

氏名	コツカ ヒロアキ 小塚 裕明
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第861号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	柔軟ばね関節を有するパラレルメカニズムの提案と応用 手法構築 (Parallel mechanism with compliant joints: novel approach and methodology for application)
論文審査委員	主査 教授 佐野 明 人 教授 山 田 学 准教授 坂 口 正 道 教授 武 田 行 生 (東京工業大学)

論文内容の要旨

本研究では、従来の回転関節などの代わりに柔軟な構造をばねのように変形し、動力を変換・伝達する機構であるコンプライアントメカニズムを、パラレルメカニズムに応用したコンプライアント-パラレルメカニズムを提案する。コンプライアントメカニズムは、機械的ガタがなく高精度に動作し、潤滑の必要がなく、摩耗粉や騒音が発生しない。さらに、コンプライアントメカニズムをパラレルメカニズムに応用することにより、ばね関節の変形を、パラレルメカニズムの機械的拘束により高精度に動作させることが可能となる。しかしながら、コンプライアントメカニズムは、柔軟構造の変形により動作する原理上、動作域に制限が生ずるため、主としてマイクロメートルオーダーの微細動作のみ適用されるという問題があった。よって、本研究では、以下の様に応用手法を構築し、小型光学部品の精密位置決め装置へ応用することにより、柔軟ばね関節を用いたパラレルメカニズムの有効性を確認した。

1. 本研究では、コンプライアントメカニズムを一般的に適用するため、加工容易性を失わず広く屈曲しながらも回転1自由度拘束を有するばね関節形状の最適な設計方法を検討した。まず、バイオマニファクチャリングの観点から植物であるハンマーオーキッドから

着想し、円弧ばね関節を提案した。平面方向のみで加工可能な従来のばね関節 3 つとともに、FEM 解析を行って、円弧ばね関節が広い動作域を有することを確認した。次に、回転 1 自由度拘束を有する剛性特性とさらに広い動作域を有するばね関節のために、従来のばね関節 3 つと円弧ばね関節を直列に連続して配置したばね関節を提案した。これらの FEM 解析から、板ばね関節を横にして連続配置した形状が、広い動作域と平行メカニズムとして構築した場合、十分な機械的拘束を得る剛性を有することが明らかになった。その形状をもとに、新たに板ばねの左右から溝が交互に入った互違溝ばね関節を提案した。その評価実験から、互違溝ばね関節の広い動作域と剛性特性を明らかにした。これらにより、提案したばね関節設計手法の有効性が確認された。

2. これらばね関節を各々平行メカニズムに応用したコンプライアントー平行メカニズム (C-P メカニズム) 試作機を開発して、平行メカニズムの機械的拘束がばね関節に有効に作用し、高精度かつ広い動作域、高剛性であることを示した。まず、円弧ばね関節を用いた回転 2 自由度、並進 1 自由度を有する試作機は、C-P メカニズムの基礎的な特性を調べるためのものであった。その評価実験から、本試作機が $0.35\mu\text{m}$ 及び 0.006deg の高い繰り返し精度で動作することが明らかになり、円弧ばね関節を用いた C-P メカニズムの精密位置決めについて有効性が確認された。次に、互違溝ばね関節を用いた並進 3 自由度を有する試作機により、ピッキングに用いるための実用的な動作域 (50 mm 四方) と $0.66\mu\text{m}$ の繰り返し位置決め精度が両立することを確認した。また、本試作機では、円弧ばね関節を用いた試作機より剛性が向上しており、ばね関節の回転 1 自由度拘束を有する剛性特性の有効性を示した。

3. 最後に産業用のピッキングおよび高精度位置決め作業へ応用のため、より多自由度のコンプライアントー平行メカニズム試作機を開発した。互違溝ばね関節を改良し、最大屈曲角度 $\pm 60\text{deg}$ を実現する改良型互違溝ばね関節を開発した。このばね関節を 5 自由度 (並進 3 自由度及び回転 2 自由度) のコンプライアントー平行メカニズムとして構築し、応用目的である光学部品のピッキング及び精密位置決めのための動作を実現した。動作域は並進 : $400 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ 、精密位置決めのための回転 2 自由度 : $\pm 3\text{deg}$ を実現した。繰り返し精度は動作域全体において $1.0\mu\text{m}$ を上回り、また、回転動作では、繰り返し精度 0.01deg を有した。よって、本試作機は、高精度動作と汎用的な応用に必要な広い動作域を実現した。なお、多自由度化により絶対誤差を補償可能となった。これらにより、広い動作域と曲げ剛性を考慮したばね関節を平行メカニズムに用いることで、汎用的応用が可能であり、本研究で提案したコンプライアントー平行メカニズムの有効性が確認された。

論文審査結果の要旨

本論文では、従来の回転関節などの代わりに柔軟な構造をばねのように変形し、動力を変換・伝達する機構であるコンプライアントメカニズムを、パラレルメカニズムに応用したコンプライアント-パラレルメカニズムを提案し、評価を行ったものである。

第一章は序論であり、本研究の目的について述べた。

第二章では、コンプライアントメカニズムに関する研究として、ばね関節形状や機構応用等いくつかに分類して記述ののち、本研究との関連や違いについて述べた。

第三章では、コンプライアントメカニズムを一般的に適用するためのばね関節形状の最適な設計方法を検討し、円弧ばね関節および板ばねの左右から溝が交互に入った互違溝ばね関節を提案した。評価実験から、広い動作域とその剛性特性を明らかにした。これらにより、提案したばね関節設計手法の有効性を確認した。

第四章では、第三章にて提案した円弧ばね関節を有する回転2自由度並進1自由度の試作機および評価実験について記述した。本試作機は、コンプライアント-パラレルメカニズムの基礎的な特性を調べるためのものであり、円弧ばね関節を用いたコンプライアント-パラレルメカニズムの精密位置決めについて有効性を確認した。

第五章では、第三章にて提案した互違溝付きばね関節を有する並進3自由度の試作機と評価実験について記述した。評価実験から、本試作機は、ピッキングに用いるための実用的な動作域（50 mm 四方）と繰り返し位置決め精度（0.66 μ m）が両立することを確認した。また、ばね関節の回転1自由度拘束を有する剛性特性の有効性を示した。

第六章では、産業用のピッキングおよび高精度位置決め作業への応用のため、より多自由度のコンプライアント-パラレルメカニズム試作機について記述した。互違溝ばね関節を改良し、最大屈曲角度 ± 60 degを実現する改良型互違溝ばね関節を開発した。このばね関節を5自由度の試作機として構築し、応用目的である光学部品のピッキング及び精密位置決めのための動作と高精度を実現した。

第七章では、開発した試作機制御に用いるロボット制御ソフトウェアについて記述した。本制御ソフトウェアは他のロボットへの実装を容易にするため、オブジェクト指向言語を使用し、安定した制御と実装容易性を有する。

第八章では、広い動作域と曲げ剛性を考慮したばね関節をパラレルメカニズムに用いることにより、汎用的応用が可能であることを総括した。

以上、本論文では新たな位置決め機構として、高精度でありながら従来と比較して広い動作範囲を実現する、コンプライアント-パラレルメカニズムを提案し、その有効性が示されている。提案する機構には技術的新規性、有用性が認められ、かつ本論文にはその応用手法の構築が明確に示されている。これらの研究成果は、審査有り論文4編として学術雑誌に掲載されている。これらのことから、本論文の学術的価値は高く、博士（工学）の学位論文に値するものであると認める。