

小型・高速・高精度位置決め技術を有する 高性能サーボモータ，アンプ

High Performance Servo Motor and Amplifier with Compact, High-Speed and High-Accuracy Positioning Systems

麻生 宜農
Noritaka Aso

辻本 隆宏
Takahiro Tsujimoto

園田 大輔
Daisuke Sonoda

下田 和弘
Kazuhiro Shimoda

要 旨

半導体製造装置，電子部品実装装置，加工／組み立てロボットなどに代表される産業機器の分野では，IoT化に向けた工場のスマート化や人件費高騰および省人化を背景とした自動化が拡大している。当社では，これらの市場環境に対応するため，産業機器のモーションコントロールの基幹デバイスであるサーボモータとサーボアンプの技術開発に取り組んだ。成果として，サーボモータでは，放熱性向上により最大でモータ長を従来比15%低減，ロータ構造の変更により堅牢（けんろう）性も向上させた。サーボモータに搭載のエンコーダでは，従来比8倍の高分解能化を実現した。さらにサーボアンプでは，サーボ制御処理の並列化により業界最高レベルの速度応答周波数3.2 kHzの実現に加え，外乱抑制制御技術，高速ネットワーク技術，工場のIoT化に向けた無線接続システムを開発した。

Abstract

In the field of industrial equipment represented by semiconductor manufacturing equipment, electronic parts packaging equipment, processing / assembling robot, etc., automation has been expanding against the backdrop of smart factories for the conversion to IoT, increase in labor cost, and labor-saving automation. In response to these market environments, we have been working on developing technologies for servo motors and servo amplifiers, which are key devices for motion control of industrial equipment. As a result, in the proposed servo motor, the maximum motor length is reduced by 15% compared to that of the conventional motor by improving the heat dissipation property. Further, robustness is also improved by changing the rotor structure. In the encoder mounted on the servo motor, the resolution is increased by a factor of eight. We developed the servo amplifier with the industry's highest level of response frequency of 3.2 kHz by parallelizing the servo control process, and by using disturbance suppression control technology, high-speed networking technology, and wireless connection systems for the IoT in a factory.

1. はじめに

サーボモータおよびサーボアンプは，半導体製造装置，電子部品実装装置，加工／組み立てロボットなどに代表される産業機器に搭載され，高速応答や高精度位置決めといった基本性能の向上のみならず，機器の省スペース化への対応，複数のモータによる同期制御の実現，さらに工場のスマート化に向けての対応が求められている。

当社では多岐にわたる市場ニーズに対応するため，下記の開発コンセプトを掲げモータ制御の技術開発に取り組んできた。

- 機器の省スペース化 → モータ構造の小型化
- 機器の温度，振動，衝撃への耐性向上
→ モータの堅牢（けんろう）性向上
- 高精度位置決め → 位置分解能の向上
- 高速応答 → 速度応答周波数の向上
- 同期制御 → 通信周期の短縮
- 工場のスマート化 → 無線接続によるIoT化対応

具体的な技術開発は，サーボモータ，エンコーダ（回転位置検出器），サーボアンプのそれぞれで取り組み，個々において性能向上を達成し，サーボシステムとして

の高い性能を実現することができた。本稿ではその技術成果について報告する。

2. サーボモータの技術開発

サーボモータにおいては，特に小型化，および堅牢性向上を実現するために，以下の技術的アプローチで開発を行った。

- 小型化：高熱伝導構造によるステータ積厚低減
 - 堅牢性向上：モータのIPM構造化
- 次節でこれらの取り組み内容について述べる。

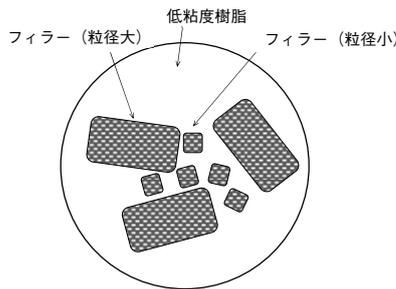
2.1 サーボモータの小型化

サーボモータの軸方向の寸法構成は，50%以上をステータが占めている。小型化実現のためには，このステータの積厚を低減する必要があるが，同時に磁束量が減少してしまう。磁束量の減少を改善するには，巻線をより細くし，より多く巻き込む必要があるため，内部温度上昇の原因となる銅損が大きくなる。内部温度が上昇し過ぎるとモータ絶縁性能が劣化するため，発熱を外部に放熱する必要がある。当業界では，BMC（Bulk Molding

Compound)を用いた工法でステータをモールドすることで放熱する構造が多く採用されていたが、多品種少量生産であるサーボモータの場合、BMC成型用の金型費用および機種切り替えによる生産効率低下に対する課題があった。また、金型が不要の樹脂注型を用いた工法では、注型時に真空状態で成型する必要があるため、生産に要するタクトが長くなる問題があった。

この課題を解決するために、ステータ内部の巻線とステータフレームの間に、フィラーの粒子径制御（小さな粒子が大きな粒子の隙間に入ることで、粒子間摩擦を低減し、流動性を向上させる）と低粘度樹脂を組み合わせた高流動性放熱材を採用し（第1図）、ステータと樹脂のプレ加熱およびステータ下部からの注型工法を組み合わせることにより、真空レスで樹脂を充填する工法を実現し、インラインで生産性の高い放熱構造を実現した。

本技術開発により、銅損を低減し、巻線の温度上昇を約15℃抑制することが可能となった。これにより、ステータ積厚を最大20%、モータ長を最大15%短縮し、業界最高レベルの小型化を実現した。



第1図 フィラーの粒径制御と低粘度樹脂を組み合わせた高流動性放熱材
Fig. 1 High-flow heat-dissipating material using filler particle size control and low viscosity resin

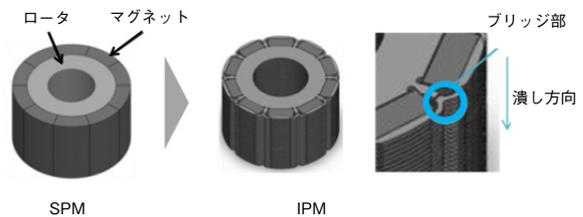
2.2 サーボモータの堅牢性向上

前章で述べたように、産業用ロボットにおいては、モータの堅牢性向上が求められる。従来のロータ構造は、磁石をロータの表面に接着するSPM（Surface Permanent Magnet）構造であり、磁石が剥離し飛散するなど、堅牢性に課題があった。この課題を解決するために、磁石をロータの内部に埋め込むIPM（Interior Permanent Magnet）構造を検討した。

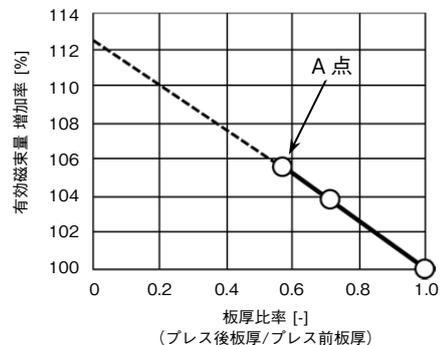
IPM構造は磁石が電磁鋼板を積層した鉄心に埋め込まれた構造となっているため、鉄心の外周に配置されたSPM構造に比べ、堅牢性が高い。しかし、磁石外周部に配置された鉄心外周を保持するブリッジと呼ばれる連結部に漏れ磁束が発生するため、有効磁束量が少なく、特にロータ径が小さい機種ほど漏れ磁束が増加するため、

業界としてIPM構造の全機種展開に至ってはいなかった。漏れ磁束はブリッジ部の断面積に比例するが、プレス機特性上、ブリッジ部の幅は、電磁鋼板の板厚より小さく打ち抜くことは難しく、限界がある。そこで、ブリッジ部を厚み方向に潰すことで、断面積を小さくするブリッジプレス方式を考案した（第2図）。潰された分の電磁鋼板は、金型構造上、ロータの外周側にはみ出す。ブリッジプレス後に外周側形状を打ち抜くことにより、ブリッジ部以外の断面積を大きくすることなく、ブリッジ部のみの厚さを薄くすることができた。

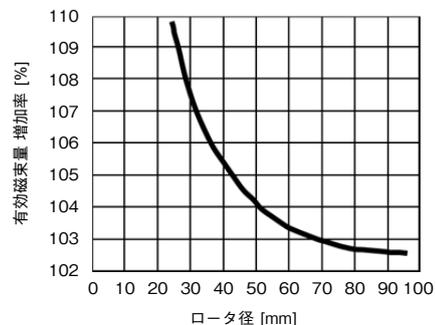
ブリッジ部の厚みを小さくした際の特性の変化とロータ径による有効磁束量の変化を第3図に示す。第3図(a)は、電磁鋼板のプレス後板厚/プレス前板厚の比率と、



第2図 SPM構造とブリッジプレスIPM構造
Fig. 2 SPM structure and bridge press IPM structure



(a) 電磁鋼板板厚比率と有効磁束量増加率



(b) ロータ径と有効磁束量増加率 (a) 図 A 点の板厚比率時

第3図 電磁鋼板板厚比率、ロータ径と磁石有効磁束量の関係
Fig. 3 Relationship between thickness ratio, rotor diameter, and effective magnetic flux of an electromagnetic steel plate

有効磁束増加率の関係を表す。板厚比率が小さくなる（潰し量が大きくなる）ほど有効磁束量が増加しており、特性が向上することがわかる。また、第3図（b）は第3図（a）のA点の板厚比率時のロータ径と有効磁束量増加率を示す。ロータ径が小さくなるほど、有効磁束量の増加率が高いことがわかる。これは、ロータ径が小さくなるほど、ブリッジ部に漏れる磁束量の比率が相対的に大きくなるため、ブリッジプレスによる漏れ磁束の低減効果が大きいことを示す。本技術開発により、ロータ外径20.1mmを最小とする今回開発した全機種ロータにてIPM構造を採用することが可能となり、モータの堅牢性向上を実現した。

3. エンコーダの技術開発

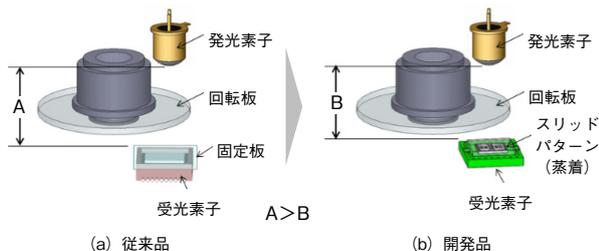
エンコーダでは、信号内挿精度改善による位置検出分解能の向上と、受光部の構成改善による薄型化に取り組んだ。

以下その詳細を説明する。

3.1 エンコーダ分解能の向上

エンコーダは第4図のように、発光素子が照射した光が回転板と固定板に蒸着されたスリットパターンを透過して受光素子に入射する構成である。モータ軸に連結された回転板が回転すると回転角度に応じて入射光の変動を受光素子で検知し、検知信号を二値化や信号内挿処理することで、回転位置情報を生成する。一般に信号内挿処理では、受光素子から出力される原信号は理想的な正弦波が望ましく、歪（ひず）みを含んだ信号では信号内挿時の精度が悪化する。

従来[1]は、第4図（a）のように受光素子に固定板を取り付けており、固定板のスリット蒸着面と受光素子の間で、発光素子からの入射光の一部が乱反射することで正弦波の高調波成分が増加し、歪み率の改善が課題であった。



第4図 エンコーダの基本構成

Fig. 4 Basic configuration of rotary encoder

本開発では、第4図（b）のように固定板を廃止し、直接受光素子上に高精度にスリットパターンを蒸着する構成とした。結果、蒸着面と受光素子間の隙間がなくなり、光の乱反射が抑制され、正弦波の歪み率を約30%低減できた。改善された正弦波信号と独自の内挿信号処理回路により、エンコーダ分解能は8倍（20 bitから23 bitへ）向上した。

3.2 エンコーダの薄型化

本開発では、第4図（b）のように固定板を廃止した構成としたため、発光素子と受光素子間の距離が短縮される。また、エンコーダの全長は、発光素子と受光素子の距離に左右され、受光素子上に配置されたパターンの総面積によって、発光素子からの受光素子上の照射スポット径が決まってしまうため、発光素子と受光素子の距離を一定量確保する必要があった。

従来は、受光素子上に、発光素子の光量補正用に専用のパターンを設けていた。本開発では、パターンを共有化することで、受光素子上のパターン総面積を減らし、受光素子上の照射スポット径を小さくすることができたため、発光素子と受光素子の距離を短くすることができた。受光素子部の構成変更により従来比25%減の薄型化を実現した。

4. サーボアンプの技術開発

サーボアンプでは、高精度・高速位置決め、高機能化を実現するため、下記に取り組んだ。

- 速度応答周波数の向上
- 外乱抑圧性能の向上
- ネットワーク通信周期の高速化
- サーボアンプのIoT化

以下その詳細を説明する。

4.1 速度応答周波数の向上

速度応答周波数とは、与えられた速度指令に対するモータ速度の応答性を示すものであり、サーボアンプの制御性能の高さを示す指標となる。装置の生産性向上のためには、この速度応答周波数をどこまで高められるかが重要となる。

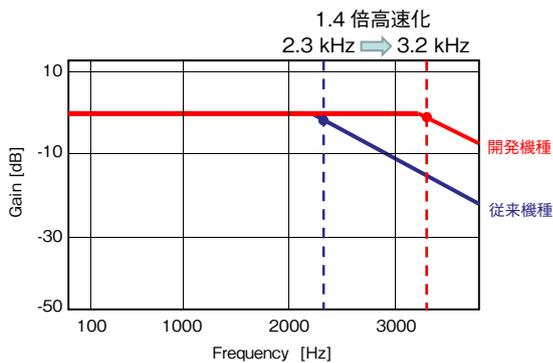
本開発では、速度応答周波数向上を実現するために下記の技術的な取り組みを行った。

- サーボ制御処理の並列化による制御周期の短縮と制御タイミングの最適化
- IPM構造に最適な電流制御アルゴリズム開発による電流応答の向上

速度応答周波数の向上を実現するうえで最も効果的な方法はサーボ制御周期を短縮することである。しかし、近年、マイコンのクロック周波数向上は頭打ちであり、単純に最新のマイコンを採用するだけではサーボ制御周期の短縮化は困難である。本開発では、従来、逐次処理で行っていたサーボ制御を並列処理可能なアルゴリズムに再構築し、新たに採用したマルチコアCPUに実装を行った。また、制御タイミングの最適化により制御遅れ時間の短縮を図った。上述の取り組みにより制御遅れ時間を従来比で約25%短縮し、位置・速度フィードバック制御系の応答性を向上させた。

また、今回採用したIPM構造のモータに最適な電流制御アルゴリズムの新規開発を行うことで電流制御系の応答性を大幅に向上させた。

以上の取り組みによって、速度応答周波数3.2 kHzとなり、従来比約1.4倍の高速化を実現した（第5図）。



第5図 速度応答周波数比較
Fig. 5 Comparison of velocity frequency response

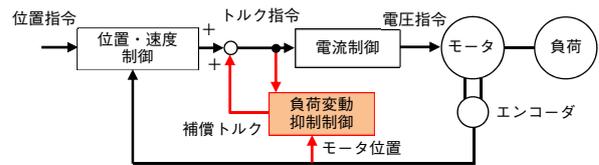
4.2 外乱抑圧性能の向上

負荷の駆動には装置のイナーシャに応じたトルクを要するため、フィードフォワード制御におけるトルク指令の計算やフィードバック制御のゲインは負荷イナーシャに応じて適切に選択する必要がある。これらが適切でないと振動が発生したり指令に対する追従性が低下したりする。

例えば、多関節ロボットの場、荷物を把持／解放、姿勢を変化させるといった動作がある。これらの動きはサーボモータから見ると負荷イナーシャの変動となり、この影響でサーボモータの動作が変化してしまうという問題があった。負荷イナーシャの変動に伴う動作の変化を抑えるには負荷イナーシャの値を常に制御に反映する必要がある。しかし、サーボアンプからは現在ロボットがどんなモノを掴（つか）んでいるか、どんな姿勢になっているかを知ることは難しく、リアルタイムの負荷イ

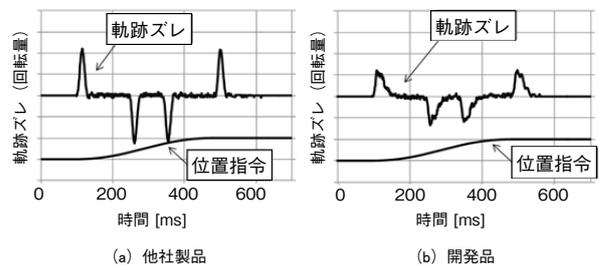
ナーシャ把握は困難であった。この課題を解決すべく、負荷イナーシャの変動量を外乱として推定し、抑制するアルゴリズムの開発に取り組んだ。

開発した制御技術を負荷変動抑制制御技術と呼ぶこととし、概要を第6図に示す。第6図における負荷変動抑制制御ブロックが負荷イナーシャの変動量を外乱トルクとして推定し、外乱トルクをキャンセルするための補償トルクを算出する。



第6図 負荷変動抑制制御ブロック図
Fig. 6 Block diagram of adaptive load control

本技術の効果を確認するため、開発した技術を搭載した異なる負荷を位置制御した場合に、それぞれの動作軌跡のズレ量を他社製品に対してどの程度低減できるか検証した。具体的には、想定どおりのイナーシャをもつ負荷と想定30倍のイナーシャをもつ負荷をそれぞれ駆動した際のモータ位置の軌跡を測定し、両者の位置軌跡のズレ量を確認した。結果を第7図に示す。開発機種では、他社製サーボアンプに対し、位置軌跡ズレの最大値を40%低減できており、他社優位性を確認することができた。また、本技術は摩擦などが変動する際の影響も最小化できるため、多関節ロボット以外の装置への適用も期待できる。



第7図 外乱抑圧性能の比較
Fig. 7 Comparison of disturbance suppression performance

4.3 ネットワーク通信周期の高速化

近年、装置の高性能化、省配線化の観点からネットワーク対応のサーボアンプが求められており、当社では独自開発したオープンネットワークであるReal Time Express[2]（以下、RTEX）に対応したサーボアンプをラ

インナップしている。

RTEXはサーボ制御に最適化されており、プロトコルが非常にシンプルで、一般的なネットワークよりも容易に対応機器を開発することができる。また、独自の誤り訂正技術により高い耐ノイズ性を実現している。

本開発では、サーボアンプが対応可能なネットワーク通信周期の高速化に取り組んだ。ネットワーク通信周期を高速化することで、上位コントローラからサーボアンプに入力する指令の更新も早くなり、より滑らかな指令の入力が可能となるなど、より高度な同期制御が可能となる。また、サーボアンプから上位コントローラへ返す情報の遅れ時間も短くなり、リアルタイム性も向上する。開発機種では、サーボアンプ内部のRTEXネットワーク処理をマルチコアCPUに最適化することで業界最高レベルのネットワーク通信周期62.5 μ s（当社比25%短縮）を実現した。

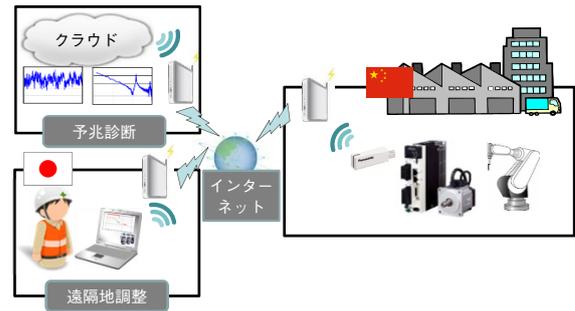
4.4 サーボアンプのIoT化

近年、注目されているインダストリー4.0やIoT化の流れに対応するため、サーボアンプによる無線接続システムの開発に取り組んだ。

具体的には、サーボアンプに接続することで、ワイヤレス接続を可能にする無線ドングルを開発し（第8図）、従来の有線接続では難しかった装置の調整やデータ収集を容易にした。将来的には、インターネット接続による遠隔地からの調整やサポート、装置機械の異常状態の診断や経年劣化の予兆診断サービスへの展開を目指す（第9図）。



第8図 サーボアンプの無線化
Fig. 8 Wireless system of servo amplifiers



第9図 サーボアンプのIoT化の今後の取り組み
Fig. 9 Next step for IoT system of servo amplifiers

5. まとめ

今回のサーボモータ、エンコーダ、サーボアンプの技術開発を通じて、速度応答周波数3.2 kHzをはじめとするサーボ制御の基本性能を飛躍的に高めることができた。

さらに、高熱伝導樹脂注型に基づく高放熱構造の開発によるサーボモータの小型化、堅牢化を実現した。また、通信周期を25%短縮したネットワークアンプの開発による高度な同期制御、および無線ドングルを用いた無線接続機能の開発によりサーボアンプのワイヤレス調整・データ収集システムを構築した。これにより、IoT化に対応したコンパクトでスマートな工場の実現への貢献が期待できる。

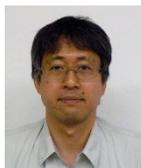
参考文献

- [1] 吉良嘉洋 他, “ACサーボシステムの技術開発,” パナソニック技報, vol. 55, no.3, pp. 10-15, 2009.
- [2] パナソニック (株), “サーボ用高速ネットワーク Realtime Express (RTEX),” <https://www3.panasonic.biz/ac/j/motor/fa-motor/ac-servo/rtex/index.jsp>, 参照 Oct. 25, 2017.

執筆者紹介



麻生 宜農 Noritaka Aso
オートモーティブ&インダストリアルシステム
ズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



辻本 隆宏 Takahiro Tsujimoto
オートモーティブ&インダストリアルシステム
ズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



園田 大輔 Daisuke Sonoda
オートモーティブ&インダストリアルシステム
ズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



下田 和弘 Kazuhiro Shimoda
オートモーティブ&インダストリアルシステム
ズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company