

# 論文内容要旨 (和文)

平成30年度入学 大学院博士後期課程

理工学研究科 機械システム工学専攻

氏 名 阿部 一樹



論文題目 球状歯車の噛み合いに基づく

回転三自由度を有する能動ボールジョイント機構の研究

社会からの期待を受け、ロボットシステムやマニピュレータの活躍の場は益々広がり続けている。一方で、ロボットの作業能力の向上はより多くの自由度、すなわち関節を必要とし、結果として、アクチュエータや機構の設計において小型化が難しいといった様々な困難をもたらしている。もし、1つの関節で複数の自由度が得られれば、ロボットは従来のものよりも小型で、低コストで、そしてより高機能になると考えられる。このような背景に後押しされ、これまで様々な多自由度アクチュエータ・メカニズムが提案されてきたが、回転3自由度を有し、広い可動範囲を持ち、そして滑りなく低速高トルクを伝達可能という、関節要素として望ましい特性を並立させたものは提案されていない。

本論文では多自由度のメカニズムとして、球状歯車の噛み合いに基づいた、回転3自由度を有する能動ボールジョイント機構を提案する。本機構は歯車の噛み合いに基づいているため、滑りが存在せず、確実な動力伝達が可能である。また、その可動範囲は従来の多自由度アクチュエータ・メカニズムと同等か、それ以上とすることができる。本論文では、この機構のアイデア、設計手法、運動学の導出、生成・製作方法、そして制御手法を構築し、試作と実験を通して、本機構の実現可能性と社会実装に向けての将来の見通しを示す。

本論文は全8章から構成されている。各章の要旨は以下の通りである。

第1章では、まずロボットの多機能化と課題、そしてそれに対する多自由度アクチュエータ・メカニズムの意義を述べる。次に先行研究を紹介し、本研究の立ち位置を明らかにした上で、その目的を述べる。

第2章では球状の歯車と、円錐歯または円弧歯を持つ駆動ピニオンというアイデアを展開し、実現可能な球状歯車と駆動ピニオンを考察した。これらの間の相互作用に着目することで、回転3自由度を発現する球状歯車と駆動ピニオンの構成を示した。原理モデルの試作を通じた実験は、回転3自由度を得るアイデアが実現可能であることを示唆したが、一方で、駆動ピニオンの噛み合いに課題があることが明らかとなった。そこで、駆動ピニオンを置換し得るものとして鞍状歯車を提案し、本機構の基礎的な構成を示した。

第3章では、第2章で示された球状歯車と鞍状歯車というアイデアについて、その形状と設計条件を具体的に定義した。また、ホルダーや駆動モジュールといった本機構を構成する要素についても、それらの設計条件を明確にした。さらに、これらの歯車同士の噛み合いにおいて生ずる相互作用を定義し、これに基づいて等価なリンク機構を導いた。この等価リンク機構に機構学を適用することで、本機構が理論上、回転3自由度を有していることを明らかにした。

第4章では第3章で導いた等価リンク機構にロボット工学のアプローチを適用し、その運動学と静力学を示した。具体的には、順運動学、逆運動学、ヤコビ行列などの導出を行い、理論的な側面から、冗長性や能動関節同士の拘束式、そして拮抗トルクが存在を明らかにした。

第5章では、第2章の鞍状歯車のアイデアを具体的な理論に落とし込み、鞍状歯車の歯面の数値解析的な生成アルゴリズムを構築した。これをJavaで実装し、各種の鞍状歯車の生成と3Dプリントによる噛み合いの確認を通して、この生成手法が妥当であることを示した。

第6章ではこれまでの章で示した設計手法と鞍状歯車の生成アルゴリズムを用いて、試作機の具体的な設計と開発を行った。これにより、本機構が一般的な工業材料と従来の加工技術で製作可能であることを示した。また、マイコンを用いた制御システムを開発し、第4章で述べた逆運動学の制御アルゴリズムを実装した。さらに、社会実装上の課題についても議論し、生産における経済性が向上する余地が十分にあること、既存のボールジョイント設計手法の延長として、より最適に設計し得ることを述べた。

第7章では、第6章で開発した試作機への実験を通して、本機構が有するいくつかの特徴と、実現可能性についての検証を行った。球状歯車の可動範囲を網羅的に位置決めする実験と、姿勢のコンフィギュレーション空間上における直線軌道に追従させる実験を行い、その到達可能性、繰り返し位置決め精度、そして軌道追従性を検証した。実験結果は特異点の存在を示したが、一方で、本機構が回転3自由度を有しており、滑りが存在せず、そして駆動モジュールの配置に自由性があることを明らかにした。また、試作機と他の多自由度アクチュエータ・メカニズムの可動範囲を比較し、今回提案する機構に優位性があることを示した。

第8章では、本研究にて得られた知見を総括した上で、今後の展望を述べた。

# 論文内容要旨 (英文)

平成30年度入学 大学院博士後期課程

理工学研究科 機械システム工学専攻

氏 名 阿部 一樹



論 文 題 目 Active Ball Joint Mechanism with Three Degrees of Freedom  
based on Spherical Gear Meshing

Motivated by social expectations, research on multi-degree-of-freedom actuators and mechanisms has been progressing. However, it seems that nothing has yet been proposed that combines the appropriate characteristics for a joint component: three-degrees-of-freedom of rotation, a wide range of motion, and the capability to transmit high torque at low speed.

In this paper, we propose an active ball joint mechanism with three-degrees-of-freedom based on spherical gear meshing as a mechanism of multiple degrees of freedom. Since this mechanism is based on the meshing of spherical gears, there is no slippage and the drive torque is transmitted reliably. Furthermore, the range of motion is equal to or larger than that of previous multi degree of freedom actuator / mechanisms. In this paper, we propose the idea, design method, kinematics, fabrication method, and control method of this mechanism. Through prototyping and experiments, we show the feasibility of this mechanism and its future prospects for social implementation.

In Chapter 1, previous research on multi degree of freedom actuator / mechanisms is

presented. After clarifying the position of this research, the purpose is described.

Chapter 2 introduces the spherical gear and the Monopole gear. In addition, we present a principle model for achieving rotational three-degrees-of-freedom.

In Chapter 3, we defined the geometry and design conditions of those ideas presented in Chapter 2. We also showed the components of this mechanism, such as a holder and a driving module. In addition, by establishing an equivalent linkage mechanism of this mechanism and applying the mechanics theory, we revealed that this mechanism has rotational three-degrees-of-freedom theoretically.

In Chapter 4, we applied robotics theory to the equivalent link mechanism and clarified its kinematics and statics.

In Chapter 5, we theorized the geometry of the Monopole gear and developed a numerical algorithm for generating the tooth surface of the Monopole gear.

In Chapter 6, we designed and developed a prototype of this mechanism using the design method and Monopole gear generation algorithm presented in the previous chapters.

In Chapter 7, we verified the reachability of the orientation, the repeatability of the positioning, and the trajectory followability using the prototype. The results show that the mechanism always has three-degrees-of-freedom in rotation, no slippage, and flexibility in the placement of the drive modules. In addition, we compared the range of motion of the prototype with that of other multiple degrees of freedom actuator / mechanisms, and showed the superiority of our proposed mechanism.



学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 3 年 2 月 1 0 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 ..... 水戸部 和久 .....  
副査 ..... 幕田 寿典 .....  
副査 ..... 久保田 繁 .....  
副査 ..... 多田隈 理一郎 .....  
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 阿部 一樹
論文題目	球状歯車の噛み合いに基づく回転三自由度を有する能動ボールジョイント機構の研究	
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日 令和 3 年 1 月 2 0 日～ 令和 3 年 2 月 9 日
論文公聴会	令和 3 年 2 月 9 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 3 年 2 月 9 日

学位論文の審査結果の要旨

本学位論文は、滑りなく確実な動力伝達が可能で、なおかつ従来の多自由度アクチュエータ・メカニズムと同等かそれ以上の可動範囲を有する多自由度のメカニズムとして、球状歯車の噛み合いに基づいた回転3自由度を有する能動ボールジョイント機構を提案するものである。本論文では、この機構のアイデア、設計手法、運動学の導出、生成・製作方法、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（回転3自由度を有する、滑りがない、等）を実証しつつ、将来的な社会実装への見通しをつけている。

第1章では、ロボットの多機能化を背景とした、多自由度アクチュエータ・メカニズム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、実現可能な球状歯車と駆動ピニオンを考察している。回転3自由度を発現する球状歯車と駆動ピニオンの構成を示しつつ、鞍状歯車という新しい歯車のアイデアを提案している。第3章では、球状歯車、鞍状歯車、ホルダなどの形状と設計条件を具体的に定義している。さらに、機構学やロボット工学の手法を適用可能な等価なリンク機構を導き、Grübler式から提案機構が回転3自由度を有することを示している。第4章では、提案機構の順・逆運動学とヤコビ行列、そして静力学を示しつつ、理論的な側面から、冗長性や拮抗トルクの存在を明らかにしている。第5章では、鞍状歯車の歯面の数値解析的な生成アルゴリズムを構築している。第6章では試作機の設計と開発を行い、本機構の製作可能性を示した。第7章では実験により、本機構が有する特徴について検証している。可動範囲を網羅的に位置決めする実験と、直線軌道に追従させる実験を行い、本機構が常に回転3自由度で、滑りなく駆動でき、そして駆動モジュールの配置に自由性があることを明らかにしている。第8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1報が学術雑誌に掲載され、かつ別の筆頭著者論文1報が全文査読付き国際会議にてフルペーパーのプロシーディング論文として発表されている。

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。