郭追跡といった統計学および画像解析の手法を適用した。また、必要に応じて再現性および妥当性の検証を行い、十分に有用な手法であることが確認された。

第5章「人工股関節ソケット摺動面の接触応力解析」では、シンプルな形状である人工股関節を対象とし、開発した摺動面応力の算出方法について述べている。リアルタイムでの解析を可能にするため、UHMWPE ライナーを弾性体、ステムや臼蓋カップを剛体と仮定する剛体-バネモデルの考え方を導入した離散要素解析を用いた。また、動作解析で得られた関節運動の境界条件を等間隔なセグメントに分割して解析することで、動的問題を連続した準静的な問題に置き換えて、動作中の応力分布変化を算出した。日常動作において、イスからの立ち上がり動作において最も大きな応力が観測され、屈曲位において、ライナーのエッジ部に応力が集中することが観測された。計算時間が短いことから、術後だけでなく、術前計画における術後動作のシミュレーションにも応用でき、より適切なインプラントの設置位置決定に貢献できると考えられた。

第6章「結論」では、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の展望についても述べている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、大変貴重なご意見やご協力を頂きました。新潟医療センター整形外科の古賀良生先生、佐藤卓先生、谷藤理先生、新潟臨港病院整形外科の湊泉先生、新潟大学超域研究機構の大森豪教授、新潟大学保健学科の坂本信教授、小林公一助教授に敬意を表し、心から感謝を申し上げます。

さらに、本論文の作成にあたり、終始丁寧なご指導を下された副指導教官の大矢誠教授、新田勇教授、審査委員の原利昭教授、鳴海敬倫教授、坂本信教授に深くお礼を申し上げます。

最後に、様々なご迷惑、ご面倒をお掛けしたにもかかわらず、終始厳しく、そして温かいご指導やご協力を賜りました新潟大学工学部機械システム工学科の田邊裕治教授に心より感謝し、厚く御礼申し上げます。