

平成16年度博士論文審査報告

氏名(本籍) 下戸 健 (広島県)
 学位の種類 博士(工学)
 学位記番号 甲第35号
 学位授与日 平成17年3月18日
 学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
 工学研究科 生産システム工学専攻
 論文課題目 全人工膝関節置換術における次世代
 支援技術の開発
 審査委員 主査 九州産業大学
 教授 日垣 秀彦
 副査 九州産業大学
 教授 西谷 弘信
 副査 九州産業大学
 教授 石川 博将

内容の要旨

全人工膝関節置換術(Total Knee Arthroplasty, TKA)は除痛可動性や支持性のある関節機能を再建する手術法として、近年ますます多用されるようになっていくが、TKAの問題として、その複雑な6自由度運動に起因する摩耗が指摘されている。本論文は、次世代人工関節の開発、患者別機種選択や術後の診断に有用な情報を与える次世代支援技術の開発を目的としている。この目的のために、人工膝関節における6自由度運動測定、力学的評価のためのトライボシミュレータ、およびコンピュータシミュレーションによる摩耗予測の3つの技術を確立し、さらに、3種類の技術の有機的連携の有用性について研究を行い、臨床応用への可能性を検討する。

第1章では、本研究の目的を明確にし、研究背景について概説する。さらに、第2章以降の本論文の構成について述べる。

第2章では、膝関節について骨、靭帯の解剖学的構造および膝の運動について基礎事項をまとめ、膝の複雑な構造、および6自由度運動に対し、目的別に多種多様に存在する人工膝関節とその機能について概説する。

第3章では、人工膝関節評価のための実験方法について述べる。第3.1節では人工膝関節における6自由度運動計測について概説する。フラットパネルディテクターから出力される1方向X線透視画像とイメージマッチング法を応用することにより、人工関節の位置と姿勢の6自由度を同定する解析手法を確立する。第3.2節では力学的評価のための6自由度トライボシミュレータについて概説する。生体関節の複雑な6自由度運動を再現するために、パラレルリンク機構による油圧アクチュエーション技術を用いた、完全な6自由度運動をシミュレ-

ションできる機構を具現化した。第3.3節ではコンピュータシミュレーションによる摩耗予測について概説する。人工関節に用いられている超高分子量ポリエチレンは耐摩耗性が高く、信頼性の高い材料であるが、その摩耗は多くの因子に影響を受けており、摩耗距離や速度、面圧、摩擦方向変化、摩擦熱による温度上昇、潤滑液への曝露時間周期等が指摘されている。ここでは、各影響因子を考慮した摩耗予測を過酷度と定義し、人工膝関節摺動面の形状データと膝の6自由度条件のみから摩耗予測を行う手法について示す。

第4章では、開発評価手法を用いた実験結果と考察を列挙する。第4.1節では6自由度運動測定において、実際に臨床で使用されている人工関節製品を対象に動態解析を行うことで本手法の有用性を検討する。さらに、従来の動態解析手法と比較し、本手法による6自由度運動計測について考察する。第4.2節ではTKAが施された患者を対象に、生体内における人工関節の6自由度運動測定を行う。インプラント間の相対関係の解析を通じ、本手法による動態解析について考察を行う。第4.3節では人工膝関節用トライボシミュレータを用いて、人工関節の接触状態に関し力学的評価を行う。既存の人工関節と著者らが開発を検討している深屈曲対応型人工関節において接触部位における圧力分布の解析を通じ、シミュレータの有用性を検討する。第4.4節では人工膝関節用トライボシミュレータ装置を用いて、モバイルベアリング式人工膝関節摺動面の相対関係を実験的に解析する。生体内における大腿骨コンポーネントと脛骨コンポーネントの6自由度をシミュレータで再現することで、各コンポーネントの相対関係を明らかにし、デザインと運動機能の関係を検討する。第4.5節では人工膝関節用6自由度トライボシミュレータを用いた摩耗試験結果と過酷度の結果を比較することにより、コンピュータシミュレーションによる摩耗予測の有用性について考察する。さらに、過酷度パラメータを変化させることで、高精度の摩耗の予測を検討する。

第5章では、これらの支援技術を用いた次世代人工関節の開発について述べる。提案する3つの技術は、すべて高度な3-D CADのソリッドモデリング技術を媒体としており、そのまま製品開発に直結できる技術となっている。現在、臨床応用が検討されている高屈曲対応型人工膝関節の開発にこれらの技術を適用させ、人工膝関節の設計を行うとともに、3種類の技術の有機的連携の有用性について考察する。

第6章では、以上の研究についてまとめを行う。

審査の結果の要旨

(論文の評価)

高齢社会の進展にともない、整形外科領域における変形性膝関節症の発生が急増している。歴史的に信頼の高い欧米製人工膝関節に依存している日本国内において、耐摩耗性の向上や日本人の体格や生活様式を考慮した次世代モデルの開発が試みられており、開発段階や術前・術後診断における信頼性の高い評価技術の開発が望まれている。本論文は、全人工膝関節置換術を支援するための次の3種の技術開発を行い、それらを組み合わせ、開発から術後診断までの各ステージにおいて例証することにより構成されている。

第1の技術として、人工膝関節置換膝の複雑な6自由度運動を計測することを目的に、X線とフラットパネルディテクターを組み合わせたシステムにより得られる透視画像に対し、イメージマッチングを応用した手法により動態解析手法を確立している。本手法は、線源とセンサーの相対関係の同定手法の確立や画像内におけるイメージマッチングウインドウの採用により、従来より提案されている輪郭形状に対するフーリエ変換等を用いた手法に比し、解析不能条件等を減らし、精度を向上させることを実現している。

第2に、生体膝の6自由度運動を実験的に正確に再現する6自由度膝シミュレータを開発している。本手法は、6自由度運動を再現するメカニズムとして油圧パラレルリンク機構を採用し、荷重等の変位量の大きな自由度に対しては空圧アクチュエータを用意している。油圧と空圧を対向配置させることで、評価部材の摩耗等の予測不能な外乱を含み、位置制御と荷重制御が混在する6自由度運動を、振動させることなく駆動することが可能なシステム構成を提案している。

第3に、ポリエチレン部材のトライボロジー特性を考慮した摩耗予測シミュレーション技術を確立している。本手法は、脛骨側に配置されるポリエチレンインサート表面の、各座標における面圧、滑り速度(動作単位を時間積分することで距離に相当)、滑り率、滑り方向変化、および潤滑液への曝露率(潤滑液成分の吸着可能時間率)等の摩耗に影響することが考えられる各因子を選択的に乗じ、1歩行周期で積分することにより、摩耗分布と相関することを確認している。

続いて、以上の3種の技術を用い、開発から術後診断までの各ステージにおける技術の有用性を例証している。

まず、6自由度動態解析においては、人工膝関節置換術後の患者に対し跪いた肢位から最大努力による深屈曲位までの解析を実施している。同手法の適用により解析不能な画像もなく、高精度の解析が確認され、結果として高屈曲が確認された症例では、共通してラテラルピ

ボットによる内旋とロールバックが確認されている。高屈曲が可能な症例でロールバックが確認されたことは、深屈曲における大腿四頭筋の緊張現象等が適応モデルの許容範囲で協調して正常に機能していることが示唆され、次世代人工関節の形状設計等に有用な情報を提供している。

つぎに、6自由度膝シミュレータに関しては、脛骨コンポーネント上でポリエチレンインサートが自由度を有するモバイルベアリング式人工膝関節に対し、インサートと各コンポーネントの動的相対運動を実験的に明らかにしている。モバイルベアリング式人工膝関節は近年多用されるようになってきているが、ポリエチレンがX線透過材料であるため、生体内における正確な動態を確認した例は認められない。本実験の手法により、2種類の人工膝関節を対象に実験・解析を行っているが、結果として0.5~1.0 Hzの動的な歩行条件において、インサート底面と脛骨コンポーネント表面の摩擦が動態に関与し、デザインの狙いとする形状適合の高い部位での接触状態を阻害し、ポリエチレンインサートの顆間部やエッジ等での接触を引き起こし、高面圧が発生することを確認している。

つぎに、摩耗予測シミュレーションに関しては、歩行運動を対象に各因子をそれぞれ選択的に組み合わせた結果と、6自由度膝シミュレータを用い正確に同運動を再現した実験結果とを比較することにより、摩耗予測手法の有用性を確認している。ポリエチレン部材表面の各座標点において、面圧と速度を組み合わせた条件に対し、残りの3種類の因子をそれぞれ乗じた条件と比し、全5種類の因子を乗じた結果が、最もシミュレータ実験結果と高い相関を示すことを明らかにしている。

以上のことから、開発された3種類の技術が、人工膝関節の開発から術後診断までの各ステージにおいて、高い精度で簡便に应用可能なことが示されている。さらに、同3種類の技術は全てCAD(コンピュータ支援設計)によるソリッドモデルを媒体に連携しており、全てのステージにおける評価が次世代モデルの設計開発に直結することが示唆されており、整形外科等の臨床を現場とする機械設計工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値すると認める。

(試験の結果)

本論文に関し、審査委員から、現状の人工膝関節の開発サイクル短縮における本開発技術の役割や6自由度歩行運動シミュレータによる摩耗実験での摩耗量の測定方法、摩耗予測シミュレーションにおける摩耗影響因子の重み関数などについて質問がなされたが、著者の回答はいずれも明確であった。また、公聴会においても出席者から質問がなされたが、著者の説明によって質問者の理

解が得られた。

以上の結果から、著者は試験に合格したものと認めた。

氏名(本籍)	ひらやま ともゆき 平山 智之(福岡県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第36号
学位授与日	平成17年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文課題目	工学研究科 生産システム工学専攻 ヘキサアリーール置換ヘキサアザトリ フェニレン類の合成と機能性に関する研究
審査委員	主査 九州産業大学 教授 山崎 澄 男 副査 九州産業大学 教授 津留 壽 昭 副査 九州産業大学 教授 永石 俊 幸 副査 九州大学 教授 又賀 駿太郎

内容の要旨

高度IT化が進む現在、従来の液晶ディスプレイに代わる次世代フレキシブルモバイルディスプレイとして有機ELディスプレイが注目され、新規な有機機能性化合物に関する研究が盛んに行われている。有機化合物における機能発現には分子内を移動しやすい π 電子が不可欠であり、広い π 共役系とヘテロ原子を持つ多縮環系ヘテロ芳香族化合物に興味が持たれている。ヘキサアザトリフェニレン(HAT)は、 π 電子不足ヘテロ芳香環であるピラジンがベンゼン環に3個縮環した構造を有し、機能性材料として期待される化合物である。しかし、HATを骨格とする機能性有機化合物に関する研究は未だ少ないのが現状である。

本論文は、HAT骨格を有する新規な有機機能性色素を合成して、それらの物性を評価したもので、6章から構成されている。

第1章では、縮環系芳香族及びヘテロ芳香族化合物における従来の研究について述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、ヘキサアリーール置換HAT類を合成し、その光学特性について検討した。ビス(4-プロモフェニル)エタンジオンとアリーールボロン酸のカップリング反応により1、2-ジアアリーールエタンジオン類を合成し、これとヘキサアミノベンゼンとの縮合反応によりフェニル及びビフェニル置換HAT類を合成した。ビフェニル置換HATの最長吸収波長(λ_{max})は、フェニル置換HATと比較して長波長シフトした。

これは、置換基の延長により π 共役系が拡張されたことを示している。フェニル及びビフェニル置換HATは、溶液中及び固体状態のいずれにおいても蛍光を示した。特にビフェニル置換HATは強蛍光を有することが認め