

学 位 論 文 要 旨

氏 名 石丸 雅巳

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

近年、人口の高齢化とともに変形性膝関節症罹患患者数も増加傾向にある。その発生頻度や QOL (Quality of Life) に与える影響から、治療には全人工膝関節置換術 (Total Knee Arthroplasty, TKA) が発展し、それに応ずるように TKA 後動態解析も進んできた。生体および TKA 術後の膝関節の動態解析では大腿脛骨関節での報告が大部分で、膝蓋骨に関する報告は少ない。しかし日常の膝関節の運動において、膝蓋骨もその動態と機能は膝関節の可動域や運動および安定性に重要な役割を担っているのは言うまでもない。また、臨床においても生体膝、TKA 術後膝に関わらず、病態の把握に困難な膝蓋大腿関節の疾患にも遭遇することがあり、生体内での膝蓋骨および膝蓋骨コンポーネントの動態解析は必要である。しかし、膝蓋骨は体積が小さいうえに大腿骨とも重なりが生じるため、十分な精度を得ることが困難である。さらに TKA 術後の膝蓋骨ともなれば、コンポーネントは超高分子量ポリエチレン製での X 線透過性のため、動作時の生体内での膝蓋骨コンポーネントの動態を高精度に解析する手法は確立していない。

我々は、独自に開発したウィンドウ解析技術と一方向 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、これまでのイメージマッチング法をさらに応用し、いまだ確立した手法のない生体内での TKA 術後のコンポーネント置換後膝蓋骨の 3 次元的動態解析を行い、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：本手法での画像撮影には、CT (computed tomography) と FPD (Flat Panel Detector) を使用した。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。その仮想投影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

氏名 石丸 雅巳

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 術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、新鮮冷凍ブタの膝蓋骨で平均誤差 0.2mm、0.2deg 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(平均年齢 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。また、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設置位置は、我々独自に考案した手法で、術後残存した膝蓋骨と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、コンポーネント置換後膝蓋骨の相対位置関係を 3 次元で描出することができた。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 (flexion) は全症例で屈曲 90° で約 35° の後傾を認めた。膝蓋骨の回転運動 (rotation) と回旋運動 (tilt) は、いずれの症例でも著名な運動は示していなかった。X 軸運動では、全症例で膝蓋骨は軽度外側移動を示す傾向であった。Y 軸運動ではいずれの症例でも約 10 ~ 15° の後方移動を示し、Z 軸運動ではほとんど移動を示していなかった。

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ていた。

考察：人工膝関節のコンポーネント形状は、大腿骨、膝蓋骨ともに生体の解剖学的形状とは異なっている。膝蓋骨コンポーネント形状は大腿骨コンポーネント顆間部の形状に合わせたドーム形状で作られているものが多い。本研究結果では、しゃがみ込み動作で rotation と tilt で TKA 術後膝蓋骨の変位はほとんど見られず、屈曲初期での TKA コンポーネントの形状に沿った運動を示していたものと考えられた。またしゃがみ込み動作での外側移動は、使用機種デザインコンセプトを反映した結果を示していたのではないかと考えられた。

これまでも膝関節を対象とした様々な動態解析手法が報告されてきたが、膝蓋骨においては実際の生体の運動を反映していない in vitro での解析が多く、また、解析精度の低いもの、外科的侵襲の加わるものも多い。

骨の一部を用いて解析を行う本手法は、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などにも有用性があるとともに、さらなる ADL の向上を目指した世代型人工関節への改良や開発など、様々な分野において有益なツールとして期待のできる手法であると考えられた。

キーワード (3 ~ 5)	image matching patella kinematics motion analysis image correlation
---------------	--