

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04101

研究課題名（和文）個別多軸工作機械の特性を生かした工程設計のための加工機能のデジタルツイン

研究課題名（英文）Digital twin of machining for process planning utilizing characteristic of individual multi-axis machine tool

研究代表者

田中 文基（Fumiki, Tanaka）

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：30207138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、個別多軸工作機械の特性を生かした工程設計のために、必要な加工事例取得に関し、仮想（コンピュータ）空間に多軸工作機械に対するデジタルツインを構築し、シミュレーションによる事例を取得する方法を提案した。

デジタルツインのために、誤差を含む多軸工作機械モデルの構造を提案、4軸工作機械モデルの構築を行った。デジタルツインの自律的フィードバックに関しては、実加工形状の測定に基づく工作機械モデルの修正を行う機能を実装した。さらに、シミュレーションによって得られる加工プロセス情報を用いて個々の多軸工作機械固有の工程設計を実現するためのデータ解析方法の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の優位性を保つため、生産システムには、多軸工作機械を用いた高効率・高機能・高精度加工が要求される。多軸工作機械の性能を十分に生かすためには、加工データを作成する工程設計が重要になる。工程設計では、実加工データを解析することで必要なルールを導出するが、多軸加工に対して有効ではない。つまり、多軸工作機械の構造が多様であり機械固有の運動誤差を含むため、他の機械の加工事例が利用できない。本研究は、多軸工作機械の誤差を含む加工運動機能をサイバー空間で実現するデジタルツインを提案、実加工事例とデジタルツインによる仮想加工事例により上述の問題を解決、個々の多軸工作機械の特性を生かすことができる。

研究成果の概要（英文）：In order to maximize the performance of multi-axis machine tools, micro process planning for creating machining data is important. As promising approaches to micro process planning, a micro process planning system was proposed that reuses actual machining cases and analyzes case data to derive the necessary rules. However, it is not always effective for multi-axis machining, because enough case data are not collected for micro process planning of a specific multi-axis machine tool.

In this study, a digital twin of multi-axis machine tool in cyberspace is proposed to collect real and virtual machining case data for micro process planning. A realization of the twinning function of the digital twin by autonomous feedback of actual machining shape measurement is also proposed. The digital twin has the same machining capabilities as a real machine tool with kinematic errors to generate the required machining case data using the proposed method.

研究分野：生産システム

キーワード：多軸工作機械 誤差モデル デジタルツイン 工作機械モデル 加工シミュレーション 工程設計

1. 研究開始当初の背景

工業における日本の優位性を保つため、生産システムには、さらなる高効率・高機能・高精度加工の実現が要求される。高機能のためには多軸工作機械を用いる必要があるが、多軸工作機械の性能を十分に生かすためには、加工データを作成する工程設計が重要になる。

工程設計に関する研究は様々行われてきたが、有力なアプローチとして、実加工データを解析することで必要なルールを導出し、利用した工程設計を研究者らが提案している。しかし多軸加工に対して必ずしも有効ではない。これは、図 1 に示すように、多軸加工の場合、機械構造が多様であり機械固有の運動誤差を含むため、実加工事例が少なく、他の機械の加工事例を集めても、工程設計結果が個々の機械に有効でないことが理由に挙げられる。

その問題を解決し、個々の多軸工作機械の特性を生かすためには、多軸工作機械の誤差を含む加工運動機能をサイバー空間で実現するデジタルツインの開発方法を提案し、実加工事例と実装したデジタルツインによる仮想加工事例を用いることが必要であると考えられる。

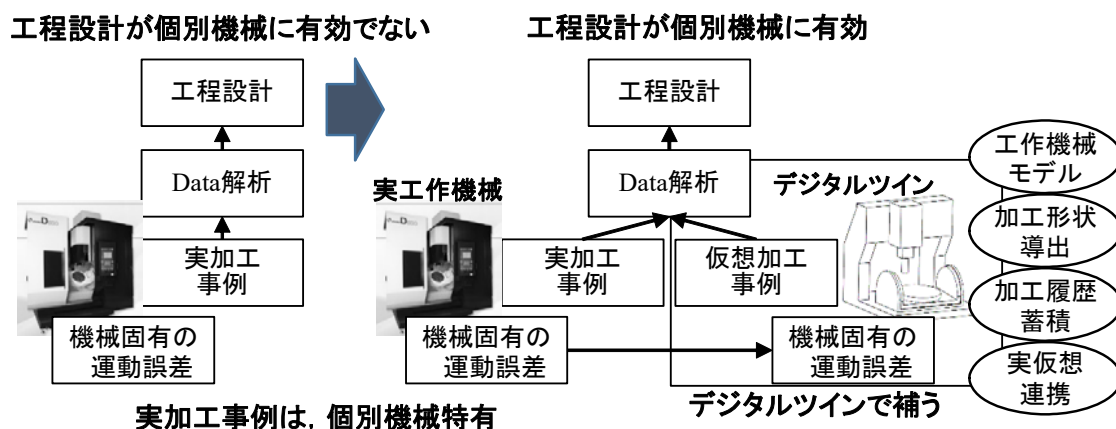


図 1 研究概要

2. 研究の目的

仮想加工事例を得るための個々の工作機械の加工運動機能をサイバー空間で実現するデジタルツインの開発方法を提案するためには、以下の課題を解決する必要がある。

- ① 様々なデジタルツインを実装するための統一的方法が提案されていない。
- ② 誤差を含む仮想加工事例を導出することは、市販のソフトでは速度、精度に問題がある。
- ③ 多軸工作機械に対する工程設計のために履歴データ蓄積を行う方法が提案されていない。
- ④ 実工作機械とデジタルツインとの間に生じる相違を補正する方法が提案されていない。

以上の問題点を解決するために、次の項目を本研究の目的とする。

- ① 様々なデジタルツインの実装するために、工作機械モデルを提案するとともに、モデルに基づくデジタルツイン構築の方法を明らかにする。
- ② 工作機械モデルを用いた、高速・高精度な仮想加工事例導出方法を明らかにする。
- ③ データ解析を可能とする加工プロセス・加工履歴を構築する方法を明らかにする。
- ④ 加工形状の測定による誤差推定方法に基づき、実工作機械とデジタルツインとの相違を補正する方法を提案する。

3. 研究の方法

上記の目的及びこれまでの研究成果をもとに、本研究は、図 2 に示すように工程設計に必要な加工作業情報取得を可能とするために、サイバー空間に多軸工作機械のデジタルツインを実現する方法を提案する。このために、研究期間内には以下のことを明らかにする。

実施事項Ⅰ：多軸工作機械モデルと加工形状シミュレーションによるデジタルツインの構築

① 実空間とサイバー空間とを連携するために、多軸工作機械機構モデルを拡張した誤差を含む多軸工作機械モデルの構造を明らかにする。工作機械の機構モデルに基づき、機構に対応した誤差要素の記述方法を提案する。さらに、提案したモデルに基づき、購入備品である多軸工作機械を例題としてモデルデータを作成する。

② 工作機械モデルに基づき加工事例を高速高精度に導出する機能を実装する。工具形状と加工運動の数学的な解析方法に基づき、①で提案した工作機械モデルを用い、加工形状を導出するアルゴリズムを実装する。また精度や速度に関して検討を行う

実施事項Ⅱ：加工履歴の蓄積と実加工形状計測の自律的フィードバックによるデジタルツイン

の実行機能の実現。

③実加工形状を測定して得た測定情報と加工プロセス情報とを関連させることが可能な加工プロセス・加工形状関連型履歴データベースの構造を明らかにする。加工プロセス情報を生成するためのNCデータ解析方法を提案する。

④実加工形状の測定に基づく工作機械モデルの修正を行う機能を提案し、デジタルツインの自律的フォードバックを行う。購入備品である測定機を用いて測定した形状から、デジタルツインに含まれる誤差パラメータを導出する方法を、提案する。

実施事項Ⅲ：多軸工作機械のデジタルツインによる工程設計への応用。

⑤蓄積された加工プロセス情報と、シミュレーションによって得られる加工プロセス情報を用いて個々の多軸工作機械固有の工程設計を実現するためのデータ解析方法を、加工データベースを用いた工程設計アルゴリズム構築方法をもとに提案し、その有効性を明らかにする。

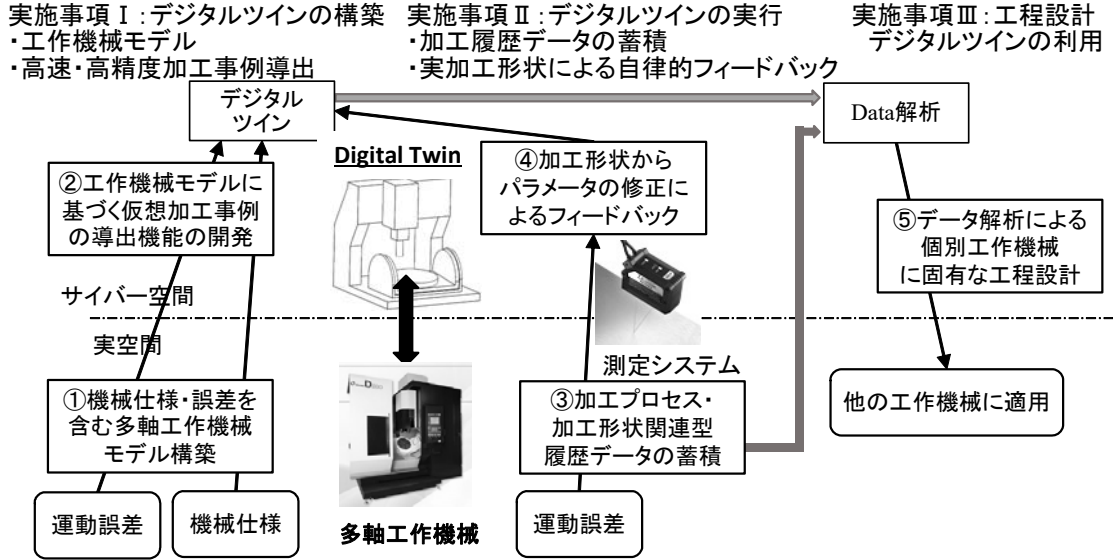


図 2 実施事項

4. 研究成果

(1) 多軸工作機械モデルと加工形状シミュレーションによるデジタルツインの構築

本研究で提案する工作機械のデジタルツインは、多軸工作機械の組立誤差を考慮した加工機能を表現できる多軸工作機械モデルに基づいて構築される。加工機能モデルは、形状創成理論に基づいており、本研究では、図 3 に示す 4 軸工作機械の形状創成関数[Inasaki1997]について述べる。誤差に関しては、隣り合う 2 つの軸間で誤差は、 X, Y, Z 軸方向への並進誤差 $\delta x, \delta y, \delta z$ と X, Y, Z 軸周りの回転誤差 α, β, γ があらわれるが、形状に現れる有効な組立誤差は、9 個となり形状創成関数を構築すると式 (1), (2) のようになる。なお、誤差についての添え字は、2 つの軸を表す。

$$\mathbf{r}'_w = \mathbf{A}^4 \mathbf{A}^2 \mathbf{A}^1 \mathbf{A}^3 \mathbf{r}'_T + [\mathbf{a}_1 \quad \mathbf{a}_2 \quad \mathbf{a}_3 \quad \mathbf{a}_4] \mathbf{r}'_T \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma_{AY} \cos \theta + \gamma_{YX} \cos \theta + \beta_{XZ} \sin \theta + \beta_{AY} \sin \theta + \beta_{ZS} \sin \theta \\ \gamma_{AY} \sin \theta + \gamma_{YX} \sin \theta - \beta_{XZ} \cos \theta - \beta_{AY} \cos \theta - \beta_{ZS} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} -\gamma_{AY} - \gamma_{YX} \\ -\alpha_{YX} \sin \theta - \alpha_{ZS} \sin \theta \\ \alpha_{YX} \cos \theta + \alpha_{ZS} \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_3 = \begin{bmatrix} \beta_{AY} + \beta_{XZ} + \beta_{ZS} \\ -\alpha_{YX} \cos \theta - \alpha_{ZS} \cos \theta \\ -\alpha_{YX} \sin \theta - \alpha_{ZS} \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_4 = \begin{bmatrix} -y\gamma_{AY} + z\beta_{AY} + z\beta_{XZ} \\ \delta y_{AY} \cos \theta - \delta z_{AY} \sin \theta + x(\gamma_{AY} \cos \theta + \gamma_{YX} \cos \theta + \beta_{AY} \sin \theta) - z\alpha_{YX} \cos \theta \\ \delta y_{AY} \sin \theta + \delta z_{AY} \cos \theta + x(\gamma_{AY} \sin \theta + \gamma_{YX} \sin \theta - \beta_{AY} \cos \theta) - z\alpha_{YX} \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

ただし、ここでは切削運動のための工具回転は省略されている。 A^1, A^2, A^3 は並進、 A^4 は回転運動行列、 x, y, z は各直線案内の移動量、 θ は各回転案内の回転量を表す。

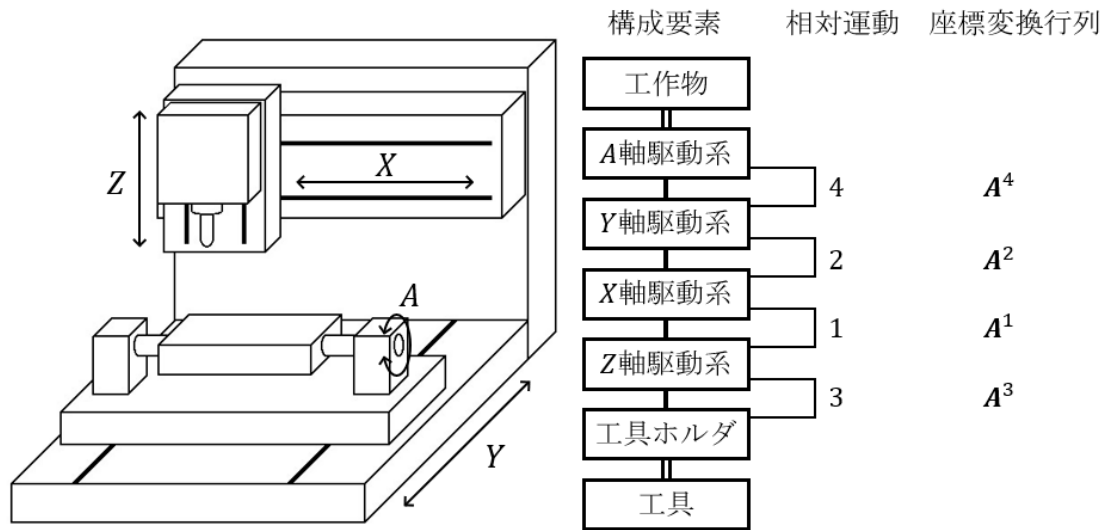


図 3 本研究で使用した 4 軸工作機械の構成

(2) 実加工形状の測定に基づくデジタルツインの自律的フィードバック

実工作機械は、経年変化などによって、最初に想定した組立誤差が変化していく。したがって、実工作機械は、デジタルツイン内のデジタルモデルとは異なった振る舞いをするようになる。そこで本研究では、実工作機械の組立誤差を実加工と計測を通じて同期する方法を提案する。具体的な手順は、図 4 に示すようになる。まず、実加工によって得られた加工物に組立誤差が特徴として現れる加工指令を設定する (A1)。次に決定した加工指令を用いて組立誤差を含む実工作機械による実加工を行う (A2)。次に実加工で得られた加工物を 3D スキャナで計測する (A3)。次に計測結果である加工形状点群から特徴を導出することで、実工作機械の組立誤差を求める (A4)。この求めた組立誤差を工作機械デジタルツインに反映させることによって同期させる。

提案方法を、4 軸工作機械 (Roland-DG 社の MDX-50) に適用した。本研究で用いた MDX-50 に与えた並進誤差は $\delta y_{AY}, \delta z_{AZ}$ である。これらは、A 軸を取り付ける際に Y 軸、Z 軸方向にずれてしまうことで生じる組立誤差である。本研究では MDX-50 の内部設定にて軸をずらして実加工を行った。検証に用いた誤差が限定された理由は、物理的に設定できる誤差が限定されているためである。これらの誤差に関して、加工形状の計測から導出可能であることが示され、デジタルツインの自律的フィードバックが可能であることが示された。

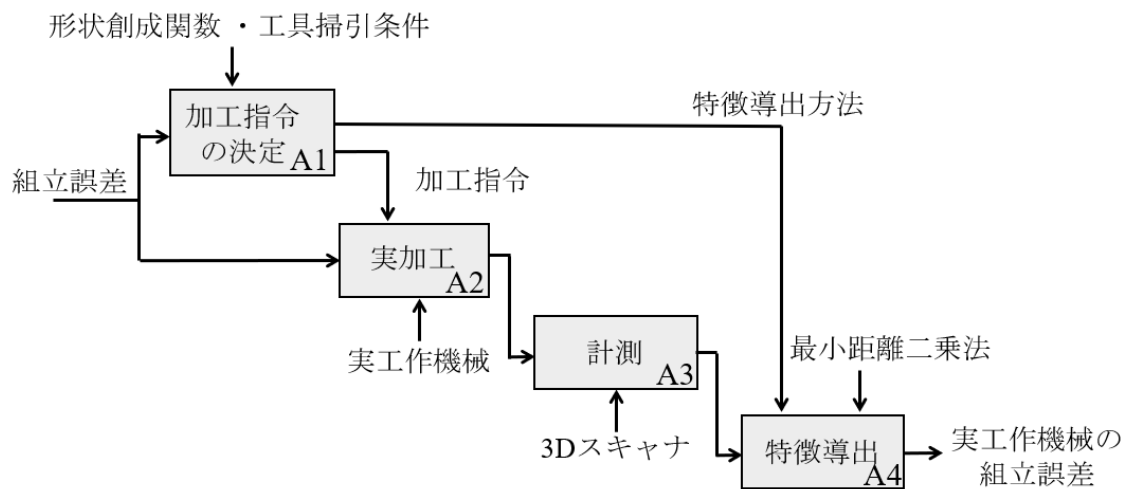


図 4 同期方法の手順

(3) 加工データベースおよびデータ解析に基づく作業設計システム

加工データベースからの作業設計アルゴリズム作成に関しては、図 5 に示すように、蓄積され

た加工情報間の関係を解析することで、加工対象形状に対する使用工具種類のパターンなどを導出しルール化する。本研究では、データ解析手法である決定木および回帰木に基づき、加工データベースからの作業設計アルゴリズムを作成する手法を採用した[Igari 2013a]。図4に示す例では、加工データベース中に、加工形状特徴として閉じたポケットおよび止まり穴を対象とした8つの加工データが含まれている。各データにおいて、素材硬度は190, 230, 350, 400である。また、閉じたポケットに対する加工データでは、使用される工具の種類はエンドミル1種類であり、工具材質は高速度鋼および超硬合金の2種類がある。止まり穴に対する加工データにおいては、使用される工具の種類はツイストドリル1種類であり、工具材質は高速度鋼および超硬合金の2種類がある。図中に示す加工データベースに対するデータ解析結果の例は、加工形状特徴および素材硬度に対する工具種類、工具材質の関係を表す。解析結果の例では、加工形状特徴が閉じたポケットで、素材硬度が230以下の場合、工具種類はエンドミル、工具材質は高速度鋼が用いられ、素材硬度が230を上回る場合、工具種類はエンドミル、工具材質は超硬合金が用いられることが表されている。加工形状特徴が止まり穴で、素材硬度が230以下の場合、工具種類はツイストドリル、工具材質は高速度鋼が用いられ、素材硬度が230を上回る場合、工具種類はツイストドリル、工具材質は超硬合金が用いられることが表されている。図中に示す作業設計アルゴリズムは、以上の関係を記述したIF-THENルールであり、加工形状特徴および素材硬度を基に工具種類および工具材質を決定する。加工作業環境特有の加工技術を反映した加工データがデータベースに蓄積されている場合、データ解析によって作成される作業設計アルゴリズムも加工作業環境特有の加工技術を反映するものとなると考えられる。

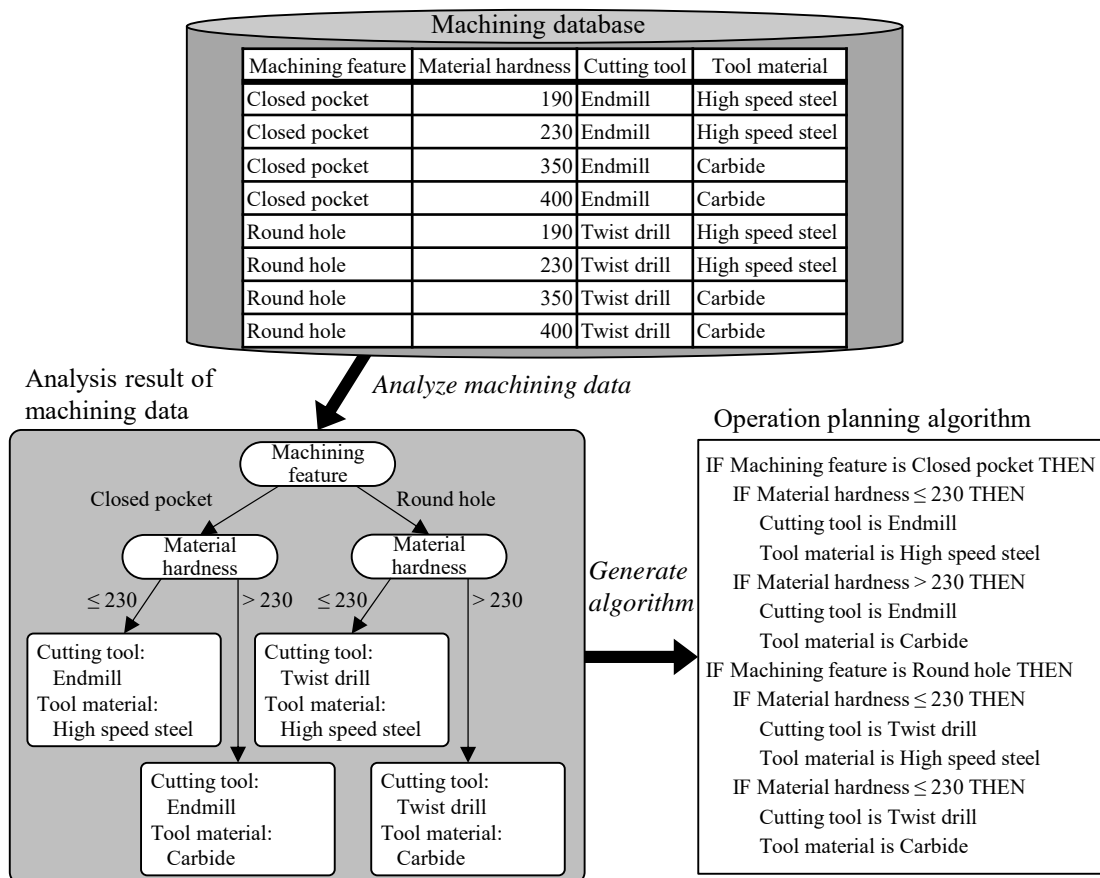


図5 データ解析による加工データベースからの作業設計アルゴリズム作成

<引用文献>

[Igari 2013a] 猪狩真二, 田中文基, 小野里雅彦, 加工データベース更新およびデータベース指向設計アルゴリズム作成に基づく実工作機械に対する作業設計システムの適応化, システム制御情報学会論文誌, 26 (3), 87-94, 2013
 [Inasaki 1997] 稲崎一郎, 岸浪建史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基: 工作機械の形状創成理論—その基礎と応用—, 養賢堂, 1997

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Fumiki Tanaka
2. 発表標題 Digital twinning of multi-axis machine tool for micro process planning
3. 学会等名 The 10th International conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiki Tanaka
2. 発表標題 A DIGITAL TWIN OF MULTI-AXIS MACHINE TOOL FOR MICRO PROCESS PLANNING
3. 学会等名 ASME International Symposium on Flexible Automation 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中文基
2. 発表標題 個別多軸工作機械における加工機能のデジタルツイン
3. 学会等名 日本機械学会 生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日刊工業新聞 2/18「工作機械産業」特集 「製造におけるデジタルツインの国際標準の動向」

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