

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

筒井 和彦

2021 年 2 月

CNCにおけるサーボ・主軸制御の 高性能化に関する研究

筒井 和彦

内容梗概

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。

このような状況の中、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。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。一方、複合加工機では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、その機械剛性が劣るという課題も発生している。

このような課題に対して、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、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、制御性能を最大限に上げるためのサーボ・主軸アンプによる分散制御システムについて研究を実施した。

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。そこで本研究では最後に、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。

目次

第一章 序論

- 1.1 CNC 工作機械における高能率加工に向けた取り組み
- 1.2 CNC 工作機械の複合化 — 非切削時間の短縮 —
- 1.3 IoT 時代における CNC 工作機械の動向
- 1.4 研究の狙い
- 1.5 論文の構成

第二章 CNC 駆動システムの概要とサーボ・主軸の分散制御

- 2.1 CNC 駆動システムの概要
- 2.2 CNC システムの基本構成
- 2.3 サーボ・主軸制御の集中処理の課題
- 2.4 サーボ・主軸制御の分散処理の構築
- 2.5 高速・光ネットワークの開発

第三章 高応答サーボ・主軸制御を実現するマルチコアシステムの構築

- 3.1 サーボ・主軸制御の基本構成とその特性
- 3.2 サーボ・主軸制御系アーキテクチャのロードマップ
- 3.3 マルチ CPU による電流ループ処理の分散制御
- 3.4 ハードウェア電流制御によるオーバーサンプリング処理
- 3.5 モータトルクリップル補正
- 3.7 高応答サーボ制御に対応した検出器の構築
- 3.8 サーボ制御における効果検証

第四章 主軸制御の常時位置ループ化

- 4.1 これまでの主軸制御方式と課題
- 4.2 主軸制御を常時位置ループ化する場合の課題
- 4.3 常時位置ループ化のための追従遅れ補償制御
- 4.4 常時位置ループ化のシミュレーションによる効果検証
- 4.5 常時位置ループ化の効果検証

第五章 制御対象のモデル化に基づく主軸モータ特性改善とサーボ象限誤差補正

- 5.1 力学モデルに基づいた象限突起誤差補正
- 5.2 主軸サーミスタによる最適制御方式

第六章 サーボ・主軸間の高精度同期制御

- 6.1 これまでの同期制御方式の課題
- 6.2 アンプ間補正制御の構築
- 6.3 アンプ間補正のシミュレーション検証
- 6.4 アンプ間補正の効果検証
- 6.5 アンプ間補正の今後の展開
- 6.6 提案する手法に関するまとめ

第七章 結言

謝辞

参考文献

第一章 序論

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。

本章では、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述べた上で、それらを解決するために行った研究のポイントと本論文の構成について述べる。

1.1 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^{[1]~[3]}、主軸の高速化^{[4]~[6]}、送り軸の高速化^[7]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^{[9]~[11]}、主軸の高精度化^{[12]~[16]}、制御系の高精度化^{[17]~[25]}等の研究開発が多数行われてきた。

この中でも送り軸の高速化に関しては、ボールねじのハイリード化が工作機械の高速化に大きく貢献している。従来 8mm~10mm であったボールねじピッチも最近では 16mm~20mm とハイリード化した工作機械が主流となってきており、送り軸の速度も 60m/min と従来から 2 倍の速度、加速度では 1.5G といった性能を実現できるようになってきている。更に、90m/min の送り速度を実現している例もある^[26]。

一方で、ボールねじのピッチをハイリード化することで、ボールねじの摩擦による発熱が課題となり、これを冷やすための軸芯冷却等も必要になってきており、これが新たな加工精度向上のための一つの大きな課題となってきている。

また、送り軸の高速化の取り組みとしては、ボールねじと回転型サーボモータの組み合わせに替わり、リニアサーボモータが使用されるケースも出て来ている^{[27]~[30]}。リニアサーボを用いた工作機械により送り速度が 120m/min、加速度が 2G の高速・高加速

度性能を持つ機械や、3m以上の長ストロークでありながら100m/min以上の高速性を持つ機械なども実用化されてきている^[30]。しかしながら、ボールねじ駆動と違いリニアモータ駆動の場合には切削反力がダイレクトにサーボ制御系に入ってくるため安定して剛性の高い制御系を構築するためには、サーボ制御のハイゲイン化がより一層重要となってくる。

このような工作機械の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^{[17]~[25]}。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のには限界がある。

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^{[12]~[16]}。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^{[31]~[38]}、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。

1.2 CNC 工作機械の複合化 — 非切削時間の短縮 —

昨今のもの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^{[39]~[54]}。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。そのため、これら複雑化した機械を CNC からの指令に応じてサーボモータや主軸モータを制御し、高い加工精度を実現するためには、サーボ・主軸制御の高速・高応答な制御性能がより重要となっており、かつ、一台の機械での様々な加工を実現するために、柔軟、かつ、ロバストな新しい制御手法の確立も必須となっている。

特に主軸モータには、機能・性能は従来の速度制御だけの制御モードから、位置制御性能、他のサーボ軸との同期補間制御性能、サーボ送り軸同様の高精度化など、機能・性能の大幅な向上が求められている。

1.3 IoT 時代における CNC 工作機械の動向

工作機械業界においては、2000 年代前半にはすでにインターネットを活用した保全サービスなどが大手メーカーを中心に進められているが、ユーザの姿勢はこれまでは積極的であったとは言えず、こういった保全サービスも十分に普及しているとは言えない。これは情報漏洩リスクの観点から、ユーザが自社の設備を外部ネットワークに接続することに抵抗感を持っているためである^[55]。

そのような中、外部ネットワークに情報を流すことがなく、工作機械の CNC システム内で、消耗品である主軸工具の損傷の回避のための加工方法や寿命管理といった機械の知能化に関する研究も活発に行われてきた^{[56]~[59]}。

一方、三菱電機は e-F@ctory コンセプトとしてエッジコンピューティングによる AI 解析等により「見える化：可視化」「観える化：分析」「診える化：改善」を提唱^{[60]~[62]}しており、また昨今では、CNC やサーボアンプにも搭載可能なコンパクトな AI などの技術^[63]も実用化されてきており、CNC 工作機械単体への適用も期待できる。このようなケースでは、工具の予知保全だけでなく、工作機械自体を構成するパーツで、かつ、加工の高速化に伴い寿命が懸念されるボールネジやベアリングといった機構部品の寿命予知や異常監視も工作機械の付加価値を追求する上で、大きな要素となりうる。この場合現状は、高速サンプリングされ、かつ、高精度なデータが必要となるため、外部に加速度センサや電流センサを用いて進められている。しかしながら、サーボアンプや主軸アンプの処理するアンプ内部の電流や速度、位置データが高速、かつ、高分解能で処理

できれば、センサレスで工作機械を智能化することができコストも削減できるため、大きな付加価値を持つことになる。なおこの場合には、高速な定周期でサーボや主軸制御を実施しながら、アンプ内で処理した高分解能・高速サンプリングデータを上位側に渡すためのネットワーク処理も重要となる。

なお、将来的にはセキュリティー技術も確立されることが期待され、上位系との情報連携やビッグデータを活用した加工精度向上のための AI 診断や、稼働監視、周辺ロボットとの連携など、求められるニーズはより更に高度化して行くことが予想される。この場合、工作機械の制御を司る CNC コントローラの高性能化に加え、サーボや主軸などの駆動系システムのインテリジェント化が益々期待されることが予想される。

1.4 研究の狙い

上述のように、工作機械の加工能率向上や高精度化のために多くの研究が行われ、その実現手段として、送り軸ではハイリードのボールねじの適用やリニアサーボモータの適用などが進んできた。また、主軸モータでは高速化やモータ発熱によるメカ変位の及ぼす加工精度への影響などが研究されてきた。しかしながら、こうした高速加工などの高能率加工の実現においては、メカ機構の改善だけでは不十分であり、駆動軸であるサーボや主軸の制御性の改善が担う役割は大きい。また、複合加工機の出現で機械剛性は、従来の専用機と比較してその軸数の多さやメカ構造の複雑化の理由により、弱くなる。このような機械に対して、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。

また、近年の半導体技術や LSI の発展のスピードは目覚しく、この技術をしっかり活用し、工作機械の駆動系の制御技術に活用していくことが、機械の構造による改善、加工技術の改善以上に効果を上げることが期待できる。

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。

多くの CNC システムでは、サーボや主軸の制御は、CNC コントローラ側で集中制御されることが多く、ネットワークを介して接続されるサーボアンプや主軸アンプでは単なる電力増幅器、もしくは、電流・電圧変換器として使われることが多い。これは、CNC

システムでは、各送り軸の同期性や補間制御、主軸モータとサーボモータの同期加工などが必要であり、ネットワークを介してそれらを別の CPU でそれぞれ制御すると処理が複雑になるといった制約があるからである。サーボの制御ループをコントローラとアンプで分けて行う（ある意味これを分散制御と呼ぶケースもある）手法において、これを如何に安定にするか、あるいは、デジタル制御するに当たりそのサンプリング時間などの無駄時間に対する影響に関する研究も数多く行われてきた[64]~[72]。

しかしながら、昨今の半導体の進化のスピードは目覚しく、CPU での制御処理の高速化の可能性は飛躍的に上がってきている。一方、ネットワークについては高速化が進んではいるものの、CPU や ASIC といった IC の処理速度と比較する大きな制約となるため、サーボ・主軸における高応答制御を実現する上では、制御ループ内を分散せずに、サーボ・主軸制御をアンプの中で一括制御し、CNC コントローラから分散する制御手法に着目した。これにより、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。なお、工作機械の多軸制御や複合加工機能を実現する上で発生するこの分散制御のデメリットを解決するため、同期性を確保した高速ネットワークを有する分散制御システムについて提案し、分散制御のメリットを最大限に発揮するための手法をいくつか実施した。

また、ハイリードボールネジやリニアサーボの出現による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[73]~[77]。本論文では、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記載する。

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。こういった応答の遅い軸に対して他の軸を追従させる制御や多軸制御性の向上に関する研究もある[78]~[83]が、実際の切削加工においてはサーボと主軸の同期性が必要な「ねじ切り加工」や「同期タップ加工」といった代表的な加工モードにおいて、応答性が低い主軸モータにサーボ軸が合わせて動く形で制御系が構成されており、この場合、精度を保ったまま加工速度を上げたり、加減速時定数を短縮したりなどできないなど、加工時間短縮や加工精度向上において制約があった。

そこで、本論文では最後に、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、その効果について検証を実施した。

1.5 論文の構成

本論文は、以下の7章から構成される。また、図1.1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。

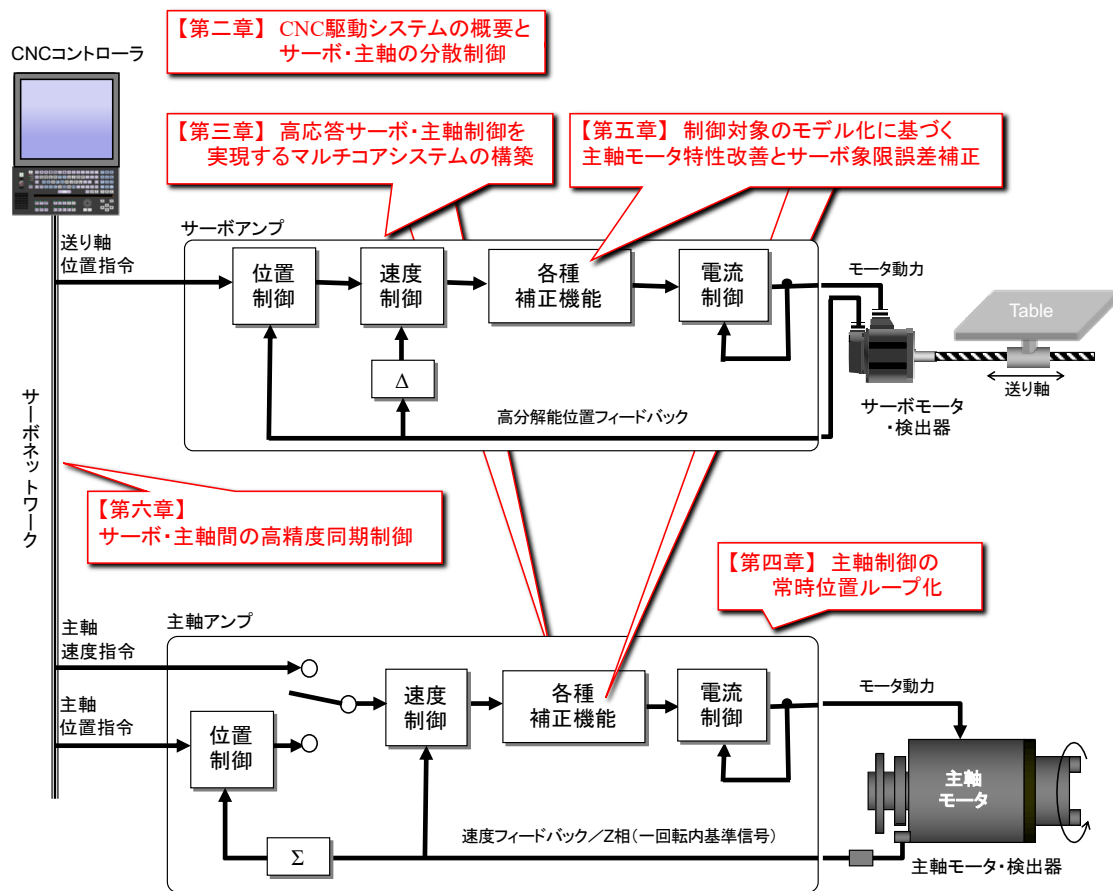


図 1.1 CNC におけるサーボ・主軸制御の高性能化に関する研究

第一章では、本研究の背景と目的について述べた。

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・主軸アンプでの位置・速度・電流制御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、研究成果を記載する。

なお、本章で記述する研究内容は、CNCにおけるサーボ・主軸制御に関して、図 1.1 に示す制御構成の全体像に言及するものである。

第三章では、この分散制御の性能を最大限に向上させるサーボ・主軸の制御アーキテクチャについて研究成果を示す。独立した主軸・サーボそれぞれがコントローラからの指令に高速・高応答で追従し、かつ、切削外乱などの影響を受けにくいハイゲインシステムとするためのアーキテクチャとして電流のオーバーサンプリング機能やモータが持つトルクリップル補正を有するマルチコアシステムを提案し、その研究成果を記載する。

なお、本章で記述する研究内容は、図 1.1 に示す制御構成のうちサーボアンプで実施するサーボモータ駆動軸の制御、主軸アンプで実施する主軸モータ駆動制御の処理を実行する制御アーキテクチャーに関するものである。

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す。

なお、本章で記述する研究内容は、図 1.1 に示す制御構成のうち主軸アンプで実施する主軸モータ制御プロセス、および主軸モータの制御手法に関するものである。

第五章では、工作機械における加工性や生産性向上を実現させるため、複雑なサーボ送り軸の摩擦のメカニズムをモデル化し、方向反転時に発生する象限突起誤差を最小化する手法、および、主軸に使用される誘導電動機（IM モータ）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、その効果を検証する。

本章で記述する研究内容は、図 1.1 に示す制御構成のうちサーボアンプや主軸アンプ内で実施する高精度化・高速化を実現するための機械やモータ特性を補正する補正機能に関するものである。

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とその効果を検証する。

なお、本章で記述する研究内容は、図 1.1 に示す制御構成のうちアンプ間のネットワークとそれを活用した主軸アンプとサーボアンプ間で実現する機能に関するものである。最後の第七章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べる。

なお図 1.2 に、本研究での技術要素の体系図を示す。第二章、第三章で紹介する分散制御や、マルチコアシステムは、工作機械におけるサーボ・主軸制御の土台となる基本

制御性能の向上に大きく貢献する。特に5軸加工機や複合加工機において顕著となる制御軸数の増加による機械剛性の低下に対してのロバスト性向上や、CNCの演算負荷増大を抑制する上で大きく貢献する。

これらの基本性能の向上を土台に、更なる高速・高精度加工の追求を目指し、第四章および第五章では、主軸モータ制御に特有の課題に対しての性能向上に関する取り組みであり、第五章の象限誤差改善に関しては、超精密加工などの追求において課題となるサーボ制御の性能向上に関する取り組みとなっている。

最後に、第六章でこれらの改善を土台として、更に、ねじ切り加工や同期タップ加工のような複合加工においてニーズが高まるサーボ・主軸の同期精度の追求に関する研究をまとめている。

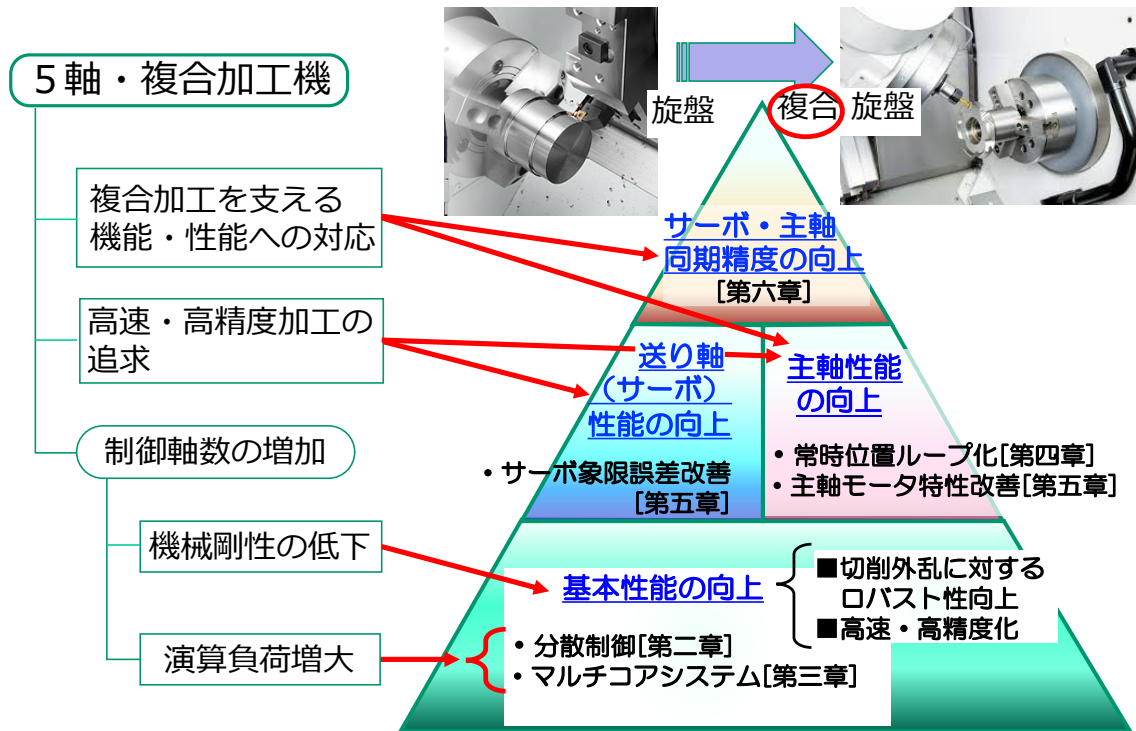


図 1.2 本研究の技術体系

第二章 CNC 駆動システムの概要とサーボ・主軸の分散制御

本章では、CNC システムにおけるサーボ・主軸制御の分散制御について考察し、分散制御を採用する上でポイントとなるネットワークの高速化を実現する手段と効果について説明する。

2.1 CNC 駆動システムの概要

CNC システムは、ユーザが生成する加工プログラムに応じて機械座標を構成する送り軸や主軸（工具）の位置・速度の指令を生成する CNC コントローラ、実際に送り軸や主軸を動かすサーボモータや主軸モータなどのアクチュエータ、そして、そのアクチュエータに電力を供給する電力変換器であるサーボ・主軸アンプ、最後に機械の稼働部やモータの位置・速度をフィードバックするエンコーダやリニアスケールなどの検出器の大きく 4 つのコンポーネントで構成されている。

工作機械の制御全体を司る頭脳に当たるのは数値制御装置と呼ばれる CNC コントローラであるが、このコントローラは主に G コードと呼ばれる工具の加工経路や工具の送り速度、工具の回転数が記述された加工プログラムを逐次解析し、各送り軸の単位時間当たりの移動量を生成する。また、切削条件に応じて主軸モータの回転速度の指令値を生成する。但し、これらの CNC コントローラでの制御はオープンループであり、実際の機械の軌跡や位置のフィードバックが本当に正しい位置にあるかどうかの制御は実施していない。

一方、工作機械に求められる性能は、如何に短時間で重切削時の加工反力（切削外乱）や機械摩擦や機械剛性の影響を最小限に抑え、ミクロンメータ、あるいはナノメートルの切削精度を実現するかであり、コントローラが生成した指令に対し、実際の機械やモータの位置や速度を高速・高精度に追従させるかがポイントとなる。つまり、CNC システムに求められる大きな目的の一つが、高応答フィードバックループの構築となる。このフィードバックループは CNC コントローラ／サーボ・主軸アンプ／モータ／検出器のシステム全体で構築しても、サーボ・主軸アンプ／モータ／検出器の CNC コントローラを除いたシステムで構築してもよいが、どの構成を選ぶかに応じて、そのコンポーネント毎に求められる性能やコンポーネントを繋ぐインターフェースの設計思想が大きく変わってくる。但し、高応答なフィードバックループを構築する上で、最も重要なポイントがループ内の無駄時間と処理サイクル時間の最小化である。無駄時間とはルー

ループ内の制御処理時間の速さ、実際の機械やモータの位置に対してループ内で処理されるまでの時間であり、CNC コントローラ／サーボ・主軸アンプ／モータ／検出器のそれぞれのコンポーネント間のインターフェースの通信周期の速さがシステムを設計する上で重要な技術となる。

ここで、サーボ・主軸アンプとモータは動力線での接続となるので一対一で配線されるが、CNC コントローラとサーボ・主軸アンプの間はシリアルデータの通信となるため、CNC コントローラ 1 つに対し、複数のサーボ・主軸アンプが一本のネットワークで配線される。したがって、やり取りするデータ量は膨大になるため、CNC コントローラ側でフィードバックループ制御を行なうと、制御ループ内の通信周期が遅くなり、応答性を追求することが難しくなる。

一方、主軸モータの制御は、その工作機械の付加価値向上とともに年々複雑化している。送り軸であるサーボモータ軸は常に位置ループ制御を構築していればいいのに対し、主軸モータはその加工モードに応じて、速度ループ制御や位置ループ制御の切り替えが必要となる。例えば、ミーリング加工、フライス加工、旋削加工などの場合は、主軸の回転数である速度だけを制御すればいいのに対し、同じ機械構成のまま、同期タップ加工や C 軸制御加工のように加工条件によっては、主軸の回転角度を制御する位置ループ制御へと移行する必要がある。

従来は、この加工モードの切り替えの度に、主軸端の機械的な角度を再構築する必要があり、所定の位置検出シーケンスを組むために加工時間を短縮できないなどの課題があった。

また、速度制御ループ構築時は、位置ループを構築している時と比べて、切削外乱などの影響を受けやすいなどの課題があった。

2.2 CNC システムの基本構成

図 2.1 に一般的な 3 軸構成のマシニングセンタにおける CNC のシステム構成を示す。左右の送り軸である X 軸、前後の送り軸である Y 軸、上下の送り軸である Z 軸は、それぞれに機械に設置されたサーボモータでボールねじ介して駆動される。そして実際にワークを切削するための切削工具は主軸ヘッドに取付けられ、主軸モータにより駆動される。これらのサーボモータや主軸モータに指令に応じた動力を制御し供給するためのサーボアンプや主軸アンプ、および、CNC コントローラは、まとめて強電盤内に設置さ

れる。

CNC システムにおいては、ワークに対する切削工具の経路がそのまま加工物の精度を左右するため、サーボモータの位置や送り速度を切削外乱や機械の摩擦などの各種負荷外乱に負けず、如何に指令に対して誤差を少なく追従させるかが重要となる。また、X,Y,Z 軸の間の同期精度や応答性能を合わせることも重要であり、仮に、各軸の同期性や応答性が合っていない場合には、工具の経路は CNC コントローラが意図しない経路を辿ることとなり、加工精度は要求される品質を満足できない。

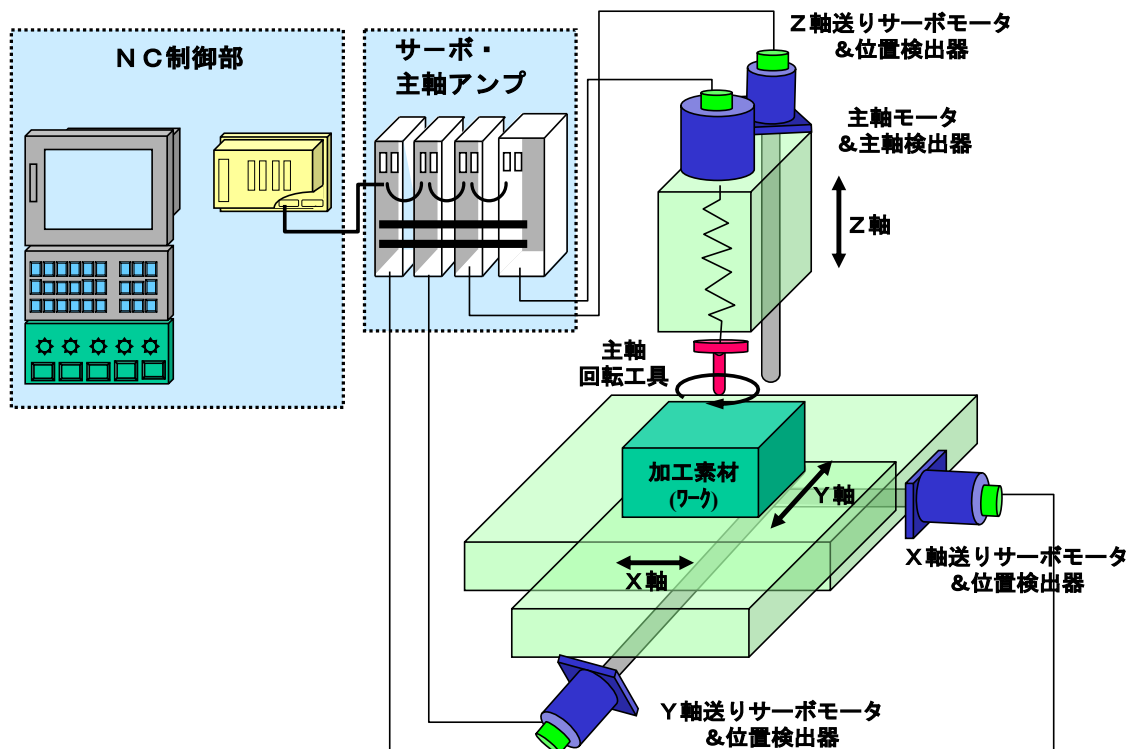


図 2.1 一般的な CNC システム構成

また、近年では図 2.2 のような複合加工機と呼ばれる加工機も増加してきている。この図では、旋盤ベースの複合加工機の例であるが、主軸モータだけでもメインとサブの二つの主軸モータに加え、ミーリング加工用のミル主軸モータも備えており、トータルで7~8軸の主軸モータ、および、サーボモータを有しており、付随する周辺軸も入れると、十数軸の同期制御を実施する必要がある。また、主軸モータに関しては、単なる旋削加工のための回転動作だけでなく、C軸加工（ミーリング加工）や、ねじ切り加工、同期タップなど、サーボ軸と同様に位置制御が必要とされ、送り軸であるX,Y,Z軸との同期性を要求されるケースが増えてきており、従来は複数の工作機械に分けて実施して

いた加工を一台の機械で実施することがトレンドとなってきた。

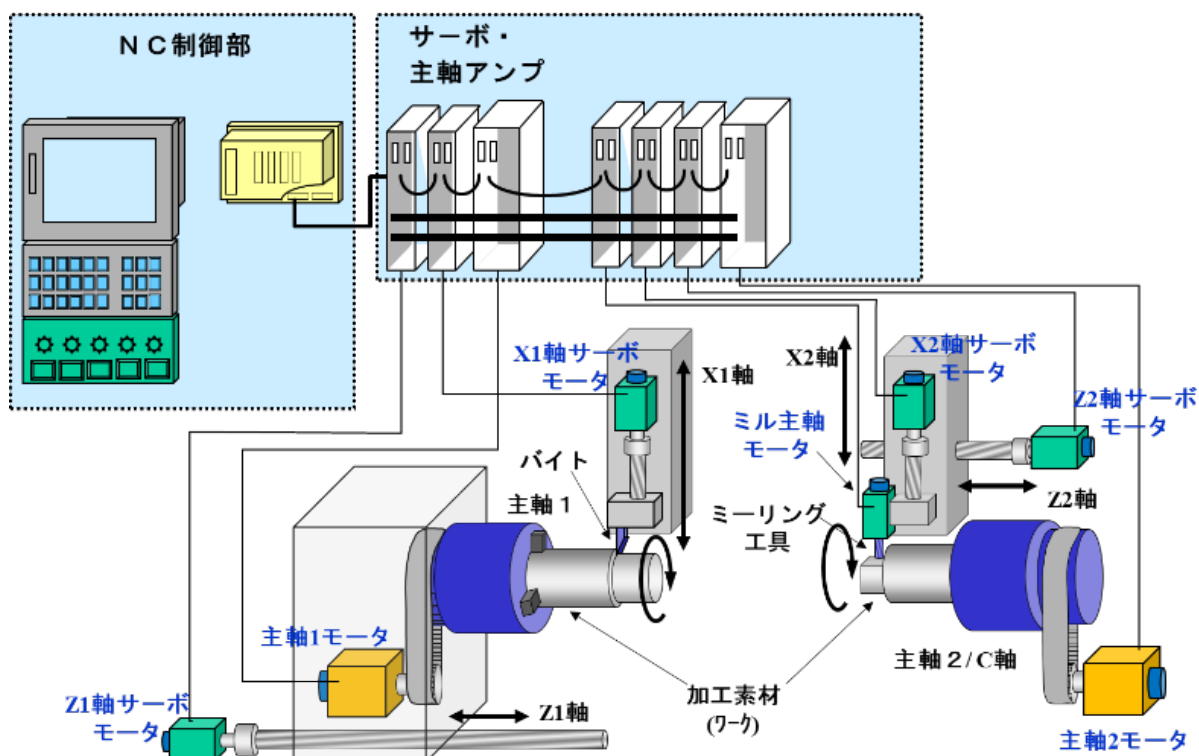


図 2.2 複合加工機のシステム構成

2.3 サーボ・主軸制御の集中処理の課題

図 2.3 に CNC によるサーボ・主軸の集中制御時のシステム構成を示す。

この場合、各軸の同期性や軸間での補正機能などを一つのコントローラ内で処理できるため構築しやすいといった点や、前述したように、複合加工機など一台の機械で多くの加工モードを切り替えて制御する必要がある場合に、コントローラ側での管理が容易であるといったメリットがある。

反面、コントローラと実際にモータを駆動するアンプとの間にネットワークが介在するため、制御ループ内に無駄時間を発生しやすく、かつ、制御ループの高速化を図れないといったデメリットが生じる。

図 2.4 は、サーボや主軸の外乱抑制や指令追従性に大きく左右する速度制御ループの周波数応答を示したものである。一般的に外乱や指令への追従性を向上させるためには、ループ内のゲインを上げ、応答帯域を高周波数まで広げることが必要となるが、ループ

内の無駄時間が大きくなると位相余裕が無くなるためフィードバックループが不安定になり、発振するなどの現象が発生する。

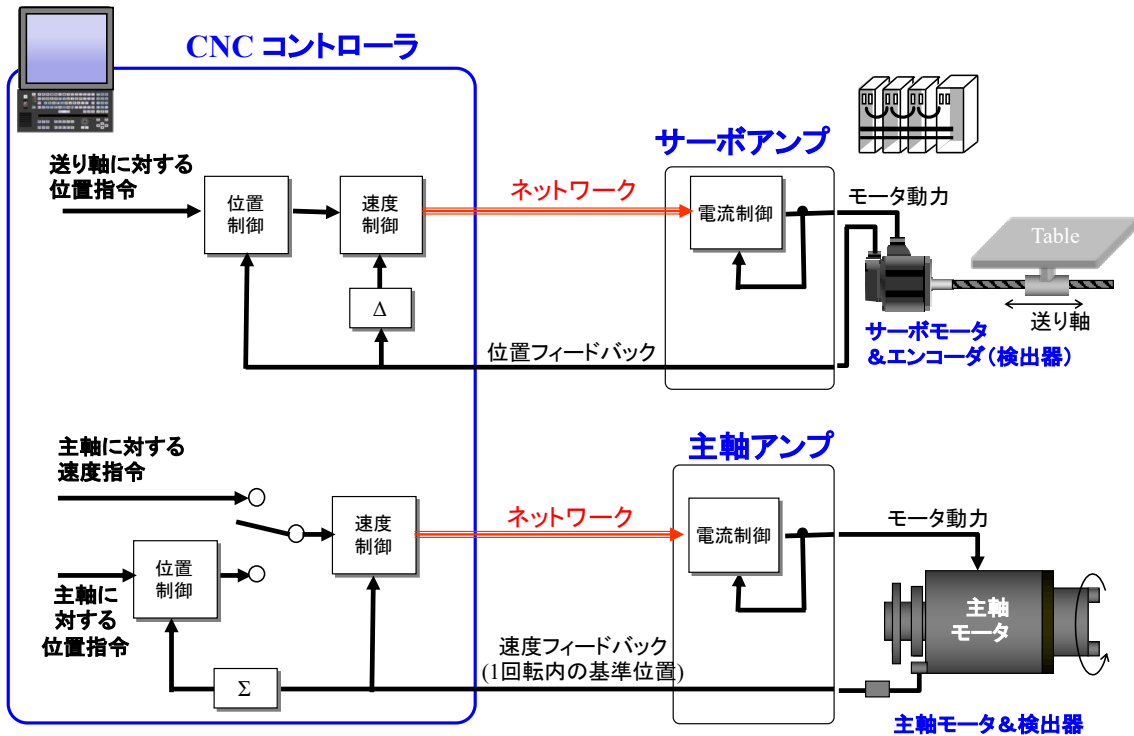


図 2.3 サーボ・主軸の制御システム構成（集中制御）

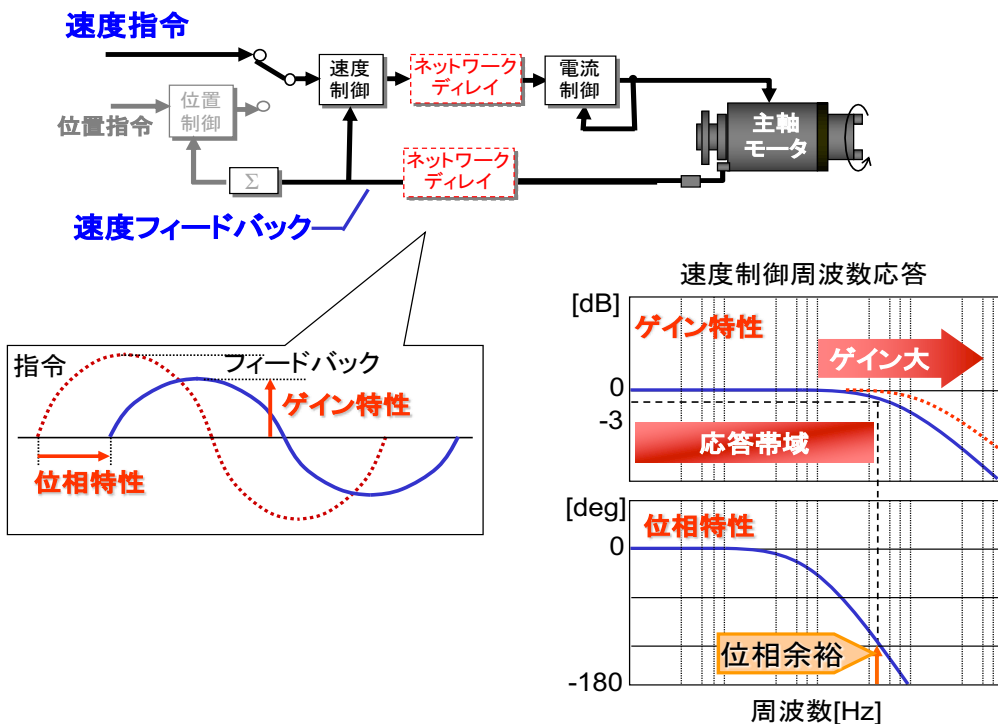


図 2.4 サーボ・主軸制御系の速度ループ周波数応答

位置や速度の制御を CNC 側で集中制御する場合、速度制御で作られる電流指令をサーボや主軸アンプにネットワークを介して伝達する必要があり、ここに無駄時間が存在する。また同様に、サーボモータや主軸モータの速度フィードバックデータもまた、ネットワークを介して CNC 側に戻す必要があるため、ここでもネットワークによる無駄時間が発生する。したがって、制御ループ内に無駄時間=位相遅れが生じるため、安定して速度周波数応答性を上げることは困難となる。

2.4 サーボ・主軸制御の分散処理の構築

このようなデメリットを削減する観点から図 2.5 に示すようなサーボ・主軸の制御ループ構成を採用した。つまり、フィードバックループを構成する位置や速度ループはアンプ内で処理（分散制御）し、無駄時間が多く発生するネットワークを制御ループの外側に配置している。

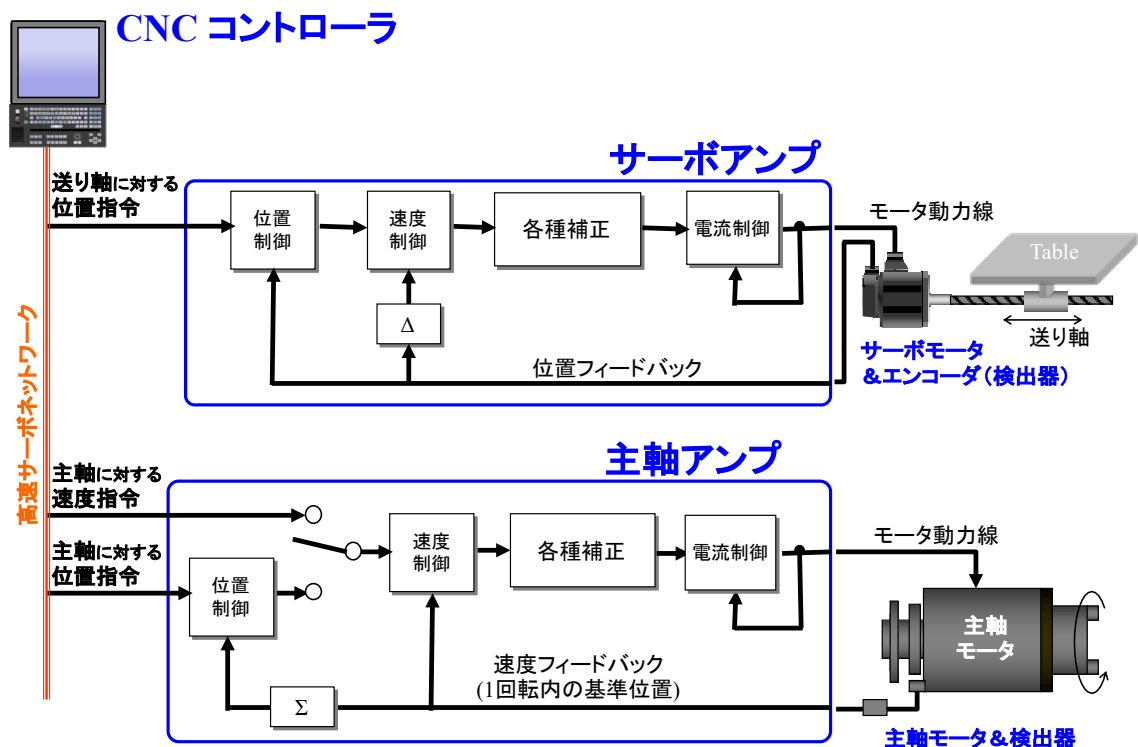


図 2.5 サーボ・主軸の制御システム構成（分散制御）

加えて、サーボ・主軸制御のアンプ側での分散制御を実施することで、CNC 側の CPU の負担を軽減でき、以下のようなメリットも創出できる。

近年の複合加工機などの普及に伴い、CNC がコントロールしなければならないならならぬサーボモータや主軸モータなどの制御軸数は年々増加しており、また、生産性向上の要求に対応するため、高速切削での精度確保のための各種補正、例えば、機械のピッチエラー補正や、熱変異補正、工具摩耗の影響を考慮した指令位置の補正なども益々重要となる。今回我々が採用した分散制御の構成を採用することで、この CNC 側の CPU の負担を大幅に削減することができ、今後、益々重要になる IOT 化、例えば CAD や CAM といった上位系との連携処理や、複雑化する加工動作に対して、機械の軸が干渉することを回避するためのリアルタイムシミュレーションなどの処理に、CNC 側の CPU 処理を専念させることが可能となる。

2.5 高速・光ネットワークの開発

2.5.1 従来のサーボ（主軸）ネットワークの課題

デジタル AC サーボが登場した 1980 年代は、CNC コントローラとサーボアンプ間の接続は、位置指令をパルス列で送り、サーボモータの位置や回転速度といったフィードバックもパルス列でコントローラに返すという単純なものであった。しかしながら、近年の機械の多軸化・複合化の進展に伴い、指令伝達の信頼性確保や保守性の改善、かつ、配線数の削減などによるシステムコストの削減などを目的に、コントローラとアンプ間をネットワークで接続することが必須となってきている。

これにより、異常発生時のアンプ内の情報の上位への伝達を可能としたり、モータの状態（電流値や回転速度など）といった情報も上位系でモニタリングすることができ、よりインテリジェントなシステムを構築することが可能となっている。現在では、多くの CNC システムにおいて、このアンプと CNC 間の接続は、従来のパルス接続からネットワーク接続へと移行している。

一方で、このネットワーク仕様は、各 CNC メーカーで異なるプロトコルとなっているため、CNC コントローラとサーボ・主軸アンプ（サーボモータや主軸モータも含む）は、同一メーカーの製品で構築する必要がある。これに対し、一部の CNC メーカーや工作機械メーカーでは、自由にサーボアンプや主軸アンプを選定したといった理由から、現在でも単純なパルス列でのインターフェースを採用しているケースもある。更には、超高応答な性能を追求する加工機では、ネットワークの応答性能による制約から、パルス列、あるいは、アナログ信号でのインターフェースを採用しているケースも存在する。

ここで従来のサーボネットワークの課題について、以下に示す。

① 性能面での課題

ネットワークの伝達速度や伝達できるデータ数に制限があるため、複数軸間で同期して一つの軸を稼働させるタンデム制御や主軸とサーボ軸間で同期して制御するねじ切り加工、同期タップ加工といった制御において、生産性の向上のために加工時間を短縮しようとする、安定性や加工精度が損なわれるといった課題があった。

また最近では、工具交換の時間短縮による生産性向上や使用ツールの種類削減といった観点から1ツールでの加工が注目されてきている。これは、小径ツールでの高速・小円弧補完制御が必要となるが、ネットワークの通信周期の制約で、指令が荒くなり、指令精度の確保が困難となるといった課題があった。

② 保守・サービスでの課題

CNC コントローラとアンプとの間でやり取りされる位置指令は、極めてセンシティブなデータである。仮に、ノイズ等によりこの位置指令データが誤った値になった場合には、高価な加工ワークを破棄せざるおえなくなったり、最悪の場合には、機械を衝突させて大きな損害が発生する場合もある。ネットワーク化し、ノイズによるデータ化け等に関しては各種通信エラーチェック機能により、排除できる反面、ノイズによる影響が大きい場合、エラー検出によるアラーム発生により、度々機械を止める必要があり、結果として加工精度に影響してしまう場合がある。

また、経年劣化や周辺環境の異常などによりサーボモータや主軸モータ、あるいは、アンプ内で地絡といった故障が発生した場合、当該モータやアンプに留まらず、隣接している機器が二次的に破損し、復旧に時間を要するケースがある。

2.5.2 高速光サーボネットワークの提案

従来のサーボネットワークでの課題を踏まえ、高速で信頼性の高い、光絶縁型のサーボネットワークの開発を実施した。図 2.6 に開発したサーボネットワークのプロトコルスタックを示す。

ここで、提案するネットワーク高速化のポイントは以下である。

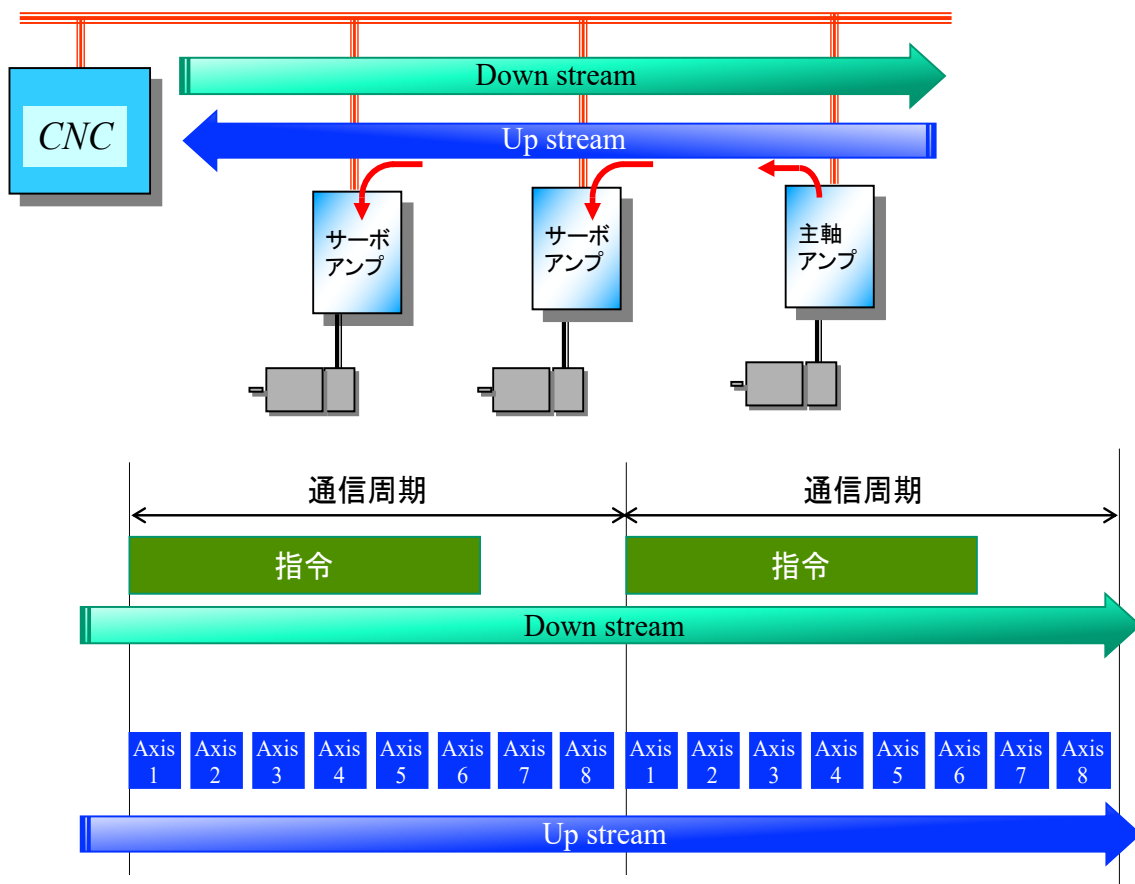


図 2.6 高速光サーボネットワークのプロトコル

- ① 通信ボーレートの向上：5.6MHz→50MHz（従来比で約 10 倍）
- ② 通信周期の向上： 1.7msec → 0.2msec（従来比で約 8 倍）
- ③ 指令分解能の向上： 1 μ m → 1nm
- ④ サーボや主軸間でのデータ交換を可能とするプロトコル

コントローラとアンプ間はダイジーチェーン方式で接続され、コマンドフレームには全軸の指令データが伝達される。一方、アンプから CNC に向かって Up stream 通信に渡されるデータは、通信周期内でタイムシェアリングされながら、順次伝達される。このデータは CNC から見て上位に接続されたアンプでは、リアルタイムで獲得できる仕組みとしており、主軸とサーボとの間の同期制御などにおいて、精度向上のための補正制御を可能としている。

- ⑤ 光通信の採用：電気→光ファイバーによる通信とすることで、対ノイズ環境の向上、軸間の絶縁耐量の向上を実現

従来、電気接続の専用配線で伝達していたアラームなどの信号もこの光通信データの Down stream コマンドフレームと Up stream 通信フレームに自動的に挿入し伝達する仕組みを搭載しており、ノイズ等に対する保護機能の信頼性を大きく向上させている。これにより、地絡故障時のサージ電圧の隣接アンプへの侵入による連鎖故障を防止できる。

図 2.7 に、この提案する高速光ネットワークを活用した特長を示している。

- ① 効果 1：工具交換の時間短縮による生産性向上や使用ツールの種類削減といった観点から注目されている 1 ツールでの高速・小円弧切削や、非円弧切削などでの指令精度が向上を実現。
- ② 効果 2：後述するが、CNC を介さずに駆動軸（アンプ）間での直接的な補正を可能とし、主軸とサーボの同期制御が必要となる同期タップなどの加工精度向上を実現。
- ③ 効果 3：通信周期の高速化と、アンプ間での直接的な補正を可能とするプロトコルにより、高速センサーなどの情報をコントローラを介さずにサーボアンプや主軸アンプで直接的にモニタし、補正を実施することも可能とした。

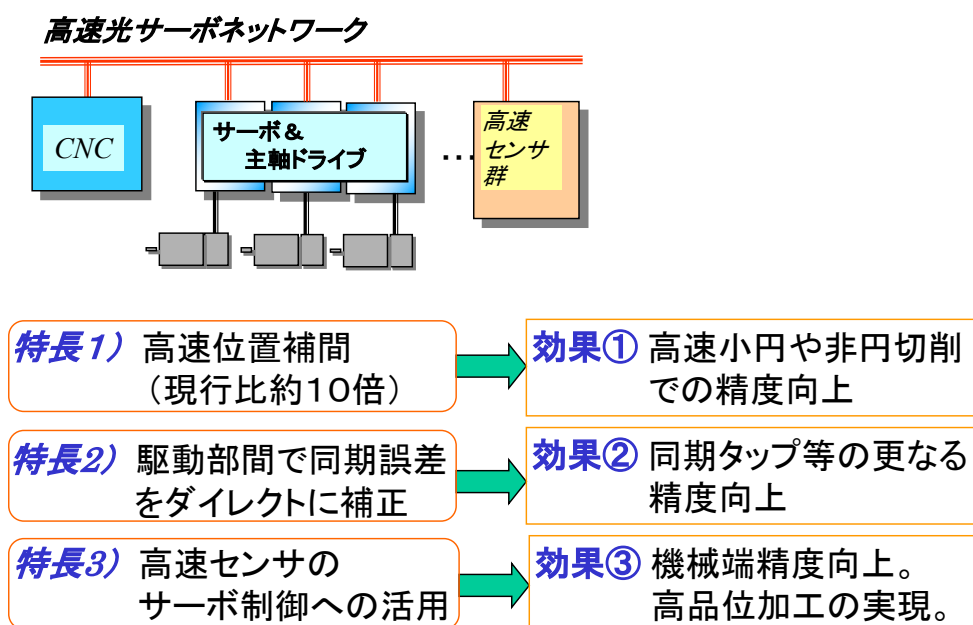


図 2.7 高速光サーボネットワークの特長

2.5.3 高速光サーボネットワークの効果検証

図 2.8 に、提案する高速光サーボネットワークの効果検証結果を示す。

ここでは、小径ツールでの穴加工を想定して、サーボ X-Y 軸での円弧補完を実施した場合のサーボモータ端での軌跡誤差を測定したものである。

測定条件としては、円弧の周速指令速度は、F：20m/min であり、円弧の半径は R：1 mm である。従来のネットワークでは、最小通信周期は 1.7msec が限界であり、その場合は、円弧一周当たり、指令の点数は、

$$\text{指令点数} = \frac{2\pi R}{F \times \text{通信周期}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \text{ mm}}{\frac{2000}{60} \times \frac{1.7}{1000}} \approx 11 \text{ 点}$$

これに対し、提案する高速光サーボネットワークを用いた場合、通信周期の向上に伴い指令点数は、

$$\text{指令点数} = \frac{2\pi R}{F \times \text{通信周期}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \text{ mm}}{\frac{2000}{60} \times \frac{0.2}{1000}} \approx 94 \text{ 点}$$

となり、これにより、軌跡誤差は、50 μm から 8 μm に改善しており、大幅な制御性向上に貢献している。

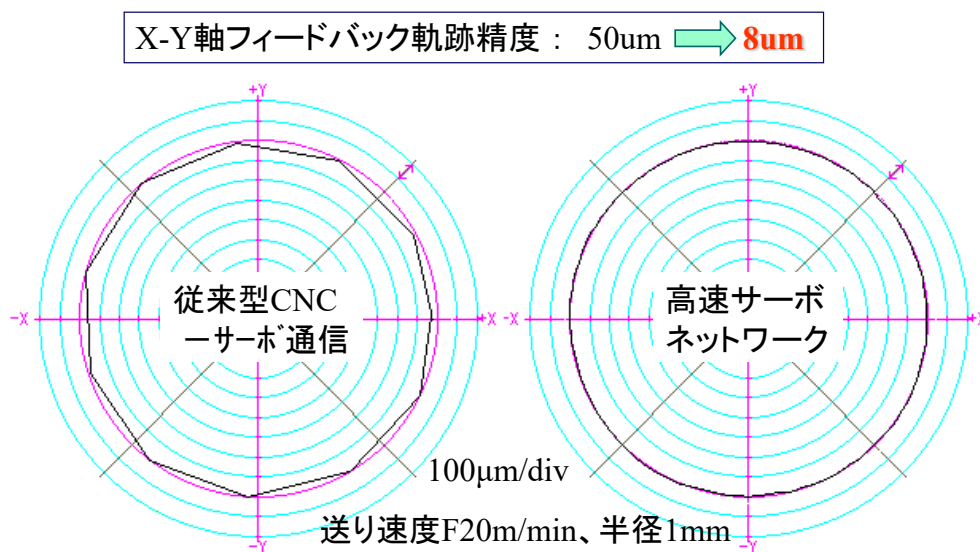


図 2.8 高速光サーボネットワークの効果検証

第三章 高応答サーボ・主軸制御を実現するアーキテクチャ

本章では、今回採用したアンプ内で位置ループや速度ループの制御を実施する分散制御の高応答化特性を追求すべく実施したサーボ・主軸制御のアーキテクチャについて説明する。

3.1 サーボ・主軸制御の基本構成とその特性

図 3.1 にサーボ・主軸アンプにおける制御ブロック図を示す。サーボ・主軸アンプの機能としては大きくパワーデバイスから構成される電力変換部と位置・速度・電流制御を実施する CPU やメモリ、ロジック回路から構成される制御部から構成される。

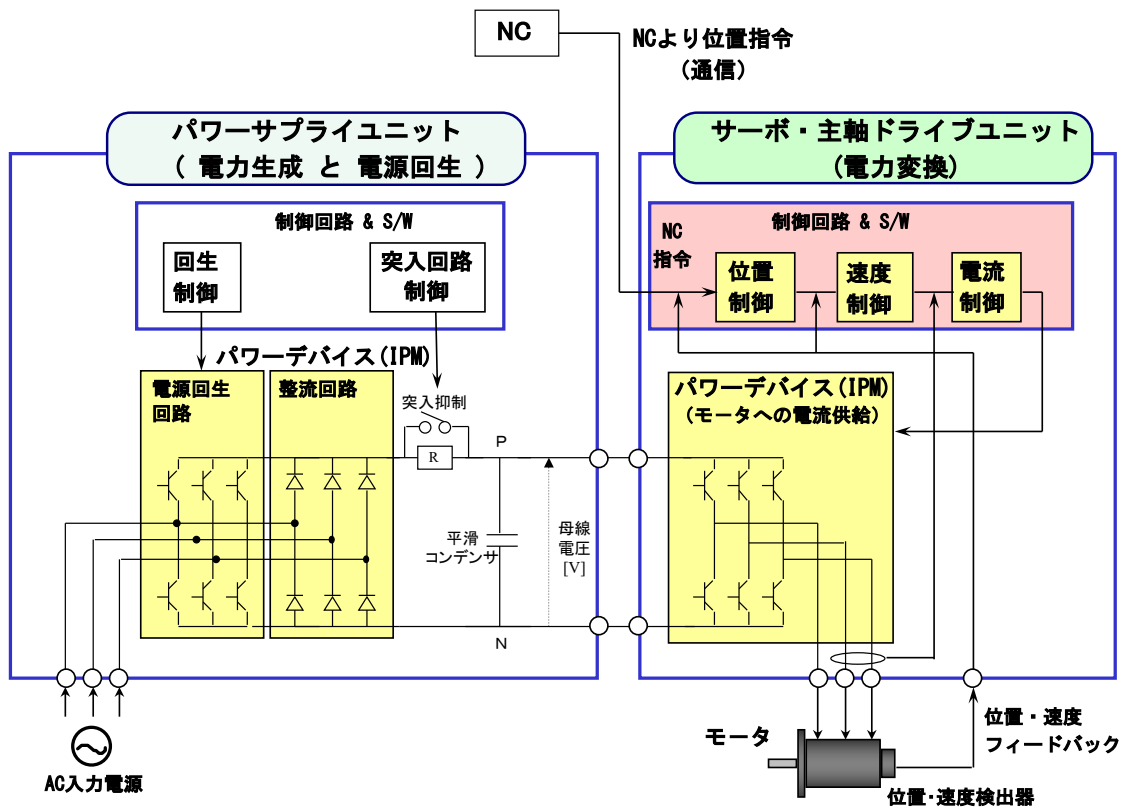


図 3.1 サーボ・主軸アンプのシステム構成

3.1.1 電流制御の基本構成とその特性

図 3.2 に電流制御の基本構成を示す。電流制御では、図に示すように d - q 変換を用いて制御している。これにより速度制御から生成されるトルク指令を q 軸電流指令とする

ことができ、d 軸電流指令はサーボの場合、基本的には0となるように制御している。但し、加減速時にモータ内の永久磁石が発生する磁界の量をコントロールしたり、主軸の場合は、永久磁石がない誘導電動機を用いるケースが多く、この場合は、磁界の量をコントロールしたりする場合には、d 軸電流指令を操作して制御している。ここで、電流制御の特性は、モータの電気特性とアンプ内の電流検出回路の特性などで決まり、モータから先の機械の特性は電流制御ループ内の特性には左右しない。

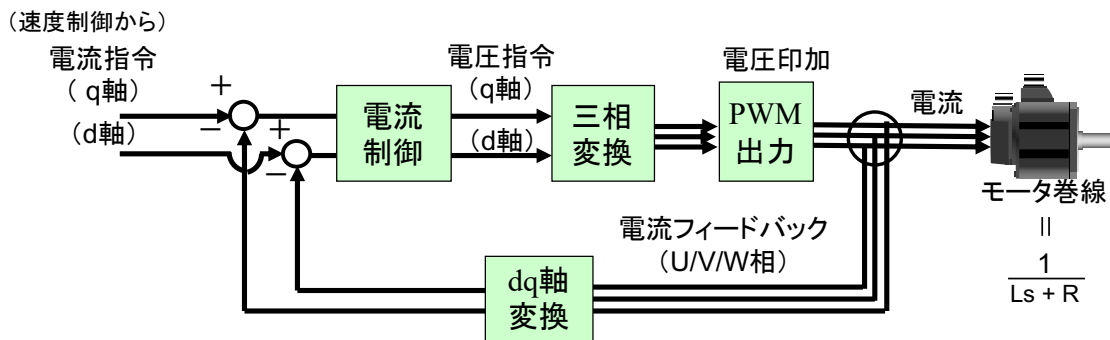


図 3.2 電流制御の基本構成

3.1.2 速度制御の基本構成とその特性

図 3.3 に速度制御の基本構成を示す。速度制御のループ内には機械特性や切削外乱特性が入ってくるため、如何にこの機械特性や切削外乱の影響を受けないように、もしくは、高応答化により抑え込めるかが、サーボや主軸の性能を大きく左右する。第二章で述べたように、この速度周波数応答を上げるためには制御ループ内の無駄時間を如何に削減するかが課題であり、速度ループ内に存在する電流ループの応答性を上げることが最も基本で、かつ、重要となる。この電流ループの高速化については後述する。

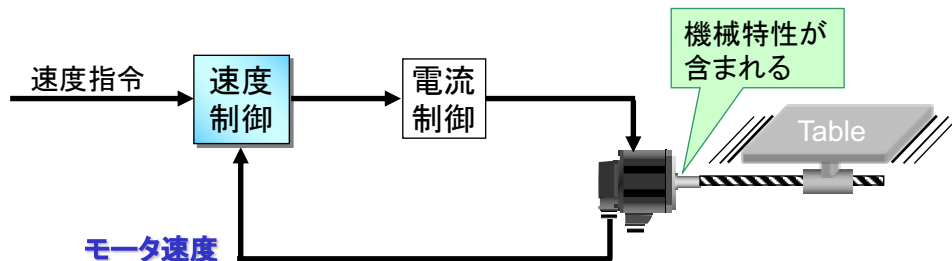


図 3.3 速度制御の基本構成

3.2 サーボ・主軸制御系アーキテクチャのロードマップ

図 3.4 にサーボ・主軸制御系アーキテクチャのロードマップを示す。

1990年代初期の頃までは、位置・速度・電流制御の全てを CPU (DSP) によるソフトウェア制御で実行しており、一部 PWM 回路やエンコーダインターフェースなどの処理を ASIC で実施していた。当時は一つの ASIC の中に搭載できるゲート数も少なかったため、それぞれの処理ブロック毎に複数の ASIC を搭載しており、これをここでは、デジタルサーボ時代の制御アーキテクチャの 1st Step とする。また、この当時はアナログ回路を ASIC に取り入れることはできなかったため、電流フィードバックをデジタル化するための AD コンバータは別置きの IC を搭載していた。

これに対し、1990年代後半の 2nd Step では、ASIC の進化に伴い、デジタルとアナログを混在できる ASIC も登場し、また、搭載ゲート数も飛躍的に向上したため、CPU (DSP) やメモリを除くロジック処理と AD コンバータを 1 チップに搭載し、サーボ・

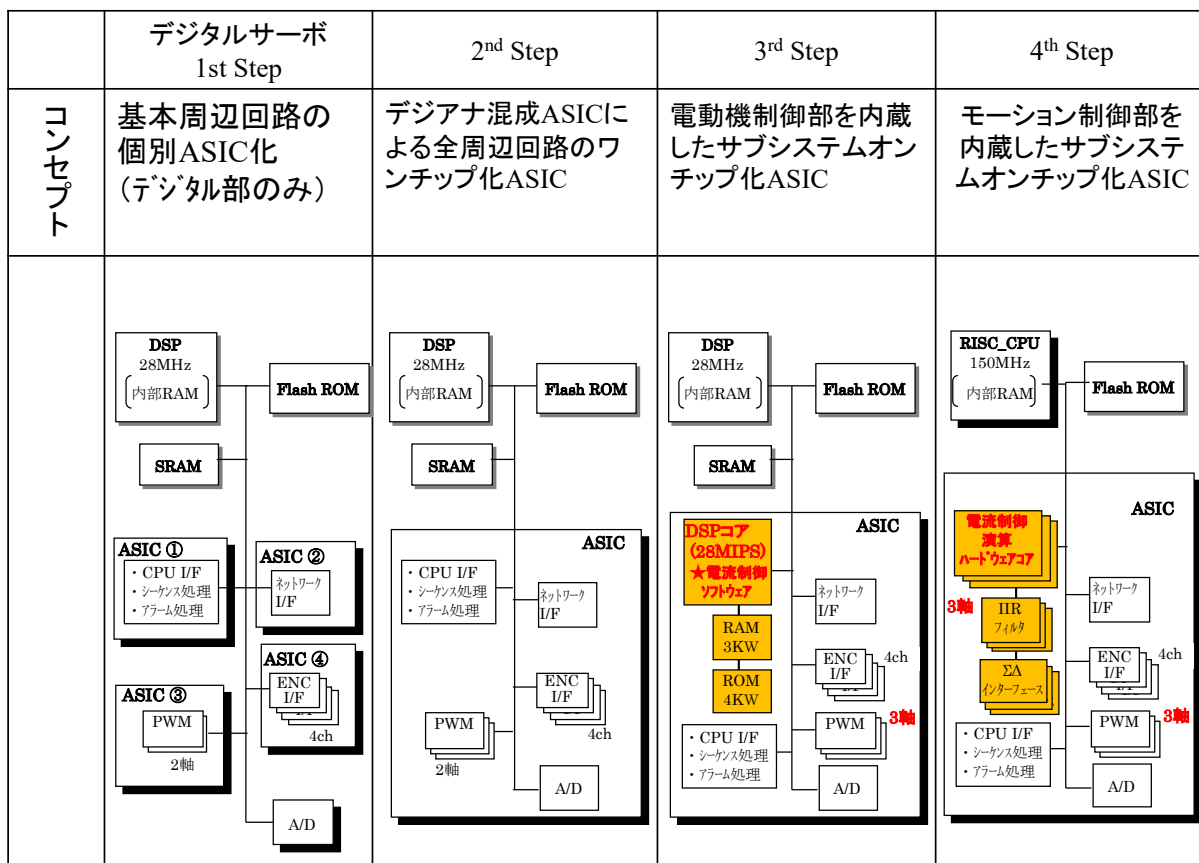


図 3.4 サーボ・主軸制御系アーキテクチャのロードマップ

主軸アンプの小型化と低コスト化を大幅に実現した。

更に、2000 年前半になると、ASIC 内に搭載できる DSP コアが登場。そこで、この DSP コアに最も高速な処理が必要な電流制御を分担させ、メインの CPU と合わせてサーボ・主軸の制御処理をマルチコアで実施するアーキテクチャを開発した。これを 3rd Step とする。

この 3rd Step によるマルチコア処理で、サーボ・主軸の制御性能は飛躍的に向上した。図 3.5 にサーボ・主軸のアーキテクチャの進化に伴う性能の向上を示している。

1st Step から 2nd Step においては、主要搭載 IC の数が 8 個から 4 個と半分になり、アンプの小型化とコストダウンには寄与したが、直接の性能向上には寄与していなかった。一方、3rd Step では、マルチコア化によりメイン CPU で位置制御と速度制御、ASIC に搭載した DSP コア（サブ CPU）で電流制御を分担させることで、制御ループ内の無駄時間の削減に大きく左右する制御周期を位置制御で 1/4、速度制御で 1/2、電流制御で 1/4 に短縮することができた。また、1 台のアンプで制御できる制御軸数を従来の 2 軸から 3 軸まで制御することを可能とした。

更に、4th Step としては、一つのサブ CPU で 3 軸分の電流制御を実施していたのに対し、電流制御専用のハードウェアコアを開発。これを 3 軸分搭載することで、電流制

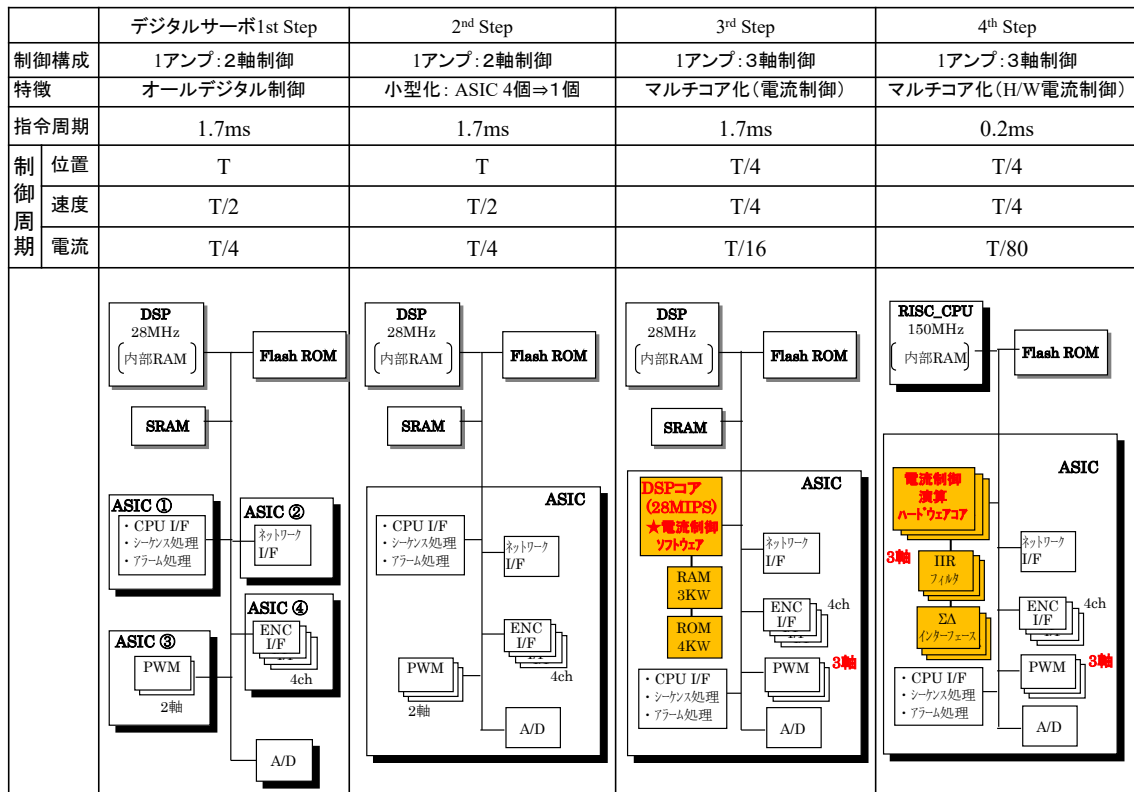


図 3.5 サーボ・主軸制御系アーキテクチャの進化と性能向上

御のオーバーサンプリング機能を実現することを可能とし、サーボ・主軸の基本性能の大幅な向上を実現した。図 3.6 に 4th Step で実現したサーボ・主軸制御系アーキテクチャのブロック図を示す。

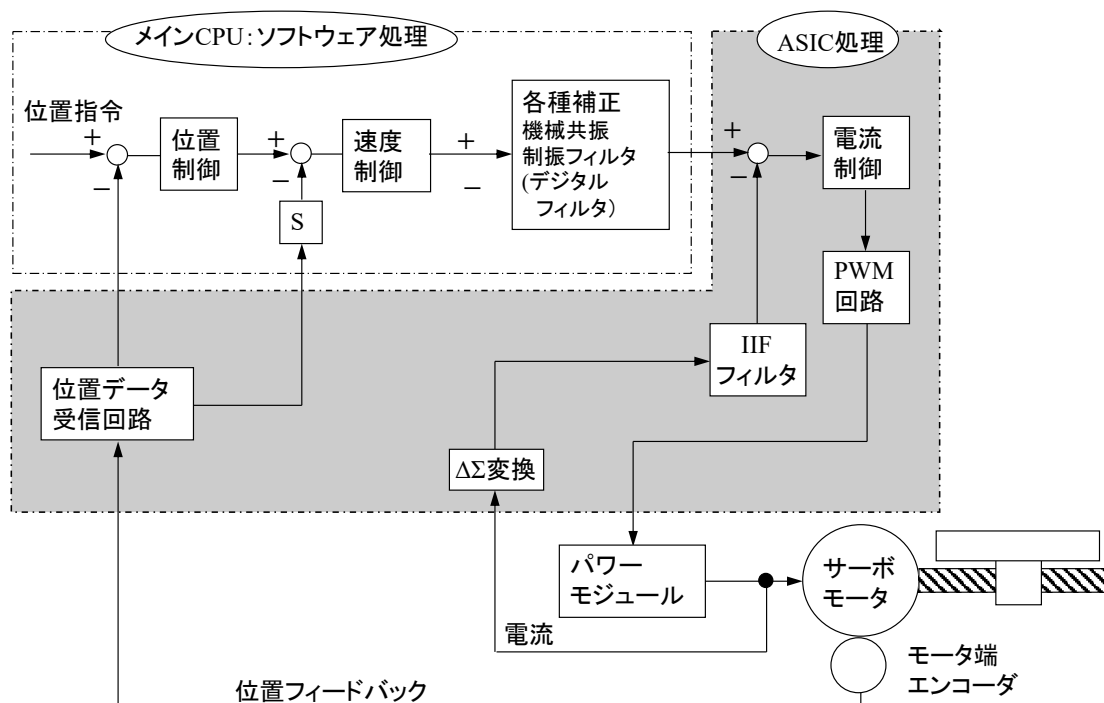


図 3.6 サーボ・主軸制御系アーキテクチャ 4th Step のブロック図

3.3 マルチ CPU による電流ループ処理の分散制御

図 3.7 に 1st Step から 2nd Step において実施していた従来の電流制御のタイミングを示す。従来は、位置制御や速度制御、その他様々な処理を一つの CPU で実施していたため、電流ループを常時回す訳には行かない。そのため、PWM でのスイッチングの影響が最も少ない PWM 基準三角波の山と谷のタイミングでのみ、電流フィードバック (電流 FB) データを AD 変換かけていた。また電流制御の処理もこの山谷のタイミングを基準に実施しており、この処理が三角波と比較し長くなると、出力した電圧指令の反映が次の三角波との交差タイミングまでに反映されず、結果として無駄時間を発生させることになる。この電流制御の処理や電流値を取り込む AD コンバータの変換時間なども従来は数十マイクロ秒かかることもあり、三角波のキャリア周波数自体も高速にするこ

とができなかった。

図 3.8 に位置制御、速度制御を含むサーボ・主軸制御処理のタイミングチャートを示

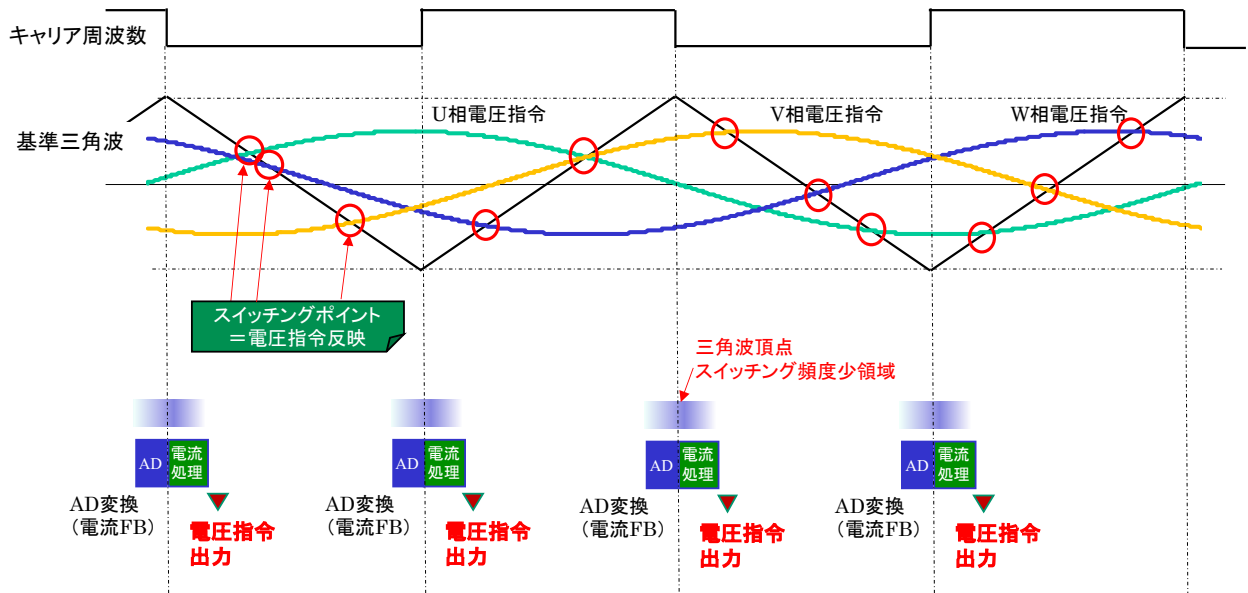


図 3.7 1st Step, 2nd Step の電流制御タイミング

す。

位置や速度、電流制御を実施する CPU はこれらの処理をシーケンス的に実施する必要があるが、前述のように電流制御が最も高速・高応答性を必要とすることから、三角波の山谷を基準にして最も優先度を高く処理している。したがって、位置制御や速度制御は、この電流制御処理が終わった空いた時間で処理している。ちなみに、1st Step と 2nd Step では一つのアンプで 2 軸分の制御を実施しているため、この PWM の基準三角波を一軸目と二軸目で電流制御の処理時間に合わせて、数十マイクロ秒ずらして制御している。

ここで、上位 CNC からネットワークを経由して位置指令を受信したタイミングを起点として、同じタイミングで実際のモータ位置のフィードバックを検出した場合、これらのデータを元に位置制御を実施し速度指令を生成し、次にこの速度指令と速度フィードバックをもとに速度制御を実施して電流ループに対する電流指令 (q 軸電流指令) を生成して電流制御処理にインプットする。電流制御では、この電流指令と電流フィードバックを元に電流制御 (主に PI 制御)、d-q 変換処理を実施し、PWM 回路への電圧指令を出力する。

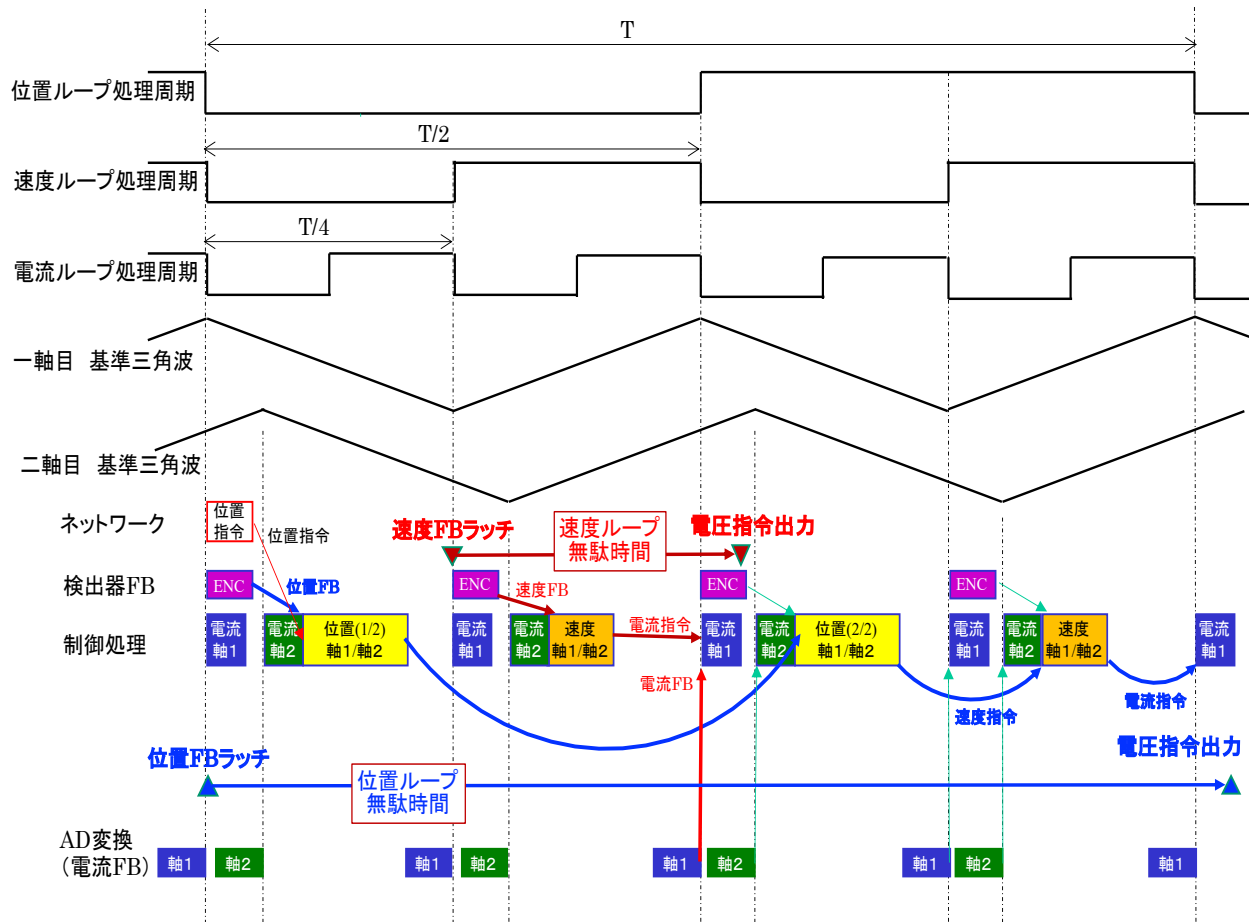


図 3.8 1st Step, 2nd Step のサーボ・主軸制御タイミング

結果として、前述のようにサーボや主軸の性能を決定する速度制御の応答周波数特性に大きく左右する速度フィードバックを検出してから実際にモータに電圧指令として出力するまでの速度ループ無駄時間は最低でも $T/4 + \alpha$ 、位置ループでは最低でも $T + \alpha$ の無駄時間が掛かることがわかる。

次に 3rd Step で実施したマルチコアによるサーボ・主軸の制御タイミングを図 3.9 に示す。ここでは、サブ CPU である DSP コアが 3 軸分の電流制御を専門で処理させた。これにより、メイン CPU 自体の処理能力は 1st Step, 2nd Step と同等であるが、位置制御の処理周期を 4 倍の $T/4$ 、速度制御の処理周期を 2 倍の $T/4$ 、更に電流制御の処理周期も 4 倍の $T/16$ に向上させることができた。これにより、速度ループ無駄時間は $T/4 + \alpha$ で変わらないものの、位置ループの無駄時間は約 T から $T/4$ と大幅な短縮を実現した。

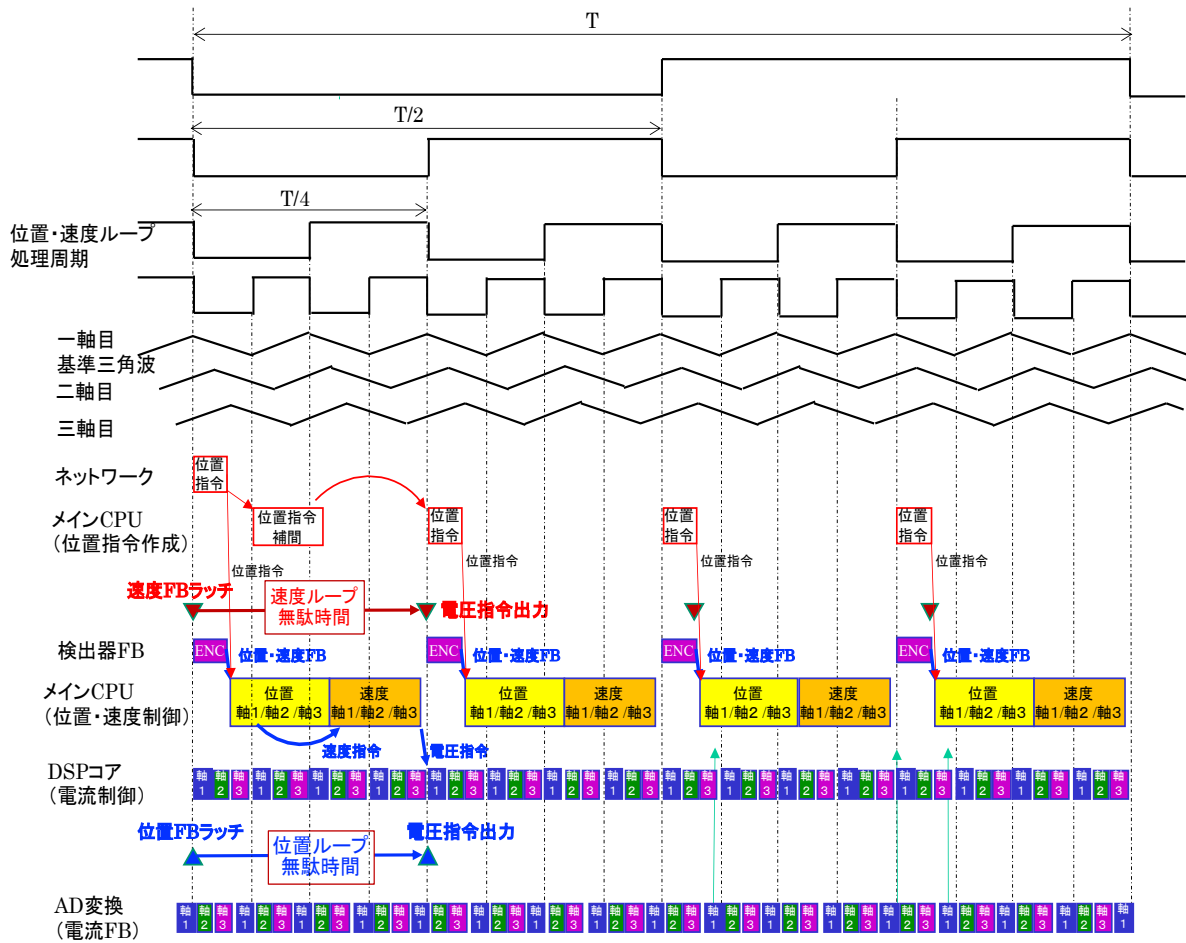


図 3.9 マルチコア(3rd Step)によるサーボ・主軸の制御タイミング

3.4 ハードウェア電流制御によるオーバーサンプリング処理

3.4.1 電流制御専用ハードウェアコアを用いた電流制御処理

4th Step では、電流制御専用のハードウェアコアを開発。これを 3 軸分搭載することで、電流制御のオーバーサンプリング機能を実現することを可能とし、サーボ・主軸の基本性能の大幅な向上を実現した。図 3.10 にそのタイミングチャートを示す。

4th Step ではハードウェア演算コアを 3 軸分搭載していることから、3rd Step で実施していたような PWM 三角波をズラす必要はなく、同時に電圧指令を反映することができるので、軸による無駄時間の差を生じさせる必要はない。但し、発生ノイズの低減が必要な場合は、意図的に 3 軸の PWM 三角波をズラすことは可能である。

また、専用コアであることより、常時電流制御を回すことが可能となるため、オーバーサンプリング機能を搭載した。これにより、スイッチング時の電流の跳ね上がりなどの影響が平均化されることで、電流フィードバック値に乘るオフセットなどが軽減し、安定な電流制御を可能とした。

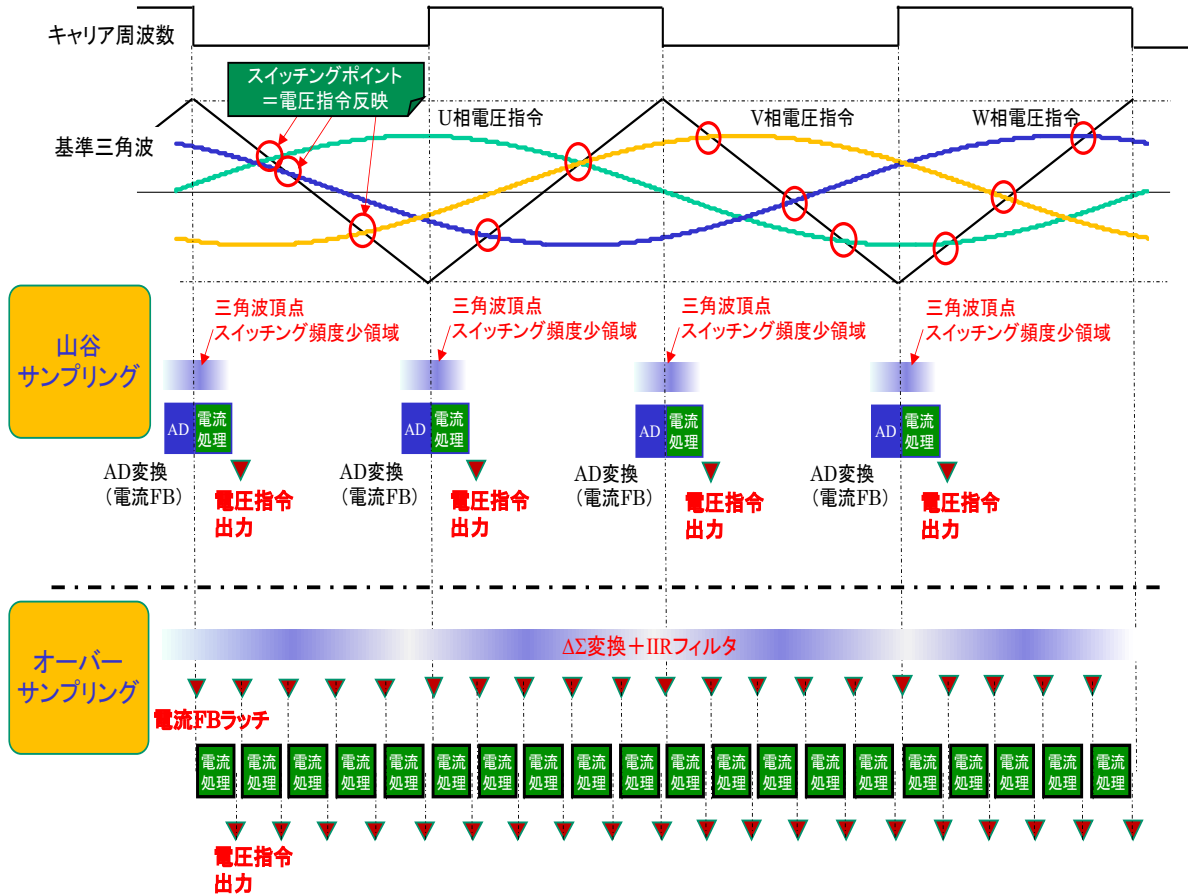


図 3.10 電流制御専用ハードウェアコア(4th Step)とオーバーサンプリング

3.4.2 4th Step (電流制御専用ハードウェアコア) の効果

… 主軸制御における効果 (例：温度上昇の低減)

オーバーサンプリング機能を搭載した電流制御専用ハードウェアコアによる効果を、ここでは主軸の例で示す。

図 3.11 は、12,000r/min の高速回転で主軸モータを回転させている時のモータの温度上昇結果とモータ電流の周波数スペクトル解析結果を示したものである。電流に重畳

させる高調波成分が大幅にカットされている。これにより、モータに発生する鉄損と呼ばれる損失が低減し、結果として10%の温度低減を実現できていることがわかる。

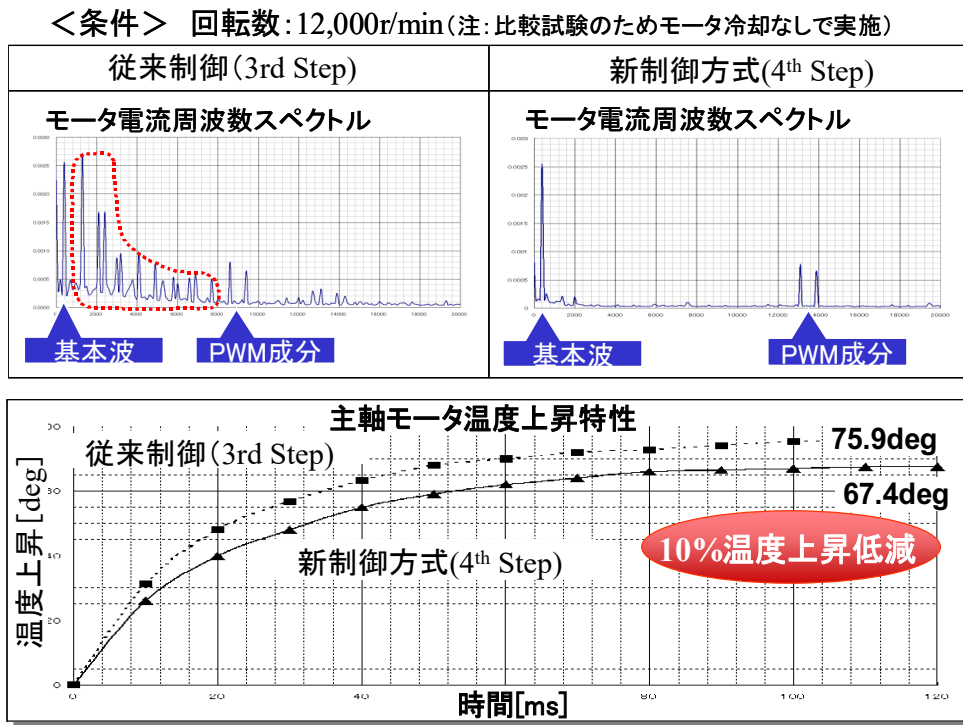


図 3.11 主軸制御における電流制御専用ハードウェアコア(4th Step)の効果 (モータ温度上昇の低減)

3.5 モータトルクリップル補正

一般的に、サーボモータには永久磁石を用いた同期モータが使われるが、原理上大きく分けて、以下の二つの速度変動（リップル）を生じさせる要因がある。一つはモータの回転子にある磁石とステータのスロット形状との関係で発生する磁気抵抗が変化することで生じるコギングトルク、そしてもう一つは、ステータの鎖交磁束に乗っている高調波成分の影響で発生するトルクリップル（通電リップル）がある。今回、4th Stepで電流制御をハードウェアで構成するに当たり、このトルクリップルを抑制するトルクリップル補正も合わせてハードウェア化することで、工作機械のサーボに求められる滑らかな送り精度を実現することを狙った。

3.5.1 トルクリップル補正の電流制御専用ハードウェアコアへの搭載

図 3.12 に電流制御専用ハードウェアコアで搭載した制御ブロック図を示す。通常の PI 制御、電圧指令処理 (d-q 変換) に加え、トルクリップル補正処理を追加している。これは実際には、d-q 変換、つまり 2 相→3 相変換、および、3 相→2 相変換での座標変換をする際に、位相を進めた変換値を重ね合わせる形で実施しており、実際のモータが持つ誘起電圧の歪みの影響を抑制する効果があることを検証した。

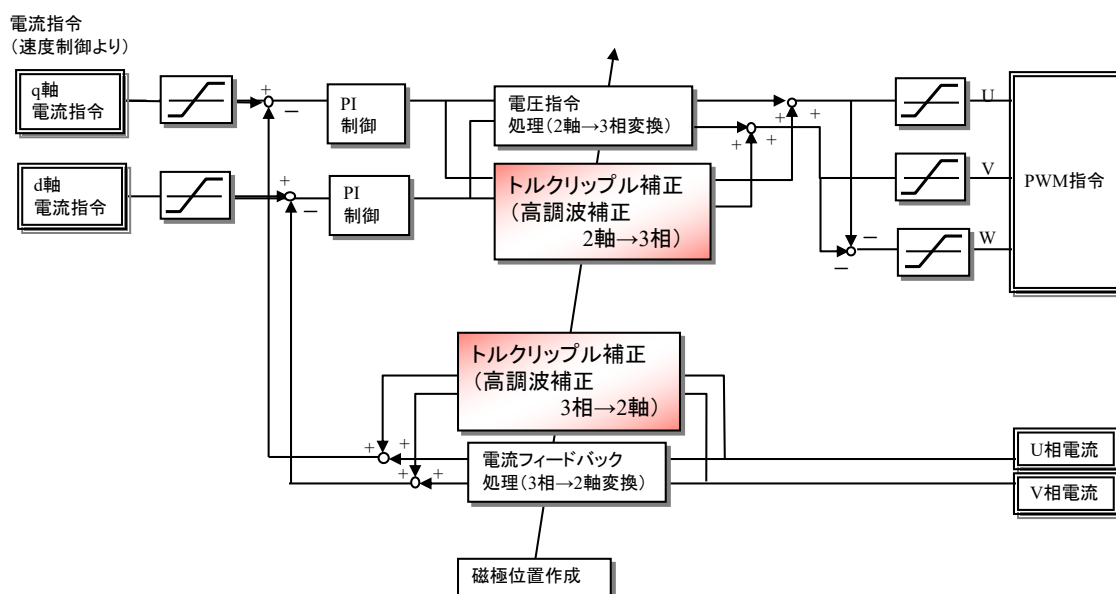


図 3.12 電流制御専用ハードウェアコアの制御ブロック図

図 3.13 は実際にトルクリップルが大きいモータの誘起電圧波形である。このモータでは電気角 1 周期当たり 7 次の高調波が重畳している。このようなモータに対して提案

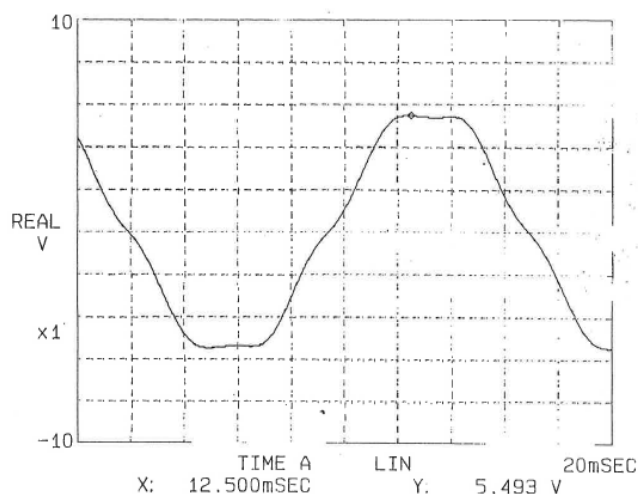


図 3.13 トルクリップルを持つ実モータの誘起電圧波形

のトルクリップル補正の効果をシミュレーションで検証した結果が図 3.14 である。ASIC 内のハードウェアコアとして実装する場合、ソフトウェアのように後からアルゴリズムを変更することができないため、本検証結果を持って実際の開発へと移行した。

図 3.15 に、開発したこのトルクリップル補正を搭載した電流制御ハードウェアコアを用いた実際のサーボアンプでの効果を検証した結果を示す。ボールネジピッチ 12mm/rev、送り速度 F : 4,000mm/min 時の指令位置に対するフィードバック位置の偏差と、モータに流している電流の q 軸成分である q 軸電流を上段に示しており、後段は、実際の機械に伝わる振動の大きさを振動計で測定したデータを示している。

このように、サーボモータの持つトルクリップルによって生じる送りムラ（位置変動＝速度変動）を抑制しており、また、機械に与えてしまう振動も抑制できていることがわ

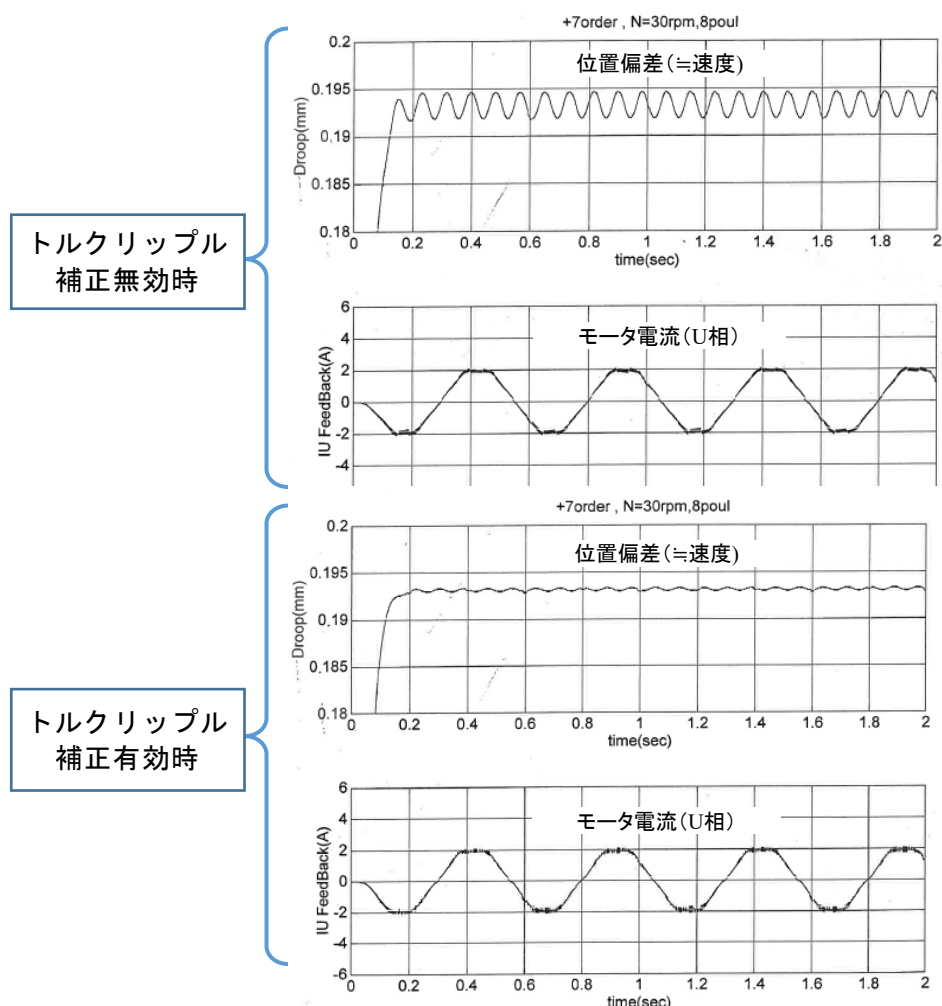


図 3.14 トルクリップルを持つモータ制御時の速度変動（シミュレーションによる効果検証）

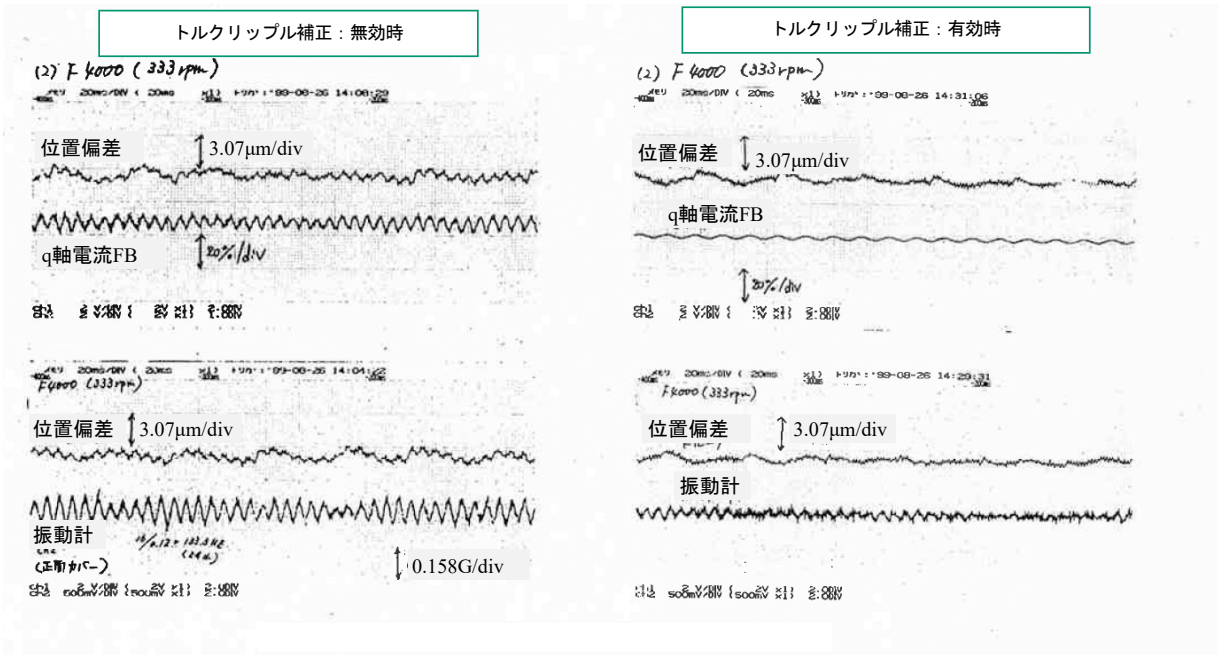


図 3.15 トルクリップル補正の実機での検証

かる。

3.5.2 コギングトルク補正

なお、モータが持つもう一つの速度変動を誘発する要因としてコギングトルクがあるが、これは前述のトルクリップルとは違い、モータの回転子にある磁石とステータのスロット形状との関係で発生する磁気抵抗の変化で生じ、これは図 3.16 に示すようにモータの電流制御系の外で外乱トルクとして作用する。したがって、電流制御専用ハードウェアコアではなく、メイン CPU でのソフトウェアでの補正とした。また、このコギングトルクはモータ毎のバラツキが大きく、取り付ける位置検出器（エンコーダ）の取

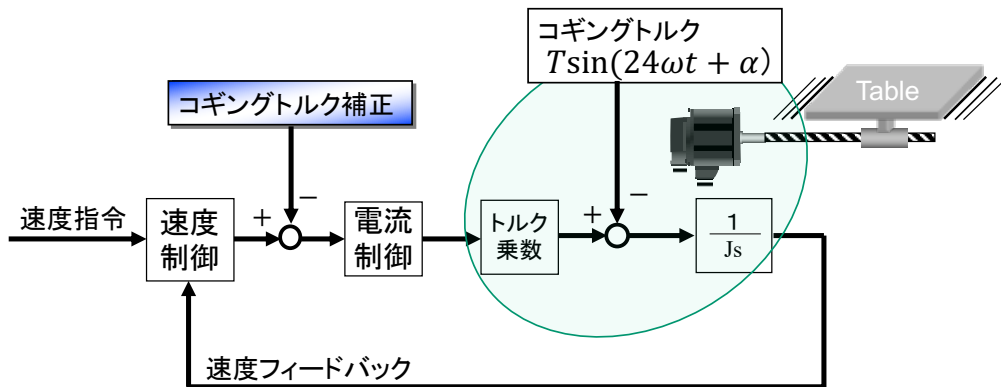


図 3.16 コギングトルク補正

り付け誤差でも、補正する場合の位相に大きく影響してしまうため、固定のパラメータで補正することが難しい。したがって、今回は、補正のパラメータを自動で推定することができるコギングトルク補正を開発した。

ここで、コギングトルクはほぼ正弦波に近似することができ、また、今回対象としたモータでは磁石とステータのスロット数の関係で一回転当たり 24 山のリップルが発生することから、コギングトルクを次のように想定する。

$$\text{コギングトルク} : T \sin(24\omega t + \alpha) \quad \dots(3-1)$$

ここで、コギングトルク補正を以下のように実施する。図 3.17 に補正のブロック図を示す。

$$\tau = A^\wedge(t) \sin(24\omega t) + B^\wedge(t) \cos(24\omega t) \quad \dots(3-2)$$

$$A^\wedge(t) = \frac{\sigma}{s+\sigma} \cdot J^\wedge \cdot e \cdot \cos(24\omega t) \cdot \Gamma \cdot \frac{1}{s} \quad \dots(3-3)$$

$$B^\wedge(t) = -\frac{\sigma}{s+\sigma} \cdot J^\wedge \cdot e \cdot \sin(24\omega t) \cdot \Gamma \cdot \frac{1}{s} \quad \dots(3-4)$$

e : 速度偏差 = 速度指令 - 速度フィードバック

この時、電流ループの応答が限りなく高くゲインが 1 とすると、モータにかかるトルク T_M は

$$\begin{aligned} T_M &= -\tau - T \sin(24\omega t + \alpha) \\ &= -A^\wedge(t) \sin(24\omega t) - B^\wedge(t) \cos(24\omega t) - T \sin(24\omega t) \cdot \cos(\alpha) - T \cos(24\omega t) \cdot \sin(\alpha) \\ &= \{-A^\wedge(t) - T \cos(\alpha)\} \cdot \sin(24\omega t) + \{-B^\wedge(t) - T \sin(\alpha)\} \cdot \cos(24\omega t) \quad \dots(3-5) \end{aligned}$$

ここで、

$$s A^\wedge(t) = \frac{\sigma}{s+\sigma} \cdot J^\wedge \cdot e \cdot \cos(24\omega t) \cdot \Gamma = \frac{\sigma}{s+\sigma} \cdot J^\wedge \cdot \frac{-1}{Js} \cdot T_M \cdot \cos(24\omega t) \cdot \Gamma \quad \dots(3-6)$$

$$J^\wedge = J \quad \dots(3-7)$$

$$a = \{-A^\wedge(t) - T \cos(\alpha)\} \quad , \quad b = \{-B^\wedge(t) - T \sin(\alpha)\} \quad \dots(3-8)$$

とすると、

$$\begin{aligned} s A^\wedge(t) &= \frac{\sigma}{s+\sigma} \left\{ \frac{a}{24\omega} \cos(24\omega t) - \frac{b}{24\omega} \sin(24\omega t) \right\} \cdot \cos(24\omega t) \cdot \Gamma \\ &= \frac{\sigma}{s+\sigma} \left\{ \frac{a}{24\omega} \cos^2(24\omega t) - \frac{b}{24\omega} \sin(24\omega t) \cdot \cos(24\omega t) \right\} \cdot \Gamma \\ &= \frac{\sigma}{s+\sigma} \left\{ \frac{a}{48\omega} (1 + \cos(48\omega t)) - \frac{b}{48\omega} \sin(48\omega t) \right\} \cdot \Gamma \\ &= \frac{a\Gamma}{48\omega} = \frac{\Gamma}{48\omega} \cdot \{-A^\wedge(t) - T \cos(\alpha)\} \quad \dots(3-9) \end{aligned}$$

$$(s + \frac{\Gamma}{48\omega})A^\wedge(t) = -\frac{\Gamma}{48\omega}T\cos(\alpha) \quad \dots(3-10)$$

$$A^\wedge(t) = \frac{\frac{\Gamma}{48\omega}}{s + \frac{\Gamma}{48\omega}} T\cos(\alpha) \simeq -T\cos(\alpha) \quad \dots(3-11)$$

$$s B^\wedge(t) = -\frac{\sigma}{s+\sigma} \cdot J^\wedge \cdot e \cdot \sin(24\omega t) \cdot \Gamma = -\frac{\sigma}{s+\sigma} \cdot J^\wedge \cdot \frac{-1}{Js} \cdot T_M \cdot \sin(24\omega t) \cdot \Gamma \quad \dots(3-12)$$

$$J^\wedge = J \quad \dots(3-13)$$

とすると、

$$\begin{aligned} s B^\wedge(t) &= -\frac{\sigma}{s+\sigma} \left\{ \frac{a}{24\omega} \cos(24\omega t) - \frac{b}{24\omega} \sin(24\omega t) \right\} \cdot \sin(24\omega t) \cdot \Gamma \\ &= -\frac{\sigma}{s+\sigma} \left\{ \frac{a}{24\omega} \sin(24\omega t) \cdot \cos(24\omega t) - \frac{b}{24\omega} \sin^2(24\omega t) \right\} \cdot \Gamma \\ &= -\frac{\sigma}{s+\sigma} \left\{ \frac{a}{48\omega} \sin(48\omega t) - \frac{b}{48\omega} (1 - \cos(48\omega t)) \right\} \cdot \Gamma \\ &= \frac{b\Gamma}{48\omega} = \frac{\Gamma}{48\omega} \cdot \{-B^\wedge(t) - T\sin(\alpha)\} \end{aligned} \quad \dots(3-14)$$

$$(s + \frac{\Gamma}{48\omega})B^\wedge(t) = -\frac{\Gamma}{48\omega}T\sin(\alpha) \quad \dots(3-15)$$

$$B^\wedge(t) = \frac{\frac{\Gamma}{48\omega}}{s + \frac{\Gamma}{48\omega}} T\sin(\alpha) \simeq -T\sin(\alpha) \quad \dots(3-16)$$

よって、モータにかかるトルク T_M は、

$$\begin{aligned} T_M &= (-A^t - T\cos(\alpha)) \cdot \sin(24\omega t) + (-B^t - T\sin(\alpha)) \cdot \cos(24\omega t) \\ &\simeq 0 \end{aligned} \quad \dots(3-17)$$

つまり、ある一定の速度でモータが回転しているときに、このコギングトルク補正のパラメータ $A^\wedge(t)$ と $B^\wedge(t)$ が自動で推定され、コギングトルクを相殺することができる。

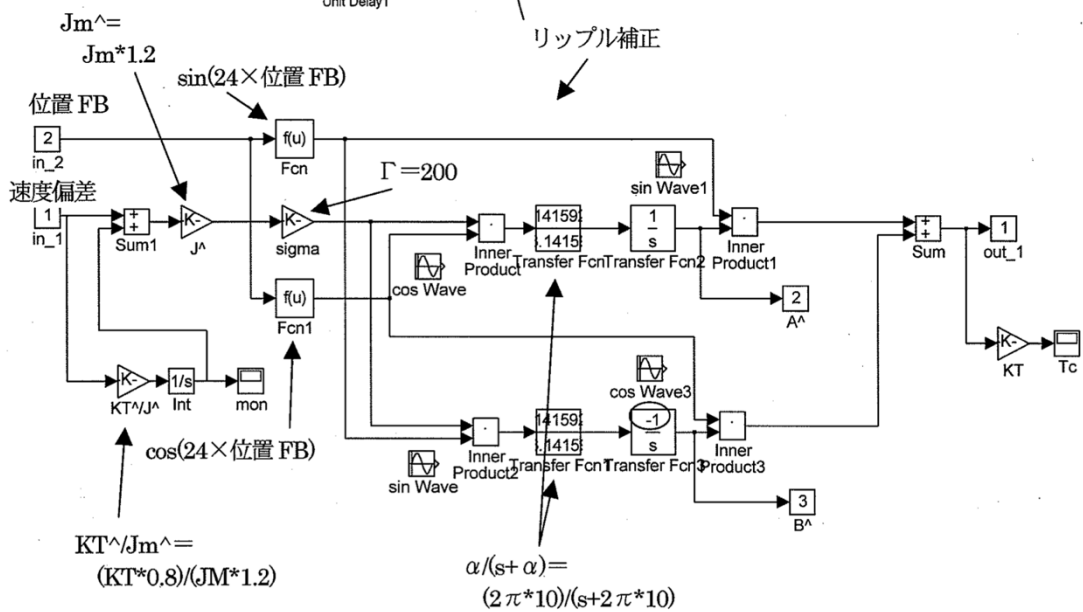
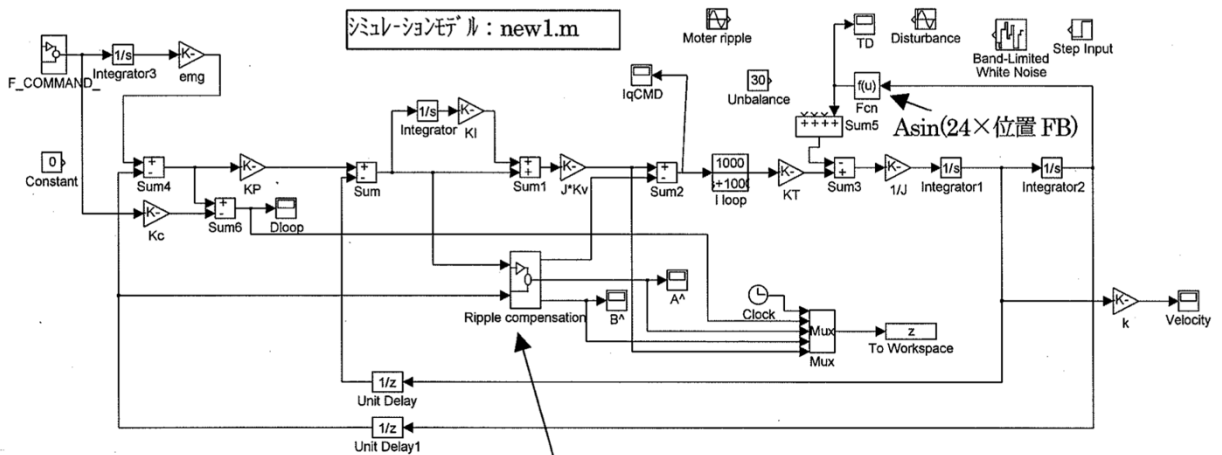


図 3.17 コギングトルク補正のブロック図

図 3.18 にこの補正の効果をシミュレーションで検証した結果を示す。

運転初期には、コギングトルクにより位置偏差（ドループ：Dloop）が変動しているが、時間が経過するとともに補正パラメータ $A^{\wedge}(t)$ と $B^{\wedge}(t)$ が自動で推定され、結果として位置偏差（Dloop）が 0 へと収束できていることがわかる。

また図 3.19 では、実際の現場を想定して、ランダムノイズが重畳される環境下でも正しく、コギングトルクが推定されるかどうかを検証した結果である。ここでも、補正パラメータ $A^{\wedge}(t)$ と $B^{\wedge}(t)$ が自動で推定され、位置偏差（ドループ）が 0 へと収束している。

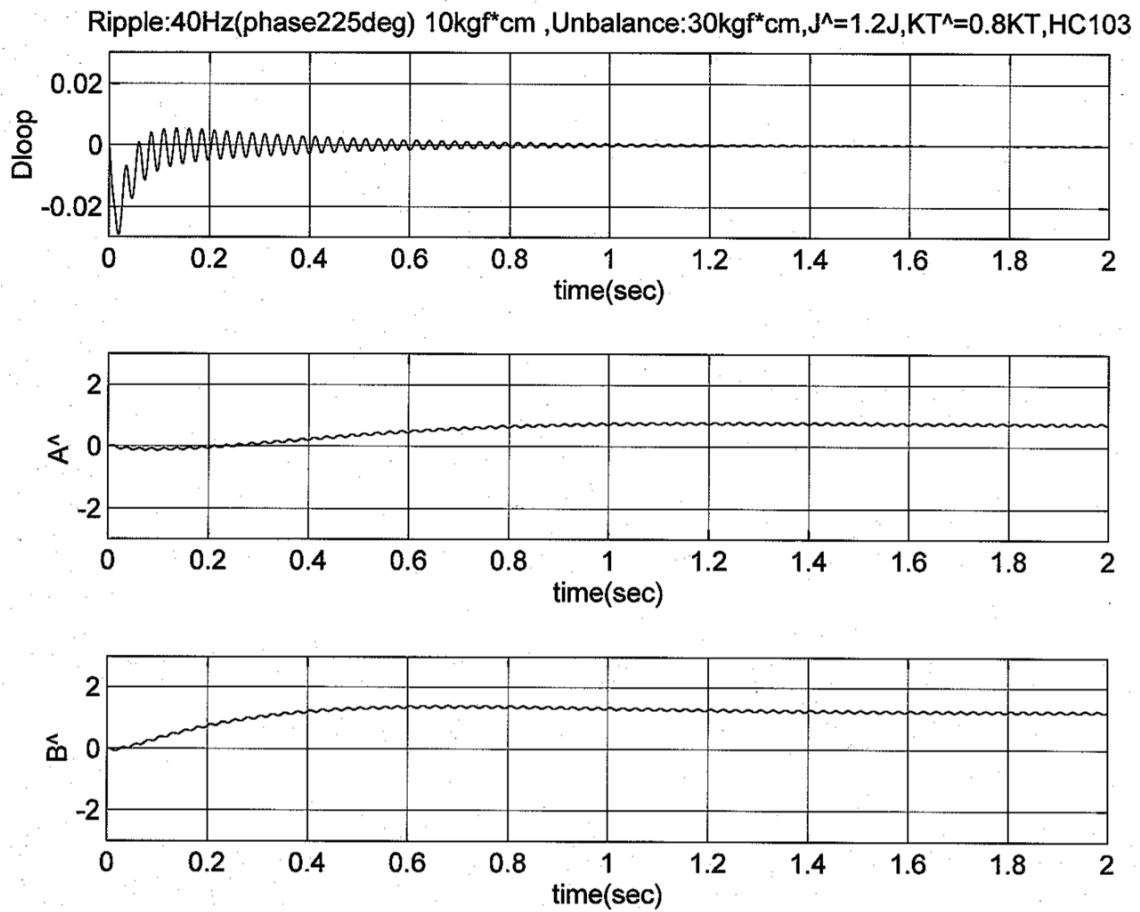


図 3.18 コギングトルク補正の効果検証

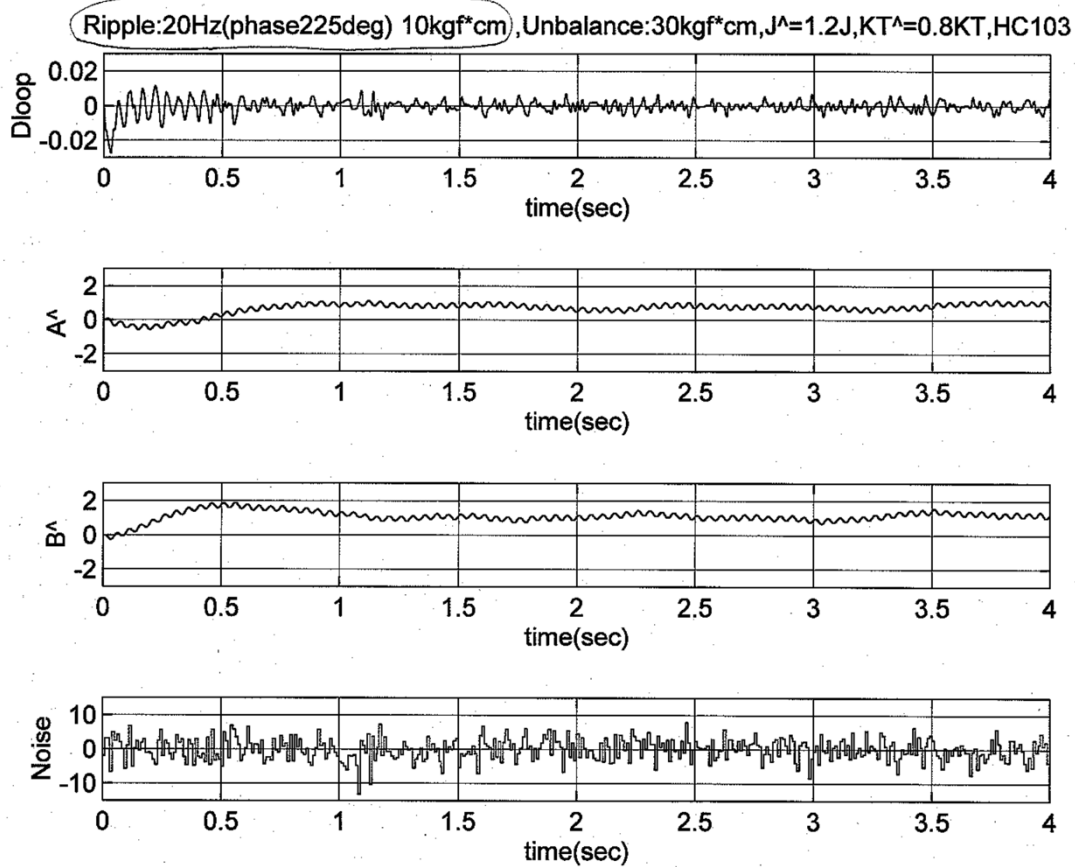


図 3.19 コギングトルク補正の効果検証（ランダムノイズ有り）

3.7 高応答サーボ制御に対応した検出器の構築

今回、電流制御専用ハードウェアコアの開発により、1st Step、2nd Step と比較して位置制御の処理周期を4倍の $T/4$ 、速度制御の処理周期を2倍の $T/4$ に向上させたことはすでに述べたが、一方で、この処理周期を向上させるのに伴い、検出器の分解能や精度を合わせて改善しないと狙った効果を実現できないどころか、むしろ悪影響を与えてしまう。これについて、今回分析を実施したので以下に述べる。

3.7.1 検出器分解能の影響

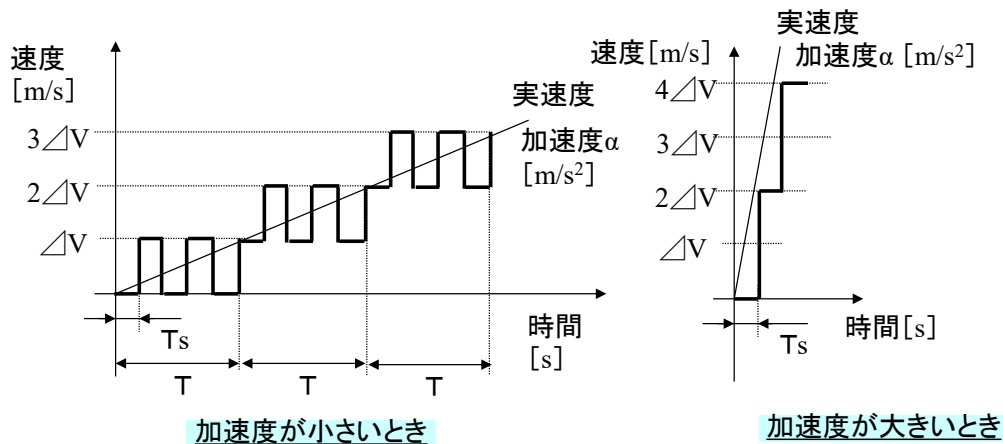
一方、サーボや主軸制御のハイゲイン化を実現するためには、検出器性能の向上も不可欠となる。サーボ制御では一定の周期毎に速度検出器から出力される位置データをサンプリングし、それを処理周期時間毎の差分を採ることで、速度フィードバックデータを作成する。この速度フィードバックデータをもとに、速度指令と比較しゲインを掛けてモータを制御するため、このフィードバックデータの挙動がハイゲイン化をした場合には、システムに大きな影響を与えることになる。

まずは、検出器分解能の影響を以下に如何に示す。量子化による1サンプリング（速度ループ処理周期）当たりの速度フィードバックは以下の図のようになる。

図 3.20 に示すように、実際の速度の変化が少ない時（実速度の加速度が小さい時）は、速度検出器の分解能によるフィードバックデータのリップル（階段）が周期的に発生する。この階段の高さは、速度ループの周期 T_s が速い（小さい）ほど大きくなり、また、検出器分解能が粗いほど大きくなる。更に、階段の変化の周期 T は階段の高さが大きいほど低周波数となる。

一般的に、工作機械の固有振動数は数 Hz から数十 Hz と低周波数であるため、この階段の周期が遅いと機械の固有振動を誘発しやすくなる。

つまり、同じ速度検出器分解能を持ったシステムでも、ハイゲイン化を実現するため（無駄時間を少なくするため）速度ループの処理周期を上げると、この速度フィードバ



$$\Delta V = \frac{\Delta}{T_s}$$

ΔV : 速度分解能 [m/s]
 Δ : 速度検出器分解能 [m]
 T_s : 速度ループ処理周期 [s]

図 3.20 速度フィードバックの量子化誤差

ックの量子化誤差の影響で機械の振動を誘発しやすくなり、結果としてハイゲイン化が難しくなる。図 3.21 に実際のモータでの検出器分解能によるフィードバックデータの違いを示す。処理周期を上げることで、量子化誤差によるリップルが、加工結果に大きく左右することがわかる。したがって、処理周期の向上と合わせて、検出器の分解能の向上も合わせて実施した。

測定結果例【R: 75mm, F2000mm/min, ホールねじピッチ10mm】

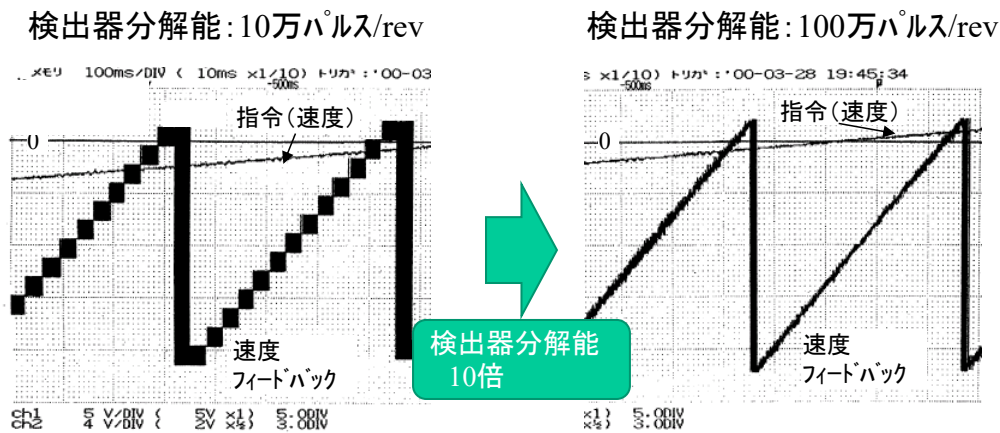


図 3.21 検出器の量子化誤差の影響

3.7.2 検出器絶対精度の影響

また、位置や速度検出器はその原理上、信号を作る原波に起因した周期的な絶対位置の偏差を持つが、その位置偏差が機械に与える影響を以下に示す。

$$\text{位置偏差} = ep \times \sin(\theta) = ep \times \sin\left\{2 \times \pi \times \left(f \times \frac{N}{60}\right) \times t\right\} \quad \dots(3-18)$$

$$\text{速度偏差} ev = ep \times \left\{2 \times \pi \times \left(f \times \frac{N}{60}\right)\right\} \times \cos\left\{2 \times \pi \times \left(f \times \frac{N}{60}\right) \times t\right\} \quad \dots(3-19)$$

$$|\text{速度偏差}| = 2 \times ep \times \left\{2 \times \pi \times \left(f \times \frac{N}{60}\right)\right\} \quad \dots(3-20)$$

ep : 位置偏差振幅、 f : うねりの周期、 N : 回転数(r/min)

一般的にこのうねりの周期は、sin, cos 波を基準にした検出器の信号原波によるものが多く、一回転当たり、2048 波や、4096 波といったものが多い。この速度フィードバックに生じる速度偏差が機械加振トルク（モータトルク）に与える機械加振トルク量は、

速度帯域を $K_v(\text{rad/sec})$ としたとき、図 3.22 のブロック図で示され(3-21)式で与えられる。

$$\text{機械加振トルク (N}\cdot\text{m)} = K_v (\text{rad/sec}) \times J (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \times e_v \quad \dots(3-21)$$

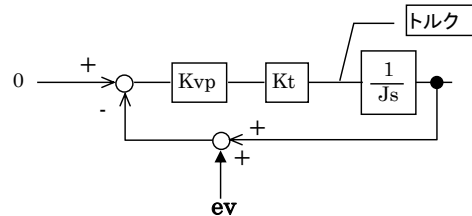


図 3.22 検出器の絶対位置偏差が与える機械加振トルク

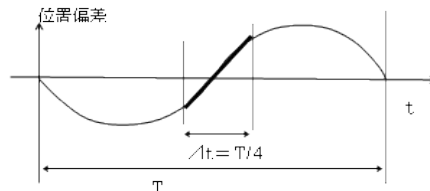


図 3.23 検出器の絶対位置偏差が最大となる回転数

つまり、ハイゲイン化= K_v の向上を図ると、検出器が持つ絶対精度の偏差により、機械の振動を大きく誘発することがわかる。また、サンプリング周期と速度偏差量が最も影響するモータ回転数は、 Δt が $T/4$ となるときのと仮定し、簡単のため $15/(f \cdot \Delta t)$ r/min として、算出した。なお、この回転数のときの速度偏差が最大となる。

図 3.24 に、一定速で送った場合の速度フィードバックの変動を測定したものを示す。左側が従来の検出器でのデータを送り速度 150r/min, 300r/min, 600r/min と変化させた場合のデータを、右側に開発した高分解能・高精度検出器でのデータを示す。開発品の方が、少ない速度フィードバックの変動に抑えられていることがわかる。

加えて図 3.25 では、検出器の絶対位置精度が機械端に与える影響を同じく送り速度 150r/min, 300r/min, 600r/min と変化させた時で比較したデータを示している。今回比較した従来の検出器では、検出器が持つ原信号の周期 f が 1 回転あたり 256 山/rev、サンプリング周期が約 0.2msec であるため、速度偏差が最大となる速度は 264r/min であり、今回 300r/min で送った時にその影響が最も大きくなる。これが今回の機械の固有振動数 300Hz を誘発し、機械端での振動を大きくしていることがわかる。一方、右側の開発した検出器では、こういった機械振動を誘発することなく制御できている。

さらに、図 3.26 では、Y 軸に従来の検出器と新型検出器を載せ替えた時の真円精度の測定結果を示している。上段がモータ端での精度であるが、ここでは従来検出器と新型検出器との間には精度の差があまり見られないが、機械端での精度を見ると、従来検出器では、機械共振を誘発し、精度がモータ端の $1.1\mu\text{m}$ から $2.0\mu\text{m}$ と約 2 倍悪化しているのに対し新型検出器では、精度の悪化が見られないことがわかる。

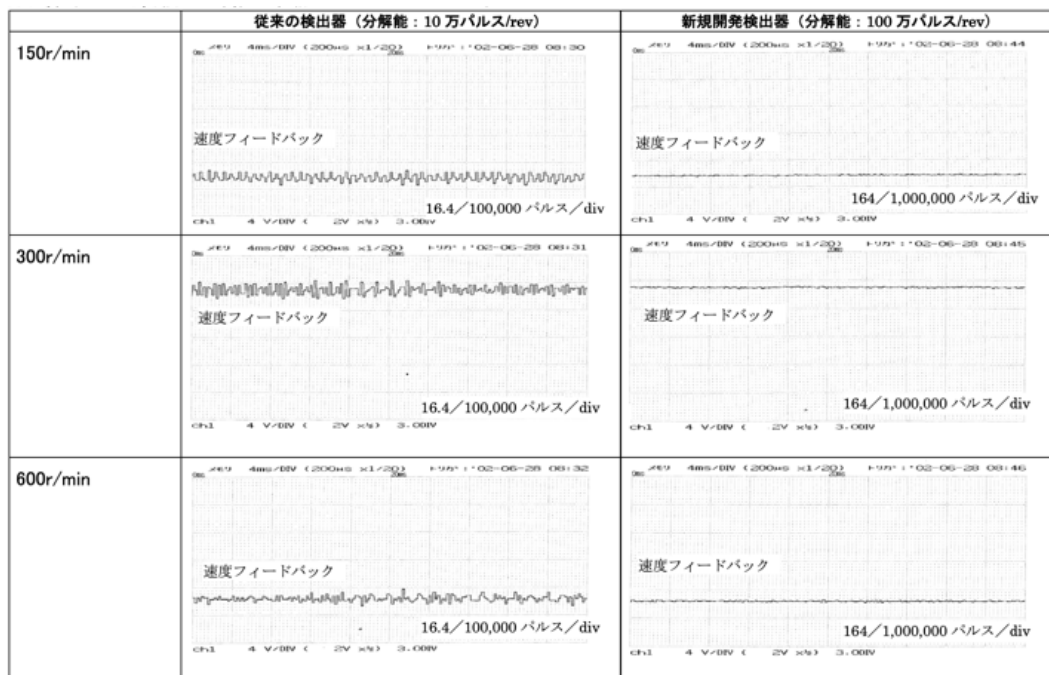


図 3.24 速度フィードバック変動 (モータ単体での駆動)

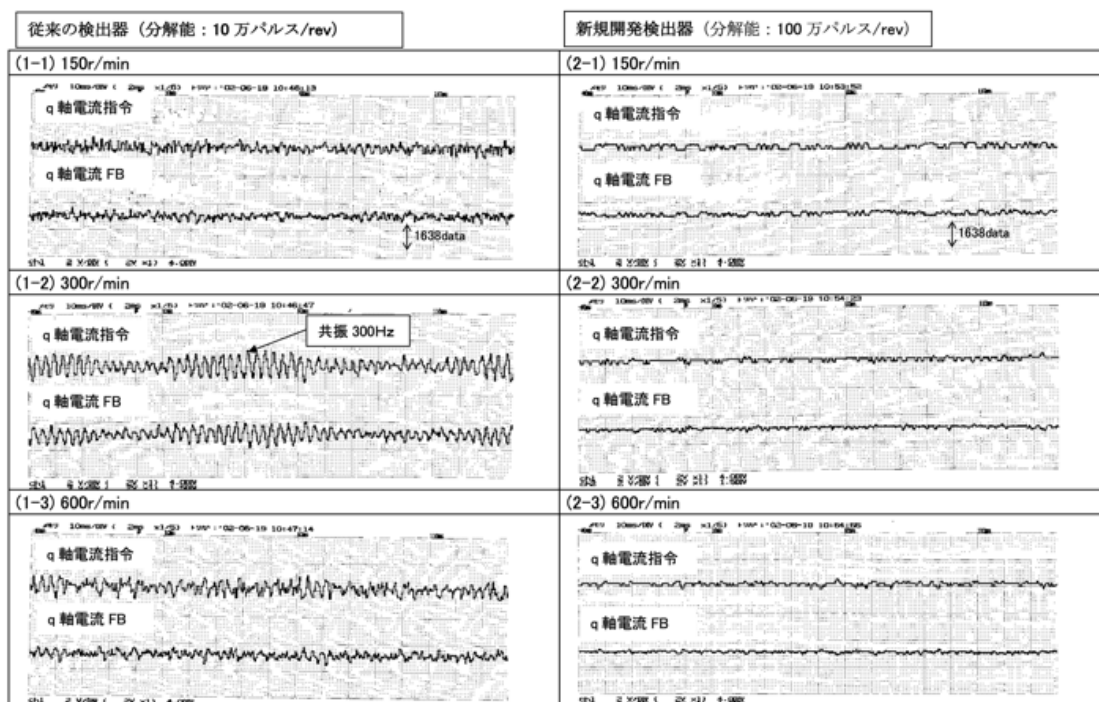


図 3.25 検出器精度が機械端に与える影響

【条件】

◇モータ : (X 軸)新規開発検出器(分解能: 100 万パルス/rev), (Y 軸)従来の検出器(分解能: 10 万パルス/rev)
 ◇半径 : 100mm, ◇送り速度 : 1500r/min

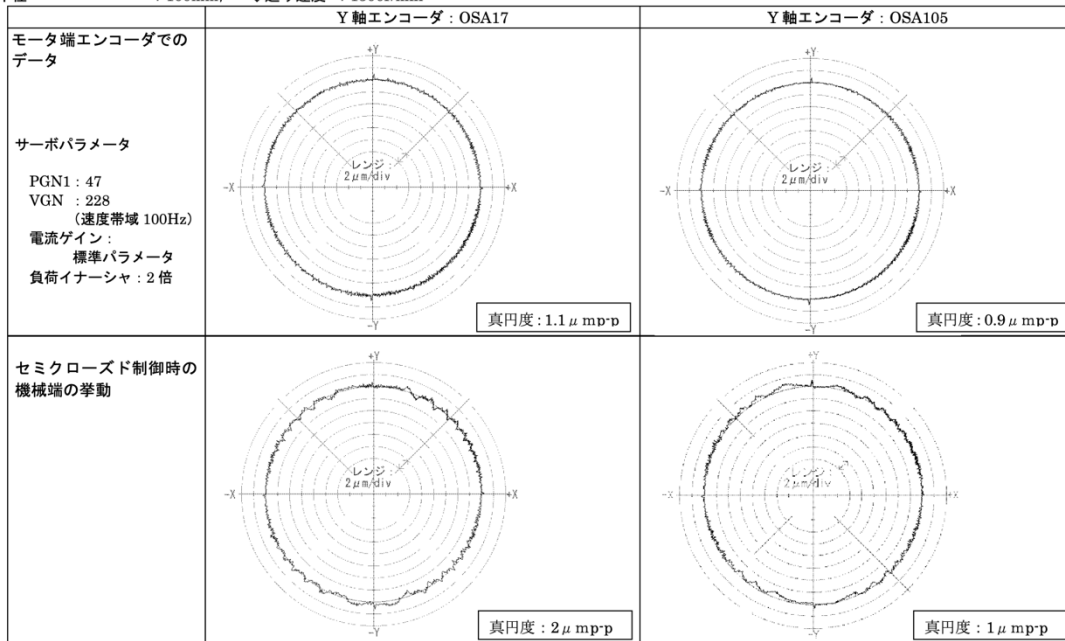


図 3.26 検出器の絶対位置偏差が機械に与える影響
 (真円精度)

これらの実験結果から分かるように、位置制御や速度制御の処理周期の向上に合わせて、検出器の分解能に加え、絶対精度の向上が必須であることがわかる。

3.7.3 高分解能、高精度検出器の開発

上記のような観点から、今回サーボ・主軸制御専用高速エンジンの開発によるハイゲイン化を実施するのに合わせて、サーボ、主軸検出器それぞれに、高精度化と高分解能化を実施した。ポイントを如何に示す。

- ① 基本波の分解能向上 : 256 波 → 2048 波
- ② 光学スリット(サーボ)の精度向上
- ③ 製品出荷試験でのアナログ信号の振幅、位相、オフセット補正
- ④ 機械搭載後の実機稼働中での振幅、位相、オフセットの自動補正

3.8 サーボ制御における効果検証

3.8.1 送り精度の滑らかさ

ここまで述べてきたような「高応答電流制御」「位置制御、速度制御の処理周期アップ」「トルクリップル補正」や「検出器分解能と精度の向上」による効果を本節で示す。

図 3.27 では一定速で工作機械の X 軸と Y 軸を送り速度 F2,000mm/min で送った時の位置偏差（ドループ）変動を示す。従来システム（3rd Step）では、 $1.6\sim 1.7\mu\text{m}$ の変動があったものが、 $0.4\mu\text{m}$ と約 1/4 に削減しており、大幅な改善効果が得られている。これにより、切削加工、特に仕上げ加工などを実施した場合の加工精度の大幅な向上が期待でき、金型加工などにおいて必要となる研磨工程の削減、もしくは、時間短縮が見込め、生産性の向上に大きく貢献できることがわかる。

同じく図 3.28 に半径 R100mm、送り速度 F8,000mm/min での円弧補間における真円精度の比較を実施した。ここでも、従来システム（3rd Step）では、真円精度が約 $4\mu\text{m}$ であったものが、 $2.5\mu\text{m}$ と約 1.5 倍の精度向上が確認できた。

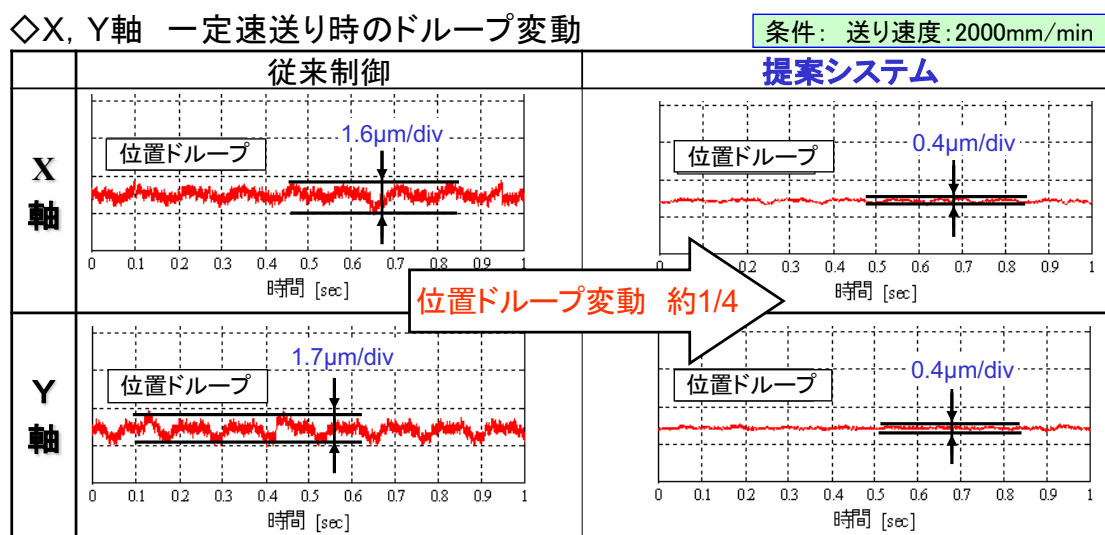


図 3.27 提案システムの効果〔一定速送り時の精度〕

真円精度比較

<条件> R:100mm, F:8,000mm/min

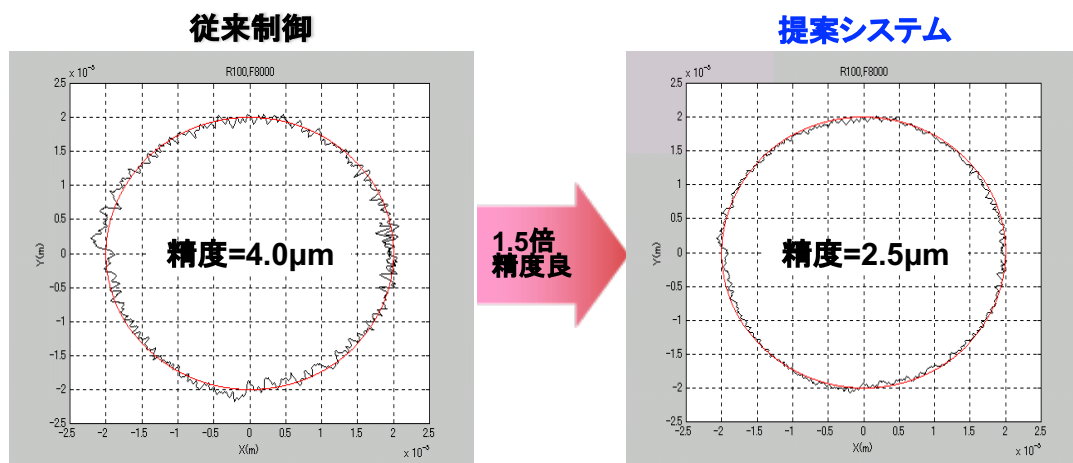


図 3.28 提案システムの効果〔円弧補間時の精度：真円度〕

最後に機械の位置決め時間の短縮効果を検証した。

図 3.29 にその検証モデルを示す。検証モデルは、図のような横型マシニングセンタであり、実際に測定した x 軸の周波数特性を使用した。ここで、周波数特性を示す赤線は閉ループ特性であり、青線は開ループ特性である。

なお、ここで用いたサーボアンプは、4th Step のアンプであり、電流制御専用ハードウェアコアを搭載したシステムである。この測定データに基づき、機械の制御対象モデルを作り、3rd Step から 4th Step、さらには、将来的に位置制御や速度制御も高速演算コアを開発し、処理周期や無駄時間を短縮した場合のシミュレーションを実施した。

その結果を図 3.30 に示す。3rd Step のシステムでは、位相余裕の観点から、安定して位置ループゲインを上げられる限界は 28rad/sec であるのに対し、4th Step では 33rad/sec と向上しており、位置決めが整定するまでの時間も 80msec から 70msec と約 15%向上している。更に、現在 LSI のプロセス改善に伴い、位置制御や速度制御までを専用演算コアで実現した場合、更に処理周期で 1/4 のサイクル時間までの短縮が見込めていることから、このシステムで構築した場合、位置ループゲインは 4th Step の 33rad/sec から 60rad/sec に向上できており、位置決め整定時間は 4th Step の 70msec から 40msec と約 80%の短縮が可能なが検証できた。これは、工作機械の生産性向上

において大きく貢献できることを示している。

X軸 実測結果

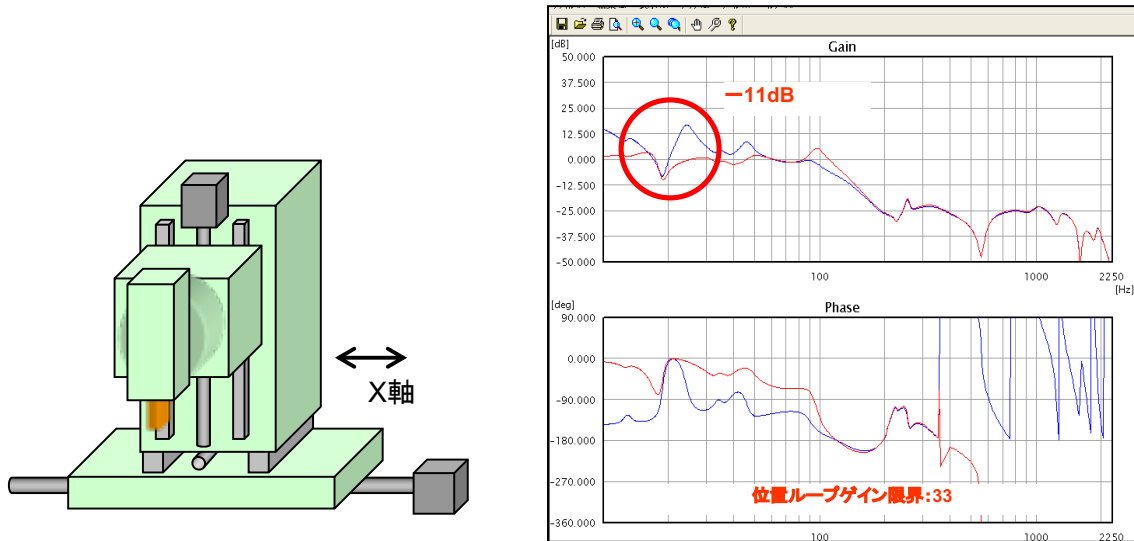


図 3.29 サーボ高応答化の検証モデル [実測データ]

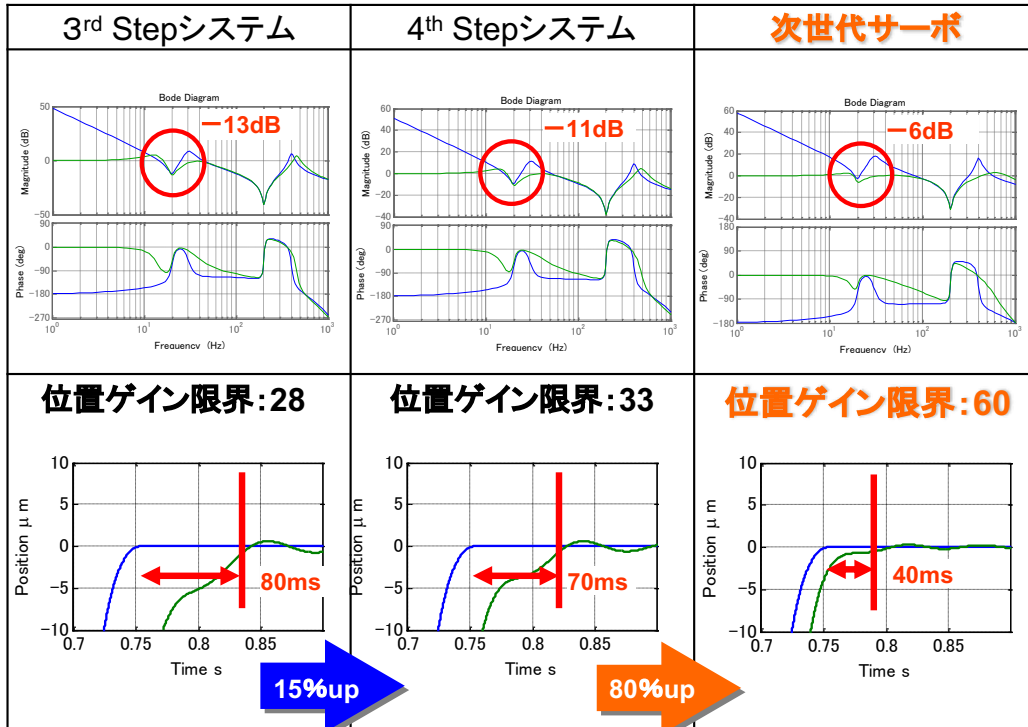


図 3.30 工作機械におけるサーボ高応答化の効果 [シミュレーション]

第四章 主軸制御の常時位置ループ化

4.1 これまでの主軸制御方式と課題

近年では図 4.1 のような複合加工機と呼ばれる加工機も増加してきており、主軸モータの制御は、その工作機械の付加価値向上とともに年々複雑化している。送り軸であるサーボモータ軸は常に位置ループ制御を構築していればいいのに対し、主軸モータはその加工モードに応じて、速度ループ制御や位置ループ制御の切り替えが必要となる。例えば、ミーリング加工、フライス加工、旋削加工などの場合は、主軸の回転数である速度だけを制御すればいいのに対し、同じ機械構成のまま、同期タップ加工や C 軸制御加工のように加工条件によっては、主軸の回転角度を制御する位置ループ制御へと移行する必要がある。

従来は、この加工モードの切り替えの度に、主軸端の機械的な角度を再構築する必要があり、所定の位置検出シーケンスを組むために加工時間を短縮できないなどの課題があった。また、速度制御ループ構築時は、位置ループを構築している時と比べて、切削外乱などの影響を受けやすいなどの課題があった。本節では、これらの主軸モータ制御方式に関する課題について述べる。

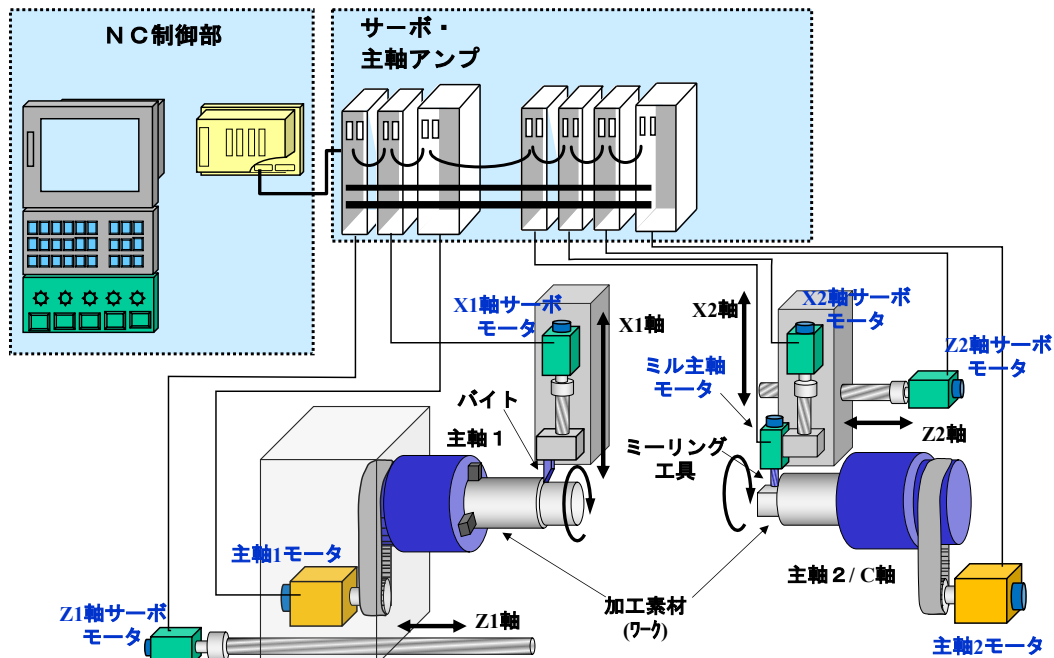


図 4.1 旋盤ベース複合加工機のシステム構成例

4.1.1 制御方式切替えによる加工時間短縮の課題

通常、主軸に対し速度制御しか必要がない加工モード（例えば旋削）の場合、CNC コントローラも主軸アンプも主軸先端の角度といった位置情報を管理することはない。

したがって、図 4.2 に示すように、C 軸制御（ミル加工）に移行する場合は、一旦、主軸を停止し、改めて主軸先端の角度を検出するために原点復帰を行う必要がある。

また、図 4.3 に示すように、2つの主軸で一つのワークを掴み旋削している状態から C 軸制御（ミル加工）に移行する場合も、主軸 1 と主軸 2 のそれぞれが原点復帰を行う必要があることから、一旦ワークを開放（チャック開放）し、主軸 1 と主軸 2 が順番に原点復帰を実施。その後、再びワークを掴みなおし（チャック閉）、C 軸としての角度を割出し、その後、ミル加工へと移行する必要がある。これらの動作切替えには一回当たり数秒から数十秒の時間を要するため、これらの加工を繰り返し行う場合には、生産性に大きな影響が出る場合があった。

また、これらのシーケンス処理を実施するためのプログラムも複雑になるなどの課題があった。

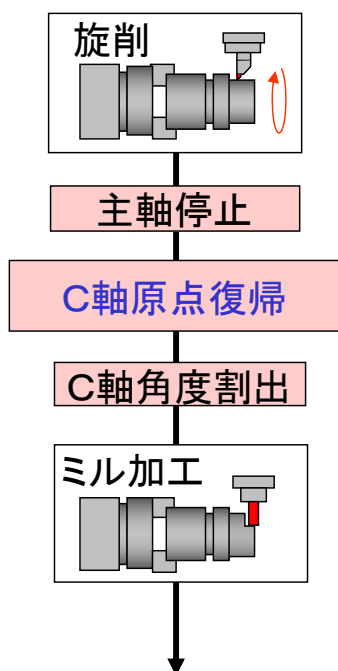


図 4.2 旋削モードからミル加工（C 軸）モード切替

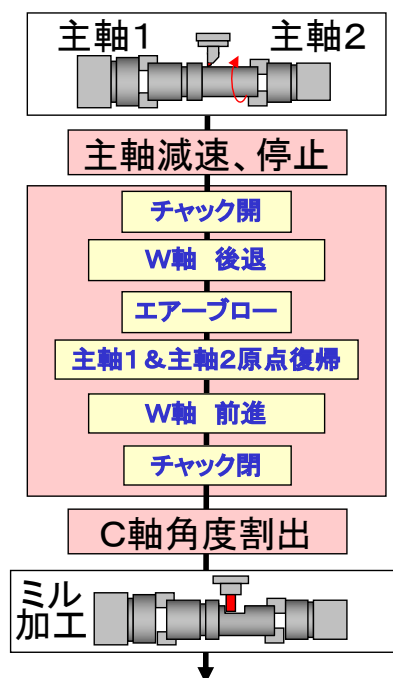
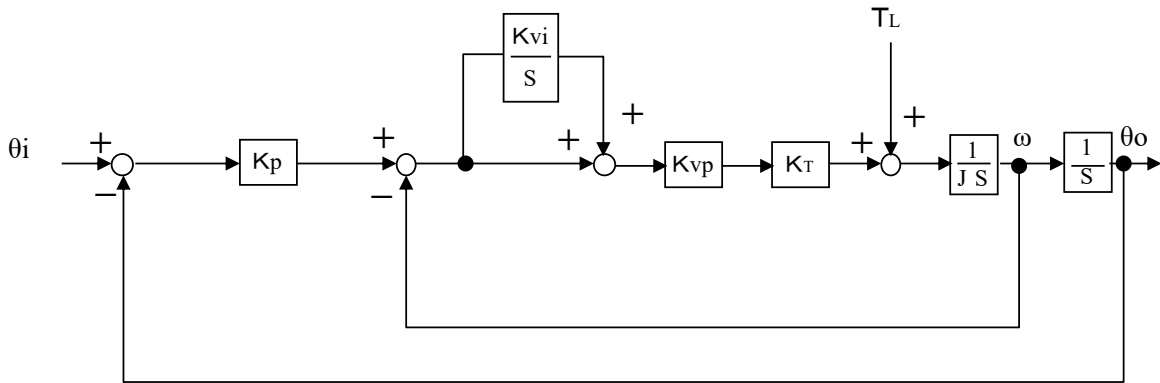


図 4.3 主軸連動旋削モードから C 軸連動ミル加工切替

4.1.2 速度制御ループにおける外乱ロバスト性の課題

前述したように、通常の旋削加工やミル加工時の工具主軸は、主軸の位置を管理する必要がなく、高速で回転し、かつ、高い出力を出すことだけが求められるので、速度ループで制御される。逆に言えば、高速で回転する場合や頻りに工具交換のために加減速を実施する場合には、位置ループで制御することができなかった。この理由については、次項で述べる。

しかしながら、本来、速度ループで制御するより、位置ループまで構築した方が切削外乱などに対するロバスト性も向上する。図 4.4 に主軸の制御系ブロック図を示す。



- | | |
|----------------------------|---|
| θ_i : 位置指令 [rad] | K_T : モータトルク定数 [N・m/A] |
| θ_o : 位置出力 [rad] | T_L : モータ軸換算負荷トルク [N・m] |
| θ_b : 機械誤差補正 [rad] | J : モータロータイナーシャ J_m
+ モータ軸換算負荷イナーシャ J_L [kg・m ²] |
| K_p : 位置ループゲイン [rad/s] | I : モータ電流 [A] |
| K_{vp} : 速度ループ比例ゲイン | S : ラプラス演算子 [1/s] |
| K_{vi} : 速度ループ積分ゲイン | |
| ω : モータ回転速度 [rad/s] | |

図 4.4 主軸制御系のブロック図

ここで、入力 $\theta_{ip} = 0$ として、負荷トルク T_L を加えたときの出力 θ_o の速度ループ系での外乱応答性能は以下の(4-1)式となる。

$$\theta_o = \frac{1}{J} \frac{1}{S^2 + K_v S + K_v \cdot K_{vi}} T_L \quad \dots(4-1)$$

一方、位置ループ系を構築した場合の外乱応答性能は(4-2)式となる。

この式より、速度ループの外乱応答特性である(4-1)式と比較し、位置ループ系の外乱応

$$\theta_o = \frac{1}{J} \frac{S}{S^3 + K_v S^2 + K_v(K_{vi} + K_p)S + K_v \cdot K_{vi} \cdot K_p} T_L \quad \dots(4-2)$$

$$K_v = \frac{K_{vp} \cdot K_T}{J} \quad \dots \text{速度ループ帯域} \quad \dots(4-3)$$

位置ループ化することで
外乱に対する
低周波域の抑制効果UP

答特性は、位置ループゲインを上げることで(4-2)式の分母を大きくすることができ、外乱 T_L の影響を小さく抑えることができることがわかる。

また、この外乱に対する速度ループ系の応答特性をボード線図で示したのが図 4.5 となる。ここでは、速度ループゲイン (=速度帯域) を 600rad/sec とした時の特性を示すが、低周波数帯域においては、-100db 付近でゲインはフラットである。

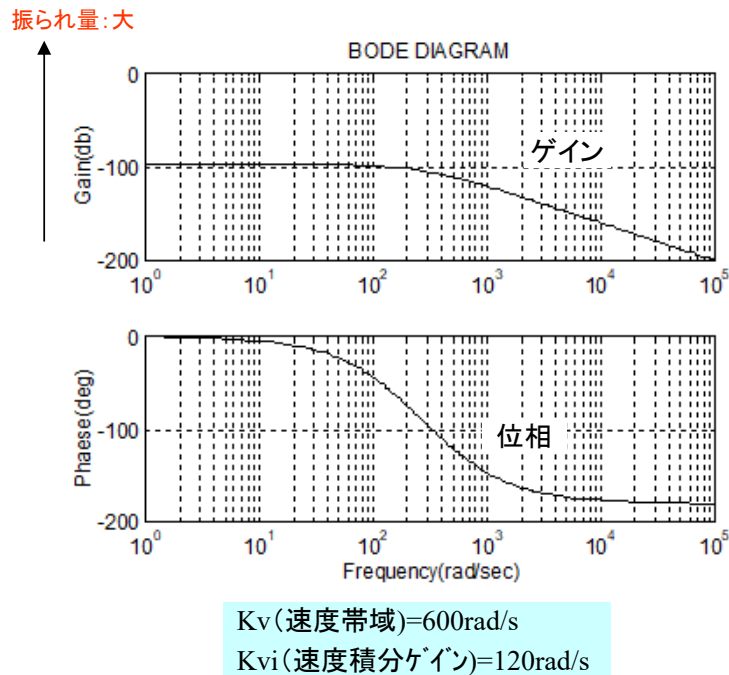


図 4.5 速度制御ループ系の外乱応答特性

これに対し、位置ループ系の応答特性を示したのが、図 4.6 となる。上段が位置ループゲインを 5rad/sec、下段が位置ループゲインを 47rad/sec とした場合の特性である。このように位置ループゲインを上げることで、つまり位置ループの応答性を上げることで、

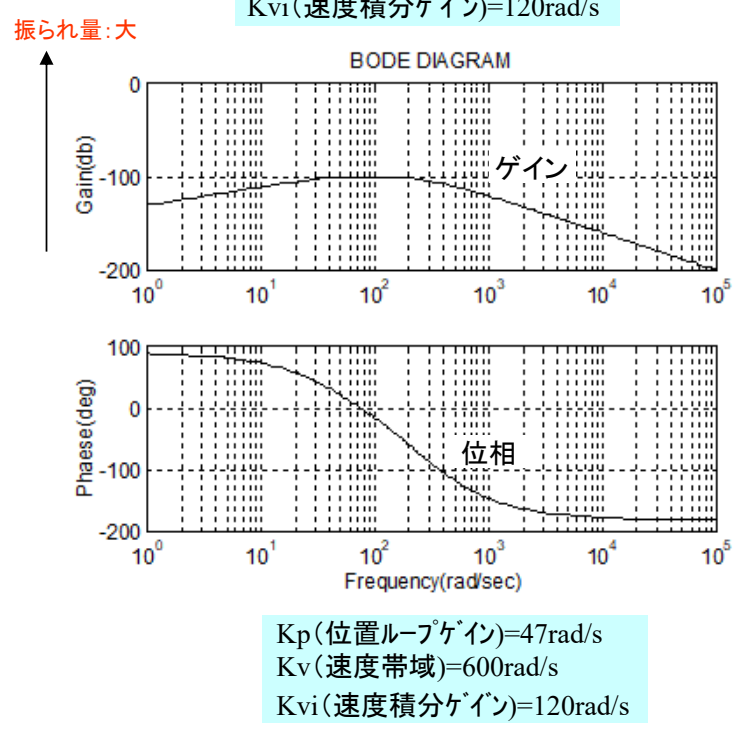
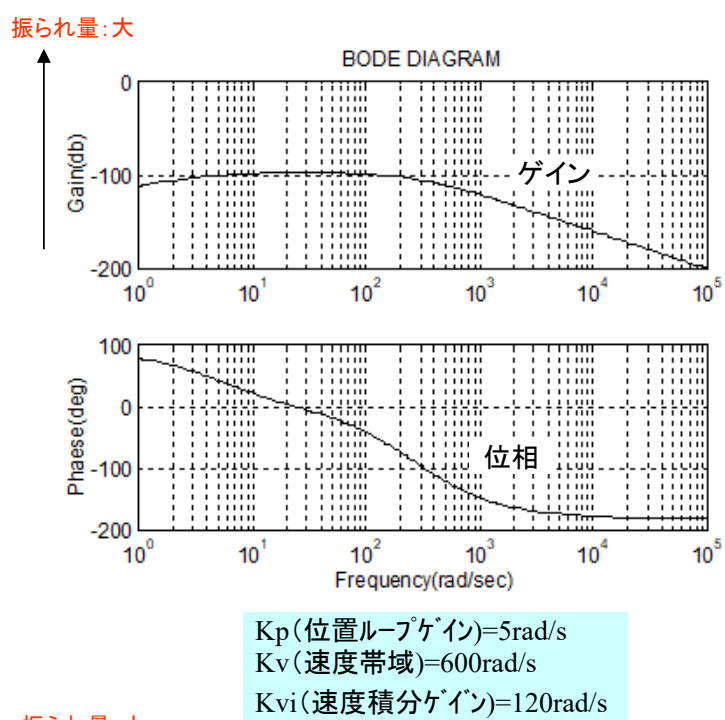


図 4.6 位置制御ループ系の外乱応答特性

特に低周波数帯域の外乱に対するロバスト性が高くなることがわかる。また、速度ループ系だけでなく位置ループ系まで構築した方が、外乱抑制効果が高く、また、高速・高精度な制御系を構築することができることがわかる。

但し、主軸モータの制御では従来、常時位置ループ系を組むことはできなかったため、

切削外乱に対する応答性においても十分に制御系の剛性を上げることができなかった。

4.2 主軸制御を常時位置ループ化する場合の課題

では、なぜ主軸アンプではサーボアンプのように常時位置ループの構成をとることができないのか。その課題について、以下で説明する。

4.2.1 位置制御を必要としない場合の加減速時間

主軸では、加工条件において工具の交換が頻発するため、交換が発生する度に、一旦主軸モータを減速停止させて、工具交換し、再びトップスピードまで加速させる動作を繰り返す必要がある。また、主軸の回転数は、分速数千回転から数万回転を必要とし、一回の加速あるいは減速に要する時間は数秒から数十秒かかるケースもある。この加減速時間を如何に短縮するかが、主軸モータ制御に求められる大きな要求項目の一つである。

図 4.7 にモータの出せる最大トルク線図を示す。横軸がモータ速度であるが、一般的にモータの出せる最大トルクをモータの発生する誘起電圧のため高速域では電圧が飽和し、アンプが流す最大電流値が一定であっても出せるトルクは減少する。

このような状況下、位置ループを組んだまま加減速を行う場合、図 4.7 の点線で示すように加減速に必要なトルクはモータの出せる最大トルク以内に収めるような時定数でプログラミングする必要がある。仮に、図 4.8 の一点鎖線に示すようにモータの出せる

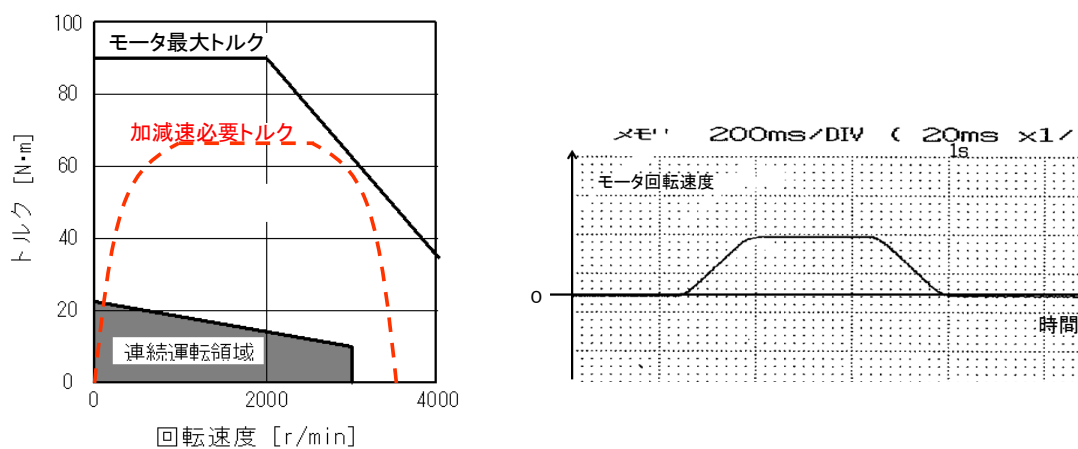


図 4.7 位置ループ制御時の加減速波形〔正常

最大トルクを上回るトルクが必要となるような時定数でプログラムを組んだ場合、指令に追従できないために位置指令と実際の位置との間に偏差が溜まり、加減速に必要なトルクが、モータの出せる最大トルクを下回ったタイミングで、今度は溜まった偏差を取り戻すためにオーバーシュートが発生し、結果的に振動や機械へのショックを与えてしまうことになる。

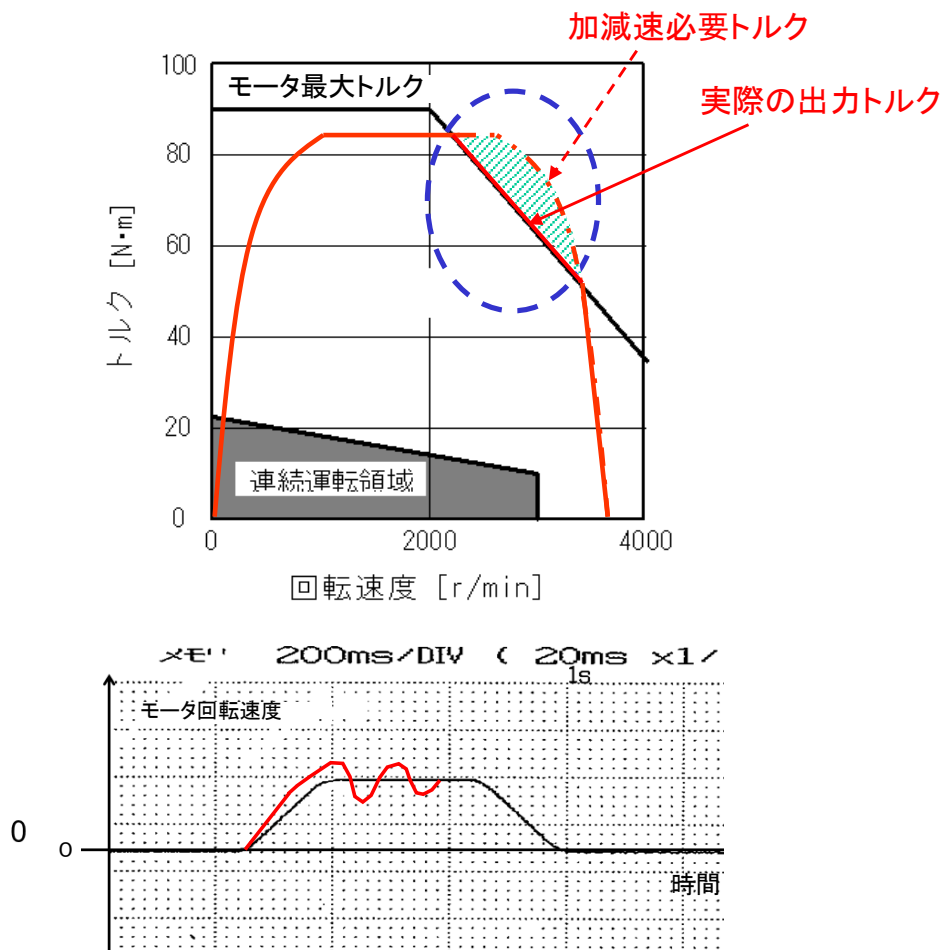


図 4.8 位置ループ制御時の加減速波形〔異常時〕

一方、前述したように位置制御を必要としない加工モードの場合、主軸のトップスピードまでの加速や、停止するまでの減速時間は最短にすることが望まれる。したがってモータの出せるトルクを最大限に活用した加減速が必要となる。

図 4.9 に速度ループ制御時の軌跡を示す。図 4.9 の実線に示すように、速度ループ制御時は必要な加減速トルクがモータの最大トルクを上回るような時定数でプログラミングしても、位置の偏差が溜まることはないため、オーバーシュートが発生することもなく、最大トルクをフルに活用した加減速が可能となる。但し、この場合は位置の管理は行っていないため、主軸端の工具の刃先の向き（角度）を管理することは不可能となる。

したがってこれまでの主軸制御では、加工モードに応じて位置と速度制御の切替えを実施している。

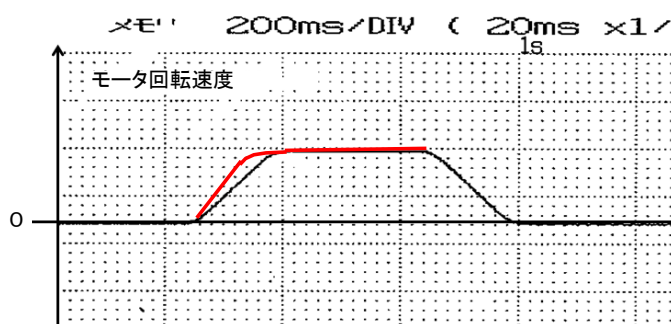
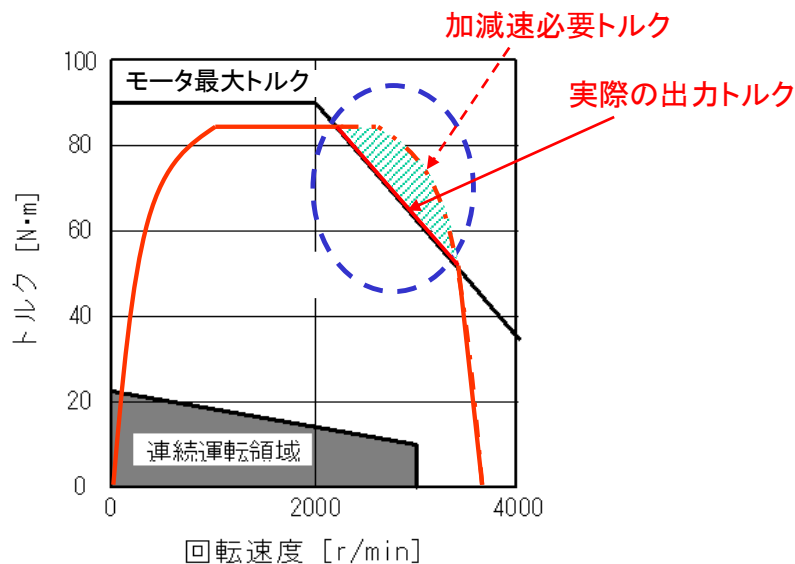


図 4.9 速度ループ制御時の加減速波形

4.2.2 主軸制御用検出器

主軸モータには、最高速 3 万 r/min（毎分 3 万回転）を超えるような性能が要求される。また、主軸端には切削水などが侵入する可能性もあるため、その耐久性と高速性の観点から、主軸用検出器はサーボ用検出器のような光学式の検出器は使うことができず、磁気検出方式の検出器が一般的に用いられる。

従来これらの検出器で毎分数万回転を超える領域で位置ずれすることなく主軸端の角度を正確に把握し続けることは難しかった。仮に C 軸制御などで位置制御に切り替える場合は、速度検出用の検出器とは別に位置制御専用の検出器を設置する必要があった。

しかしながら、我々は主軸検出器の検出原理の改善や主軸アンプへの伝達を従来のアナログ信号からシリアルデータに変えるなどの改良を実施し、毎分数万回転を超える状況でも位置ずれすることなく、正確に主軸端の位置情報をフィードバックすることができるシステムを構築した。

図 4.10 に今回開発した高精度・高信頼性検出器のシステム構成を、また、その特長を表 4.1 に示す。

アンプとのインターフェースをシリアル化したのに加え、従来プリアンプで実施していた波形調整を無くしたことで、検出器ヘッドとアンプとの間に必要だったプリアンプを削除した。これにより、耐油性などの耐環境性を大きく向上させた。なお、波形調整に関しては、アナログ変換器の精度向上や高速化により、分解能を 50 万パルス/rev か

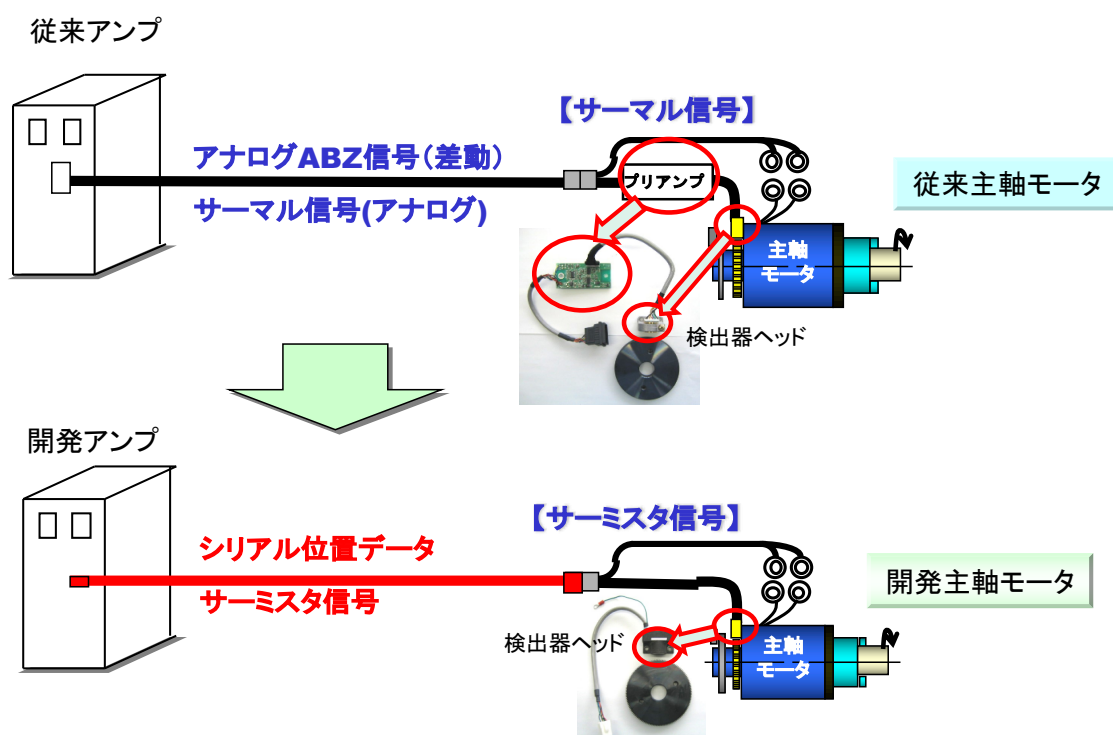


図 4.10 高精度・高信頼性主軸検出器

ら 400 万パルス/rev へと 4 倍向上させ、かつ、検出器歯車と検出器ヘッドとの間を広ギャップ化(0.15mm→0.3mm)し、偏芯等のギャップ変動による絶対精度への影響を従来比 1/2 以下に抑制（精度誤差 max124”→max40”）できた事が大きく寄与しており、従来、機械に設置後に必要であったアナログ原波形のボリュームによる調整を排除することができた。

表 4.2 にその他の仕様詳細について従来品との比較を記載している。

この主軸検出器を開発したことで、次に述べる常時位置ループ化を可能とした。

表 4.1 高精度・高信頼性主軸検出器の特長

主軸検出器に求められる課題	今回の対応	
1.加工精度の向上	・高分解能化	・50万p/rev→400万p/rev ⇒高速域まで安定した位置制御が可能
	・絶対精度の向上	・広ギャップ化(0.15mm→0.3mm)により偏芯等ギャップ変動の絶対精度への影響を従来比1/2以下に抑制 (精度誤差max124''→max40'')
2.耐環境性能の向上	・耐油性の向上	・プリアンプをセンサヘッドに内蔵し、IP67対応予定
	・耐ノイズ性向上	・シリアル通信化
3.組付性の容易化	・調整レス化	・調整ボリュームレス化(ボリューム数6→0)
	・取付の簡易化	・プリアンプレス化(センサヘッド内蔵)

表 4.2 高精度・高信頼性主軸検出器の仕様

	従来検出器	新規開発 検出器	従来検出器	新規開発 検出器
最高回転数 (r/min)	標準仕様		高速仕様	
	20,000		40,000	
停止時 絶対精度 (秒)	200秒(120秒) 注1)	100秒(40秒) 注1)	300秒(120秒) 注1)	150秒(40秒) 注1)
歯車	256歯	128歯	128歯	64歯
分解能 (p/rev)	256歯 × 2048 = 50万	128歯 × 32768 = 400万	128歯 × 2048 = 26万	64歯 × 32768 = 200万
出力信号	アナログ	シリアル	アナログ	シリアル
備考	プリアンプ有 波形調整要	プリアンプ内蔵 波形調整レス	プリアンプ有 波形調整有	プリアンプ内蔵 波形調整レス

注1) ()内は「ピッチエラー補正有効時の位置決め精度 (NC位置指令にて補正)

4.3 常時位置ループ化のための追従遅れ補償制御

4.3.1 追従遅れ補償制御の概要

前述のように常時、位置ループを組んだ場合の大きな課題は、モータの出せる最大トルクを最大限に活用した加減速を実施した場合、指令に追従できないことで発生する位置の偏差によるオーバーシュートが大きい要因を占める。したがって、今回、図 4.11 に示すような追従遅れ補償制御を有する主軸アンプを提案する。

これにより、加工モードによらず主軸アンプの中では常時、位置ループを組むことが

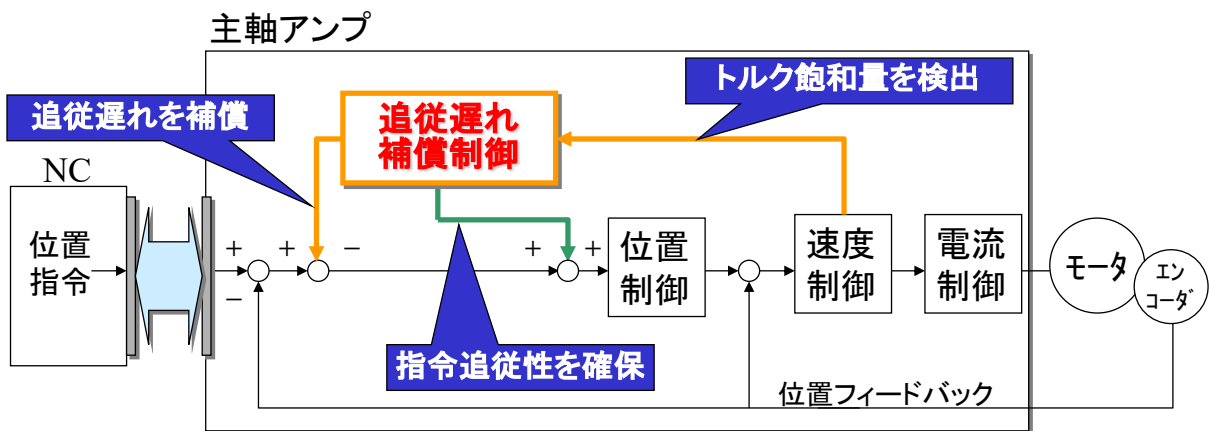


図 4.11 常時位置ループ化のための追従遅れ補償制御

可能となり、加工モードの切替え時間の短縮を図るとともに、位置ループを組むことにより切削時の外乱抑制効果も上げることが可能となる。

4.3.2 追従遅れ補償制御

本項では、この追従遅れ補償制御について詳細を説明する。図 4.12 に提案する追従遅れ補償制御を有する主軸アンプの制御ブロック図の詳細を示す。

(1) CNC コントローラ処理

CNC コントローラ 1 では、通常の旋削加工やマシニング加工、フライス加工といった場合は主軸に対し速度指令信号を出力するが、本制御方式ではこの場合でもこの速度指令信号を積分し位置指令を作成する。一方、同期タップや C 軸制御加工といった場合には

主軸端の回転角度に応じた位置指令信号を出力する。CNC コントローラ 1 では、このような加工モードの変化に応じて、スイッチ 4 d を切替え、主軸アンプに対する位置指令信号 θ_r を作成する。その際、指令切替制御部 4 e は、切替時に位置制御運転か速度制御運転かの情報である位置／速度運転切替えコマンド MOD を出力する。

(2) 位置、速度、電流制御処理

CNC コントローラ出力された位置指令信号 θ_r とモータ端や主軸端に取付けられた検出器によって生成された位置信号 θ_s との差である位置偏差信号 θ_e は積分器 2 0 にて生成された補正位置偏差量 θ_{cd} に差引かれ、偏差入力信号 θ_f として偏差制御部 2 1 に入力される。また、位置指令信号 θ_r は微分器 2 2 によって指令速度信号 Fdt に変換され、さらに微分器 2 3 によって指令加速度信号 Acc に変換される。そして、位置／速度運転切替えコマンド MOD、指令速度信号 Fdt 、指令加速度信号 Acc 及び偏差入力信号 θ_f と共に位置偏差制御部 2 1 に入力される。位置偏差制御部 2 1 は所定の処理を行い、位置制御部 5 に偏差制限手段出力値 θ_g を出力する。位置偏差制御部 2 1 の所定の処理の詳細については後述する。

位置偏差制御部 2 1 の出力値 θ_g は位置制御部 5 に入力され、位置制御部 5 は速度指令に換算した速度指令演算信号 V_r を出力する。そして、速度指令演算信号 V_r と微分器 7 によって位置検出器 6 にて検出された位置信号 θ_s の微分値との差分である速度偏差信号 V_e は速度制御部 8 に入力される。

速度制御部 8 は、速度比例制御器 9 と速度積分制御器 1 0 を備えている。速度偏差信号 V_e が速度制御部 8 に入力されると、速度偏差信号 V_e は速度比例制御器 9 と速度積分制御器 1 0 の双方に伝達され、各々比例電流指令値と積分電流指令値を算出し、これを加算した電流指令値 I_r を電流制限器 1 1 に出力する。電流制限器 1 1 は電流指令値を電流制御部 1 2 が出力できる最大電流値に制限する。そして電流制限器 1 1 から出力された電流制限値 I_{r1} を基に電流制御部 1 2 はモータ 1 3 の電流を制御する。

電流制限部 1 1 で電流が制限されているときには、電流制限器 1 1 は速度積分制御器 1 0 に対し積分を中止するよう電流制限指令 I_1 を出力する。速度積分制御器 1 0 は積分を停止し、電流が制限を受けている時に発生する速度偏差信号 V_e を不必要に積分して電流制限が解除されたときに速度指令値に対してのオーバーシュートを抑制する構成となっている。また、電流制限器 1 1 は電流制限指令 I_1 を位置偏差制御部 2 1 にも出力

する。

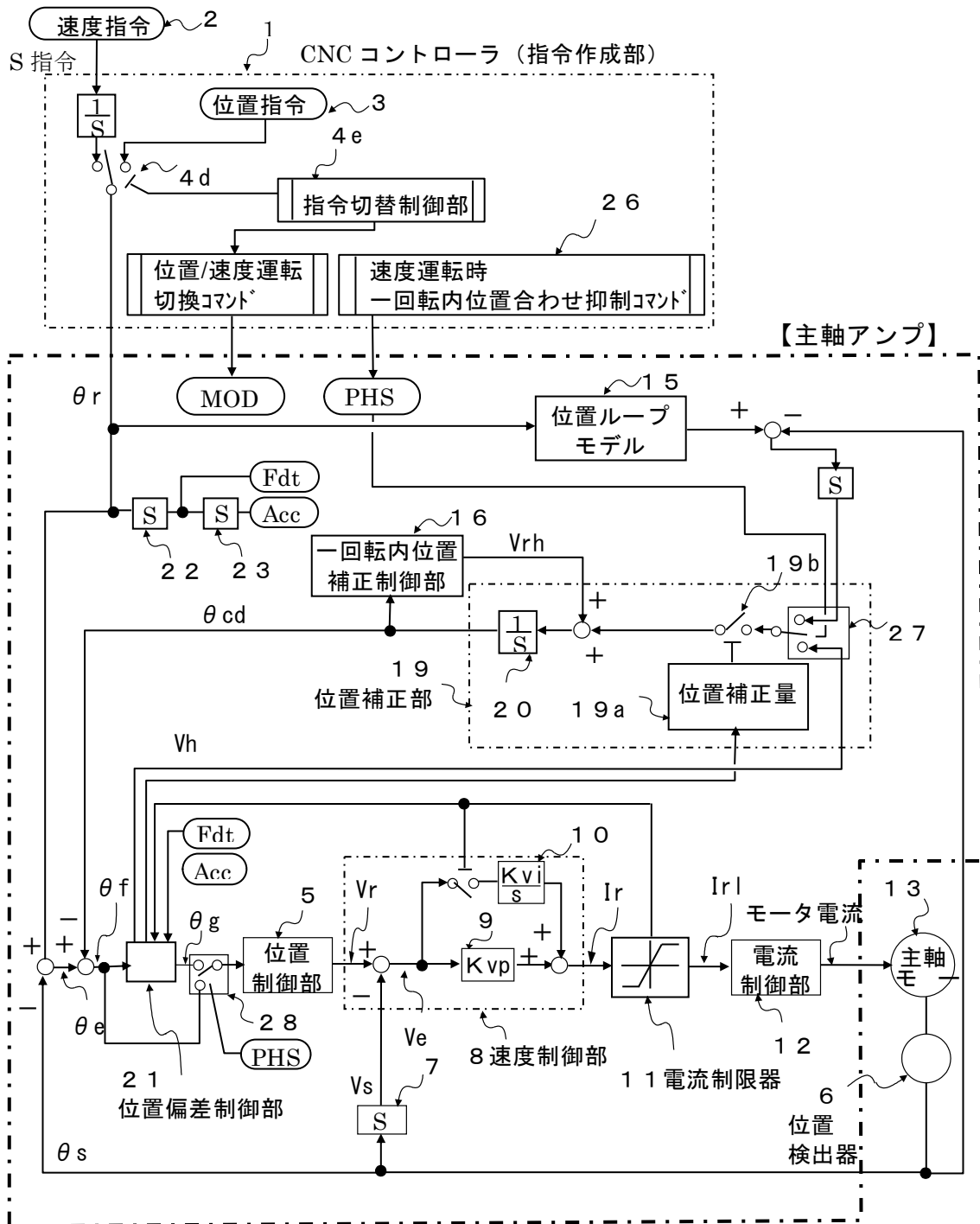


図 4.12 追従遅れ補償制御のブロック図

(3) 位置偏差制御部

ここで、位置偏差制御部 21 について説明する。位置偏差制御部 21 は、位置／速度運転切替えコマンド MOD、指令速度信号 F d t、指令加速度信号 A c c の情報を基に、下記に示す処理による条件により位置補正部 19 の位置補正量制御部 19 a に指令を送り所定の条件を基にスイッチ 19 b を ON とし、また入出力偏差信号 V h を出力し、また位置制御部 5 へ位置偏差制御部出力値 θ_g を出力する。

図 4.13 は位置偏差制御部 21 が行う処理のフローチャートである。位置偏差制御部 21 の処理は、電流制限指令 I 1 中 (S 1 0 1) で、かつ、位置／速度運転切替えコマンド (MOD) が絶対的な位置の追従性を要求しない速度運転モード時 (S 1 0 2) に、指令加速度信号 A c c が正の値 ($A c c \geq 0$) の場合には (S 1 0 3)、もし偏差入力信号 θ_f が正の方向に増加していれば (S 1 0 4)、位置偏差制御部出力値 $\theta_g = \theta_g$ の前回値とし (S 1 0 5)、入出力偏差信号 V h を $V h = \theta_f - \theta_g$ とする (S 1 0 6)。その際、図 10 の位置補正部 19 内の位置補正量制御部 19 a に対し指令を送り、スイッチ 19 b を ON にするため、位置偏差制御部 21 の入出力偏差信号 V h を積分器 20 で累積し、補正位置偏差量 θ_{cd} を出力する。この補正位置偏差量 θ_{cd} を、位置偏差信号 θ_e から減算して偏差入力信号 θ_f が作成される。

また、指令加速度信号 A c c が負の値 ($A c c < 0$) の場合には (S 1 0 9)、もし偏差入力信号 θ_f が負の方向に増加していれば (S 1 1 0)、出力 $\theta_g = \theta_g$ の前回値とし (S 1 1 1)、入出力偏差信号 V h を $V h = \theta_f - \theta_g$ とする (S 1 1 2)。

位置偏差制御部 21 の入出力偏差信号 V h が $V h = \theta_f - \theta_g$ となる時、第 10 の位置補正部 19 の位置補正量制御部 19 a がスイッチ 19 b を ON とする。すると位置偏差制御部 21 の入出力偏差信号 V h を積分器 20 で累積し、補正位置偏差量 θ_{cd} を生成する。この補正位置偏差量 θ_{cd} を、位置偏差信号 θ_e から減算する。これにより、モータの加減速時にモータ出力電圧の飽和や指令加速度に対するトルク不足などにより電流指令値がモータ制御装置内の制限値に達した場合、速度指令 2 がスイッチ 4 d によって選択されている時に、速度指令信号から換算された位置指令信号 θ_r の値自体が大きすぎても、補正位置偏差量 θ_{cd} の基となる入出力偏差信号 V h は、位置指令信号 θ_r からモータ 13 の位置信号 θ_s との差である位置偏差信号 θ_e と補正位置偏差量 θ_{cd} との差であるので、位置制御部 5 から出力される速度指令演算信号 V r と実際のモータ

速度 V_s と差が大きくなりすぎないように抑制することができる。結果として、電流制限から開放されたタイミングで位置制御への復帰が遅れてしまうことを抑制できる。

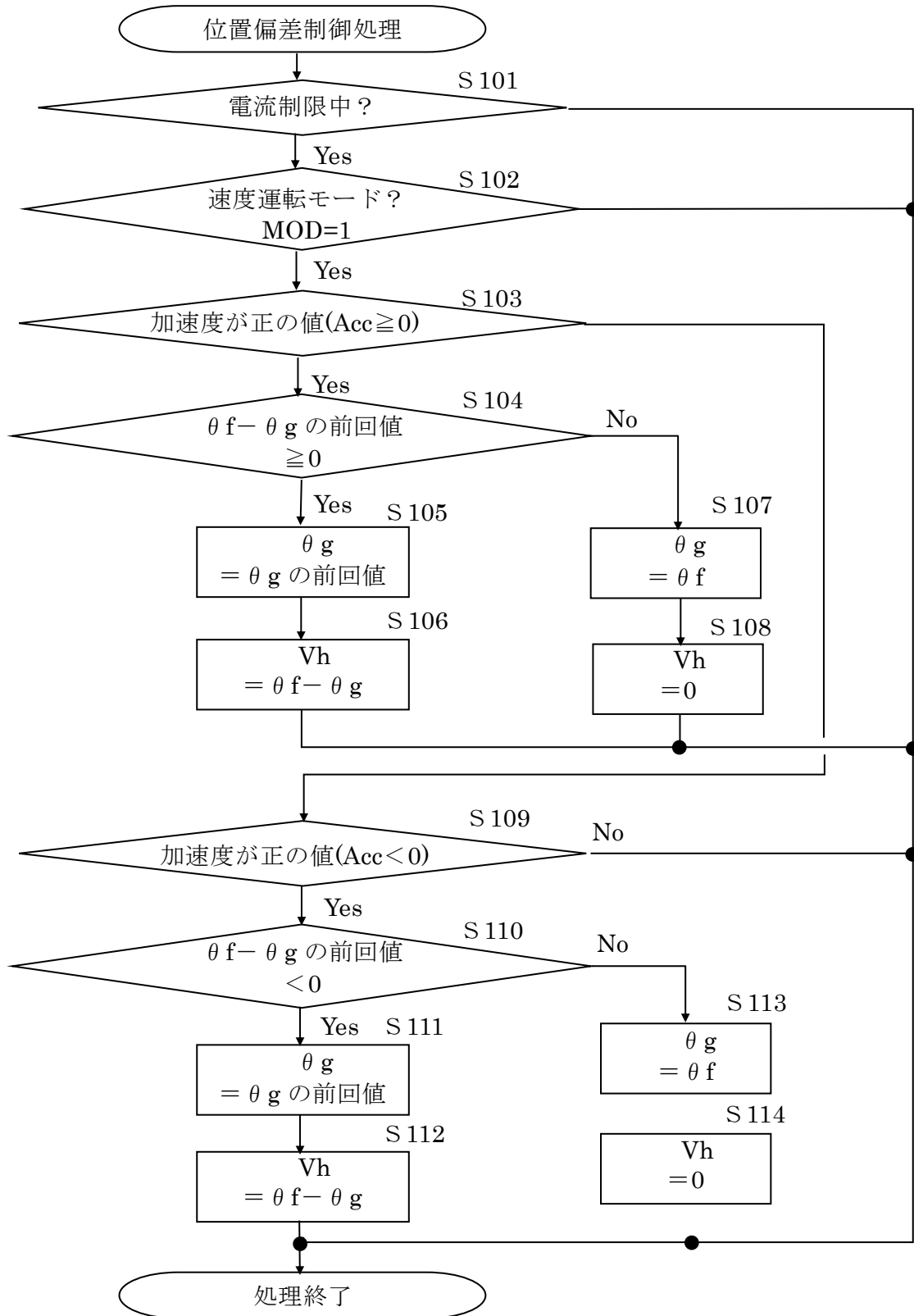


図 4.13 位置偏差制御部処理のフローチャート

(3) 一回転内位置補正制御部

なお、位置補正部 19 の出力側に、一回転内位置補正制御部 16 を備えている。この一回転内位置補正制御部 16 は位置補正部 19 の出力である補正位置偏差量 θ_{cd} を正規化しモーター一回転内位置偏差信号 V_{rh} を演算する（1 回転以上のデータを放棄し、1 回転以内のモータズレ量（位置指令と実際のモータとの間のズレ量）を演算する）。そして、電流制限状態が開放され電流指令が電流制限値内の領域にあることを判断すると、モーター一回転内位置偏差が 0 となるように一回転内補正量 V_{rh} を算出し、その一回転内補正量 V_{rh} を位置補正部 19 の積分器 20 に加算する。

図 4.15 は、一回転内位置補正信号 V_{rh} の加減速の傾きを示している。横軸は速度、縦軸は傾き（加速度）、実線はケース 1、鎖線はケース 2、一点鎖線はモータのトルク特性である。

図 4.14 の (a) に示すように一回転内位置補正信号 V_{rh} の補正パターンにおける最大速度は、実際の補正開始時点の速度フィードバック値に対しある比率 (γ)（例えば 10%）で規定している。また、一回転内位置補正信号の補正パターンにおける最高速度に到達するまでの傾き（加速度）は、図 4.14 の下段 (b) の一点鎖線に示すようにモータの出力トルク特性に合わせて決定している。制御装置内の処理時間やメモリ容量に余裕があれば、図 4.15 のケース 1（実線）のようにモータの出力トルク特性にあるマージンを見込んで連続的に選ぶことができるが、処理時間やメモリ容量に余裕がない場合にはケース 2（鎖線）のように段階的に特性を決定することも可能である。これにより、電流制限から開放されたタイミングから行う一回転内位置補正を安定に、かつ、短時間で実施することが可能となる。

図 4.12 の CNC コントローラ 1 において、速度運転モード（絶対的な位置の追従性を要求しないモード）時に一回転内位置合わせ抑制部 26 からモーター一回転内位置の補正も必要としないことを示すコマンド PHS がモータ制御装置に入力され、そのコマンド PHS は、位置補正部 19 内のスイッチ 27 と、位置偏差制御部 21 と位置制御部 5 との間のスイッチ 28 に伝達される。通常はそのスイッチ 27 は位置偏差制御部 21 の入出力偏差信号 V_h に接続されるようになっているが、そのコマンド PHS が入力された時、スイッチ 27 を切り換えて位置偏差制御部 21 の入出力偏差信号 V_h 側とは反対側と接続する。その反対側は、位置指令信号 θ_r に基づいて位置ループモデル 15 が被制御対象の特性を含む等価な位置制御系モデルから理想的なモータ 13 の位置を算出し、

その位置と実際に位置検出器 6 から計測されたモータ 1 3 の位置との偏差の微分値が接続されている。その際、位置／速度運転切替コマンド MOD が速度運転であるときは、理想的なモータ 1 3 の位置を算出し、その位置と実際に位置検出器 6 から計測されたモータ 1 3 の位置との偏差から作成される。また、このコマンド PHS が入力されている場合には、スイッチ 2 8 を切り換えて、位置偏差制御部 2 1 を介さずに偏差入力信号 θf を位置制御部 5 へ直接入力させるよう接続する。

これにより、モーター一回転内の位置補正を要求しない場合には、加減速時間をモータ出力トルクに合わせて最短にすることができる。

また、図 4.14 は、本提案手法を実施したときの動作信号波形図である。上段のグラフは横軸が時間で縦軸が速度であり、鎖線が速度指令信号 $F d t$ 、一点鎖線が速度指令演算信号 $V r$ 、実線がモータ速度 $V s$ である。また 2 段目は横軸が時間で縦軸が電流であり、実線が電流指令値である。3 段目に、一回転内位置補正信号 $V r h$ を示している。横軸は時間、縦軸は補正量を示している。4 段目は横軸が時間で縦軸が位置偏差であり、実線が補正位置偏差量 $\theta c d$ とモーター一回転内分偏差である。本提案では、電流制限によりモータの加速度が十分得られず、指令作成手段 1 が出力する指令速度信号 $V r v$ とモータ速度 $V s$ の偏差が大きくなっても、位置偏差制御部 2 1 は位置偏差制御部出力値 θg を所定条件で制限して、位置制御部 5 の出力である速度指令演算信号 $V r$ が実際のモータ速度 $V s$ との差である速度偏差信号 $V e$ が所定以上に大きくならないように制御する。これにより、モータの出力トルク特性が回復して電流制限から開放されたタイミングから実施する位置補正への以降を迅速に行うことができ、電流制限から開放された後に生じる速度や位置のオーバーシュートを抑制する効果がある。

また、電流制限から解放されたら、一回転内補正量 $V r h$ を位置補正部 1 9 の積分器 2 0 の入力側に加算し、常に主軸の一回転内位置を指令に追従させるように制御する。この補正位置偏差量 $\theta c d$ は、加速時は減らして、減速時は増やして一回転内分位置を 0 にする距離となるように設定されるので、短時間で補正量を決定し、一回転内位置補正をおこなうことができる。

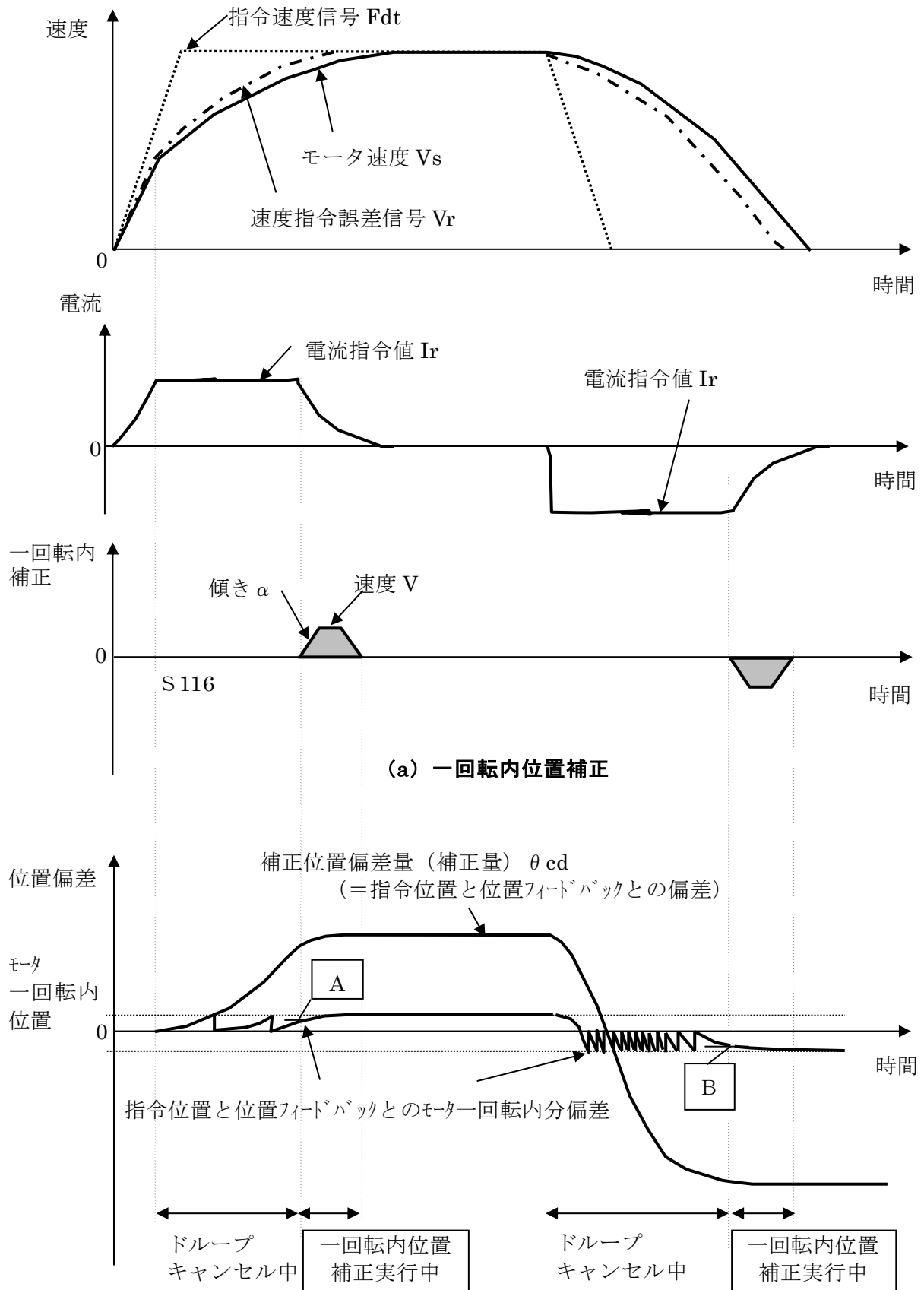


図 4.14 位置偏差制御時の各信号波形

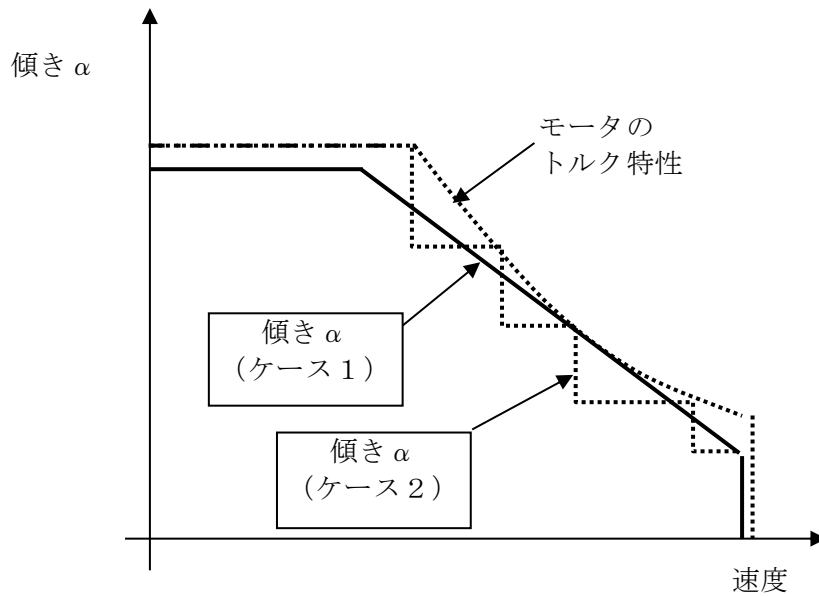


図 4.15 一回転内位置補正信号

4.4 常時位置ループ化のシミュレーションによる効果検証

ここでは、提案した追従遅れ補償制御の効果をシミュレーションで検証した結果を示す。

図 4.16 に提案する追従遅れ補償制御がない通常の位置ループを組んだ場合の加減速波形を示している。モータの出せる最大トルクを上回る時定数でプログラムした場合、本来必要とする加減速トルクが出せないため、位置指令との偏差が溜まり、これを取り戻そうと制御ループが働くためオーバーシュートが発生する。また、このモータ最大トルク領域に達した場合は、アンプ内では電流制限に掛かるため、制御系が非線形領域に入り、電流指令は上下限の電流制限を往復するような不安定な動作となる。このような現象が起こると機械に対して与えるショックが大きくなり、大きなダメージを与えることになる。

一方、図 4.17 は今回提案した追従遅れ補償制御を用いた場合の加減速波形を示している。モータの出せる最大トルクを有効に活用するために加減速時定数はそれを上回るようにプログラミングしており、モータの最大トルク線図に沿った加減速を実施している。指令に対し、モータトルクが制限されるため、アンプ内の電流は最大電流で制限さ

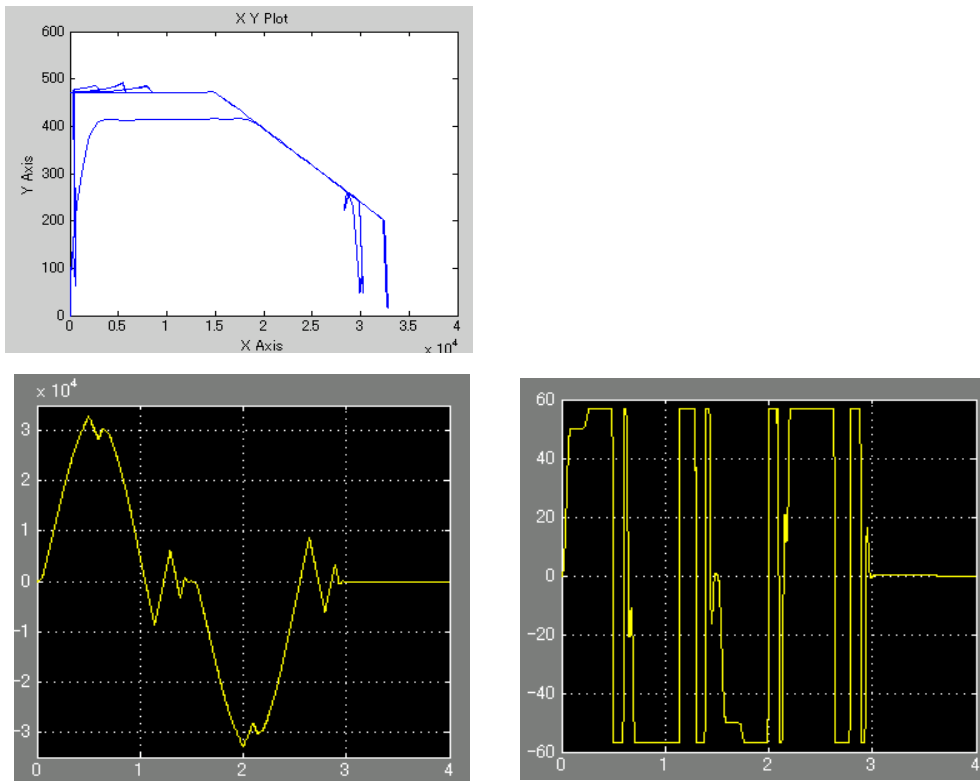


図 4.16 追従遅れ補償制御無効時の加減速波形

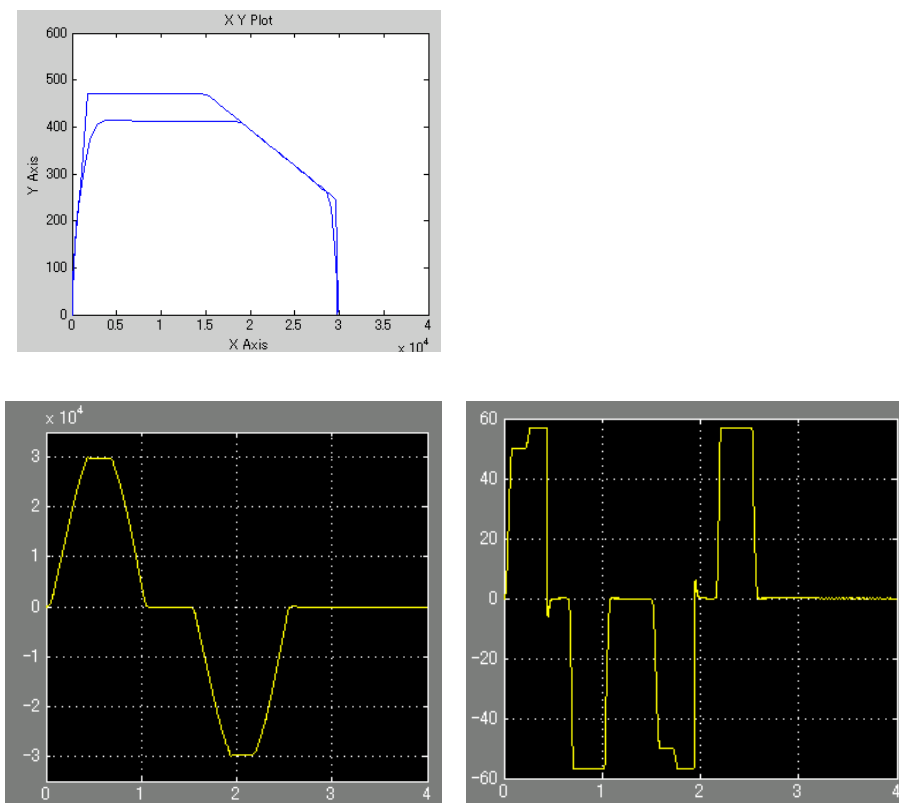
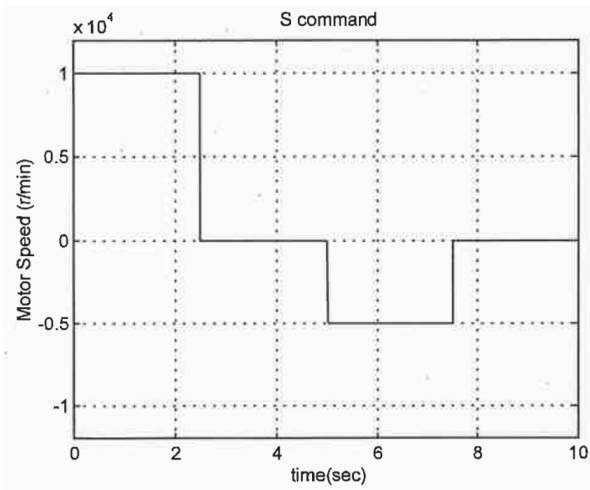
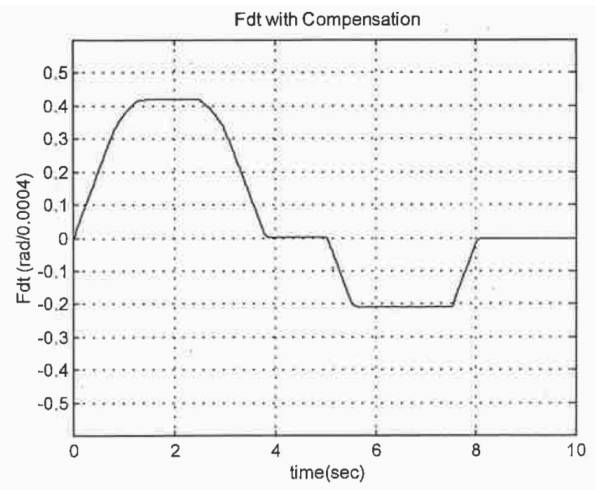


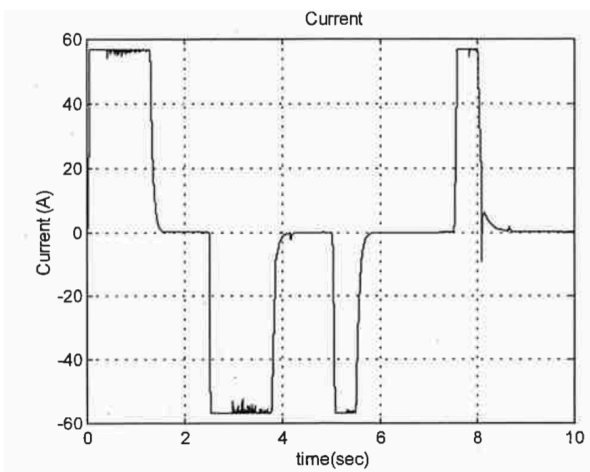
図 4.17 追従遅れ補償制御有効時の加減速波形



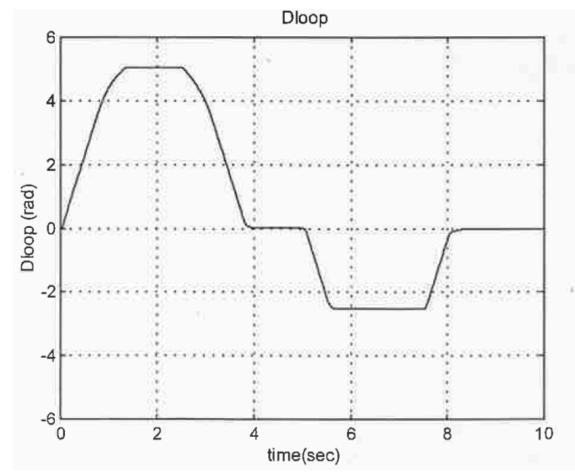
(a) CNCからの速度指令



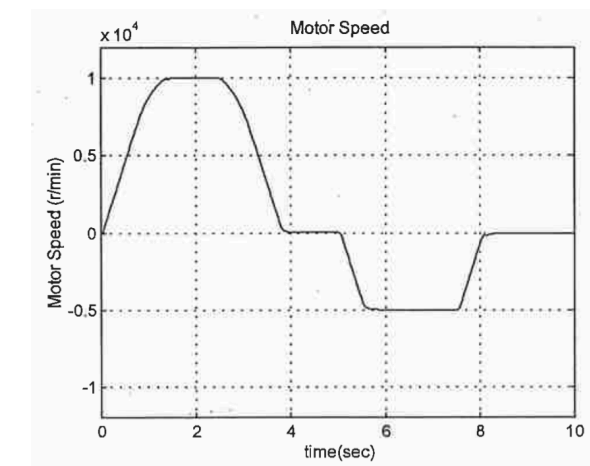
(b) 電流飽和発生時の補正後指令速度



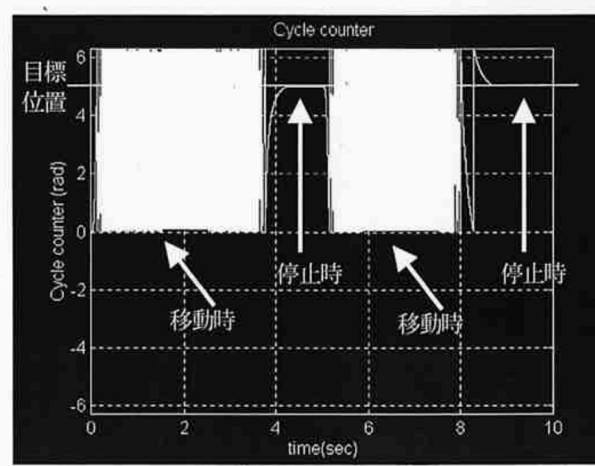
(c) 電流指令



(d) 位置偏差(ドループ)



(e) 速度フィードバック



(f) 一回転内モータ位置

図 4.18 追従遅れ補償制御有効時の各種信号波形

れているが、その後、オーバーシュートの発生もなく、かつ、制御ループが不安定になることはない。

図 4.18 に、追従遅れ補償制御有効時の各種アンプ内信号波形の詳細を示す。(a) は CNC から送られてくる速度指令 (S 指令) である。ここでは、加減速時間を短縮するため、モータが出せる最大トルクの特性は考慮せずに、ステップ的に最大の加減速時定数で作成している。ここで、追従遅れ補償制御がなければ、オーバーシュートを発生させるところであるが、今回は追従遅れ補償制御の効果により、アンプ内での速度指令は (b) のように補正が入った滑らかな指令となっており、(c) のようにアンプ内の電流はアンプが出せる最大電流で制限され、非線形なショックを誘発しやすい波形となっているにもかかわらず、(d) の位置偏差 (ドループ) や (e) の速度フィードバックはオーバーシュートがない滑らかな波形となっている。

また、(f) はモータの一回転内の位置を表すサイクルカウンタの波形を示している。高速でモータが回転しているときは、この一回転内位置 (サイクルカウンタ) は 0 から 360 度 ($0 \sim 2\pi$ [rad]) で何度も折り返されているが、最終的にモータが停止したときは、電流制限に掛かっている間に位置偏差制御部でキャンセルした位置偏差のうち 1 回転内での目標位置 (角度) に対しては確実に補償され、目標位置で停止していることがわかる。

4.5 常時位置ループ化の効果検証

4.5.1 常時位置ループ化による制御モード切替時間短縮

本項では、本提案の手法を実際に主軸アンプに実装し、効果を検証した結果を示す。

今回の検証では、旋削できるメイン主軸を 2 つ (主軸 1、主軸 2) 持ち、かつ、ミル加工できる工具主軸を有する複合加工機であり、それぞれのメイン主軸の送り軸として X1/X2、Z1/Z2 軸を持つ。それぞれのメイン主軸毎に 2 つのワークに対し異なる加工もできるし、メイン主軸 1 で前加工が終わったワークを人による段取り作業なく、主軸間でワークを掴み替え、その後加工をメイン主軸 2 で行うこともできる。また、主軸 1 とメイン主軸 2 で一つのワークを掴んで、重切削などにも対応できる。

(1) C 軸切替時間の短縮

今回の提案手法を用いることで、常時位置ループ化が可能となり、図 4.19 にあるような、これまで速度ループ制御で実施していた旋削加工からメイン主軸に位置制御をさせ、工具主軸でミル加工を実施するような位置制御へ移行する際に必要であった主軸の一旦停止からの C 軸原点復帰、C 軸角度割出しといったプロセスを削除することができる。

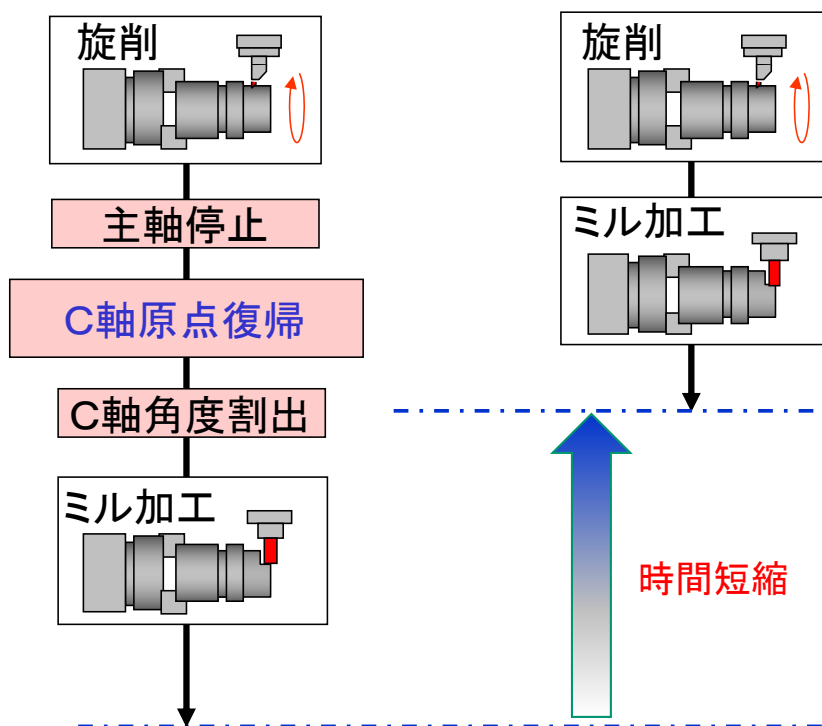


図 4.19 旋削モードからミル加工切替 (C 軸切替) 時間の短縮

(2) 主軸同期時間の短縮

また、図 4.20 に示すように、メイン主軸 1 とメイン主軸 2 で 1 つのワークを重切削 (旋削) していた状態から C 軸制御へ移行する場合も基本的には図 4.19 と同様のプロセスではあるが、旋削時にはメイン主軸 1 とメイン主軸 2 は位置を管理していないため、それぞれの主軸が原点復帰するにはワークを掴んだまま同時に実施することができない。そのため順番にチャックを開放してワークを片側の主軸だけで保持し、その間にもう片側の主軸が原点復帰をするという動作が必要となっていた。今回の提案手法を用いるとこれらの非切削時間を削減することが可能となる。

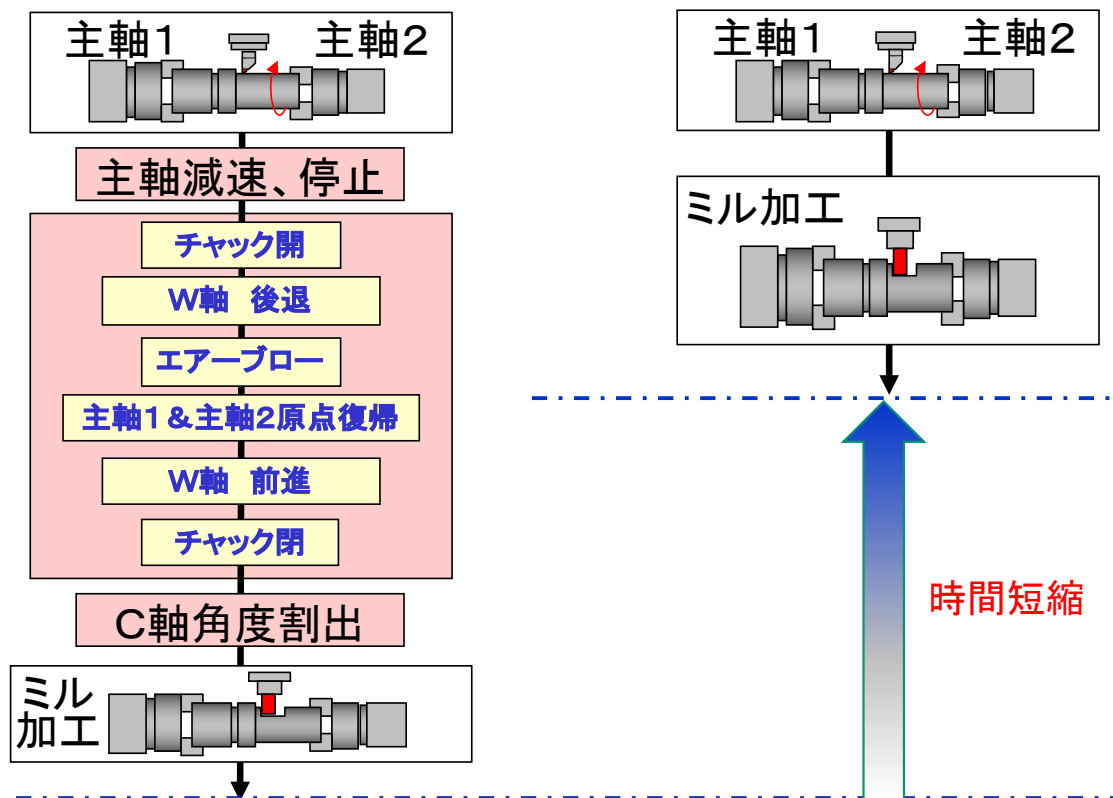


図 4.20 主軸連動旋削モードから C 軸連動ミル加工
(主軸同期切替) 時間の短縮

(3) 主軸オリент停止時間の短縮

また工具主軸では、加工によってツールを交換する必要があるが、ATC (Auto Tool Changer) を使って作業者の手を介さずにプログラムで自動で工具交換を行う場合には、主軸の角度を必ず所定の位置で停止させる必要がある。

この場合、従来であれば高速回転から一旦、一定の低速回転を続けながら位置ループ制御に切替え、主軸端 (工具) の角度を検出し、その後所定の角度で止まるための残指令をアンプ内で作成してから停止させるといったプロセスが必要であった。

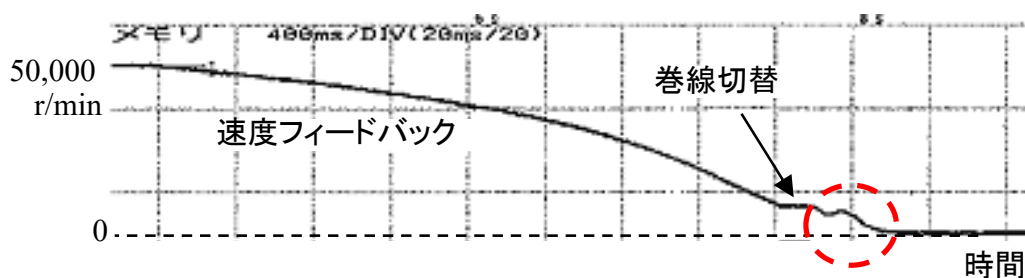
今回の提案する手法を用いれば、常に位置ループを組んでおき、主軸端 (工具) の角度は常にアンプの中で把握しているため、従来必要であったプロセスを削除することができ、主軸オリент停止時間を短縮することができる。

図 4.21 にこの主軸オリент停止動作における実測結果を示す。上段は、従来の制御

で主軸が 50,000r/min での高速回転で回転中に減速し、所定の一回転内位置（角度）に停止させるオリент停止を実施した場合の波形を示している。赤点線で囲まれた部分が、速度ループ制御から位置制御に切換え、かつ、一回転内位置を再検出して目的の角度に停止している動作を示している。

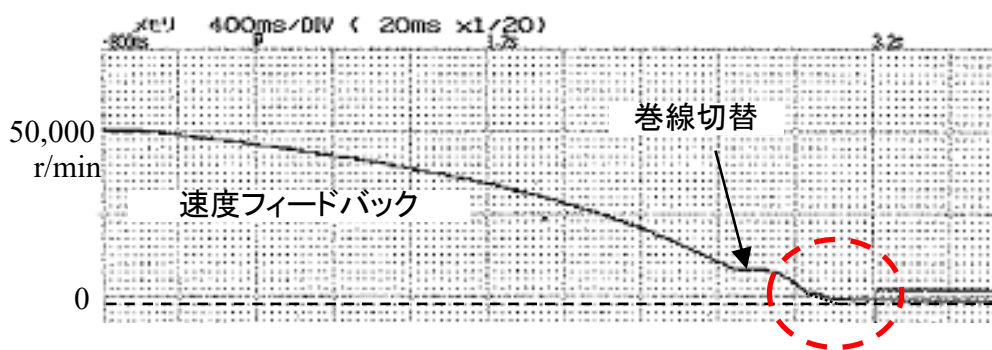
これに対し、下段が今回提案する追従遅れ補償制御を有効にした場合の波形である。上段の補償制御が無効である場合と比較し、制御ループの切換え処理や一回転内位置の再検出動作が入らない分、スムーズで高速なオリент停止ができていることがわかる。具体的には、オリент時間として今回のケースでは 100msec、約 30%の時間短縮を実現している。

条件： 主軸50,000r/minからのオリент



速度制御→位置制御切替あり
(一回転内位置再検出動作)

**位置決め停止時間
約30%減**



速度制御→位置制御切替なし
(一回転内位置再検出動作)

図 4.21 主軸オリент時間の短縮結果

なお、参考までに、今回実測した高速主軸モータの場合、一つのモータ内で低速回転用の巻線と高速回転用の巻線の2つを搭載し、速度に応じて巻線切換を実施する仕様となっている。これは、低速領域ではフライス加工のような重切削を実現するためにトルク（出力）を稼ぐために巻線を多く巻いているが、この巻線仕様のまま高速回転で動作させると、誘起電圧が高くなり電圧飽和してしまうためである。今回、その巻線切換を速度 10,000r/min で実施しているため、赤点線で囲んだ、位置決め動作（オリエント動作）の直前に 200msec 程、巻線切換処理が掛かっているが、これは今回の提案でのオリエント動作とは関係がない。

また表 4.3 に、これまで述べた加工モード切替え時の時間短縮効果をまとめている。

表 4.3 複合加工プログラム実行時の時間短縮効果

新規機能	内容	効果	
主軸 常時位置ループ化	C軸切り替えや主軸同期切り替え時におけるシームレスな運転パターンの移行		
		従来制御	新規制御
		C軸切替	0.8~1sec
		主軸同期切替	11.2sec
	オリエント位置決め時間の短縮	(1)メイン主軸での50,000r/minからのオリエント実測例	
		従来制御	新規制御
		位置決め停止時間	0.32sec
			0.23sec

(4) 主軸の切削精度の向上

今回常時位置ループ化に伴い、主軸制御のサーボ制御との演算プロセッサ、制御アルゴリズムの統合、主軸検出器の精度向上などを実施。

結果として高精度な軌跡制御が求められるサーボ軸と同等性能までフィードバック制御性能を引き上げることができた。

図 4.22 に今回提案する制御系を用いた場合の、切削を想定したインパクト応答での速度変動の抑制効果を示す。上段が従来制御での結果である。切削負荷を想定してモータの定格トルク比 100 の負荷トルクを印加している状態から、インパクト的に負荷が急激に抜けた場合、約 18r/min の速度変動（定格トルク比 1.2%）が発生している。これに

対し、下段が提案する追従遅れ補償制御により常時、位置ループ化した場合の結果である。位置ループ化による剛性アップにより、速度変動は、約 7r/min の速度変動（定格トルク比 0.5%）に抑えられていることがわかる。

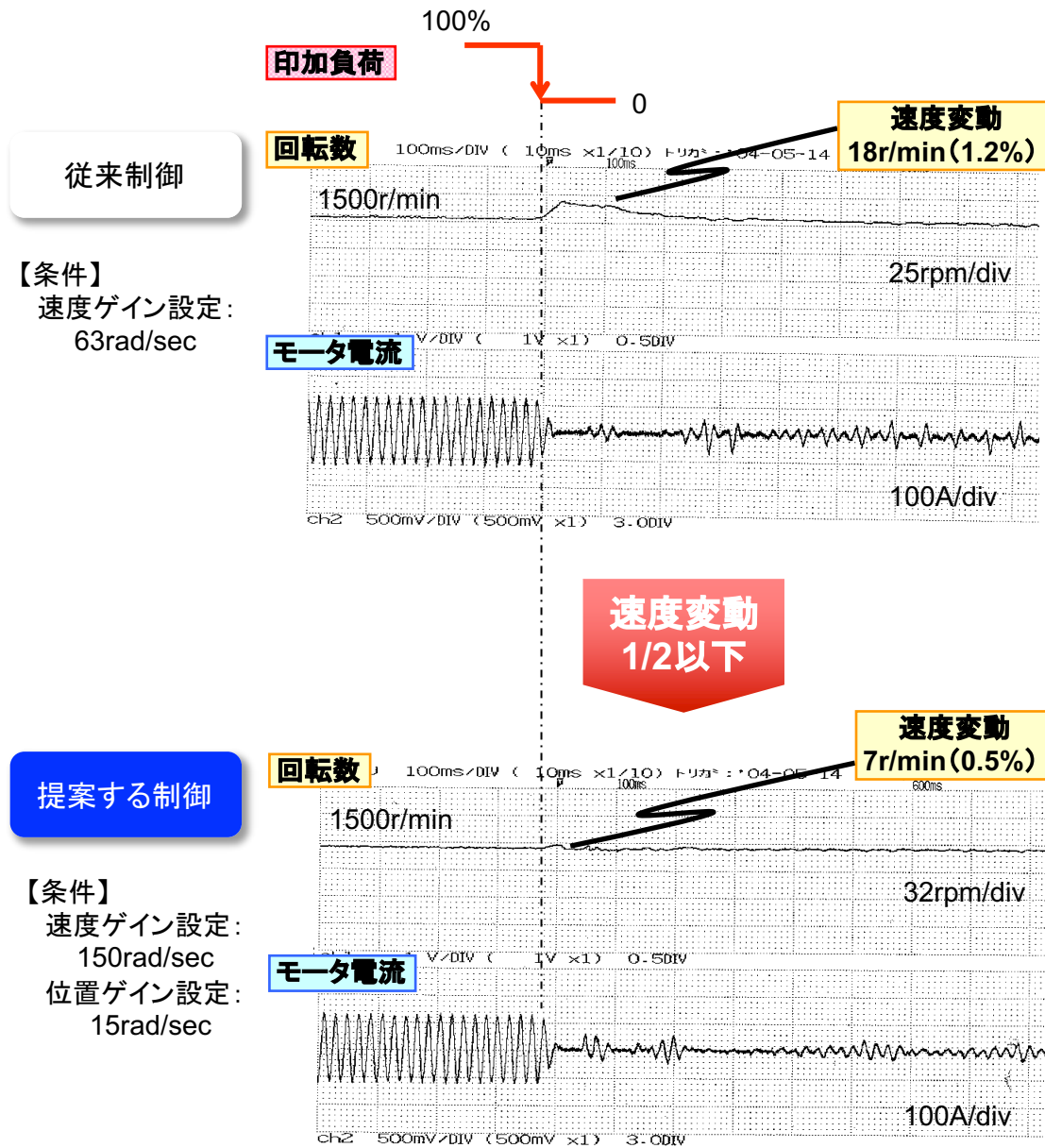


図 4.22 主軸常時位置ループ化による切削耐量向上
(インパクト負荷に対する影響)

図 4.23 に従来制御である速度ループ制御による切削加工結果と、今回提案する常時位置ループ化を実施した主軸アンプでの加工結果の比較を示す。

上段が従来制御（＝速度ループ制御）で切削した時の加工物（ワーク）の切削面を測定した結果であり、面精度として約 $6\mu\text{m}$ と、見た目にも縞目が大きく確認できる。

下段が同一条件で実施した提案手法を用いて常時位置ループ化して切削した時の結果である。ここでは、面精度が約 $2\mu\text{m}$ に改善されており、見た目にも縞目が少なく良好な結果が得られている。

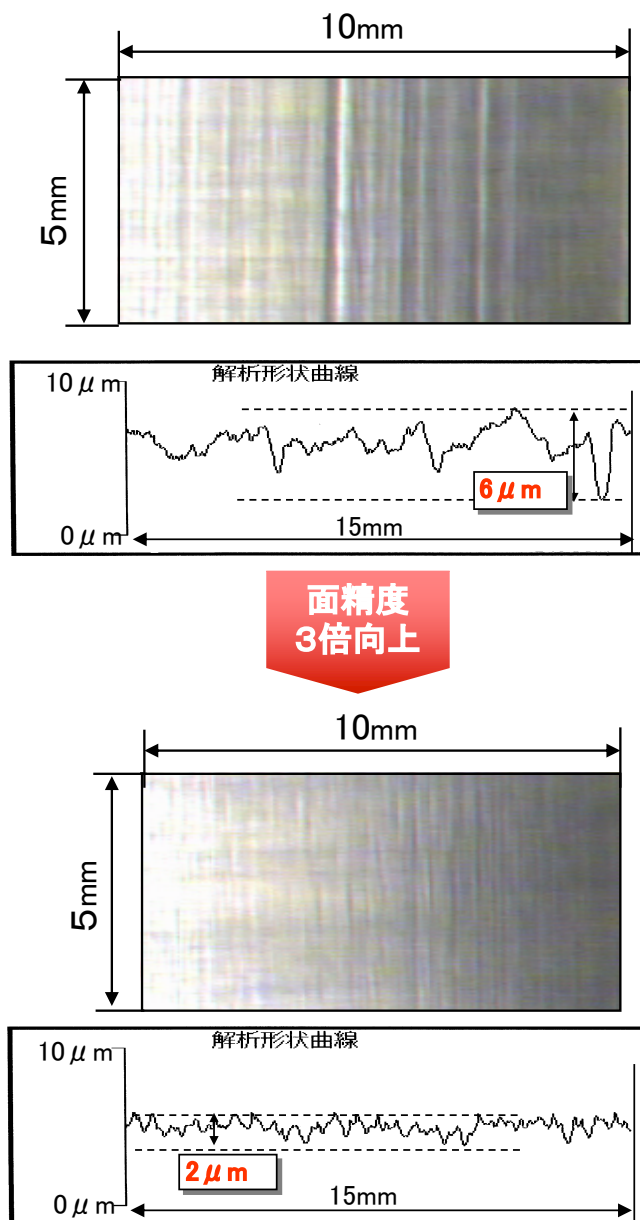


図 4.23 主軸常時位置ループ化による切削精度向上

(4) 主軸常時位置ループ化のまとめ

歴史的に工作機械の主軸モータおよび主軸アンプは、工具軸を高速回転させることに主眼がおかれ、如何に高速回転までの加減速時間を短縮するために最大トルクを出せるか、また、重切削を行うために高出力が出せるかに焦点が当てられていた。

しかしながら、昨今の切削加工現場での高生産性を追求する過程の中で複合加工機といった旋削加工とミーリング加工を同じ機械で実施するというケースが増えてきている。つまり、主軸（モータ、アンプ）にも C 軸制御といった位置制御を求めるケースが増えてきており、如何にこの切り替え時間を短縮できるかが議論されてきた。

本章ではこの課題を解決するために主軸アンプでもサーボアンプのように常時位置ループ化するための手法を提案し、その有効性を示した。

第五章 制御対象のモデル化に基づく最適制御

本章では、前章までに提案した制御ループの応答性向上だけでなく、主軸やサーボアンプでの分散制御の利点を最大限に活かすために制御対象である機械やモータの特性をモデル化し補正することで、更なる制御性能向上や加工精度向上を実現する手法についてサーボ送り軸での方向反転時に発生する「象限突起誤差補正」と、温度により特性の影響を受けやすい誘導モータ主軸に対する「サーミスタ活用最適制御方式」を提案する。

5.1 力学モデルに基づいた象限突起誤差補正

5.1.1 象限突起誤差のメカニズム

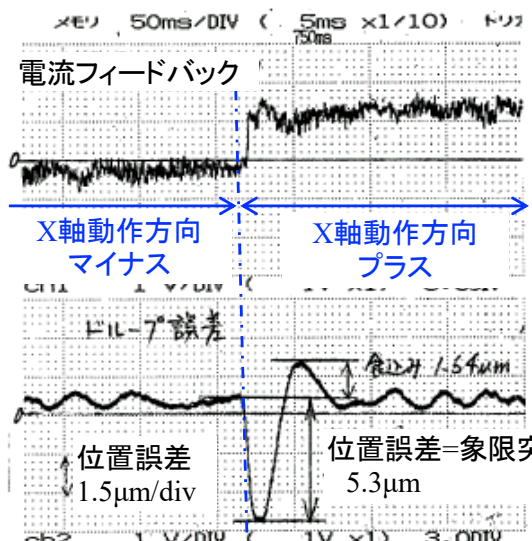
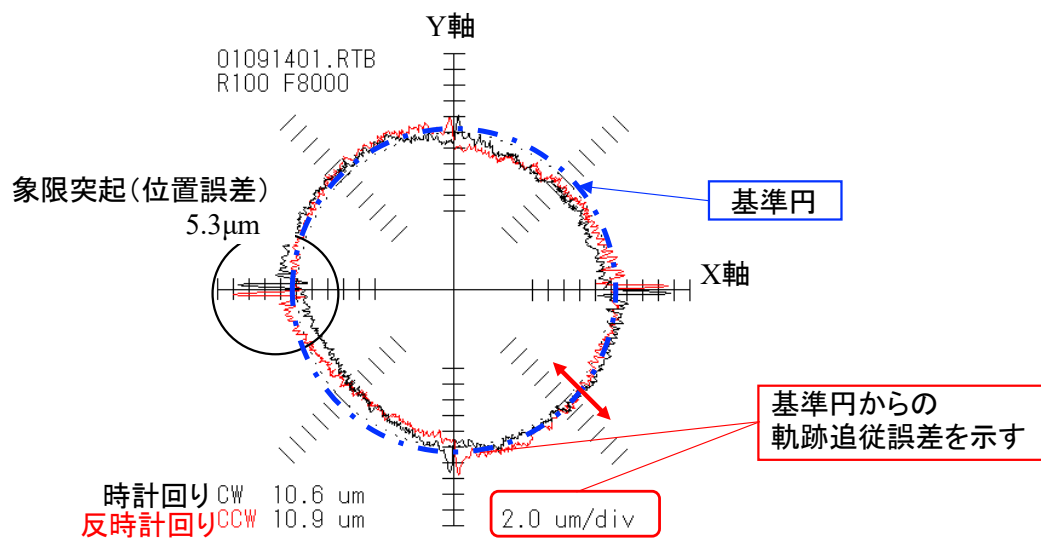
工作機械におけるサーボ送り軸の制御では、如何に高速・高応答に CNC から送られる位置指令に追従するかがポイントであること、そして、これを実現するためには制御ループを高応答化（ハイゲイン化）することが有効であることを既に述べた。

しかしながら、その加工精度をミクロンメータ、更には、ナノメータレベルで追求する上で問題となるのが、送り方向が反転する際の機械やボールねじの摩擦や弾性変形により生じる追従遅れにより発生する軌跡追従誤差である。この領域でのミクロン、ナノレベルでの誤差を抑制するためには、ハイゲイン化だけではうまく対応できない。旋削加工やフライス加工のような送り軸が方向反転しないような加工、あるいは、荒削りにおいてはこの機械やボールねじの摩擦や弾性変形による影響は問題とならないが、ミーリング加工による金型加工などの場合は、円弧補間による切削などでサーボ送り軸の方向が反転するケースが多く、かつ、その切削精度の向上が最重要課題となる。

図 5.1 に円弧補間プログラムでサーボ送り軸 X 軸と Y 軸を動作させた時の波形を示したものである。上段が軌跡追従精度（真円精度）を示しており、基準円に対しての X 軸と Y 軸の辿った軌跡の誤差を 1 division で $2\ \mu\text{m}$ としてプロットしたものである。今回の X 軸と Y 軸の軌跡は、機械端に取り付けられたグリッドエンコーダという測定器を用いて測定した結果であるが、サーボの位置制御はモータ端の検出器を元を実施するセミクローズド制御となっている。基準円に対して実際の軌跡が楕円になっているのは、機械の姿勢変形などが原因である。

今回ポイントとするのは象限部分であるが、例えば丸で囲った象限は、マイナス方向に動いていた X 軸がプラス方向に方向反転する象限を示している。この時の X 軸の電流

フィードバックと X 軸単体の位置指令との偏差（誤差波形）を下段に示しているが、象限切替えのポイントで電流フィードバックがステップ的にプラスに変化している。これは、マイナス方向に動いていた時の動摩擦分電流から一転、プラス方向の静摩擦を抜けるまでモータ電流が増加し、その後、プラス方向の動摩擦を流しながらモータを駆動していることを意味する。これは一旦、X 軸モータが静摩擦に打ち勝つだけの電流を制御ループで生成するまでの間、モータが停止してしまっていることを意味している。一方、Y 軸は同一方向に、しかも最高速度で動いている最中であるので、この X 軸の位置誤が X 軸と Y 軸とで作る軌跡誤差（象限突起）として発生する。これは、金型に傷を作った



- 条件:
- ・送り速度: F8,000mm/min
 - ・半径: R100mm
 - セミクロード制御 (モータ端エンコーダフィードバック制御)
 - 真円精度測定箇所: 機械端

図 5.1 象限突起誤差

りするなど加工結果に大きな悪影響を及ぼすため、何らかの補正が必要となる。

5.1.2 象限突起誤差補正の制御対象

本来、この象限突起誤差も位置指令と位置フィードバックとの誤差が原因であるので、速度ループや位置ループの応答性が限りなく高ければ抑制できるが、現実には、方向反転というわずかな時間でかつ、ステップ的に外乱トルク（摩擦トルク）が変化し、更に、速度が停止から微速の領域で、速度偏差や位置偏差も微小な領域であるため、単なるハイゲイン化で取り切ることが難しい。

そこで、この象限切替時の補正としては、制御対象をモデル化し、その挙動を考慮してフィードフォワード的にトルク（電流）を補正する必要がある。

本節では、この象限突起誤差補正を実施する前に、制御対象をモデル化する。

図 5.2 に工作機械で近年多く使われるようになってきた、ボールねじの軸芯冷却での象限突起誤差に関する問題点を示している。軸芯冷却を実施している軸では、通常のボールねじ駆動と比較して、まず、①摩擦力が大きい。②静摩擦と動摩擦との変化が大きい、③その挙動にばね要素を持っている。といったことが挙げられる。図 5.3 に軸芯冷却での上述のような問題点の原因となるオイルシールについて、考えたメカニズムを示す。

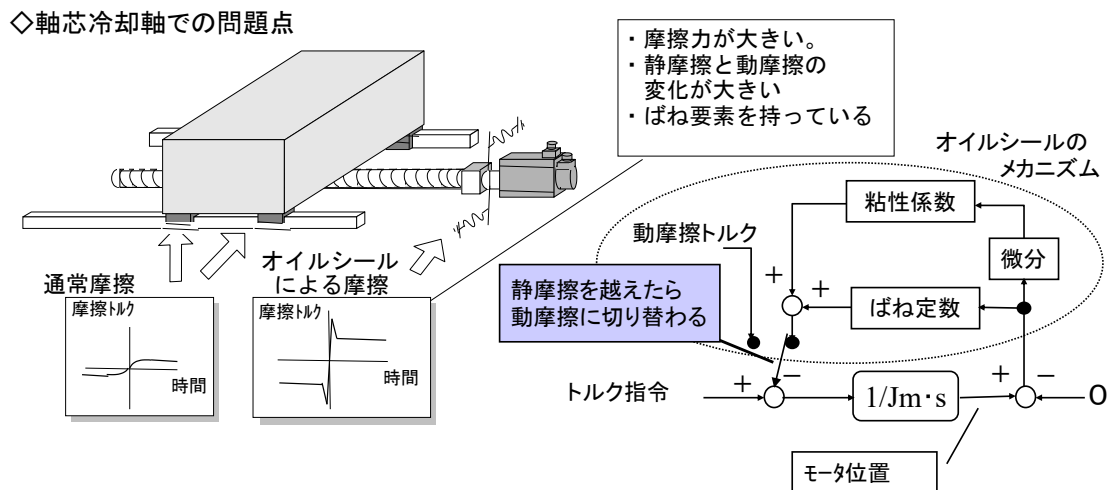


図 5.2 工作機械におけるボールねじ軸芯冷却での問題点

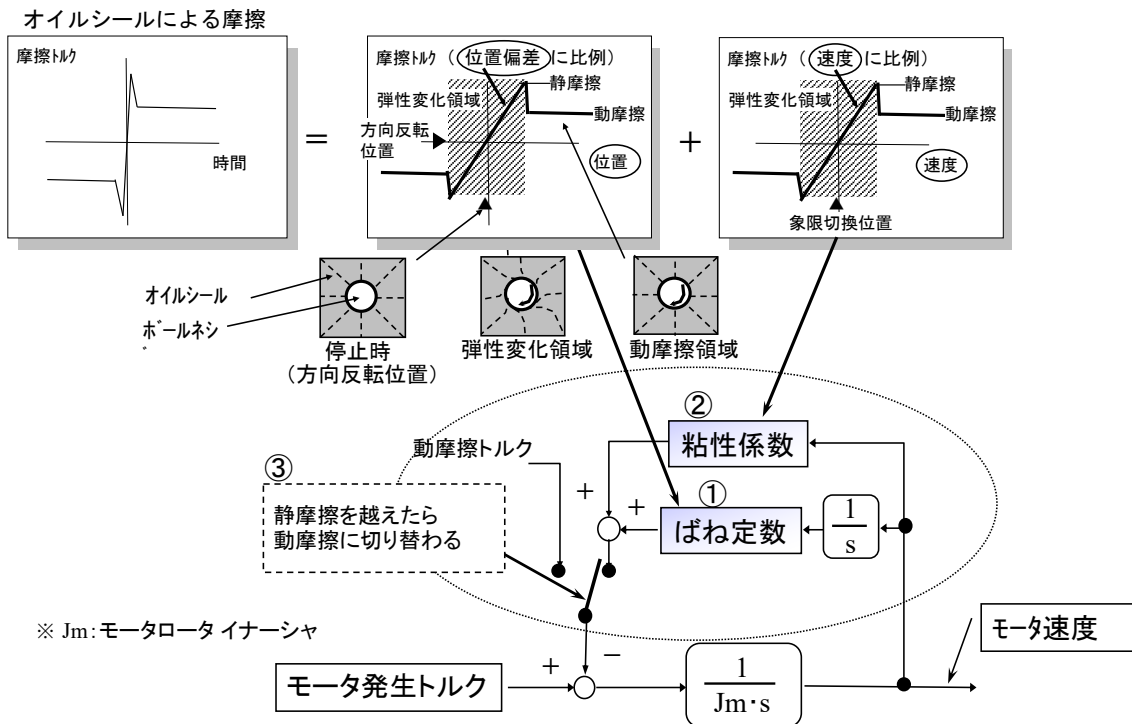


図 5.3 オイルシールによる摩擦のメカニズム

このように、オイルシールによる方向反転時の摩擦のメカニズムを位置に比例するばね要素と、速度に比例する粘性係数でモデル化し、方向反転時からモータの発生するトルクが静摩擦の大きさを超えたら、動摩擦に変化するモデルで定義した。

5.1.3 オイルシールモデルを考慮した象限突起誤差補正

図 5.3 で考えたオイルシールのモデルを考慮して実施した象限突起誤差補正について図 5.4 に示す。

補正を実施するタイミングは、位置制御モデルのモデル速度 A の方向反転のタイミングを用いて実施する。これは、実際は速度フィードバックを用いた場合、量子化誤差や機械の振動の影響で補正タイミングが正確に判断できないためである。また、ばね乗数に乘じる方向反転からの位置データにも位置制御モデルを用いるが、これには更に機械の応答遅れも考慮し、機械系モデル（一次遅れ系）の出力 B を用いた。また、ばね乗数に乘じるデータも同様に、位置制御モデルの出力するモデル速度 A を用いた。

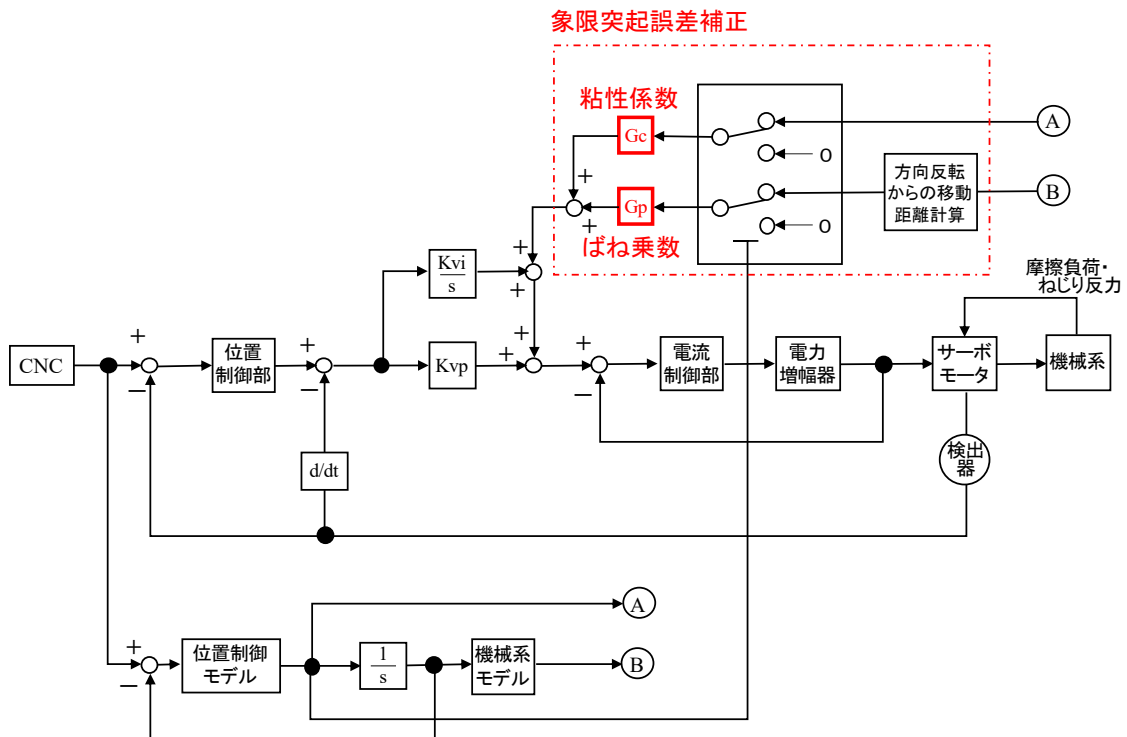


図 5.4 オイルシールモデルに基づく象限突起誤差補正

図 5.5 に提案する象限突起誤差補正において、ばね乗数による補正のみを実施した時の効果を示した結果となる。横軸に送り速度、縦軸に象限突起誤差の大きさを示しているが、補正なしと比較して補正を実施することで誤差を約 1/2 まで抑制できていること

X-Y平面(R100mm)

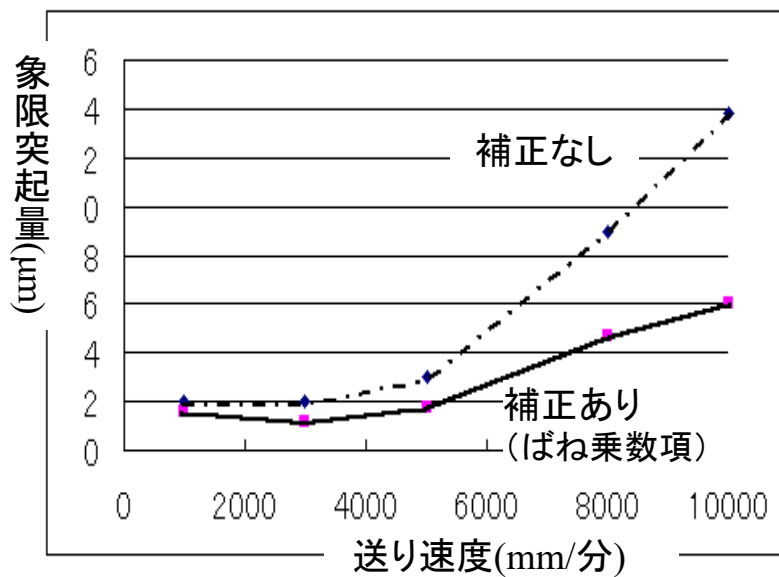


図 5.5 ばね乗数項のみを考慮した象限突起誤差補正の効果

がわかる。ただし、送り速度を上げていくと位置に比例するばね乗数による補正だけでは、補正しきれずに、誤差が大きくなって行くことがわかる。

そこで、図 5.6 ではこのばね乗数による補正に加え、粘性係数による補正も実施した結果を示す。ばね乗数項だけの補正から更に、高速域での象限突起誤差を大幅に抑制できていることがわかる。

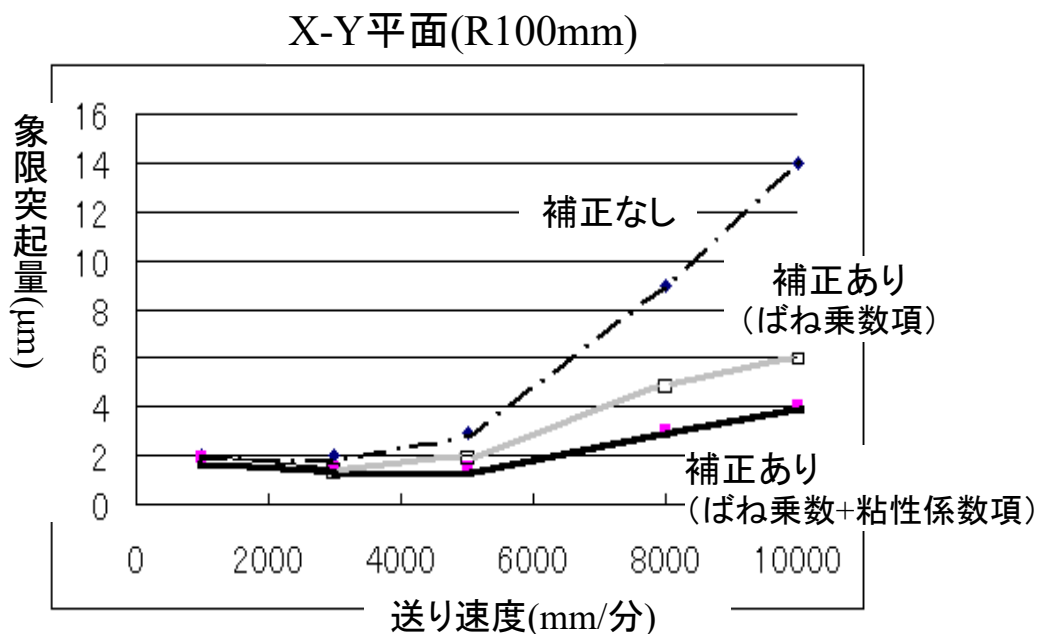


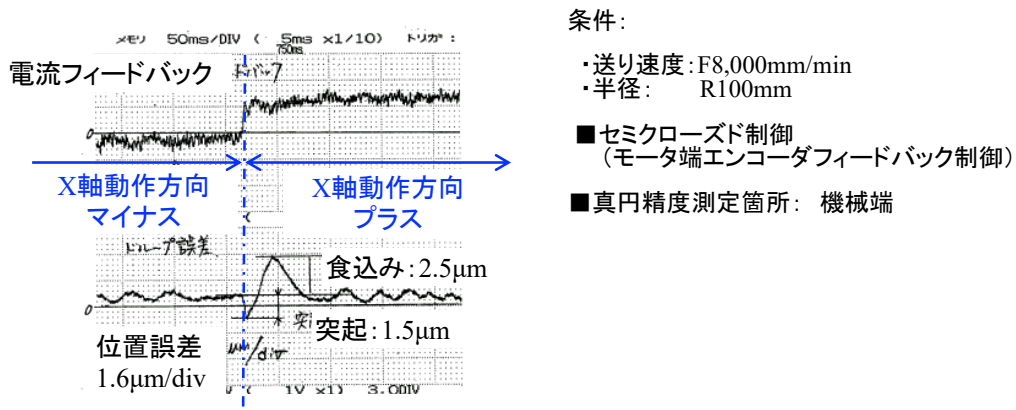
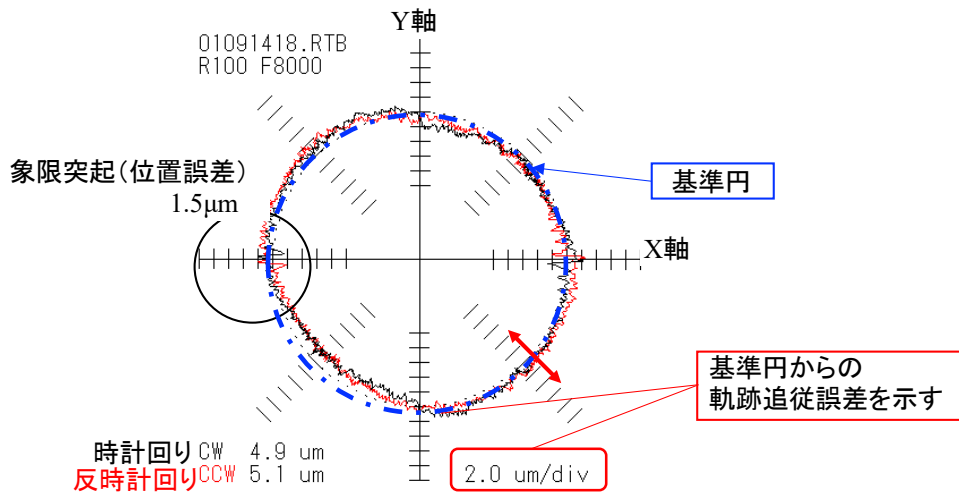
図 5.6 ばね乗数+粘性項を考慮した象限突起誤差補正の効果

5.1.4 象限突起誤差補正の更なる改善

(1) 方向反転時における食込み

図 5.7 に図 5.1 で測定した同一条件で、提案した象限突起誤差補正を有効にした時の結果を示している。補正なし時に発生していた象限突起誤差 $5.3\mu\text{m}$ が、補正有効にすることで $1.5\mu\text{m}$ まで抑制できていることがわかる。一方、象限において発生している食込みに関しては $2.5\mu\text{m}$ 発生しており、これについては提案の手法では抑制できない。加工精度の更なる向上に当たっては、更なる補正アルゴリズムの改善が必要である。

そこで、更なる改善として、モデルの位置偏差に対してゲインを掛けて補正するアルゴリズムを追加した。



条件:

- ・送り速度: F8,000mm/min
- ・半径: R100mm
- セミクロード制御 (モータ端エンコーダフィードバック制御)
- 真円精度測定箇所: 機械端

図 5.7 補正有効時の象限突起誤差

(2) 象限突起誤差補正のタイミング

前述したように象限突起誤差補正を実行するタイミングとなる象限切換、つまり、速度の符号反転のタイミングは、本来エンコーダからフィードバックされる信号をもとに行なうのが理想であるが、速度フィードバック信号には分解能の影響、機械共振による振動などの成分が含まれており、モータ（機械）の方向反転を判別するのが難しくなる。そのため図 5.4 に示すように、サーボンプ内に用意した理想モデルの速度指令を象限切換タイミングの判別に使用している。図 5.7 にそのタイミングを示す。実際には

モデルの方向反転から機械端の方向反転には遅れがあり、これは速度や加速度が大きくなるにつれ増加する傾向にある。そこで、提案した補正では図 5.8 のようにパラメータで設定される時定数をもつ機械系のモデルを挿入して象限突起誤差補正の実行タイミングを調整した。

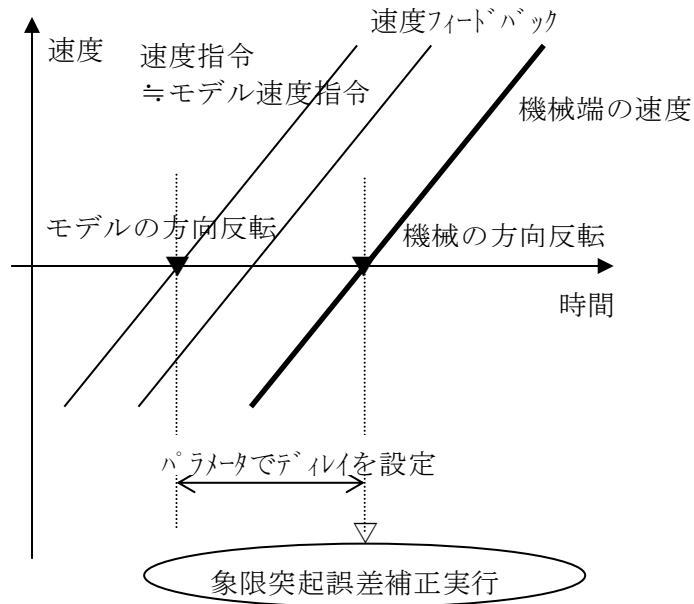


図 5.7 象限突起誤差補正タイミング

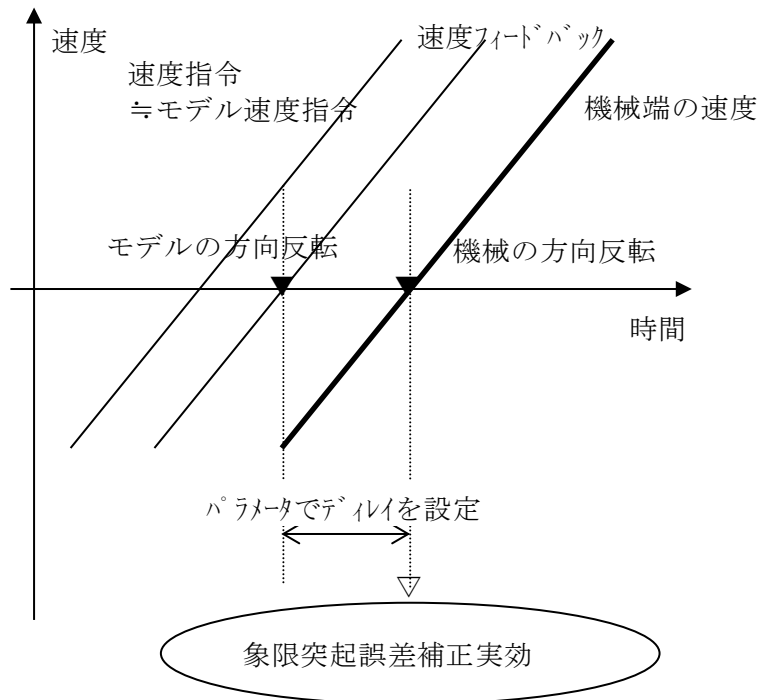


図 5.8 象限突起誤差補正タイミングの改善

しかしながら、モデルの速度指令から機械端速度までの遅れの中には実際には速度指令から速度フィードバックまでの遅れも含まれており、低速・低加速度で要求精度が低い場合には問題なかったが、高速・高加速度でかつ、要求精度が高くなった場合、パラメータで決まる機械系モデルのみでのタイミング判別では限界がある。

そこで今回更に、速度ループの遅れを考慮した理想モデルを用いることで、速度変化に対するタイミングのずれを改善することを図った。

(3) 象限突起誤差補正の更なる改善の提案

図 5.9 に更なる改善を狙った象限突起誤差補正のブロック図を示す。図 5.4 で示した補正に対し、位置制御モデルの位置偏差による補正項を加え、かつ、補正実施のタイミングには、速度ループの遅れを考慮したモデルを追加している。

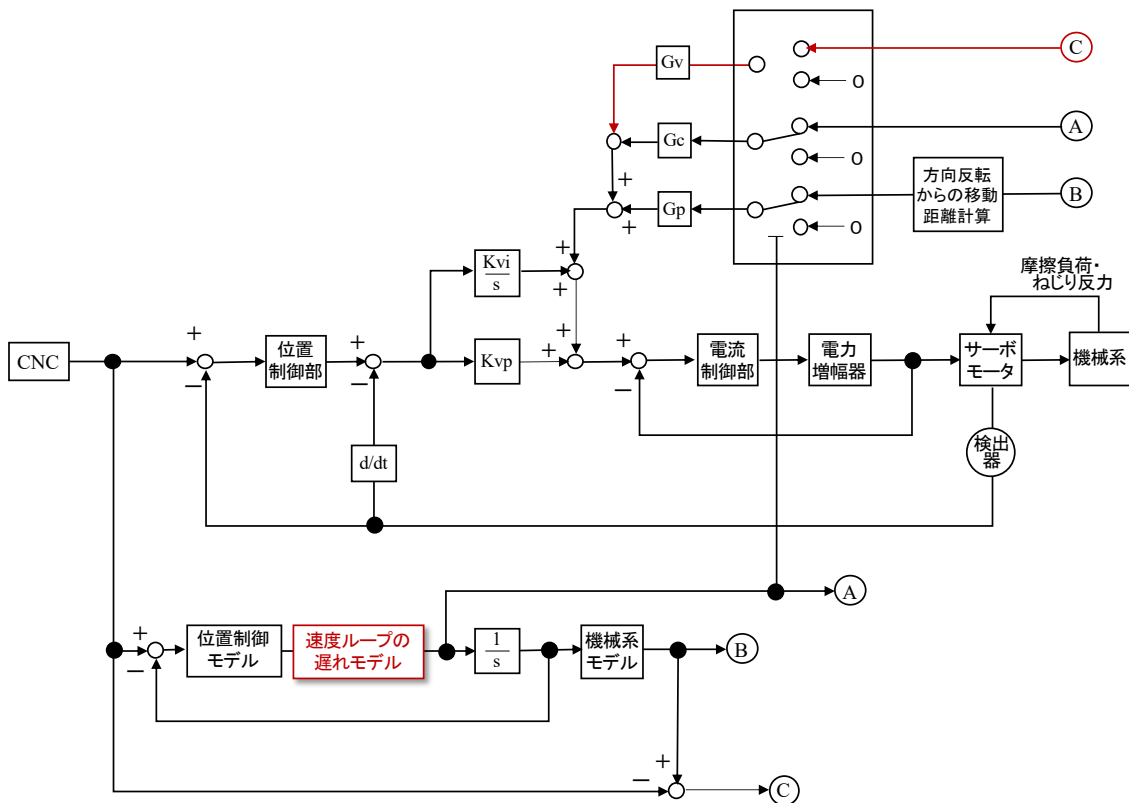


図 5.9 改善型 象限突起誤差補正のブロック図

図 5.10 に提案する改善型の象限突起誤差補正の結果を示す。なお、比較のため補正なし、および、前節で提案した補正の結果も並べて示している。改善型の補正を有効とすることで、象限突起誤差は更に $0.8\mu\text{m}$ まで改善しており、食込み現象も $0.8\mu\text{m}$ と抑制できており、高速・高精度加工において加工精度の向上に大きく貢献できることが確認できた。

条件:

・送り速度: $F8,000\text{mm/min}$ 、半径: $R100\text{mm}$

■セミクロード制御(モータ端エンコーダフィードバック制御)

■真円精度測定箇所: 機械端

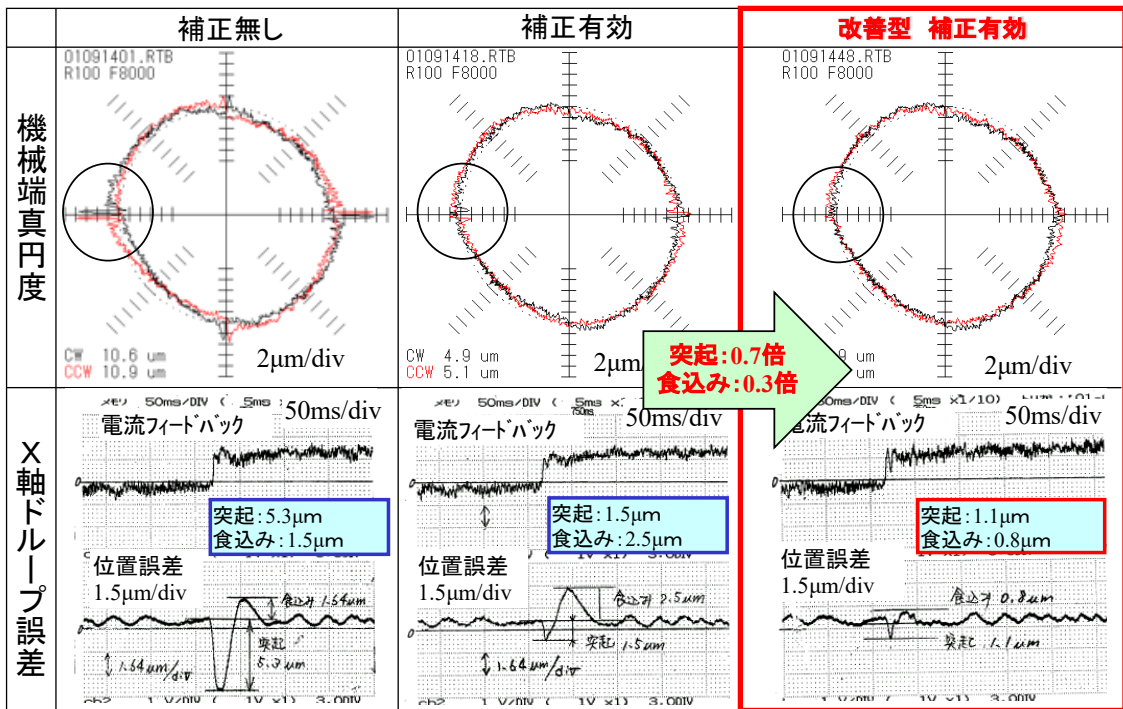


図 5.10 改善型 象限突起誤差補正の効果

5.2 主軸サーミスタによる最適制御方式

5.2.1 主軸モータとしての誘導モータ駆動の課題

主軸モータは、一分間に3万回転を超えるような超高速な回転数を必要とするミーリング加工や、重切削に耐えるための数十キロワットを超える高出力が求められるため、その回転するロータには膨大な遠心力が掛かる。そのため、ロータには磁石などを貼り付けることはできないため、一般的にはサーボモータに使われる永久磁石を用いた同期モータ (Synchronous Moto: SM モータ) ではなく、永久磁石を用いない誘導電動機 (Induction Motot: IM モータ) が用いられる。

つまり、主軸モータ制御においては、サーボと同レベルの高応答な制御を実現することが困難である。これは、ねじ切り加工や、同期タップ加工といった主軸の回転位置とサーボ送り軸の位置を完全に同期させて制御することが困難であることを意味している。

一般的に主軸モータに用いられる誘導電動機 (IM モータ) のトルク τ は以下の式で与えられる。

$$\tau = \frac{PM}{2L} i_q \psi_d \quad \dots(5-1)$$

$$\psi_d = M i_d \quad \dots(5-2)$$

τ : 誘導電動機のトルク

P : 極数

M : 固定子と回転子間の相互インダクタンス

L : インダクタンス

ψ_d : 鎖交磁束

i_q : q 軸電流、 i_d : d 軸電流

ここで、鎖交磁束は、サーボモータ (同期モータ) のように永久磁石で作られる訳ではなく、モータに流す d 軸電流とインダクタンスの積で作られるので、温度の影響を受けやすく常に安定した出力を得ることが困難である。

5.2.2 サーミスタを活用した IM 主軸モータの出力最適化

図 5.11 に主軸モータの搭載したサーミスタを活用した CNC システムの基本構成を示す。このように、主軸モータのコイルにサーミスタを内蔵し、主軸アンプで温度を常時監視できる仕組みを導入。温度条件に応じて d 軸電流 i_d をコントロールすることで、温

度によらず安定した出力特性を得ることを図った。

なお、このサーミスタ情報は主軸モータの特性改善のための補正に使うだけでなく、CNCの画面上で温度表示できるようにした。これは、将来的には消耗しやすい主軸モータのベアリングの磨耗診断や加工物の品質管理など、IoTデータとして活用可能である。

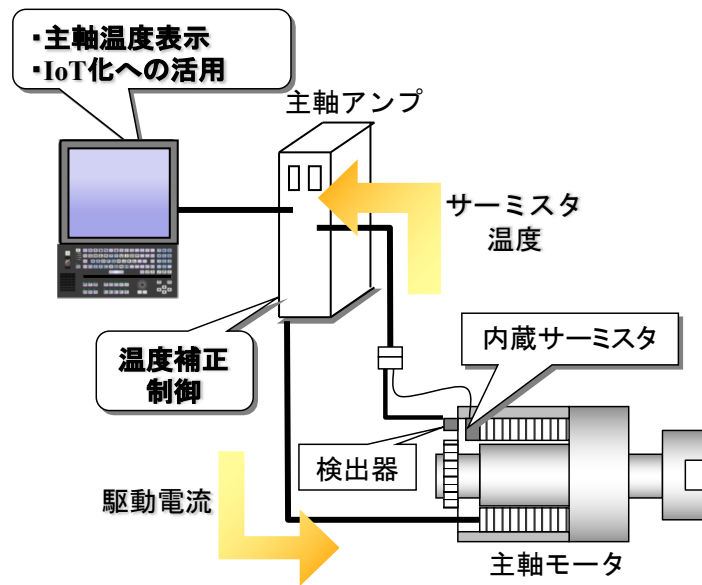


図 5.11 サーミスタによるモータ温度監視

さて、図 5.12 にサーミスタによる温度補正を活用した場合に、改善したいモータの特性を示している。前章で述べたが、主軸モータの加減速ではサーボ軸のように常に位置を管理する必要が無いいため、モータが持つ最大のトルク（出力）で加減速を実施する。

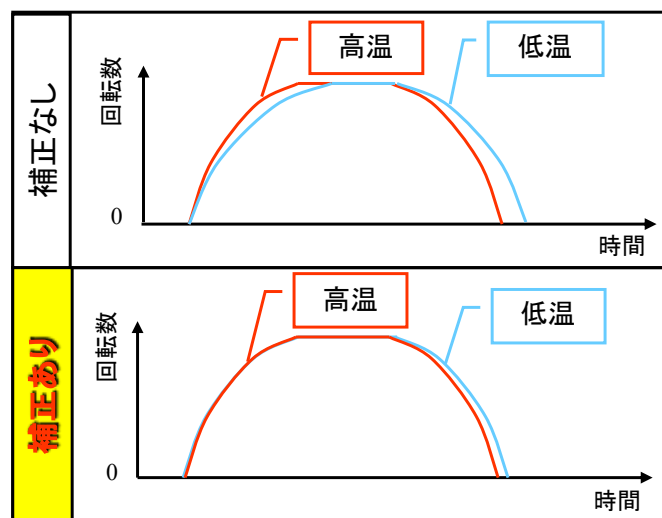


図 5.12 サーミスタによるモータ温度補正の狙い

このため図のように、誘導電動機を用いた主軸モータでは低温と高温では特性が異なり最適な特性を安定して出力できなかつた。そこで、今回提案する手法では主軸モータの温度によらず、安定した出力を得ることを狙った。

具体的には、予め各温度でのモータの特性を測定しておき、各温度での(5-2)式における M (固定子と回転子間の相互インダクタンス) を算出。この M の温度に対する近似式を用意し、その近似式に応じて i_d の値をコントロールした。

5.2.3 サーミスタを活用した IM 主軸モータの出力最適化の効果

図 5.13 に主軸モータに搭載したサーミスタの情報を活用し、出力特性をコントロールする新制御方式を採用した効果を示す。右図のプロットは 80°C の条件でパラメータを調整した後、温度が変化した場合の加減速時間変化をプロットしたものである。青色点線が補正がない従来制御時の変動、赤色実線が今回提案した補正を実施した場合の変動をプロットしたものである。温度変化による変動が抑制されていることがわかる。

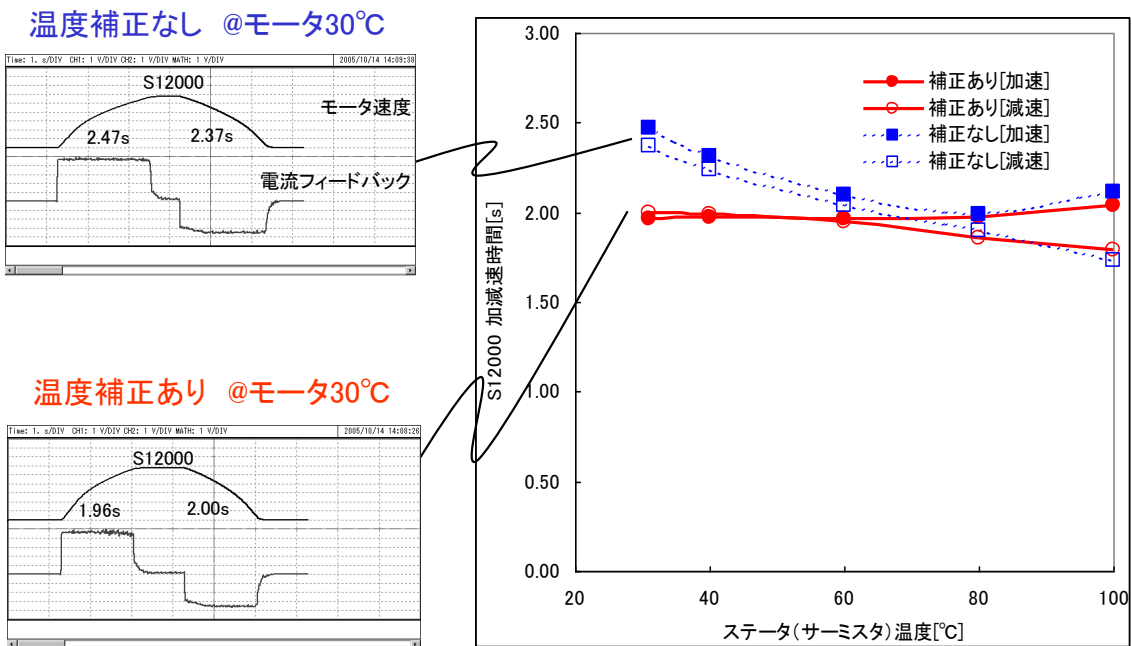


図 5.13 サーミスタによるモータ温度補正の狙い

第六章 サーボ・主軸間の高精度同期制御

第五章までに、サーボ、主軸のそれぞれの軸が高応答で高精度なシステムを構築するための手法について言及してきた。これにより、工作機械の高速・高精度加工や、超精密加工を実現するための礎を築くことができた。しかしながら、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。このため、サーボと主軸を同期させる必要があるねじ切り加工や同期タップ加工などでは、応答性が遅い主軸に性能が左右される。

本章では、分散制御化したサーボアンプと主軸アンプ間の補正手法を提案し、その効果について説明する。

6.1 これまでの同期制御方式の課題

図 6.1 に、主軸の回転位置とサーボ送り軸の位置を同期させる必要があるねじ切り加工時の制御ブロック図を示す。

高応答な位置制御を求められるサーボモータには永久磁石を用いたサーボモータが用いられる反面、主軸モータには一般的に永久磁石を用いない誘導電動機が用いられるケースが一般的である。例えば CNC が使用されるマシニングセンタや旋盤においては、主軸モータに位置制御を必要とするケースより、如何に回転工具を安定に高速に回転させることができるか、もしくは、重切削にもしっかりと耐えることができるだけの高出力を実現できるかが重要なポイントとなるため、高速回転や高速回転での高出力に向いていない同期モータが使われることは少ない。これは、サーボモータと比較して高応答な制御を実現することが難しいことを意味している。

一方、工作機械に求められる加工は複雑化しており、ねじ切りや同期タップのような主軸モータとサーボモータの位置を同期させる必要がある加工も、一台の機械で実施することが求められる。

前述のように主軸モータの応答性は低く、サーボと比べて応答周波数は一桁低いため、このようなねじ切り加工においては、図 6.1 のように CNC 側に一旦、主軸モータの位置フィードバックを返し、CNC 内でこれをサーボ軸の位置指令としてサーボ軸の位置ループや速度ループ制御を CNC 内で集中制御する方式が一般的である。

これにより応答性が低い主軸の動きに対して応答性が高いサーボが追従することで、主軸 - サーボ間の同期誤差を軽減することを狙いとしていた。

本節では、このような従来の主軸・サーボ間の同期制御における課題をねじ切り加工制御と同期タップ加工時を例に説明する。

6.1.1 ねじ切り加工制御

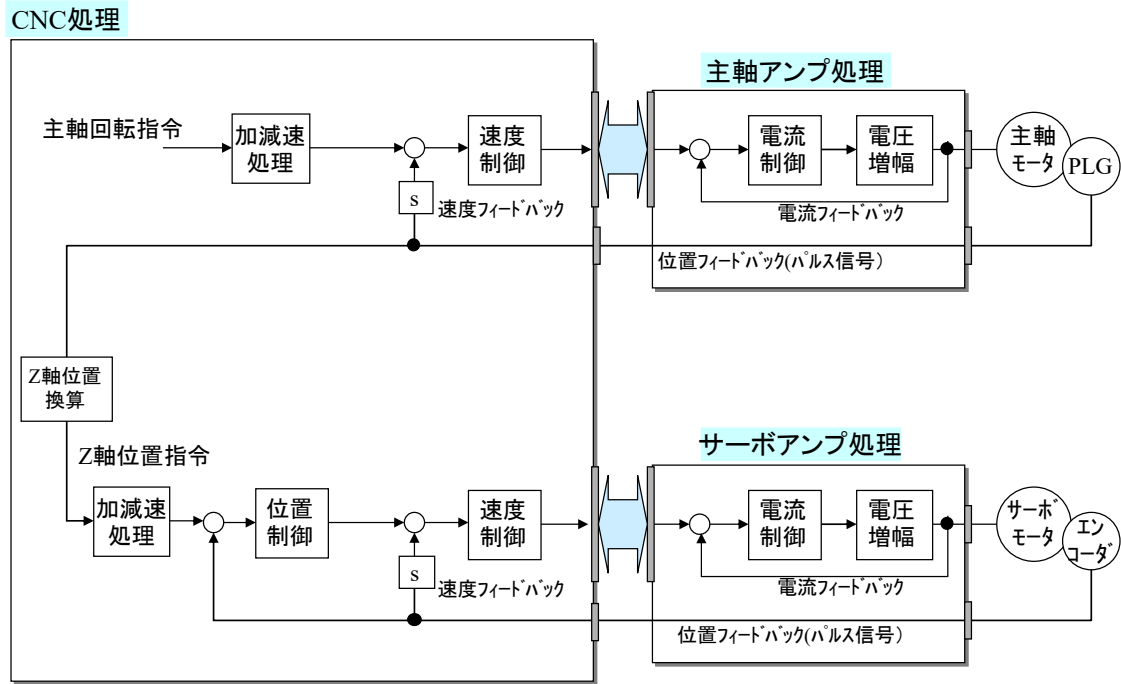


図 6.1 主軸 - サーボ間同期制御（ねじ切り／同期タップ）

図 6.1 のような制御方式を構築することで、応答性が低い主軸モータの位置に合わせて比較的応答性が早いサーボを追従させることで、主軸とサーボ軸の同期性能を高めることは可能だが、あくまで応答性が低い主軸を基準にしており、主軸の応答が上がらない限り、ねじ切り加工の高速化によるタクト向上は実現できないという課題があった。また、主軸モータの位置フィードバックを一旦 CNC 側に戻し、かつ、サーボ軸指令に

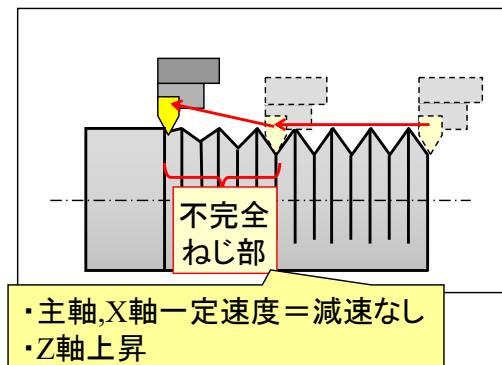


図 6.2 ねじ切り加工における不完全ネジ部

換算する処理を経由したのち、再びネットワークを介してサーボアンプに渡されるため無駄時間も大きくなり、結果として同期誤差を抑制するには限界があった。

更に、主軸とサーボの対応できる加減速時間にも差があるため同期精度を確保するためには、主軸とサーボが一定速度になるまでは加工に入ることができない、もしくは、図 6.2 に示すような Z 軸が上昇を終えるまでは、主軸および X 軸の速度を減速できずに、不完全ねじ部ができてしまうという課題もあった。

6.1.2 同期タップ

同期タップ加工においても、ねじ切り加工と同様に、主軸の回転位置に同期させて、サーボ駆動の送り軸を同期させる必要があるため、図 6.1 のような CNC 側での集中制御が取られるケースもある。しかしながら、ねじ切り加工と比べて同期タップ加工の場合、事前に下穴を加工してから実際のタップ加工を実施するため、比較的切削負荷が小さく、また、ワーク自体を回転させるねじ切りと違い、切削工具（タッパー）自体のイナーシャが小さいこともあり、図 6.3 のように主軸とサーボへの位置指令はそれぞれ独立して与えられ、より高速な加工を目指した構成をとるケースが多い。

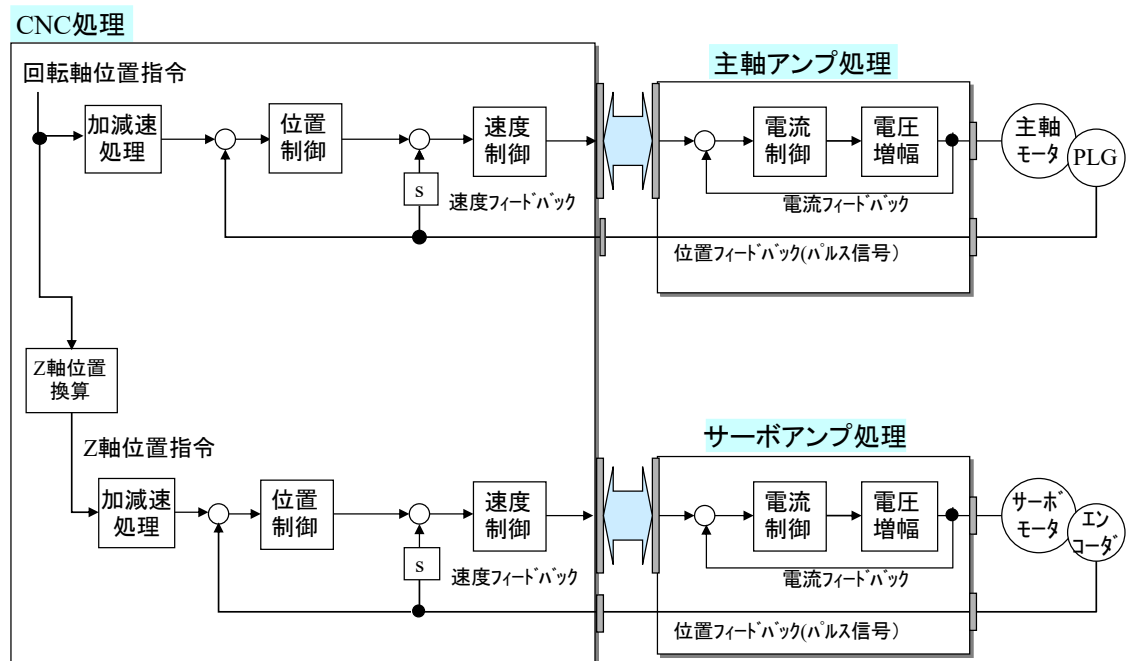


図 6.3 主軸 - サーボ間同期制御（同期タップ）

しかしながら、切子の噛み込みの影響などわずかな同期性のずれがあると、タッパーの破損を誘発したり、規格にあったネジを加工することができないなどの課題があった。

6.2 アンプ間補正制御の構築

本節では、このような主軸とサーボ軸間での同期制御における課題を解決するアンプ間補正について説明する。

これまでに、分散制御により、サーボや主軸制御のハイゲイン化を実現する手法を提案した。この分散制御方式を取った最大のメリットは、サーボや主軸の制御ループ内にネットワークを介在しないため無駄時間を最小化できるという点であるが、別ユニットであるために逆に、サーボ軸間や主軸 - サーボ間の補正を実施できないといった課題があった。

そこで、本節では第二章で提案した高速・高信頼性ネットワークを活用したアンプ間補正について説明する。

繰り返しになるが、これまでサーボ軸や主軸それぞれの軸単体でのハイゲイン化による指令追従性の向上や外乱に対する剛性アップを追求してきた。しかしながら、主軸制御には、電気的時定数や高イナーシャの影響で応答性を高く取るのが難しい誘導電動機

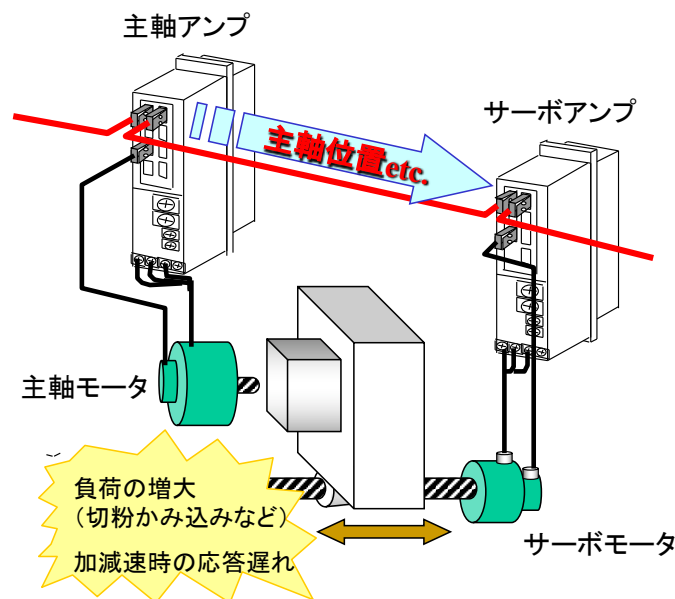


図 6.4 アンプ間補正による高速同期タップ機能

(IM モータ)を用いる点や、電源環境などによる電圧飽和（トルク飽和）により加減速特性が安定しないといった理由で、サーボに対し指令追従特性が劣る場合がある。このため、主軸 - サーボ軸間での高い同期性能を得ることが難しい場合が多くある。

したがって、我々は高速光ネットワークに盛り込んだアンプ間でのデータ通信プロトコルを活用し、図 6.4 に示すような主軸 - サーボ間でのアンプ間補正を活用した高速同期タップ機能を開発した。

図 6.5 に高速同期タップ機能のブロック図を示す。主軸とサーボ軸にはそれぞれ同期した位置指令がネットワークを介して送られる。これに対し、主軸アンプ、サーボアンプではそれぞれ位置ループ制御を実施し、モータを指令に追従するように制御する。もし、切削外乱などもなく、理想的に指令に追従できれば、同期精度は保障されるが、一般的には主軸モータの方がサーボモータより速度周波数応答性を上げることが難しく、外乱による指令との偏差が生じたり、トルク不足により加減速応答が遅れたりして主軸 - サーボ間の同期性が崩れてしまう。

したがって、本提案手法では、主軸アンプ内の位置偏差、および、速度フィードバックを高速光ネットワークに設けたアンプ間データ通信プロトコルを利用してサーボアンプに渡す。サーボアンプ側では CNC コントローラによって送られる主軸位置とサーボ軸

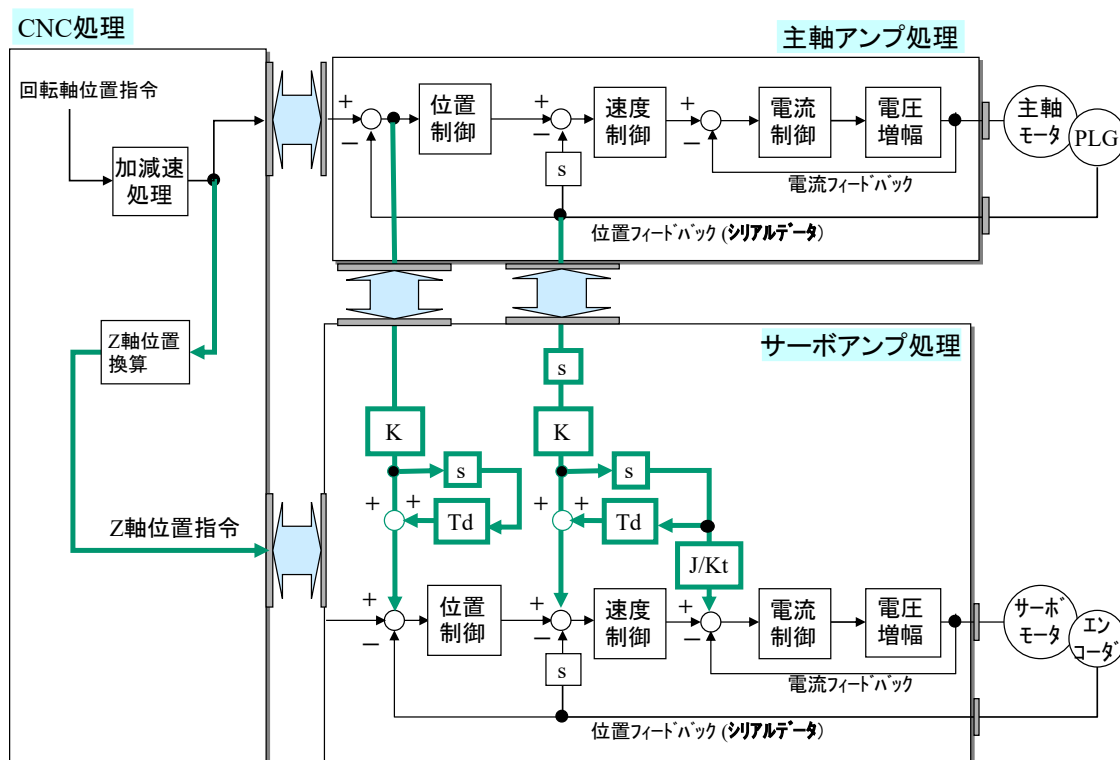


図 6.5 高速同期タップ機能ブロック図

の換算係数 K を用いて単位変換して、主軸位置偏差はサーボ軸の位置指令に補正位置として、また主軸の速度フィードバックは速度指令に補正值として足し込まれる。また、主軸速度フィードバックは更に微分されサーボ軸のイナーシャ J とモータのトルク定数で換算されたのち、電流指令に補正電流値として加えられる。また、これらの補正位置指令や電流指令は、ネットワークを介した分だけ遅れたデータとなっているので、ネットワークによる無駄時間 T_d 分だけフィードフォワードされた値となっている。これにより、従来制御による同期タツプなどの主軸 - サーボ間同期制御と比較して、高精度化、および、高速化が可能となり、生産性の向上に大きく貢献できる。

ここで、図 6.6 に高速光サーボネットワークでのアンプ間補正のデータのやり取りを示している。今回開発したネットワークでは、CNC からアンプ側に送られるデータを Down Stream、アンプ側から CNC 側に送られるデータの流れを Up Stream と呼んでおり、この Down Stream と Up Stream はそれぞれ平行に伝送されている（全二重伝送方式）。また、アンプ間通信は Up Stream 側で実施され、CNC から見て下位のア

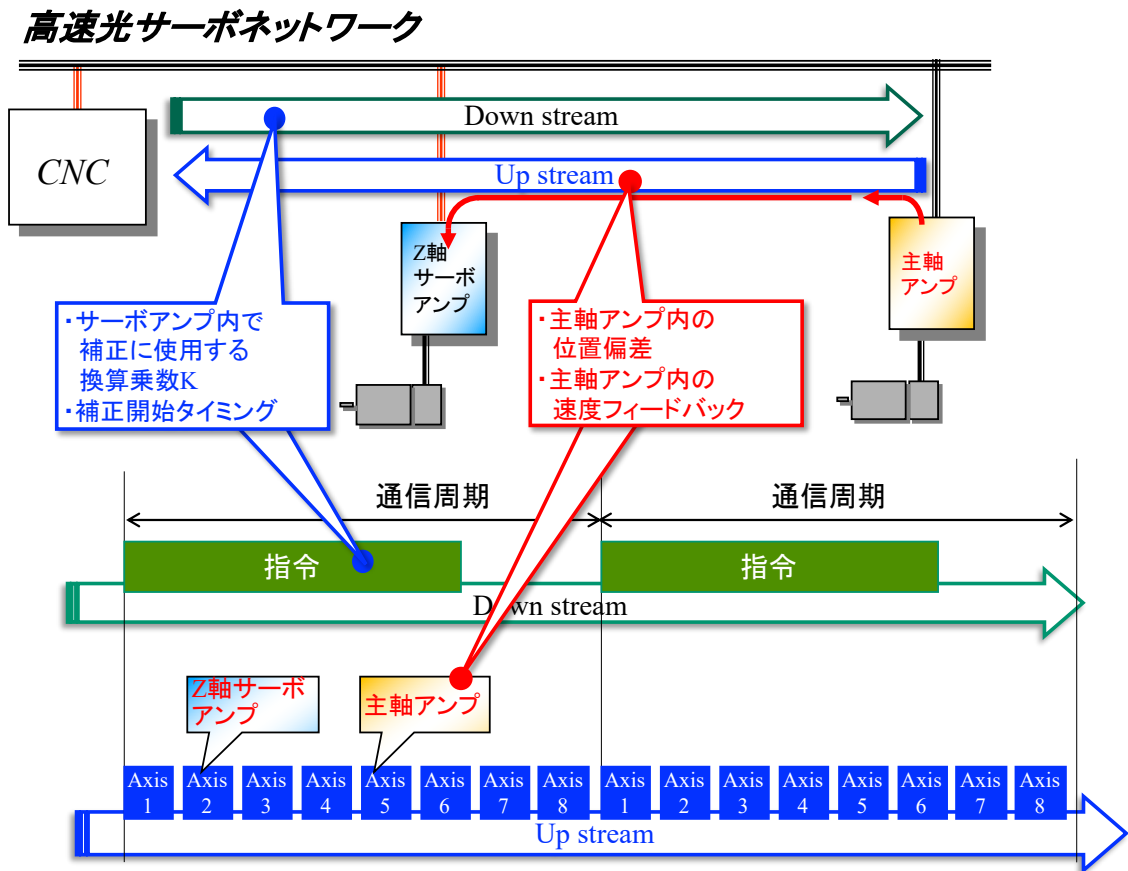


図 6.6 高速同期タツプ機能におけるアンプ間コミュニケーション

ンプが載せたアンプ間通信用データを上位のアンプが自動で受信できる仕組みとしている。

したがって、今回提案する主軸とサーボアンプ間でのアンプ間補正を実施する場合には、必ず CNC から見て後段に主軸アンプを接続する必要がある、かつ、双方向でのアンプ間補正は実施できない。更に、コスト的な制約でアンプ内の受信バッファメモリ数には制限があるため、アンプ間補正を実施する直前にどの後段アンプのデータを受信するかを、CNC から指示を受け自動受信バッファの設定を実施する必要がある。このようなアンプ間補正の軸情報や、指令換算係数 K といったパラメータは、Down Stream を使って実施される。ちなみに、今回のアンプ間補正の周期は、ネットワークの最小周期である 0.2 msec である。

6.3 アンプ間補正のシミュレーション検証

今回、本提案手法の有効性をまず、シミュレーションで実施した。図 6.7 にその主軸・サーボ間の同期制御によるねじ切り加工のシミュレーション結果を示す。今回、比較としては、左から従来制御方式（主軸の回転位置フィードバックにサーボが追従する方式）、中央が主軸とサーボのそれぞれが位置指令に追従する方式（主軸位置ループ化）。そして右側が主軸・サーボ間でアンプ間補正を実施した場合を示している。

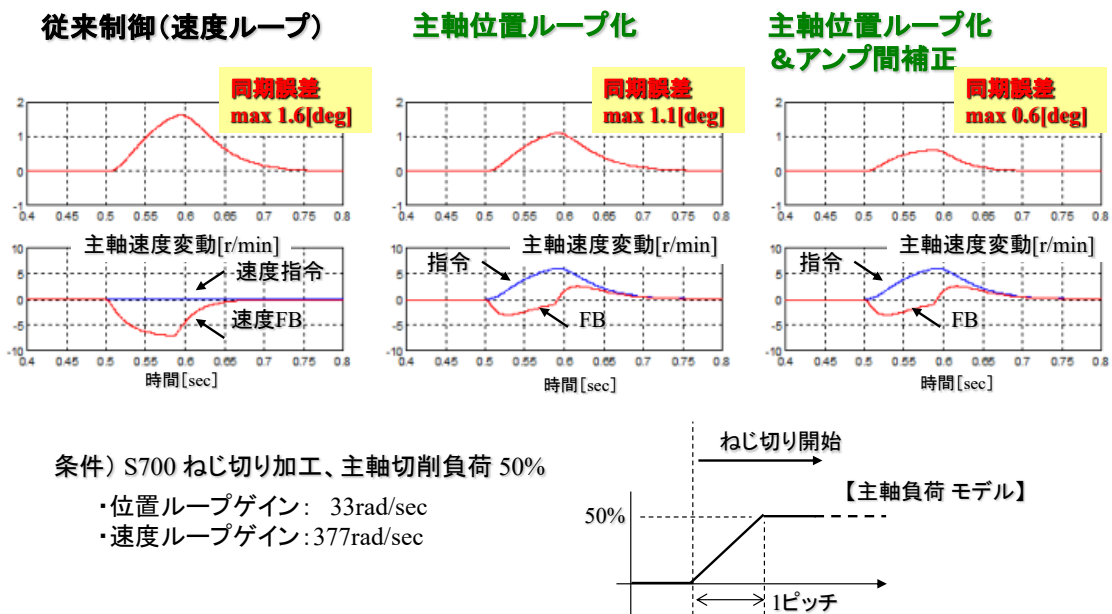


図 6.7 ねじ切り加工における改善

結果として、従来制御ではねじ切り開始時の主軸切削負荷が掛かり始めた際に、同期誤差が最大で 1.6deg あったのに対し、主軸の位置ループ化で最大 1.1deg に改善。更に、アンプ間補正で主軸の応答遅れに対しサーボが補正を加えることで、最大同期誤差が最大 0.6deg まで改善された。

なお、ねじ切り加工などにおいては、機械のオペレータがその加工の仕上がり状況を見ながら、プログラムで指定された速度より実際の切削速度を落として加工したいといった要求がある。図 6.8 ではそのような要望を想定し、ねじ切り加工途中で主軸速度を変化させるオーバーライド処理を実施した場合に、ねじ切り加工精度（同期誤差）がどのように変化するかを確認するため、シミュレーションを実施した結果である。

左側の従来制御で主軸の速度を減速させた場合、主軸とサーボの指令追従応答性の差が大きいため同期誤差が増大し実用に耐えれない結果となっている。一方、主軸制御を常時位置ループ化した場合は、主軸の応答性が上がり、同期誤差は 0.7deg まで改善。更に、アンプ間補正を実施時には、同期誤差は 0.4deg まで改善することができ、主軸の速度を変化させる場合（オーバーライド時）にも、同期精度の向上が可能となることがわかる。

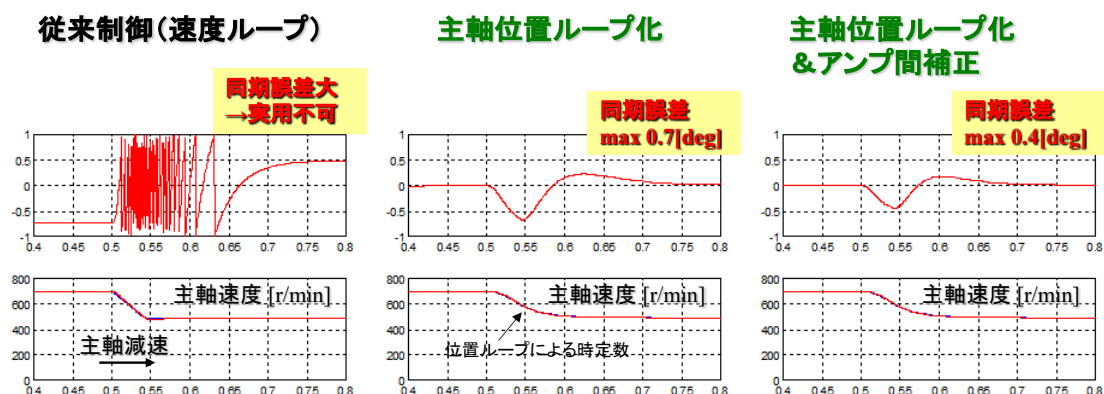


図 6.8 ねじ切り加工における同期精度(オーバーライド時)

ここで、図 6.7、図 6.8 のシミュレーションでは、主軸と水平軸である X 軸サーボとの間でのアンプ間補正の効果を示したが、図 6.9 では上下軸である Z 軸サーボとの関係について評価した。図 6.9 に示すように、Z 軸による工具上昇が始まってから終了するまでの期間はねじ深さが浅くなるため不完全ねじ部となる。この不完全ねじ部は極力短くすることが望ましいが、主軸と X 軸サーボの同期がズレることによるピッチの崩れは、ねじ深さが浅くなること以上に避ける必要がある。このため、これまでは Z

軸が完全に上昇するまで、主軸の減速（オーバーライド）を実施することができなかったが、図 6.8 の結果のように主軸減速時にも X 軸との同期精度が保てることで、不完全ねじ部の長さを短縮することができる。今回のシミュレーションでは従来、不完全ねじ部が 3.3mm であったのに対し、アンプ間補正を実施することで 2.8mm まで短縮することができることがわかった。

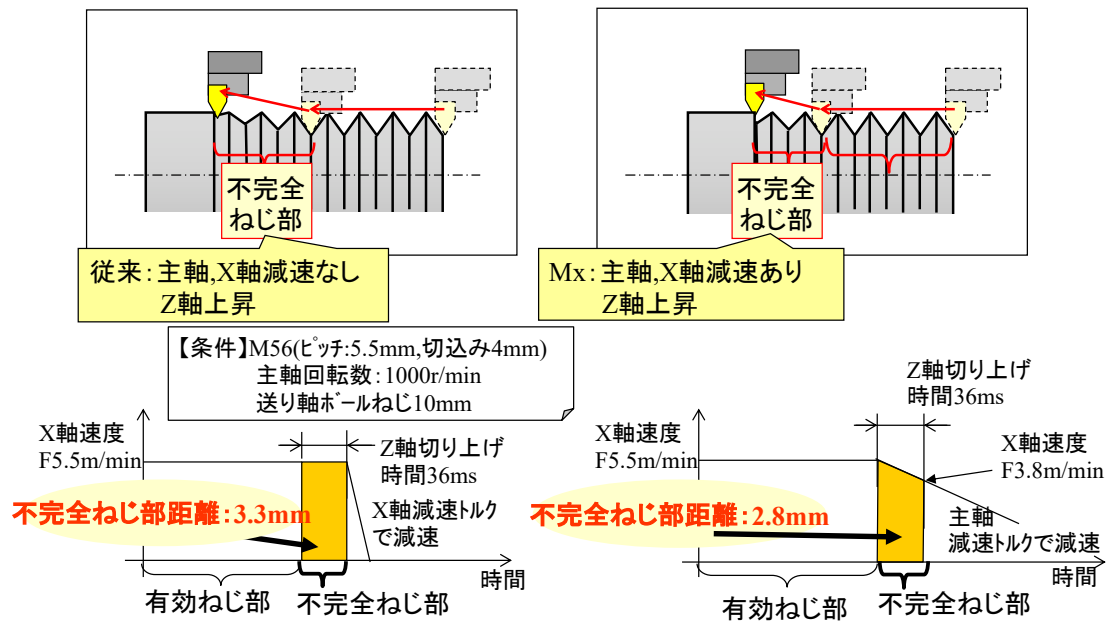


図 6.9 ねじ切り加工不完全ネジ部の短縮

次に、同期タップ加工におけるシミュレーション検証結果を図 6.10 に示す。

図 6.10 の左側は、主軸の位置ループ化を実施した 4th Step のアーキテクチャを用いてハイゲイン化を実施した主軸アンプを想定したシミュレーション結果であるが、タップの最高速度 3,000r/min の条件で、サーボとの同期誤差が 14 パルスとなっている。ここでパルスの単位は、主軸モーター回転あたり 4,096 パルスであり、1 パルス \approx 0.09 度である。これに対し、アンプ間補正を実施した場合のシミュレーション結果では、同期誤差がやく 6 パルスまで改善できた。

これらのシミュレーション結果を持って、今回実際に主軸アンプ、および、サーボアンプにこのアンプ間補正を実装し製品化を進めた。

【条件】モータ単体

タップ最高速度:3,000r/min, 主軸モータ容量:5.5kW

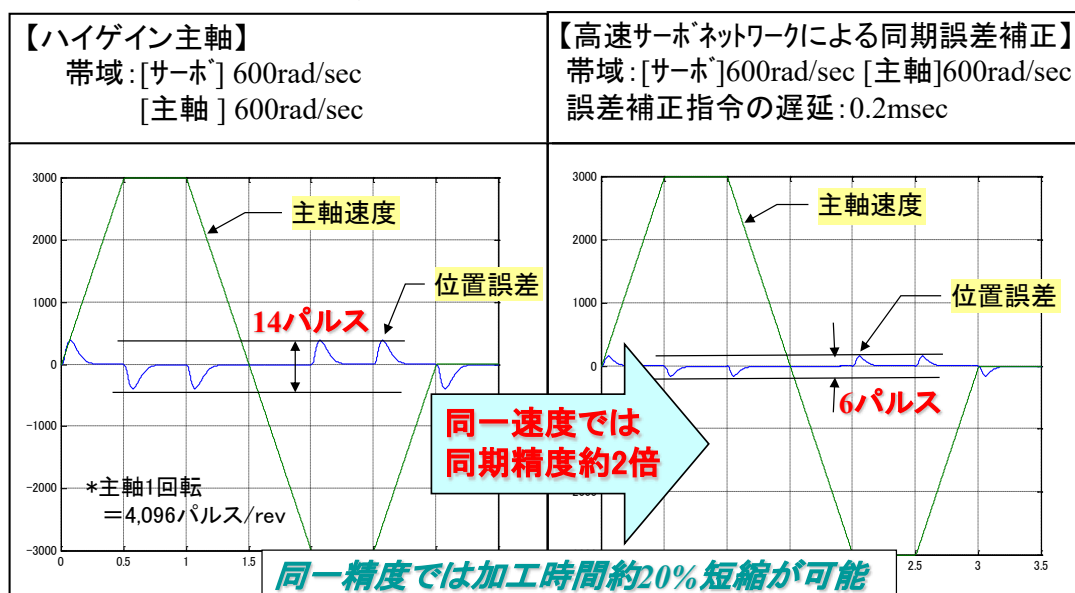


図 6.10 同期タップ精度向上の検証 (シミュレーション検証)

6.4 アンプ間補正の効果検証

6.4.1 主軸・サーボ間同期制御性能検証 1

(同期タップ加工の高速高精度化: 実機加工検証)

図 6.11 に提案するアンプ間補正を実装し、実際にマシニングセンタで同期タップ加工を実施した時の結果を示す。左側の図はアンプ間補正機能を無効とした従来の使用条件での結果を示す。ここでは主軸モータがトルク飽和をしない領域で使用するため余裕を含め 560msec という加減速時定数で動作させている。これに対し、真ん中の図は、時定数を 560msec から、350msec へ短縮したケースであり、この時には主軸モータのトルク飽和領域に掛かるため、指令に対して主軸モータが追従することができずサーボ軸との同期誤差が、30 パルスから 160 パルスに増大している。

一方、右側の図はアンプ間補正を有効にした場合の結果を示す。時定数は真ん中の図と同じく 350msec と主軸モータのトルクが飽和する条件であるが、主軸モータとサーボ軸の同期誤差は、8 パルスと大きく改善していることがわかる。

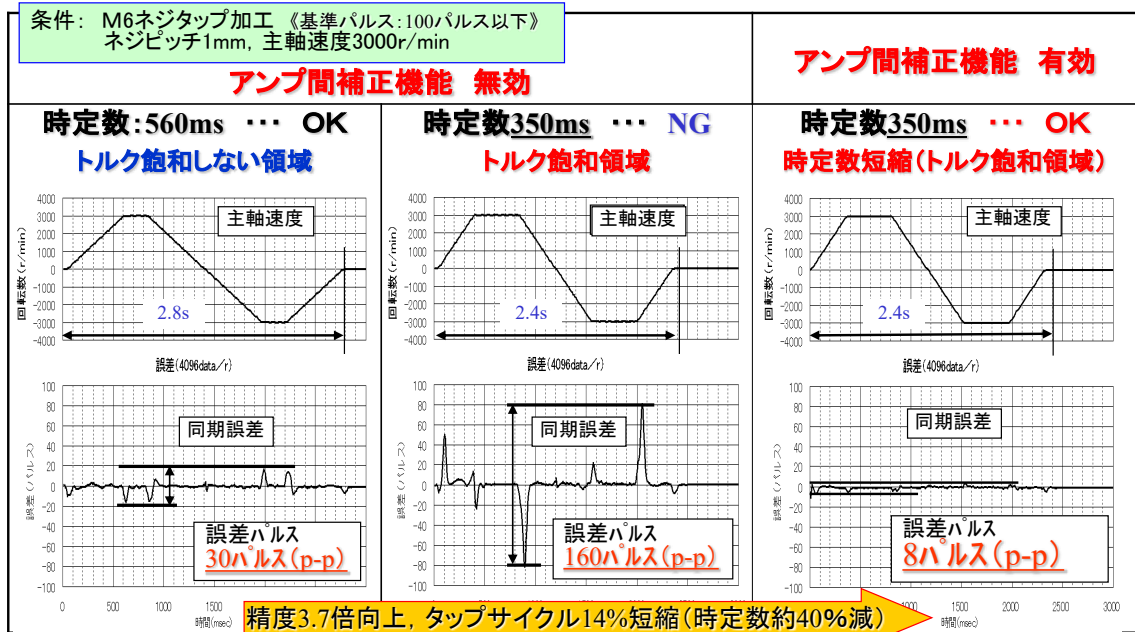


図 6.11 同期タップ実加工での検証結果

次に、M6ネジのタップ加工を設定時定数を変えて切削した時の同期誤差をプロットしたものを図 6.12 に示す。通常制御では、主軸の加減速時定数を小さくするほど同期

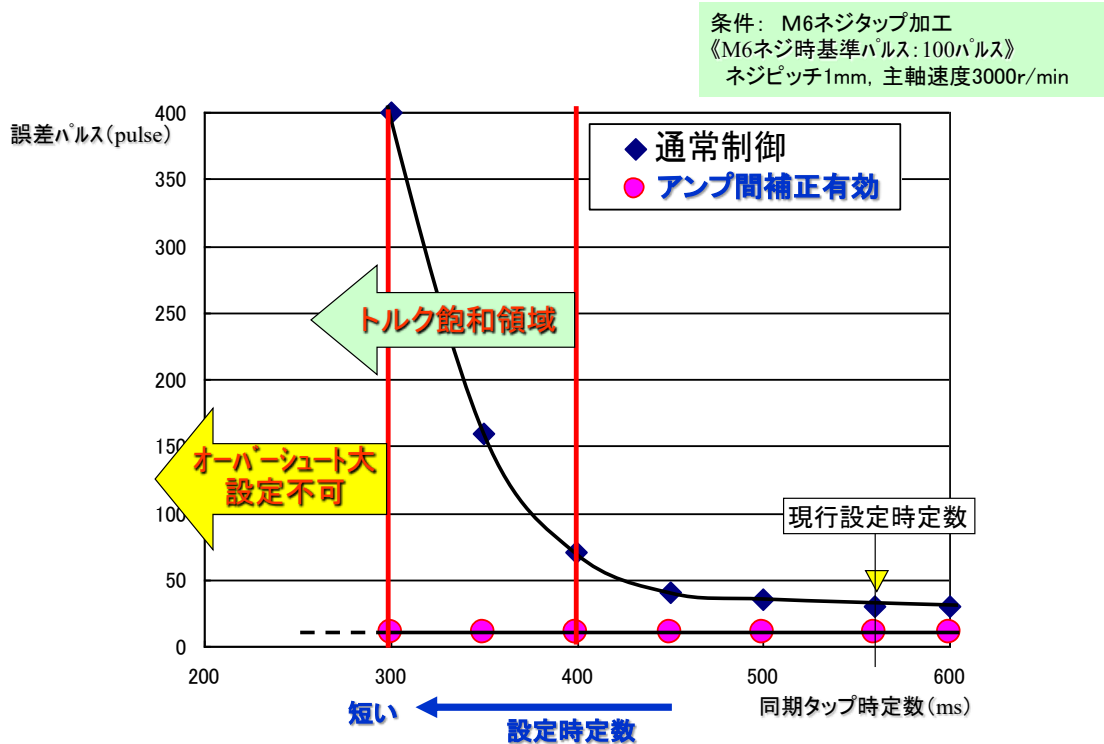


図 6.12 同期タップ設定時定数と同期誤差

誤差が大きくなっており、特にトルク飽和領域に入るほど小さい時定数を設定した場合、同期誤差の増加は顕著となっている。つまり、実際の使用に当たっては、電源環境の変化などを考慮し、設定時定数はトルク飽和が起きないようにマージンを見て設定する必要がある。一方、アンプ間補正を有効にした場合には、トルク飽和領域に掛かっていても同期誤差は抑えられている。つまり、これまでのように、マージンを見て時定数を設定する必要がなく加工時間短縮に大きく貢献できる。

6.4.2 主軸・サーボ間同期制御性能検証2 (同期タップ加工の連続加工：実機加工検証)

図 6.13 では、マシニングセンタ実機で M5 ネジの同期タップの連続加工を実施した結果を示す。アンプ間補正無しで従来設定していた加工条件でのネジ精度を確保したまま、主軸速度と加減速時定数を短縮しても、アンプ間補正を実施することで、精度を確保でき、結果として同一時間（75 秒）内で 30 個から 36 個と 20% の生産性向上を実現できている。

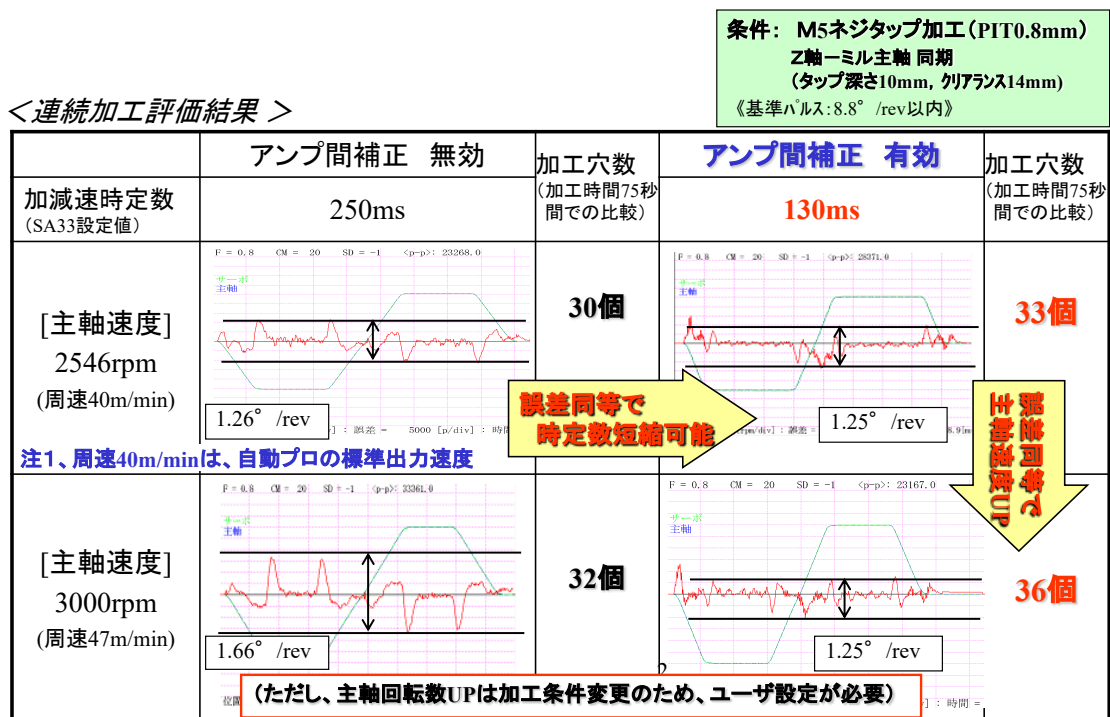


図 6.13 アンプ間補正での連続同期タップ加工における効果

図 6.14 は、この時の加工結果の写真である。今回は、主軸速度を 3000rev/min と同じ条件としているが、M5 ネジの JIS 規格に対し、13%の生産性向上を実現できた。

<実加工評価結果> 主軸速度:3000r/min
加工穴数比較(加工時間75秒間)

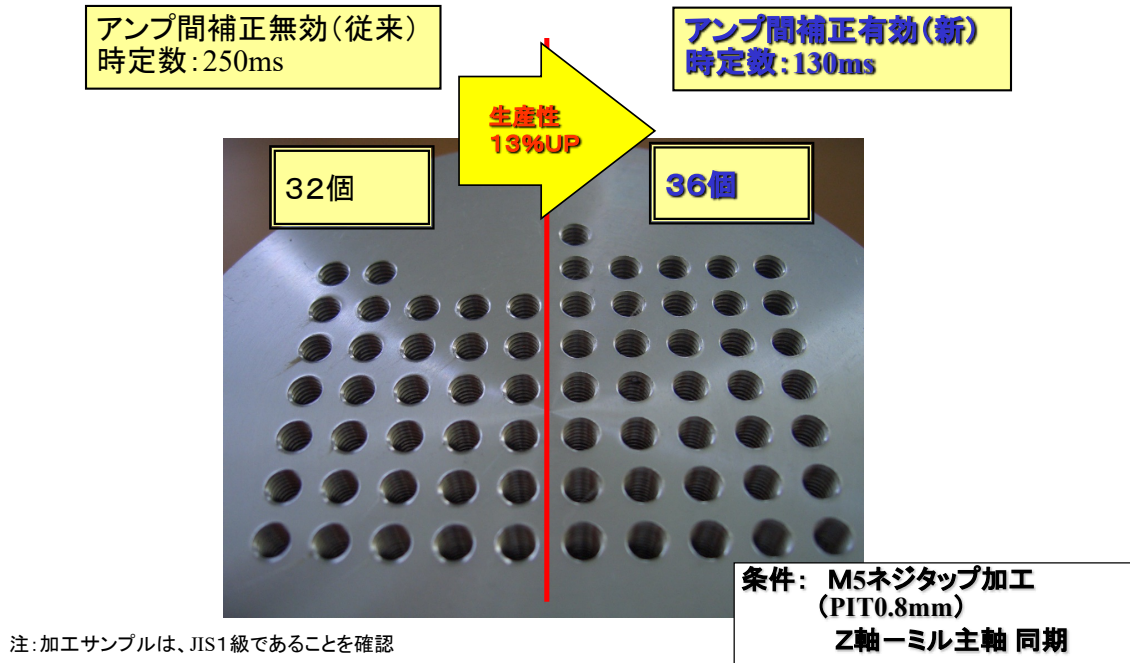


図 6.14 アンブ間補正有効時の同期タップ加工結果

6.5 アンブ間補正の今後の展開

6.5.1 主軸同期制御への展開

今回開発したアンブ間補正は6.2節で記載したように、CNC側から見て下位のアンブの情報を上側のアンブで受信して補正に使うことしかできず、上位に接続されたアンブ側から下位のアンブ側に補正值などを伝達することができない。これは、開発実施時点での光通信用モジュールや受信回路 IC (ASIC) などの制約で通信速度が 50Mbps、通信周期が 0.2msec に制限されていたからである。もちろん、性能だけなら対応できる素子などはあったが、大変高価であることやノイズ環境が悪い FA 環境化で使用できる物は、当時は存在しなかった。

しかしながら、現在は、通信 IC の半導体プロセスの進化や、ネットワークプロトコル技術の進化も進んでおり、今後更に進化していくことが容易に想像できる。実際すでに、FA 用途でも現行通信周期 0.2msec に対し、通信周期 0.03125msec (31.25 μ sec) の実現目処が立ってきている。

そこで、次世代アンプでは、現在できなかった双方向でのアンプ間補正や、通信周期の更なる向上を計画している。ここでは実際の開発に先立ち、これらのアンプ間補正の更なる進化を実現した場合の効果について、シミュレーションで検証した結果を紹介する。

図 6.15 に双方向アンプ間通信を用いた場合の主軸同期制御の高出力化について検証した。今回実施した主軸同期の場合、二つの主軸がワークを介して接続されており、この二軸間には同期ズレを許容するような遊びや弾性がないため、少しでも同期ズレが発

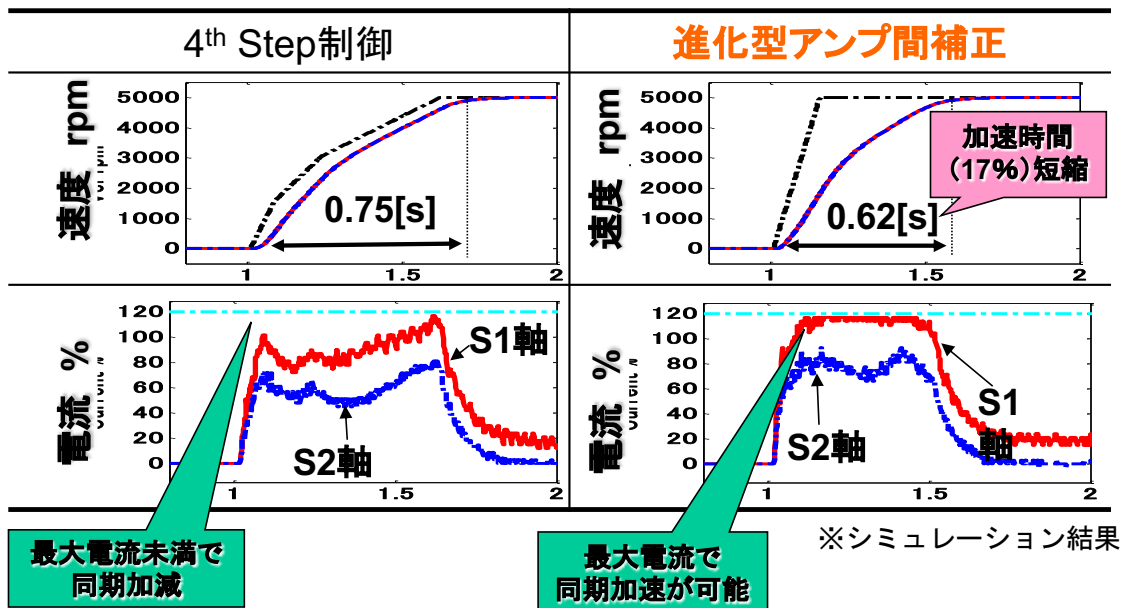
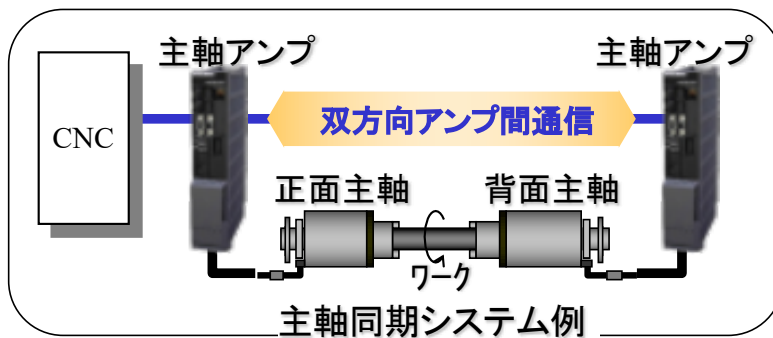


図 6.15 双方向アンプ間通信を用いた主軸同期制御の高出力化

生すると軸同士で干渉が発生し、正常に制御を実施することが難しくなる。したがって、現在のアンプ間補正ではこのような主軸同期制御に活用することができない。

しかしながら将来的に通信周期を $31.25 \mu \text{ sec}$ まで高速化することで、このようなアプリケーションでもアンプ間補正を活用できる。この時、現状（今回提案したハイゲイン化アーキテクチャ 4th Step での主軸制御）では、主軸の位置偏差が発生しないようにマージンを見て最大出力電流以下となるような運転しかできなかつたところを、進化型アンプ間補正を活用することで、少なくとも片方の軸が最大出力電流で制限されても同期誤差を抑えることが可能となるため、加速時間を約 17%短縮することが確認された。

6.5.2 5軸加工機高精度化への展開

次に、この進化型アンプ間補正を最近、急速に普及してきている5軸加工機に展開した場合の効果をシミュレーションで図 6.16 に示す。

ここでは、回転テーブル C 軸とそのテーブルを更に回転させることができる A 軸を搭載したチルトテーブルを想定しており、それら C 軸、A 軸にはそれぞれダイレクトドライブモータ（DD モータ）が使用されているモデルを想定。このモデルにおいて、重心がアンバランスなワークが C 軸テーブルの上に載せられている時に、その A 軸テーブルがダイレクトドライブモータにより高速に回転することで生じる慣性力が C 軸に干渉力として加わるケースをシミュレーションした。

左側の結果は、3rd Step のアーキテクチャでの制御した場合は、A 軸の動作により、C 軸が $2.6/1000\text{deg}$ 振られてしまっているのに対し、4th Step によるハイゲイン化アーキテクチャでは、約 15%改善の $2.2/1000\text{deg}$ に改善している。これに対し、次世代でサーボ制御周期を通信周期と同じ $31.25 \mu \text{ sec}$ まで高速化した場合は、現状の 4th Step から 50%改善の $1.1/1000\text{deg}$ まで、更に、双方向アンプ間補正を可能とする進化型アンプ間補正を実施して、A 軸の動きに合わせてフィードフォワードで C 軸に補正を実施することで、 $0.1/1000$ 以下の振られ量まで改善できる。

このような取り組みにより、分散制御での唯一の欠点であったアンプ間での補正についても十分な効果を上げることが可能となる。

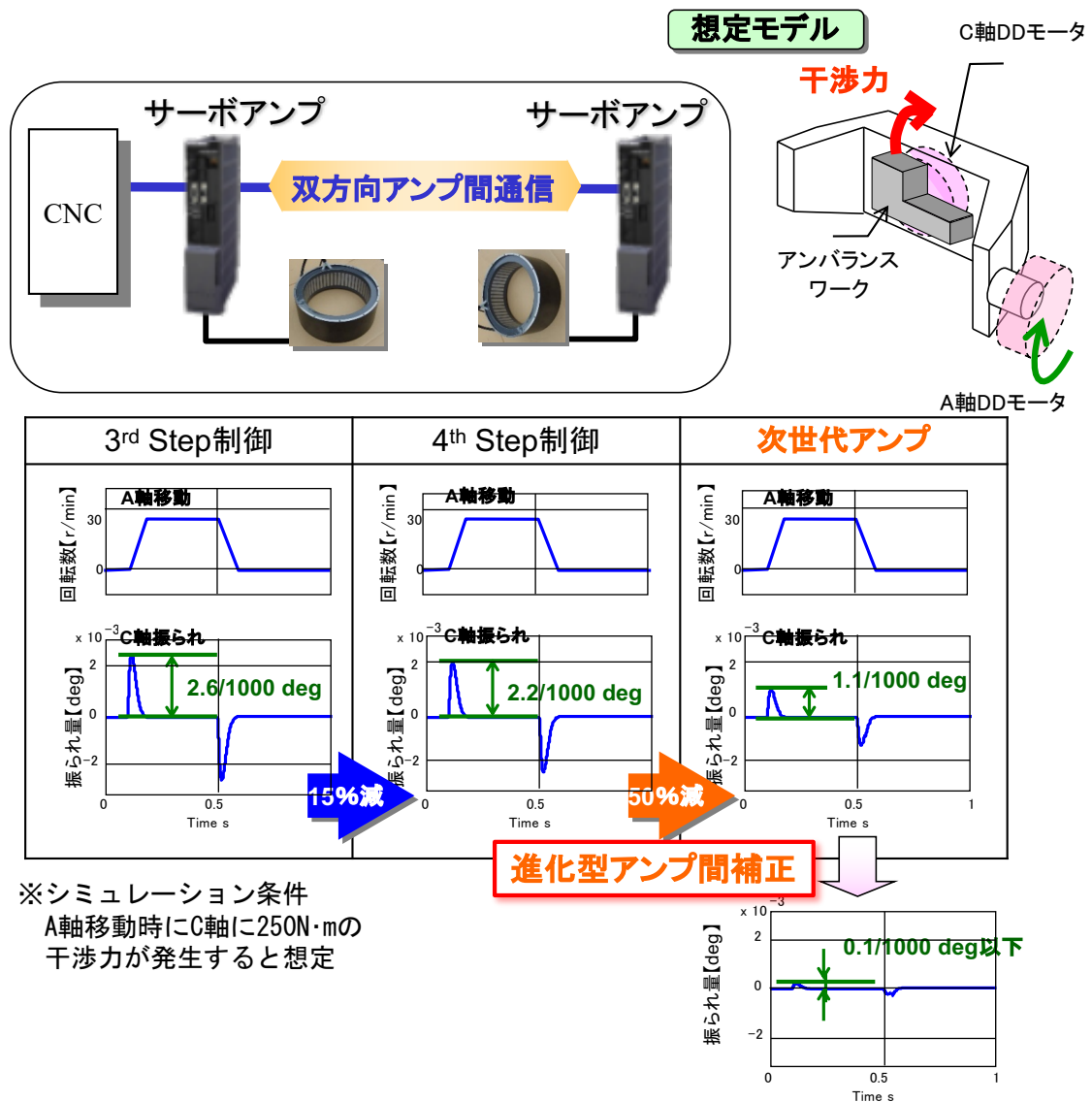


図 6.16 双方向アンプ間通信を用いた5軸加工機の高精度化

6.6 提案する手法に関するまとめ

近年、生産性を向上させるために一台の工作機械で様々な加工に対応する複合加工などの要求が増加している。このような中、主軸とサーボが同期して加工するケースが増加してきている。本章では、そうした主軸とサーボの同期加工における高速・高精度化を実現するための実施した施策を紹介した。

今回は特に、ねじ切り加工や同期タップ加工といった主軸の回転位置とサーボ送り軸

の位置を同期させて制御する必要がある場合に対して、高速で信頼性の高いネットワークを活用したアンプ間での補正を提案し、シミュレーション、および、実加工で加工精度の向上と加工時間の短縮（生産性向上）に対しての効果を検証した。

本研究により主軸とサーボの制御において、CNCコントローラと分散して制御する分散制御方式の特性を最大限に発揮する主軸・サーボ制御システムを構築することができた。これにより、従来制御と比較して、例えば、本章で示した同期タップ加工の条件においては、実際の加工において13%の生産性の向上を実現することができた。

また、これは、半導体プロセスの今後の進化を主軸・サーボ制御に最大限に活用するための指針にもなり、かつ、CNCコントローラと主軸やサーボ間のネットワークの重要性も同時に示した。

今後は、更に半導体の進化やネットワークの高速化技術をタイムリーに取り入れながら、主軸やサーボの同期性能を最高に引き出すためのアーキテクチャや補正アルゴリズムの最適化などを継続して進めていく予定である。

第七章 結言

CNC 工作機械はマザーマシンとも言われ、様々な製造業において大きな役割を持つ。最近では、スマートフォンや5Gなどの通信機器の需要も高く、これらの部品や金型の加工には欠かせないものであり、その生産の効率化の要求は益々強まっている。

このような中、CNC 工作機械に求められる性能には、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、その実現のため多くの研究が行われている。しかしながら、多くの研究は、機械の構造的な要因が与える精度への影響、切削加工における精度への影響などに関するものが多く、送り軸であるサーボの制御や主軸モータの制御に関しても多くの研究はなされているものの制御系の安定性に関する制御理論に関するものや、高効率なモータ制御に関する研究が多く、複合化が進む工作機械のサーボや主軸制御を体系的に研究したものはなかった。

実際、工作機械の駆動系であるサーボや主軸の制御性能が工作機械の高速・高精度加工に与える影響は大きく、近年の半導体技術やLSIの発展のスピードは目覚しく、この技術をしっかり活用し、工作機械の駆動系の制御技術に活用していくことが、機械の構造による改善、加工技術の改善以上に効果を上げることが期待できる。

本研究では、生産性向上のために複雑化、高度化する工作機械の制御を司る CNC システムにおいて、高能率加工と高能率システムを実現するサーボ・主軸制御のシステム構成と制御性改善に関する研究をまとめた。

第一章では、CNC 工作機械の生産性向上に関する研究の流れを整理するとともに、サーボ・主軸モータ制御に関する課題を整理し、研究の流れを示した。

- (1) サーボ軸・主軸の個々の基本制御性能（高応答特性）の向上
・・・[第二章、第三章、第四章]
- (2) 基本性能に加え制御対象のモデル化によるサーボ・主軸モータの制御性改善
・・・[第五章]
- (3) サーボ軸と主軸間の同期制御性能の改善
・・・[第六章]

第二章では、高速・高応答な CNC 駆動システムを構築する上で基本となるハイゲイン化を実現するためのサーボ・主軸アンプでの位置・速度・電流制御の分散制御の提案

と、CNC とサーボ・主軸アンプの間のネットワークについて考察を行い、高速光ネットワークの提案とその効果を提案し、加工の高速・高精度化に対する効果を検証した。

例えば、工具交換の時間短縮による生産性向上や使用ツールの種類削減といった観点から注目されている 1 ツールでの高速・小円弧切削や、非円弧切削などでの指令精度が送り速度 20m/min, 半径 1mm の条件で約 8 倍の精度向上ができることを示した。

第三章では、独立した主軸・サーボそれぞれがコントローラからの指令に高速・高応答で追従し、かつ、切削外乱などの影響を受けにくいハイゲインシステムとするためのアーキテクチャとしてマルチコア化について提案した。メインプロセッサとサブプロセッサ側での最適な制御分担（電流制御専用コア）や処理タイミング、補正機能の最適なシステム構築を提案するとともに、その効果を実証した。例えば、主軸モータの温度上昇の低減(10%)、円弧補間時の精度が 1.5 倍向上することを実証するとともに、本アーキテクチャの更なる進化（位置・速度制御の高速化：専用コア化）で、位置決め整定速度が 80%向上することを検証した。

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・機能性を飛躍的に向上させる主軸の常時位置ループ化手法を確立した。これにより昨今高生産性の追求のため旋削加工とミーリング加工を同じ機械で実現する複合加工機が増えてきているが、この複合加工機での加工時間短縮や加工精度向上に大きく貢献できることを検証した。例えば、旋削モードから C 軸切り替えで従来約 1 秒掛かっていたものがゼロに、旋削モードから主軸同期制御への切り替えで従来 11 秒掛かっていたものが、同じくゼロに削減できることを検証した。また、切削外乱に対するロバスト性向上により、実加工において面精度が 3 倍向上することを実証した。

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、方向反転時に発生する象限突起誤差を最小化する手法、および、主軸に使用される誘導電動機（IM モータ）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。例えば、象限突起誤差補正では、送り速度の変化に対して、従来制御では、象限突起が 14 μm 発生するようなケースでも、提案する補正を実行することで、4 μm に抑えることができ、約 3 倍精度が向上できることを検証した。

また、誘導電動機の温度による電気的特性の変化をモデル化し、サーミスタを内蔵した主軸モータを合わせて開発することで、補正がない場合に加減速時間が温度条件で約 0.5 秒変動するのに対し、変動を約 0.1 秒以内に抑えることができることを検証した。

最後に第六章では、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提案した高速・高信頼性ネットワークについての研究成果を示した。具体的には、アンプ間補正を実施することで、主軸速度と加減速時間を短縮することが可能となり、同一時間での加工結果を比較した場合、従来は 32 個の同期タップ加工しかできなかったケースに対し、提案する制御手法を採用することで、36 個の同期タップ加工が可能となり、工作機械の切削加工において大幅な生産性の向上を実現できることを検証した。

このように、年々要求が高まる工作機械の生産性向上に応えるため、サーボ・主軸の制御アーキテクチャの基本構成の研究から、制御対象のモデリング、ネットワークの最適化、加工精度や加工時間を短縮するための補正機能などについて提案、および、検証を実施した。

今回提案した分散制御方式や、半導体の進化を活用した専用サーボ制御ハードウェアコアなどの制御アーキテクチャは、複合加工機の普及などでサーボモータや主軸モータの軸数が増加していく傾向が強まる中、CNC コントローラの CPU 能力の負荷軽減に今後も大きく貢献する。

一方、昨今の少子高齢化による労働人口の減少や、かつて世界の工場と言われた中国やその他の発展途上国などにおいても人件費が急騰している状況などから、生産現場における自動化・省人化の要求は、今後益々加速するものと推測される。

こうした中、今後は、工作機械によるマシニング加工や旋削加工といった実際の加工における生産性を上げる取り組みだけでなく、クラウド活用による情報連携や AI を活用した加工精度向上のための補正機能、周辺ロボットとの連携、ダウンタイム削減を目的とした予知保全への取り組みなど、求められるニーズはより高度化していくことが予想される^{[84]~[87]}。

図 7.1 に、昨今注目されているスマートファクトリへの今回取り組んだ研究の展開を示している。今回取り組んだサーボアンプや主軸アンプでの分散制御やそれを活かす専用制御アーキテクチャ (LSI 活用技術) などの取り組みは、今後更に、サーボや主軸アンプのモータ電流や温度、速度、位置、振動などのデータのセンシングやデータのクレンジング機能の向上などにも発展させることができ、予知保全システムの構築や AI 活用による補正機能の実現など、工作機械のインテリジェント化にも大きく貢献できることが期待される。

また、直接的な切削加工に関しても、現在はエンコーダなどの位置や速度のフィードバック情報のみを活用しているが、今後、切削加工面の仕上がりや切削時の機械のたわ

みなどを直接ビジョンカメラなどの画像データを元に、サーボ系のフィードバック制御に活用していくことも考えられる。すでにビジョンカメラによるビジュアルフィードバックをロボットに活用しようという流れは進んできているが[88]~[90]、今後、更に高速・高精度が要求される工作機械に適用しようとした場合には、実切削加工や複合加工において、高速性を重視する処理や中速で補正により精度を確保すべき処理の見極めなど、工作機械におけるサーボ制御に求められる機能・性能とそれが切削結果に与える影響を十分に把握した専用 LSI の設計技術が重要になってくる。こうした技術においても、今回研究したサーボ制御専用アーキテクチャ (LSI 活用技術) や、その性能と加工精度に与える影響を評価・検証した今回の研究成果は、将来的に工作機械で必要なビジュアルフィードバックや高速画像処理のアーキテクチャ設計の大きな指針の一つになると考えている。

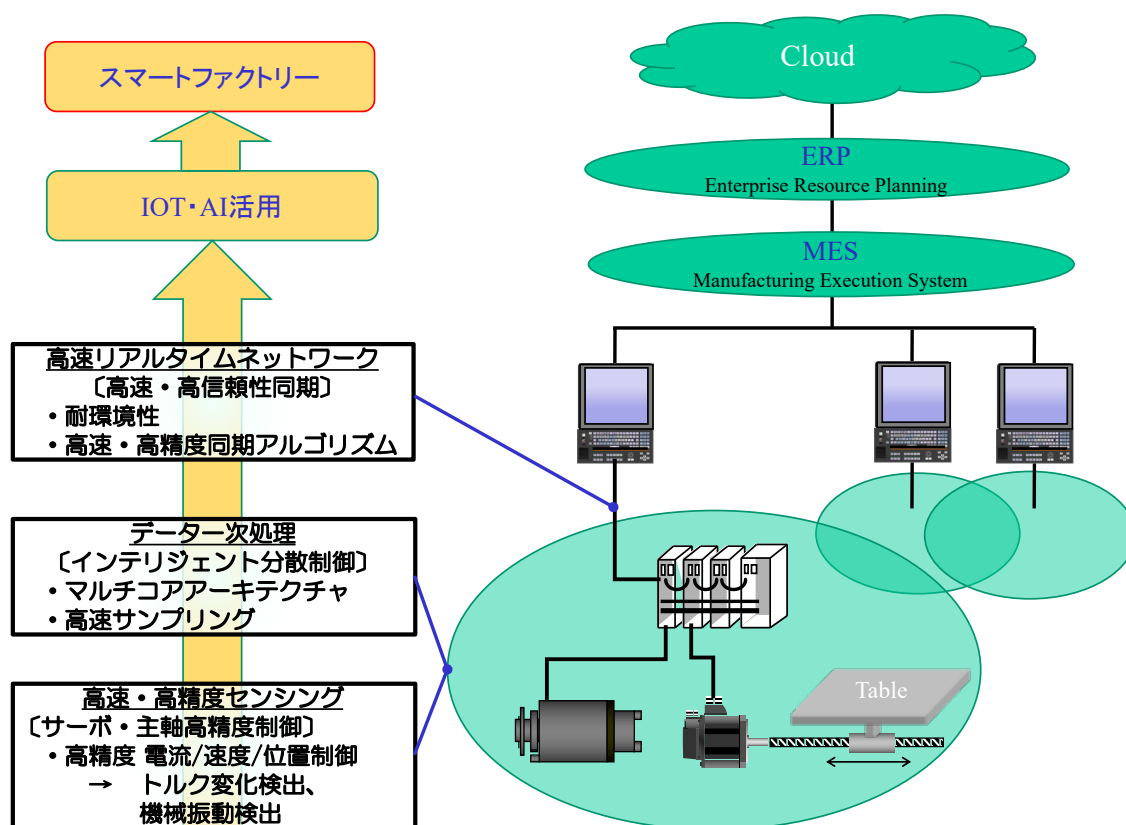


図 7.1 サーボ・主軸制御のスマートファクトリーへの展開

謝辞

本研究を博士論文として纏めるにあたり、ご多忙の中、ご懇篤なるご指導を賜りました愛知工業大学情報科学部情報科学科教授 中條直也博士に深甚なる敬意を表します。

また、本研究の機会を与えて頂き、国際学会の発表から、論文誌としての投稿など詳細にわたってご丁寧なご指導を頂きました静岡大学名誉教授・愛知工業大学情報科学部客員教授 水野忠則博士に心より感謝いたします。

本研究の執筆にあたっては、愛知工業大学情報科学部情報科学科准教授 梶克彦博士、および、内藤克浩博士に多大なご協力を頂き、深く感謝いたします。

なお、本研究は三菱電機名古屋製作所において行われたものであり、当時、本機会を与えてくださった山下昭裕博士、加知光康博士（当時、三菱電機名古屋製作所 NC システム部）に厚くお礼申し上げます。

また本研究を進めるにあたり、安藤和秋氏、佐野修也氏、澤木潤氏、青木敏氏（当時、三菱電機名古屋製作所 NC システム部）には、研究当初より多大な協力を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 垣野義昭：最新のマシニングセンタの機能と課題，工業調査会 機械と工具，Vol.41，No.4，pp.2-5(1997).
- [2] 佐治木清吾：工作機械数値自動制御の展望，精密機械，Vol.24，No.286，pp.663-667(1958).
- [3] 森脇俊道：工作機械の高速化技術の現状，精密工学会誌，Vol.53，No.7，pp.1001-1004(1987).
- [4] 中村晋也，河村 久，勝野美昭：工作機械主軸の技術開発と今後の課題，NSK technical journal，686，pp.31-39(1992).
- [5] 藤井健次：高速主軸用軸受の潤滑技術，工作機械関連技術者会議，B2-1(2000).
- [6] 下村利明：工作機械主軸用アンギュラ玉軸受ハイアビリー軸受の開発，KOYO Engineering Journal，161，pp.39-46(2002).
- [7] 高田芳治，山岡義典，水本洋，有井士郎：サイクルタイム分析に基づく高能率マシニングセンタの開発，精密工学会誌，Vol.65，No.6，pp.878-882(1999).
- [8] 二見 茂，古谷彰浩：AC リニアモータと転がり案内を用いたナノメータ位置決め（第1報）-システム構成と粗・微動制御-，精密工学会誌，Vol.57，No.3，pp.556-561(1991).
- [9] 二見 茂，古谷彰浩：AC リニアモータと転がり案内を用いたナノメータ位置決め（第2報）-転がり案内のトライポロジー-，精密工学会誌，Vol.57，No.10，pp.1808-1813(1991).
- [10] 深田茂生，成瀬慎也，松本貴広：ボールねじの微視的変位挙動に関する研究（第1報）-準静的特性に関する基礎実験-，精密工学会誌，Vol.66，No.7，pp.1070-1075(2000).
- [11] 藤田 純，羽山定治，濱村実，垣野義昭，松原 厚，大脇悟史：NC 工作機械のボールねじねじり振動がサーボ系の安定化に及ぼす影響，Vol.65，No.8，pp.1190-1194(1999).
- [12] 山根八州男，山戸一弘，柳 耕，鳴瀧則彦：マシニングセンタ主軸用簡易動剛性評価法，精密工学会誌，Vol.65，No.1，pp.136-140(1999).
- [13] 奥村太史，堤正臣：マシニングセンタ用高速主軸の回転中の触れと振動の抑制（第1報）-3面バランス修正の効果-，精密工学会誌，Vol.69，No.9，pp.1327-

- 1331(2003).
- [14] 奥村太史, 羽田壮一郎, 堤 正臣 : マシニングセンタ用高速主軸の回転中の触れと振動の抑制 (第2報) -3面バランス修正の問題と4面バランス修正の効果-, 精密工学会誌, Vol.70, No.2, pp.269-274(2004).
- [15] 雀 新, 竹ノ内哲也, 堀内 幸, 池野順一, 高巢周平 : 永久磁石式磁気軸受併用によるエアスピンドルの高精度高剛性化, 精密工学会誌, Vol.65, No.4, pp.615-619(1999).
- [16] 玉村都夫, 上村 誠, 松浦勝俊, 矢野 宏 : マシニングセンタ主軸の機能性評価に関する研究, 品質工学, Vol.10, No.4, pp.26-33(2002).
- [17] R.J. Bickel and M. Tomizuka : Synchronization of Multiple-axis Systems Subject to Periodic Disturbances A,SME Japan / USA Symp. Flexible Automation, Vol.2, pp 821(1992).
- [18] 垣野義昭, 松原 厚, 黎 子椰, 中川秀夫, 竹下虎男, 丸山寿一 : NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究 (第3報) -機構パラメータのチューニング-, 精密工学会誌, Vol.62, No.3, pp.423-427(1996).
- [19] 垣野義昭, 松原厚, 黎 子椰, 中川秀夫, 竹下虎男, 丸山寿一 : NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究 (第2報) -1軸のサーボパラメータチューニング-, 精密工学会誌, Vol.61, No.2, pp.268-272(1995).
- [20] 垣野義昭, 松原 厚, 茨木創一, 中川秀夫, 竹下虎男, 丸山寿一 : NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究 (第4報) -多軸チューニング-, 精密工学会誌, Vol.63, No.3, pp.368-372(1997).
- [21] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫 : 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社(2001).
- [22] 曾我部正豊, 中村厚生 : 最近の NC 工作機械用サーボ制御機器, 精密機械, Vol.59, No.286, p. 1427-1430(1993).
- [23] 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三 : AC サーボシステムの理論と設計の実際, 総合電子出版(1997).
- [24] 松本圭二, 瀬戸 誠, 竹垣盛一 : FA を取り巻く駆動制御技術の動向と展望, 三菱電機技報, Vol.73, No.9, pp.648-652(1999).
- [25] 二見茂 : 精密・超精密位置決めへの制御法, アンプの最近の動向, 精密工学会誌, Vol.67, No.2, pp.184-187(2001).

- [26] ヤマザキマザック (株) : FF-660 カタログ
- [27] 堀内 宰 : 精密・超精密位置決め的高速化, -ボールねじ対リニアモーター, 精密工学会誌, Vol.67, No.2, pp.179-183(2001).
- [28] 曾我部 正豊 : 工作機械用リニアモーター高出力化, 高精度化, 低発熱化に対する現状, 課題, 並びに開発動向, 精密工学会誌, Vol.69, No.11, pp.1542-1544(2003).
- [29] ヤマザキマザック (株) : F³-660L カタログ
- [30] ヤマザキマザック (株) : SVC-2000L カタログ
- [31] 辻峰 男 : パワーエレクトロニクスと電動機制御入門, 長崎大学が記述研究成果リポジトリ第2章(2015).
- [32] 古谷真一, 佐竹 彰, 筒井 和彦 : AC モータの高速運転に適した電流制御法の提案, 電気学会論文誌 D, Vol.128, No.12, pp.1361-1402(2008).
- [33] 古谷真一, 佐竹 彰 : 低キャリア周波数駆動に適した交流モータの電流制御法, 電気学会全国大会講演論文集, pp. 224-228(2006.3).
- [34] 渋谷貴之, 伊東 淳一 : 高速サンプリングとスイッチング周波数における電流応答限 5 界に関する基礎検証, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.535-536(2010.8).
- [35] 高木祐介, 正木良三, 金子 悟, 宮崎泰三, 小原三四郎 : 高速回転誘導モータの電流制御安定化, 電気学会講演論文集, 905, pp.296-297(1996.4).
- [36] 金原義彦, 道木慎二, 大熊 繁 : 抵抗変動にロバストな最適オブザーバーを用いた誘導電動機のベクトル制御法, 電気学会論文誌 D, Vol.121, pp.902-907(2001.8).
- [37] R. Toutant, S. Balakrishnan, S. Onyshko, and N. Popplewell : Feedrate Compensation for Constant Cutting Force Turning, IEEE Control Systems Magazine, Vol.13, No.6 (1993.12).
- [38] Dong-II Kim, Chung Hyuk Yim : All digital high performance controller for spindle motor in CNC machine tool, IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, pp. MC2-2.1-MC2-2.3(1997).
- [39] 中西賢一 : 複合加工機の最新技術動向, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, pp.13-14(2008).
- [40] 村木俊之, 森 吉範 : 複合加工機の最新技術, 日本機械学会, 第4回生産加工・工作機械部門講演会論文集, pp.185-186(2002).
- [41] 村木俊之, 山本 博雅 : 複合加工機の現状と展望, 精密機械, Vol.78, No.9, pp. 740-743(2012).
- [42] 齋藤明德 : マシニングセンターの進化と現状, 日刊工業新聞, (2016.10.21).

- [43] 山中日出晴, 三宅和久: 高速ターニングにおける最近の制御技術, 精密工学会誌, Vol.59, No.9, pp.1439-1442(1993).
- [44] 白瀬敬一: これから求められる工作機械, 機械と工具, pp.10-16(2005.11).
- [45] 竹内芳美: 多軸・複合・高機能・超精密加工機の最新の動向について, 精密工学会誌, Vol.78, No.9(2012).
- [46] 後藤正明: 高付加価値生産への飽くなき追求, 月刊生産財マーケティング, (2005.5).
- [47] 横山哲男: 複合加工の生産性とその評価, 機械技術, 日刊工業新聞, Vol.48, No.2, pp.18-20(2000).
- [48] 工作機械業界の現状と今後の展望, Mizuho Industry Focus, Vol.180(2016).
- [49] 石村敏雄: CNC 自動旋盤の同時加工性能による生産性向上, 機械と工具, 工業調査会, Vol.45, No.8, pp.28-32(2001).
- [50] 内 庸二: CNC 複合旋盤による複合・複雑加工, 機械技術, 日刊工業新聞, Vol.52, No. 5, pp.32-35(2004).
- [51] 酒井格夫: CNC 複合旋盤「Cincom」の有効活用事例, 機械技術, 日刊工業新聞, Vol.57, No.8, pp.23-25(2009).
- [52] 染谷英一郎: 充実した複合加工機能を備えた CNC 自動旋盤「シンコム M シリーズ」, 機械と工具, 工業調査会, Vol.46, No.8, pp.29-32,(2002).
- [53] 長谷川茂雄: 小物部品加工用 CNC 自動盤の課題と対応技術, 機械と工具, 工業調査会, Vol.48, No.4, pp.45-49(2004).
- [54] 村木俊之, 垣野義昭, 常井宏一: 複合工作機械の運動精度向上に関する研究, 精密工学会誌, Vol.69, No.12, pp.1734-1738(2003).
- [55] 貴田義和: 「Smart Factory プロジェクト」進まない実態と解決策, オペレーションズ・リサーチ, Vol.63, No.4(2018).
- [56] 藤島誠, 垣野義明, 松原 厚, 佐藤智典, 西浦 勲: 知能化工作機械によるドリル加工に関する研究 (第1報) -工具の異常監視と加工能率の向上-, 精密工学会誌, Vol.66, No.11, pp.1972-1796(2000).
- [57] 山岡義典, 垣野義昭, 鈴木康彦, 長江昭充, 村木俊之: タップ加工用知能化工作機械システムに関する研究 (第1報) -内部センサによる工具損傷と切りくずつまりのモニタリング-, 精密工学会誌, Vol.66, No.12, pp.1992-1926(2000).
- [58] 佐藤智典, 垣野義昭, 松原 厚, 藤嶋誠, 西浦 勲: 知能化工作機械によるドリル加

- 工制御に関する研究（第1報）-ドリル加工における切削条件の決定法-, 精密工学会誌, Vol.66, No.8, pp.1270-1274(2000).
- [59] 佐藤智典, 垣野義昭, 松原 厚: 知能化工作機械によるドリル加工制御に関する研究室（第2報）-工具寿命を考慮した連続した複数個の加工全体の加工時間の最小化-, 精密工学会誌, Vol.69, No.5, pp.731-735(2003).
- [60] 山下昭裕, 尼崎新一: FA システム機器の将来展望, 三菱電機技報, Vol.80, No.10, pp.678-682(2006).
- [61] 吉川 勉: MES インターフェース製品, 三菱電機技報, Vol.80, No.10, pp.683-690(2006).
- [62] 斎藤公美雄, 二瓶貴行, 三田善郁, 吉川 勉: FA 統合ソリューション e-F@ctory と iQ-Platform, 三菱電機技報, vol.81, No.10, pp.683-690(2006).
- [63] 毬山利貞, 増井秀之, 穂苅寛光, 太田 佳, 森本卓爾: AI 技術 “Maisart” による機器制御 の高性能化, 三菱電機技報, vol.94, No.6, pp.348-351(2020).
- [64] S. Wang and E.J. Davison: On the Stabilization of Decentralized Control Systems, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-18-5, pp.473-478(1973).
- [65] H. C. Wang: Sampling Period and Stability Analysis for the Microcomputer-Based Motor Control System, Trans. IEEE, IECI-28, 2, pp.98-102(1981).
- [66] 美多 勉, 向田 昌幸: デジタル制御系における最適サーボ系の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.3, pp.193-199(1983).
- [67] 原 辰次: 分散制御に対するサーボ問題の可解性とサーボ設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.12, pp.943-949(1983).
- [68] 美多 勉, 大山 恭弘, 古田 勝久: サンプル周期より短い制御遅れ時間をもつ最適デジタルレギュレータとその特性, 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.7, pp.589-591(1983).
- [69] 水谷 隆, 岡本清和, 大庭信男, 張 玉武: デジタルサーボ系におけるサンプリング間隔の影響に関する基礎的考察, 精密工学会誌, Vol.56, No.6, pp.1100-1104(1990).
- [70] 須田信英, 王 秋玲: 分散制御によるロバストサーボ問題, 計測制御学会論文集, Vol.26, No.12, pp.1368-1375(1990).

- [71] 中村政俊, 香田英之, 久良 修: サーボ系による連続経路制御のサンプル値制御における適正サンプル周波数の決定, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.5, pp.649-651(1992).
- [72] 二見 茂: サーボモータとその制御における高性能化技術, 精密工学会誌, Vol.61, No.3, pp.351-354(1995).
- [73] 垣野義昭, 井原之敏, 中津善夫, 篠原章翁: NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第6報) -円弧補間送り字のスティックモーションの生成機構とその補正-, 精密工学会誌, Vol.56, No.4, pp.739-744(1990).
- [74] 藤田 純, 羽山定治, 濱村 実, 欺波和広, 垣野義昭, 松原 厚, 大脇悟史: NC 工作機械の円弧象限切替時運動誤差の理論解析, 精密工学会誌, Vol.67, No.1, pp.152-156(2001).
- [75] 濱村 実, 藤田 純, 垣野義昭, 松原 厚: 慣性力と粘性抵抗が円弧補間運動誤差に及ぼす影響に関する研究, 精密工学会誌, Vol.69, No.9, pp.1306-1311(2003).
- [76] 田中淑晴, 大岩孝彰, 大塚二郎: 精密位置決め制御のためのリニアボールガイドの摩擦モデルに関する研究 (第2報) -ブラシモデルを用いた閉ループ制御によるシミュレーション-, 精密工学会誌, Vol.73, No.4, pp.465-469(2007).
- [77] Yasuhiko Suzuki, Atsushi Matsubara, Yoshiaki Kakino, Kazuhiko Tsutsui: A Stick Motion Compensation System with Dynamic Model, JSME International Journal, Series C, Vol.47, No.1(2004).
- [78] 中村政俊, 冷水大作, 久良修郭: 主軸従軸関係をもつメカトロサーボ系の主軸位置同期を図った高精度輪郭制御法, 計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.4, pp.274-279(1997).
- [79] 中村政俊, 冷水大作, 中村光児, 久良修郭: メカトロサーボ系の2次モデルを用いた従軸追従形の主軸位置同期制御法, 計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.9(1997).
- [80] 中村祐司, 二見 茂: 予測制御のFAメカトロ機器への適用, 計測と制御, Vol.39, No.5, pp.349-351(2000.5).
- [81] 佐藤隆太, 井出 裕, 堤 正臣: 多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.73, No.727(2007).
- [82] Erkorkmaz, K. and Altintas, Y., High Speed CNC System Design. Part II: Modeling and Identification of Feed Drives, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.41, pp.1487-1509(2001).

- [83] 鎌野琢也, 鈴木茂行, 飯田賢一, 片岡 雄 : 適応制御を用いた多軸速度同期システム, システム制御情報学会, Vol.5, No.7, pp.302-304(1992).
- [84] 清 威人 : スマートファクトリー 戦略的「工場マネジメント」の処方箋, 英治出版株式会社(2015).
- [85] J.Wan, H.Cai, K.Zhou : Industrial 4.0 Enabling Technologies, IEEE/ICIT, 2014 International Conference on, pp.135-140(2015)
- [86] F.Shrouf, J.Ordieres, G.Mirafliotta : Smart Factories in Industry 4.0, A Review of the Concept and of Energy Management Approached Based on the Internet of Things Paradigm, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp.697-701(2014).
- [87] 水落隆司 : FA-IT 統合ソリューション e-F@ctory を支える最新の FA 技術・ソリューション, 三菱電機技報, Vol.93, No.4, pp.212-221(2019).
- [88] 中坊嘉宏, 石井抱, 石川正俊 : “超並列・超高速ビジョンを用いた 1ms ターゲットトラッキングシステム” , 日本ロボット学会誌, Vol. 15. No. 3, pp. 417-421(1997).
- [89] 並木明夫 : 高速視覚フィードバック制御のロボット応用, 精密工学会誌, Vol.84, No.3, pp.243-247(2018).
- [90] Tomoki Tamada, Wataru Ikarashi, Daiki Yoneyama, Kazuhito Tanaka, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masato Ishikawa : High-speed Bipedal Robot Running Using High-speed Visual Feedback, IEEE/RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp.140-145(2014).

本論文に関わる発表または投稿論文リスト

論文のテーマ	掲載誌名 (号・巻等含む)	著者	博士論文 との 対応章	公表 年月日
<u>Optimum Method of Spindle control for Multi-tasking Machine</u> (査読：有)	International Journal of Informatics Society (IJIS), Volume 12, No 1, pp. 69-78, (2020.8).	<u>K. Tsutsui</u> , J. Sawaki, N. Chujo, T. Mizuno	第二章 第四章	'20年8月
<u>High accuracy synchronized spindle/Servo control in the CNC Equipment</u> (査読：無)	Proceedings of International Workshop on Informatics (IWIN 2020), pp. 189-197, (2020.9).	<u>K. Tsutsui</u> , K. Kaji, K. Naito, N. Chujo, T. Mizuno	第三章 第五章 第六章	'20年9月

研究業績リスト

論文題目	公表の方法及び時期	著者
Failure Prediction of Factory Automation Equipment using the Interaction between Parallel Links	International Journal of Informatics Society (IJIS), Volume. 12, No. 2, pp. 131-140, (2020.11).	Masanori Haga, <u>Kazuhiko Tsutsui</u> , Katsuhiko Kaji, Katsuhiko Naito, Tadanori Mizuno, Naoya Chujo
High accuracy synchronized spindle/Servo control in the CNC Equipment	Proceedings of International Workshop on Informatics (IWIN 2020), pp. 189-197, (2020.9).	<u>Kazuhiko Tsutsui</u> , Katsuhiko Kaji, Katsuhiko Naito, Naoya Chujo, Tadanori Mizuno
Anomaly detection in FA equipment using an interaction model	Proceedings of International Workshop on Informatics (IWIN 2020), pp. 51-56, (2020.9).	Hiroaki Ando, Yusuke Iwatsuki, Daiki Hibi, <u>Kazuhiko Tsutsui</u> , Satoshi Aoki, Katsuhiko Naito, Naoya Chujo, Tadanori Mizuno, Katsuhiko Kaji
Optimum Method of Spindle control for Multi-tasking Machine	International Journal of Informatics Society (IJIS), Volume 12, No 1, pp. 69-78, (2020.8).	<u>Kazuhiko Tsutsui</u> , Jun Sawaki, Naoya Chujo, Tadanori Mizuno
FA 機器間の相互作用モデルを用いた異常検知の基礎検討	情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集 pp. 203-204. (2020.2).	安藤弘晃, 岩月佑介, 日比大貴, 青木 敏, 筒井和彦, 内藤克浩, 中條直也, 水野忠則, 梶 克彦
Failure prediction considering interaction between servo motors of FA equipments	Proceedings of International Workshop on Informatics (IWIN2019), pp. 233-238, (2019.9).	Masanori Haga, <u>Kazuhiko Tsutsui</u> , Katsuhiko Kaji, Katsuhiko Naito, Tadanori Mizuno, Naoya Chujo
Consecutive Position Control for Spindles in CNC Equipment	International Workshop on Informatics (IWIN 2019), pp.227-232(2019.9)	<u>Kazuhiko Tsutsui</u> , Jun Sawaki, Naoya Chujo, Tadanori Mizuno
FA 機器のサーボモータ間の相互作用を考慮した故障予測の検討	情報処理学会第 81 回全国大会, pp. 183-184, (2019.2).	芳賀正憲, <u>筒井和彦</u> , 梶 克彦, 内藤克浩, 水野忠則, 中條直也

本論文に関わる特許

公開番号	出願日	公開・公表日	出願人・権利者	発明者または考案者	代理人	発明等の名称
再表 2005 /122385	2004/6/11	2005/12/22	三菱電機株式会社	筒井和彦 澤木 潤	高橋省吾 稲葉忠彦 村上加奈子 中鶴一隆	モータの制御装置及びその制御方法
特開 2006- 252392	2005/3/14	2006/9/21	三菱電機株式会社	宮崎友宏 筒井和彦 佐野修也	酒井宏明	同期制御装置
再表 2002 /039574	2000/11/1	2002/5/16	三菱電機株式会社	筒井和彦	宮田金雄	サーボ制御方法及びその装置
再表 2002 /03833	2000/11/1	2002/5/16	三菱電機株式会社	筒井和彦	宮田金雄	サーボ制御装置