

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560314

研究課題名(和文)非対称構造と冗長駆動を用いた広可動域高精度・空間3自由度パラレルメカニズムの開発

研究課題名(英文)Development of a novel asymmetrical designed redundantly actuated 3-dof spatial parallel mechanism with large workspace and high accuracy

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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：特異フリーにモード変化を行い、動作範囲を拡大する非対称冗長駆動パラレルロボットを提案した。転置ヤコビ行列の小行列列式を用いて、数式計算に適した冗長駆動パラレルメカニズムの冗長性と特異性の計算方法を提案した。対称冗長駆動ロボットはモード変化中に特異となるが、非対称冗長駆動ロボットは特異とならずにモード変化が行えることを数式計算および数値計算例を用いて示した。モータ固定子間隔、モータとロッド間対偶位置を可変とし、各種条件でモード変化実験を行う試作機を開発した。ロボットのモードを識別し、モード間の状態遷移を考慮した制御ソフトウェアを開発実装し、特異フリーにモード変化を行うことを実機検証した。

研究成果の概要(英文)：A novel parallel mechanism which enlarges the workspace by singularity-free mode change is proposed. The proposed mechanism is inherited the design of Linear DELTA which has three degree-of-freedom translational moving plate driven by three linear actuators, in addition, extended it by redundantly actuation by four linear actuators and asymmetric design. New criterions about redundancy and singularity of redundantly actuated parallel mechanism using summation and product of determinants of minor matrices of the transposed Jacobian matrix are proposed. Redundantly actuation and asymmetric design enables singularity-free mode changes with loss redundancy but maintain non-singularity, that are evaluated by the proposed criterions. Numerical simulations demonstrate the singularity-free mode changes of the proposed mechanism. The singularities avoided mode changes were performed by newly developed prototype.

研究分野：精密機械工学，パラレルメカニズム

キーワード：ロボティクス パラレルメカニズム 非対称構造 冗長自由度 モード変化 広可動範囲

1. 研究開始当初の背景

(1) パラレルメカニズム (PKM: Parallel Kinematic Mechanism) を利用したパラレルロボットは高速・高精度・高剛性である一方で、複雑に存在する特異姿勢や機械的干渉の影響で動作範囲が小さい。PKM の動作範囲を拡大する方法としてモード変化と総称する研究が行われている。PKM に複数存在する逆運動学解の間を姿勢遷移させる動作モード変化 (working mode change)、複数存在する順運動学解の間を姿勢遷移させるアセンブリモード変化 (assembly mode change) により動作範囲を拡大する。これまでのモード変化の研究では、PKM の出力節の自由度とアクチュエータの数が等しい非冗長駆動 PKM が対象とされてきた。非冗長駆動 PKM では、モード変化中に特異姿勢を通過させる必要があり、その際に出力節の全動作自由度空間を張るロボットとして機能せず機構的にも不安定となる。冗長駆動 PKM はモード変化時の特異性を回避する機構として有効であるが、機構や制御が複雑となるために、これまでにモード変化の研究対象として取組まれた例が殆んどない。

(2) 申請者はこれまでにパラレルメカニズムに関して、主として動作範囲の拡張と高精度化に関する研究に取り組んできた。本研究は x 軸方向に広い動作範囲を有する空間 3 自由度 (xyz) リニア DELTA ロボットに対して、冗長駆動と非対称構造により特異フリーにモード変化してさらに動作範囲を拡大する新しいパラレルメカニズムを提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、空間 3 自由度パラレルメカニズムに関して、(1) 機械的干渉を回避する機構設計、(2) 運動自由度よりも冗長な数のアクチュエータ駆動、(3) 非対称構造メカニズムを用いることを特徴とし、従来からある対称構造パラレルメカニズムの 2 倍以上の可動域を有し、市販 NC 工作機械と同等の円運動誤差 $5\mu\text{m}$ 以下の精度を実現する新たなメカニズムを開発することである。

3. 研究の方法

上記研究の目的を具現化するために、年度毎に下記の目標を定めて研究に取り組んだ。

(1) 機構解析と非対称構造パラレルメカニズムの設計試作 (平成 24 年度)

目標：対称構造メカニズムの 2 倍以上の可動域を有する非対称構造メカニズムを設計試作する。

① 非対称構造の分類と機構解析

機構解析では、可操作度などの性能指標を用いて非対称構造と大域的な特異性の関係を明らかにし、従来からある対称構造パラレルメカニズムの 2 倍以上の可動域を有する非対称構造メカニズムの設計指針を確立する。

② 機構設計と試作

機構解析に基づいて非対称構造パラレルメカニズムの機構設計と試作を実施する。

(2) 非対称構造パラレルメカニズムの制御技術と精度評価技術の確立 (平成 25 年度)

目標：位置制御により広可動域動作を検証し、円運動精度を計測する。

① 制御装置の構築

アクチュエータ部は、申請者が平面 3 自由度パラレルメカニズムの試作に使用してきたシャフトモータ (定格推力 5N)、リニアエンコーダ (位置分解能 $1\mu\text{m}$) と同等のものを使用する。申請者の研究室で独自に開発した制御装置を拡張し、ロボットを制御する。

② 広可動域動作の実現

制御装置対して、無負荷状態で図 5(c)(d) に示す特異姿勢回避および、図 5(e) に示す正折れ⇔逆折れ動作を実施する位置制御ソフトウェアを作成実装し、これらの動作が安定して実施できることを検証する。

③ 円運動動作の計測

制御装置対して円運動動作を実施する位置制御ソフトウェアを作成する。円運動試験装置 (レニショー社製 QC20 ボールバー) を購入し、円運動試験を実施する。

(3) 非対称構造パラレルメカニズムの高精度化 (平成 26 年度)

目標：機構キャリブレーション技術を開発し、円運動誤差 $5\mu\text{m}$ 以下の精度を実現させる。

① 機構キャリブレーション

別途研究中の冗長駆動平面 3 自由度パラレルメカニズムの外界センサを用いないセルフキャリブレーションを拡張して適用する。

② 円運動誤差 $5\mu\text{m}$ の実現

キャリブレーション後に円運動試験を実施し、市販 NC 工作機械と同等である円運動誤差 $5\mu\text{m}$ を実現する。

4. 研究成果

(1) 研究成果総括

最初に当初目標と対比して研究成果を総括する。以下、研究目的を、[目的 1] 従来 2 倍以上の動作領域を有し、[目的 2] NC 工作機械と同等の運動精度を有するシステムを開発することに大別する。

① 平成 24 年度は、メカニズムの機構解析、詳細設計と機構部の試作を完了させた。

従来のパラレルメカニズムの研究で用いられてきた次元解析に基づいた機構解析では、冗長駆動メカニズムの冗長性と特異性が十分に評価できない事を明らかにし、新たに新しい機構解析指標を提案した。

② 平成 25 年度は、平成 24 年度に試作した機構部にリニアモータを組み込み、当研究室で開発した制御装置と接続して基本動作の確認を行った。円運動試験装置を購入し試験装置単体の動作テストを実施した。

③ 平成 26 年度の成果は下記のとおりである。
・円運動試験装置に対して、機構キャリブ

ーションに有効となる球面運動の計測を行うようにデータ取得および解析方法を拡張した。

・非対象冗長駆動メカニズムにより、メカニズムが反転して動作領域を拡張するアセンブリモード変化（順運動学解の間の状態遷移）中に遭遇する特異姿勢と、動作モード変化（逆運動学解の間の状態遷移）中に遭遇する特異姿勢を回避することを理論的に裏付けた。

・平面3自由度非対象冗長駆動平行メカニズムに対して、特異姿勢を回避するモード変化方法を提案し、制御装置に実装して動作検証を行った。

・以上より、[目的1]である従来の2倍以上の動作領域を有する平行メカニズムの機構解析・設計と制御方法の開発を完成させた。
④ [目的2]である高精度化に関しては、冗長駆動によるセルフキャリブレーションと球面運動計測を併用したハイブリッドキャリブレーションの着想まで実施した。

⑤ 上記の研究成果を、査読付雑誌論文9件にまとめ、口頭発表9件を実施した。国際学会にて、2件のベストプレゼンテーションを受賞した（雑誌論文⑥，学会発表①）。また、本研究を含む冗長駆動平行メカニズムに関する招待講演を行った。（学会発表⑤）

以下、代表的な研究成果の内容をまとめる。

(2) 非対象構造の分類とモード変化

① 非対象構造の分類

設計の簡便さを考慮して本研究では図1(a)に示すようにモータ可動子とロッド間の対偶位置を非対象に配置した機構を対象とする。動作モード変化時とアセンブリモード変化時に遭遇する特異姿勢をそれぞれ図1(c)(d)に示す。対称機構では冗長駆動にもかかわらず、機構の対称性のためにモード変化時に特異となるが、非対象機構では特異回避していることがわかる。非対象機構は図1(e)に示すようにベース中空部を跨いだアセンブリモード変化を特異フリーに行うことが可能となり、動作範囲を格段に拡大できる。

② 動作モード変化

MP(ムービングプレート)位置 x が与えられたときのモータ変位 q_i は、

$$q_i = q_{0xi} \pm \sqrt{l_i^2 - q_{0yi}^2 - q_{0zi}^2} \quad (1)$$

を得る。式(1)では逆運動学解が2通りとなり、動作モード変化では、この2通りの解の位置にモータ位置を遷移させてPKMの動作範囲を拡大させる。

③ アセンブリモード変化

モータ変位 q_i が与えられたときのMP位置 x を求める。3つのリンク i, j, k を選択し、式(2)の連立方程式解である3球の交点がMP位置 x の順運動学解となる。

$$\begin{cases} (x - x_{0i})^T (x - x_{0i}) = l_i^2 \\ (x - x_{0j})^T (x - x_{0j}) = l_j^2 \\ (x - x_{0k})^T (x - x_{0k}) = l_k^2 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)の解は2個存在し、順運動学解は2通りとなる。アセンブリモード変化では2通りの順運動学解の位置にMPを遷移させてPKMの動作範囲を拡大する。

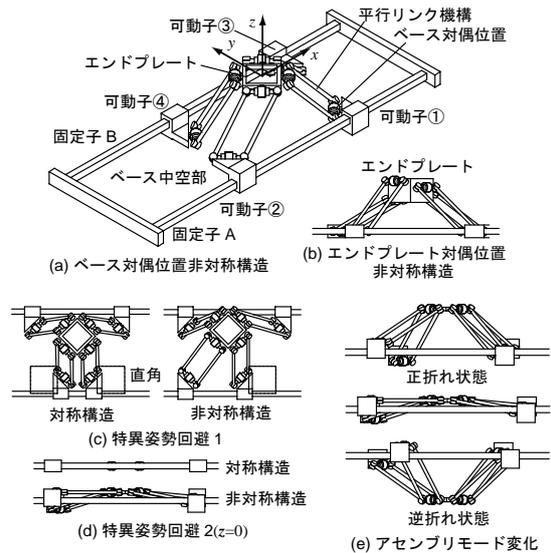
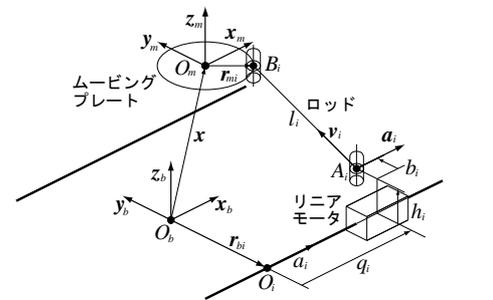


図1 冗長駆動リニア DELTA ロボット



- O_b : ベース原点
- O_m : ムービングプレート(MP)原点,
- O_i : モータ原点
- A_i : リンク i のモータとロッド間の対偶位置
- B_i : リンク i にのロッドと MP 間の対偶位置
- r_{bi} : モータ原点位置ベクトル
- r_{mi} : MP 原点位置ベクトル,
- x : ベース原点に対する MP 原点位置ベクトル
- h_i : モータ-ロッド対偶位置高さオフセット
- b_i : モータ-ロッド対偶位置幅オフセット
- v_i : ロッド単位方向ベクトル
- l_i : ロッド長さ
- q_i : モータ変位

図2 機構解析モデル

(3) 機構解析

図2に示すPKMのヤコビ行列は、

$$\mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_4^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \mathbf{a} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{v}_4^T \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。

従来の冗長ロボットの特異性や冗長性に対する研究では、次元解析に基づいて式(3)に示す2種類のヤコビ行列がランク落ちするときを特異、ヤコビ行列像空間の直交補空間の次元を冗長度として定義されている。モード変化時の特異姿勢回避は、冗長性を失うが特異ではない状態により実現されるが、次元定理より導かれる冗長度ではこの状態を両方を識別できない。そこで、新たな冗長性と特異性を識別する評価指標を提案した。以下では m 自由度を $m+1$ アクチュエータで駆動するパラレルメカニズムを対象とする。

① アクチュエータ冗長性と特異性

$$\text{rank}(\mathbf{J}_q) = m+1 \quad (4)$$

のときにアクチュエータ冗長性を有すると定義する。

$$\text{rank}(\mathbf{J}_q) < m \quad (5)$$

のときに、アクチュエータ特異となる。有効なアクチュエータ出力の数が m の場合にアクチュエータ特異ではないが冗長性を失う。ヤコビ行列のランクは、

$$\text{rank}(\mathbf{J}_q) = m \quad (6)$$

となる。アクチュエータ冗長性を失っても特異ではなく、非冗長駆動PKMとして機能する。図2の機構では、4個中1個のアクチュエータ出力のみが無効なとき、すなわち1個のみのリンクにおいてモータ駆動方向とロッド方向間の角度が90度となる場合に該当する。この状態を利用して、非冗長駆動機構が動作モード中に遭遇する特異姿勢を回避する。

② エンドエフェクタ冗長性と特異性

転置ヤコビ行列 \mathbf{J}_x^T を用いてエンドエフェクタ冗長性と特異性を定義する。 $(m+1) \times m$ 行列 \mathbf{J}_x^T の全ての $m \times m$ 小行列の行列式が0でないときに、エンドエフェクタ冗長性を有すると定義する。転置ヤコビ行列を一般的に、

$$\mathbf{J}_x^T = [\mathbf{v}_1 \ \cdots \ \mathbf{v}_{m+1}] \quad (7)$$

と記述し、 \mathbf{J}_x^T の第 i 列を除いた $m \times m$ 小行列の行列式を $M_i (i=1, \dots, m+1)$ と定義する。

$$M_i = \det([\mathbf{v}_1 \ \cdots \ \mathbf{v}_{i-1} \ \mathbf{v}_{i+1} \ \cdots \ \mathbf{v}_{m+1}]) \quad (8)$$

エンドエフェクタ冗長性を有する条件 M_i の絶対値 $\|M_i\|$ の相乗と相加を用いて記述する。

$$\left(\prod_{i=1}^{m+1} \|M_i\| \neq 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=1}^{m+1} \|M_i\| \neq 0 \right) \quad (9)$$

式(7)の 3×4 転置ヤコビ行列 \mathbf{J}^T の各列ベク

トル \mathbf{v} は図2に示す各ロッドの単位方向ベクトルとなる。小行列式 M_i は、幾何学的には第 i リンクを除いた残り3つのロッドの単位方向ベクトルにより構成される平行6面体の体積を表す。3つのロッドの単位方向ベクトルが同一平面上に存在する場合に平行6面体の体積はゼロとなる。4個中3個ロッドを選択する全ての組み合わせにおいて、各単位方向ベクトルが同一平面上に存在しない場合にエンドエフェクタ冗長性を有する。

行列 \mathbf{J}_x^T の全 $m \times m$ 小行列の行列式 M_i が0となるときに、エンドエフェクタ特異となる。エンドエフェクタ特異となる条件は以下となる。

$$\left(\prod_{i=1}^{m+1} \|M_i\| = 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=1}^{m+1} \|M_i\| = 0 \right) \quad (10)$$

行列 \mathbf{J}_x^T の全 $m \times m$ 小行列の行列式 M_i が0ではないが、一つ以上の小行列の行列式が0であるときに、エンドエフェクタ特異ではないが冗長性を失う。

$$\left(\prod_{i=1}^{m+1} \|M_i\| = 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=1}^{m+1} \|M_i\| \neq 0 \right) \quad (11)$$

この時、非冗長駆動パラレルメカニズムとして機能する。この状態を利用して、非冗長駆動機構がアセンブリモード中に遭遇する特異姿勢を回避する。

(4) 非対称冗長駆動パラレルロボットの動作領域拡張

① 動作モード変化

図3に対称機構および非対称機構パラレルメカニズムの動作モード変化の様子を示す。動作モード変化中にモータ駆動方向とロッド方向間の角度が90度、すなわちアクチュエータ冗長性を喪失する状態を跨ぐ必要がある。対称機構では機構の対称性のために別のリンクのモータ駆動方向とロッド方向間の角度も同時に90度をなし、アクチュエータ特異となる。非対称機構では設計の非対称性のために同時に2個のモータ駆動方向とロッド方向間の角度が90度とはならないので、冗長性は喪失するが特異とはならない。非対称機構は特異フリーに動作モード変化を実現する。

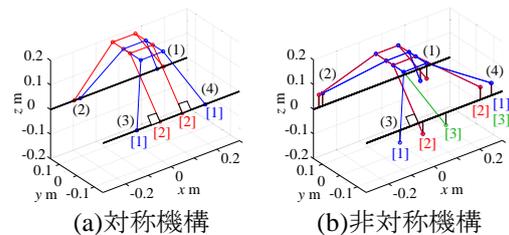
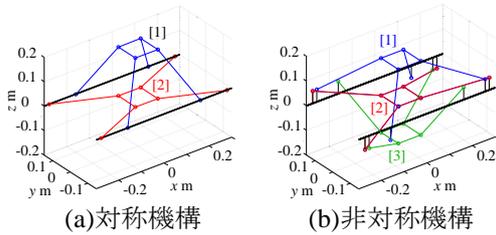


図3 動作モード変化

② アセンブリモード変化

図4にアセンブリモード変化の様子を示す。対称機構の場合、アセンブリモード変化中の

ムービングプレート位置が $z=0$ となるときに 4 個のロッド全てが同一平面上に存在し、エンドエフェクタ特異となりアセンブリモード変化を実現できない。非対称機構では、アセンブリモード変化中に 3 個のロッドの単位方向ベクトルが同一平行平面上に存在しないので、特異フリーにアセンブリモード変化を実現する。



(a)対称機構 (b)非対称機構
図4 アセンブリーモード変化

(5) 非対称パラレルメカニズムの設計試作

図5に示す実験装置を試作した。モータ固定子間隔とモータ-ロッド間対偶位置を可変とし、さまざまな条件での動作検証を行える設計とした。定格推力 10Nm のリニアアクチュエータと、位置分解能 $0.1\mu\text{m}$ のリニアエンコーダを選定した。

制御装置はエムティティ社製の iBIS を用いて、サンプリング周期 1ms にて制御演算を実行した。制御ソフトウェアは Simulink ベースのモデルベース設計を試み、ソフトウェアの開発効率を高めた。

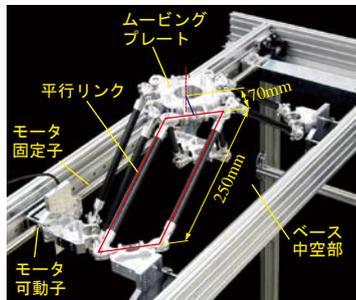


図5 試作した実験装置

(6) 円運動動作の評価技術の確立

円運動試験装置として、図6に示すレニショー社製 QC20 を導入した。円運動試験装置は工作機械に xy 平面, yz 平面, zx 平面上の円運動を行わせた時の精度を測定し、専用のソフトウェアで各円運動精度を解析評価する。

機構キャリブレーションには、広範囲の動作を行わせた時の MP 位置情報を取得解析する必要がある。そこで、データの取得と解析を行うソフトウェアを新たに開発し、図7に示すように球面運動の精度評価を行えるようにした。

(7) モード変化実験

平面3自由度非対称冗長駆動パラレルメカニズムに対して、特異姿勢を回避するモード変化方法を考案し制御装置に実装して動作

検証を行った様子を図8に示す。従来のロボットの制御方法では、一つの順運動学解および一つの逆運動学解を用いる単一モード動作である。本研究で実施したモード変化は、複数の順運動学解と複数の逆運動学解を用いる複数モード動作となる。ロボットのモードを表現するフラグ(図8の(-+-+)や[+0]など)を導入すると共に、モード間の状態遷移を考慮した制御ソフトウェアを開発し、ロボットに実装した。

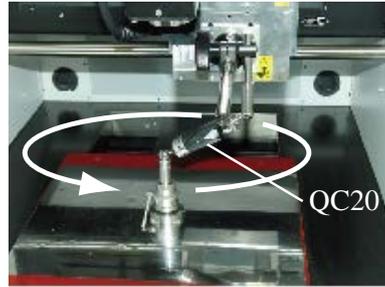


図6 円運動試験装置 QC20

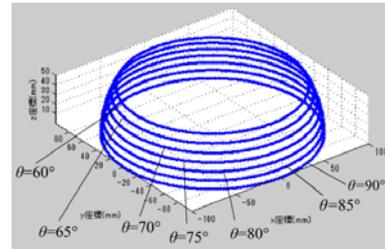


図7 球面運動精度の解析

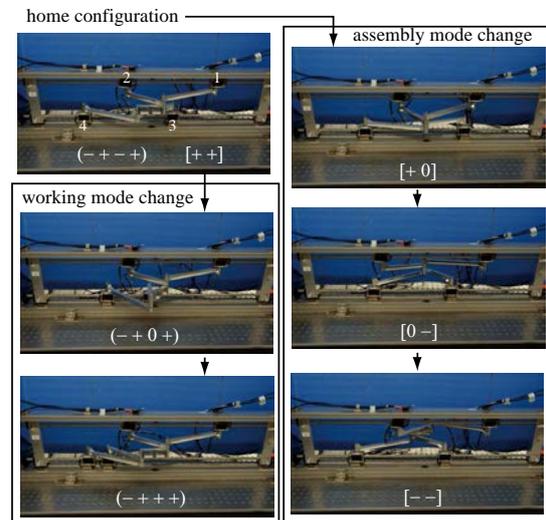


図8 非対称冗長駆動 PKM のモード変化

(8) 今後の展望

「冗長駆動」、「非対象設計」、「モード変化」をキーワードとして、パラレルメカニズムの欠点である動作範囲の小ささを克服する研究を提案して実機検証を行った。今後は本研究成果を工作機械用のテーブルなどへの具体的なアプリケーション展開に取り組んでいく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

① T. Harada, "Mode Changes of Redundantly Actuated Parallel Mechanism", Journal of Mechanical Engineering Science, 査読有, 2014, (印刷中)

② T. Harada, "Mode Changes of a Planar 3 DOF Redundantly Actuated Parallel Robot", International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 査読有, (印刷中)

③ T. Harada, "Design of a Redundantly Actuated Asymmetric Linear DELTA Parallel Mechanism for Singularity-Free Mode Changes", Applied Mechanics and Materials Journal, 査読有, Vol. 575, 2014, pp. 711-715, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.575.711

④ T. Harada and J. Angeles, "Kinematics and Singularity Analysis of a CRRHRRRC Parallel Schoenflies Motion Generator", 査読有, Trans. of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 38, No. 2, 2014, pp. 185-197

⑤ T. Harada, T. Friedlaender and J. Angeles, "The Development of an Innovative Two-DOF Cylindrical Drive: Design, Analysis and Preliminary Tests", Proc. of 2014 IEEE ICRA, 査読有, 2014, pp. 6338-6344

⑥ T. Harada, "Design of a Redundantly Actuated Linear DELTA Parallel Mechanism for Singularity-Free Mode Changes", Proc. of MIMT2014, 査読有, CD-ROM M0061, 2014, 5 pages.

⑦ T. Harada and J. Angeles, "Kinematics and Singularity Analysis of a CRRHRRRC Parallel Schoenflies Motion Generator", Proc. of CCToMM M3, 査読有, 2013, 12 pages.

⑧ T. Harada and P. Liu, "Internal and External Forces of a Planar 3-DOF Redundantly Actuated Parallel Mechanisms by Axial Force Sensors", ISRN Robotics, 査読有, 2013, 593606, 8 pages, doi: 10.5402/2013/ 593606

⑨ T. Harada, K. Dong, and T. Itoigawa, " Design Optimization of Active Scanning Probe Using Parallel Link Mechanism", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, Vol. 13, No. 8 doi: 10.1007/s12541-012-0182-4

〔学会発表〕(計9件)

① T. Harada, "Mode Changes of a Planar 3 DOF Redundantly Actuated Parallel Robot", ICCMA 2014, 2014年12月, ドバイ (UAE)

② 原田 孝, "冗長駆動パラレルロボット内力の数式計算方法", 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014年9月, 東京電機大学(東京都)

③ T. Harada, "Singularity-Free Mode Changes of Redundantly Actuated Asymmetric Parallel Mechanism", Parallel 2014, 2014年7月, 天津市 (中国)

④ 原田 孝, 平面3自由度冗長駆動パラレルメカニズムの特異姿勢を回避するモード変化, 日本機械学会 ROBOMECH2014, 2014年5月, 富山市総合体育館(富山県 富山市)

⑤ 原田 孝, "冗長駆動パラレルロボット", 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2014年4月, 信州松代ロイヤルホテル(長野県 長野市)
【招待講演】

⑥ 原田 孝, 木邨真人, "特異フリーにモード変化する非対称冗長駆動リニア DELTA ロボット", 2013年9月, 首都大学東京(東京都)

⑦ 木邨真人, 大坪義一, 原田 孝, "平面3自由度冗長駆動パラレルメカニズムの姿勢遷移方法の提案", 日本機械学会 ROBOMECH2013, 2013年5月, つくば国際会議場(茨城県 つくば市)

⑧ 木邨 真人, 原田 孝, 阿野 優次郎, "平面3自由度冗長駆動逆折れパラレルメカニズムの開発", 日本機械学会 ROBOMECH2012, 2012年5月, アクトシティ浜松(静岡県 浜松市)

⑨ 原田 孝, 留 伯迪, "リンク軸力センサを用いた平面3自由度冗長駆動パラレルメカニズムの内力と外力の計測", 日本機械学会 ROBOMECH2012, 2012年5月, アクトシティ浜松(静岡県 浜松市)

〔その他〕

ホームページ等

(1) 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/>

(2) 近畿大学 理工学部 機械工学科 原田 孝
<https://sites.google.com/site/parallelmec/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究代表者

なし

(3) 連携研究者

なし