

On-machine Estimation of Workholding State for Precision Machining of Thin-walled Parts

その他（別言語等）のタイトル	薄肉部品の精密加工のための工作物保持状態の機上推定
著者	曾 靖凱
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第493号
研究科・専攻	工学専攻
学位授与年月日	2022-03-23
URL	http://doi.org/10.15118/00010862

氏 名 曾 靖凱 (ウ ジンカイ)

学位論文題目 On-machine Estimation of Workholding State for Precision
Machining of Thin-walled Parts
(薄肉部品の精密加工のための工作物保持状態の機上推定)

論文審査委員 主査 教授 寺本 孝司
教授 風間 俊治
教授 藤木 裕行

論文内容の要旨

薄肉部品は、高度な比強度を実現する構造として現代の製造業で広く使用されています。しかしながら、別の観点から見ると、これらの部品は構造が複雑で、剛性が低く、高精度な加工が必要になります。機械加工中においては、剛性の低い構造特性のため、実際の工作物保持の実施工程と把持具の選択により、薄肉部品の変形は大きく影響されます。さらに、ほとんどの工作物把持工程は手動操作として実行されるため、プロセスのばらつきが大きくなります。これらの変動する固定プロセスは、長い間加工精度を低下させてきました。

この研究の目的は、固定力と工作物の変形を効率的かつ迅速に推定するためのオンマシン推定方法を調査することです。この推定により、工作物保持状態の視覚化が可能になり、薄肉部品の加工精度が向上します。

本研究では、工作物把持シミュレーションと局所的に測定されたひずみを組み合わせた工作物把持状態の体系的な推定方法を提案し、その妥当性を評価します。提案されたオンマシン推定方法は、さまざまな工作物保持条件（把持シーケンスと固定力）で評価されます。把持された状態での薄肉工作物の推定固定力と工作物の変形を、実験結果と比較した。実験結果との比較から、提案手法は固定力不足や過度の変形などの不適切な工作物保持状態を検出する可能性があることが明らかになりました。

この論文では、複数の基盤技術を用いて機械加工プロセスにおける薄肉部品のワーク保持状態を推定するシステムを構築しました。本編の構成は以下のとおりです。

まず、本研究の背景として、最近の生産動向をまとめました。現代の製造業に適用される薄肉部品の役割、薄肉工作物加工の動向、薄肉工作物の重要性について整理します。さらに、工作物を把持した状況における工作物把持状態の推定、測定技術の開発、FEM 分析、および測定とシミュレーションの組み合わせに関する関連研究の調査結果を示します。

次に、本研究の目的を具体的に達成するために設定された 4 つのステップについて説明

します.

- (1) オンマシン推定の実現可能性の検証
- (2) 工作物固定力の推定
- (3) 工作物把持シーケンスの影響評価
- (4) 測定点の選択手法の構築

そして、オンマシン推定の枠組みを提案します。プロセス変数の考察に基づいて、状態推定のための最適化プロセス、工作物把持シミュレーションの枠組み、複雑形状工作物に対する把持状態推定の流れ、および測定可能点の評価指標の有効性について検討した結果を示します。この研究は、薄肉部品の工作物把持状態推定のための効果的なシステムを構築するためにこれらの方法を連携させる手法を提案しました。

さらに、研究目的を達成するための4つのステップに基づいて、提案を検証するために行った、評価実験について紹介します。評価実験の結果から、提案された工作物把持状態の推定方法は、さまざまな工作物把持状況において、工作物把持状態を推定し視覚化することができることが明らかになりました。

最後に、本論文の結論について述べます。

ABSTRACT

Due to the higher structure efficiency and lightweight characteristic, thin-walled parts are widely used in the modern manufacturing industry.

However, from another point of view, these parts are complex in structure, have weak stiffness, and high precision demand. During the machining process, because of low rigidity structural characteristics, actual workholding process and fixture selection are heavily affected by the deformation of thin-walled parts. Moreover, most of the fixturing process is executed as manual operations, which generate large process variations. These fluctuated fixturing processes have deteriorated machining accuracy for a long time.

The objective of this research is to investigate an on-machine estimation method to achieve an efficient and fast estimation of the fixturing force and workpiece deformation. The estimation enables visualization of workholding states and improves machining

accuracies of thin-walled parts.

In this research, a systematic estimation method of workholding states which combines fixturing simulation and locally measured strain is proposed and evaluated. The proposed on-machine estimation method is evaluated in different workholding conditions (clamping sequences and fixturing forces). Estimated fixturing force and workpiece deformation for a clamped thin-walled workpiece was compared to the results from the engineering experiments. From the comparison, it becomes clear that the proposed method has the feasibility to detect improper workholding states such as insufficient fixturing force or excessive deformation.

In this thesis, several methods are used to build a system to estimate the workholding state of thin-walled parts in the machining process. The main story is described as follows.

Firstly, trends of recent production are summarized as a background of this research. Roles of thin-walled parts which apply in the modern manufacturing industry, trends of thin-walled workpiece machining, and the importance of thin-walled workpieces are introduced. Moreover, related researches about workholding state estimation in workholding situations, measurement technology development, FEM analysis, and a combination of measurement and simulation are surveyed.

Secondly, to concretely explain the overall objective, the whole research process is illustrated to follow four steps:

- (1) Feasibility verification of On-machine estimation
- (2) Fixturing force estimation
- (3) Effect of clamping sequence
- (4) Measurement points selection

Thirdly, a framework for on-machine estimation is proposed. Based on considerations of process variables, a concept of the iteration optimization process, workholding simulation framework, estimation flow of complex workholding state, and evaluation criterion of measurable points are explained. This research presents these methods to build an effective system of thin-walled parts workholding estimation.

Fourthly, several case studies are set to verify our proposal based on the four steps of the objective paragraph. From the results of case studies, the proposed estimation method of workholding state can visualize the fixturing states in various workholding situation.

Lastly, the conclusion of the dissertation is described.

論文審査結果の要旨

本論文は、近年重要度の高まっている薄肉工作物の精密加工において不可欠となる工作物把持状態の机上推定手法について検討したものである。

薄肉部品は、高度な比強度を実現する構造として航空機部品をはじめ、現代の製造業で広く使用されている。近年、設計技術の高度化に伴いその適用範囲が増加している。特に、アディティブマニュファクチャリングに代表される様々な小ロットニアネットシェイプ成形技術が提案され普及が進んでいることから、薄肉構造部品の小ロット生産における仕上げ切削加工の高精度化が求められている。

小ロット加工における工作物把持は、自動化が困難で手動作業となることが多いことから、エンドミル加工における加工不良の大きな要因であると指摘されている。そこで、実際に加工を行う工作機械上で適切な把持が実現できていることを検証する手法が求められている。本論文では、この問題に対して以下のような検討を行っている。

まず、工作物把持シミュレーションと局所的に測定されたひずみを組み合わせた工作物把持状態の体系的な推定方法を提案している。具体的には、固体接触を考慮した有限要素解析と応答局面法を用いた推定手法について提案している。そして、提案した手法の妥当性を検証するために、異なる把持条件を対象とした把持力および工作物変形の推定結果について検討している。さらに、ひずみ計測を行う計測位置を選定する手法について提案し、その妥当性について把持状態の推定実験をもとに検証している。

検証に用いた実験と推定値の比較により、提案した手法が妥当であり把持状態の機上推定が可能であることを示している。

以上、本研究で得られた成果は、薄肉部品の精密加工のための基盤を提供するものであり、機械加工の高度化に寄与するところが大きいといえる。よって、本論文著者は博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。