

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289020

研究課題名(和文) 弾性ジョイントからなる並進・回転運動分離形5自由度パラレルロボットの設計法

研究課題名(英文) Design of a Position-Orientation Decoupled Parallel Robot with 5-DOF Using Flexure Joints

研究代表者

武田 行生 (TAKEDA, YUKIO)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20216914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：並進3自由度+回転2自由度の運動を出力運動とする5自由度パラレル機構として、出力リンクの回転中心の位置を制御する連鎖と回転中心まわりの回転運動を制御する連鎖の2種類の連鎖からなる機構の具体的な構造を明らかにしてその特異点、作業領域等に基づく機構総合を行った。また、2つのフレーム間に薄板ばねを2重らせん状に配置した弾性回転ジョイントについて、その剛性特性、回転変位に伴う回転軸のドリフト特性を理論的および実験的に明らかにするとともに、薄板ばねの安定的な挙動を実現する板ばねの適切な材質選定および配置決定を行った。そして、作業領域と位置・姿勢精度に優れた5自由度パラレルロボットを開発した。

研究成果の概要(英文)：Structural synthesis of position-orientation decoupled parallel mechanism composed of a target point controlling chain and two rotational motion generating chains was carried out. As the result, 24 kinematic structures were figured out. Kinematic analysis of a mechanism among them was carried out to evaluate workspace, accuracy and singularity. Stiffness and displacement-dependent drift of a flexure revolute joint, which is composed of two frames and in-parallel arranged thin plates, were theoretically and experimentally investigated, while a spatial mechanism based on the Oldham's coupling mechanism was developed as a measurement apparatus used in our experiments. A new design of the joint including material selection was proposed for better stable behavior of it. A parallel robot with a position-orientation decoupled structure was designed and built, and experimental results showed its good performance in workspace and accuracy.

研究分野：機械工学

キーワード：機械設計 ロボット工学 機構学 弾性ジョイント パラレルマニピュレータ

1. 研究開始当初の背景

腹腔鏡下での低侵襲手術や人工関節加工等においては、エンドエフェクタ（出力リンク）の回転中心の位置を3次元空間内で移動させつつ精密かつ大きな姿勢角変位を達成することが必要とされる。このような並進3自由度、回転2自由度の合計5自由度の運動を出力とするロボット機構としては、これまでほとんどの場合にアクチュエータを直列に配置したシリアル機構が採用されてきたが、駆動源の保護、可動部ジョイントの潤滑・密封を厳しく管理するために多大なコストを要していた。この問題を解決するために、アクチュエータをベースあるいはその隣接部に配置可能でこれらの保護が容易であるパラレル機構を運動機構として採用し、そのジョイントには摺動部が無く潤滑・密封が不要で再現性の高い動作が可能な弾性ジョイント（部材の弾性変形によりジョイントの機能を果たす機械要素）を採用することが考えられる。しかし、上記の空間5自由度運動はいわゆるリー代数に閉じた運動群に属していないため、この運動を実現する機構の総合には最近の10年間ほどで開発されてきた並進3自由度パラレル機構等と類似した総合法を適用することができず、未だ有用な機構総合法が開発されていなかった。また、従来の弾性ジョイントは、可動範囲が狭い・拘束剛性が低い等により、上記のような応用に適したものが存在していなかった。

2. 研究の目的

第1章での背景をもとに、本研究では、広い動作領域を有しスムーズ、低発塵、高精度かつ長時間の安定した動作が実現可能な、弾性回転ジョイントからなる5自由度の並進・回転運動分離形パラレルロボットの設計法を開発することを目的とした。まず、パラレルロボットの新たな機構構造として、並進3自由度+回転2自由度の運動を出力運動とする機構を提案し、その総合法を確立することを第1の目的とした。次に、広い可動範囲と伝達回転軸まわりの低剛性を実現しつつ、それ以外の拘束方向に関しては高い剛性を達成する弾性回転ジョイントの設計法を開発することを目的とした。そして、パラレルロボットを設計・試作して実験による検討を加え、開発した機構、ジョイントおよび解析・総合手法の有用性について検証することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、A. 並進・回転運動分離形5自由度パラレル機構の解析・総合システムの開発、B. 弾性回転ジョイントの特性解析、試験方法の開発と構造の最適化、C. パラレルロボットの設計・試作および駆動実験、の3つの項目に分けて研究を推進した。

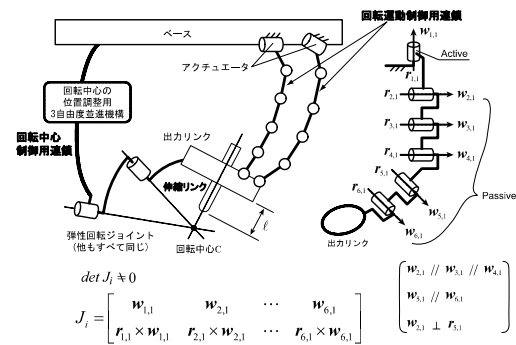


図1 並進・回転運動分離形5自由度パラレル機構の基本構成

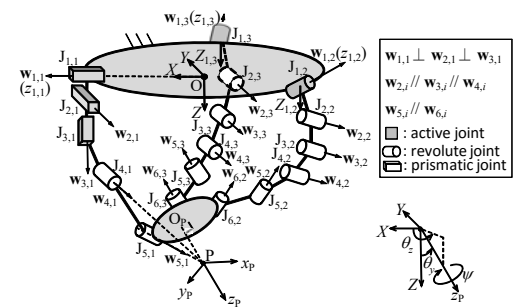
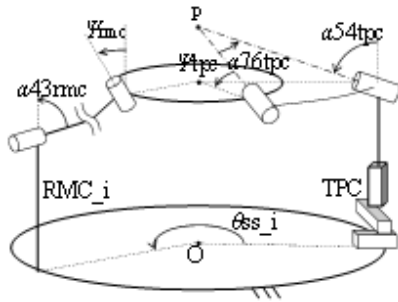


図2 対象とした5自由度パラレル機構

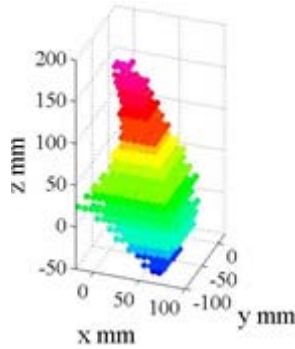
4. 研究成果

A. 並進・回転運動分離形5自由度パラレル機構の解析・総合システムの開発

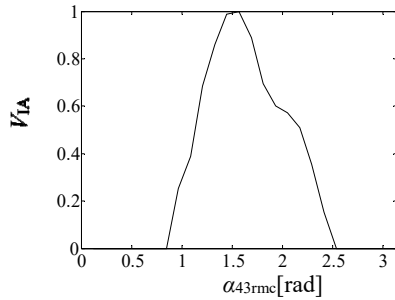
まず、並進3自由度+回転2自由度の運動を出力運動とするパラレル機構として、出力リンクの回転中心の位置を制御する連鎖（回転中心制御用連鎖）と回転中心まわりの回転運動を制御する連鎖（回転運動制御用連鎖）の2種類の連鎖からなる機構の基本構成を提案した（図1）。そして、それぞれの連鎖が満たすべき自由度、拘束成分等の条件について機構学的に検討を行い、1形式の回転中心制御用連鎖および24形式の回転運動制御用連鎖の構造を具体的に明らかにした。そのうちの1形式の機構図を図2に示す。この機構について、幾何学的条件に基づく変位解析手法、スクリュール理論に基づく速度および力の解析手法を開発した。これらの手法に基づき、良好な運動特性を有する機構パラメータを明らかにするために、拘束特異点および駆動特異点を評価するとともに、弾性ジョイントの可動範囲を考慮して、図2の機構を対象として、実用可能な作業領域の体積と機構パラメータの関係の網羅的な調査を行った。その結果の一部を図3に示す。以上の解析を種々行った結果をもとに、機構パラメータの最適化を行って、実用作業領域に優れた並進・回転運動分離形5自由度パラレルメカニズムの機構寸法を明らかにした。



(a) 設計パラメータの定義



(b) 実用作業領域の例

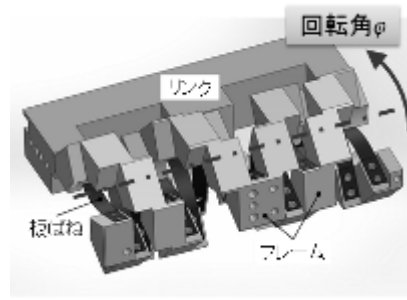


(c) 設計パラメータと実用作業領域の関係

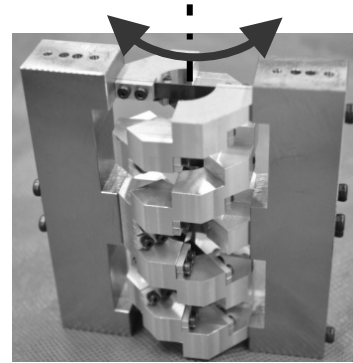
図3 実用作業領域の解析結果

### B. 弾性回転ジョイントの特性解析, 試験方法の開発と構造の最適化

2つのフレーム間に薄板ばねを2重らせん状に配置した弾性回転ジョイント(図4)について, フレーム間に回転軸まわり以外の方向の力とモーメントを種々に与えた場合の有限要素解析を行い, 各方向の剛性を理論的に明らかにした. また, この結果を踏まえて本弾性ジョイントを試作するとともに, 他の研究機関で開発している弾性回転ジョイントも試作して定性的な特性比較を行った. さらに, 弾性回転ジョイントのフレーム間に任意方向の力を作用させつつジョイントに強制的な回転変位を与えてジョイントのフレーム間の変位および作用力を測定することを可能とするために, 図5に示すオルダム継手機構を応用した試験装置を設計・試作した. そして, 試作ジョイントの3次元的な剛性特性を実験的に測定するとともに, 転がり軸受



(a) 3D-CAD 図



(b) 試作ジョイントの写真

図4 対象とする弾性回転ジョイント

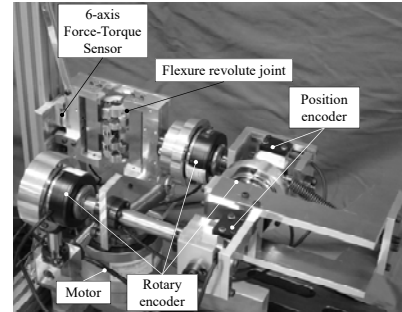


図5 ジョイントの特性試験装置

を用いたジョイントおよび市販の弾性回転ジョイントとの特性比較を行った. その結果, 本研究で対象とする弾性回転ジョイントは他のジョイント(通常の転がり軸受, 市販の弾性ジョイント)に比較してドリフト量が大きいたことが明らかとなった. また, 本研究の弾性回転ジョイントには, その挙動に不安定性があることから, これを改善するための板ばねの材質および配置方法を種々検討した. 具体的には, 低弾性率の材料を入手して弾性ジョイントへの組み込みが可能となるように加工を行った後, 弾性ジョイントを試作して, 回転軸まわりの抵抗モーメントを計測した. その結果, 絶対値が小さく変動の小さい抵抗モーメントで回転可能であることが明らかとなった. また, 回転変位に伴う弾性エネルギーに着目した板ばねの新たな配置法

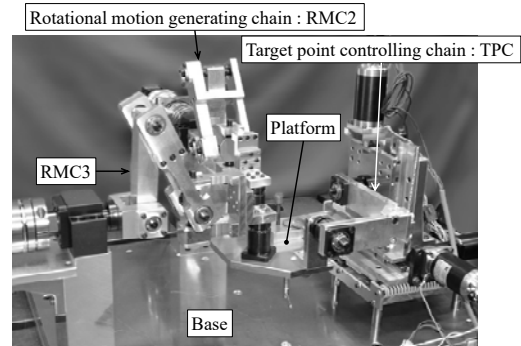


図6 板ばねの材質と配置を最適化した  
試作弾性回転ジョイント

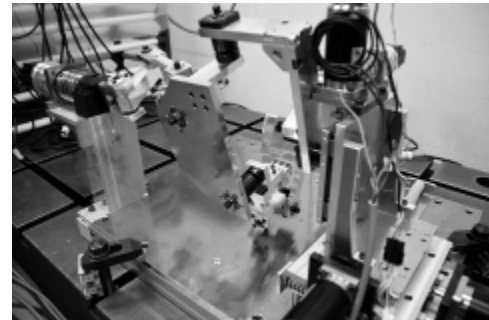
を提案し、試作（図6）を行ったところ、従来採用していた材質の板ばねであっても従来よりも安定した回転挙動を示す弾性回転ジョイントが実現できること、今回採用した材質の板ばねと提案した板ばね配置をともに適用することにより、より安定した挙動を有する大変位の弾性回転ジョイントが実現できることを示すことができた。さらに、これらの成果を踏まえ、アクリル製のフレームからなる弾性ジョイントを試作し、より軽量で実用的な回転弾性ジョイントが開発できることを示し、弾性回転ジョイントを組み込んだ5自由度パラレルロボットの実現に有効な知見を得ることができた。

### C. パラレルロボットの設計・試作および駆動実験

弾性ジョイントの可動範囲を考慮した作業領域等を評価してロボットの設計と試作を行い、その並進運動時および回転運動時の精度を実験的に測定した。試作パラレルロボットの写真を図7に、実験結果の一例を図8に示す。このように、本研究で設計・試作したロボットは、並進運動時の姿勢変化（誤差）が小さいことが確認された。また1点回りの回転運動を行った際の回転中心の位置の誤差も小さいことを実験により確認した。すなわち、本研究の成果として得られた5自由度パラレルロボットは、良好な並進・回転運動の分離特性を実現した。



(a) 概観



(b) 大きな姿勢角を実現している様子

図7 試作パラレルロボットの写真

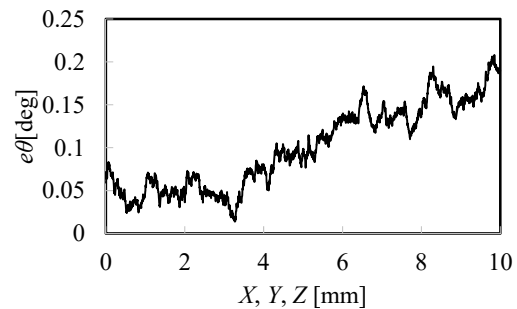


図8 並進運動時の姿勢角の変化（実験）

### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計4件）

- (1) 守屋瑠璃子・松浦大輔・武田行生, 大変位幅弾性ジョイントの剛性と精度の評価装置の開発, 日本機械学会・ロボティクス・メカトロニクス講演会2014講演論文集(Robomech2014), 富山, 2014年5月26日~28日, 3P1-W05.
- (2) Ruriko MORIYA, Daisuke MATSUURA, Yukio TAKEDA, Development of Spatial 1-DOF Torque Transmission Mechanism for Characteristics Evaluation of Flexure Revolute Joints, ICPT2014: The 6<sup>th</sup> International Conference on Positioning

Technology, in USB Memory, Nov. 18- 21, 2014, Fukuoka, Japan.

- (3) Yukio TAKEDA, Masanori TERAMOTO, Daisuke MATSUURA, Kinematic Design of a Spherical Parallel Mechanism with Variable Target Point Having a Large Practical Workspace, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, pp. 456-457, Okinawa, Japan, April 22-25, 2015.
- (4) 寺本正倫, 武田行生, 松浦大輔, 回転／並進運動完全分離型空間5自由度パラレル機構の駆動・拘束特性を考慮した最適設計, 日本機械学会・ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集, 京都, 2015年5月17日～19日, 2A2-B04.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~msd/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武田 行生 (TAKEDA, YUKIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：20216914

### (3) 連携研究者

松浦 大輔 (MATSUURA, DAISUKE)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：40618740