

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03811

研究課題名（和文）補間セグメント間の運動誤差によるマシニングセンタの工具経路の誤差推定

研究課題名（英文）Trajectory error estimation for machining center cutter path due to motion error between interpolation segments

研究代表者

丘 華 (Qiu, Hua)

九州産業大学・理工学部・教授

研究者番号：40227335

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、マシニングセンタ（MC）の使用者の立場から、セグメントのNC直線加減速処理と駆動軸位置サーボ制御に起因するMCの直線または円弧補間工具経路運動誤差の実用的な推定方法を提案した。この方法に必要なパラメータは少なく、その値も簡単に同定可能である。実機検証実験結果から、提案シミュレーション方法の妥当性が確認された。その結果、切削実験をせずにNCプログラムから工具経路の運動誤差を精度よく推定することが可能となる。また、シミュレーション結果に基づき、運動誤差をそのまま逆補正する形で工具経路を簡単に補正することにより、送り速度を落とさず実際の工具経路運動精度を有効に改善する可能性も実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した工具経路運動軌跡の推定方法はアルゴリズムが明快で理解しやすい。その利用に当たっては、NCシステムの内部処理に関する専門的知識が必要なく、プログラミング作業も簡単にできる。したがって、単品・少量生産が多い金型部品の加工業者のようなMCの使用者にとっては、複雑な輪郭形状を加工する際に、要求する加工精度を達成できる最大効率加工パラメータの選定などの面に提案方法の利用が可能である。また、シミュレーション結果に基づく工具経路の逆補正方法を生産現場で利用すれば、送り速度を落とさずに輪郭加工精度の改善が期待できる。

研究成果の概要（英文）：From the machining center (MC) user's point of view, this research proposes a practical approach to precisely simulate the trajectory motion error of a cutter path, consisting of linear or circular arc segments, produced by the NC acceleration/deceleration processing and position servo control of the used MC. In this approach, only two parameters are required and their values can be easily identified. The effectiveness of the approach has been demonstrated from the results of the verification experiments on an actual MC. As a result, it is possible to accurately estimate the motion error of the tool path from the parameters of the NC program without implementing an actual cutting experiment. Moreover, a reverse compensation to improve the cutter path motion accuracy is presented, in which only simple modification work to the NC program is necessary based on the cutter path simulation result. The feasibility of the method is also proved by the confirming experiments.

研究分野：機械工学

キーワード：機械エンジニアリング 工作機械加工精度 NC加減速制御 駆動軸位置サーボ制御 運動誤差解析モデル 工具経路運動軌跡のシミュレーション方法 運動誤差の逆補正 実験検証

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

マシニングセンタ (以下、MC と略す) を使用してワークの輪郭を精密に加工する際に、直線補間または円弧補間を利用して工具経路を生成することがよくある。この場合、実際の工具経路に補間セグメントの NC 加減速運動処理と駆動軸の位置サーボ制御により運動誤差が発生し、加工したワークの輪郭には形状誤差が生じる。一般的に補間セグメントが短く指令する送り速度が大きいほど工具経路の運動誤差は大きくなる。そのため、如何に送り速度を下げずに工具経路の運動誤差を抑制するかは加工効率向上の立場から重要な課題である。

工具経路の運動精度およびその改善策に関する研究は、有効な NC 加減速運動の制御方式や経路補間アルゴリズムの開発を目的とするものが多い。それらの研究では、MC 駆動系の動力学的モデルを含んだ NC システムの詳細を検討する必要がある。そのため、実験システムを構築したり、MC メーカーとの協力により NC システムの詳細データを入手したりして研究を遂行する必要がある。一方、MC の使用者の立場から、複雑な輪郭形状の加工において、加工効率をできるだけ下げずに要求する加工精度を達成できる切削条件をどのように決めるかは重要な問題である。例えば、試切削せずに NC 加減速運動とサーボ制御系の影響を把握し、切削パラメータの妥当性について事前に検証することができれば、生産性の向上につながる。このような問題を解決するには、NC システムの内部処理に関する高度な知識とともに、使用する MC の NC システム内部制御方式の詳細と関連パラメータ値の情報が必要である。しかし、通常では MC の使用者にとってこのような情報は提供されていない。

2. 研究の目的

本課題では、MC の使用者の立場から、実機 MC 上に簡単な実験を通して必要な MC の NC 加減速処理と位置サーボ制御のパラメータを同定する方法と、多数の短い補間セグメントからなる工具経路を対象に、セグメントの NC 加減速運動と位置サーボ制御に起因する工具経路の詳細をシミュレーションしてその軌跡誤差 (運動誤差) を効率的に推定する方法の確立を目的とする。また、近年に MC の NC システムに多く採用されている NC 加工モードや AI 先行制御・AI 輪郭制御などの技術と工具経路運動誤差抑制との関連について、実験と解析の両面から検討し、それらの技術の現場での効率的な活用に関連する有益な参考を提供する。

3. 研究の方法

上記の目的およびこれまでの研究成果をもとに、本研究は、図 1 に示すプロセスを計画し研究を遂行する。このために、研究期間には以下のことを明らかにする。

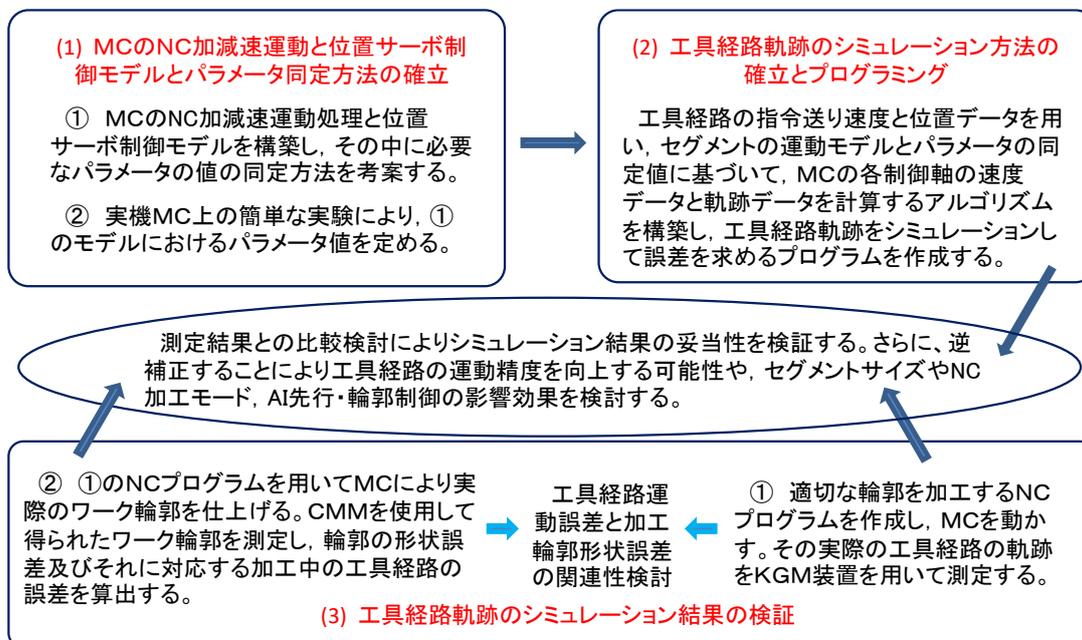


図 1 研究の方法と実施事項

実施項目 1 : MC の NC 加減速運動と位置サーボ制御モデルの構築とモデルにおける必要なパラメータ値の同定

対象 MC に採用している NC 加減速方式に基づき、予備実験の結果から各駆動軸の位置サーボ制御系を互いに独立な一次遅れ系として、補間セグメント加減速運動のモデルを構築し、モデルに必要なパラメータを定める。つぎに、高度な利用技術と高価な測定装置を必要せずに、生産現場にも簡便に実施できるパラメータの値を同定する方法を確立する。さらに、同定実験を実施

し、その効果を調べる。

実施項目 2：工具経路運動軌跡の汎用的なシミュレーション方法の確立とプログラミング

工具経路の NC プログラムに指令する構成セグメントの位置パラメータと送り速度値を用いて関連する MC の各送り軸制御運動の公称パラメータを生成し、実施事項 1 に構築した運動モデルに基づいて順番にセグメントごとの運動をシミュレーションして各制御軸の速度データと軌跡データを計算し、工具経路の運動誤差を求める。そのための汎用アルゴリズムを構築し、プログラムを作成する。

実施項目 3：工具経路運動軌跡のシミュレーション結果の検証

CAM ソフトウェアを利用して適切な輪郭を加工する NC プログラムを作成して、実機 MC を動かす。KGM（交差格子）測定装置を用いて MC の経路誤差を測定し、得られる経路誤差をシミュレーション経路誤差と比較することにより、シミュレーション結果を検証する。また、MC を使用して実際のワーク輪郭も加工し、CMM（三次元測定機）を用いてその形状を測定する。得られた輪郭形状データおよび工具経路軌跡のシミュレーションと KGM 測定の結果との比較により、シミュレーション結果のダブル確認を取る。同時に、工具経路運動誤差と加工輪郭形状誤差との関連性について検討を加える。さらに、運動誤差を逆補正することにより工具経路の運動精度を向上する可能性、並びに輪郭加工精度との関連についてセグメントのサイズや NC 加工モード、AI 先行制御・AI 輪郭制御などの影響を検討する。

4. 研究成果

4-1 MC の NC 加減速運動と位置サーボ制御モデルの構築とモデルにおける必要なパラメータ値の同定

対象 MC に採用された NC 直線加減速方式について、NC プログラムに指令した位置パラメータと送り速度値を用いて工具経路を構成する各直線または円弧セグメントに対応する MC の各駆動軸に配分する速度コマンド値 $f_b(t)$ と公称運動指令時間を算出し、式(1)（松原, 2008）を利用して各駆動軸位置制御サーボ系への指令値 $f_a(t)$ を求める。

$$f_a(t) = \frac{1}{t_A} \int_{t-t_A}^t f_b(\tau) d\tau \quad (1)$$

また、これまでに公称運動時間が直線加減速時定数 t_A より短い円弧セグメントの NC 直線加減速処理の詳細は不明であるが、それに対応する処理法も提案した。

次に各駆動軸の位置サーボ制御を互いに独立な一次遅れ系とし、 $f_a(t)$ を $in(t)$ として式(2)から各駆動軸の速度出力 $ou(t)$ を算出する。それを時間 t に積分すると駆動軸の変位出力が得られる。

$$ou(t) = \mathcal{L}^{-1} \{Ou(s)\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{Ts+1} \times In(s) \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{Ts+1} \times \mathcal{L}[in(t)] \right\} \quad (2)$$

以上に構築したモデルに必要なパラメータは t_A と位置制御サーボ系の時定数 T の二つである。運動経路推定軌跡の妥当性を確認する検証実験の結果から、 t_A と T の値は対象 MC の NC システムにおける設定値をそのまま利用可能であることがわかった。ただし、送り速度 F と半径 R を指令する MC 円運動の定常半径減少量 Δr を表す式(3)に基づいて、実際に仕上げた円輪郭の半径誤差から t_A と T の値を便利に同定することができる。

$$\Delta r = \left\{ 1 - \frac{\sin(t_A \omega / 2)}{t_A \omega / 2} \times \frac{1}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}} \right\} R, \quad \text{where } \omega = F / R \quad (3)$$

4-2 工具経路運動軌跡の汎用的なシミュレーション方法の確立とプログラミング

各駆動軸に関する独立な線形特性の仮定に基づき、工具経路の運動速度と軌跡を次の方法で求める。まず、適切な記録時間間隔を決めておき、工具経路動作時間の全領域にわたって、指令時間順に各構成直線または円弧セグメントの駆動軸サーボ系速度出力と変位出力を求め、対応する記録時刻ごとにそれらをそれぞれ足し合わせると、各駆動軸の速度出力と変位出力の時間序列データが得られる。工具経路開始点の座標を対応する駆動軸変位データに加算すると、各駆動軸の動作時間順の位置座標データになる。そして、同じ時刻における各駆動軸の位置座標から工具経路上の同時刻の軌跡点位置を生成し、指令工具経路に対して経路軌跡点の偏差を求めれば、それは工具経路の運動誤差となる。さらに、検討目的に応じて、必要な駆動軸の速度や接線速度、工具経路運動軌跡や運動誤差などの結果を検討しやすい形に図示すれば実用上便利である。この計算アルゴリズムは順番に各セグメントの運動軌跡を計算して合成するので、計算効率が高くプログラミング作業が容易であり、しかも円弧と直線セグメントが混在する工具経路にも簡単に適用でき、短いセグメントや NC 加工モードの影響も容易に対応できる。

4-3 工具経路運動軌跡のシミュレーション結果の検証

(1) シミュレーション結果の妥当性 対象 MC を使用して多数の工具経路について運動軌跡のシミュレーション結果と KGM 実測結果を比較しながら、多様な角度から提案したシミュレーション方法の妥当性を検討した。その 1 例として図 2 における工具経路の検証結果を示す。この経路は左右対称で、点 A から点 B、点 C、点 D、点 E の順にまわる。まず、点 B から点 D

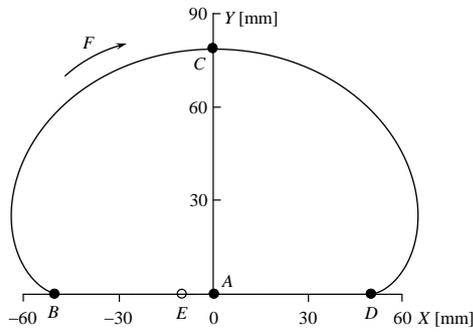


図2 テスト工具経路

表1 輪郭仕上げの切削条件

Cutting conditions	Spindle speed [rpm]	10,000
	Feed rate [mm/min]	2,000
	Radial depth of cut [mm]	0.02×2
	Axial depth of cut [mm]	5
Square end mill	Cutting direction / Fluid	Down cut / Wet
	Diameter [mm]	3
	Flute number	4
	Helix angle [°]	30
Workpiece	Material	CO-HSS-TiN coating Aluminum A5052

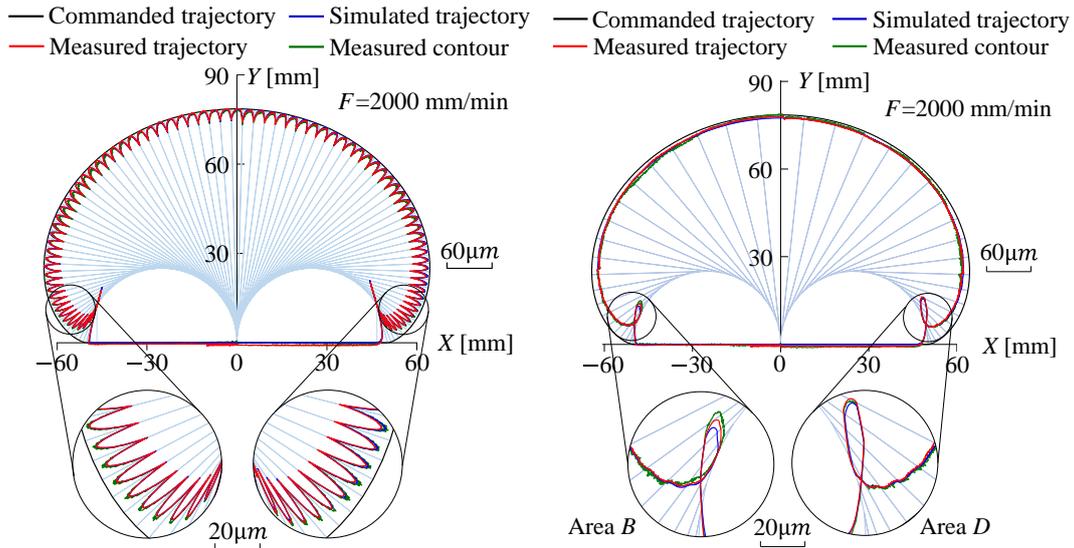


図3 直線補間工具経路の運動軌跡

図4 円弧補間工具経路の運動軌跡

までの経路部分を長さ 1.095 mm~3.916 mm の 83 個の直線セグメントで構成させた直線補間工具経路について、送り速度 F を 2000 mm/min に指令して得られた運動軌跡の結果を図 3 に示す。図中の水色細線が補間セグメントの境界線を示す。この図からシミュレーション曲線と実測曲線はよく一致していることがわかる。また、表 1 に示す切削条件を用いて仕上げたワークの輪郭形状の CMM 測定結果も図 3 に記入している。CMM 輪郭曲線も工具経路のシミュレーション曲線と KGM 実測曲線とよく一致している。

次に、点 B から点 D までの経路部分を半径 3.213 mm~77.683 mm、長さ 0.419 mm~16.087 mm の 43 個の円弧セグメントで構成させた円弧補間工具経路について、 $F=2000$ mm/min に指令して得られた運動軌跡の結果を図 4 に示す。表 1 の条件で仕上げたワーク輪郭の CMM 測定結果も記入している。この図においても、工具経路のシミュレーション曲線と KGM 実測曲線および加工ワークの輪郭形状曲線は互いによく一致している。

以上の結果から、工具経路運動軌跡のシミュレーション結果の妥当性ととも、実験条件の場合に対象 MC のワーク輪郭仕上げ精度は主に NC 加減速処理と駆動軸位置サーボ制御に起因する工具経路の運動誤差に左右されることが確認された。その結果、対象 MC について、切削実験をせずに工具経路の運動精度に及ぼす切削送り運動パラメータの影響を推定して把握する可能性が確認された。

(2) シミュレーション結果に基づく工具経路運動誤差の逆補正 運動軌跡のシミュレーション結果に基づき工具経路を逆補正すれば、送り速度を落とさずに実際の工具経路の運動精度を向上させられる。円弧補間工具経路を例としてこの可能性の検証結果を示す。図 4 における工具経路の運動軌跡シミュレーション結果をベースに、各円弧セグメント半径減少の平均値 Δr_i を算出し、中心点位置を変更せずに元の半径値 R_i に Δr_i の絶対値を加算して新しい半径値とし、対応するセグメント間の接続点位置も計算する。構成セグメントの新しいパラメータを用いて逆補正工具経路の NC プログラムを作成し、 $F=2000$ mm/min に指令して得られた運動軌跡の結果を図 5 に示す。図 5 と図 4 を比較すると、 B 領域と D 領域以外の部分には逆補正工具経路の運動誤差がほとんどなくなったことがわかる。NC システムからの補間セグメントの運動指令に対して駆動軸サーボ系の出力応答は時間的に遅れが発生する。その影響で短いセグメントが集まる B 領域と D 領域において逆補正の効果が制限される。したがって、元の工具経路の点 B と

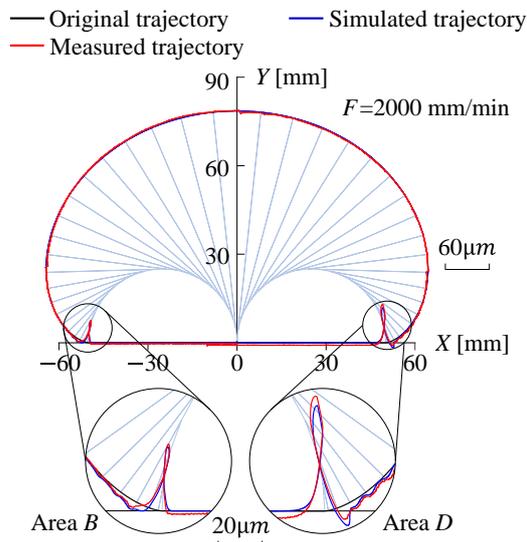


図5 直接に逆補正した円弧補間工具経路の運動軌跡

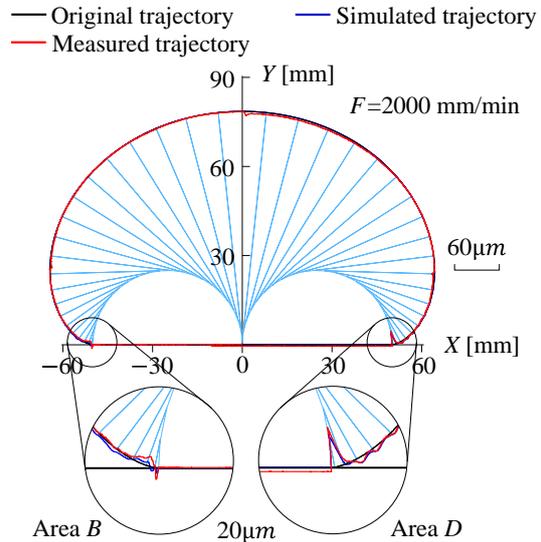


図6 ドウェルを設けて逆補正した円弧補間工具経路の運動軌跡

点 D でそれぞれ 0.1 sec のドウェルを設けた上で再度工具経路の運動軌跡をシミュレーションした。その結果に基づいて新しい逆補正工具経路を生成して、 $F=2000 \text{ mm/min}$ の条件で実施した検証実験の結果を図 6 に示す。 B 領域と D 領域における運動誤差はかなり小さくなっている。運動誤差シミュレーション値は図 4 に $63.1 \mu\text{m}$ であり、図 6 には $18.2 \mu\text{m}$ である。ただし、工具経路の実際運動時間は 11.018 sec から 11.445 sec に微増した。

以上の結果から、運動軌跡のシミュレーション結果に基づき、工具経路を簡単に逆補正することにより、送り速度を落とさず実際の工具経路の運動精度を大幅に改善する可能性が実証された。他の工具経路逆補正手法 (Ishizaki and Shamoto, 2022; Sato et al., 2018) と比べると、専用の NC システムや NC システムの内部処理を実施する専用ソフトウェアの必要がなく、実際の切削実験の実施も不要なので、提案した逆補正方法は実用性と利便性の面に十分価値がある。

(3) 輪郭加工精度に及ぼす補間セグメントサイズ、NC 加工モード、AI 先行制御・AI 輪郭制御の影響に関する検討 公称運動時間が直線加減速時定数 t_A より短いセグメントで構成する直線補間工具経路の場合において、NC 直線加減速処理により 1 つのセグメントに関する駆動軸サーボ制御系への指令は複数のセグメントの運動に影響を与える。その結果、実際の工具経路の運動軌跡は元の NC プログラムに指令する経路と大きく異なる可能性がある。多数の工具経路について、実験とシミュレーションの両面からこの可能性を実証した。長さがサブ mm オーダーの補間セグメントをすでに実用されていると言われる輪郭形状の精密加工現状を踏まえて、この問題を意識し、CAM システム等に対応策を組み込む必要があると考えられる。

対象 MC の NC システムに MC メーカー独自の NC 加工モード R1, R2, R3, R4 が組み込まれている。これらのモードの設定基準や作動メカニズムに関する技術的な説明がなく、取扱説明書には R1→R4 の順に加工精度の重視程度が上がっていくという簡単な記述に限られている。工具経路の運動精度に及ぼす NC 加工モードとの関連を明らかにするために、検証工具経路を設計し、実測した運動軌跡とシミュレーション軌跡との比較から、各 NC 加工モードに設定した制限パラメータとその値を確認するとともに、NC システムの内部処理手続きも明らかにした。また、提案した工具経路運動軌跡のシミュレーションアルゴリズムにその影響を取り入れた。

NC メーカー独自の AI 先行制御加工機能は対象 MC の NC システムに組み込まれているが、その詳細な説明が見当たらない。工具経路のシミュレーション軌跡と実測軌跡の比較から、この機能の実施により指令した工具経路の運動誤差を効果的に補正できることが確認されたが、この補正メカニズムの詳細はまだ不明である。一方、短いセグメントで構成する工具経路部分には運動誤差の過補正現象が確認された。

<引用文献>

松原厚, 精密位置決め・送り系設計のための制御工学 (2008), 森北出版株式会社。

Ishizaki, K. and Shamoto, E., A new real-time trajectory generation method modifying trajectory based on trajectory error and angular speed for high accuracy and short machining time, Precision Engineering, Vol. 76 (2022), pp.173-189.

Sato, R., Hasegawa, S., Shirase, K., Hasegawa, M., Saito, A. and Iwasaki, T., Motion accuracy enhancement of five-axis machine tools by modified CL-data. International Journal of Automation Technology, Vol. 12, No. 5 (2018), pp.699-706.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 丘 華、山口 哲郎	4. 巻 90巻931号
2. 論文標題 NC直線加減速処理によるマシニングセンタの円弧補間工具経路の運動誤差推定	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1~ 20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00247	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 丘 華、山口 哲郎、黄 永安	4. 巻 89巻920号
2. 論文標題 NC直線加減速処理によるマシニングセンタの直線補間工具経路の運動誤差推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1~ 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.22-00306	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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hua QIU, Tetsuro YAMAGUCHI
2. 発表標題 Estimation and examination for cutter path motion error of machining center
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2023 & Manufacturing Systems Conference 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口 哲郎・丘 華
2. 発表標題 マシニングセンタの円弧補間工具経路運動誤差の推定結果に関するいくつかの検討
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 山口 哲郎・丘 華
2. 発表標題 マシニングセンタのNC直線加減速処理による短い直線セグメントからなる工具経路に関する一検討
3. 学会等名 2023年度精密工学会中国四国支部・九州支部共催広島地方講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hua Qiu, Tetsurou Yamaguchi, Yongan Huang
2. 発表標題 An Estimation Approach to Circular Cutter Path Trajectory Error of Machining Center Produced by Linear Acceleration/Deceleration Processing
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丘華・山口哲郎・黄永安
2. 発表標題 マシニングセンタの円弧補間工具経路に及ぼすNC直線加減速処理の影響(その1:工具経路運動誤差の推定計算)
3. 学会等名 日本機械学会第14回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丘華・山口哲郎・黄永安
2. 発表標題 マシニングセンタの円弧補間工具経路に及ぼすNC直線加減速処理の影響(その2:工具経路運動誤差の実験検証)
3. 学会等名 日本機械学会第14回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丘華・山口哲郎・青木大騎・黄永安
2. 発表標題 NC直線加減速処理によるマシニングセンタ円運動の半径減少量
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丘華・山口哲郎・黄永安
2. 発表標題 マシニングセンタの直線補間工具経路に及ぼすNC直線加減速処理の影響（パート1：工具経路運動誤差の推定計算）
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丘華・山口哲郎・黄永安
2. 発表標題 マシニングセンタの直線補間工具経路に及ぼすNC直線加減速処理の影響（パート2：工具経路運動誤差の実験検証）
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hua Qiu, Tetsurou Yamaguchi, Yongan Huang
2. 発表標題 A Practical Approach for Estimating Cutter Path Motion Error of Machining Center Due to Linear Acceleration/Deceleration of Linear Segment
3. 学会等名 The 10th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------