

# 主論文の要約

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)

氏名 **高幣 一樹**

## 論文内容の要約

切削加工は CNC 工作機械を用いて実現される主要な加工方法の一つであり、機械加工の基盤をなす。しかし、実際の切削加工では、びびり振動や工具摩耗などの要因によって寸法精度や加工面性状の悪化が引き起こされる。これを克服すべく、従来から加工プロセスの分析・監視技術やシミュレーション技術に関する数多くの研究がなされ、切削加工においても仮想空間で加工状態を管理しプロセスを最適化する試みが進められてきた。しかしながら、現実の生産現場でこれらの技術を適用する際には専用の計測機器や専門家による分析作業を要するという実用上の課題があった。本研究では、プロセス最適化に利用可能な切削加工のデジタルツインの構築を目的として、動的なミリングプロセスにおけるモデルパラメータの同定手法の開発と検討を行った。

第一に、ボールねじ送り駆動系を備える CNC 工作機械において加工中に発生する外乱力を推定するための外乱オブザーバを構築し、動力計との比較によりその推定性能を評価した。第二に、外乱オブザーバ技術と加工シミュレーション技術を融合したパラメータ同定手法の提案を行った。加工実験において、加工中の CNC 工作機械から取得できる情報のみを用いて同定を行い、提案手法における同定性能の評価と課題抽出を行った。第三に、パラメータ同定の実用化に向けて高速かつ高能率なパラメータ同定手法の提案を行い、その同定性能を実験的に検証した。

以下では本論文における各章の内容をまとめる。

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すことを示し、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得ることを見出した。

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または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、ボールねじによって駆動される機械テーブルに作用する外乱力を推定するために多慣性モデルの変形を行うことで外乱オブザーバを導出した。外乱オブザーバへの入力情報にはCNCサーボ信号に加え加速度センサ信号を与えた。

ここで構築した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の結果と比較を行った。さらに、単慣性オブザーバとセンサなし多慣性オブザーバの推定性能とも比較を行い、提案するオブザーバにおける多慣性モデルおよび加速度センサ援用の効果を検証した。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、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。周波数帯域をさらに向上するには、推定対象の帯域において高次の振動モードを再現できるようなモデルの修正が必要であると考えられる。

また、外乱オブザーバの慣性数が小さい場合や加速度センサの援用がない場合には、びり振動が発生する高周波帯域に対して十分な外乱力推定性能を得られないことを確認した。動力計と比較して加速度センサは小型かつ安価であるため、600Hz以下の送り駆動系

に対する外乱力を推定する場合に、加速度センサを援用する外乱オブザーバは産業的な観点から有益な手法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の検討を行った。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モデルパラメータ同定法を構築した。提案手法により、事前に設定されている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だけを用いて動的なミリングプロセスにおけるモデルパラメータの値をヒューリスティックに推定することができる。

エンドミル加工実験を実施し、600Hz以下のびびり振動が含まれる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。同時に、外乱オブザーバによる推定外乱力の代わりに動力計による実外乱力を参照する場合の同定も実施し、両者の比較を行った。その結果、加速度センサ援用多慣性外乱オブザーバを利用するパラメータ同定の結果が、動力計で直接計測した外乱力を利用して同定する場合の結果と同等であった。さらに、シミュレーションモデルにおいて、切削力を伝達する機械構造のダイナミクスを工具側およびワーク側にそれぞれ設定することで、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。加えて、このようなモデル化に基づいて、びびり振動を含む外乱力を参照することで、工具・ワーク間の加工プロセスを表すパラメータだけでなく、構造物の動的な特性を表すモーダルパラメータも同時に同定することができることが明らかになった。以上から、動力計などの高価なセンサを付加することなくインプロセスで動的なミリングプロセスのパラメータ同定ができることを確認した。

さらに、従来法である切削試験やハンマリング試験による同定結果との比較を行い、インプロセスデータを利用したモデルパラメータ同定の有効性について考察した。従来手法により同定したモデルパラメータの値をミリングシミュレーションに設定すると、加工プロセスと機械ダイナミクスの相互作用を伴う実際の外乱力を再現できなかった。一方で、提案手法による同定結果を用いると、工具とワークにそれぞれ外力(切削力と切削抵抗)が加わったときのダイナミクスの変化と、工具とワークの相互作用を伴う動的なプロセスの特性を反映したシミュレーションが可能であった。ゆえに、加工プロセスと機械ダイナミクスの相互作用を考慮しない従来法による同定と比較し、びびり振動中の外乱力を参照する同定が有効であることが明らかになった。

ただし、提案手法による同定結果から再現したシミュレーションは実測値が完全には一致していなかった。びびり振動を含めたミリングプロセスをより精度良くシミュレーションで再現するには、より高精度なモデル化が必要であると考えられる。

第5章では、第4章で構築したヒューリスティックモデルパラメータ同定法の実用化の

ため、同定法の改良を行い、その性能の評価と課題の検討を行った。ヒューリスティックモデルパラメータ同定法はヒューリスティック解を得るためにミリングシミュレーションを繰り返し実行する必要がある、解の最適性はパラメータの初期値に依存するという実用上の課題がある。本章における第一の改良では、第 2 章で構築した動的なミリングプロセスモデルをモデルパラメータについて線形化し、最小二乗法が適用可能な形式へ変形した。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。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することで、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別々に同定することができる。実用環境において工具-ワーク間の直接計測は困難であるという前提に立ち、提案手法では外乱力において工具側またはワーク側構造物の慣性力を補正することで、切削力と同等の力を同定に利用することができる。このように構築された線形モデルパラメータ同定法の性能をシミュレーション実験と加工実験の両面から評価した。

シミュレーション検証により、線形モデルパラメータ同定法では、ヒューリスティック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た上で、予めシミュレーションに与えた設定値と同等の値を推定できることを確認した。びびり振動による切り厚さ変動の影響を含んだ非線形効果の小さい外乱力データを用いることで、正確な同定を実現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。さらに、複数の条件での同定精度を比較し、非線形効果を伴うプロセスでは同定精度が低下することを確認した。また、びびり振動のないプロセスではプロセスとダイナミクスとの連成がないため、固有振動数および減衰比は同定できるが最大コンプライアンスは十分に同定できないことが明らかになった。

実加工検証では、主軸回転数変動下でのびびり振動を発現させたが、シミュレーション検証で確認したような十分な同定精度を得ることができなかった。1 回の変動周期の中でびびり振動の振幅に変動が生じたが振幅が十分に低減されなかったため、パラメータ同定に適切な振動状態を発現できなかったと考えられる。したがって、びびり振動の非線形が同定精度を左右するため、主軸回転数変動の条件を調整し、同定に有利な振動状態を探索することがパラメータ同定に重要であることを明らかにした。

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。

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した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、その有効性を検証した。提案手法により、汎用的な CNC 工作機械において、加工前後のデータ収集・分析作業や高価なセンサを必要とせずモデルパラメータが同定できることを

実証できた。一方で、実環境で正確な同定を行うには、現実の動的な加工プロセスを正確に表現するためにモデルを精緻化するとともに、同定に有利な外乱力データを抽出するための加工条件の選定が必要となる課題が明らかになった。本研究ではモデルパラメータ同定法の構築に着目したが、実用化においては CNC 工作機械システムに対する実装検討が必要である。今後、さらなる研究により提案手法の課題が解消し実用化が成されることで、本研究の成果が製造業の発展に貢献することを期待する。