

# 主論文の要約

論文題目 数値制御工作機械の高速・高精度化に関する研究  
(Study on speed and accuracy improvement of numerically controlled machine tools)

氏名 石崎 浩資

## 論文内容の要約

数値制御工作機械では、運動精度が数値制御の性能にも依存するため、高精度な運動を実現する高度な制御手法が求められる。また、加工効率の向上のため、より高速な運動を実現することも重要になっている。本研究では、数値制御工作機械の高速・高精度化を目的とした、「同期制御手法と制御パラメータの簡便な調整方法」についての研究開発、「機械の構造振動と軌跡誤差の抑制を両立する軌跡生成手法」について研究開発を行った。

第1章では、数値制御工作機械について説明し、高速・高精度化への制御系や軌跡生成処理の問題や課題について詳細に述べている。

第2章、3章では、「2台のモータの同期性能を向上させる制御手法とその制御パラメータの簡便な調整手法」についての研究開発について述べている。第2章では、まず、一般的に利用されているタンデム制御、マスタースレーブ制御や近年提案されているクロスカップリング制御といった制御手法について、同期誤差を抑制することが困難であるという同期性能の問題や制御系のパラメータの調整方法が難しく実用上の問題について述べている。

その後、提案するクロスカップリング制御の構成について述べ、モータの数式モデルを用いた伝達関数の解析により、提案手法が同期誤差を抑制可能であり、従来手法よりも優れた同期性能を持つことを示している。次に、一般的な制御系の性能やモータの特性を仮定した近似をもとに、提案手法の追従性能を表す追従伝達関数、同期性能を表す同期伝達関数の低次元化を行い、制御系のパラメータが追従性能、同期性能に与える影響を明らかにしている。最後に、低次元化した伝達関数をもとに、提案手法の制御パラメータの簡便な

調整手法を述べている。第 3 章では、2 台のリニアモータを用いて行った提案手法の評価結果について述べている。まず、制御系のパラメータの調整方法の有効性を検証するため、伝達関数の解析とステップ応答のシミュレーションを行っている。その結果、第 2 章で導出した近似伝達関数とそのステップ応答が、元の追従伝達関数、同期伝達関数の伝達関数とそのステップ応答にそれぞれよく一致していることから、提案するパラメータの調整方法の有効性を示している。次に、感度関数からノミナル性能について提案手法の安定性を評価し、提案手法がタンデム制御と比較し、同程度の安定性をもちうることを示している。最後に、提案手法と従来手法の同じ指令を与えた場合の追従誤差、同期誤差の比較実験を行い、提案手法が、従来手法と同程度の追従誤差、従来手法よりも小さい同期誤差となったことから、提案手法が追従性能を低下させず、同期性能を向上させることを示している。一方、安定性の詳細な検討が今後の課題である。

第 4 章、5 章では、「ガントリーテーブルなどの 2 台のモータを用いる軸の同期制御」についての研究開発について述べている。ガントリーテーブルのような 2 台のモータが物理的に結合した機械の制御系が、ベースのねじり振動モードにより不安定化する問題がある。第 4 章では、このベースのねじり振動に起因する問題を解決する新たな同期制御手法を提案している。提案手法は、ベースのねじり振動の制御系への影響を抑制し、制御系の安定化を行う。まず、ベースのねじり振動を考慮したガントリーテーブルのモデル化を行い、そのモデルを用いて提案する制御系の特性を明らかにしている。特に、ねじり振動を抑制する制御器のパラメータがねじり振動の減衰比に影響することを示し、減衰比から制御器のパラメータを調整する方法を提案している。第 5 章では、リニアモータ駆動のガントリーテーブルを用いて行った提案手法の評価について述べている。まず、制御パラメータの調整方法の有効性を検証するため、制御パラメータを変化させたときのベースのねじり振動を測定している。その結果、減衰比の予測が実測の結果とよく一致することから、第 4 章で示した制御パラメータの調整方法の有効性を示している。つぎに、実験により、従来手法と同じ追従性能を持つように提案手法を調整した場合に、従来手法の場合はベースのねじり振動が発生したが、提案手法の場合ではねじり振動が抑制され安定した運動を行えることを示している。このことは、提案手法がベースのねじり振動の影響を抑制し、制御系を安定化させることが可能であり、より追従性能の向上が実現できうることを示している。また、今回は、単一の振動モードのみを考慮したため、複数の振動モードや異なる振動モードを考慮したときの検討が今後の目標である。

第 6 章、7 章では、一般的な移動平均フィルタによる加減速処理を対象に、フィルタパラメータの最適化と指令速度の最適化を行い、機械の構造振動の抑制と軌跡誤差の制御を両立可能な新たな軌跡生成手法の研究開発について述べている。第 6 章では、まず、一般的な軌跡生成手法について説明し、加減速処理が、機械の振動抑制などに必要不可欠であること、軌跡誤差を発生させること、について述べ、従来手法では、機械の振動抑制、軌跡誤差の制御が両立できないことを述べている。つぎに、加減速処理に用いるフィルタの周波

数特性を示し、フィルタパラメータの調整により振動抑制を行う方法について説明している。その後、軌跡誤差と、加減速処理に用いるフィルタ、運動する軌跡形状や送り速度との関係を定式化している。この結果を基に、軌跡誤差の許容値（最大軌跡誤差）を満たすように、関係式を解析的に解き速度指令の最適化を行う軌跡誤差制御手法、数値計算を用いた速度指令の最適化を行う軌跡誤差制御手法、の 2 つの手法を提案している。前者の誤差制御方法では、円弧での軌跡誤差を近似により解析的に解を求めることが可能な形への定式化、および円弧などを含む軌跡形状に前述した軌跡誤差の関係式を適用するための定式化を行い、任意の軌跡形状、任意の軌跡誤差許容値への適用方法について述べている。後者の方法では、軌跡誤差の関係式から、軌跡誤差を抑制するための速度減少が必要な時間を最小にするための、ブロック分割という方法を提案している。さらに、ブロック分割を任意の軌跡形状に適用する方法について述べている。第 7 章では、提案手法を、単純なコーナのみ軌跡、円弧を含む軌跡、複雑な曲線形状を含む軌跡などの様々な軌跡に対して、シミュレーション、実験により評価を行った結果について述べている。提案手法が、シミュレーションを行ったすべての軌跡に対して設定した軌跡誤差の許容値以下で運動する軌跡を生成することを示している。さらに、実験により、生成した軌跡で運動させたときに、目標の周波数の振動が抑制されることを示し、機械の振動抑制と軌跡誤差の制御を同時に実現できることを示している。

第 8 章、9 章では、加減速処理に使用するフィルタの最適化と指令軌跡形状の補正を行い、機械の構造振動の抑制と軌跡誤差の抑制を両立する新たな指令生成手法について述べている。本手法は、第 6、7 章でも対象とした一般的な移動平均フィルタによる加減速処理を対象にしている。第 8 章では、まず、従来提案されている指令軌跡の補正手法が一般的な軌跡に適用できない、または、軌跡誤差の抑制効果が低い問題について、その原因を明らかにしている。次に、軌跡誤差と補正の関係を定式化および数値計算により示し、従来手法が解決できていなかった問題を解決し、任意の軌跡に対して軌跡誤差を抑制する指令軌跡の補正方法を提案している。最後に、この指令軌跡補正をリアルタイムに行うアルゴリズムも提案している。第 9 章では、提案する軌跡補正手法の評価を、単純なコーナのみ軌跡、円弧を含む軌跡、複雑な曲線形状を含む軌跡などの様々な軌跡に対して実験で行い提案手法の評価を行った結果について述べている。実験結果では、提案手法が事件を行ったすべての軌跡に対して、サイクルタイムの増加なしに、機械の振動抑制と軌跡誤差の抑制を実現できており、このことから、提案手法が任意の軌跡に対して適用可能であり、サイクルタイムの増加なしに、機械の振動抑制と軌跡誤差の抑制可能な軌跡生成手法であることを示している。ただし、軌跡補正を行った箇所付近で送り速度が指令値を超過すること、また、軌跡誤差許容値の設定ができないことが明らかとなり、これらの解決が今後の課題である。

第 10 章では、上記の第 2 章から 9 章までに得られた各研究の成果、結論をまとめ、今後の展望について述べている。