

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：37110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K12150

研究課題名（和文）繊維結合型膝継手を搭載した大腿義足による歩行機能再建に向けた研究開発

研究課題名（英文）Research and development for reconstruction of walking function by thigh prosthesis employed fiber-coupled knee joint

研究代表者

園田 隆 (Takashi, Sonoda)

西日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70750339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：靭帯と骨格を模した膝継手により失われた膝関節の代償能力と歩行機能の再建可能性を明らかにするために以下の研究成果を得た。まず、既存の膝継手構造の回転中心軌跡の解析やIMUおよびモーションキャプチャーを用いた従来型膝継手による義足歩行の計測・評価を実施した。従来構造の仕組みや特徴を調査した。次に、無人義足歩行試験機の開発を行った。最後に繊維結合型膝継手について次のような設計技術を開発した。三次元化を見据えたリー代数の導入、巻き付き拘束による繊維結合関節構築手法の開発、繊維への負荷を考慮した固定端位置の最適化や繊維拘束法についての新たな展開（特許出願予定のため詳細を省く）である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

繊維結合型膝継手では、生体関節の筋骨格系と同様に、「靭帯の働きをする繊維」と「骨に相当するフレーム」を持つため、人の膝関節に近い構造を持った膝継手となっている。これは、従来の大腿義足に用いられてきた膝継手と大きく異なる点である。本研究で開発した設計技術は、繊維結合型膝継手を体系的な技術へと発展させるものである。この研究の成果は、医療福祉工学分野に留まらず、バイオメカニクス分野やロボット工学分野への貢献にもつながる可能性がある。構成論的なアプローチから、義肢（機械）技術と生体力学の橋渡しとして、人体への理解を深める研究の起点となりうる。

研究成果の概要（英文）：The following research results were obtained to clarify the compensatory ability of the lost knee joint and the possibility of reconstructing the gait function by using a knee joint that mimics ligaments and the skeleton. First, we analyzed the center-of-rotation trajectory of existing knee joint structures and measured and evaluated walking with a prosthetic knee joint using an IMU and motion capture. The mechanism and characteristics of the conventional structure were investigated. Next, we developed an unmanned prosthetic walking test machine. Finally, the following design techniques were developed for the fiber-coupled knee joint. (1) Introduction of Lie algebra for three-dimensional design, (2) Development of a method for constructing a fiber-coupled joint by using coiling restraints, (3) Optimization of the fixed end position considering the load on the fibers, and (4) New development of the fiber restraint method (details are omitted).

研究分野：ロボット工学

キーワード：膝継手 大腿義足 歩行機能再建 機構設計 繊維結合型関節

## 1. 研究開始当初の背景

全国の障害者の 50%以上が肢体の運動を不自由とする運動機能障害を持っている。特に移動に関わる運動障害は、社会生活を行う上で重要な問題である。脚を切断した場合には、補装具(義肢や装具など)により運動機能を補う。切断者の膝関節が残存する場合は、膝関節がない場合に比較して歩行能力の低下が抑えられる。切断者が活発な活動を行うには、大腿義足の「膝継手」構造の影響が大きい。立脚期の影響としては、膝継手の「膝折れ」発生による転倒リスクがある。遊脚期の影響としては、下腿部の不自然な振れ方により利用者の体力消費が増加する。よって、膝折れが発生しない安定した構造や下腿部の正常(自然)な動作が可能な構造が必要である。

膝継手の性能は歩行機能に直結するため、ブレーキ付や電子制御されたものなどが考案されてきた。しかしながら、膝継手の基本的な機械構造は、以前から進展していないのが現状である。従来の膝継手では、リンク機構や蝶番構造により構成されている。これらは生体関節とは全く異なった機械構造となっている。生体の関節は、靭帯・骨格構造で構成されている。さらに、膝関節は、屈曲・伸展時に関節面で転がりや滑りが同時に発生するなど、複雑な動きをしている。従来の膝継手では、生体の膝関節のような複雑な動きを実現できないために近似的な動きを再現するのみである。本研究では、繊維拘束による転がり関節の技術を基盤として、生体関節の運動機能を膝継手への工学的な応用と大腿義足による歩行能力の向上を目指している。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、転がり型繊維結合型膝継手の技術をさらに発展させ、「膝関節の靭帯・骨格構造のような動きを可能とする繊維結合型膝継手の実現と大腿義足へ応用すること」にある。加えて膝継手の開発と大腿義足への応用を通して、膝関節としての代償能力と歩行機能の再建可能性を明らかにする。

「筋肉の代償機能がなく、膝関節の靭帯・骨格構造のみを再現した膝継手を搭載した大腿義足によって従来の膝継手と同等以上の歩行機能が得られるのか」、さらに「同等以上の歩行機能が得られない場合には、どのような代償構造を膝継手に付加すべきか」という点も明らかにすべき課題としている。

## 3. 研究の方法

当初の目的では、生体膝関節の代償構造として設計した繊維結合型膝継手により、従来の膝継手と同等以上の歩行機能を満たす大腿義足を実現できるかを明らかにすることである。そのために、以下のような研究課題を設定した。

- (1) 従来構造(多軸型膝継手)と同等の動作が可能な繊維結合型膝継手の実現
- (2) 生体膝関節の靭帯・骨格構造に類似した動作が可能な繊維結合型膝継手の実現
- (3) 開発した膝継手を対象とした強度試験による安全性評価
- (4) 膝継手を搭載した大腿義足(模擬義足および訓練用仮義足)による歩行機能の評価
- (5) 立脚期における安定性(膝折れの有無)と耐久性の評価
- (6) 遊脚期における下腿部(足首・踵など)の運動軌跡の評価

上記の研究課題を達成するために、当初の計画では以下のような方法を設定した。ただし、COVID-19の影響などに起因して、計画の変更が必要となった。本研究は、進捗の遅れを鑑みて、研究期間を1年の延長をしている。

- ① 繊維結合型膝継手の設計・解析:「多軸型膝継手と同等の回転中心軌跡を持つ膝継手」および「人工膝に類似した回転中心軌跡を持つ膝継手」の膝継手2種を作成するとした。当初は前者の多軸型膝継手の開発に着手した。その後、後者の人工膝に類似した回転中心軌跡を持つ膝継手の開発に着手した。
- ② 繊維結合型膝継手の製作・評価:膝継手を実際に製作し、義足への適用を想定して強度試験による安全性評価を行う必要があった。そのため、この試験により、提案膝継手が歩行時の荷重に耐える強度を実現できるかを評価するとした。しかしながら、①の膝継手開発が難航したため、十分な評価を実施できていない。
- ③ 模擬義足の製作および健常者による模擬義足を用いた歩行試験:膝継手を搭載した模擬義足の製作と歩行試験を実施するとした。模擬義足は、初年度に義足製作企業へ依頼し製作した。模擬義足を用いた健常者による歩行をモーションキャプチャーやIMUを用いて計測する環境を構築した。しかし、2020年初頭から国内で流行したCOVID-19の影響で、模擬義足を用いた歩行実験の実施が難しい状況となった。そのため、歩行評価用の装置開発に重点を移した。
- ④ 実用レベルの訓練用仮義足(大腿義足)の耐久性評価:模擬義足による評価を踏まえ、切断者用の訓練用仮義足(大腿義足)の製作を試みるとした。しかしながら、実施までこぎ付けることができていない。
- ⑤ 切断者による訓練用仮義足を用いた歩行:繊維結合型膝継手を用いた大腿義足が、切断者の歩行能力再建に十分な性能が得られるか評価するとした。④と同様に実施できていない。

#### 4. 研究成果

(1) 従来構造「多軸型膝継手」の解析：従来の多軸型（四節リンク機構とも呼ばれる）の膝継手を購入し、その回転中心の変化を解析した。構造を解析するために制作したソフトウェアでは、機構の回転中心を視覚的に確認できるような機能を持たせた。このソフトウェアの解析結果から、多軸型膝継手の回転中心は、40cmほどの変化幅があり、最大伸展時に股関節辺りに位置することがわかった。屈曲するにつれて、股関節付近から膝関節付近まで回転中心位置が変化しているのが図1から確認できる。回転中心位置が膝関節から離れるほど、曲がりにくいことを意味する。伸展時には、股関節に近い位置に回転中心が来るため、膝継手が曲がりやすく関節の安定に寄与している。一方で、少し屈曲させると一気に膝関節側に回転中心が寄るため、膝継手が曲がりやすくなるのが解析結果より明らかである。

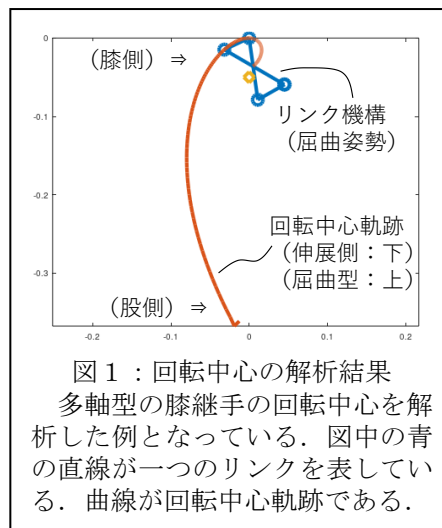


図1：回転中心の解析結果  
多軸型の膝継手の回転中心を解析した例となっている。図中の青の直線が一つのリンクを表している。曲線が回転中心軌跡である。

(2) IMU およびモーションキャプチャーを用いた従来型膝継手による義足歩行の計測・評価：開発した回転姿勢計測装置では、2つの加速度センサを用いて、重力方向から姿勢を算出し2つのセンサ情報から歩行運動を計測できる仕組みを開発した。この装置を模擬義足へ搭載し検証実験を実施した。実験において歩行時のおおよその負荷の解析を行った結果、歩行時には膝継手へ体重の2.5倍程度の負荷が瞬間的に加わることが推定された。健常者の歩行では、膝関節への負荷が体重の2~3倍程度とされているため、義足歩行でも同等の負荷がかかることが明らかになった。

モーションキャプチャーシステムを用いて模擬義足を用いた歩行での歩行軌跡、歩数、歩行速度を計測した。この歩行試験の結果からは、膝継手を用いた歩行動作の特徴を分析した。その結果、義足部の制御には健常歩行では見られない振り戻しの動作が重要であることが明らかになった。振り戻し動作とは、義足が遊脚側のときに接地直前に膝をまっすぐ伸ばすための振り子運動のことである。(1)でも示した通り、従来型の膝継手では、回転中心位置の変動幅が大きい。そのため、膝継手を完全に伸展状態にしなければ、膝折れの危険性を回避するための振り戻し動作が発生する。

(3) 無人義足歩行試験機の開発：当初の計画にあった人による義足を用いた実験について COVID-19 の状況を鑑みて実施しない方向に計画を修正した。代替策として図2のような無人での義足歩行試験を可能とする装置（以下無人義足歩行試験装置）の製作に取り組んだ。無人義足歩行試験装置は、膝継手の試験を可能にするために、ドレッドミルと歩容を生成する機械を組み合わせた装置となっている。

人の股関節部分の矢状面での動きを再現できるように、股関節の上下運動と屈曲伸展を行えるように駆動部を構築した。立脚相から遊脚相までの動きを荷重ありの状態でも再現できるように設計した。歩行時に体重を想定した負荷が義足に加わるようにしている。再現する運動は、以前に収集したモーションキャプチャーで計測された歩行データ（股関節周り）を元としている。しかしながら、ドレッドミルとの股関節の連動に未だ課題があるため持続的な歩行ができていないのが現状である。

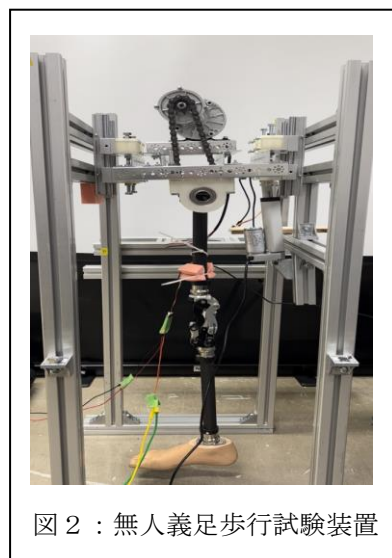


図2：無人義足歩行試験装置

(4) 繊維結合型膝継手の設計技術開発：

①【回転中心位置が大幅に変化する機構の問題点】当初は、計画通りに多軸型膝継手の製作を進めていた。しかし、(1)で示したように多軸型膝継手は、伸展状態で回転中心の位置が膝関節から約40cm股関節側に寄っている。そのため、多軸型と同等な繊維結合型膝継手を製作するには、40cm以上の繊維長が必要になる。これは、膝継手の巨大化に繋がる。この問題に対して解決すべく尽力したが現時点においても解決の糸口が見つかっていない。

②【リー代数の導入】生体のような3次元的な関節曲面の設計を行うために、回転系に有用なリー代数の考えに基づいた計算手法を導入し解決を試みた。その結果として、図3のように数値計算による三次元的な曲面の設計が限定的であるが可能になった。リー代数は、回転行列を四元数などにパラメータ化せずとも、評価関数を最小化する方向の回転行列を導出することが可能である。これを応用して、「リー代数の方法」によって、関節接触面の凹凸を設計するための方法を開発した。この方法により、従来の平面的な解析を三次元へ拡張することが可能になった。

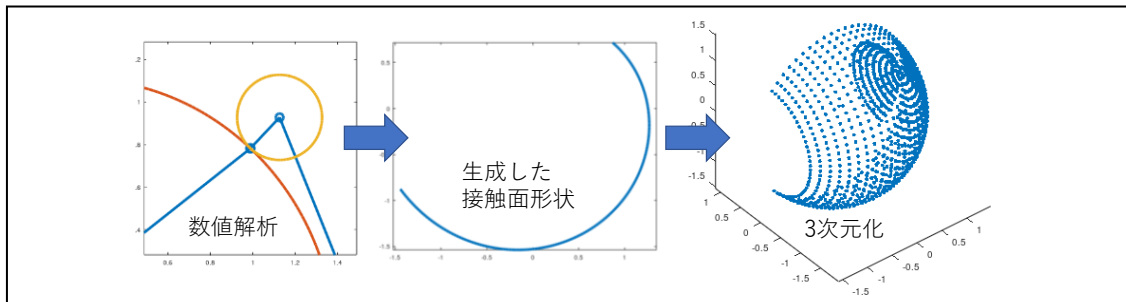


図3：関節接触面の生成結果

図中の左は、運動する円に接する曲線を数値解析により導出した結果である。計算には、「リー代数の方法」を用いた最適化を行っている。図中の中央は、実際に算出した接触面形状であり、関節の骨格が互いに接する面の一部を表す。右は、その3次元化である。

③【巻き付き拘束による繊維結合手法の開発】繊維結合型膝継手の設計法について、新たな繊維拘束手法を考案した。この拘束手法では、転がりと滑りが同時に発生する関節変位の条件下において有効な手法となる。関節の接触面形状の凹凸の合わせ目で運動方向と拘束方向の設計を行っていた。新たに考案した手法では、繊維を利用した巻き付き拘束によって設計する。この設計を元にした継手（図4）を試作し有効性を調査した。図4のように伸展状態から屈曲状態へ変化するとともに転がりと滑りが同時に発生することを確認した。

④【繊維への負荷を考慮した固定端位置の最適化】繊維の配置に関する設計を非線形計画問題として、拘束条件付きの最適化問題に関する数値解法への発展を試みた。膝継手設計に関わる多くの設計変数は、設計者が値を経験的に決定する手法で行っていた。この経験的手法での問題点は、設計者の設計値に依存していた点である。そこで、最適設計手法として知られる随伴変数法を応用することで解決を図った。目的関数として、外力（重力など）から受ける繊維への負荷（ひずみエネルギー）を最小化するように問題設定を行った。基礎方程式としては、繊維の変形（弾性材料の変形）と応力や重力を考慮した。繊維の固定端位置は、片方の固定端を指定した曲線上に拘束されているとし、もう一方の固定端はひずみエネルギーが最低になるように固定位置を修正する。ただし、繊維長にペナルティを科すように設定している。範囲で本設計法については、現時点では二次元の運動への応用に留まっている。

⑤【繊維拘束法についての新たな展開（特許出願予定のため詳細を省く）】膝継手の関節接触面形状設計には厳しい制約が生じる。この問題を回避するための解決策について、新たな着想を得た。この手法による試作から、膝継手の設計容易性、運動性と安定性について有効なことが確認され、実用に向けて進捗が見られた。

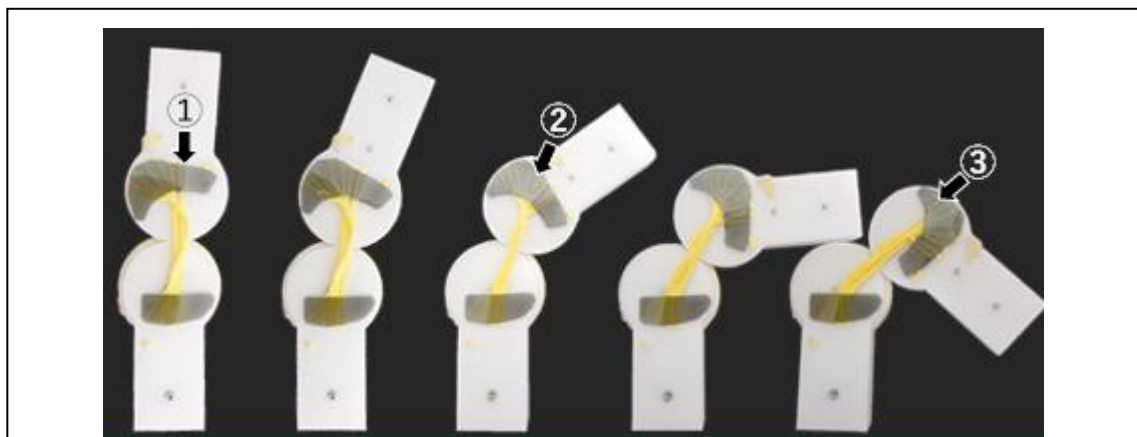


図4：巻き付き拘束を導入した関節の試作

巻き付き拘束を導入した関節機構の試作であり、①の伸展状態から③の屈曲状態までの変化を並べている。巻きかけ拘束により、上側が滑りと転がりを同時に発生させている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sonoda Takashi	4. 巻 37
2. 論文標題 Design of Rolling Joint Employing Ligament-Type Constraint Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 955 ~ 961
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.37.955	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------