

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04119

研究課題名（和文）複合モデル型プロセス表現を基にした加工事例の共有と利用による切削加工の精度保証

研究課題名（英文）Research on accuracy assured machining by using machining case sharing based on compositional process modeling method

研究代表者

寺本 孝司（TERAMOTO, Koji）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40252605

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）：本研究は加工ステーションにおける精度保証機能を実現するために不可欠な、加工誤差の要因分析について検討を行った。具体的には計測された誤差情報を加工プロセスで発生する物理現象との関連について、複合モデル型のプロセスシミュレーションを基にした評価を行った。実装したシステムを基にした加工実験により、プロセスシミュレーションを基にポケット加工の加工手順や個々の把持状況の違いを評価できることが分かった。評価事例を蓄積することにより、高信頼度な加工誤差の要因推定を実現できる可能性があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、加工結果が想定したものとならなかった場合にその原因を推定する手法について十分検討されてこなかった。本研究では、切削加工プロセスに関係する断片的な加工現象に関するシミュレーション群を利用することで、切削加工の加工誤差要因推定が可能かどうか検証した。航空機部品などで多用されるリブ構造体の加工を対象に提案手法を適用して検証したところ、加工誤差要因推定は実現可能性があることが分かった。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this research is to achieve accuracy assured machining. Finding influential factors of machining error is an essential function of the accuracy assurance. This research has investigated to evaluate a feasibility of association between the machining error and physical phenomena which occur in machining process. A compositional process representation method has been introduced to formulate a framework of the association. Based on the proposed framework, case studies to evaluate correlations between the machining error and physical phenomena. From the case studies, it becomes clear that machining situations such as machining sequence and fixturing state can be characterize the machining error. This implies the feasibility of influential factors finding from machining error.

研究分野：機械工学

キーワード：加工誤差要因推定 精度保証加工 切削加工 小ロット高精度加工

1. 研究開始当初の背景

計測技術と情報通信の高度化・低価格化により実世界と計算機内のモデルを連携させる試みが注目を集めており、Digital Twin と呼ばれる実世界情報に接続された計算機内機器モデルを利用した機器保全や運用支援について注目が集まっている。さらに、Industry 4.0 がドイツの国家的戦略プロジェクトとして発表されて以来、情報通信技術を用いた製造業の革新を求める「第4次産業革命」への機運が世界中で高まっている。これらの取り組みでは、生産工程を、通信ネットワークを介して連携するとともに、収集された膨大なセンシングデータに対して大規模情報処理技術を適用することで実世界の効率的な運用をめざしている。しかし、デジタル化、センシング、ネットワーク化を実現する技術開発に比べ、繋がった機器の有効な利用方法や適切な使い方については、明確に提示されていない。機械加工を対象とした工作機械関係でも、遠隔監視や加工実績をもとにしたコンサルティングといったビジネストピックはあるもの、計測情報や機械間の連携による新たな機能の創出には至っていない。

2. 研究の目的

本研究は加工ステーションにおける精度保証機能を実現することを最終的な目的としている。具体的には、加工誤差を工作機械の構造や機能に起因する要因と加工条件や工作物形状などの加工プロセス起因する要因に分離したうえで共有・再利用する手法を構築する。誤差要因分析については、研究代表者が提案している複合モデル型プロセス表現をもとにしたモデル学習による要因分析手法を適用する。要因ごとに同定されたモデルを異機種・異作業間で共有することで、加工事例情報の効率的な共有と再利用が可能になる。本報告では、加工時に発生する加工現象と加工結果の計測の関連について検討し、精度保証加工のための加工誤差要因の推定の可能性について検討する。

3. 研究の方法

加工ステーションレベルで加工精度保証を実現するためには、加工誤差の機上計測を行い加工の妥当性を評価することが必要である。さらに、許容範囲を超えるかこうごさがはっせいしている場合には、加工誤差を発生させた要因を推定して修正加工を実施することが不可欠である。本研究ではバイスを用いたリブ構造体の削り出し加工を対象とし、切削加工時における工作物表面の間欠計測結果を基に、誤差要因推定の可否について検討する。

具体的には、一連の加工を加工ステップに分解し、加工ステップ終了ごとに間欠計測を行う。計測に用いるレーザ変位計は、計測時に工作機械ヘッドに装着し表面形状計測を実施する。このような加工と間欠計測を、異なる加工シーケンスでの加工事例について実施したうえで、加工プロセスシミュレーションと比較することで加工誤差を発生させた誤差要因の推定が可能であるかどうか検証する。

4. 研究成果

4.1 加工実験での計測結果

Fig. 1 に示す異なる4つの加工手順で、壁面厚2mmのリブ構造体の削り出し加工において間欠計測を実施した。なお、工作物はバイスを用いて長手方向に12kNの把持力で把持し、工具長補正は刃先位置測定器を用いてFig.1左図のB部表面上で行なった。本実験では、加工誤差に影響を及ぼすと考えられる工作物変形以外の誤差要因の影響を排除するために、仕上げ加工の仕上げ代と送り速度を小さくし、ウェット切削で加工した。これにより、工具系の変形および切削熱による工具・工作物の膨張を十分抑制できると考えられる。工具は2枚刃超硬スクエアエンドミル(φ6)を用い、被削材はA2017(50×100×18)を使用した。仕上げ時の加工条件は、回転数10,000rpm、送り速度50mm/min、仕上げ代0.5mmとし、切削方式はダウンカットを採用した。

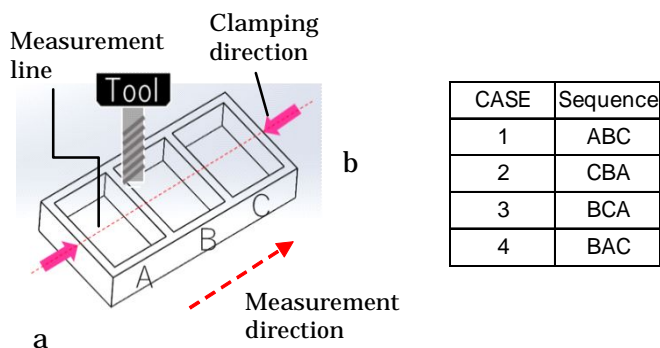


Fig. 1 Shape of workpiece and machining sequence

工作物表面の計測は、レーザ変位計(KEYENCE CL-L070)を工作機械ヘッドにジグを介して装着し、ヘッドを移動しながら表面の離隔を取得した。

機上での間欠計測結果から各ポケット加工直後の底面と除荷後の結果を示す。なお、ハンマリング後の B 部の表面が高さ 0 となるようにデータを補正し、切削深さを示す縦軸と理想切削深さを対応させている。

各ポケット加工直後の底面の深さに着目すると、どのケースにおいても加工深さが一定であることがわかる。これは、工具系の変形や工具およびワークの熱膨張を十分に抑制できていること示している。加えて、工作機械運動精度も巨視的には良好であることが分かる。その一方で、理想切削深さが-16mm に対して、CASE1 以外で-16mm 程度とほぼ同等の値を示しているが CASE1 では約-15.975mm となっている。マイクロメーターで測定した加工終了後の底面計測結果では、底面厚さは他に比べて CASE1 が大きかったことから、工具長補正が本来補正されるべき高さより上部で行われていた可能性が考えられる。

CASE3-4 では、ポケット 2 個目に比べて 3 個目のポケット内部の勾配が大きくなっている。すなわち、加工手順の違いが寸法誤差やポケット内部の勾配に影響を与えることが確認された。これは、加工途中で剛性が低下し、変形が徐々に大きくなっている中で加工された結果を反映したものであると考えられる。

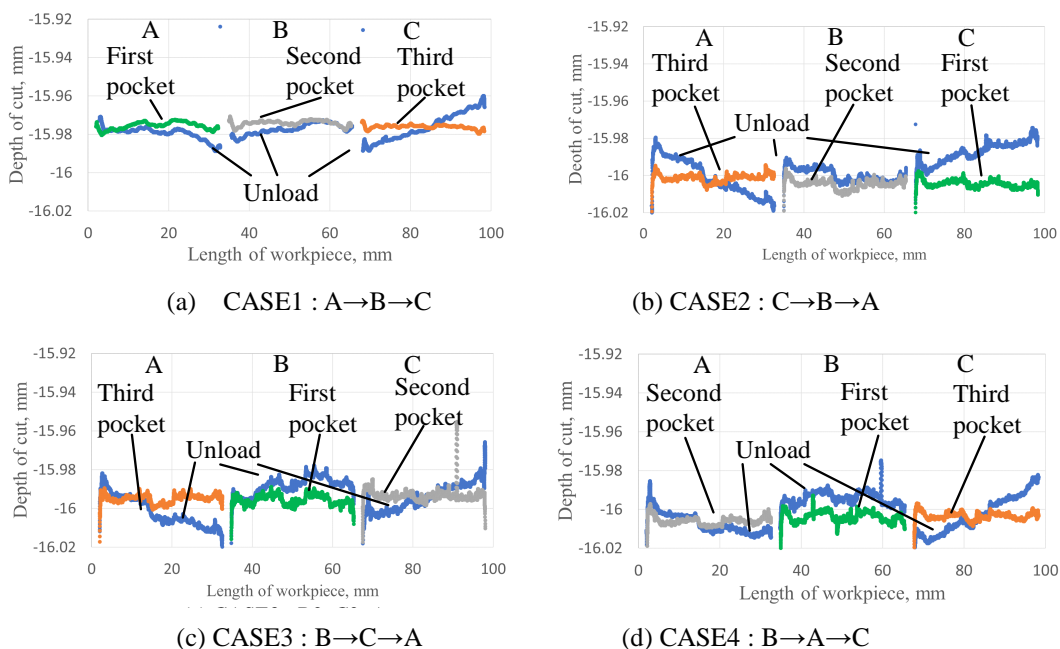


Fig. 3 Profiles of machined surface

4.2 工作物変形解析を基にした誤差要因推定

剛性低下に伴う変形形態の変化が、最終的な切削面の表面深さに影響を与えたと考えられる。その場合、有限要素法を用いた弾性変形解析によりこの変形を説明することができれば、加工誤差の要因の一つである工作物変形の影響について推定することができると考えられる。そこで、数値解析により各加工段階に対応する形状を有する工作物へ複数の異なる把持モデルを実装し、バイス把持における低剛性部品把持を表現できる把持モデルの検討を行った。評価は、各ポケット内部 5 箇所の変形量を求め、変位分が加工誤差に反映されるとして加工実験によって得られたデータと数値解析データを比較した。

まず、解析条件として、I~V の境界条件を設定し適切なモデルの構築を検討する。

- I. 工作物とバイス(剛体)および治具(剛体)の接触条件は、個体接触(摩擦係数 $\mu = 0.1$)。把持力は一定で 12kN とする。
- II. I+通常、把持後に工作物の浮き上がりを消去する(ハンマリング作業に相当)。これを解析で再現するため、治具に接触する工作物下面の 4 つの頂点が高さ方向に対して拘束+バイス可動部側(弾性体)の浮き上がりは予備実験を基に再現した。把持力は一定で 12kN とする。
- III. I+ハンマリング効果のみ考慮する。把持力は一定で 12kN とする。
- IV. I+工作物の剛性低下に伴う把持力低下を考慮する。
- V. I+ハンマリング効果および工作物の剛性低下に伴う把持力低下を考慮する。

なお、Fig.4 に示すようにバイス可動部を介して把持力を工作物に与えている。

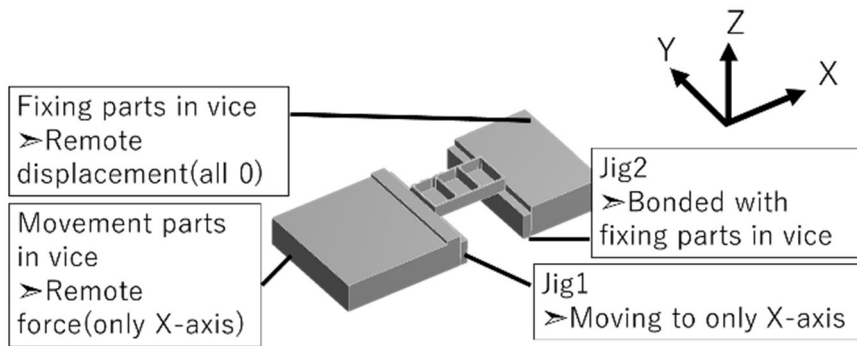


Fig. 4 Modeling of workpiece and machine vice

解析と実験間の変位量の差を Fig. 5 と Fig. 6 にまとめる．算出方法は，Fig. 3 の各ケースにおいて，加工段階に対応する形状での高さから除荷後の高さを引き絶対を取る．これを変位量とする．次に，実験と解析の差異について，加工面に相当する部位の変位 5 箇所を各ポケットで平均化し，加工手順別(Fig. 5)とポケット別(Fig. 6)にまとめる．

解析Iを基準とした場合，解析IIは悪化傾向にあり，その原因は解析IIIよりパイス浮き上がり効果によるものとわかった．次に，加工進展に伴う把持力減少量をモデル化し，このモデルを適用した推定手法を導入したところ，とくにポケット三個目の差に改善が見られた．それぞれの条件に対して個別の評価を実施した結果，ハンマリング効果と把持力低下の効果を考慮することで良好な結果が得られた．解析 V の結果から，解析Iに比べてポケット一個目:27%，二個目:19%，三個目:31%の改善が見られた．工作機械とレーザ変位計による測定精度を考えた時に，解析誤差はこの測定誤差範囲に近い値を示していることから，把持モデルとして適切であるといえる．ただし，Fig. 6 よりポケット A から C にかけて差が大きくなっていることから，より詳細な検討のためには，パイス固定部側の影響について検討が必要である．

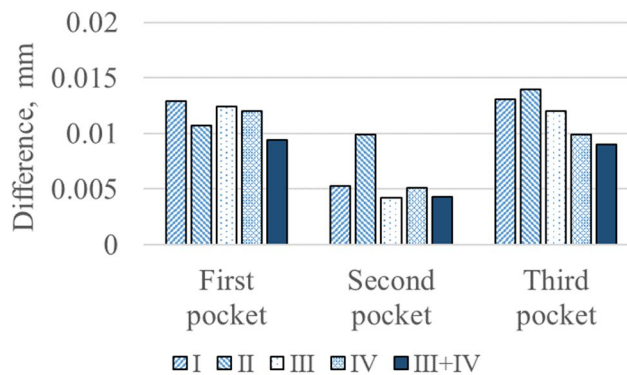


Fig. 5 Difference of deformation between analysis and experiments by machining sequence

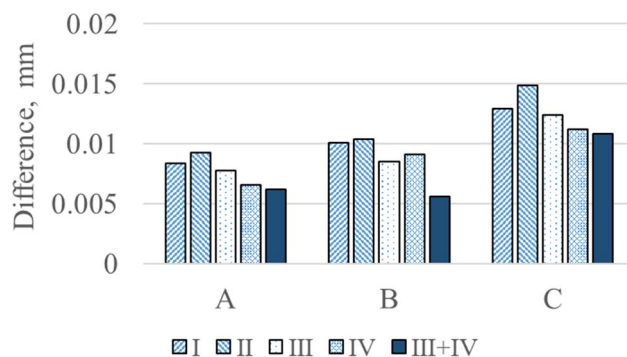


Fig. 6 Difference of deformation between analysis and experiments by location

4.3 結論

本研究では，機上間欠計測結果を基に誤差要因を推定することを目的とし，異なる加工条件での加工実験を行った．その結果，以下のことが明らかとなった．

- (1) 機上間欠計測により機械運動精度，工具長補正，工具/工作物の熱膨張の影響について

評価できる可能性がある

- (2) 適切な加工プロセスモデルを用いることで、加工誤差の発生プロセスを再現することが可能であることが分かった。
- (3) 機上間欠計測を行うことで加工シーケンスの違いによる加工誤差への影響を評価することが可能であることが分かった。

今後は、多様な加工事例について機上間欠計測の実施と誤差要因の推定について検討して、汎用的な推定手法の実現が必要である。

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 2件）

1. 著者名 Adirake Chainawakul, Koji Teramoto, Hiroki Matsumoto	4. 巻 15
2. 論文標題 Statistical Modelling of Machining Error for Model-Based Elastomer End-Milling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 852-859
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0852	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 Zeng Jingkai, Teramoto Koji, Matsumoto Hiroki	4. 巻 15
2. 論文標題 On-Machine Estimation of Workholding State for Thin-Walled Parts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 860 ~ 867
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0860	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yutaro Nakao, Koji Teramoto
2. 発表標題 Analysis of the Effect of Machining Sequence on Machining Error Considering Workpiece Rigidity Change
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing LEMP2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jingkai Zeng, Koji Teramoto, Dongjin Wu, Hiroki Matsumoto
2. 発表標題 On-Machine Estimation of Workpiece Deformation for Thin-Walled Parts Considering Fixture Clamping Sequence
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing LEMP2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Adirake Chainawaku, Koji Teramoto, Zejian Wu, Takahiro Katsube
2. 発表標題 Proposal of a Framework for Empirical Modelling of Complex Machining Phenomena
3. 学会等名 8th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaro NAKAO and Koji TERAMOTO
2. 発表標題 Research on estimation of machining error factors for accuracy assured machining
3. 学会等名 Joint Symposium on Mechanical Industrial Engineering and Robotics 2019 (MIER2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jingkai Zeng, Koji Teramoto, Dongjin Wu
2. 発表標題 On-machine Estimation of Workholding Situation for Thin-walled Parts
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Dongjin Wu, Koji Teramoto, Jingkai Zeng
2. 発表標題 Proposal for a workpiece monitoring framework for accurate end-milling
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mengmeng YANG, Koji TERAMOTO, Feng ZHANG
2. 発表標題 Research on Measuring Point Selection for Workpiece Thermal Monitoring
3. 学会等名 The 10th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya HIBINO and Koji TERAMOTO
2. 発表標題 Modelling of fixturing force reduction caused by workpiece rigidity change
3. 学会等名 The 10th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2021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		
中国	瀋陽農業大学		