

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月28日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560279

研究課題名（和文） 倣い機能を有する微小カパラレルリンク機構による
オンマシンロボラスト形状計測研究課題名（英文） Robust on-machine profile measurement using a parallel mechanism
with small touching force scanning motion

研究代表者

原田 孝 (HARADA TAKASHI)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：80434851

研究成果の概要（和文）：機械部品の形状を能動的に倣い計測する空間3自由度パラレルメカニズムを開発した。低摺動ジョイントと平行リンクを用いたメカニズムと、3次元画像計測装置を用いた位置精度評価装置を設計試作し、機構キャリブレーション方法を考案した。冗長駆動を用いたパラレルメカニズムにおいて、動作範囲1.6mm立方体内で分解能 $0.5\mu\text{m}$ 、絶対位置精度 $2.4\mu\text{m}$ を実現した。インピーダンス制御に基づく倣い制御を提案し安定した倣い制御を実現した。

研究成果の概要（英文）：A 3-dof active scanning probes using non-redundantly and redundantly actuated translational parallel mechanisms are developed. In order to improve the positioning accuracy and controlling small forces, a small parallelogram linkage with low friction joint is developed. We have developed 3D measurement system by stereo cameras for evaluating the accuracy of the parallel mechanisms. The positional resolution of the redundantly actuated mechanism becomes $0.5\mu\text{m}$ in a cubic working range with side length of 1.6 mm. By applying mechanical parameters calibration, the accuracy of the absolute position of the parallel mechanism has been improved to $2.4\mu\text{m}$. A stable scanning motion based on the impedance control is also developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：精密機械システム，パラレルメカニズム，機構設計，オンマシン計測，誤差解析，キャリブレーション，インピーダンス制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者は、高剛性・高精度な特徴を有するパラレルメカニズムに関し、動作領域を拡張した新しい機構(NSKメカトロニクス技術高度化財団研究助成)や、小型高精度メカニ

ズムの研究(近畿大学理工学部 教員研究充実費助成)を行っている。

(2) 機械加工の高精度化に伴い、加工部品の形状を高精度に測定する取り組みが盛んに

行われている。鏡面仕上げされた金型などが主たる対象であるが、従来のタッチプローブは接触力が大きく、鏡面に傷をつける問題がある。近年、光ファイバプローブなどの座標計測用の高精度・微小測定力プローブに関する研究が行われている。しかし、これらは測定球の接触を ON/OFF にて検出するタッチ式測定の域を超えておらず、多点の座標計測には多大な測定時間がかかる問題がある。

(3) 申請者は、鏡面仕上げされた金型や微小な凹凸を有するワークの形状を高速高精度に計測を行うことを目的とし、これまでのパラレルメカニズムに関する研究を発展させて、微小力でワーク表面を触れながら、連続して座標計測を行うメカニズムの研究に着手した。機械式バネを介して測定子をワークに押し当てる従来の受動的触れプローブに対して、力制御したアクチュエータを介して測定子を押し当てる能動的触れ機能により、測定面の傾きや面性状に応じた測定力を与えることが特徴である。

XYZ 方向の計測感度を等方にする最適設計や力制御方法を新たに提唱し、ストローク 5.0mm、定格推力 1.3N、位置分解能 $1\mu\text{m}$ の 3 個のリニア・アクチュエータを推力制御し、滑り軸受用いた市販のユニバーサル・ジョイントを用いた 3 自由度パラレルリンク機構を試作した。しかし、機械的組立て誤差や、摺動抵抗の大きい滑り軸受のために、高精度な位置制御や微小力制御が困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高精度かつ効率的な機械加工のために、鏡面加工された金属部品にも傷をつけない微小力オンマシン触れ形状計測装置を研究開発し、それをを用いた加工誤差フィードバックシステムを確立することである。測定環境が悪いオンマシン環境でも誤差にロバストな計測システムを構築することが特徴である。

3. 研究の方法

(1) 触れ座標計測

本研究にて提案するパラレルメカニズムを用いた触れ座標計測装置の概観を図 1 に示す。アクチュエータをサーボ制御することで、触れ動作時の接触子の接触剛性や粘性の大きさ、方向、接触力を任意に制御できる(能動的触れ座標計測)。自由曲面の法線方向に対して接触剛性を小さくしたり、粘性を制御して振動を小さくしたり、接触力を一定に保つなどのフレキシブルで安定した触れ動作が可能である。アクチュエータをベース部に配置することにより可動部質量が小さく、高速な動作が可能であり、微小凹凸を高速触れ測定にも適している。一方で、機構や運動学

的な複雑さのために、パラレルメカニズムを能動的触れ座標計測に適用した研究事例はない。

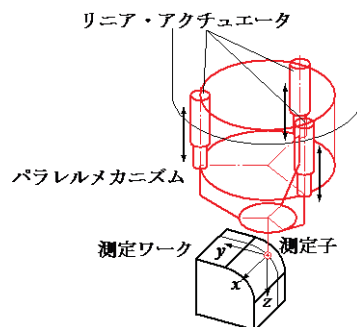


図 1 パラレルメカニズム座標計測装置

(2) 開発目標

市販の小型受動的触れプローブの測定レンジおよび精度に関する仕様をメーカーのデータシートから引用し整理した。本研究でも、これらと同程度の分解能と計測精度を最終的な目標とする。すなわち、位置分解能 $1\mu\text{m}$ 以下、測定レンジ $\pm 0.5\text{mm}$ 以上、計測精度 $3\mu\text{m}$ を目標に設定して装置の試作を行い、その精度を評価する。

(3) 初年度はパラレルメカニズムの設計と制御に関する研究を実施した。

パラレルメカニズムの運動学、微小運動学式を導出し、機構設計とセンサー・アクチュエータの選定を行った。微小な力を制御するために摺動抵抗を小さくしたジョイントの開発を行い、試作 1 号機を開発した。同時に 2 次元画像計測装置を開発し、パラレルメカニズムの位置精度を計測した。機構誤差にセンシティブであり、XY 方向の位置決め誤差が大きくなる課題を抽出した。

(4) 2 年目は新たに平行リンクを用いたメカニズムを研究試作し、ジョイント部のガタを除去する機械設計および組立管理と特異姿勢解析によるリンク長の最適設計などにより、機構の高精度化を実現した。

メカニズムの空間分解能を計算する方法を提案し、空間分解能 $0.58\mu\text{m}$ を得た。3 次元画像計測装置と、これを用いた機構キャリブレーション方法を提案した。メカニズム先端の動作領域 1.6mm 立方体において、絶対位置精度が $3.4\mu\text{m}$ となることを確認した。

(5) 最終年度はメカニズムの位置精度のさらなる向上と、高速触れ測定を実現する制御方式を確立した。パラレルメカニズムの動作領域を分割する機構キャリブレーション方法を提案し、メカニズムの絶対位置精度が $2.4\mu\text{m}$ に向上した。

機構先端 3 自由度に対し、4 個のアクチュエータにて駆動する冗長メカニズムの設計

と試作を完了した。冗長駆動により空間分解能が $0.5\mu\text{m}$ に向上することを明らかにした。

外部からの位置計測を必要としないセルフキャリブレーションを提案した。さらなる高精度化のために、セルフキャリブレーションと外部相対位置計測を組み合わせた新しいハイブリッド・キャリブレーションを着想し、アルゴリズムを定式化した。

高速微い測定のための制御方式の確立
微小凹凸を高速微い測定するために、インピーダンス制御における機械的応答を高めるためのパラメータの設定方法を考案した。

4. 研究成果

(1) 試作 1 号機の開発 [初年度の研究]

① 低摺動ジョイントの開発

研究開始当初の背景 (3) に記載のように、申請者らは前もってリンク長さ 8.1mm の 3 自由度平行メカニズムを試作していた。しかし、機械的組立て誤差や、摺動抵抗の大きいすべり軸受のために、高精度な位置制御や微小力制御が困難であった。

そこで、図 2(a) のすべり軸受の代わりに、図 2(b) に示すミニチュア玉軸受 (内径 1mm) を用いた低摺動抵抗ジョイントを開発した。ジョイントの摺動抵抗を計測したところ、転がり軸受の摺動抵抗はすべり軸受の $1/40$ に小さくなることを確認した。

② 試作 1 号機

図 3 に示す平行メカニズム 1 号機を試作した。ベース部に配置したストローク 5mm 、定格推力 1.3N 、位置分解能 $1\mu\text{m}$ のリニア・アクチュエータおよび図 2(b) の低摺動ユニバーサル・ジョイント 3 組用いた、3-PUU 機構 (P: 直動駆動, U: ユニバーサル・ジョイント) を用いた。機構全体は既に提案している計測感度等方設計を適用し、中立点での XYZ 方向の位置決め感度を等方にした。機構各部に組み立て調整用の基準面を設けて、アライメント誤差を小さくした。

③ 2 次元位置精度評価装置

平行メカニズムの位置精度を評価するために、図 4 に示す 2 次元画像計測装置を開発した。平行メカニズム先端部に取り付けられた $\phi 1\text{mm}$ の測定子の中心位置を、平行光光学系を用いてサブ μm 分解能で計測することが可能である。

④ 位置精度の評価

図 3 に示す試作 1 号機を 1 辺 1.6mm の立方体内の範囲に位置決めし、図 4 の画像計測装置にて実際の位置精度を測定した。Z 軸方向 (上下方向) は $3\mu\text{m}$ 程度の位置決め精度を実現したが、XY 方向 (水平方向) には数 $10\mu\text{m}$ の大きな位置決め誤差があることがわかった。

この原因を調査したところ、メカニズムに採用した 3-PUU リンクは機構学上の特性により設計誤差に対してセンシティブであり、機構部寸法や組立の小さな誤差により、平行メカニズムの出力節 (エンドプレート) が不安定に傾斜し、その結果測定子位置にて XY 方向に位置決め誤差を生じていた

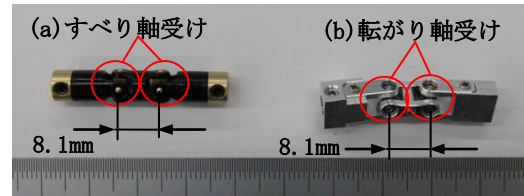


図 2 低摺動ジョイント

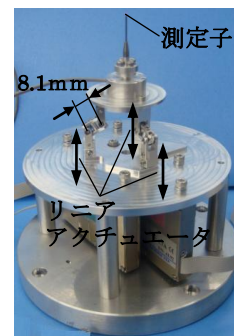


図 3 試作 1 号機 (3-PUU メカニズム)

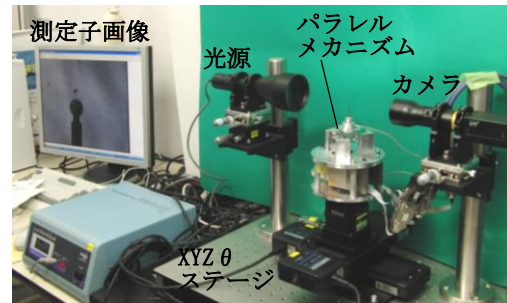


図 4 2 次元画像計測装置

(2) 試作 2 号機の開発 [2 年目の研究]

① 平行リンクの開発

新たに図 5 に示す平行リンクを用いたリンク部を設計試作した。平行リンクの機械的拘束により、平行メカニズムは 3-PR₂R₂R₁ タイプ (R: 回転対偶, 同一の添え字の回転対偶は回転軸方向が平行であることを意味する) のとなる。エンドプレートが純並進する 3 自由度メカニズムに属し、不安定にエンドプレートが傾くことはない。

② 試作 2 号機

平行リンクを用いた平行メカニズム 2 号機を図 6 に示す。エンドプレート、平行リ

リンク機構、アクチュエータ可動部および力センサを含む可動部全体の質量は 98g であり、微小な凹凸が連続するような複雑な機械部品形状の高速微い測定に適している。

③等方性と空間分解能

市販の小型受動的微いプローブの計測レンジに準拠し、平行メカニズムの基準動作範囲を XYZ 方向に各辺 1.6 mm の立方体とした。平行メカニズムの先端部とアクチュエータの微小変位関係のヤコビ行列 J_{12} の条件数の逆数を等方性の評価基準とした。リンク長さ 8.1mm (試作 1 号機) に対して、試作 2 号機ではリンク長さを 18mm に延長し、基準動作範囲境界の測定感度等方性の劣化を小さくした。

ヤコビ行列 J_{12} を特異値分解し、平行メカニズム先端部の空間分解能を計算する方法を提案し、本研究の設計では、アクチュエータの分解能がメカニズム先端部で $1/\sqrt{3}$ に縮小されることを明らかにした。

試作機で用いたアクチュエータの分解能は $1\mu\text{m}$ であるので、平行メカニズムの空間分解能は $0.58\mu\text{m}$ となる。

④ 3次元位置精度評価装置

平行メカニズムの位置精度を評価するために、図 7 に示す 3次元画像計測装置を開発した。平行光光学系カメラ 2 台を用いたステレオ画像計測により、平行メカニズム先端部に取り付けられた $\phi 1\text{mm}$ の測定子の中心の 3次元位置をサブ μm 分解能で計測することが可能である。

⑤機構キャリブレーション

本メカニズムでは順運動学が解析的に導出できることを明らかにし、順運動学に基づく機構パラメータキャリブレーション方法を提案して試作機に適用した。

1.6 mm の立方体の基準動作範囲内に 0.4mm 間隔の格子状に 125 点位置決めするアクチュエータの制御量を与え、その時の測定子球中心位置を、図 7 の 3次元画像計測装置を用いて計測した。計算上のメカニズム先端部位置と、実際の位置を比較し、その差が小さくなるように最小二乗法にて順運動学式に含まれる機構パラメータを推定計算した。

機構キャリブレーション前後の位置決め精度の比較を図 8(a) (b) に示す。位置決め位置を \circ で示し、位置決め誤差を 25 倍拡大して実線表示している。キャリブレーション前後で基準領域内の平均絶対位置精度が $16.2\mu\text{m}$ から $3.4\mu\text{m}$ と大幅に改善された。

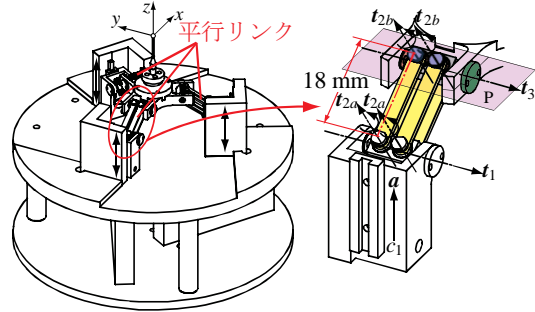


図 5 平行リンク

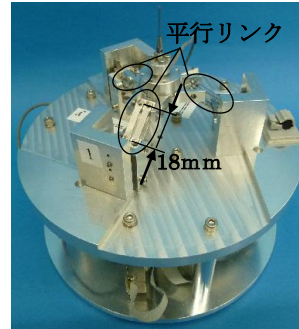


図 6 試作 2 号機 (3-PR₁R₂R₂R₁ メカニズム)

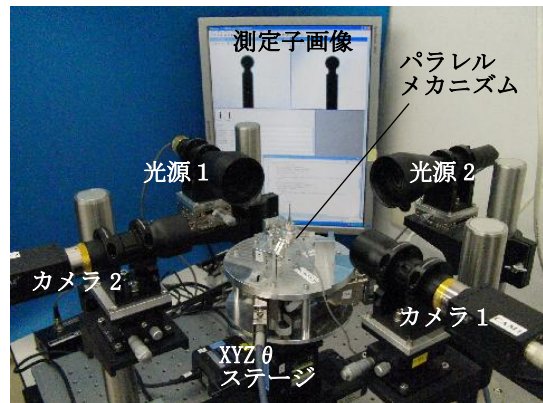
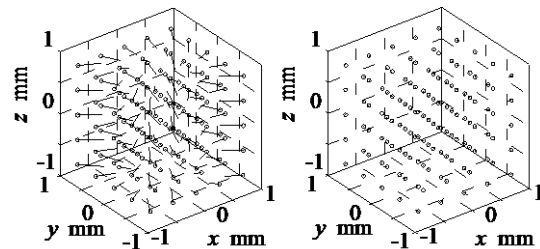


図 7 3次元画像計測装置



(a) キャリブレーション前 (b) キャリブレーション後
図 8 機構キャリブレーション結果

(3) 試作 3 号機の開発 [3 年目の研究]

①空間分割キャリブレーション

平行メカニズムの動作領域を XYZ の各象限で 8 分割し、領域毎に機構キャリブレーションを行う動作領域分割キャリブレーション方法を提案した。領域分割前の平均絶対

位置精度 $3.4\mu\text{m}$ に対して、領域分割後の平均絶対位置精度が $2.4\mu\text{m}$ に向上した。

②試作 3 号機

メカニズムの空間分解能と機構キャリブレーション精度の向上を目的として、図 9 に示す 4 個のアクチュエータにて先端部 3 自由度を駆動する 4-PR₁R₂R₂R₁ 冗長メカニズムの設計と試作を行った。

③空間分解能の向上

先端部 3 自由度を N 個のアクチュエータにて駆動する場合、ヤコビ行列 J_{12} の特異値分解より、アクチュエータの分解能がメカニズム先端部で $1/\sqrt{N}$ に縮小されることを明らかにした。図 9 の 4 アクチュエータ機構では、アクチュエータの分解能 $1\mu\text{m}$ に対してメカニズムの空間分解能は $0.5\mu\text{m}$ となる。

④セルフキャリブレーション

冗長メカニズムに対し、外部からの位置計測を必要としないセルフキャリブレーションを提案した。セルフキャリブレーションに関する誤差解析方法を提案し冗長メカニズムに適応したところ、現在の 1/10 以下の位置分解能を有するアクチュエータが必要であることがわかった。そこで、セルフキャリブレーションと外部相対位置計測を組み合わせた新しいハイブリッド・キャリブレーションを着想し、アルゴリズムの定式化までを実施した。

⑤高速微い測定のための制御方式の確立

微小凹凸を高速微い測定するために、インピーダンス制御における機械的応答を高めるためのパラメータの設定方法を考案した。

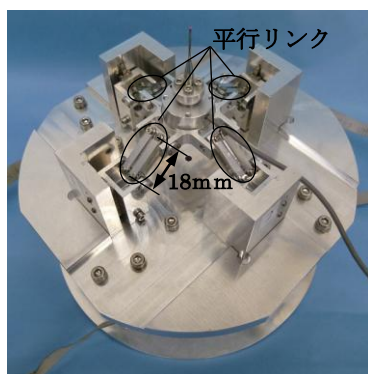


図 9 試作 3 号機 (4-PR₁R₂R₂R₁ メカニズム)

(4) 得られた成果と国内外へのインパクト

研究成果に関して、国内外から下記の学会賞を得た。

①冗長駆動平行メカニズムの高速微いのための制御方式に関して、IEEE 主催の国際学会 ROBOT2010 にて最優秀講演論文賞 (309 件

中 1 件) を受賞した。(雑誌論文⑤)

②平行メカニズムの機構設計と評価方法に関して、掲載ジャーナルの Most Downloaded 月間総合 2 位を獲得した。(雑誌論文⑧)

③平行メカニズムの微い動作時などの力計測に関して、計測自動制御学会より優秀講演賞を受賞した。(学会発表①)

④平行メカニズムの機構と運動学に関して、招待論文を執筆した。(図書①)

(5) 今後の展望

高精度かつ効率的な機械加工のために、鏡面加工された金属部品にも傷をつけない微小力オンマシン微い形状計測装置を開発し、位置分解能 $1\mu\text{m}$ 以下、測定レンジ $\pm 0.5\text{mm}$ 以上、絶対計測精度 $3\mu\text{m}$ の目標を達成した。

実際に工作機械や座標計測装置に搭載するために、(1) 小型高分解能のアクチュエータを用いたメカニズム全体の軽量化、(2) ハイブリッド・キャリブレーションによる位置精度の向上、(3) 加工誤差フィードバックのための CAM の構築、などが課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① Harada, T., Dong, K. and Itoigawa, T., Design Optimization of Active Scanning Probe Using Parallel Link Mechanism International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, Vol.13, No. 8, 2012, 掲載決定

② 原田 孝, 董 科, 金丸 健太, パラレルメカニズムを用いた座標計測用微いプローブに関する研究(感度等方メカニズムの設計試作と機構キャリブレーション), 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 78 No. 787, 2012, 826-841

③ Uchikoshi, T. and Harada, T., Study of Parallel Mechanism with Back-Flip Motion Applying Parallel Drive System of Linear Motors, 査読有, Proc. IEEE ROBOT 2011, 2002-2007

④ Harada, T. and Dong, K., Mechanical Design and Accuracy of A Miniature Translational Parallel Mechanism for Active Scanning Probe, 査読有, Proc. IEEE ROBOT 2011, 2756-2761

⑤ Harada, T. and Motoya, N., Impedance Control of a Redundantly Actuated 3-DOF Planar Parallel Link Mechanism Using Direct Drive Linear Motors, 査読有, Proc. IEEE ROBOT 2010, 501-506

⑥ 原田 孝, 長瀬 元哉, マルチ駆動リニア

モータを用いたパラレルリンク機構に関する研究 (第2報, 冗長駆動パラレルリンク機構のインピーダンス制御), 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 76, No. 770, 2010, 2656-2662

- ⑦ Harada, T. and Dong, K., Design and Control of 3-DOF Active Scanning Probe Using Parallel Link Mechanism, 査読有, Proc. ISMQC 2010, 2010, E2-145:1-4
- ⑧ Harada, T., Robust Method for Position Measurement of Vertex of Polyhedron Using Shape from Focus, JSME Int. J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol. 4, No. 2, 2010, 492-503
- ⑨ 原田 孝, 長瀬 元哉, マルチ駆動リニアモータを用いたパラレルリンク機構に関する研究 (第1報:機構の形態と力学モデル), 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 75, No. 758, 2009, 2729-2734
- ⑩ Nagase, M. and Harada, T., Impedance Control of Parallel Link Mechanism by Multi Drive Linear Motors, 査読有, Proc. 5th LEM21, 2009, 179-182
- ⑪ Harada, T. and Nagase, M., Configurations and Mathematical Models of Parallel Link Mechanisms Using Multi Drive Linear Motors, Proc. IEEE IROS 2009, 査読有, 2009, 1974-1979

[学会発表] (計 10 件)

- ① 留 伯迪, 打越 友哉, 原田 孝, 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, 計測自動制御学会 第 12 回 SI 部門講演会, 2011 年 12 月, 京都市
- ② Harada, T., Dong, K. and Itoigawa, T., Optimum Design of Active Scanning Probe Using Parallel Link Mechanism, 10th ISMTII, 2011 年 6 月, 韓国
- ③ 打越 友哉, 原田 孝, 東 大地, バック転パラレルリンク機構に関する研究(機構解析とプロトタイプを試作), 日本機械学会 ROBOMEC 2011, 2011 年 5 月, 岡山市
- ④ 原田 孝, 糸魚川 智之, 董 科, パラレルメカニズムを用いた座標計測用倣いプローブに関する研究(リンク機構の設計と機構キャリブレーション), 日本機械学会 ROBOMEC 2011, 2011 年 5 月, 岡山市
- ⑤ 東 大地, 原田 孝, 打越 友哉, マルチ駆動リニアモータを用いたパラレルリンク機構に関する研究 (第 5 報:誤差伝播解析によるキャリブレーションの高精度化), 日本機械学会 ROBOMEC 2011, 2011 年 5 月, 岡山市
- ⑥ 打越 友哉, 原田 孝, 水平 3 自由度冗長駆動バック転パラレルリンク機構の運動

学, 日本機械学会 第 8 回生産加工・工作機械部門講演会, 2010 年 10 月, 岡山市

- ⑦ 原田 孝, マルチ駆動リニアモータを用いたパラレルリンク機構に関する研究 (第 4 報:機構パラメータのセルフキャリブレーション), 日本機械学会 ROBOMEC 2010, 2010 年 7 月, 岡山市
- ⑧ 打越 友哉, 原田 孝, マルチ駆動リニアモータを用いたバック転パラレルリンク機構の最適設計, 精密工学会 2010 年度関西地方学術講演会, 2010 年 5 月, 京都市
- ⑨ 董 科, 原田 孝, 3 自由度パラレルリンク機構を用いた座標計測装置の誤差解析, 2009 年度精密工学会秋季大会, 2009 年 9 月, 神戸市
- ⑩ 董 科, 原田 孝, パラレルリンク 3 自由度スキャンニングプローブに関する研究 (リンク機構の低摺動化と高精度化), 精密工学会 2009 年度関西地方学術講演, 2009 年 5 月, 豊中市

[図書] (計 1 件)

- ① Harada, T., InTech, Numerical Analysis - Theory and Application, (Chapter 18, Kinetostatics and Dynamics of Redundantly Actuated Planar Parallel Link Mechanisms を分筆), InTech, 2011, pp. 395-416

[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 ホ ー ム ペ ー ジ , <http://www.mec.kindai.ac.jp/mech/lab/harada/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 孝 (HARADA TAKASHI)
近畿大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80434851

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし