

# Sensorless Cutting Force Estimation in Ball-screw-drive System and Its Application to Chatter Avoidance

August 2017

Yuki Yamada

# 主 論 文 要 旨

報告番号	甲	第	号	氏 名	山田 雄基
主論文題名： <b>Sensorless Cutting Force Estimation in Ball-screw-drive System and Its Application to Chatter Avoidance</b> (ボールねじ送り駆動系におけるセンサレス切削力推定とびびり振動回避への応用)					
(内容の要旨) 近年、マスカスタマイゼーションに対応するため、生産システムの柔軟性とロバスト性に対する要求が一層高まっており、工作機械分野においては異常加工検知や加工最適化に必要な状態監視技術と、それに基づく安定化技術が求められている。状態監視において、低コストで持続可能性のある付加的なセンサを用いない切削力推定技術に対するニーズは高いが、推定精度・帯域の点で課題を残す。本研究は、ボールねじ送り駆動系を対象としたセンサレス切削力推定手法と推定切削力に基づきびびり振動を回避する安定化加工法の開発を目的とする。 第1章では、切削加工時における異常監視・回避技術と本研究の目的を示している。 第2章では、複数エンコーダを利用した2つのセンサレス切削力推定手法を提案している。マルチエンコーダ型外乱オブザーバを応用した切削力推定手法は、多慣性系の運動方程式に基づく推定手法であり、ステージ位置に応じて変動する剛性値に依存しない力推定を実現できる。モード分解型の切削力推定手法では、送り軸の運動を剛体モードと、機械要素間の相対運動に基づく振動モードの2つに分解し、各モード空間上で切削力推定を行う。 第3章では、切削力推定性能を評価するシミュレータと実験装置を説明している。また、切削力推定の誤差因子となる外力の位置依存性や、外力や位置/角度変動を波長領域で解析した結果に基づき、これらの補償方法を検討している。 第4章では、センサレス切削力推定における誤差因子の影響を評価している。具体的には、推定手法の違いや質量値の同定誤差、位相遅れ要素に起因する同期誤差、角度計測時の量子化誤差の影響をシミュレーションとエンドミル加工試験により評価している。上記の誤差因子を考慮した切削力推定システムを構築することにより、提案したマルチエンコーダベースの推定手法は、モータの電流参照値と回転角度を利用した外乱オブザーバを適用した従来手法よりも切削力の推定帯域が向上することを実験的に示している。 第5章では、モード分解型の切削力推定手法、特に振動モードでの切削力推定の有用性を評価している。回転一並進間の相対運動を利用することで、切削力の送り方向成分だけでなく、静止摩擦力を下回る直交方向成分も含めた切削力推定が実現できることを実験的に示している。 第6章では、推定切削力を応用したパラレルターニングのためのびびり振動監視/回避手法を提案している。提案手法は、びびり周波数と主軸回転数から求められる最適ピッチ角差で加工することによりびびり振動を回避する。推定切削力に基づきびびり周波数を計測することで、センサレスかつ実加工中にびびり振動回避ができることを実験的に示している。 第7章では、結論として本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について言及している。					

## Thesis Abstract

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> “KOU” <input type="checkbox"/> “OTSU” No. <span style="float: right; font-size: small;">*Office use only</span>	Name	YAMADA, Yuki
Thesis Title <div style="text-align: center; padding: 10px;"> <h3>Sensorless Cutting Force Estimation in Ball-screw-drive System and Its Application to Chatter Avoidance</h3> </div>			
Thesis Summary <p>In recent years, demand for flexibility and robustness of production system has further increased to respond to mass customization. In field of machine tool, condition monitoring and stabilization techniques based on it are required, which are indispensable to detection of abnormal cutting and process optimization. In the condition monitoring, there is great need for cutting force estimation technique, which is low cost and sustainable and never requires additional sensors. However, the estimation bandwidth and accuracy of the cutting force are remaining issues. In this research, sensorless cutting force estimation method for ball-screw-drive system and stabilizing machining method were proposed, avoiding chatter based on the estimated cutting force.</p> <p>Chapter 1 presents monitoring and avoidance techniques of abnormal cutting and shows the purpose of this research.</p> <p>Chapter 2 presents two sensorless cutting force estimation methods using multiple encoders. Cutting force estimation applying multi-encoder based disturbance observer is introduced based on dynamic equation of multi-inertia system, which is independent from stiffness value that varies depending on the stage position. In mode-decoupled estimation technique, motion of feed drive is decoupled into rigid body and vibration mode which is based on relative motion between the mechanical elements. Cutting force components are estimated in each modal space.</p> <p>Chapter 3 describes simulator and experimental setup for evaluating the cutting force estimation. Compensation method of error factors is discussed based on analysis result of them, such as position dependency of the external force, and variations of the external force, position and angle in wavelength domain.</p> <p>Chapter 4 presents evaluation results of the error factors in sensorless cutting force estimation. Specifically, difference of estimation methods, identification error of mass, synchronization error resulting from phase lag elements, and quantization error of angle measurement are evaluated based on the simulation and end milling tests. By constructing the estimation system considering above error factors, the proposed multi encoder-based estimation method increases the estimation bandwidth compared with the conventional estimation method applying disturbance observer using current reference and angle of motor.</p> <p>Chapter 5 describes validity of the mode-decoupled cutting force estimation especially in the vibration mode. It is possible to estimate both feed and cross-feed force components less than static friction force by utilizing the relative motion between the motor and the stage.</p> <p>Chapter 6 presents chatter monitoring and avoidance in parallel turning applying the estimated cutting force. In the method, the chatter is avoided by machining at optimum pitch angle difference, which is determined by chatter frequency and spindle speed. By measuring the chatter frequency based on the estimated cutting force, sensorless and in-process chatter avoidance is possible.</p> <p>Chapter 7 summarizes and concludes this research, including future prospects.</p>			