

1. 担当 PM

田中 邦裕（さくらインターネット株式会社 代表取締役社長）

2. クリエータ氏名

村木 雄太（九州大学 芸術工学府）

3. 委託金支払額

2,880,000 円

4. テーマ名

新しい機構を持ったアシストスーツと、その人間工学設計

5. 関連 Web サイト

なし

6. テーマ概要

本プロジェクトは、非円形歯車機構を用いた歩行補助アシストスーツの開発と、その設計を個人に合わせて最適化するためのソフトウェアの構築を目的としたものである。

アシストスーツは、身体負荷の軽減や作業支援、リハビリテーションなどを目的として研究および製品化が進められている分野であるが、既存の多くの装置は特定の動作に最適化された設計となっており、汎用性や個人適応性に課題がある。また、アクティブ型のアシストスーツはモータやバッテリーを必要とするため構造が複雑になり、重量やコスト、運用の制約が大きくなる傾向がある。

一方で、パッシブ型のアシストスーツは構造が比較的単純であり軽量化や低コスト化に有利であるが、バネの特性に依存するため、補助できるトルク特性が限定されるという問題がある。すなわち、個々の使用者や動作に応じた最適な補助特性を実現することが難しいという制約が存在している。

本プロジェクトは、このような課題に対して、機構そのものを再設計することでトルク特性を自由に制御可能とし、パッシブ方式でありながら柔軟なアシストを実現することを目指したものである。具体的には、非円形歯車機構を用いることで回転角度に応じたトルクプロファイルを設計可能とし、従来のバネ依存

の構造を拡張するアプローチが採用されている。

さらに、本プロジェクトでは機構設計にとどまらず、設計プロセスそのものをソフトウェアとして実装し、身長や体重などのパラメータに応じて最適な装置を自動生成する仕組みの構築が行われている。これにより、個人最適化と製造の効率化を同時に実現することが試みられている。

以上より、本プロジェクトは単なるアシストスーツの試作ではなく、機構設計、数理モデル、ソフトウェア、製造プロセスを統合し、アシストスーツの設計方法そのものを再構成することを目的とした取り組みである。

7. 採択理由

本提案は、外部電力やモータを一切用いず、特殊歯車とバネのみで高効率な歩行補助を実現するアシストスーツを開発し、それに電子制御による個別最適化を組み合わせようとするものである。すでに実現している高い完成度を持つ機構を土台に、動力不要と柔軟制御の両立という困難な課題に取り組む点に、未踏事業として支援すべき価値があると判断した。

アシスト特性を関数として設計・制御する発想は、構造そのものをアルゴリズムとして捉える高度な工学的アプローチであり、まさに未踏的として評価できる。また、用途は歩行にとどまらず、階段昇降やリハビリなどへの応用も視野にあり、汎用的な身体支援技術としての展開も期待される。

提案者は、設計・実験・検証・論文化に至るすべてを自ら遂行しており、数値計算や電子制御に関する深い理解と実装力を有する。さらに科学啓発や創作活動を通じて、技術を社会に開く姿勢も明確である。自由な試行が許される未踏事業の場でこそ深化が期待される提案であると判断し、採択した。

8. 開発目標

本プロジェクトの開発目標は、パッシブ型アシストスーツにおける性能、適応性、コストといった複数の課題を同時に解決し、個人ごとに最適化された歩行補助装置を実現することである。従来のパッシブ型アシストスーツは、バネの特性に依存した補助を行う構造であるため、トルク特性が固定的であり、特定の動作や体格に対して最適化された設計となりやすい。このため、異なるユーザや動作条件に対して柔軟に適応することが難しく、実用性の面で制約となっていた。また、アクティブ型のアシストスーツはモータや制御系によって柔軟な補助が可能である一方、重量やコスト、電源管理といった点で課題があり、日常的な利用には適さない場合が多い。このように、パッシブ型とアクティブ型のいずれにも明確な制約が存在している。

本プロジェクトでは、これらの制約に対して、機構設計そのものを見直すことで対応することが目標とされている。具体的には、非円形歯車機構を用いることで、回転角度に応じたトルクプロファイルを設計可能とし、従来のバネ依存の固

定的な特性から脱却することが目指されている。この目標は、単に新しい機構を導入することにとどまらず、「トルク特性を設計可能な対象として扱う」という点に本質がある。すなわち、補助の強さやタイミングを設計パラメータとして扱い、それを機構として実現することが本プロジェクトの中心的な目標である。

さらに、本プロジェクトでは設計の個人最適化も重要な要素として位置づけられている。身長や体重、歩行特性といったパラメータに応じて装置の設計を変化させることで、個々のユーザに適したアシストを実現することが求められている。このため、機構設計と並行して、設計プロセスをソフトウェアとして実装し、入力パラメータから最適な構造を自動生成する仕組みの構築も開発目標に含まれている。これにより、設計と製造の効率化、および個別最適化の両立を図ることが目指されている。

以上より、本プロジェクトの開発目標は、非円形歯車機構によるトルクプロファイル制御の実現、設計の個人最適化、そしてそれらを統合したアシストスーツの構築という3つの要素から構成されている。

9. 進捗概要

本プロジェクトは当初、電動制御を組み合わせたアシストスーツの開発を前提として開始された。機械的な補助機構に加えてモータによる制御を導入することで、補助の強さやタイミングを柔軟に調整できる構成を目指していた。この段階では、従来のパッシブ型の制約を超えて、より自由度の高い補助特性を実現することが主眼となっていた。

しかし試作および検討を進める中で、このアプローチには複数の制約が存在することが明らかになった。特に問題となったのは、バネによって発生する力に対してモータおよび機構が十分に追従できない点である。補助力の変化に対してモータの応答が遅れる、あるいは必要なトルクを十分に発生できないといった状況が確認され、安定した制御を行うことが困難であることが明らかとなった。

また、モータを組み込むことによって構造全体が複雑化し、重量の増加や構造の大型化といった問題も発生した。アシストスーツは人体に装着する装置であるため、重量やサイズの増加はそのまま使用性の低下につながる。このため、単に機能を追加する方向ではなく、装置全体として成立する構造であることが重要であると判断された。

さらに、制御系の構築にも課題があった。補助のタイミングや強さを制御するためには、状態検出と制御ロジックが必要となるが、これらを安定して動作させることは容易ではなく、制御のばらつきや遅延が動作に影響することが確認された。

これらの検討を通じて、「モータによって制御する」という当初の前提が成立しないことが明確となり、本プロジェクトは大きな方向転換を行うこととなる。

すなわち、外部から制御するのではなく、「機構そのものによって特性を実現する」というアプローチへの転換である。この時点で、問題の捉え方が根本的に変化している。

この新しいアプローチの中核となったのが、非円形歯車機構である。従来の円形歯車では、回転に対して一定の関係しか得られないが、非円形歯車では形状そのものを設計することで、回転に対する力の伝達特性を変化させることが可能となる。この特性を利用することで、補助の特性を機構として実現することが試みられた。

具体的には、非円形ピニオンと曲線ラック歯車を組み合わせた構造が採用されている。この構成では、歯車の形状を変化させることで、回転角度に応じた力の伝達を設計することが可能となる。この段階で、本プロジェクトは単なる装置開発から、設計対象としての特性を扱うプロジェクトへと変化している。

この機構を実現するためには、歯車形状の設計が重要な課題となる。非円形歯車は円形歯車とは異なり、形状を個別に定義する必要があるため、設計を数学的に扱う必要がある。本プロジェクトでは、ピッチ曲線の定義、形状の導出、接触条件の検討などを含む数理モデルが構築されている。

この数理モデルを実際の設計に適用するため、歯車設計ソフトウェアが開発された。このソフトウェアでは、設計したい特性を入力として与えることで、それに対応する歯車形状を生成することが可能となっている。また、生成された形状の動作を確認するためのシミュレーション機能や、可視化機能も備えられており、設計と検証を一体として行うことができる。

さらに、設計結果をそのまま製造に利用できるように、出力機能も整備されている。3D プリンタによる製造を前提とし、形状データの出力に加えて、製造に適した形式でのデータ生成が行われている。特に Gcode の生成により、設計から製造までを一貫して扱うことが可能となっている。

アシストスーツ全体の設計についても同様にソフトウェア化が進められている。入力されたパラメータに応じて装具の寸法や構造を決定する仕組みが構築されており、個別に最適化された設計を生成することが可能となっている。このように、機構設計とソフトウェアが密接に結びついた構成となっている。

ハードウェアの開発は複数の試作を通じて進められている。初期の試作では基本的な構造の成立性を確認し、その後の試作では力の伝達や装着性、構造の安定性といった観点で改良が行われている。試作を繰り返す中で、設計と実際の挙動の差異が明らかとなり、それに基づいて設計の見直しが行われている。

最終的には、図 1 に示すとおり、非円形歯車機構を中心とした構造を持つ試作機に到達している。この試作機では、軽量化および構造の簡素化を維持しながら、実際に補助動作が可能であることが確認されている。また、設計から製造までの一貫したプロセスが確立されており、再現性のある開発が可能となっている。



図 1：非円形歯車式歩行補助アシストスーツ「Mechanical Suits」

一方で、当初想定していた電動制御は最終的には実現されていない。また、評価についても限定的な条件での確認にとどまっており、定量的な評価や広範な検証は今後の課題として残されている。

さらに、開発の過程において本プロジェクトは 1 月に田邊氏がプロジェクトのメンバーから外れて村木氏 1 名の開発体制となった。そのため開発の進め方にも影響が生じている。その結果として、試作中心の開発から、理論および設計を中心としたアプローチへと重点が移行している。

以上のように、本プロジェクトは当初の電動制御によるアプローチから出発し、その限界を踏まえて機構設計へと転換し、非円形歯車機構を中心とした設計へと到達している。そして、数理モデル、設計ソフトウェア、試作機の開発を通じて、その構造を実装として成立させている点に本プロジェクトの進捗の本質がある。

10. プロジェクト評価

本プロジェクトの評価において重要な点は、当初の手段に固執することなく、開発の過程で課題の本質に到達し、設計の前提そのものを転換したことにある。

当初は電動制御を前提とした構成で開始されているが、試作および検証を通じてそのアプローチが装置として成立しないことを確認している。この段階で

「モータで制御する」という前提を見直し、「機構によって特性を実現する」という方向へ転換している。この転換は単なる手法の変更ではなく、問題設定の再定義であり、本プロジェクトの中核となる成果である。

この再定義の結果として到達したのが、非円形歯車機構によるトルクプロファイル制御である。従来のパッシブ型ではバネ特性に依存していた補助を、歯車形状の設計によって制御可能な対象として扱っている点に本質がある。すなわち、力学的特性を設計変数として扱い、それを機構として実現している点において、設計原理レベルでの拡張が行われている。

また、この設計を理論にとどめることなく、数理モデルとして整理し、さらに設計ソフトウェアとして実装している点も重要である。歯車形状の生成、動作の検証、製造データの出力までを一体として扱うことで、設計から製造までの一貫したプロセスを構築している。この点において、本プロジェクトは単なる装置開発ではなく、設計手法そのものを拡張している。

さらに、複数世代の試作機を通じて構造を洗練させ、最終的に実際に動作する装置として成立させていることも評価できる点である。設計と実装を往復しながら改善を重ねている点において、高い実装力が示されている。

以上を踏まえると、本プロジェクトは当初計画の達成という観点では未達の部分を含むものの、その過程でより本質的な設計原理に到達し、機構・数理モデル・ソフトウェア・製造プロセスを統合した形で実装として成立させている点において、未踏プロジェクトとして高く評価できる成果である。

11. 今後の課題

本プロジェクトは設計原理を提示し、実装として成立させる段階に到達しているが、今後の発展に向けてはいくつかの課題が存在する。

第一に、評価および検証の課題である。現状では動作の成立は確認されているものの、被験者数や条件が限定されており、統計的な裏付けを持つ評価には至っていない。実際の使用環境を想定した定量的な検証を行い、補助効果の再現性や有効性を明確にする必要がある。

第二に、機構および機能の拡張である。非円形歯車機構によってトルク特性を設計可能とする基盤は確立されているが、より多様な動作や条件に対応するためには、さらなる機構設計の拡張や調整が求められる。また、当初検討されていた電動制御との組み合わせについても、今後の発展可能性として検討の余地がある。

第三に、実用化に向けた課題である。現状の試作機は機能として成立しているが、実際の製品として利用するためには、耐久性、安全性、装着性、長時間使用時の影響といった観点での設計が必要となる。また、製造プロセスについても、試作から量産への移行を見据えた検討が求められる。

第四に、プロジェクト遂行能力に関する課題である。本プロジェクトでは技術

的には高い成果が得られている一方で、スケジュール管理やコミュニケーションの面で課題が見られた。今後、より大規模な開発や社会実装を進める上では、技術力に加えて、プロジェクトを安定して遂行するための基礎的な能力の向上が重要となる。

以上より、本プロジェクトは設計原理の確立という重要な段階に到達しているが、今後は評価、機構拡張、実用化、そしてプロジェクト遂行能力の各側面において発展が求められる。