

研究の課題名

油空圧アクチュエータのコンプライアンス制御による

6 自由度膝関節シミュレータの開発

九州産業大学 工学部 教授

報告者 日垣 秀彦

報告日 2008 年 (平成 20 年) 4 月 17 日

1. 本研究の意義・特色

関節機能を再建する手術手技として、全人工膝関節置換術は年間 4 万例を超えるなど広く普及している。しかし、最大の問題点として超高分子量ポリエチレンの摩耗粉の発生が指摘されており、次世代の人工関節の開発では、生体膝の動態および生体内の環境を完全にシミュレート可能な装置による力学試験が不可欠である。そこで本研究では、すでに開発している油圧パラレルリンク 6 自由度アクチュエータと空圧サーボシリンダを応用したコンプライアンス制御による人工膝関節用 6 自由度トライボシミュレータについて、6 自由度位置制御と 6 自由度トルク制御の組み合わせを自由に設定できるように改良し、臨床データで要望の高い様々なパラメータを考慮した製品評価が可能な自由度の高い実験系の確立を行った。これにより、生体内における人工関節の力学問題の解明、既存人工関節の機能評価、および次世代人工関節の開発を実施するのに有用なツールになると期待される。

2. 実施した研究の具体的内容、結果

生体関節の複雑な 6 自由度運動を再現することができる人工膝関節用 6 自由度トライボシミュレータについて概説する。装置は、油圧式パラレルリンク 6 自由度アクチュエータ、空圧水平軸シリンダ(屈曲/伸展運動)、空圧垂直軸シリンダ(荷重)、6 軸力覚センサで構成され、パーソナルコンピュータによって制御した。脛骨コンポーネントをパラレルリンク 6 自由度アクチュエータのモーションベースに固定された 6 軸力覚センサに取り付け、大腿骨コンポーネントを空圧シリンダに連結された屈曲伸展軸に取り付ける機構で、6 本のアクチュエータからなるパラレルリンク 6 自由度アクチュエータによって、脛骨側に内転/外転 (X 軸を中心とした回転)、内旋/外旋 (Z 軸を中心とした回転)、内側/外側の平行移動 (Y 軸方向の並進)、および前方/後方の平行移動 (X 軸方向の並進) を制御した。大腿骨コ

ンポーメントには、2つの空圧シリンダによって自由度の大きい軸荷重及び屈曲/伸展運動が与えられた。脛骨コンポーメントの運動制御を行うパラレルリンク6軸アクチュエータは、従来用いられているシリアルリンクのロボティクスと比較し、運動性能や耐久性において優位性が確保されており、主要な荷重周期において殆どの生体運動をシミュレート可能な10Hz程度まで引き上げることができる。以上の機構は5自由度位置制御と1自由度荷重制御を組み合わせ制御したため、荷重制御を行った自由度における変位から人工関節のコンポーメントの面圧や摩耗の評価が可能であった。開発した人工膝関節用トライボシミュレータを用いて、以下の研究を行った。

(1) モバイルベアリング式人工膝関節の力学的評価

超高分子量ポリエチレンの摩耗の問題を解決する手段の一つとして、脛骨コンポーメント上でポリエチレンインサートの運動を許容しているモバイルベアリング式人工膝関節が臨床応用されている。この人工膝関節は2つの摩擦界面に機能分担することで摺動方向を往復動に近づけることができる。しかし、生体内の人工膝関節の動態を確認する手段としてX線を用いる方法があるが、超高分子量ポリエチレンはX線透過材料であるため、X線を用いてモバイルベアリング式人工膝関節のポリエチレンインサートが正常に機能しているか確認することは極めて困難である。そこで本課題では、人工膝関節用6自由度トライボシミュレータを用いて、歩行時における6自由度運動を再現し、生体内におけるポリエチレンインサートの動態と人工膝関節形状の検証を行った。

対象には、現在臨床で応用されている2機種 of モバイルベアリング式人工膝関節 Type A と Type B を用いた。Type A は後方安定型で後十字靭帯を代行するポストとカムによって、生体に近いロールバックを可能にしている。Type B は後十字靭帯温存型で後十字靭帯の切除が行われなため、ポストとカムが存在しない。両機種 of 人工膝関節の形状は脛骨コンポーメントの穴部にポリエチレンインサートの突起部をはめ込む機構で、制限のない内外旋の回転運動のみを許容している。大腿骨コンポーメントとポリエチレンインサート、および脛骨コンポーメントの相対関係に関し、静的条件と動的条件(0.5Hz, 1.0Hz)において解析を行った。その結果、大腿骨コンポーメントとポリエチレンインサートの接触において、最も形状適合の高い相対位置での接触は確認されず、周波数が高くなることで急激で大きな変位を持つ回旋を行っていた。さらに、後方安定型である Type A では、高屈曲時や高周波数時において大腿骨コンポーメントのカムやボックスがポリエチレンインサートに接触し、瞬間的なポリエチレンインサートの浮き上がる動態が観察された。

本課題は、生体内における人工関節の動態を動的に解析し、人工関節製品の機

能評価を行うものである。X線を用いた動態解析を行えないモバイルベアリング式人工関節を対象に実験を行い、運動速度に依存したインサートの動態を確認することが可能であった。全人工膝関節置換術を受ける患者は高齢者が多いことを考慮すると、日常生活での歩行速度は0.5Hz~1.0Hzの間に存在すると考えられる。したがって、本実験のような6自由度トライボシミュレータを用いて高齢者の歩行を完全に再現し、接触に関する力学試験を行うことは有用であると考えられた。

(2) 後方安定型人工膝関節のポスト前方部分における接触圧力評価

全人工膝関節置換術後、後方安定型人工膝関節のポスト前方部分の変形や破損が近年報告されている。本研究グループが行っている生体内における人工膝関節の動態解析においても、過進展時にポスト前方と大腿骨コンポーネントの顆間部の衝突を確認しており、力学的評価を行うことは人工膝関節の形状を検討する上でも重要だと考えられる。そこで本課題では、人工膝関節用6自由度トライボシミュレータを用いて、後方安定型人工膝関節の過伸展時における大腿骨コンポーネント顆間部とポスト前方部間の接触圧力評価を行い、接触状態と人工膝関節形状の検証を行った。

対象には既存の後方安定型人工膝関節(Type A~D)を用いた。屈曲角度-15, -10, -5, 0, 5degにおいて内外転と内外旋をそれぞれ0degに設定し、大腿骨コンポーネントとポリエチレンインサートの摺動面を接触させた状態をNeutral positionとした。回旋時の測定は、回旋角度を5degとした。脛骨コンポーネントを固定し、大腿骨コンポーネントを関節面と平行に100N後方へ荷重を負荷し、そのときのポスト/顆間部の接触面積と接触圧力の計測を行った。その結果、形状に依存した接触状態が確認され、Type A~Type Cでは長期経過において、ポスト前方での接触を繰り返すことにより、ポストに著明な摩耗や破損を生じる危険性があると推察された。Type Dでは、接触領域は十分確保されており、他機種と比較し良い成績を得られたが、可動域が狭いことが問題点として挙げられた。屈曲角度0degの時点でポスト上部端に接触しており、大腿骨が後方移動した場合、脱臼の可能性が考えられた。

本課題は、特定の肢位を再現し力学試験から人工関節製品の機能評価を行うものである。後方安定型人工膝関節において、問題点として近年報告されている過伸展時におけるポスト/顆間部の接触について再現し、圧力評価を行った。その結果、ポスト前方での接触が生じた際に自由度を確保し、広い接触面積が安定的に得られるようなデザインの変更が必要であると考えられた。

開発した人工膝関節用6自由度トライボシミュレータは膝の動態を完全にシミュレートするだけでなく、簡便な操作により関節肢位の再現が可能であるため、

多くの製品におけるトライボ評価を短時間において実施することができる。そのため、人工関節開発において有力なツールとなることが実証された。現在、この装置を用いて多くの既存製品を評価し、アジア人に適したサイズバリエーションや正座等の深屈曲に対応したデザインを有し、既存製品以上の耐久性が期待される次世代人工関節の開発を実施している。

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

日垣秀彦・教授

中西義孝・教授

三浦裕正・助教授

下戸健　・研究員

4. 研究実施時期

2006年（平成18年）4月1日から　2008年（平成20年）3月31日

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

【原著論文】

- (1) Kinematic analysis for mobile bearing total knee arthroplasty during walking, 日垣秀彦, 下戸健, 吉住昌晃, 中西義孝, 藏田耕作, 濱井敏, 三浦裕正, 岩本幸英, Proc. 5th World Congress of Biomechanics, pp.157-162, (2006-8)
- (2) 過酷度パラメータによるポリエチレンインサートの摩耗予測, 下戸健, 日垣秀彦, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 第27巻, pp.287-293, (2006-11)
- (3) TKA6自由度トライボシミュレータを使用した Mobile Bearing TKA の力学的評価, 下戸健, 須崎映太, 日垣秀彦, 梅野貴俊, 中西義孝, 三浦裕正, 岩本幸英, 日本機械学会論文集, C編, 第73巻736号, pp.146-152, (2007-12)
- (4) Contact stress analysis of the conforming post-cam mechanism in posterior stabilized total knee arthroplasty, 赤崎幸穂, 松田秀一, 下戸健, 三浦裕正, 日垣秀彦, 岩本幸英, J Arthroplasty, (in press)

【学会発表・シンポジウム等】

- (1) Kinematic analysis for mobile bearing total knee arthroplasty during walking, T. Shimoto, H. Higaki, T. Suzaki, T. Umeno, Y. Nakanishi, K. Kurata, H. Miura, Y. Iwamoto, 5th World Congress of Biomechanics, (2006-7)

- (2) PS 型人工膝関節における回旋時のポスト / カム間の接触圧力評価 ,上野雄洋 ,日垣秀彦 ,下戸健 ,中西義孝 ,三浦裕正 ,松田秀一 ,岩本幸英 ,日本機械学会 2006 年度年次大会 ,(2006-8)
- (3) 後十字靭帯切離型人工膝関節におけるポスト / カム部分の接触圧計測 ,松田秀一 ,赤崎幸穂 ,三浦裕正 ,日垣秀彦 ,下戸健 ,岩本幸英 ,第 21 回日本整形外科学会基礎学術集会 ,(2006-9)
- (4) PS 型人工膝関節における回旋および Lift off 時のポスト / カム間の接触圧力評価 ,吉村大助 ,上野雄洋 ,日垣秀彦 ,下戸健 ,三浦裕正 ,松田秀一 ,岩本幸英 ,第 27 回バイオメカニズム学術講演会 ,(2006-10)
- (5) 実験的歩行シミュレーションによる PS 型と CR 型モバイルベアリング式人工膝関節の動態解析 ,矢原弘樹 ,下戸健 ,日垣秀彦 ,中西義孝 ,三浦裕正 ,岩本幸英 ,日本機械学会九州学生会第 38 回卒業研究発表講演会 ,(2007-3)
- (6) 後十字靭帯置換型人工膝関節のポスト前方部分における接触圧測定 ,濱井敏 ,三浦裕正 ,松田秀一 ,日垣秀彦 ,下戸健 ,山崎裕章 ,岡崎賢 ,田代泰隆 ,岩本幸英 ,日本臨床バイオメカニクス学会第 34 回日本臨床バイオメカニクス学会 ,(2007-12)
- (7) 過伸展時における PS 型人工膝関節の接触圧力評価 ,荒津大慧 ,山崎裕章 ,日垣秀彦 ,下戸健 ,濱井敏 ,三浦裕正 ,岩本幸英 ,日本機械学会第 20 回バイオエンジニアリング講演会 ,(2008-1)
- (8) PS 型人工膝関節のポスト前方における接触圧力評価 ,山崎裕章 ,日垣秀彦 ,下戸健 ,三浦裕正 ,岩本幸英 ,日本機械学会九州学生会第 39 回卒業研究発表講演会 ,(2008-3)

6 . 内外における関連研究の状況

既存製品より優れた性能を持つ人工関節の開発が期待されており , 膝関節については高屈曲をターゲットにした商品開発が散見される . 製品の接触圧力や摩擦摩耗挙動を生体内と同様に 6 自由度運動下で正確に再現することで , 信頼性と安全性が得られる人工関節の開発を行うことができる . これらの技術に関して , 英国の Leeds 大学 D Dowson , J Fisher 両教授と Durham 大学 Unsworth 教授らのグループでの先駆的な報告があるが , いずれも 3~4 自由度のシミュレータでの実験と 2 自由度の解析である . さらに , ISO が人工関節の摩耗試験において 4 自由度を提唱しているが , リフトオフや内外側方向の動揺といった動態を再現することができず , 生体膝の複雑な動態をシミュレートするには不十分である . 本研究のような生体関節に見られる複雑な 6 自由運動を完全にシミュレーションする技術の後発として , 佐賀大学の木口教授らは DC サーボモータとリニアアクチュエータを用いたシミュレータを検討しているが , 制御法等について未だ開発段階で

あり，製品開発に応用された報告はなされていない．

7. 今後の発展に対する希望

なし