

論文内容要旨（和文）

(H27)2015年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 _____ 高木 稔



論 文 題 目 自由曲面に対応した全方向駆動歯車及びソフト材料を用いた
柔軟な駆動系の研究

本論文は、曲面上に直交して配置されたラック構造にそれぞれ噛み合う平歯車2対を協調制御することで、ある方向には並進し、それと直交した方向にはゼロ・正・負の曲率を有する自由曲面に対応して駆動して、曲面に沿ったあらゆる方向への動力伝達を可能にするという、2自由度を有する「自由曲面型」全方向駆動歯車を提案するものである。この自由曲面型全方向駆動歯車は、一段構造で、従来型の上下二段構造の X-Y ステージより小型・軽量化に適している上に、様々な曲率を有する自由曲面に柔軟に対応して動力を伝達することが可能であるという特長を有している。これにより、従来技術では搬送機能を与えることが困難であった狭隘空間にも、物体搬送機能を付加することが可能となり、様々な機器のさらなる自動化に貢献することを目指すものである。

本研究論文では、曲率ゼロの平面型の全方向駆動歯車と、正の曲率を有する凸円弧型の全方向駆動歯車とを接合して、自由曲面型の全方向駆動歯車を製作した。そのとき、接合面において発生しうる駆動用平歯車と全方向駆動歯車の機械的干渉を、3次元 CAD によるシミュレータ内で、製作前に予め試験して予測し、干渉を未然に防ぐために十分なクリアランスを確保したり、滑らかに、曲率半径の異なる歯面へと全方向駆動歯車が接合されるような工夫を施したりした。これにより、実際に製作した動力伝達機構の、機械的干渉の無いスムーズな動作を実現した。この方式で、機械的干渉の無い接合面による、様々な曲率を有する全方向駆動歯車を前後左右に連結してゆくことにより、自由曲面型全方向駆動歯車の可動範囲の広さと形状を、任意に拡張・設計することが可能であることを示した。

さらに、通電するときに陰極側に水が染み出すという特性を有する DN ゲルを用いて、上記の全方向駆動歯車のような柔軟なアクチュエータの環境適応機能を補強することを目指し、小型・軽量の柔軟アクチュエータを、DN ゲルと形状記憶合金の組み合わせで製作して、体の中心部分まで柔軟なソフトマターロボットと成り得る尺取虫型移動ロボットに適用した。本論文においては、このソフト材料と自由曲面型の全方向駆動歯車とを組み合わせた柔軟な駆動系を開発する手法と、それをソフトマターロボットに適用する方法論についても検討を行った。

第1章では、これまでに無い、直交したラック構造という独特な歯形状を有する自由曲面型の全方向駆動歯車について定義した。第2章では、曲率ゼロの平面型の全方向駆動歯車と、正の曲率を有する凸円弧型の全方向駆動歯車とを接合して、自由曲面型の全方向駆動歯車を製作する際に発生し得る機械的干渉を、3次元 CAD "SolidWorks"を用いて予測し、設計段階において機械的干渉を除去・回避する手法について説明する。第3章では、3次元 CAD で検証した結果に基づいて製作した、金属製の自由曲面型全方向駆動歯車の第一試作機の機構と、それを用いた実証実験について説明する。第4章では、自由曲面型全方向駆動歯車の第一試作機の実証実験の結果に基づき改良して、実際に自動車に使用されているサイドミラーを、単に「回転」運動により折り畳むだけでなく、自

由曲面型全方向駆動歯車により「前後左右方向に適切に『並進』」させて、ドア内部に収納することを可能とする、より小型の自由曲面型全方向駆動歯車の第二試作機の設計方法について述べる。第5章では、通電することで、陰極側に水分子を生成する機能を有する DN ゲルを脚部に用いた尺取虫型移動ロボット第一試作機の機構およびその歩行実験について説明する。尺取虫型移動ロボット第一試作機では、ロボットの胴体を伸縮させる直動アクチュエータとして送りねじを用いたが、これを形状記憶合金のような柔軟な直動アクチュエータに交換することで、体中心部分まで柔軟な、真のソフトマターロボットを開発することを可能とする方法についても検討を行った。第6章では、そのような摩擦制御機能を有する DN ゲルを、自由曲面型全方向駆動歯車と組み合わせることにより、少ない部品点数で、狭隘空間に適用可能な小型・軽量の柔軟アクチュエータを開発するための設計論と、今後の工学的応用可能性について議論した。

上記の研究成果は、多くの自由度が求められる狭隘空間探索ソフトマターロボット用の柔軟アクチュエータ等に適しており、複数の関節の集約によって、小型・軽量化、低コスト化、および高機能化をもたらす効果があり、従来の剛体のみで構成されていた移動ロボットでは探索できなかった狭隘空間の探索を可能とする効果がある。また、従来の剛体の力学の制約の下で開発されていたアクチュエータでは、物体を搬送するのが困難であった狭隘空間においても、物体を搬送したり、移動させたりすることを可能とする、柔軟マニピュレータの開発にも道を拓くものである。

論文内容要旨 (英文)

2015 年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 _____ 高木 稔



論文題目 Omni-directional Driving Gears for Freeform Surfaces and Soft Materials Research on flexible drive systems

This paper introduces a "free-form" omni-directional driving gear with two degrees of freedom: translation in one direction and movement along a surface with variable curvature. This gear features a single-stage structure, making it more compact and lightweight compared to conventional X-Y stages with two-stage structures. It can flexibly transmit power to surfaces with different curvatures.

The research involves fabricating the free-form omni-directional driving gear by combining a planar gear with zero curvature and a convex arc-shaped gear with positive curvature.

Mechanical interferences at the joints were tested and predicted using a 3D CAD simulator, ensuring smooth operation. This approach allows extending the gear's movable range by connecting gears with various curvatures and interference-free joints.

Additionally, the paper discusses a small, lightweight flexible actuator made from DN gel and a shape memory alloy, applied to a shakuhari-mushi type mobile robot. Combining this soft material with the free-form gears is also explored.

Chapter 1 defines the unique tooth profile of the free-form gear. Chapter 2 details predicting mechanical interferences using “SolidWorks” software. Chapter 3 covers the first prototype’s mechanism and demonstration. Chapter 4 describes the improved second prototype designed to fit an automobile side mirror. Chapter 5 focuses on the shakuhari-mushi type mobile robot with DN gel legs and its walking experiment. Chapter 6 discusses designing a small, flexible actuator for confined spaces by combining DN-gel and free-form gears, and its potential applications.

These results are promising for flexible actuators in confined-space exploration robots, offering a compact, lightweight, low-cost, and highly functional solution.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 6 年 8 月 9 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 多田 隈 理一郎

副査 水戸部 和久

副査 南後 淳

副査 原田 知親

副査



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻 機械システム工学専攻 氏名 高木 稔		
論文題目	自由曲面に対応した全方向駆動歯車及びソフト材料を用いた柔軟な駆動系の研究		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和 6 年 7 月 17 日～ 令和 6 年 8 月 2 日
論文公聴会	令和 6 年 8 月 2 日	場 所	工学部 6-508 教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和 6 年 8 月 2 日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本学位論文は、人間と物理的な接点を持ちうるソフトロボット用のアクチュエータに適用可能な、任意の曲率を有する自由曲面に対応した全方向駆動歯車およびソフト材料を用いた柔軟な駆動系として、DN(Double-Network)ゲルを用いた柔軟な動力伝達機構を提案するものである。本論文では、これらの機構のアイデア、設計手法、生成・製作手法、そして制御手法を構築し、試作と実験を通して、提案機構の実現可能性と特徴を実証しつつ、将来的な社会実装への見通しを付けている。

第1章では、ソフトロボットの対人親和性の向上を目的としたソフトアクチュエータの意義を説明しつつ、先行研究と比較した本研究の立ち位置と目的を述べている。第2章では、曲率ゼロの平面型の全方向駆動歯車と、正の曲率を有する凸円弧型の全方向駆動歯車を滑らかに接続することで、駆動用平歯車との機械的な干渉を避ける設計手法を説明しつつ、自動車のサイドミラーの収納に使用可能なほどに小型化している。第3章では、提案する自由曲面对応型全方向駆動歯車を駆動するための電子回路について説明した上で、レーザ測距センサを用いた動作精度計測実験を行い、その結果十分な精度で、上下・左右方向への並進と、回転運動とを行えることを示した。第4章では、方眼紙とペンとを用いて、自由曲面对応型全方向駆動歯車をプロッターとして駆動することにより、その軌道追従精度の計測実験を行い、十分な精度を有していることを定量的に実証した。第5章では、前述の全方向駆動歯車と同様に、ソフトロボットに適用可能な、DN ゲルを用いた直動駆動機構を開発し、それを適用した尺取虫型配管探索ロボットの試作機の設計と開発を行った。第6章では、通電することで摩擦抵抗を低減する特性を活用した DN ゲルによる小型直動機構が十分な推力を出せることを実験的に検証している。第7章では本研究のまとめと今後の展望を述べている。

このように、本学位論文の研究テーマには新規性・独自性があり、自ら研究を計画・遂行するための専門的知識に基づいて、その研究背景と目的が正しく述べられていた。学位論文は適切な構成と体裁と共に、論理的に論点が記述されており、設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられていた。この学位論文の研究テーマに関連するフルペーパーの査読付き筆頭著者論文2報が学術雑誌に掲載されている。本学位論文により得られた知見とその成果は、ロボット工学及び機械工学の発展に十分寄与するものである。よって、博士(工学)の学位論文として合格と判定した。

なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文に関する1時間の口頭発表の後に、主査・副査の教員により、同じく1時間質疑応答を行う形で実施された。当該学生の専門的知識、本学位論文の論理展開について、深い議論が行われた。その結果、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断されたため、最終試験について合格と判定した。