

審査の結果の要旨

氏名 舒利明

高齢化社会が深刻化する中で、歩行機能を維持することは、QOL (Quality of Life) の向上や高齢者の自立生活を支える基盤となる。高齢者の約 26%は、骨関節炎や関節リウマチによる痛みを訴え、歩行が困難となる。そこで、1968年に、骨の一部を切除してインプラントに交換する全膝関節置換術 (TKR) が始まった。この手術適用数はこの 10 年間で 2 倍になっている。しかしながら、手術を受けた患者の 11%~19%が手術の結果に満足しておらず、約 6%は合併症のために再手術が必要となっている。また、インプラントの摩耗や、インプラント設置位置の不正確性は、患者の満足度に影響を及ぼしてくる。本論文は、これらの課題を解決するために、手術後の状態を予測する筋骨格-有限要素解析手法を実現すると共に、患者固有の人工膝関節を設計する設計論の確立を目的としたものである。

まず、健全な膝関節と人工関節手術を施した膝関節の運動および接触機構の相違を明らかにした。軟部組織を含めた人間の膝関節を模した有限要素シミュレータを開発し、世界的に認められているデータセットに基づいて実験的に評価した。その結果、このシミュレータは十分な精度を有しており、従来のシミュレータよりも高精度であることを証明した。次に、このシミュレータを用いて、健全膝と 4 種類の人工関節膝の運動を解析した。その結果、内側を中心に回転する人工関節のデザイン (Medial Pivot 型) が、健全膝に近い運動を実現することを確認した。ただし、この Medial Pivot 型人工関節では、外側で接触面積および接触圧に課題があり、摩耗を引き起こす可能性があることを示唆した。そのため、患者固有の人工膝関節設計では、Medial Pivot を基本とするが、接触面積および接触圧の考慮もあわせて必要であることを示した。

患者固有の人工膝関節を設計するためには、身体の動的メカニズムおよび関節の内部機械特性を理解することが必要となる。そこで、有限要素法 (FE) と筋骨格 (MS) モデリング技術を同時に実行することが可能な MS-FE モデルを構築した。このモデルにより、手術前後の運動を考慮することが可能となる。本論文では、下肢の FE-MS モデルを構築するための方法論を提示し、患者固有の MS モデル、靭帯等の軟部組織を有する膝関節モデル、および、変形可能な

FE 人工関節モデルの間の相互関係を示した。関節部分をヒンジとする従来の **MS** モデルと比較し、歩行サイクルで実験的に検証した結果、提案した **FE-MS** モデルにより予測精度が向上したことが示された。この提案モデルにより、膝関節の接触面積、圧力、および応力を解析することが可能となる。この新しい **FE-MS** アプローチは、高精度に膝関節を力学解析し、人工関節手術における個別治療および人工関節設計を適用するための方法を提供するものであることが示された。

得られた知見により、患者固有の解剖学的構造および生体力学特性の両方を考慮した人工膝関節設計の方法論を構築した。 **Medial pivot**, **Rolling back**, **No paradoxical motion** を同時に実現する人工膝関節を提案し、患者固有の人工関節設計が、骨とインプラント間の特性改善や、インプラントコンポーネント間の接触力学的改善を含むことを示した。このような機能を有する患者固有の人工膝関節は、世界的に類を見ないものであり、その優れた性能が期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。