

論文内容要約

平成30年度入学 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

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。

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、そして拮抗トルクの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。