



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## エンドミル加工における熱変形の統計的推定に関する研究

メタデータ	言語: English 出版者: 公開日: 2023-06-07 キーワード (Ja): 統計モデル, 数値シミュレーション, 誤差解析, エンドミル加工 キーワード (En): MLR, Statistic model, numerical simulation, MLR, error analysis, end-milling 作成者: 楊, 蒙蒙 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.15118/00010893">https://doi.org/10.15118/00010893</a>

氏 名 YANG MENG MENG(ヤン メンメン)

学位論文題目 Research on statistical estimation of thermal deformation in  
End-milling  
(エンドミル加工における熱変形の統計的推定に関する研究)

論文審査委員 主査 教授 寺本 孝司  
教授 風間 俊治  
教授 花島 直彦

### 論文内容の要旨

エンドミル加工における切削熱による工作物の変形は、加工精度に大きな影響を与えます。工作物の変形を加工中に直接測定することは、加工プロセスの外乱のために困難です。一方、工作物の局所的な温度は、一般的な測定方法で簡単かつ正確に測定できます。この研究の目的は、工作物の変形を監視する方法を開発することです。少量生産における工作物の熱状態を推定するために、局所温度測定と熱シミュレーションを組み合わせたセンサー配置型熱シミュレーションが提案されています。本研究では、計算時間を短縮するために、測定された温度から工作物の変形を推定する経験的モデリング手法を導入します。

信頼性の高い推定のためには、適切な測定ポイントを選択することが不可欠です。さまざまな機械加工状況における熱変形と測定点の温度との関係を確立するために、統計情報に基づく計測点選択方法を多重線形回帰 (MLR) 法を使用して提案します。エンドミル加工プロセスの FEM ベースの熱変形シミュレーションを使用することにより、加工点で予測される変形の時系列情報を出力変数とし、測定点の温度の時系列情報を入力変数とすることが可能になります。赤池情報量基準 (AIC) を評価することで独立な測定点数を決定し、 $p$  値指数を用いて有効な測定点を選択します。提案された体系的な構築方法は、シミュレーションベースのケーススタディによって評価されます。

FEM シミュレーションによって計算された変形と工作物の変形用に構築された統計ベースのモデルはよく一致します。構築したモデルは、最小限の測定点数で工作物の変形を表現できます。エンドミル加工プロセス中のさまざまな境界条件での提案された統計モデルの精度について議論した後、修正係数統計モデル (MCSM) と調整統計モデル (ASM) という 2 つの修正統計モデルが、関係をより適切に表現するために提案されました。2 つの修正統計モデルの誤差分析をそれぞれ議論しました。その結果、MCSM と ASM はどちらも、測定点の温度とさまざまな境界条件での加工点での熱変形との関係をより正確に記述でき

ることが明らかになりました。

**キーワード:** 統計モデル、数値シミュレーション、MLR、誤差解析、エンドミル加工

## ABSTRACT

The thermal workpiece's deformation in end-milling process has significant effect on accuracy of machining. In-process direct measurement of workpiece deformation is difficult because of machining process disturbance. On the other hand, local temperatures of workpiece can be easily and accurately measured by common measuring methods. The objective of this research is to develop a method to monitor the workpiece's deformations. In order to estimate workpiece's thermal states in small-lot production, a sensor-configured thermal simulation has been proposed by combining local temperature measurements and thermal simulation. To accelerate the process time, an empirical modeling method to estimate workpiece's deformation from measured temperatures is introduced. It is indispensable to select appropriate measuring points for reliable estimation. In order to establish a relationship between thermal deformation and temperatures of measuring points in various machining situation, a statistic-based selection method is proposed by using the Multiple Linear Regression (MLR) method. By using FEM-based thermal simulation during end-milling process, predicted time-series of deformation at the machining point are regarded as output variable while time-series of temperature of measuring points are regarded as input variables. The similarity of measuring points is evaluated by using Akaike's Information Criterion (AIC), and effective measuring points are selected by using  $p$ -value index. Proposed systematic construction method is evaluated by simulation-based case studies. A constructed temperature-based model for workpiece's deformation shows good agreement to the deformation calculated by the FEM simulation. The constructed model can represent workpiece's deformation with the minimum number of measuring points. After discussing the accuracy of proposed statistic model in various boundary conditions which correspond to various end-milling situation, two modified statistic model, such as modified coefficient statistic model (MCSM) and the adjusted statistic-model (ASM), were proposed to achieve more suitable expression of the relationship between monitoring points temperature and thermal deformation at machining point of workpiece surface. The error analysis of two modified statistic model were respectively discussed. Consequently, MCSM and ASM are both more accuracy to describe the relationship between temperature of monitoring points and thermal deformation at machining point in various boundary condition.

**Keywords:** Statistic model, numerical simulation, MLR, error analysis, end-milling

## 論文審査結果の要旨

本論文は、高精度なエンドミル加工において考慮することが不可欠な工作物熱変形に起因する加工誤差を加工プロセス中に監視し、適切な加工を担保することを目的とした研究である。加工中の切削熱による工作物の変形は、加工精度に大きな影響を与えることは広く知られているが、工作物の変形を加工中に直接測定することは困難である。本研究では、比較的計測が容易な工作物の局所的な温度を用いて、加工中の工作物熱変形を推定する手法について検討している。具体的には、測定された温度から工作物の変形を推定する統計的モデルを構築する手法として、切削加工プロセスシミュレーションを用いた統計的モデルの構築について検討している。

信頼性の高い熱変形推定のためには、適切な測定ポイントを選択することが不可欠であることから、温度計測点の選定方法を提案している。まず、計測可能な計測候補により、切削加工点での熱膨張の推定が可能であるかどうかの判定を行う。そして、各計測候補点の温度履歴と変形量の履歴から、赤池情報量基準 (AIC) を評価することで独立な測定点を決定する。さらに、計測候補点ごとにp値を用いて有効な測定点を選択する。以上の手順により、最小限の温度計測により加工点での熱膨張量を推定するモデルを構築することが可能になった。また、提案された体系的なモデル構築方法を、異なる加工状況で適用するためのモデル拡張についても提案している。

以上の提案について、有限要素法を基にした切削加工シミュレーションによって計算された変形と、工作物変形推定用に構築された統計ベースのモデルにより計算された変形の比較を行い、両者がよく一致することが示された。構築したモデルは、最小限の測定点数で工作物変形を表現することができることが明らかとなった。

以上、本研究で得られた成果は、高精度切削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。