

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03874

研究課題名（和文）「ポータブル」ロボット切削加工システムの基礎となる空間精度の新しい測定法

研究課題名（英文）A new measurement scheme of volumetric accuracy as a basis to develop a "portable" robotic machining system

研究代表者

茨木 創一（Soichi, Ibaraki）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：80335190

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：現在の産業用ロボットの多くは「ティーチング」、すなわち人間による操作をコピーすることでプログラムされる。しかし近い将来には、バーチャルモデルによるプログラミングに移行すると予想する。そのとき、ロボット作業の精度は、ロボットの空間精度、すなわち可動領域内の任意の点における、指令位置に対する実際の位置の精度が決めることになる。本研究では、可動領域全体で、ロボットの手先位置を測定する方法を提案した。また、ロボットの空間誤差を正確に予測するための、新しい幾何学モデルを提案した。提案したモデルの予測精度は、まずスカラ型ロボットで実証し、次に6軸ロボットに拡張した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の製造現場で、産業用ロボットのティーチングを行うオペレータの確保は、ロボットの導入コストを上げる主要因である。製造現場の自動化が今後ますます進み、ロボットの用途が拡大するのは明らかであるが、そのために、ロボットはコンピュータによるプログラミングに移行するだろうと予想する。本研究で構築した、ロボットの空間誤差を高精度に予測できるモデルを使えば、誤差補正を行うことができる。本研究の成果は、ロボットの空間精度を格段に向上させるための基盤技術となる。ロボットがコンピュータによってプログラミングされるようになれば、ロボットの作業の精度は、空間精度が決める。

研究成果の概要（英文）：In today's manufacturing industry, most industrial robots are programmed by the teach method. In near future, many robots will be programmed offline based on a virtual model. Then a robot's volumetric accuracy, i.e. the positioning accuracy with respect to the command position arbitrary given in the entire workspace, will be crucial to successfully perform the given task. This paper first proposed a scheme to measure the end effector's position over the entire workspace. Then, a new kinematic model, containing the bidirectional angular positioning error profile of every rotary axis, was proposed to precisely predict the robot's volumetric accuracy over the entire workspace. Its prediction accuracy was experimentally verified first with the 2D positioning by a SCARA robot, and then the present model development was extended to the 3D positioning by a six-axis robot.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：産業用ロボット 位置決め 空間精度 測定 切削 幾何学モデル レーザ干渉計

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボット（以下「ロボット」）の販売台数は、コロナ禍の一時的な影響はあるものの、今後も成長が見込まれている。先進工業国では人手不足、新興工業国では人件費上昇などを背景として、製造現場の自動化が今後ますます進むのは明らかだからである。

ロボットの動作はほとんど、「ティーチング」でプログラムされる。ティーチングとは、人間が操作盤を使って手でロボットを動かし、それを記憶させることである。一方、工作機械は、ティーチングでプログラムすることは100%ありえない。工作機械のプログラムは、CAMと呼ばれるソフトウェアを使い、加工物のバーチャルモデルをもとに自動計算する。

この根本的違いの原因のひとつは、ロボットには「空間精度」が保証されず、指令した通りに動作し、所定の作業を完了できる保証がないことである。ここで、可動領域内の任意の点に位置決めしたとき、指令位置と実際の位置の3次元誤差を「空間誤差」と呼ぶ。ロボットをティーチングで動かす限り、空間精度は必要ではない。ロボットが作業を失敗すれば、人間がティーチングをやり直せばよいからである。

ティーチングの手間と、それができる人材の確保は、ロボットを導入するコストを上げる要因である。研究代表者は、近い将来には、工作機械がそうであるように、多くのロボットがティーチングではなく、バーチャルモデルによるプログラミングだけで運用されると予想している。そうなれば、ロボット作業の精度は、ティーチング作業の精度ではなく、ロボットの空間精度が決めることになる。

工作機械に代わり、ロボットを切削加工に活用する研究は、特に欧米の航空機メーカーや研究機関を中心に研究開発が先行している。日本はロボットメーカーが幾つもあるにもかかわらず、この分野で遅れをとっている。切削加工では、工具は複雑な3次元経路に沿って動くので、ティーチングすることは不可能である。また、ロボットの空間精度が、加工物の形状精度に直結する。ロボットを用いて切削を行う際の課題は、切削力に対する剛性が十分ではないこと、空間精度が十分でないこと、の2つが要因と考える。このうち、ロボットの剛性を工作機械と同程度に高めるには、機構の根本的な見直しが必要と考える。しかし、近年はニアネット・シェイプ成形を使って、仕上げ加工の除去量を小さくする加工法が増えている。低剛性でも切削加工できる対象は、今後は増えていくと予想する。本研究では、ロボットの空間精度を研究対象とする。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的＝ロボットの新しい用途の開拓： 工作機械と比べてとき、ロボットの最大の長所は、可搬性（ポータビリティ）と考える。図1は、本研究の最終的な目標と考える、ロボットを使った「ポータブルな」切削加工システムのイメージ図を示す。大型の部品は、通常、大型の工作機械で切削加工される。それには大きな工場環境が必要で、コストも高い。図1のように、ロボットを移動し、必要な箇所だけ切削加工を行えば、はるかに低いコスト、低消費エネルギーで加工が行える。

学術的「問い」－ロボットの空間精度をどのように測定するか： ロボットの空間精度を向上するのが難しい一番の理由は、ロボットの手先の3次元位置を計測するのが難しいことと考える。一般に、計測できないものは、制御できないためである。空間内の任意の点の、3次元位置をマイクロメートルオーダの精度で測定するのは、単純であるが、困難な計測問題である。本研究では、レーザ干渉計のみを用いて、この測定を行う方法を構築することを目的とする。また、その測定結果から、どのようにロボットの誤差原因を診断し、その補正を行えばよいか、方法論を構築する。

3. 研究の方法

(1) スカラ型ロボットを対象とした「オープンループレーザトラッカ測定法」の提案

「オープンループレーザトラッカ測定」と呼ぶ、ロボットの位置決め精度を測定するための新しい測定法を提案し、スカラ型ロボットを対象として、その試験を行った。この測定法を図2に示す。ロボットの手先に、レーザ干渉計を取り付ける。可動領域内の様々な位置にロボットの手

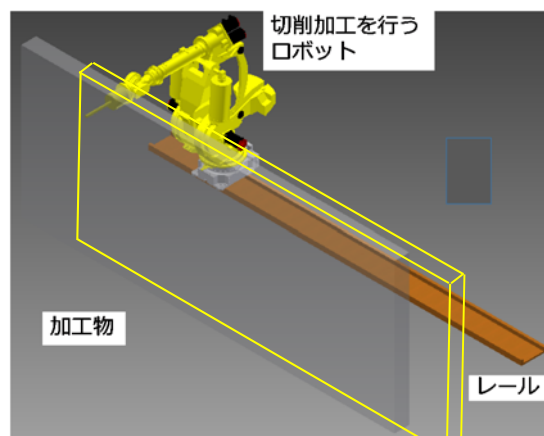


図1：ロボットを使った「ポータブルな」切削加工システムのイメージ図

先を位置決めしたとき、レーザ光が常に、床に設置された反射鏡に入射するように、ロボットの姿勢を制御する。それにより、ロボットの手先から反射鏡までの距離を、可動領域全体を網羅する多数の点で測定する。

(2) ロボットの新しい幾何学モデルの提案

本研究の最も重要な貢献は、ロボットの空間誤差を正確に予測するための、新しい幾何学モデルを提案したことである。また、(1)の測定法を用いて、そのモデルを同定する方法を示した。一般にロボットは、アームの自重による弾性変形、関節のバックラッシュなど、非線形要因の影響も大きい。ロボットの幾何学パラメータの同定に関する過去の研究は多いが、それらのほとんどすべては、リンク長の誤差、各関節の初期角度の誤差だけをモデル化の対象としている。非線形要因の影響を考慮に入れ、各関節の角度位置決め誤差を「誤差マップ」の形で表現し、それを基礎とした新しい幾何学モデルを提案した。角度位置決め誤差とは、指令角度に対する、実際の角度の差を意味する。また、(1)の方法によって、角度位置決め誤差の「誤差マップ」を同定する方法を示した。

(3) 6 軸ロボットの幾何学モデルとその同定法の提案

(1)(2)では、回転2軸による2次元位置決めに単純化された問題に対して提案法を適用し、その効果と、課題を調べた。第2段階として、この成果を、垂直多関節6軸ロボットによる3次元位置決めに拡張した。

6軸ロボットに対しては、レーザトラッカと呼ばれる測定器を使って、手先に付けた反射鏡の3次元位置を測定することで、各軸の角度位置決め誤差を同定する方法を提案した(図3)。6つの回転軸すべての角度位置決め誤差を組み込み、従来研究よりはるかに高い精度で空間誤差を推定することができるモデルを提案した。

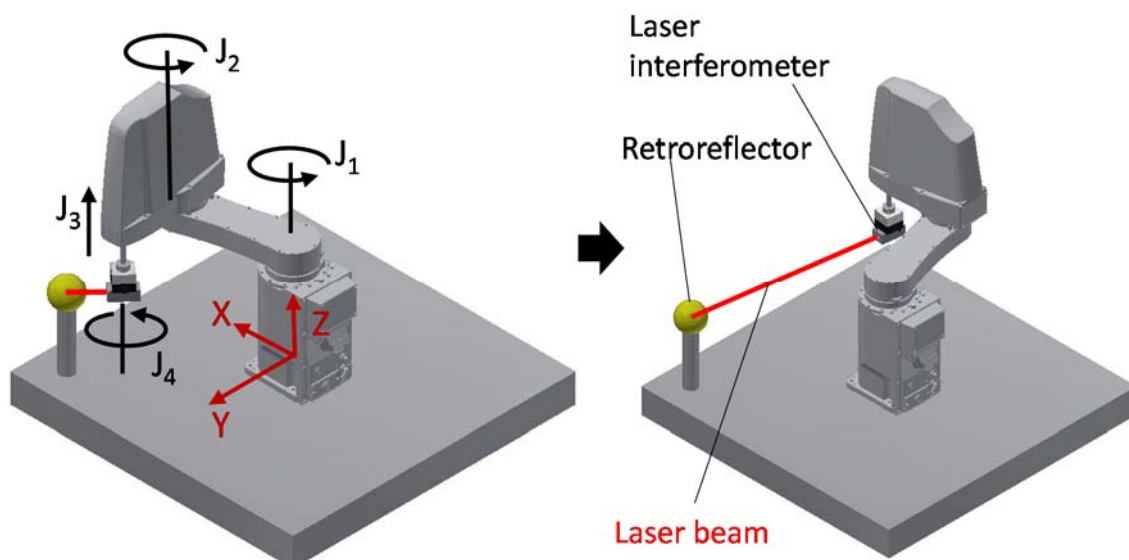


図2：提案した測定法。スカラ型ロボットの手先にレーザ干渉計を付け、テーブルに固定した反射鏡にレーザ光が入射するように、回転軸の角度を制御する。可動領域全体で、レーザ光の距離を測定する。

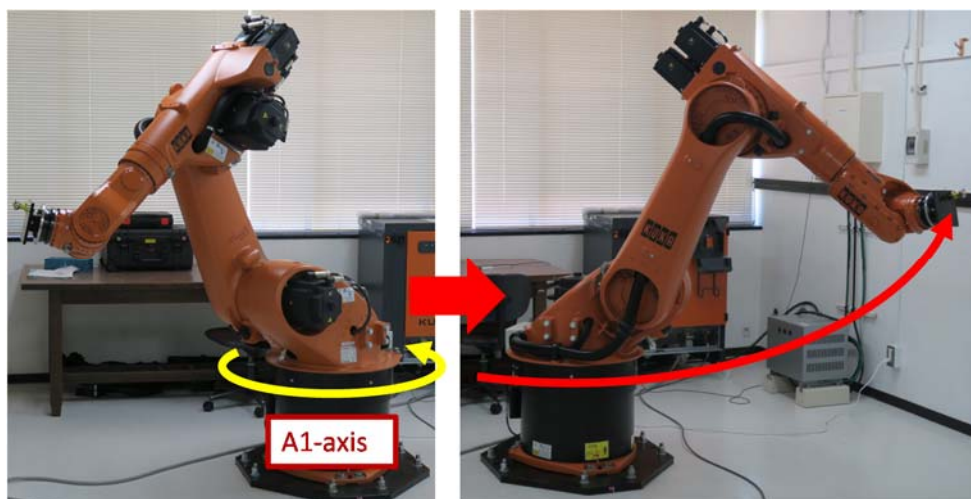


図3：提案した6軸ロボットの角度位置決め誤差の測定法(A1軸の例)。A1軸を一定角度毎に割り出し、手先に付けた反射鏡の3次元位置をレーザトラッカで測定する。

4. 研究成果

(1) スカラ型ロボットを対象とした「オープンループレーザトラッカ測定法」の提案

提案した測定法（図 1）の実証実験として、図 4 に示すスカラ型ロボット（三菱電機株式会社・RH-3FRH）の手先にレーザ干渉計（株式会社 東京精密・DISTAX PS-300A）を取り付け、提案法を実施した。

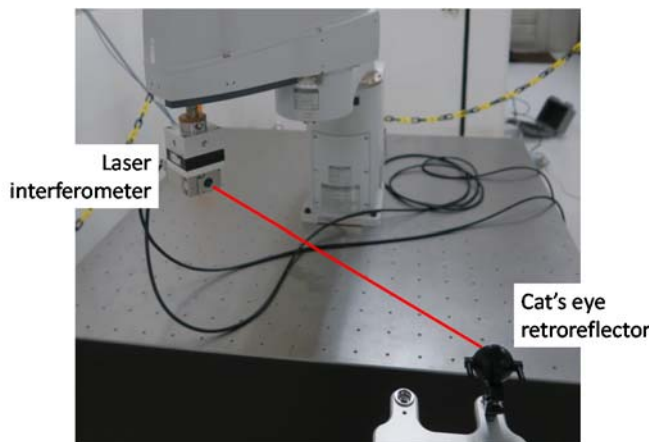


図 4：提案した測定法のセットアップ

(2) ロボットの新しい幾何学モデルの提案

図 5 は、提案した測定法によって同定した、スカラ型ロボットの J1 軸及び J2 軸（図 1 参照）の角度位置決め誤差を示す。角度位置決め誤差は、指令角度（横軸）と、回転方向の関数としてモデル化した。指令角度によって変わるのは、角度位置決め誤差は、回転軸の歯車のピッチ誤差などが原因で生じるためである。回転方向によって変わるのは、ロボットの回転軸はギアやベルトで駆動されるため、バックラッシュの影響が大きいためである。

図 6 は、提案モデルの構成（入出力関係）を示したものである。従来研究の幾何学モデルは、リンク長誤差、初期角度の誤差（「D-H パラメータ」と呼ばれることが多い）しか含んでいないのに対し、提案モデルは、図 5 の 1 点 1 点を、角度位置決め誤差の「誤差マップ」としてモデルに含む。本研究では、手先までのレーザ距離の測定から、モデルを逆に解き、2 軸の角度位置決め誤差を同定するアルゴリズムを構築した。

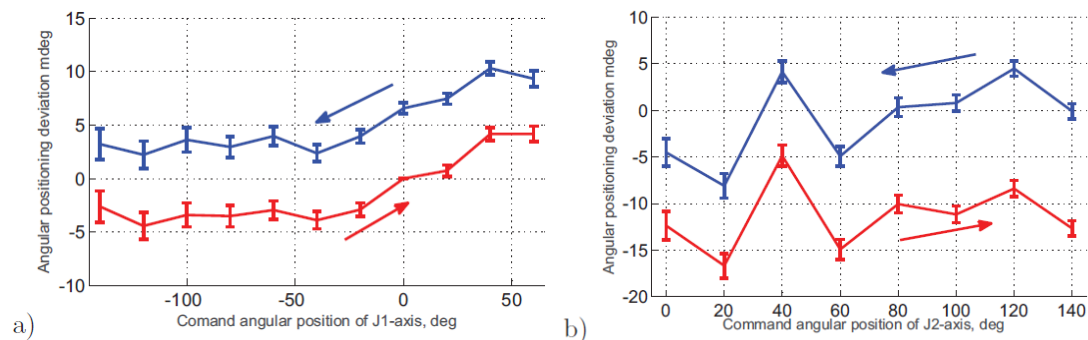


図 5：提案した測定法（図 4）により同定した a) J1 軸及び b) J2 軸の角度位置決め誤差

(3) 6 軸ロボットの幾何学モデルとその同定法の提案

図 6 と同様の構成を持ち、ただし、図 3 の 6 軸ロボットに拡張されたモデルを、図 3 に示した測定法を用いて同定した。6 軸全ての角度位置決め誤差を、図 5 と同様に同定した。一例として、図 3 の A1 軸の角度位置決め誤差の同定結果を図 7 に示す。

同定した幾何学モデルによる空間誤差の推定精度を、実験で検証した。図 3 のロボットを対象に、 2.0×0.4 m の範囲で、長方形経路に対する実際の手先の位置誤差を実測した例を、図 8 a) に示す。最大 0.3 mm 程度の位置誤差があった。提案したモデルによる予測軌跡が図 8 b) である。時計回り・反時計回りの違いも含めて、高い予想精度を示している。提案モデルは、この長方形経路とは全く異なる経路を使って同定されたにもかかわらず、ここまで高い予測精度を示す。この経路だけでなく、可動領域全体で同じ程度の予測精度を示すことを、実験で確かめた。

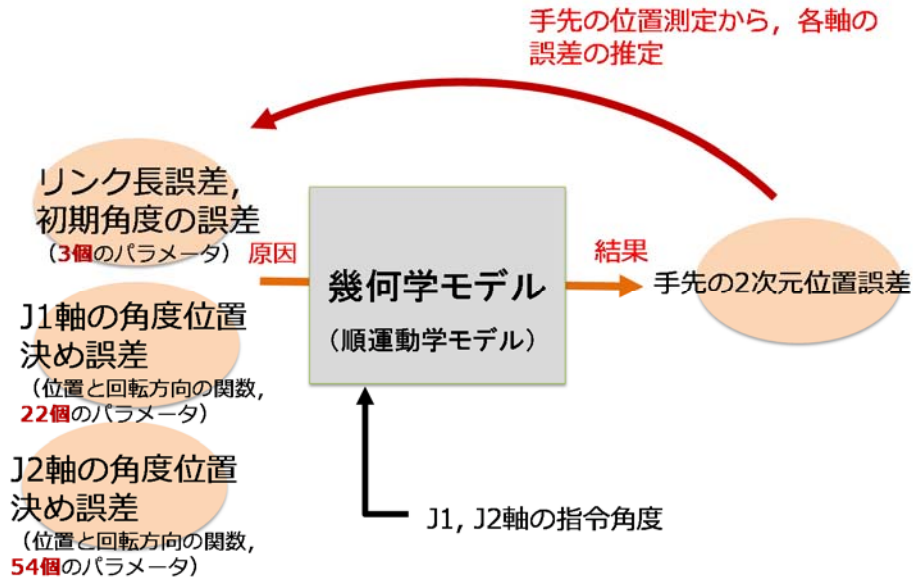


図 6 : 提案したスカラ型ロボットの幾何学モデル

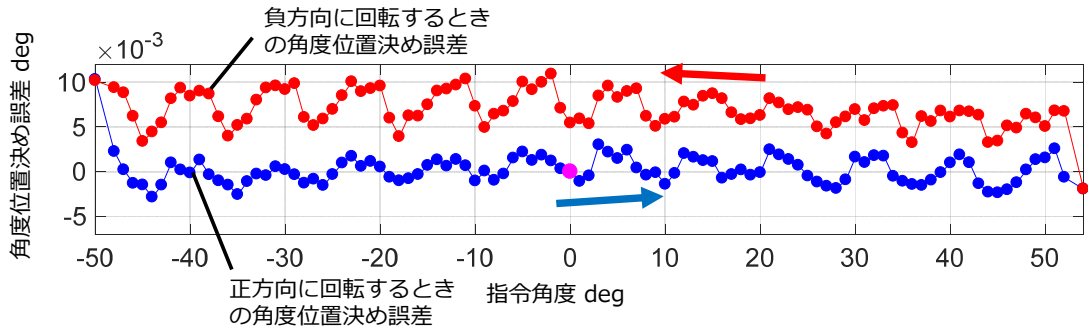
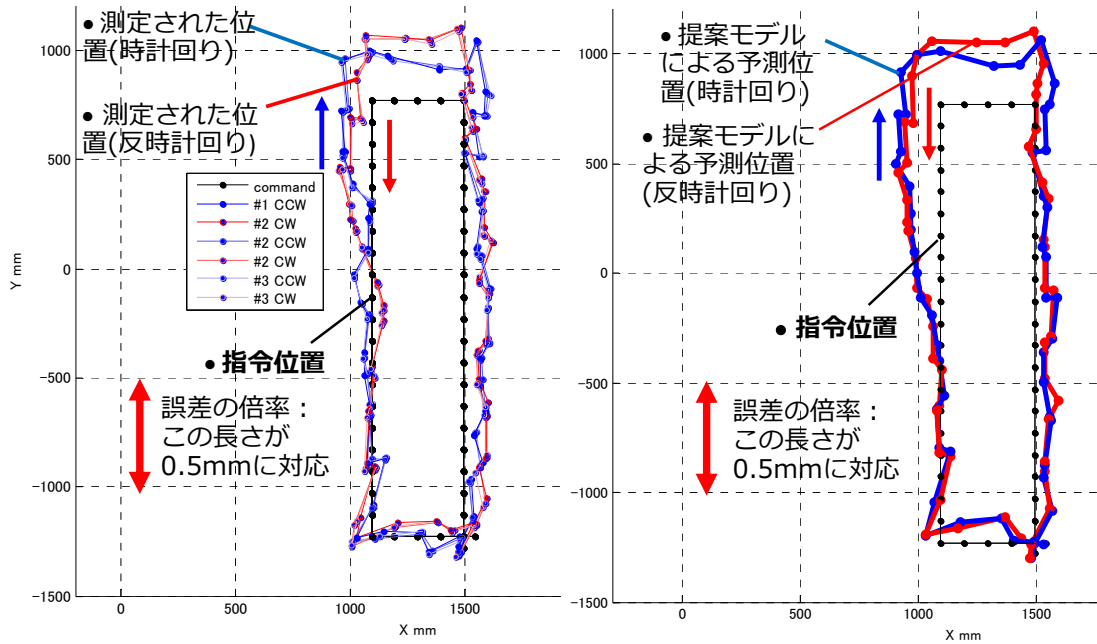


図 7 : 本研究で提案した手法で同定した, 6 軸ロボットの回転軸 (A1 軸の例) の角度位置決め誤差. 指令角度 (横軸) に対する実際の回転角度の誤差 (縦軸) を表す. 回転方向により異なる.



a) 測定した軌跡

b) 提案モデルでの予測軌跡

図 8 図 3 の 6 軸ロボットを長方形経路に沿って位置決めしたときの位置決め誤差の測定結果及び予測結果. 指令位置 (黒丸) からの誤差を拡大して表示している.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 富田 正俊, 茨木 創一
2. 発表標題 可動領域全体におけるSCARAロボットの2次元位置決め精度の測定
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 趙 楠, 茨木 創一
2. 発表標題 レーザートラッカを使用したスカラ型ロボットの回転軸角度位置決め偏差の同定と補正
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田 功貴, 茨木 創一
2. 発表標題 追尾型レーザー干渉計を用いた6軸ロボットの幾何学モデルの同定
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野 寛大, 茨木 創一
2. 発表標題 スカラ型ロボットの熱変形の同定
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 臼井 亮太, 茨木 創一
2. 発表標題 「オープンループ・レーザトラッキング測定」によるスカルロボットに対する2軸の関節の角度位置決め偏差の同定法
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nan Zhao, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Calibration of rotary axis angular positioning deviations on an industrial robot by using a laser tracker
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Tomita, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Measurement of 2D Positioning Accuracy of a SCARA-type Robot Over the Entire Workspace
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nan Zhao, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Calibration and compensation of rotary axis angular positioning deviations on a SCARA-type industrial robot using a laser tracker
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (LEMP20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Md Moktadir Alam, Soichi Ibaraki, Koki Fukuda, Sho Morita, Hiroshi Usuki
2. 発表標題 Identification of a kinematic model of a 6DOF industrial manipulator with angular positioning deviation 'error map' of rotary axes
3. 学会等名 ASME 2020 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masatoshi Tomita, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Measurement of 2D positioning "error map" of a SCARA-type robot over the entire workspace by using a laser interferometer and a PSD sensor
3. 学会等名 ASME 2020 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kandai Kawano, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Estimation of thermal influence on 2D positioning error of a SCARA-type robot over the entire workspace
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Fukuda, Soichi Ibaraki, Md Moktadir Alam, Sho Morita, Hiroshi Usuki, Naohiro Ohtsuki, Hirotaka Yoshioka
2. 発表標題 Identification of a novel kinematic model of a 6-DOF robot with bidirectional angular positioning deviation of rotary axes
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田正俊, 茨木創一
2. 発表標題 格子状のレーザ光路を用いたSCARAロボットの2次元位置決め精度の測定と, 回転軸の角度位置決め偏差の同定
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ロボットの運動精度測定方法及び位置補正方法	発明者 茨木創一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-199605	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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