

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04068

研究課題名(和文) ハンドの高速移動と高速無限回転を実現するケーブル駆動パラレルロボットの開発

研究課題名(英文) Development of a cable-driven parallel robot that realizes high-speed hand movement and high-speed infinite rotation

研究代表者

原田 孝 (Harada, Takashi)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：80434851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：可動部に接続した複数のケーブルの長さを制御して可動部の位置と姿勢を変化させるケーブル駆動パラレルロボットは、長いケーブルを用いることで広い動作範囲を有し、スタジアムカメラの移動などに利用されている。しかしながら、可動部を回転させたときにケーブル同士が干渉し、回転動作範囲が制限される問題がある。そこで本研究では、可動部に回転プーリを組み込み、エンドレスケーブルを用いてプーリを摩擦駆動する新たな機構により、回転プーリの無限回転を実現する新しいロボットを提案し、力学的な解析に基づいた設計方法を確認し、数値計算および基礎実験による検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の回転拡大機構を組み込んだケーブル駆動パラレルロボットは、制御対象である6自由度の位置・姿勢に対して、7自由度(可動部6自由度+回転機構1自由度)の運動学的冗長機構である。さらに、ケーブル張力を正とするケーブル駆動条件を満たすために、これを8個のアクチュエータ制御する駆動冗長機構でもあり、パラレルロボットの分野では新しい研究領域である。研究期間内に別のタイプの「運動学的冗長性と駆動冗長性を有するパラレルロボット」の動作範囲の拡大にも取り組み、本研究の運動学、動力学、制御方法に関する成果が汎用的に応用できることを確認し、本研究が学術的に意義のある研究であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：A cable-driven parallel robot controls the position and orientation of its moving part by changing the length of multiple cables connected to the moving part. This type of robot has excellent characteristics of fast movement of the low weight moving part and the wide translational operating range by using a long cable. It is used for moving stadium cameras, etc. However, there is a problem that the cables interfere with each other when the movable part is rotated, and the rotational operating range is limited. In this research, we proposed a new robot that realizes infinite rotation of the rotary pulley embedded in the moving part and frictionally driving the pulley using an endless cable, and designed it based on mechanical analysis. The method was established and verified by numerical calculation and basic experiments.

研究分野：ロボット機構学

キーワード：知能機械 ケーブル駆動ロボット パラレルメカニズム 機構解析 機械設計

### 1. 研究開始当初の背景

パラレルロボットは、手先部に取付けた可動部を剛体リンクで駆動する剛体リンクパラレルロボットと、柔軟リンクであるケーブルを用いるケーブル駆動パラレルロボットに大別される。

図1に可動部が3次元空間を並進回転する従来の6自由度( $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ )ケーブル駆動パラレルロボット機構の模式図を示す。ケーブルを巻き取る複数のウインチと可動部(moving part)間にケーブルを張り、ケーブルの長さを制御して可動部の位置と姿勢を制御する。ケーブル駆動パラレルロボットは、可動部質量が小さく高速動作が可能であり、長ケーブルを用いることで広い並進( $x, y, z$ )動作範囲を有する特長がある。一方で、ケーブル間の干渉のために手先部の回転角度( $\alpha, \beta, \gamma$ )が小さく、実用化の妨げとなっている。

特に、機械部品などのハンドリング作業では、可動部に取付けたハンドが $z$ 軸周りに $\pm 180$ 度程度回転できる必要がある。先行して研究事例の多い剛体リンクパラレルロボットにおいても同様の課題があったが、手先部にギア、スクリュー、クランクなどを組込んで $z$ 軸周りの回転角度を拡大する方法が提案され、機械部品から食品、薬品のハンドリングなどに広く応用されている。本研究開始前に、手先部にクランクを組込んで角度 $\gamma$ を拡大するケーブル駆動パラレルロボットが提案されていた。この方法は剛体リンクパラレルロボットの研究で提案された機構を応用したものであり、ケーブル駆動に適しているとは言い難く、さらにはクランクの高速回転時に動的なアンバランスを生じる問題がある。

ケーブル駆動に適した回転角度拡大機構を考案することが実用化の課題である。

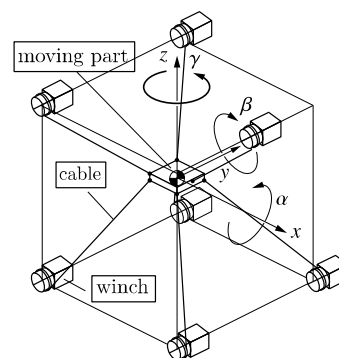


図1 従来のケーブル駆動機構

### 2. 研究の目的

空間6自由度(位置3自由度+姿勢3自由度)ケーブル駆動パラレルロボットの動作範囲の拡大を目的とし、以下の(A)(B)を具体的な研究目標とした。

- (A) 従来のケーブル駆動パラレルロボットと同様の並進動作範囲を有し、ハンドの $z$ 軸周りの高速無限回転を実現するロボット機構を提案し、その機構解析および設計手法を確立する。
- (B) ハンドの180度回転を含む機械部品的高速ハンドリング用テストサイクルを世界最速レベル(0.5秒)で実現する実験装置を開発して動作検証を行う。

また、本研究のように回転拡大機構を組み込んだケーブル駆動パラレルロボットは、制御対象である6自由度の位置・姿勢に対して、7自由度(可動部6自由度+回転機構1自由度)の運動学的冗長機構である。さらに、ケーブル張力を正とする「ケーブル駆動条件」を満たすために、これを8個のアクチュエータ制御する駆動冗長機構でもあり、パラレルロボットの分野では新しい研究領域である。そこで、以下を目標に加え、学術的な研究に寄与することも目的とした。

- (C) 運動学的冗長性と駆動冗長性を有するパラレルロボットの力学的特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

上記(A)(B)(C)の研究目的を実現するために、以下の(1)(2)(3)(4)を研究の方法とした。

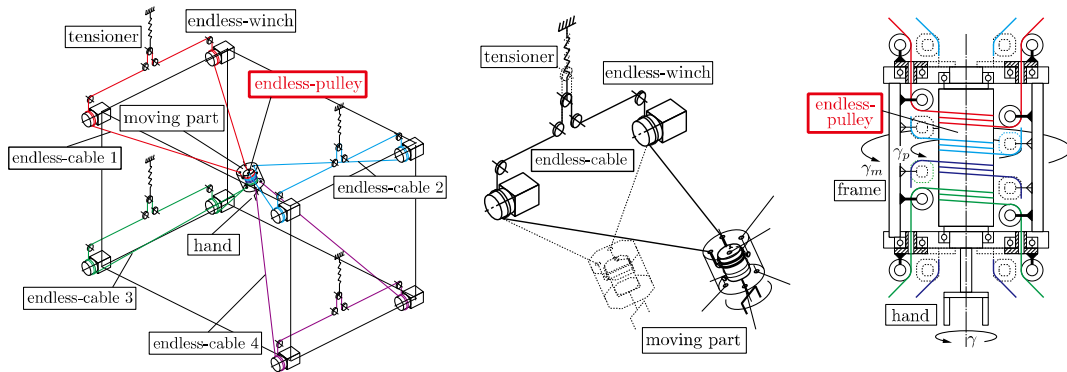
- (1) ケーブル駆動パラレルロボットの回転角度範囲の拡大
  - ・ ケーブル駆動に適した回転角度拡大機構を提案する。研究の準備として、「プリー組込み手先機構」と「ケーブルループ機構」を用いたハンド高速無限回転機構を着想しており、その構想設計と基本設計を完成させる。
  - ・ 提案する機構は、ケーブルとプリー間の摩擦力を利用したケーブル駆動機構である。ケーブルとプリー間の摩擦伝動特性を明らかにし、さらには、ケーブルとプリー間の滑りを抑制する機構設計および駆動機構の制御方式を確立する。
- (2) ケーブル駆動パラレルロボットの並進動作範囲の拡大
  - ・ 「ケーブル駆動条件」を満たす並進動作範囲を最大とする最適設計手法を確立する。
- (3) 設計・制御技術の確立と動作検証
  - ・ 目標仕様を満たす機構設計技術を確立し、機械要素部品およびアクチュエータを選定し、「プリー組込み手先機構」と「ケーブルループ機構」を具体的に設計試作する。
  - ・ ケーブル駆動パラレルロボットを高速動作させるための制御装置を開発し、試作機の動作検証を行う。
- (4) 運動学的冗長性と駆動冗長性を有するパラレルロボットの力学的特性の解明
  - ・ 運動学的冗長性と駆動冗長性を有する他のタイプのパラレルロボットにも機構解析を拡張し、その力学的特性を明らかにし、新しいタイプのパラレルロボットの学術的研究領域を広げることに寄与する。

#### 4. 研究成果

研究方法に対応した主要な研究成果を以下に整理する, なお, [Harada : 20XX]は 5. 主な研究論文内の雑誌論文を, (Harada : 20XX)は学会発表を指し示す.

##### (1) ケーブル駆動パレルロボットの回転角度範囲の拡大

- ・「プーリ組込み手先機構」と「ケーブルループ機構」を用いたハンド高速無限回転機構 (原田, 牧野 : 2018) (広里ほか : 2018)



(a) 提案したケーブル駆動機構全体図 (b) ケーブルループ機構 (c) プーリ組込み手先機構  
図2 「プーリ組込み手先機構」と「ケーブルループ機構」

本研究で提案したプーリ組込み手先機構とケーブルループ機構の模式図を図2に示す. 図1の従来機構と比べて, 図2(b)に示すように, 2個のウインチとテンショナで構成したエンドレスケーブルを図1(a)に示すように4組用いて, 図1(c)に示すプーリ組込み手先機構の本体及び内蔵プーリを同時に駆動する新しいケーブル駆動パレルロボット機構を考案した. エンドレスケーブルを用いることで, 図2(c)のハンドを $\gamma$ 高速で無限回転することが可能である.

##### ・「多巻エンドレス・プーリ」の摩擦伝道特性の解明

[Harada, Hirosato : 2019] (Hirosato, Harada : 2019)

ケーブル・プーリ間のすべりを抑制するためには, 図3(a)に示すようにケーブルをプーリに対して多巻する必要があるが, 図3(a)の単ドラムプーリでは, ケーブルをスムーズに巻付させることが困難である. そこで, 図3(b)に示すダブルドラム機構を考案し, 図2(b)のエンドレスウインチに採用した. さらにプーリのトルクを大きくするために図3(c)の複数ケーブルで駆動ドラムを摩擦駆動する機構を考案し, 図2(c)の可動部内蔵プーリに適用した.

摩擦力でプーリを回転駆動する力学は, オイラー・アイテルワインの式として広く認知されている. 本研究では, オイラー・アイテルワインの式を拡張し, 図2(b)のエンドレスウインチ上でケーブルが滑らないためのモータトルクとバイアステンションの関係, および, 図2(c)の内蔵プーリ上でケーブルが滑らないためのケーブルバイアス張力の関係式を導出した. 導出した関係式に対して, 各張力とすべり回避領域をわかりやすく図示する方法を考案した(図4).

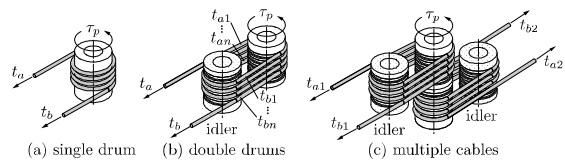


図3 多巻・複ケーブル摩擦駆動機構[①]

これにより, 設計仕様に対して, モータトルク, テンショナ張力, 多巻エンドレス・プーリの巻き数を計算することが可能となり, 詳細設計に反映させた.

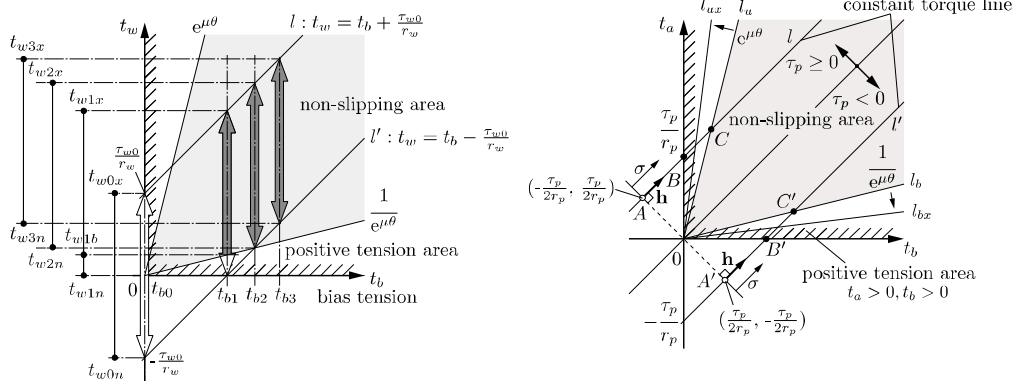


図4 多巻・複ケーブル摩擦駆動機構[①]

(2) ケーブル駆動パレルロボットの並進動作領域の拡大

[広里, 原田 : 2020], [原田, 中村 : 2020], [Hirosato, Harada : 2019]

(Hirosato, Harada : 2019), (広里, 原田 : 2019), (広里, 原田 : 2020), (広里ほか : 2020)

ケーブルは引くことはできるが押すことが出来ない. 一般的には, 引く方向のケーブル張力を正(プラス)に定義されており, ケーブル駆動パレルロボットの動作中には, 全てのケーブルの張力を正と必要があり, これが「ケーブル駆動条件」である. ケーブル駆動条件は, 図 2(a)のウインチの位置, 図 2(c)の可動部のケーブル取り込み口の位置や内蔵プーリへの巻き掛け方向などの, ケーブル配置により変化する. ケーブル駆動条件を満たす並進動作範囲を最大とするパレルロボットのケーブルの張り方を決定する方法を考案し, 図 5 に示す平面 5 自由度ケーブル駆動パレルロボットを対象として有効性を検証した.

本研究で提案するケーブル駆動ロボットは, ループケーブルの摩擦駆動により可動部に内蔵したプーリを無限回転してハンドの動作領域を拡張し, その際に駆動冗長性と運動学的冗長性を用いてケーブル張力を常に正とするケーブル駆動条件を満たすようにケーブル配置を最適化することが特徴である. これまでのケーブル駆動ロボットにおけるケーブル配置問題では, 特定して与えたケーブル配置パターン(構造)に対して, ケーブル接続点の位置座標の値(量)を対象とした設計が行われてきた. 新たにケーブル配置パターンをも含めた設計手法を考案し, ケーブル駆動ロボットの「構造の総合」に関する研究に発展させて, その内容を日本機械学会論文集に採択・掲載された[広里, 原田 : 2020]. 関連して, ケーブル駆動ロボットの回転動作範囲を拡張する差動ネジ機構に対しても「構造の総合」に関する研究を行い, その内容が日本機械学会論文集に採択・掲載された[原田, 中村 : 2020].

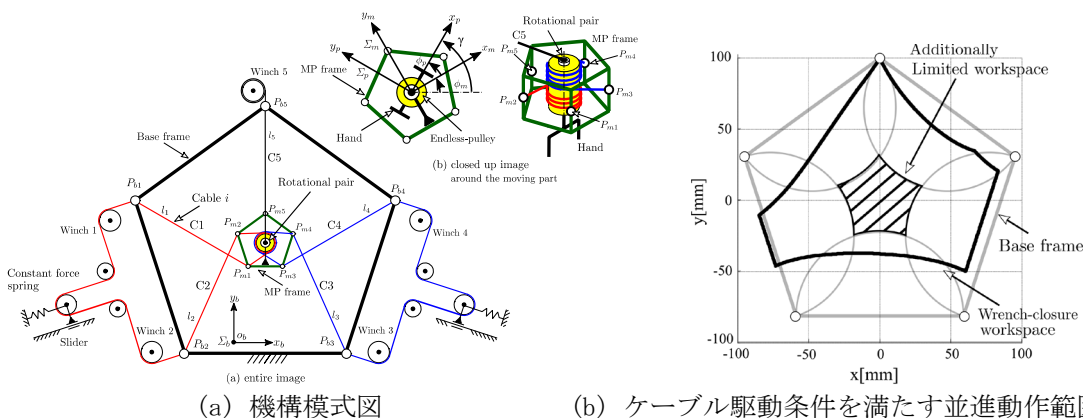


図 5 可動部に回転プーリを内蔵した平面 5 自由度ケーブル駆動パレルロボット [2]

(3) 設計・制御技術の確立と動作検証

・目標仕様を満たす機構設計技術の確立, 機械要素部品およびアクチュエータの選定, および「プーリ組込み手先機構」と「ケーブルループ機構」の設計試作 (一ノ本ほか : 2020)

8 ケーブル 7 自由度ケーブル駆動パレルロボットの実験機を設計および予備試作した. 設計仕様 : 作業領域 300mm 立法, 可動部質量 500g, 可動部最大速度 5.5m/s, 最大加速度 10G. モータ定格トルク 0.4Nm, ウインチ直径 15mm, テンション張力 50N を用いることで, 最大ケーブル速度 4m/s, 最大ケーブル張力 80N を達成し, ロボットの高速動作指標である ADEPT サイクルが 0.5 秒で実現できることを力学シミュレータを用いて確認した(図 6).

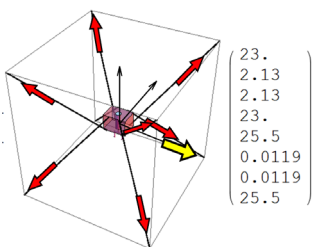


図 6 力学シミュレータの解析例

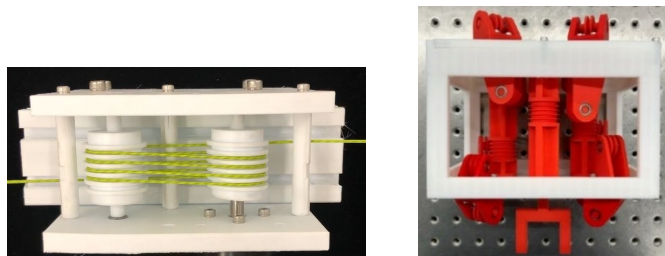


図 7 予備試作した多巻プーリとプーリ内蔵可動部

・ケーブル駆動パレルロボットを高速動作させるための制御装置の開発 (瀧澤, 原田 : 2019)

LinuxCNC を用いて本研究で提案する 6 自由度 8 ケーブル駆動の制御方法を考案した. LinuxCNC を用いたパレルロボットの力制御方法を考案し, 2 自由度パレルロボットを試作してコンプライアンス制御を実装して動作検証を行った. 力学シミュレータ上では, 設計した機構が仕様を満たすことを検証したが, 最終試作した 6 自由度 8 ケーブル駆動による検証の完了には至らなかった.

(4) 運動学的冗長性と駆動冗長性を有するパラレルロボットの力学的特性の解明

[原田, 牧野 : 2018], [Harada, Kunishige : 2020], [Harada : 2020]

(Harada, Kunishige : 2020), (榎原, 原田 : 2019), (Tsuchihara, Harada : 2019)

(原田, 大野 : 2020), (Harada : 2019)

本研究のケーブル駆動パラレルロボットと同様に運動学的冗長性と駆動冗長性を有する剛体リンクパラレルロボットに関して、制御に必要な順逆運動学式の数式的な計算方法を考案し、その内容を日本機械学会論文集に投稿・掲載された[原田, 牧野 : 2018]. 差動ネジを用いて動作領域を拡張したパラレルロボットの研究にも取り組み、8アクチュエータ7自由度パラレルロボットを設計試作し(図8)、駆動冗長性と運動学的冗長性を用いて特異姿勢を回避する方法を提案して実機検証し、ロボットの研究で最も歴史の深い国際学会 ROMANSY 2020 において最優秀講演論文賞を受賞した[Harada, Kunishige : 2020].

差動ネジ機構を内蔵した4自由度ケーブル(ベルト)駆動パラレルロボットの運動学、動力学、制御方法の研究にも取り組み、国際ジャーナルへ論文を投稿・掲載された[Harada : 2020].

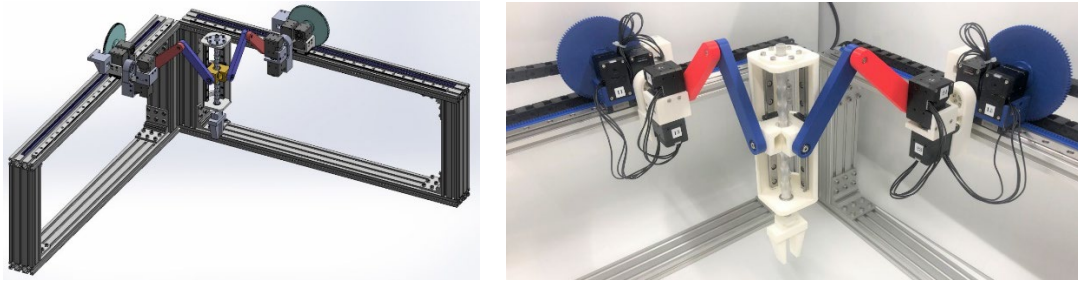


図8 差動ネジを可動部に内蔵した剛体リンクパラレルロボットの設計・試作

(5) まとめ

本報告書にまとめたように、当初の研究目的は最終試作機の動作検証を除きほぼ完了させることができた。本研究で提案したエンドレスケーブルを用いた摩擦駆動方式ケーブル駆動パラレルロボットは実用的な応用範囲が広く、特にプーリ内蔵の回転機構の自由度を増やすことで、 $z$  軸周り以外の回転動作範囲の拡大も実現しうる。また、研究期間を通して、「運動学的冗長性と駆動冗長性を有するパラレルロボット」に対する動作範囲の拡大に取り組み、研究成果である運動学、動力学、制御方法は学術的に広く応用が可能であることが示唆された。

<引用文献>

- ① Takashi Harada and Yuta Kunishige, Singularity Free Mode Changes of a Redundantly Driven Two Limbs Six-Dof Parallel Robot, ROMANSY 23 - Robot Design, Dynamics and Control, Springer, pp.405-413, 2020
- ② 広里 光樹, 原田 孝, 駆動冗長性と運動学的冗長性を有する摩擦ケーブル駆動パラレルロボットのケーブル配置に関する研究, 日本機械学会論文集, 86-887, 20-00003, 2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Harada Takashi, Kunishige Yuta	4. 巻 -
2. 論文標題 Singularity Free Mode Changes of a Redundantly Driven Two Limbs Six-Dof Parallel Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ROMANSY 23 - Robot Design, Dynamics and Control	6. 最初と最後の頁 405 ~ 413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-58380-4_49	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 原田 孝, 中村 悠人	4. 巻 86
2. 論文標題 マルチボディ運動学に基づく2自由度差動ネジ機構の構造の総合	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 広里 光樹, 原田 孝	4. 巻 86
2. 論文標題 駆動冗長性と運動学的冗長性を有する摩擦ケーブル駆動パラレルロボットのケーブル配置に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Harada	4. 巻 9(1)
2. 論文標題 Novel Schoenflies Motion Parallel Robot Driven by Differential Mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 106-110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/ijmerr.9.1.106-110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harada Takashi、Hirosato Koki	4. 巻 -
2. 論文標題 Non-slipping Conditions of Endless-Cable Driven Parallel Robot by New Interpretations of the Euler-Eytelwein's Formula	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cable-Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science 74	6. 最初と最後の頁 23 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-20751-9_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirosato Koki、Harada Takashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of Cable-Configurations of Kinematic Redundant Planar Cable-Driven Parallel Robot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cable-Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science 74	6. 最初と最後の頁 35 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-20751-9_4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 原田 孝, 牧野 達	4. 巻 866-84
2. 論文標題 運動学的冗長性と駆動冗長性を有する2リム6自由度パラレルロボットの提案と閉形式運動学解の導出	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 18-00025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件(うち招待講演 1件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 原田 孝, 大野 稜馬
2. 発表標題 マルチボディダイナミクスを用いた差動ベルト駆動ロボットの力学解析
3. 学会等名 計測自動制御学会第21回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 広里 光樹, 原田 孝, 道岡 武信
2. 発表標題 摩擦ケーブル駆動パラレルロボットのケーブル配置と操作力 に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一ノ本 将冴, 原田 孝, 広里 光樹
2. 発表標題 ハンドの高速移動と無限回転を実現するケーブル駆動パラレルロボットの設計
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 広里光樹, 原田 孝
2. 発表標題 ハンドの無限回転を実現する摩擦ケーブル駆動パラレルロボットのケーブル配置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Harada Takashi, Kunishige Yuta
2. 発表標題 Singularity Free Mode Changes of a Redundantly Driven Two Limbs Six-Dof Parallel Robot
3. 学会等名 ROMANSY2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 瀧澤 敦史, 原田 孝
2. 発表標題 LinuxCNC を用いたパラレルロボットの高機能制御システムの構築
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 広里 光樹, 原田 孝
2. 発表標題 運動学的冗長性を有するケーブル駆動パラレルロボットのケーブル配置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植原 怜生, 原田 孝
2. 発表標題 可動部に付加自由度を有するパラレルロボットの姿勢最適化とコンプライアンス制御
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rei Tsuchihara and Takashi Harada
2. 発表標題 Posture optimization and compliance control for the family of the kinematic redundant parallel robots with rotational mechanisms embedded in the moving part
3. 学会等名 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koki Hirosato and Takashi Harada
2. 発表標題 Wrench-closure and Non-slipping Condition of a Frictional Cable-Driven Planar Parallel Robot with Kinematic Redundancy
3. 学会等名 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 広里光樹, 原田孝, 牧野達
2. 発表標題 可動部にブーリを組み込んだ平面 3 自由度運動学 的冗長ケーブル駆動パラレルロボットの運動学
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田 孝, 牧野 達
2. 発表標題 可動部に回転機構を組み込んだ運動学的冗長パラレルロボットの姿勢最適化制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Harada
2. 発表標題 Novel Schoenflies Motion Parallel Robot Driven by Differential Mechanism
3. 学会等名 International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Takashi Harada 研究紹介  
<https://sites.google.com/site/parallelmech/ja>  
近畿大学 理工学部 機械工学科 精密機械工学研究室  
<http://www.mec.kindai.ac.jp/mech/lab/harada/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------