

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03987

研究課題名（和文）極小径超長リード差動ネジ機構を搭載する広可動域ミニチュアパラレルロボットの開発

研究課題名（英文）Development of a wide range of motion miniature parallel robot equipped with a ultra small diameter and ultra long lead differential screw mechanism

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：顕微鏡下手術や航空機エンジン内部の点検保守などの狭い環境内で動作する極小サイズで動作範囲の広い空間6自由度ミニチュアパラレルの開発を目的とする。2組のパラレルロボットの出力節間に差動ネジ機構などの付加回転機構を搭載し、ミニチュア化のために出力節そのものを傾斜させて全ての受動対偶を球面對偶とするロボット機構を考案した。直径2mmの極小径差動ネジ機構の設計試作、出力節傾斜機構を有するパラレルロボットの機構解析、設計試作および制御に取り組み、特許出願を行うと共に、IEEE ROBI02023 Robotica Best Paper Award、日本機械学会ROBOMECH表彰などを受賞した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したパラレルロボットの新しい機構は広く産業界にて活用できるように特許公開まで行なっている。本研究では、パラレルロボットの機構解析において国内では研究事例が少ないスクリー理論やマルチボディダイナミクスを用いており、その学術的な成果が評価され、日本機械学会やIEEEにて権威ある賞を受賞している。これらの研究は基礎的かつ学術的な研究であり、今後の国内のロボットの機構設計、解析、制御の研究の発展に大いに寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This project aims to develop a spatial 6-DOF miniature parallel robot with an extremely small size and a wide operating range that can operate in confined environments such as surgery under a microscope and inspection and maintenance inside aircraft engines. A robot mechanism was devised in which all passive pairs are compact spherical joints, and the output nodes are directly tilted by the novel parallel mechanism for miniaturization. We designed and built a prototype of an ultra-small differential screw mechanism with a diameter of 2 mm, and conducted mechanism analysis, design and control of a parallel robot with an output node tilting mechanism, and submit a patent. Our research received the IEEE ROBI02023 Robotica Best Paper Award and the Japan Society of Mechanical Engineers ROBOMECH Award.

研究分野：機構学・機械力学

キーワード：パラレルロボット 機構設計 機構解析 スクリュー理論 マルチボディダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

手先部を複数のリンクで支持して駆動するパラレルロボットは高剛性・高精度である一方で、リンク間の機械的な干渉などにより動作範囲が小さい。我々は2012年度より「非対称機構」や「付加回転機構」などの新しい機構を提案し、通常サイズ(cmサイズ)の『パラレルロボットの動作範囲の拡大』に取り組んできた。2012年度から2020年度に至り連続する3件の科研費(基盤C24560314, 15K05918, 18K04068)や5件の競争的外部資金および2件の学内競争資金などに基づき研究を実施し、IEEEやIFTToMM主催などの国際学会最優秀論文賞を受賞するなどの学術的な研究に取り組んできた。

軸受やガイドなどの機械部品の小型化が進み、これらを応用して顕微鏡下手術などの狭い環境内で動作するミニチュアロボットの研究が盛んである。パラレルロボットはモータを土台に集中配置することで機構の小型化が可能である。近年にモータの小型化が進み、直径25mm円筒サイズの6自由度パラレルロボットが発表された。これらは従来のパラレル機構を小型化したものであり、動作範囲が小さい問題は残したままである。

2. 研究の目的

本研究では我々のこれまでのパラレルロボットの研究を発展させて、顕微鏡下手術や航空機エンジン内部の点検保守などの狭い環境内で動作する極小サイズで動作範囲の広い空間6自由度(位置3自由度+姿勢3自由度)ミニチュアパラレルロボット(mmサイズ)の開発を目的とする。

並進動作範囲 $\pm 5\text{mm}$ 、旋回角度範囲 ± 45 度、回転角度範囲 ± 180 度を実現する親指サイズ(直径25mm以下円筒)の広可動域6自由度ミニチュアパラレルロボットの開発を具体的な目標とする。

図1に研究開発当初のミニチュアパラレルロボットの構想設計図を示す。図1左に示すように、出力節が3自由度(x,y,z)並進するDELTA機構を上下2段重ねとし、各出力節にx,y軸周りの回転(α, β)を行う自在継手を經由して差動ネジ機構を搭載する。図1右に示すように、2つの出力節の相対変位を利用して、差動ネジのx,y,z方向の並進およびx,y,z軸周りの回転(α, β, γ)を実現する。

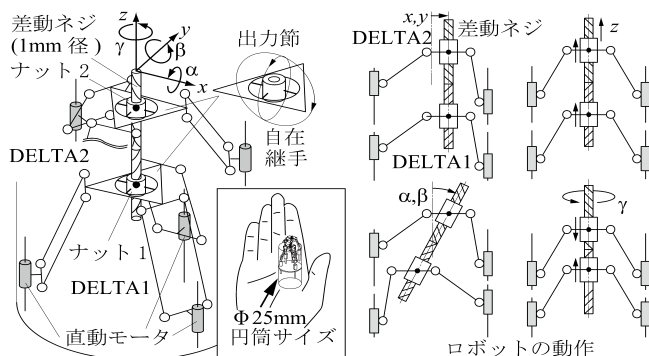


図1 研究開発当初のミニチュアパラレルロボットの構想図

3. 研究の方法

【1】極小径・超長リード・大アスペクト比差動ネジ機構の開発

図1のミニチュアパラレルロボットに搭載する、極小径・超長リード・大アスペクト比(L/D)の差動ネジ機構を開発する。軸径(D)2mm以下に対して、ナット並進を駆動源とする差動ネジ機構の回転をスムーズに行うための超長リード(リード10mm:すすみ角50度以上)を目標とする。ナット並進で長リードネジに広い回転角を実現するために、ネジ長さ(L)を40mm以上とする。

大学が所有する国内最高精度の微細加工用5軸NC加工機を用いて、我々が提案している正方形断面形状ネジの小型化を図る。一般的なCAMソフトでは、細棒を荒加工してネジ部の仕上げ加工の工程が生成されるが、極小径大アスペクト比の場合は仕上げ加工時にワークが変形して高精度加工が困難である。また、工具干渉により、小径の正方形断面ナットの切削加工も困難である。そこで、新たな加工方法を考案・具現化し、極小径・超長リード・大アスペクト比差動ネジ機構を開発する。

【2】広可動域6自由度ミニチュアパラレルロボットの開発

開発した差動ネジ機構などの付加回転機構を手先に搭載し、並進動作 $\pm 5\text{mm}$ 、旋回角度 ± 45 度、回転角度 ± 180 度を実現する親指サイズ(直径25mm円筒サイズ)の広可動域6自由度ミニチュアパラレルロボットを開発する。微細加工用5軸NC加工機に加えて、申請者が競争的外部資金により導入した新型の高精度3Dプリンタを併用して、ミニチュアマニピュレータ本体を設計・試作・評価する。

研究着想段階の図1のパラレルロボット機構は付加回転機構の傾斜(α, β)のために出力節に自在対偶を搭載する必要があり機構の小型化には最適とは言えない。そこで、付加回転機構を傾斜

させる新たな機構を有するパラレルロボット機構を考案して具現化する。

4. 研究成果

【1】 極小径・超長リード・大アスペクト比差動ネジ機構の開発

我々が提案している左右の正方形ネジ面をオーバーラップさせた Gaudi ネジの極小径・超長リード・大アスペクト比可を実現した。図2に示すように、Gaudi ネジの基本形状を最先端部から一つずつ段階的に粗加工⇒仕上加工を繰り返す工法を考案した。一般的に粗加工と仕上加工で工具交換を行が、Gaudi ネジ面は曲率半径が大きいために仕上加工に使用するボールエンドミル径も大きくすることができるために、工具交換無しとして工具交換に伴う工具の取付け誤差がなく高精度な加工が可能である。正方形断面ナットに関しては、図3に示すように正方形ねじのコーナーに沿って4分割した形状を加工し、図3(d)のようにこれらを組み合わせる新しい工法を考案した。図2 図3の工法を用いて、図4左に示す断面正方形1辺2mm、リード10mm(すすみ角57.9度)、ネジ長さ40mmのミニチュア Gaudi ネジと、それと対偶する左右ねじれナットを製作し、図4右に示す実験装置を開発して動作検証を行なった。

本研究に関して、2023年3月に韓国・済州で行われた日韓機械学会共催の国際学会 ICMDT2023にて基調講演を行い、日本機械学会論文集に論文投稿・採択され、2024年3月に掲載された。

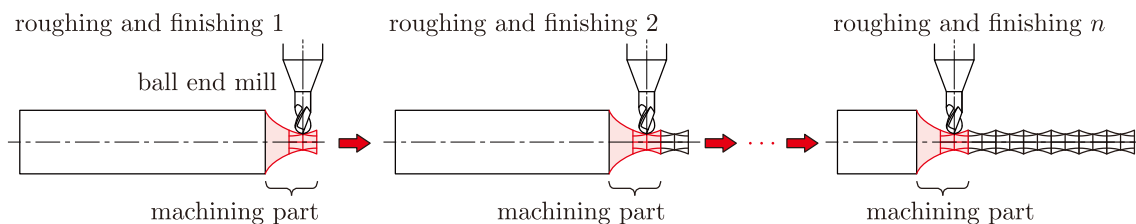


図2 極小径・超長リード・大アスペクト比差動ネジの加工方法

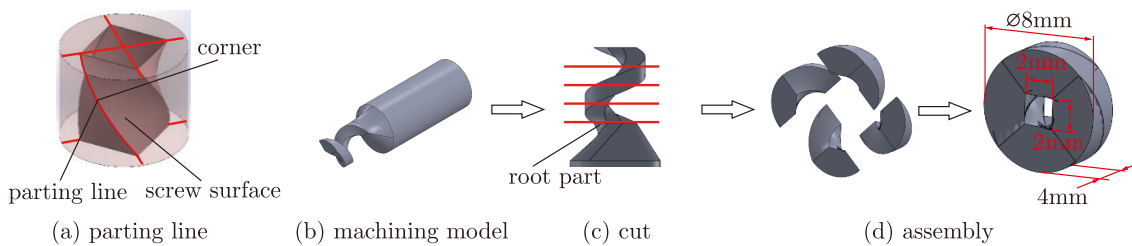


図3 正方形断面極小径ナットの加工方法

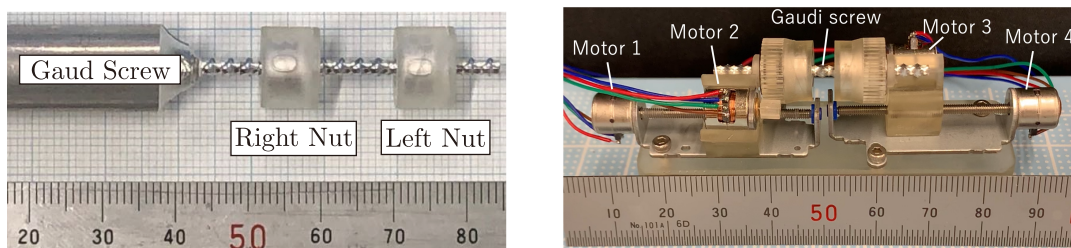


図4 試作した極小径・超長リード・大アスペクト比差動ネジ機構と動作実験

【2】 広可動域6自由度ミニチュアパラレルロボットの開発

(1) プレート傾斜自由度を有する新しいパラレルロボットの開発

研究着想段階の図1のパラレルロボット機構は付加回転機構の傾斜(α, β)のために出力節に自在対偶を搭載する必要があり機構の小型化には最適とは言えない。そこで、図5に示すプレート傾斜自由度を有するパラレルロボット着想し、2022年度に特許出願して2023年に公開された(特開2023-176402: AMPパラレルロボット)。新しいロボット機構の構成方法と機構解析を日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会(ROBOMECH)2022 および2023にて学会講演氏、ROBOMECH2023の講演論文が、部門のROBOMECH表彰(学術研究分野)を受賞した。出力節に自在対偶を取り付けることなく図5(d)(e)に示すようにx,y軸周りの傾斜(α, β)を実現し、ミニチュア化に適した機構である。

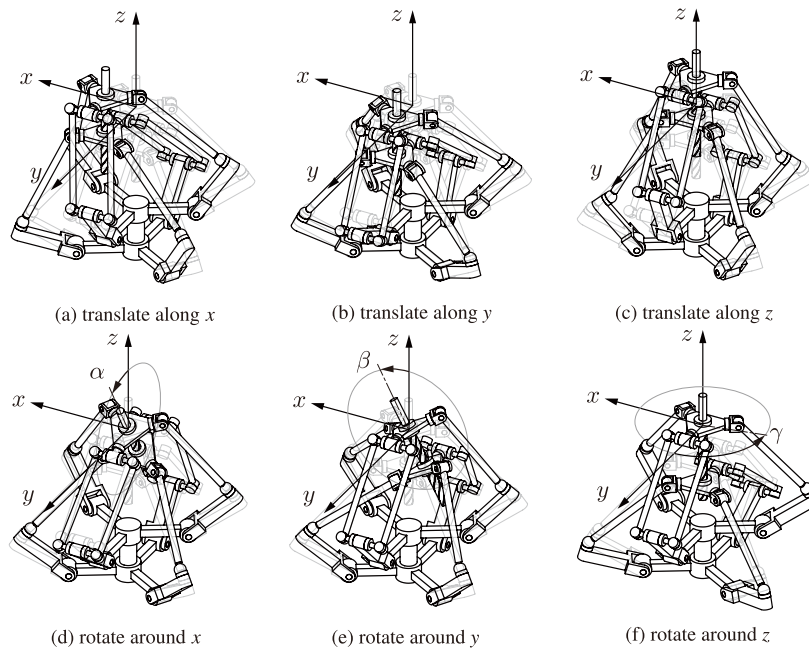


図5 プレート傾斜自由度を有する新しいパラレルロボット

(2) ミニチュア化のための機構設計

図5のパラレルロボットに対して、受動対偶をコンパクトな球面对偶(赤色)に置き換える図6に示す3タイプのパラレルロボット機構を考案し、その構成方法を国際学会 IFToMM WC2023 にて論文投稿と講演を行なった。

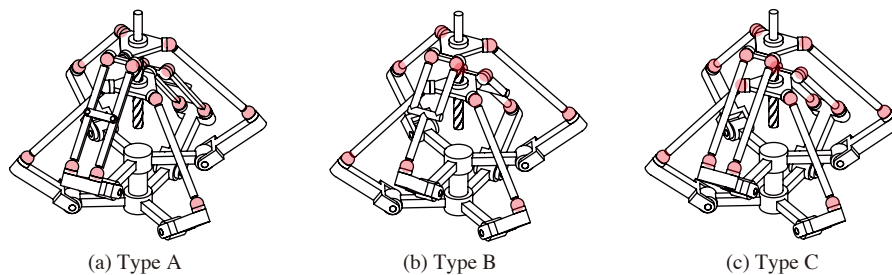


図6 全ての受動対偶を球面对偶とするプレート傾斜パラレルロボット

図7に示す直径8mmの磁石タイプの球面对偶を採用した実験装置を試作し、MATLAB/Simulink環境のマルチボディダイナミクスソフト Simscape Multibody を用いた図8に示す制御装置を開発してロボットの動作を検証した。試作機的设计および制御に関して IEEE 主催の国際学会 ROBIO2023 にて論文投稿および講演を行い、論文が Robotica Best Paper Award を受賞した。

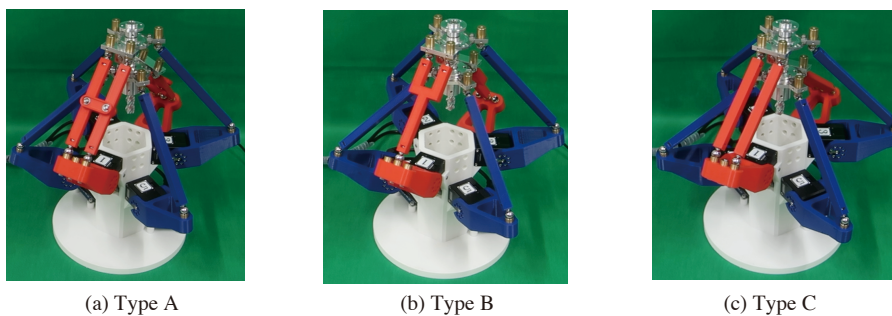


図7 プレート傾斜パラレルロボットの試作機(球面对偶径8mm)

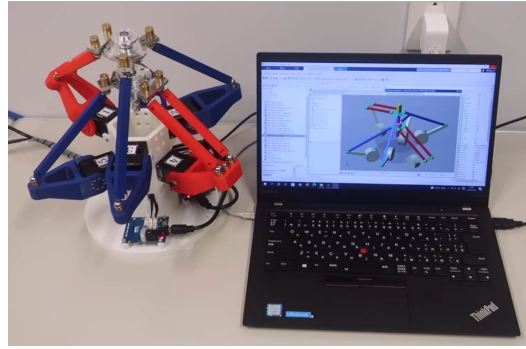
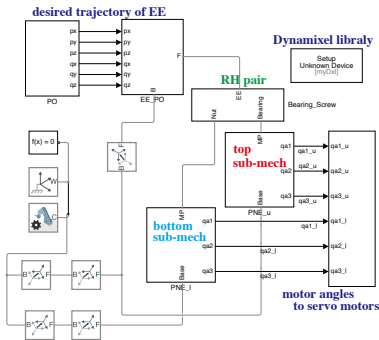
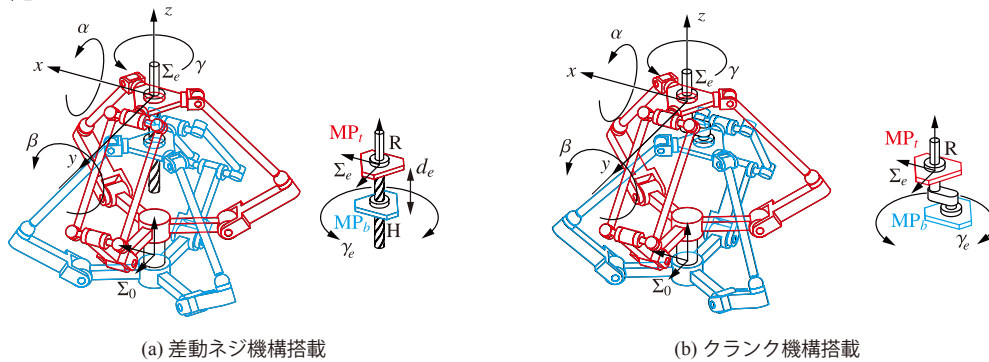


図 8 Simscape Multibody を用いたパラレルロボット制御装置

(3) 新しい付加回転機構を搭載したミニチュアパラレルロボットの設計

これまでに提案してきた差動ネジ機構搭載のパラレルロボットは、可動子間の相対距離が有限であり、ネジ対偶にて生成される z 軸周りの回転角度も有限となる．そこで、図 9(b)に示すプレートを傾斜する自由度を有する 2 個のパラレル機構の可動子をクランク機構で連結した新しい 6 自由度パラレルロボットを着想した．クランク機構は差動ネジ機構に比べて製作が容易であり、これを搭載したベース直径 34mm、アーム長 23mm、ロッド長 48mm、移動プレート直径 25mm、球面對偶直径 2mm の手のひらサイズのミニチュアパラレルロボットの設計と試作を行い、数値シミュレーションソフトウェアを作成してシミュレーション上での動作検証まで完了させた(図 10)．図 10 のミニチュアロボットに関して、JST 主催の大学見本市 2023 にて「狭所作業用親指サイズ多自由度ロボットのための新しい機構の提案」の講演展示を行い、企業との共同研究に結びつけた．



(a) 差動ネジ機構搭載

(b) クランク機構搭載

図 9 新しい付加回転機構を搭載するパラレルロボット

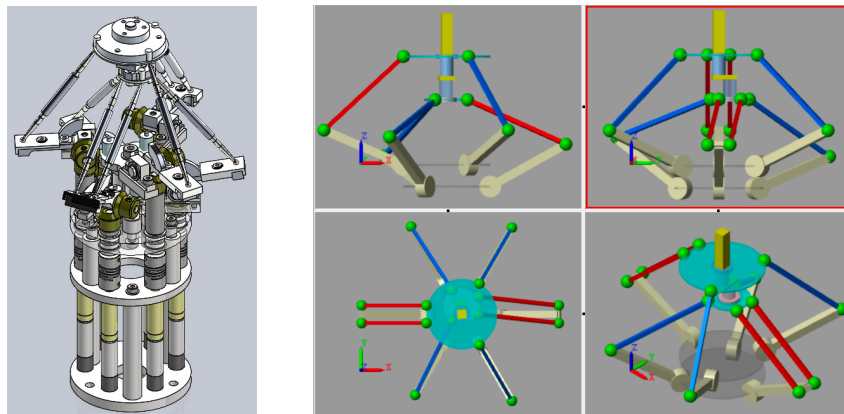


図 10 ミニチュアパラレルロボットの設計と制御装置

【3】 関連研究

本研究を通して、図 8 や図 10 に示す Simscape Multibody を用いたロボットの計測制御に関する研究を進めてきた．その内容を日本機械学会論文集、および Robomech Journal に論文投稿して採択された．また、日本機械学会 機械力学・計測制御部門のマルチボディダイナミクス研究会において 2023 年 12 月に招待講演を行なった．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 原田 孝	4. 巻 88
2. 論文標題 マルチボディシステムダイナミクスを用いた2自由度平面差動ベルト駆動ロボットの動的非干渉化設計	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 21-00367
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00367	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 Yase Hayato, Harada Takashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Proposal of Drivable Rapid Prototyping System for Robot Mechanisms Verification	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 589-593
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/sii55687.2023.10039437	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 Makarov Oleg, Yase Hayato, Harada Takashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Implementation of interactive control of a crane ship model in MATLAB/Simulink environment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-023-00259-7	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, Yase Hayato	4. 巻 -
2. 論文標題 Mobility Analysis of a Novel Six-DOF Parallel Robot with Additional Rotation and Plate Tilting Mechanisms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Mechanism and Machine Science (1)	6. 最初と最後の頁 824 ~ 832
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-45705-0_80	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 Harada Takashi、Yase Hayato	4. 巻 -
2. 論文標題 Family of Six-DOF Novel Two-platform Parallel Robots and Development of Re-configurable Prototypes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 2023 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/robio58561.2023.10354656	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, 八瀬 快人	4. 巻 90
2. 論文標題 極小径長リードミニチュア差動ねじ機構の開発	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.23-00302	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11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 原田 孝
2. 発表標題 ロボット工学におけるマルチボディダイナミクスの応用
3. 学会等名 日本機械学会 第37回マルチボディダイナミクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Harada Takashi、Yase Hayato
2. 発表標題 Family of Six-DOF Novel Two-platform Parallel Robots and Development of Re-configurable Prototypes
3. 学会等名 2023 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Harada Takashi、Yase Hayato
2. 発表標題 Mobility Analysis of a Novel Six-DOF Parallel Robot with Additional Rotation and Plate Tilting Mechanisms
3. 学会等名 IFToMM World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田 孝, 八瀬 快人
2. 発表標題 プレート傾斜と付加回転機構を有する6自由度2プラットフォームパラレルロボットの変位解析
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田 孝, 八瀬 快人
2. 発表標題 スクリュウ理論を用いた2プレート6自由度パラレルメカニズムのモビリティ解析
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2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田 孝
2. 発表標題 新しい 2 プラットフォーム 6 自由度パラレルロボットの提案
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2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田 孝, 古荘 純次
2. 発表標題 Simscape Multibodyを用いた 4 自由度差動ベルト・差動ネジ駆動パラレルロボットの動力学解析
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harada Takashi
2. 発表標題 Development of Gaudi-inspired Screw for Miniature Differential Drive Mechanism
3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田 孝
2. 発表標題 2リム6自由度パラレルロボットの機構と運動学特性
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田 孝, 大窪 晃平
2. 発表標題 極小径超長リード差動ネジ機構部品の製作方法
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田 孝, 大窪 晃平
2. 発表標題 極小径超長リード差動ネジ機構用ナット部品の開発
3. 学会等名 日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 AMPパラレルロボット	発明者 原田 孝	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、-	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Kindai University, Harada Lab. (YouTube チャンネル) https://www.youtube.com/channel/UC1ynEM-T1I8xbXidsFyWcwA/videos 原田 孝 研究ページ https://sites.google.com/view/parallelmech/home
--

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
---------	---------