

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01228

研究課題名（和文）産業用ロボットの新しいティーチングレスのアプリケーションを拓く空間精度の保証技術

研究課題名（英文）Ensuring volumetric accuracy of an industrial robot to extend its offline programming applications

研究代表者

茨木 創一（Ibaraki, Soichi）

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） 13,300,000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される。そのとき、ロボット作業の精度は、ロボットの空間精度が決めることになる。本研究では、ロボットの空間誤差を精緻に予測するための、新しい幾何学モデルを提案し、それに基づく誤差補正を実装することで、空間精度を大幅に向上できることを示した。ロボットに高い精度が求められる新しいアプリケーションとして、ロボットによる切削加工システムと、アーム型3次元座標測定機の2つに、提案法を適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

製造現場の人手不足が今後進み、ものづくりのなかで産業用ロボットの役割が増すのは、確実に思える。ロボットの用途を現状より飛躍的に広げるには、コンピュータ上でロボットをプログラムするオフラインプログラムが必須であるが、そのための課題のひとつは、ロボットは位置決め精度が悪いことである。本研究では、工作機械の空間誤差の補正を応用し、ロボットの位置決め誤差を可動領域全体で高精度に予測し、補正する方法を構築した。それによって、ロボットの新しい用途を開拓する研究を行った。すなわち、「ポータブルな工作機械」としてのロボット切削加工システム。アーム型3次元座標測定機の高精度化、である。

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 project proposed a new kinematic model of a robotic manipulator to precisely predict its volumetric accuracy. By implementing the numerical compensation based on it, experiments showed significant improvement of robot volumetric accuracy over the entire workspace. The proposed compensation was applied to new robot applications, requiring higher volumetric accuracy, namely the robotic machining and articulated arm coordinate measuring machines.

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 空間精度 誤差補正 ロボット切削 アーム型座標測定器 レーザトラッカ

1. 研究開始当初の背景

日本のロボットメーカーの世界での販売台数は急速に伸び、今後も年 10%程度の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。

ロボットの現在の主な用途は、物品の搬送、組み立て、溶接、塗装などだが、それらに共通するのは、ロボットの動作を「ティーチング」でプログラムすることである。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%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。ロボットを同様にプログラミングする試み（「オフラインティーチング」等と呼ばれる）は進められているが、現在もロボットの 9 割以上はティーチングされる。

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、それは人間によるティーチングが不正確だったためである。

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。

工作機械では、空間誤差の補正技術も成熟している。空間誤差の補正とは、任意の指令位置に対して、ロボットの空間誤差を予測するモデルを用いて、それをキャンセルするように指令位置を調整する方法である。ロボットの空間精度の補正法に関する研究は、これまでに世界中で報告されているが、その多くは、Denavit-Hartenberg (D-H) 誤差と呼ばれる誤差原因だけを考えている。D-H 誤差とは、回転軸が 1 回転するときの、回転中心軸の平均の位置と向きの誤差を表し、例えば図 1 のロボットに対しては、6 つの回転軸に対し、計 18 個の D-H 誤差が定義される。しかし、我々の論文サーベイによると、ほとんどの論文で、誤差補正のあとでも、ロボットの空間誤差は工作機械の数 10 倍から数 100 倍悪い。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、ロボットの空間誤差を精緻に予測するための、新しい幾何学モデルを提案し、それに基づく誤差補正を実装することである。また、提案モデルを実験で同定するための手法を提案する。誤差補正の効果は、モデルの予測精度が決める。本研究の本質的問いは、ロボットの空間精度にブレークスルーをもたらすためには、どのようなモデルが必要か、を明らかにすることである。

応用実証として、ロボットの空間精度が必要不可欠な、以下に示すアプリケーションに対し、提案法を適用し、大幅な精度の改善を目指す。①「ポータブルな工作機械」としてのロボット切削加工システム。② 6 軸ロボットの手先にプローブを装備した、アーム型 3 次元座標測定機。

3. 研究の方法

(1) 6 軸ロボットの幾何学モデルとその同定法の提案

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。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 1 は例として、A1 軸の角度位置決め誤差を測定するセットアップを示している。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。

(2) 提案したモデルの改善: 軸間の精度の干渉のモデル化

提案したモデルの予想精度をさらに改善するために、軸間の精度干渉をモデル化する方法を構築した。6 軸ロボットは、姿勢によって、リンクに作用する重力が、回転軸に与える静的なトルクが変化し、角度位置決め誤差や、D-H 誤差を変化させる可能性がある。この影響を測定し、モデルに含める方法を提案した。

(3) ロボット切削加工への応用

本研究の成果の応用実証として、ロボットを使った切削加工システムへ適用した。ロボットの本質的な長所は、ポータビリティ(可搬性)にある。すなわち、工作機械よりはるかに小さいロボットを使っても、加工が必要な箇所自ら移動し、切削加工が行える。ただし、最大の課題は加工精度が悪いことである。

本研究では、我々のモデルを用いた補正を行うことで、加工精度を向上することも目的とした。6 軸ロボットの手先に、回転主軸を装備し、切削加工システムを構築した。加工物の形状精度を測定することで、ロボット切削システムの精度を評価できるような、工作試験を提案し、実施した。

(4) アーム型座標測定機への応用

6 軸(7 軸)ロボットアーム構造を持ち、人間が操作をして手先のプローブを対象物に接触させ、対象物の 3 次元形状を測定するアーム型座標測定機は、ポータビリティに優れた、製造現場での測定装置として普及しつつある。課題は、3 次元測定機 (CMM) と比べて、測定精度が低いことである。本研究で提案したモデルと、その同定法を、アーム型座標測定機に合わせて拡張した。

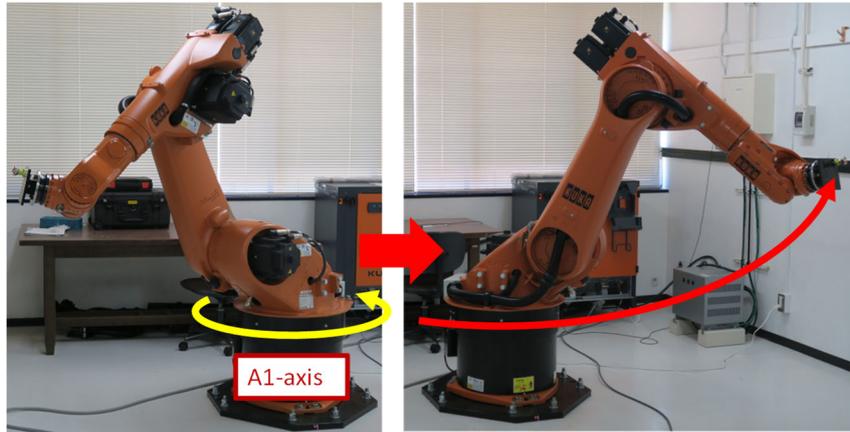


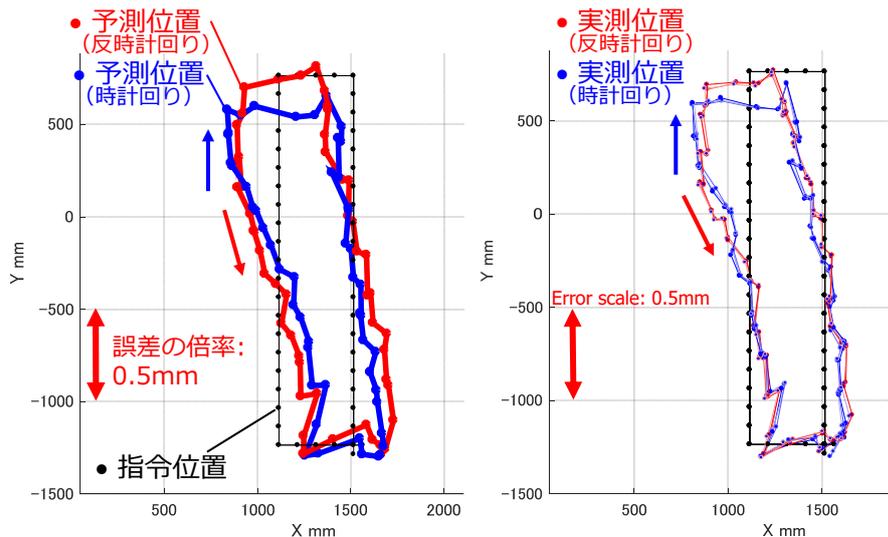
図 1 本研究で提案した 6 軸ロボットの角度位置決め誤差の測定法 (A1 軸の例)。

4. 研究成果

(1) 提案した幾何学モデルの予測精度

提案したモデルによる、ロボットの位置決め誤差の予測精度を、実験で調べた。図 2 は、本研究で提案したモデルによる予測軌跡 (図 2 (a)) と、レーザトラックを使って実測した軌跡 (図 2 (b)) を比較したものである。非常に高い精度で、位置決め誤差を予測できていることが分かる。また、このモデルを用いて、誤差を補正する実験も行った。その結果、従来モデルより明確に高い補正性能を示すことを確認した。

図 1 に示すロボット (KUKA 社 KR30HA, 可搬重量 30kg の中型ロボット) だけでなく、KUKA 社 KR500 (可搬重量 500kg の大型ロボット)、三菱電機株式会社 RV-13FL (可搬重量 13kg の小型ロボット)、安川電機株式会社 GP215 (可搬重量 215kg の大型ロボット) など、構造の異なる様々な機種に対して、提案モデルを用いた補正実験を行い、いずれも同様の、優れた補正性能を示すことを確認した。



a) 提案モデルによる予測軌跡

b) レーザトラックによる実測軌跡

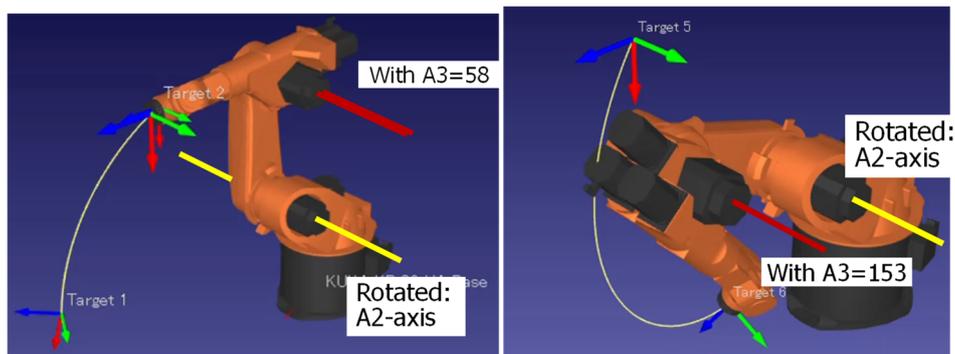
図 2 6 軸ロボットを長方形経路に沿って位置決めしたときの誤差の a) 予測結果及び b) 測定結果。指令位置 (黒丸) からの誤差を拡大して表示 (「誤差の倍率」の矢印の長さが、誤差 0.5 mm に対応)。

(2) 提案したモデルの改善: 軸間の精度の干渉のモデル化

提案したモデルの予想精度をさらに改善するために、手先の重量物や、ロボットのリンク自体に作用

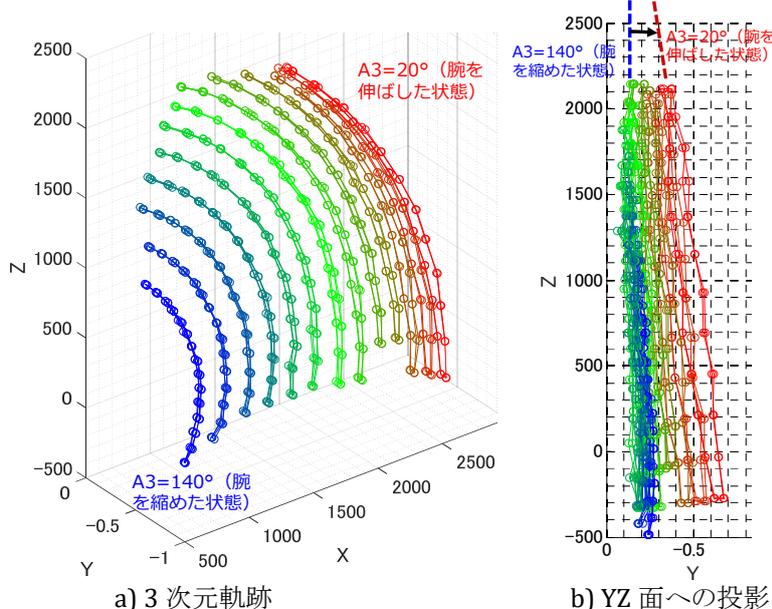
する重力が、位置決め誤差に及ぼす影響を含めた、新しい幾何学モデルを提案した。図 3 に、この影響を説明するための例を示す。A3 軸の角度によって(腕を伸ばした状態(図 3 (a))と縮めた状態(図 3 (b))), リンクの自重が、A2 軸に与える静的なトルクが異なる。その結果、A2 軸を回転させるとき、その回転精度が変化し得る可能性がある。

図 4 は、A3 角度を様々に変え、A2 軸を回転したときの、ロボット手先の軌跡をレーザトラックで測定したものである。腕を縮めたときに比べ、伸ばした状態では、手先の軌跡は Y 方向に変位し、かつ、X 軸周りの傾きが大きくなるのが観察できる。このような影響は従来のモデルでは表現できず、モデルの誤差の原因となる。本研究では、このような影響をモデルに含める方法を提案した、提案したモデルによって、位置決め誤差の予測精度をさらに改善できることを、実験により確認した。



a) 腕を伸ばした状態で A2 軸を回転した場合 b) 腕を縮めた状態で回転した場合

図 3 ロボットの姿勢(この例では A3 軸角度)が A2 軸の回転精度に及ぼす影響



a) 3次元軌跡

b) YZ面への投影

図 4 異なる A3 軸の角度で、A2 軸を回転したときの、ロボット手先の軌跡(レーザトラックで測定)

(3) ロボット切削加工への応用

可搬重量 500kg の大型ロボット(KUKA 社 KR500)の手先に、主軸ユニットを搭載し、図 5 (a)に示すロボット切削加工システムを構築した。さらに、図 5(b) に示す、工作試験用のワークを提案した。立方体ワークの 4 面に、計 5 つのポケットを、それぞれ異なるロボット姿勢で加工する。ワークの寸法は 135×135×135 mm で、ロボットのサイズと比べて大きくないが、それぞれのポケットを加工する際の各軸の角度は、かなり大きく異なる。ロボットの運動誤差が、ポケットの位置・姿勢・形状の精度に大きな影響を及ぼすように、工作試験用のワークをデザインした。

実際に加工試験を行い、加工されたワークの形状精度を計測した。その結果、提案したモデルによって、ワークの形状誤差を、高い精度で予測できることを確かめた。提案したモデルを使って誤差補正を行えば、ロボット切削の精度を向上できることを、今後実験で確かめていく。また、より実用的な切削アプリケーションへの応用を研究していく。

(4) アーム型座標測定機への応用

図 6 に、本研究で使用したアーム型座標測定機(株式会社ニコン MCAx20)を示す。アーム型座標測定機は、各関節にモータや、歯車がないので、モータ駆動の 6 軸ロボットとは誤差原因は異なる。し

かし、各関節のロータリエンコーダの角度測定誤差が、手先位置の測定誤差の原因となると考え、各関節の角度測定誤差を含んだ新しい幾何学モデルを提案し、それを実験で同定する手法を構築した。図 6(b) は、提案したモデル同定実験の様子を示す。手先のスタイラス球を球面座で拘束し、手動で手先の姿勢を変えたとき、各軸の関節角度を取得する。人の操作によって、手先のスタイラス球が微小に変位することがあるのを、R-Test 装置と呼ぶ測定器を使って計測して、人の操作の習熟度にかかわらず、高精度にモデル同定が行える方法を提案した。

図 7 は、測定精度の評価実験(図 6 (a))において、あらかじめ校正された穴間距離(「Short1」「Short2」「Long」)を、アーム型座標測定機を用いて測定したときの測定誤差を示したものである。従来モデル(D-H モデル)に対し、提案モデルを用いて、かつ、R-Test 装置を用いたモデル同定実験を行うことで、測定誤差は 50%以上低減した。今後は、研究成果を市販のアーム型座標測定機へ実装するための研究を継続する。

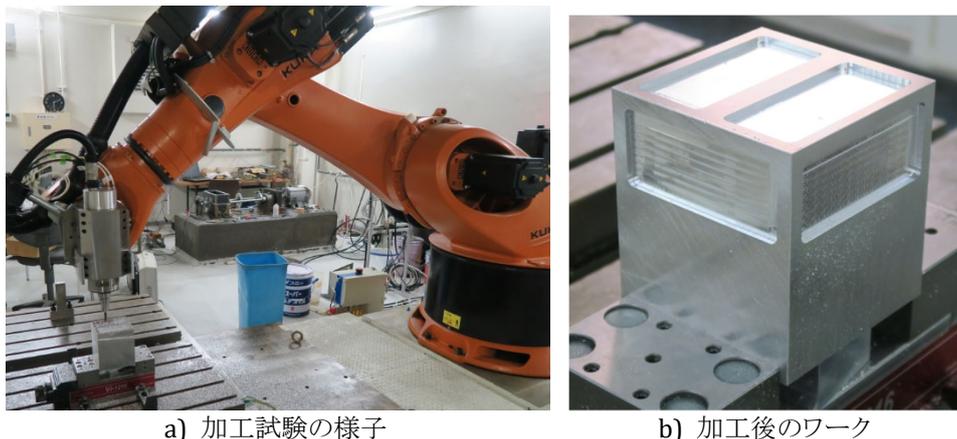


図 5 ロボット切削実験. 計 5 つのポケットを、それぞれ異なるロボット姿勢で加工する。



図 6 アーム型 3 次元測定機の測定精度評価実験とモデル同定実験の様子

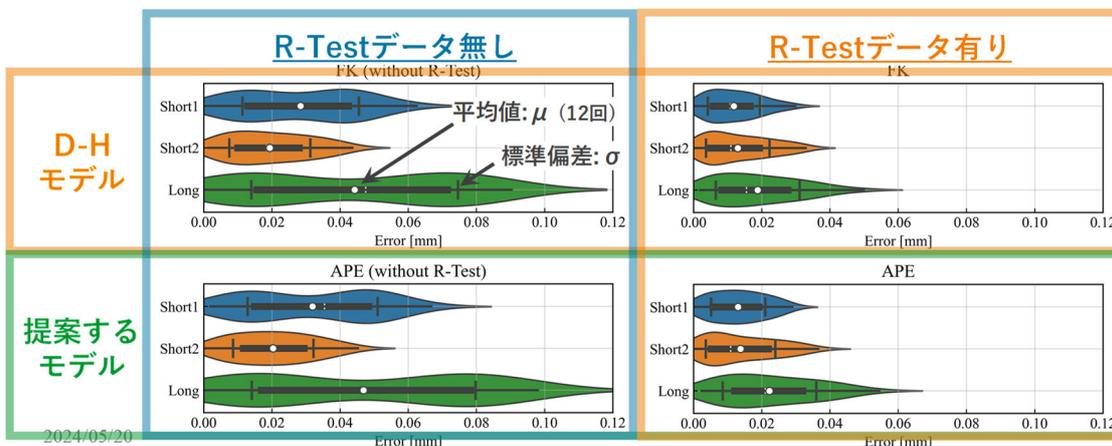


図 7 測定精度評価実験において、穴間距離をアーム型 3 次元測定機を用いて測定したときの、測定誤差の比較。従来モデル(D-H モデル)と提案モデル、R-Test 測定を行う場合と行わない場合で、アーム型 3 次元測定機の測定誤差を比較している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nan Zhao, Soichi Ibaraki	4. 巻 120
2. 論文標題 Novel kinematic model of a SCARA-type robot with bi-directional angular positioning deviation of rotary axes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 4901-4915
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00170-022-08943-5	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 Alam Md Moktadir, Ibaraki Soichi, Fukuda Koki, Morita Sho, Usuki Hiroshi, Otsuki Naohiro, Yoshioka Hirota	4. 巻 27
2. 論文標題 Inclusion of Bidirectional Angular Positioning Deviations in the Kinematic Model of a Six-DOF Articulated Robot for Static Volumetric Error Compensation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 4339-4349
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2022.3156056	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 S. Ibaraki, K. Fukuda, M.M. Alam, S. Morita, H. Usuki, N. Otsuki, H. Yoshioka	4. 巻 70(1)
2. 論文標題 Novel six-axis robot kinematic model with axis-to-axis crosstalk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 411-414
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2021.04.079	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 Md. Moktadir Alam, Soichi Ibaraki, Koki Fukuda	4. 巻 15(5)
2. 論文標題 Kinematic Modeling of Six-Axis Industrial Robot and its Parameter Identification: A Tutorial	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 599-610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0599	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 Soichi Ibaraki, Nikolas Alexander Theissen, Andreas Archenti, Md. Moktadir Alam	4. 巻 15(5)
2. 論文標題 Evaluation of Kinematic and Compliance Calibration of Serial Articulated Industrial Manipulators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 567-580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2021.p0567	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 該当する

1. 著者名 Soichi Ibaraki, Ryota Usui	4. 巻 74
2. 論文標題 A novel error mapping of bi-directional angular positioning deviation of rotary axes in a SCARA-type robot by "open-loop" tracking interferometer measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 60-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2021.11.002	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 Ibaraki S., Saito R.	4. 巻 72
2. 論文標題 Novel kinematic model of articulated arm coordinate measuring machine with angular position measurement errors of rotary axes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 449 ~ 452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2023.03.035	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 Ibaraki Soichi, Kawano Kandai	4. 巻 17
2. 論文標題 On Thermal Positioning Error of a Planar Robot Arm over Entire Workspace	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 504 ~ 511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2023.p0504	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 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Ryuichi Saito, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Identification of A Novel Kinematic Model of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines with Angular Positioning Deviation 'Error Map' of Rotary Axes
3. 学会等名 International Symposium on Flexible Automation 2022 (ISFA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kianoosh Rossoli, Kira Shuhei, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 A Novel Identification Method of Geometric Errors of A Six-Axis Robot with Sweeping Laser Measurement
3. 学会等名 International Symposium on Flexible Automation 2022 (ISFA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tianhao Cui, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Identification of novel six-axis robot kinematic model with angular positioning deviations by R-Test
3. 学会等名 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉良秀平, Kianoosh Rossoli, 茨木創一
2. 発表標題 レーザスキャン測定器を用いた6軸ロボットの幾何学モデルの同定
3. 学会等名 2022年度精密工学会 九州支部・中国四国支部 久留米地方講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田 功貴, 茨木 創一, 森田 翔, 白杵 年, 大槻 直洋, 吉岡 弘剛
2. 発表標題 重力が6軸ロボットの位置決め精度に及ぼす影響の測定とモデル化
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022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位置決め誤差がタッチプローブ測定に及ぼす影響の推定
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tianhao Cui, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Identification of Rotary Axis Angular Positioning Deviations of a Six-axis Robot by R-Test
3. 学会等名 JSME International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing (LEM&P2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryuichi Saito, Soichi Ibaraki
2. 発表標題 Identification of a new kinematic model of an articulated arm coordinate measuring machine using the R-test instrument
3. 学会等名 JSME International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing (LEM&P2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ravichandran Paveethran, Ibaraki Soichi
2. 発表標題 6軸ロボットの姿勢誤差の計測とモデル化
3. 学会等名 2023年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 正峯 敬介, 茨木 創一, 濱村 実, 高原 修
2. 発表標題 6軸ロボットを用いたタッチプローブ測定の精度の向上
3. 学会等名 2023年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 茨木 創一
2. 発表標題 産業用ロボットの位置決め精度の向上のための研究課題
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ロボットの制御装置及び制御方法	発明者 茨木創一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2022-177476	出願年 2021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
---------	---------