

巻頭論文

FA機器・産業用加工機を支える モーション制御技術



田中健一*



真柄卓司**

Trend of Motion Control Technology for FA Components and Industrial Machinery Systems

Kenichi Tanaka, Takuji Magara

要旨

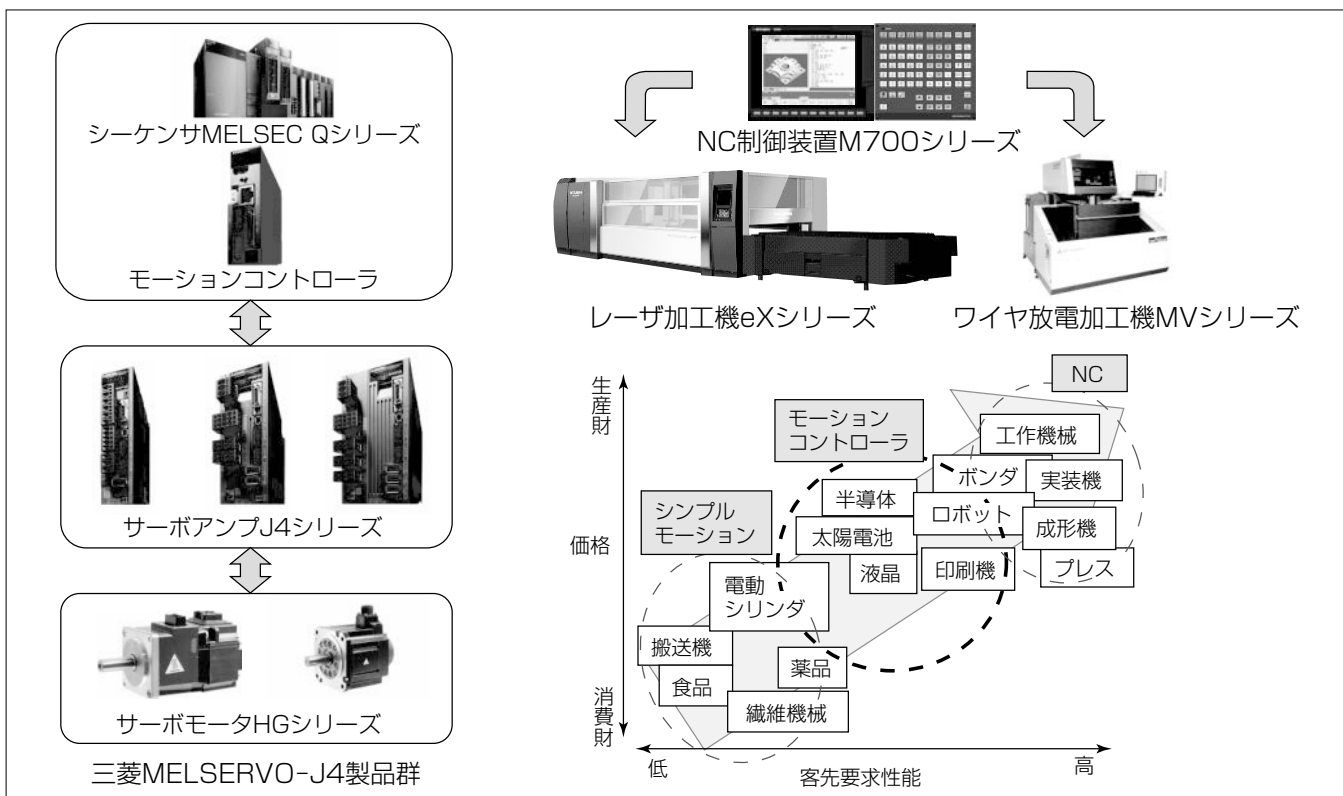
モーション制御は、あらゆる自動機器の動作をつかさどる制御であり、その速度性能や位置決め性能が自動システムとしての基本性能を決定する。このため、機械系・電気系ハードウェア技術の進歩と並行し、種々の制御理論を複合的に組み合わせてソフトウェアとして組み込むことによって、産業機器の生産性向上を支える最も重要な技術の一つとして発展してきた。これらの技術は、FA (Factory Automation) 機器・産業用途のみでも、工作機械、ロボット、半導体製造装置、射出成形機やデジタル家電検査装置等の中核技術として極めて広範囲にわたって利用されており、設備投資に占めるモーション制御機器の規模は、グローバル市場で今なお加速度的に増大を続けている。

モーション制御に関しては、最近のデジタル処理用ハードウェアの高速処理性能の進歩に伴い、著しい性能向上が図られている。また、ソフトウェアに関しても、ポスト現

代制御理論に基づく制御アルゴリズムを組み込んだ高速・高精度、かつ安定な制御が、汎用サーボコントローラにも搭載され、性能・信頼性の向上とともに、システム構築・立ち上げの容易化、調整レス化が図られている。さらに、ここ数年のトレンドとして、安全対応、省エネルギーといった要求が高まる中、より付加価値の高いインテリジェントな制御システムの構築が可能となりつつある。

工作機械の制御に関しては、NC (Numerical Control) コントローラの性能向上とともに、NC制御のもとに駆動され、足回りとなるサーボ駆動系との連携性能が極めて重要となっている。特に最近では、様々なモータと機械系の組合せに応じて、位置決め性能、高速性能、制振性能等を安定して確保できる適応型システムが実現されている。

本稿では、このようなFA機器・産業用加工機を支えるモーション制御技術の最新動向について述べる。



産業機器・工作機械を支えるモーション制御機器群

FA市場に対応した三菱電機のFA制御機器群とメカトロ加工機群（レーザ加工機、放電加工機）を示す。

1. ま え が き

当社では、工作機械や搬送機等のFA用途に用いるモータ駆動システム、及びNC制御コントローラ等とともに、当社独自の発振器や電源、センサを搭載した各種レーザ加工機、放電加工機、ロボット等のメカトロシステムを幅広く製品展開している。

本稿では、このようなFA機器・産業用加工機を支えるモーション制御技術の最新動向について述べる。

2. 汎用サーボ・モーション制御技術の開発動向

汎用サーボは、搬送機や食品包装機、半導体・液晶・太陽電池製造装置や印刷機、工作機械、成形・プレス機械、実装機等、多岐にわたる産業機械で使用されている。これらのシステムの大半は電動機(モータ)を動力源としているため、その生産性は、装置の動きをつかさどるサーボシステムの駆動性能によって左右される部分が多い。したがって、要求される高速性能、高精度性能等の要求に合わせて、最適なサーボ駆動機器を選定し、システムを構築することが重要となる。

汎用サーボシステムのモーション制御に関しては、性能・信頼性の向上とともに、システム構築・立ち上げの容易化、調整レス化、さらには、ここ数年のトレンドとして、安全対応、省エネルギー対応といった点についての要求が高まっている。

2.1 基本性能の向上

特にサーボアンプシステムにおける制御性能を左右するハードウェアの性能として、速度周波数応答性能が挙げられる。最新のサーボアンプシステムである当社“MR-J4シリーズ”(図1)では、デジタル処理ハードウェア技術及び高速ソフトウェア処理技術の向上によって、業界最速^(注1)の2.5kHzという周波数応答性能を実現し、整定時間を従来比約40%短縮している。

サーボシステムの性能はサーボアンプ以外にモータ、エンコーダの性能、さらには、上位コントローラとの通信速度性能にも左右される。最新の高性能モータ“HGシリーズ”では、400万パルス/回転以上の高分解能絶対値エンコーダが採用されており、コギングやリプルの低減と相まって、高速性能と高精度な位置決め性能を両立させている。

通信速度については、従来比3倍の双方向150Mbpsに

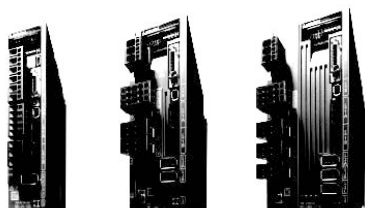


図1. 当社サーボアンプMR-J4シリーズ

高速化が図られ、システムの応答性が飛躍的に向上している。また、サーボアンプ間の完全同期通信を可能としたことによって、多軸同期が必要な印刷機、食品機械、加工機といった装置の高性能化を実現している。

(注1) 2011年11月現在、当社調べ

2.2 調整レス化による立ち上げ性の向上

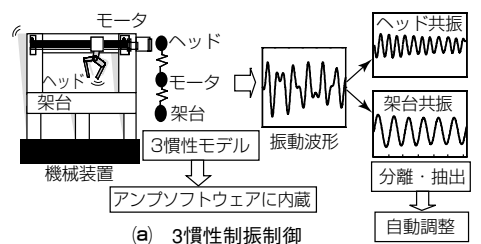
汎用サーボシステムは、対象となる産業機械が多岐にわたり、各装置の形態に対して、サーボ特性の調整が必要であるため、システム構築を容易にするための支援機能が重要である。最新のサーボアンプシステムでは、機械共振抑制フィルタ、制振制御フィルタ、ロバストフィルタを含めた、サーボゲインの高度な自動チューニング機能が搭載されている。

制振制御に関しては、図2に示すような3慣性系の低周波振動抑制アルゴリズムによって、低周波振動を2つまで同時に抑制することができ、複雑な連成振動を伴う低剛性の装置における調整の容易化を実現している。

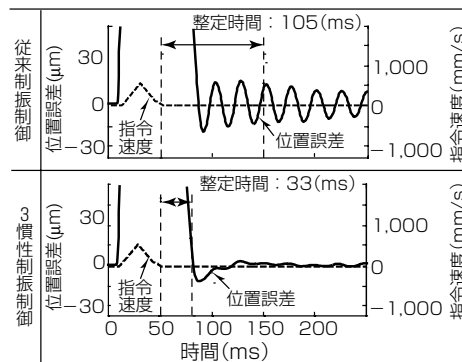
ロバストフィルタは、図3に示すような、大慣性のためにゲインの調整が難しいシステムで、調整範囲を広げロバスト性を向上させる機能であり、特に印刷機や包装機等の大慣性システムにおける同期精度を高めるのに極めて有効である。

2.3 柔軟性・保守性の向上

自動装置では、動作の途中で、位置制御からトルク制御に切替える必要がある場合がある。キャップの締め付け装置などの場合は、位置制御からトルク制御への切替をスムーズに行うことによって、柔軟性を持たせたシステムの構築を可能としている。速度やトルクの急変がないため、機械の負荷を低減するとともに、高度な作業や高品質な成形が可能となっている。



(a) 3慣性制振制御



(b) 整定時間の短縮効果

図2. アドバンスト制振制御Ⅱ(3慣性制振制御)

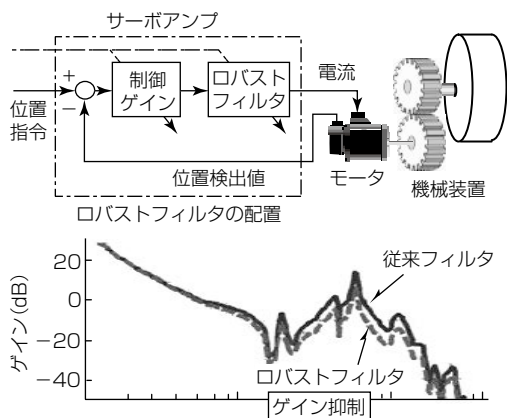


図3. ロバストフィルタ

作業者の負荷低減と、安定稼働の両立のためには、予防保全が可能な診断機能も重要である。当社MR-J4シリーズでは、装置の摩擦、負荷慣性モーメント、アンバランストルク、振動成分の変化を解析することによって、機械部品の異常を検出、機械診断・予防保全を行う機能を備えている。

2.4 省エネルギー性能の向上

資源エネルギー庁の統計によれば、国内の消費電力の約半分はモータで消費されており、汎用サーボシステムにおける省エネルギー性は昨今ますます重要となってきた。当社では、“エコ・サーボ”を標榜(ひょうぼう)するなか、複数軸サーボシステムで、ある軸の回生エネルギーを他の軸のモータ駆動エネルギーとして活用することで、装置の省エネルギー化を図る技術を実用化している。特に、最新の多軸一体サーボアンプでは、コンデンサ再充電による再利用可能エネルギーを増加させることによって、省エネルギー性能の向上を図っている。また、サーボアンプ内での速度や電流等のデータから、回生電力を計算・表示する機能も装備することで、“省エネルギーの見える化”を図っている。サーボシステムの省エネルギー化に関しては、サーボアンプのパワーモジュールの損失低減やモータの極/スロットの最適化による効率アップも寄与しているが、駆動システムとしての性能向上によって、タクトタイム、稼働時間を短縮することによる省エネルギー効果も大きい。

3. NCモーション制御技術の開発動向

工作機械の制御に関しては、汎用サーボシステムと比較すると、一般に、多軸同期システムにおける軌跡精度の確保という一段高い精度が要求される。特に高精度のミリング加工では、三次元での軌跡精度の確保はもとより、工具姿勢を変化させる5軸加工などでも工具先端の精度を維持する必要がある。このため、NCコントローラの性能とともに、NCの制御のもとに駆動されるサーボ駆動系の基本性能が極めて重要となる。特に、高速・高精度の工作機械では、位置決め性能、高速性能、制振性能等を安定して

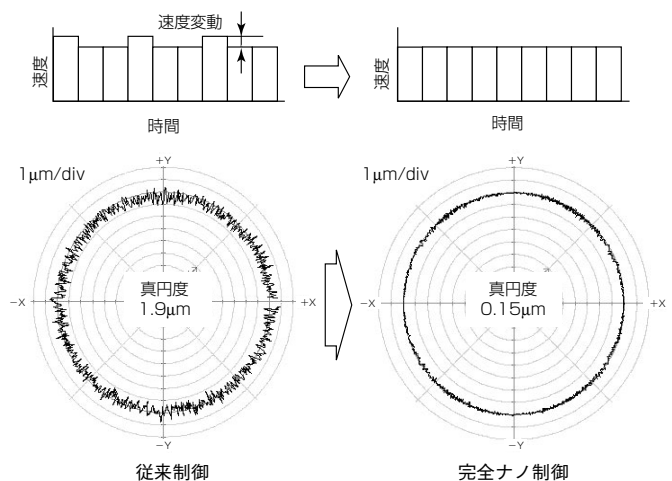


図4. 完全ナノ制御による高精度化

保証できるシステムである必要がある。

3.1 機械運動精度の向上

3.1.1 基本性能の向上

近年、非球面レンズや液晶ディスプレイの導光板金型等サブミクロンメートルからナノメートルの領域の精度が求められる加工が増えてきている。これらの加工では、形状精度で数十ナノメートルオーダー、表面粗さでナノメートルオーダーといった、従来の一般的な加工よりも1~2けた高い精度が要求される。このような加工に対応するためには、工作機械のハードウェア技術や加工技術とともに、高い精度で工作機械を制御する数値制御装置(NC)の制御技術が必要不可欠となる。

ナノメートルオーダーの制御を可能にするためのNCには、まず、基本制御技術として、NCシステム全体をすべて十分に高い精度(例えば、1 nm以下)で、かつ高速に制御できることが求められる。さらに、各種外乱や機械系のダイナミクスに伴う運動精度低下要因の影響を低減または補償するための応用制御技術もあわせて必要となる。当社では、これらの要求に応えるため、NCシステム全体をすべてナノ単位で制御する完全ナノ制御NCを実用化し、その後も性能向上のための応用制御技術開発を進めてきている。

図4は完全ナノ制御NCシステムの精度改善を示したものである。完全ナノ制御では、プログラム値からサーボ指令まですべてナノ単位で演算が行われるため、速度指令変動が減少し、加速・減速の繰り返しによって生じる機械誤差を大幅に低減することができる。

3.1.2 機械誤差補正による運動精度の向上

従来の工作機械におけるサーボは、モータの駆動が指令に一致するよう制御がされていたが、近年ではモータの駆動による理論的な軌跡と実際の機械の軌跡の間のわずかな差が問題視されるようになってきた。このため、加工の高速・高精度化に向けて、従来のモータだけではなく加工に直結する機械の運動に着目した制御技術が必要となる。

最新のNC制御では、機械系の弾性変形や摩擦力に応じたフィードフォワードでの機械特性補償や可変バックラッシュ補正等によって、機械の動特性に起因する加工誤差の低減を図っている(OMR制御:Optimum Machine Response制御)(図5)。また、主軸とサーボの同期制御では、誤差の高速補正機能を搭載することによって主軸と移動軸の高速同期が可能となり、タップ加工などにおける高速・高精度化を実現している。

機械振動の抑制については、機械振動を誘発せずに機械の最適な応答を引き出すフィードフォワード制御を採用するとともに、機械共振の変化に対しても、共振周波数を推定し、ノッチフィルタパラメータを自動的に再設定する適応型ノッチフィルタを搭載している。これらの機能によって、機械共振の変化に対しても自動追従ができるため、経年変化などによる共振の再発の防止を図っている。

3.2 加工面品質の向上

近年、航空機部品及び一体化部品等の複雑形状部品の増加や、加工リードタイム短縮要求の高まりを背景として5軸加工機や複合加工機の需要が拡大している。さらに金型や精密部品といった高い加工品位の必要な加工への5軸加工の適用も広がってきている。

金型の自由曲面など三次元形状の滑らかな加工面を高品位に加工する場合、加工面の滑らかさ(面精度)が特に重視される。一般に、加工プログラムを作成するCAM(Computer Aided Manufacturing)では、工作物に対する工具の曲線的な動きを、微小線分で近似しているが、微小線分データには誤差が多少なりとも含まれる。NCでは、軌跡精度を保つために、形状に応じて送り速度を決定する処理を行っているが、指令形状に誤差が含まれると、適切な送り速度を正確に求めることが難しくなる。

そこで、近年はこのような問題に対応するため、同時5軸加工でも、微小な段差や逆行等の誤差の影響を抑制し、最適な送り速度を決定する制御方式(SSS制御:Super Smooth Surface制御)を採用している。

SSS制御では大域的な形状認識と回転軸の移動指令の平

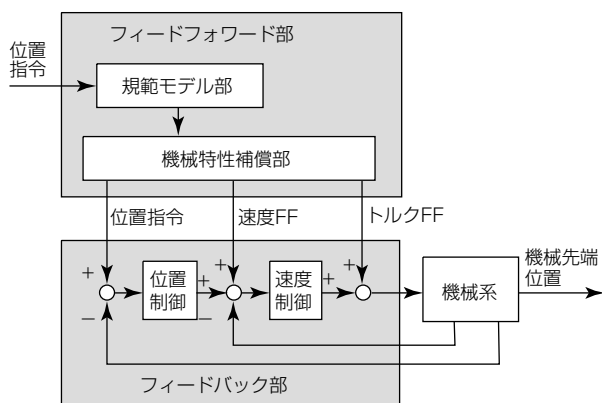


図5. 機械モデルに基づく推測制御(OMR制御)

滑化によって、加工物に対する工具先端点の送り速度や工具姿勢の角速度を滑らかに制御することで、高品位な加工面を得ることができる。また不要な減速をなくすように制御することで従来比5~30%時間短縮(同一精度で比較)の効果が得られている。

3.3 省エネルギー性能の向上

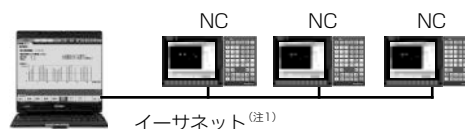
工作機械でも、消費電力の削減要求が高まる中、電力の見える化機能の開発を進めている。図6はこれらの消費電力モニタの画面を示したものであり、NC上はもちろん、ネットワーク接続したパソコンモニタ上で複数の工作機械の消費電力の監視が可能となっている。

NC駆動部の消費電力は、サーボアンプの情報から自動的に収集されるため、外付けの高価な測定器を使用しなくても、回生状態を含めて簡単に消費電力の計測・表示が可能となっている。また、ラダーで測定値をNCに渡すことで、NC駆動部以外の測定結果も合わせて表示することができ、データの積算も可能となっている。

当社はこうした省エネルギーの取り組みを、サーボも含めて“e&eco-F@ctory”と呼んでおり、今後も工場トータルの省エネルギー化につなげる統一的なソリューションとしての開発を進めていく予定である。

4. メカトロ加工機のモーション制御の開発動向

当社は顧客である国内外の多くの工作機械メーカーにNC、サーボシステムを供給すると同時に、これらの技術に当社の保有するレーザ、放電技術を加えることで、付加価値の高いレーザ加工機、放電加工機事業を30年以上にわたって成長させてきた。特に、昨今は、高速化・高精度化に関する要求が高まっており、加工性能に占めるモーション制御の重要度は極めて高いものとなっている。



(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

図6. 消費電力モニタ

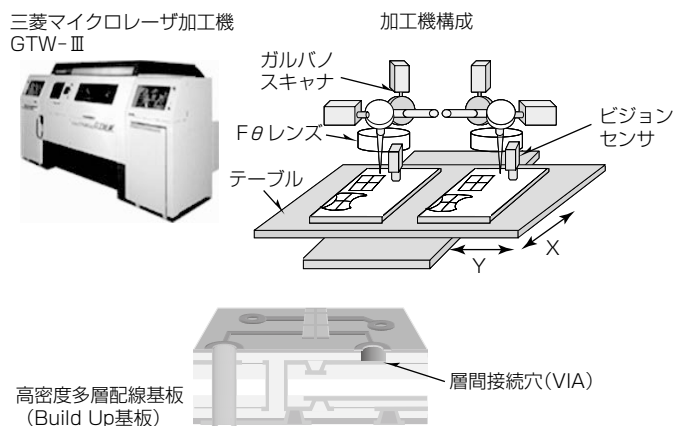


図7. プリント基板穴あけ加工用マイクロレーザ加工機

4.1 高速加工性能の向上

板金加工用レーザ加工機については、工作機械の中では最速レベルの毎分60m以上の高速駆動を実現しており、NC制御装置についても高速の軌跡補間を行うために高い処理能力が必要である。また、高速駆動に伴う機械の動特性に応じた、機械誤差補正のための最新のモーション制御技術が採用されている。

基板穴あけ用レーザ加工機(図7)では、毎秒最大4,500穴の微細穴加工が可能となっている。極めて高速の位置決めが必要となるため、ガルバノスキャナと呼ばれる専用の高速アクチュエータを使用している。NC制御装置によるテーブルのステップ送り動作とは別に、このガルバノスキャナによるビームの高速位置決め動作を専用高速駆動コントローラによって行っている。

こうしたレーザ加工装置については、機械駆動系のモーションコントロールに同期させて、発振器の高速動作が不可欠であるため、高速加工性能を高めるためには、モーション制御系と発振器制御系の両方を高速に制御することが必要となる。当社はNC制御装置、サーボ駆動システム、レーザ発振器のすべてを自社開発、内製化することで、こうしたコンポーネントそれぞれの性能を最大限に引き出すシステムを構築している。

4.2 高精度加工性能の向上

放電加工機のような高精度金型用加工機では、ファインブランキング金型などに代表される精密金型など、1 μ m以下の形状加工精度の要求が高まっている。こうした高精度を実現するため、NC制御装置とサーボ駆動系を光高速通信によって接続することで、通信速度従来比4倍の高応答サーボシステムを構成している。これによって、ナノレベルの高精度モーション制御を行うことで、従来では超高精度加工機の領域であった真円度0.8 μ m以下の実加工精度が可能となっている。

放電加工では、機械系の位置ループの外側に、加工状態検出フィードバックによる加工制御ループを設け、加工状

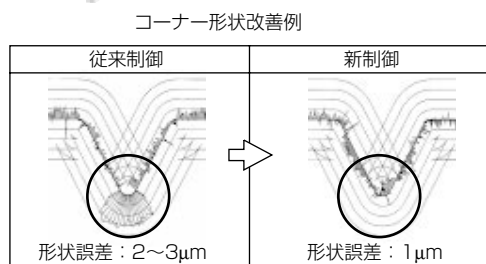
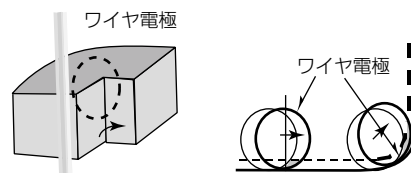


図8. ワイヤ放電加工機における高精度コーナー制御

態に応じた最適送り制御を行うことが一般的に行われている。最近では、三次元の加工形状データに基づき、事前に加工予測を行うことで、モーション制御と加工電源の協調制御によって、1クラス上の形状加工精度を実現している。三次元の加工形状データに基づいて加工板厚の変化をNC制御装置上で事前に計算しておくことで、加工板厚に応じた加工電気条件の設定や、サーボパラメータの最適化を自動的にを行い、加工形状精度の向上を図っている。

高精度の抜き型加工では低クリアランスでの高い嵌合(かんごう)精度が必要なため、コーナー部での精度1 μ m以下が要求されるようになってきているが、ワイヤ放電加工では、コーナー部での加工で加工体積が急激に変化するため、形状誤差が発生しやすい。このため、最新のワイヤ放電加工機では、コーナー部における加工体積変化をリアルタイムで正確に計算し、直線部とコーナー部の単位時間あたりの加工体積が等しくなるよう加工速度を制御するコーナー制御方式を搭載し、コーナー部における形状誤差を従来の約1/3に低減している(図8)。こうした高精度の加工制御が可能となった背景には、NC制御装置やサーボ駆動システムの性能向上が大きく寄与している。

5. む す び

汎用サーボシステム、NCシステム、レーザ・放電加工機等の高速・高精度加工システムの性能を左右するモーション制御について、最近の技術動向を述べた。今後も当社では、顧客の機械システムの更なる高能率化・高速化・高精度化の要求に応えるため、制御機器の性能向上とともに、使いやすさの向上を実現していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 佐藤智典, ほか: 超精密加工制御とそのソフトウェア技術, 機械の研究, 60, No.1, 73~80 (2008)
- (2) 真柄卓司: 三菱FAメカトロニクス技術開発の方向性, 三菱電機技報, 84, No.2, 139~142 (2010)