

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	センサ信号解析および機械学習に基づくエンドミル加工の状態モニタリング
Title(English)	
著者(和文)	高口順一
Author(English)	Junichi Kouguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12687号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,吉野 雅彦,田中 智久,赤坂 大樹,中野 寛,吉岡 勇人
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12687号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（工学）
学生氏名： Student's Name	高口 順一		審査員主査： Chief Examiner	進士 忠彦	

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

近年、環境負荷低減の要求といった社会的背景により、製造プロセスも一層の高度化が求められている。そのために切削加工の状態モニタリングは重要な技術であるが、特に小径エンドミル加工においてはまだ課題がある。そこで本研究の目的は、高速回転工具を用いた形状加工における切削力および振動モニタリングの実現である。具体的には工具主軸に付けた加速度センサを用いて、センサ信号解析によりモニタリングを行う。これには切削力や振動についての特徴量を定義して提案し、さらには計測した駆動テーブル側の変位情報を加えてより高精度なモニタリングを提案する。結果として、小径エンドミルでの形状加工への適切なモニタリングを実現している。

本論文は全 5 章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章「緒論」では、社会的背景から製品の複雑化と製造プロセスの高度化が求められる中で、切削加工の状態モニタリングが重要な技術であることを指摘した。また、切削加工の状態モニタリングに関する現状を明らかにし、小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工への適用における問題点を説明した。そして、この問題を解決する切削加工の状態モニタリングの実現を本研究の目的とすることを述べた。

第 2 章「モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリング」では、モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリングについて提案した。工具径の小さい切削工具を使用する場合には、工具先端付近で発生する高周波の振動が加速度センサ等の計測値に含まれるため、切削加工の状態モニタリングが困難である。そこで、提案方法では逐次 2 次回帰近似を用いて加速度センサ信号から一刃周期の加速度変動と高周波振動成分の分離を行い、モデルベースアプローチから切削力を推定する。その後、新たに定義した切削力と振動の 2 つの特徴量を算出し、切削加工の状態モニタリングを行う。この提案方法を用いて、直線送りでの加工やコーナー加工において適切なモニタリングが可能であることを確認した。また、X, Y 方向に加えて Z 方向に対してもモニタリングが可能であることを確認した。さらに、切削加工中の異常振動や摩耗工具による切削力の変動など、問題となる状況を意図的に発生させてモニタリングを行った。このように、従来では難しかった小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工に対して、切削力および振動の適切なモニタリングを実現した。

第 3 章「工具主軸の静的変位のモニタリング」では、工具主軸の静的変位のモニタリングおよびそれを利用した高精度な切削力の推定方法を提案した。まず、工具主軸を外部から変位センサにより計測することで、切削加工中に工具主軸の静的変位が存在することを確認した。その上で、変位センサを追加することなく静的変位を推定する方法について提案を行った。具体的には、モータエンコーダとリニアスケールの相対変位をテーブル変位と定義し、ここから推定切削力を算出し、静的変位の推定値を求める。そして、静的変位の推定値を利用して工具主軸側のモデルからより正確な切削力を推定する方法である。この提案方法について、一定の切込み量での直線送り加工、切込み量を変化させた加工、加工方向を変化させた切削加工において評価を行った。その結果、推定切削力について改善が見られることを確認した。本章では、センサを用いて実現している切削加工の状態モニタリングに対して、別のセンサを加えて活用することにより、状態モニタリングの高度化が実現できることを示した。これは、主軸側だけでなくテーブル駆動系のセンサ出力を組み合わせることで更なるモニタリングの精度向上が可能であることを示しており、今後の展開を示唆する有用な成果であると考えられる。

第 4 章「機械学習を用いたモデルパラメータ同定による切削力推定法」では、機械構造のモデルパラメータの同定に機械学習を利用することで、高度なモデル化を実現する方法を提案した。実際

の加工実験で得られるデータを用いて学習するため、特別な装置やシミュレーションデータを必要としないことが特長である。この提案方法について、数ある機械学習の手法の中でも MLP を利用してモデルパラメータを同定し、これを用いて切削力を推定して評価を行った。一定の切込み量での直線送り加工，切込み量を変化させた加工，加工方向を変化させた切削加工，工具主軸の回転数を変化させた加工，切削工具を変化させた加工，被削材を変えた加工に対して検証し，機械学習によるモデルパラメータの同定から適切な切削力が推定できることを確認した。さらに，機械学習において中間層を追加してパラメータ数を増やした MLP 構成を用いると，より高精度な切削力の推定が可能であった。このように MLP を用いると中間層の追加が可能であり，将来的な拡張性があることを確認した。

第 5 章「結論」では，エンドミル加工の状態モニタリングについて，センサ信号解析や機械学習を用いて実施した本研究において得られた結果を総括するとともに，今後の展望について述べた。

以上のように，本研究によって小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工における状態モニタリングについて，有用な研究成果が得られた。すなわち，工具主軸に取り付けた加速度センサおよび一般的な工作機械に取り付けられているモータエンコーダおよびリニアスケールを用いて，センサ信号解析および機械学習といった方法を活用することで，小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工における状態モニタリングが可能であることを実証できた。これまで実現が困難であった切削加工を対象にした状態モニタリングの可能性を示しており，新たな展開が考えられる有用な成果であると考えられる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	高口 順一		審査員主査： Chief Examiner	進士 忠彦

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In recent years, there has been a demand for further advanced manufacturing processes to meet social requirements such as a reduction of environmental impact. Therefore, condition monitoring of the cutting process is an important technology, however, there are still difficulties especially in milling with small-diameter end mills. Thus, the purpose of this research is to achieve cutting force and vibration monitoring in shape milling with small-diameter end mills.

In the chapter 1, it was described the current research of condition monitoring for cutting process and problems in the application for shape milling at high-speed rotating tool with small-diameter end mills. Then, it was mentioned that the purpose of this research was to achieve condition monitoring for cutting process by solving these problems.

In the chapter 2, a model-based approach monitoring for cutting forces and vibrations was proposed. Signals from acceleration sensors on the tool spindle were separated into the fluctuations of the acceleration in the tooth passing period and the high frequency vibration component to estimate the cutting force based on the model-based approach. In addition, the condition monitoring for cutting process was carried out by calculating two newly defined feature values of cutting force and vibration.

In the chapter 3, a method for monitoring the static displacement of the tool spindle was proposed. Table displacement was defined as the relative displacement between the motor encoder and the linear scale. Then, the estimated cutting force was calculated from the table displacement to estimate static displacement of the spindle. Finally, the estimated static displacement was used to estimate a more accurate cutting force based on the model of the tool spindle structure.

In the chapter 4, a method to achieve advanced modelling by using machine learning was proposed to identify the model parameters of the machine structure. Among the various machine learning methods, MLP was used to identify model parameters, and this provided more accurate cutting force estimation.

In chapter 5, the results achieved in this research of the condition monitoring for cutting process were summarized and the prospects for the future were described.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).