

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	Kazuhiko Tsutsui
氏名	筒井 和彦
学位の種類	博士 (経営情報科学)
学位記番号	博 甲 第 38 号
学位授与	令和 3 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目	CNC におけるサーボ・主軸制御の高性能化に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 中條 直也 ¹ (審査委員) 教授 石井 成美 ² 准教授 梶 克彦 ¹

論文内容の要旨

CNC におけるサーボ・主軸制御の高性能化に関する研究

昨今、急激に進行する円高、新興国の台頭、多品種少量生産、短くなる製品寿命サイクル、省エネや環境への配慮など、CNC システムを用いる工作機械業界を取り巻く環境はより競争が激化している。特に生産性を上げるための、リードタイム(素材投入から製品出荷までのトータル所要時間)の短縮に対する要求は、年々厳しさを増している。

このような中、CNC 工作機械に求められる性能は、大きく高速・高精度加工を実現する高能率加工と、実際に加工している以外の段取り時間の短縮やダウンタイムの削減などに関する非切削時間の短縮を目的とする高能率システムの構築が挙げられる。

本研究では、こうした背景を踏まえて CNC システムを用いる工作機械におけるサーボや主軸といった駆動系システムに求められる要求や課題について整理し、それらを解決するために手法について提案し、その効果の検証を実施した。

1. 研究の背景

(1) CNC 工作機械における高能率加工に向けた取り組み
従来から加工能率を高めるために、切削加工の高速化、主軸の高速化、送り軸の高速化等の研究開発が行われており、加工精度に関してはこれまで、送り駆動系の高精度化、主軸の高精度化、制御系の高精度化等の研究開発が多数行われてきた。また、サーボ制御技術についても多くの研究

がされているが、その多くが工作機械の構造からくる動剛性特性やボールねじやガイドの摩擦特性により発生する変位メカニズムに対して如何に最適なサーボパラメータをチューニングするかといった観点のものが中心であった。しかしながら、工作機械の構造やガイドの摩擦モデルは千差万別でありパラメータチューニングだけで加工精度を改善するには限界がある。

なお送り軸の高速化は、主軸制御においても技術的にクリアすべき課題を多く生んでいる。例えば主軸モータ回転数の向上と、それに伴う主軸剛性、低発熱化といった課題が挙げられ主軸ヘッドに使用されるベアリングに関する研究や主軸ヘッドの剛性に関する評価や研究も多く行われている。また、この主軸モータを効率的に制御するための研究も多く、主軸制御の高性能化・ハイゲイン化も工作機械の高速化のための大きな技術的課題となっている。

(2) CNC 工作機械の複合化 — 非切削時間の短縮 —

また、昨今のものでづくりの現場においては、限られた工場内のスペースの中で生産変動に柔軟に対応して、必要な物を、必要なときに、必要な量だけ供給できる生産システムへの変革が急速に進んでいる。このような状況の中、従来の旋盤やマシニングセンタといった代表的な工作機械に加え、一台の機械で、様々な加工を可能とする複合加工機といった機械が急速に注目を集めている。複合加工機は、旋盤と、フライス、穴あけ、タップ加工などを行う 5 軸制御マシニングセンタの両方の機能を併せもち、複数台の旋盤やマシニングセンタの工程を 1 台に集約できる。これにより、工場内の省スペース化はもちろんのこと、加工

1 愛知工業大学 情報科学部 情報科学科 (豊田市)

2 愛知工業大学 経営学部 経営学科 (名古屋市)

と加工の間の段取り替え時間の大幅な削減、段取り替えにより生じる加工精度の悪化を抑制し、高精度化にも寄与することが期待される。

しかしながら、複合加工機は一台の機械で数多くの切削加工を可能とし、特に段取り時間削減といった非切削時間の短縮に大きく貢献する一方、機械を稼働させるためのサーボモータ制御軸の増大や、主軸ヘッドの多軸化など駆動軸数が大幅に増大し、機械構造が複雑化するため、従来のマシニングセンタや旋盤といった専用加工機と比較して、その機械剛性が劣るという課題も発生している。

2. 研究の狙い

このような課題に対して、切削外乱に負けない高剛性なサーボ・主軸の制御系は不可欠であり、かつ、高速な指令に追従するための高応答な制御系（ハイゲインシステム）の構築が不可欠である。

そこで本論文では、サーボ・主軸のハイゲイン化を実現するための手法として、サーボ・主軸の制御をCNC側で一括して行うのではなく、アンプ側で実施する分散化システムの構築についてその効果と課題に関する研究を実施した。具体的には、LSIの進化と合わせてサンプリング時間の最小化、無駄時間の排除を追求して制御性能を最大限に上げるための研究を実施した。

また、高能率加工の追求過程で新たに顕在化してきた課題もある。一つは、高速化した主軸モータの発熱による特性変化であり、二つ目はハイリードボールねじの普及に伴いボールねじの発熱を抑えるために採用されている軸芯冷却機構による精度悪化である。本研究では、これらの新たに発生した課題に対し、制御対象のモデル化による補正機能を提案し、その効果についても研究した。

これらの研究により、サーボ・主軸制御のそれぞれを飛躍的に高応答化（ハイゲイン化）できるようになったが、使われるモータ性能の違いにより、サーボによる送り軸と主軸の応答性を完全に一致させることはできない。そこで本研究では、分散制御化したサーボアンプと主軸アンプ間のアンプ間補正手法を提案し、その効果についても検証を実施した。

3. 本研究の構成

図1にCNCにおけるサーボ・主軸制御の基本構成と高性能化に関する各種研究要素との関係箇所を示している。まず、論文の第二章で、サーボ・主軸の高速・高応答化の基本となるハイゲイン化を実現するためのサーボ・主軸アンプでの分散制御システムの構築と、分散化の課題を解決する高速ネットワークについて提案した。次に第三章で、この分散制御の性能を最大限に向上させる制御アーキテクチャについて研究成果を示した。更に第四章で、機能の多様化が急速に進む主軸モータ制御に対して、その性能・特性・機能性を飛躍的に向上させる主軸の常時位置ループ化手法の提案とその研究成果について示し、第五章では、複

雑なサーボ送り軸の摩擦のメカニズムをモデル化し、摩擦により発生する誤差を最小化する手法、並びに、主軸に使用される誘導電動機の温度による特性の影響を抑制し、最適な出力を制御する手法を提案して、その効果を検証した。最後に第六章で、主軸とサーボの応答性の差を補完して同期性能を最大限に引き出すアンプ間補正とそれを実現するために高速・高信頼性ネットワークについてのシステム提案とその効果を検証した。

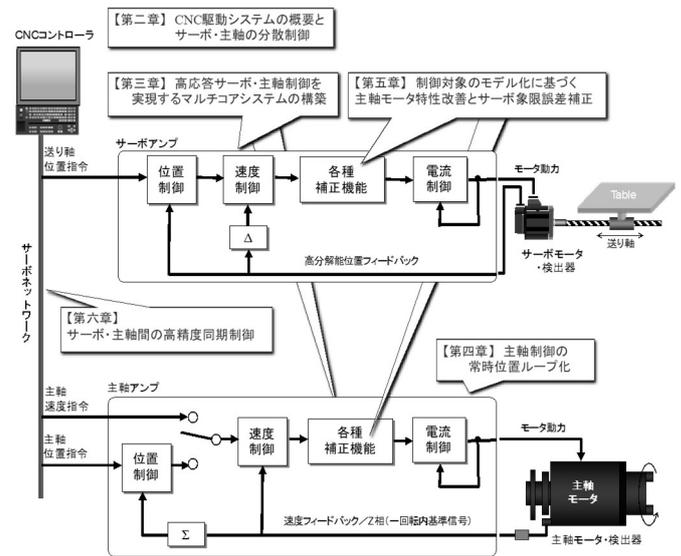


図1 CNCシステムにおける本研究のポイント

4. 結果

この研究により、CNC工作機械に求められる高速・高精度加工を実現する高能率加工や、段取り時間の短縮やダウンタイムの削減など非切削時間の短縮を目的とする高能率システムの構築に対して、大きく貢献することができるサーボ・主軸の制御手法を確立することができた。

また、ここで研究したアーキテクチャや高性能化の取り組みは、機械の状態を監視したり異常を予知したりする上で有益であり、今後注目されていくスマートファクトリの実現においても大きく貢献が期待できる。

以上

論文審査の結果の要旨

筒井和彦君の提出した博士論文「CNCにおけるサーボ・主軸制御の高性能化に関する研究」は、FA機器の高性能化について、論文提出者自身が行った五つの研究を中心として考察を行った結果をまとめたものである。本論文は全七章から構成されている。

第一章では、研究の背景について述べられている。急激な為替変動、新興国の台頭、多品種少量生産、短くなる製品寿命サイクル、省エネや環境への配慮など、CNCシステムを用いる工作機械業界を取り巻く環境はより競争が激

化している。特に生産性を上げるための、リードタイム(素材投入から製品出荷までのトータル所要時間)の短縮に対する要求は、年々厳しさを増している。

このような中、CNC 工作機械に求められる性能は、大きく高速・高精度加工を実現する高能率加工と、実際に加工している以外の段取り時間の短縮やダウンタイムの削減などに関する非切削時間の短縮を目的とする高能率システムの構築が挙げられる。

本研究では、こうした背景を踏まえて CNC システムを用いる工作機械におけるサーボや主軸といった駆動系システムに求められる要求や課題について整理し、それらを解決するために手法を提案し、その効果の検証を実施した。

第二章では、サーボ・主軸の高速・高応答化の基本となるハイゲイン化を実現するためのサーボ・主軸アンプでの分散制御システムの構築と、分散化の課題を解決する高速ネットワークについて提案し、その効果を検証した。

第三章では、この分散制御の性能を最大限に向上させる制御アーキテクチャについて提案を行い、ASIC 開発、DSP コア搭載、マルチコア化などのハードウェア開発とシステム実装によって、その効果を検証した。

第四章では、機能の多様化が急速に進む主軸モータ制御に対して、その性能・特性・機能性を向上させる主軸の常時位置ループ化手法の提案を行い、その効果を検証した。

第五章では、複雑なサーボ送り軸の摩擦のメカニズムをモデル化し、摩擦により発生する誤差を最小化する手法、並びに、主軸に使用される誘導電動機の温度による特性の影響を抑制し、最適な出力を制御する手法を提案し、その効果を検証した。

第六章では、主軸とサーボの応答性の差を補完して同期性能を最大限に引き出すアンプ間補正とそれを実現するために高速・高信頼性ネットワークについてのシステム提案を行い、その効果を検証した。

第七章では、まとめと今後の課題について述べられている。CNC 工作機械に求められる高速・高精度加工を実現する高能率加工や、段取り時間やダウンタイムなど非切削時間の短縮を目的とする高能率システムに対して、提案するサーボ・主軸の制御手法がその性能向上に大きく貢献することを示した。ここで研究したアーキテクチャや高性能化の取り組みは、機械の状態監視や異常予知にも有益であり、今後のスマートファクトリの実現においても貢献が期待できる。

以上に述べたように、審査委員会の委員 3 名が論文執筆者から提出された論文原稿の内容を詳しく審査した結果、本論文は博士(経営情報科学)の学位を受けるに十分な内容を持ち、博士学位論文として受理するに値するものであるとの結論に達した。