

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14291 号
------	---------------

氏 名 高幣 一樹

論 文 題 目

CNC工作機械のインプロセス情報を利用したミリングプロセスのモデルパラメータ同定
(Identification of model parameters for milling process by utilizing in-process data of CNC machine tools)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	社本 英二
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	梅原 徳次
委員	慶應義塾大学	理工学部	教授	柿沼 康弘
委員	中央大学	理工学部	教授	鈴木 教和

論文審査の結果の要旨

高幣一樹君提出の論文「CNC工作機械のインプロセス情報を利用したミリングプロセスのモデルパラメータ同定」は、産業界で一般に採用されるボールねじ送り系を搭載したCNC工作機械を対象とし、外乱オブザーバを用いた新しいパラメータ同定方法を提案している。実験的・解析的検討を通じてミリングシミュレーションに必要なプロセスパラメータとモーダルパラメータの同時同定を実現し得ることを明らかにしている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、CNC工作機械における切削加工の同定技術の概要について説明した。知的生産システムとしてのCNC工作機械がスマート工場において重要な役割を果たし、加工プロセスのデジタルツイン構築がプロセス最適化をはじめとする生産性の改善に資する手段であることを確認した。ただし、現実の加工プロセスの特性を把握するという同定作業において実用上の課題があることを述べた。先行研究の調査を行い、CNC工作機械システムが取得できるインプロセス情報のみを用いて、加工プロセスと機械ダイナミクスを表現するモデルパラメータを同定することは実用上有効な手段になることを見出した。

第2章では、加工プロセスと機械ダイナミクスの相互作用を表現したミリングプロセスモデルの構築を行った。加工プロセスのモデル化では刃先のジャンプ効果・多重再生効果・工具の回転偏心を切り取り厚さの算出過程に取り入れることで、精緻な切削力の表現が可能になった。また、ダイナミクスのモデル化では、加工時に工作機械の構造に作用する力として外乱力を定義した。工具-ワーク間で発生する切削力と外乱力を区別することで、外乱オブザーバによる推定や動力計による計測によって外乱力データを取得したときに含まれる振動構造物の動特性の影響を表現することが可能になった。さらに、当該モデルを用いて時間領域シミュレーションを実行するための入出力情報および計算過程の整理を行った。

第3章では、CNC工作機械に一般的に採用されているセミクローズド制御のボールねじ送り駆動系に対する外乱オブザーバを構築し、その推定性能の評価を行った。ボールねじ送り駆動系は多慣性系としてモデル化し、外乱オブザーバへの入力情報としてCNCサーボ信号に加え加速度センサ信号を与えた。提案する加速度センサ援用多慣性外乱オブザーバの検証のため、エンドミル加工を行い加工中に発生する外乱力を推定し、動力計による直接計測や、単慣性オブザーバおよびセンサなし多慣性オブザーバの推定性能と比較を行った。検証の結果、加速度センサを利用した多慣性外乱オブザーバは、その他のオブザーバよりも優れた周波数特性を有し、600Hz以下の周波数領域において、動力計と同等の外乱力推定性能を有することを確認した。動力計と比較して加速度センサは小型かつ安価であり、提案手法は産業的な観点から有益であることを確認した。

第4章では、ボールねじ送り駆動系を有する汎用的なCNC工作機械を対象として、ミリングプロセスのモデルパラメータ同定を検討した。第2章で構築したミリングシミュレーションと第3章で提案した外乱オブザーバを組み合わせ、ヒューリスティックなモデルパラメータ同定法を構築した。提案手法では、加工条件情報と外乱オブザーバによって推定される外乱力データのみを用いてモデルパラメータをヒューリスティックに推定する。エンドミル加工実験を実施し、600Hz以下のびびり振動が生じる系に対し外乱力を外乱オブザーバによって推定し、推定結果からモデルパラメータ同定を行った。検証実験の結果、提案手法により同定したパラメータを用いることで、動力計による実測値と類似度の高い外乱力をシミュレーションで表現することができた。切削試験やハンマリングを通じて従来法により同定されるパラメータではびびり振動の推定精度が低下することから、インプロセスデータを利用する提案手法の有効性が明らかになった。

第5章では、第4章で構築したヒューリスティックなモデルパラメータ同定法を発展させ、その高速化・高精度化の検討を行った。第一の改良では、第2章で構築した動的なミリングプロセスモデルを、最小二乗法が適用可能な線形形式へ変形した。第二の改良では、加工条件に主軸回転数変動を追加し、加工中に発生するびびり振動に時間的な変化を与えた。提案する線形モデルパラメータ同定法では、切削力をノミナル成分とびびり振動成分に分離し、加工プロセスパラメータとモーダルパラメータをそれぞれ区別して同定する。シミュレーションによる検証の結果、びびり振動が小さく切り取り厚さ変動に対して非線形効果が小さい状態量を選択的に用いることで、ヒューリスティックなモデルパラメータ同定法と比較して大幅に同定時間を短縮し、精度よくパラメータ同定できることを明らかにした。主軸回転数変動によってこの振動状態を意図的に発現させることで、パラメータ同定に有利な外乱力データを利用できることが示唆された。一方で、実加工検証では、パラメータ同定に適切な振動状態を発現できずに、同定精度が劣化する結果となった。プロセスの非線形性が同定精度を左右するため、非線形モデルの考慮や同定に有利な振動状態を探索する工夫が重要であることを明らかにした。この知見は今後の同技術の実用化に向けた研究において有益である。

第6章では、本研究で得られた成果について述べるとともに本研究の総括を行った。

論文審査の結果の要旨

以上のように本研究では、加工プロセスと機械ダイナミクスが連成する加工系におけるモデルパラメータをインプロセス情報のみに基づいて推定する新しい同定手法を提案し、その有効性を解析的・実験的に明らかにした。これらの同定方法並びに得られた結果は、高度な加工シミュレーション技術の産業応用を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である高幣一樹君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。