

## 学位論文審査結果の要旨

氏名	石丸 雅巳
審査委員	主査 渡部 祐司 副査 今村 健志 副査 望月 輝一 副査 羽藤 直人 副査 久門 良明

論文名 画像相関を利用したイメージマッチング法による人工膝関節  
全置換術後膝蓋骨の三次元動態解析

審査結果の要旨 (2,000字以内)

(標準書式：日本工業規格A4，11ポイント1行42字，1ページ40行)

(背景および目的) 人口の高齢化とともに変形性膝関節症罹患者数は増加傾向にある。治療として全人工膝関節置換術 (Total Knee Arthroplasty, TKA) が発展し、術後の動態解析も進んできた。しかし、日常の膝関節の運動における膝蓋骨機能は、関節可動域や運動および安定性に重要であるにも関わらず、膝蓋骨をターゲットとした動態解析に関する報告は少ない。膝蓋骨は体積が小さく大腿骨との重なりが生じるため、解析の精度を上げることが困難であったことと、TKA 術後の膝蓋骨コンポーネントは超高分子量ポリエチレン製であり、X線透過性であるため動作時の高精度解析が困難であったことが理由として挙げられる。申請者らは、これまで独自に開発したウインドウ解析技術と、一方向性 X 線連続撮影像を用いた画像相関を利用したイメージマッチング法により、TKA 膝および生体膝の動態解析を行ってきた。本研究では、イメージマッチング法を応用し、今までに確立した手法のない生体内での TKA 術後膝蓋骨の 3 次元動的動態解析を行い、その可視化と膝蓋大腿関節の各コンポーネントの最近接点を可視化することを目的とした。

(方法) CT と FPD (Flat Panel Detector) を使用し、TKA 術前の CT データからグレースケール 3

次元モデルを構築し、それを FPD 撮影条件と同様の条件にした仮想投影シミュレーション像を作成した。その仮想シミュレーション像と、解析対象となる FPD で撮影された X 線連続撮影画像の画素値の画像相関を利用したイメージマッチングを行うことで、生体関節の動態解析を行った。TKA 後の大腿骨および脛骨コンポーネントの 3 次元描出には、X 線画像と仮想投影シミュレーション像とを比較し、排他的論理和によりその空間位置と姿勢を推定した。動態解析の精度は、二乗平均平方根偏差 (Root mean square error, RMSE) を使用して算出した。新鮮冷凍ブタの膝蓋骨では平均誤差 0.2mm, 0.2 度以内の精度が得られた。臨床例では、Quest Knee System を使用した 4 症例 (平均 73 歳) を対象に、しゃがみ込み動作の解析を行い、膝蓋骨コンポーネントの 6 自由度運動における変位量、変位角度を評価するとともに膝蓋骨コンポーネントを可視化した。TKA 術後の膝蓋骨および大腿骨コンポーネントの最近接点を評価した。膝蓋骨コンポーネントの設置位置は、申請者らのオリジナルの方法で術後残存した膝蓋骨コンポーネント設置のために作成したドリルホールから算出した。

(結果) 本手法により、TKA 術後の大腿骨および脛骨コンポーネントと、置換後膝蓋骨の相対位置関係を 3 次元で表示し得た。膝蓋骨 6 自由度運動評価では、しゃがみ込み動作での後傾運動は全症例で屈曲 90 度で約 35 度の後傾を認めた。膝蓋骨の回転運動と回旋運動は著明ではなかった。X 軸運動では全症例で、膝蓋骨は軽度外側移動を示した。Y 軸運動では約 10 度～15 度の後方移動を示し、Z 軸運動では移動しなかった。膝蓋骨コンポーネントの大腿骨コンポーネントとの最近接点では、屈曲が進むにつれて内外側の接触点間隔が広くなりながら近位に移動していた。大腿骨コンポーネントの最近接点は遠位に移動しながらやや外側に移動する傾向を示した。

(考察および結論) 人工膝関節のコンポーネント形状は、生体の解剖学的形状とは異なっており、本研究によりしゃがみ込み動作において回転、回旋運動での TKA 術後の膝蓋骨の移動が認められず、屈曲初期での TKA コンポーネントの形状に沿った動きであることが分かった。また、本法により従来の解析手法では不明であった精密な 3D 解析ができ、膝関節のみならず診断に難渋する種々の関節疾患の病態把握や術後評価にも利用できると考えられた。更に、ADL の向上を目指した次世代型人工関節への改良や開発に繋がる有益なツールになると考えられた。

審査会は平成 26 年 1 月 6 日に開催され、発表後に本研究に対して質疑応答がなされた。各審査委員からは、1) 従来の解析法に対する優越性、2) 本システムの欠点、3) 膝関節の様々な負荷に対する影響の検討の有無、4) TKA 術後と術前予想との比較、5) 膝運動中のリアルタイム解析の可能性、6) 膝関節における膝蓋骨の位置合わせのためのポイント数の最適値、7) TKA における最適な膝の条件 (年齢や生活スタイルとの関係を考慮して) などの質疑応答がなされた。申請者からは、従来、膝関節の中で膝蓋骨にターゲットを絞った精密な動態解析が、これほど高い精度で行われたことはないことから、本手法の従来法に対する優位性を述べた。但し、様々な負荷や条件を変えた検討は今後継続して行う必要がある点と、患者の生活スタイル等も加味した検討を行ってゆく必要性も述べた。将来は次世代型人工関節への改良や開発に繋げることもみならず、TKA 術後の患者ケアや更に多くの入院患者を対象とした解析結果を基に患者ニーズにあった適切な看護・介護に活かすことができるなどの展望を述べた。

申請者は各質問に的確に返答し、本論文関連領域に関して学位授与に値する十分な見識と能力があることを審査員全員一致で確認した。