

## 2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	宮崎大学 工学教育研究部 機械知能工学プログラム
職位または役職	准教授
氏名	舩屋 賢

### 1. 研究題目

ロボット装具のための回転軸位置が自在に変化する軽量・高出力・画一的な関節機構

### 2. 研究目的

本研究では、人の生活を豊かにするウェアラブルロボット装具のための、回転軸の位置が自在に変化する画一的かつ軽量・高出力な関節機構の開発、を目的とする。

健常者用のウェアラブルロボット装具が工場や介護の現場へ導入されつつあり、人の生活を豊かにするロボット装具の研究が期待されている。従来研究 [Kikuchi ら (2016), Yang ら (2016), Jiang ら (2020)] では、回転に伴って生じる回転中心位置の変動が人の膝・足首・腰などの各関節で違うため、ある関節を対象とした関節機構開発、すなわち、ハードウェアのテーラーメイドに基づく装具開発が行われてきた。しかし、ハードウェア調整によるコスト増加や、設計のための測定による利用者の負担増加が問題となる。

そこで、報告者は、測定による負担低減のために、推定器・制御器のようなソフトウェアが人に合わせて自動調整される、ソフトウェアのテーラーメイドに基づく装具開発を目指し、研究を進めている。ソフトウェアのテーラーメイドが可能になれば、画一的な関節機構の組合せで装具を設計でき、ハードウェアの調整コスト削減が図れ、装具の普及につながる。このような機構には、次の 5 つの特性が求められる。

- ① 人の回転中心変動に合わせるための、「回転中心変動に対する受動性」
- ② 意図した角度で補助するための、「関節角度の制御性能」
- ③ 人の運動補助のための、「高速・高トルクな出力」
- ④ 人に装着するための、「モジュールの軽量さ」
- ⑤ 駆動部の質量を減らすための、「遠隔駆動」

これらを満たす関節機構として、報告者は永守財団研究助成 2021・2022 にて、平行リンク機構とベルト駆動を統合した膝関節・股関節のための遠隔駆動可能な関節機構の開発に取り組んできた。その設計にあたり、とくに平行リンク機構間に設けた角度差が、軽量な設計に有効であることをこれまでに確認している。この設計指針を応用することで、軽量な装具機構を他の関節でも同様に開発できると考えられる。しかし、例えば、足首関節において、平行リンク機構の設計結果によっては地

面と機構が接触しやすくなり、かえって歩行などの日常生活の妨げとなる。このため、環境との接触を考慮した機構設計が必要となる。

したがって、研究助成 2023 では、平行リンク機構とベルト駆動を統合した、回転軸の位置が自在に変化可能、かつ環境との接触を回避可能な、三次元関節機構の開発を目指す。

### 3. 研究内容及び成果

#### ■A. 柔軟タイミングベルトを用いた 2 軸差動関節の開発

最終的なベルトによる遠隔駆動との統合のための 1 手法として、これまでに開発した柔軟なタイミングベルトを用いた差動関節機構(図 1)の開発を行った。実験により、モータから得られる理論トルク・理論角速度とフォースゲージ・エンコーダから得られる計測トルク・計測加速度を比較した。結果より、トルクにおいて、十分なトルク伝達できていないことが確認された。これは、歯のかみ合いの影響によるものと考えられる。一方で、角速度の伝達は十分に行えることを確認した。

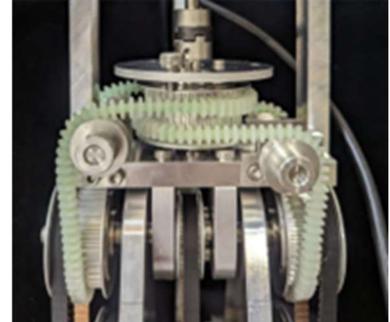


図 1. 柔軟タイミングベルトを用いた 2 軸差動関節。

#### ■B. 平行リンク機構を導入した足首関節用機構の開発

これまでに開発した平行リンク機構のリンク長さ最適化をもとに、図 2 のような足首用関節機構の設計に取り組んだ。ここで、三つの平行リンク機構を組合せた構造とし、屈曲・伸展をモータ駆動で補助するものとした。また、三つの平行リンク機構の各リンク長さについて、人の可動域と装着箇所へのずれから得られる要求可動域を含み、かつリンク長さが小さくなるように最適化を行った(図 3)。



図 2. 製作した足首関節用関節機構。

この関節機構について、回転関節へモータにより与えられる駆動トルクが、平行リンク機構を介して装着位置の力・トルクにどのように伝達されるかを仮想仕事の原理より解析した。結果として、装着位置にはトルクのみが伝達されることを確認した。また、図 2 の実験機で検証し、ある装着箇所では力は伝達されず、トルクのみが伝達されることを確認した。

#### ■C. 角度差付き平行リンク機構を用いた股関節用機構の開発

関節機構の軽量な設計のために、平行リンク機構間に角度差を設けた最適化計算を構築し、股関節用機構の設計に適用した。ここで、股関節用機構では、リンクが三次元配置されるため、角度差もまた三次元姿勢として考える必要がある。本研究では、この三次元姿勢を 3 つの角度で表すとし、これら 3 つの角度とリンク長さに対して、要求可動域を含み、かつリンク長さが小さくなるように最適化を行った。

最適化結果を図 4 に示す。結果より、リンクの可動域が要求可動域を覆いながらも、おおよそ同じ大きさになる程度まで小さくできることを確認した。また、この結果に基づいて設計したものを図 5 に示す。赤・緑・青の部分がそれぞれ平行リンク機構を示している。

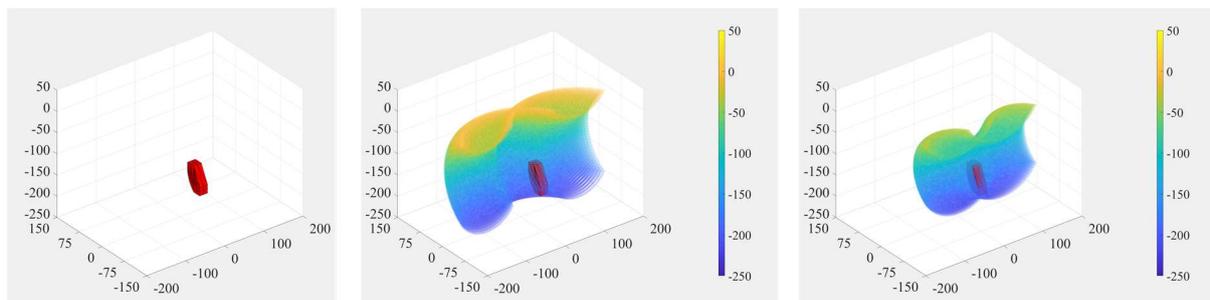


図 3. 足首関節用機構の最適化計算(左図:装着箇所のずれを考慮した要求可動域, 中央図:最適化前, 右図:最適化後)

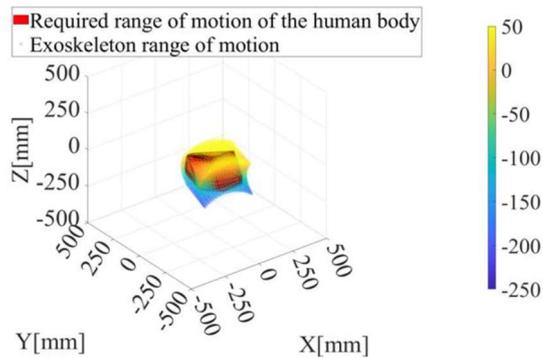


図 4. 角度差付き平行リンク機構を用いた股関節用機構のための最適化計算.

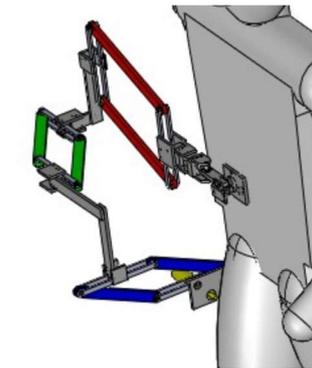


図 5. 設計した股関節用機構.

#### ■D. 周辺との接触を考慮した軽量な機構設計方法の構築

装具と周辺環境との接触を考慮しながら軽量な機構を設計するとき、これまでの最適化計算へ接触回避をそのまま導入すると計算時間が莫大になる。ここで、平行リンク機構は根元側と先端側で角度変化が生じないため、それぞれの平行リンク機構間の距離をリンク機構の原点位置に統合して最適化計算が行えることが確認されている。そこで、この平行リンク機構間の距離に着目し、はじめに前述の角度差付き平行リンク機構の最適化計算を実行した後、平行リンク機構間の距離を最適化することで接触を回避する、2段階の最適化計算を構築した。この2段階の最適化計算をまず人を環境とみなして実施し、人と装具の干渉を回避できる構造を設計した。

#### 4. 今後の研究の見通し

研究助成 2023 では、平行リンク機構により回転軸の位置が自在に変化可能、かつ環境との接触を回避可能な、三次元関節機構の開発に取り組んだ。その開発にあたり、これまでに開発してきた柔軟なタイミングベルトやリンクパラメータの最適化計算を拡張した。さらに、人を一種の環境とみなして、人と装具の干渉を回避できる構造設計を行った。今後、地面や椅子といった環境を考慮した設計へ拡張する予定である。

また、本研究助成では、平行リンク機構を主たる機構として関節機構の設計に取り組んだが、平行リンク機構の動作は平面に固定される。このため、三次元的な動作のためには、少なくとも3つの異なる回転方向をもった平行リンク機構が必要であり、最適化計算においても大型化しやすい傾向があった。この問題に対して、三次元的な動作が可能なパラレルリンク機構へ拡張することで、さらなる軽量化・小型化が行えると予想される。また、自由に回転できる関節で機構が構成されることから、重力の影響により特異姿勢に陥りがちであった。このため、重力補償機構の開発が今後の課題のひとつである。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議(査読無)

- [1] 神原龍樹, 舛屋賢, “柔軟タイミングベルトを用いた2軸差動関節の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024, 1P1-O02, 宇都宮, 2024.6.
- [2] 弓掛匠, 舛屋賢, “平行リンク機構を用いた股関節用外骨格のための各リンクの長さ・取付角・可動域の最適化”, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 盛岡, 3A6-08, 2024.12.(発表予定).

解説記事

- [1] 舛屋賢, “多方向に曲げられる柔軟なタイミングベルトの開発”, 機械設計, Vol. 68, No. 13, pp. 48-51, 2024.