

ACサーボシステムの技術開発

Technological Developments of AC Servo System

吉 良 嘉 洋
Yoshihiro Kira

西 園 勝
Masaru Nishizono

岡 井 洋 樹
Hiroki Okai

田 澤 徹
Toru Tazawa

要 旨

サーボシステムは、モーションコントロールの基幹デバイスとして、主に産業機器や生産設備に搭載されている。近年の産業分野のグローバルな発展に伴い、その需要は拡大傾向にあり、多様性も増している。当社では、これらのニーズに対応するため、サーボ製品の技術開発に取り組んできた。その成果として、開発機種では業界最高レベルとなる速度応答周波数2 kHzを実現した。さらに、リアルタイムオートチューニングや振動抑制フィルタといった制御技術の改善によりサーボ性能の向上を図ることができた。また、サーボモータにおいては、磁気回路を一新し小型化と低コギング化を実現するとともに高分解能エンコーダを新たに開発し搭載した。

Abstract

Servo systems are installed in industrial equipment and production facilities as key devices for motion control. Recently, as industrial fields have expanded globally, demand has also expanded and diversity has increased too. To meet these needs, we have worked on the development of a new servo technology. As the result, a speed response frequency of 2 kHz was achieved in a new product. In addition, the improvement of the servo performance was enabled by control technologies such as real-time auto tuning and vibration-suppression filter. In the servo motor, miniaturization and low cogging torque were achieved and new high resolution encoder was installed.

1. はじめに

サーボシステムの主な搭載用途である、半導体製造装置、電子部品実装、ロボット関連機器などの分野では、高速応答性や高精度、使い勝手の向上が求められるとともに、環境に配慮し省エネ化や小型化のニーズが高まっている。また、油圧機の電動化をはじめ食品加工業界や繊維機械など一般機器のサーボ化が進んできている。

当社では、産業機器の革新に貢献すべく、多岐にわたる市場ニーズに対応する技術テーマを以下のとおり設定し、サーボシステムの技術開発に取り組んできた。

(市場ニーズ)	(技術テーマ)
・高スループット	高速高応答
・微細化への対応	低振動、分解能向上
・高面積生産性、 環境への配慮	小型化、損失低減
・調整工数削減、 簡単化	オートチューニング 技術の向上

具体的な技術開発は、サーボモータ、ロータリーエンコーダ(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た。また、それらを結集することで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

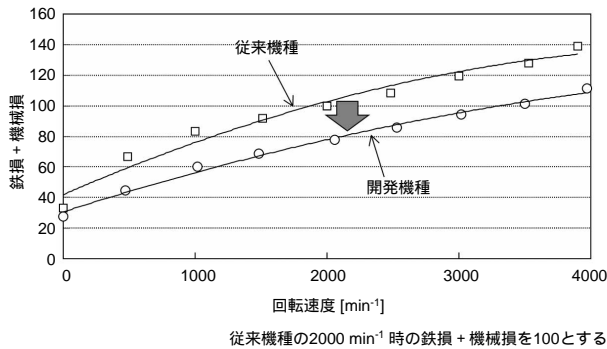
サーボモータにおいては、前述の開発コンセプトの内、特に小型化、損失低減と低振動を実現するために、以下の技術的アプローチで開発を行なった。

- ・ステータの積層工法改良による損失の低減
 - ・高エネルギー積マグネットの採用によるモータの薄型化
 - ・科学的手法を用いたモータ設計手法による低コギング化とトルク飽和率の改善
- 次項で、これらの取り組み内容について述べる。

2.1 モータ損失の低減

モータは、ステータ部に積層電磁鋼板を使用することで、運転時に発生する鉄損を低減することが一般的に行われている。当社では、ステータ部に独自の分割コア方式を採用するとともに、その積層固着にレーザーPAC(Press Auto-clamp)方式を採用してきた。しかし、同方式ではレーザー溶接部で電磁鋼板が電氣的に連結されているため渦電流損が発生し、鉄損増加の一因となっていた。

この課題を解決するために、特に中容量(1 kW以上)の機種において、電磁鋼板の積層固着をなくし、巻線とモータ外郭フレームのみで固定子全体を保持する新工法を開発した。これにより、鉄損を20%程度低減することができた(第1図)。

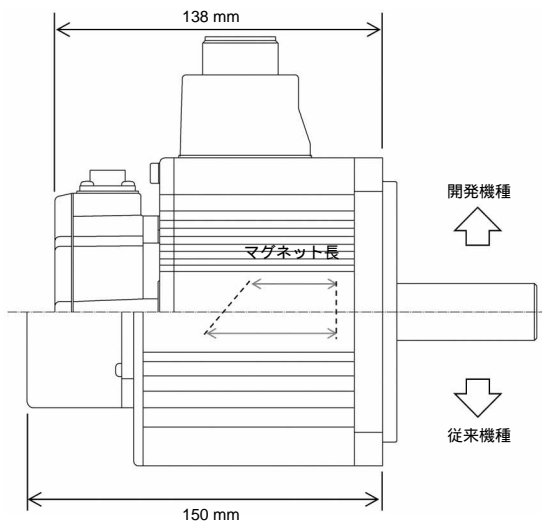


第1図 積層工法による損失比較 (出力1 kW)
Fig. 1 Comparison of iron loss + mechanical loss (output 1 kW)

特に、モータの小型化設計に際しては、発熱密度の上昇や放熱面積の減少によるモータ内部の温度上昇が課題となるが、開発機種では新工法の採用により鉄損を低減することでこの課題を解決した。その結果、現行機種に対してモータの薄型化を実現しながら温度上昇は同等以下に抑えることができた。

2.2 モータの薄型化

開発機種では、新たに高エネルギー積マグネットを採用することでモータの薄型化を実現した。同マグネットは最大エネルギー積 (BH)_{max} が従来採用品に対して約26%向上している。マグネットの性能向上に合わせて、ステータ形状などの磁気回路を最適化することにより、出力はそのままに、ステータ部、マグネット部の長さを低減することができた。第2図に、従来機種との全長比較を示す。



第2図 従来機種との全長比較 (出力1 kW)
Fig. 2 Comparison of motor size (output 1 kW)

2.3 低コギング化とトルク飽和率の改善

前項で述べたように、高性能マグネットの採用によりモータの薄型化が可能となった。しかしながら、マグネットの変更だけでは十分なモータ性能を得ることはできない。具体的には、以下の課題があった。

- ・磁束密度が高くなり磁気飽和の影響で最大トルク時のトルクリニアリティを維持ができない
- ・ギャップ磁束密度の増加と磁気バランスの変化により、コギングトルクが悪化傾向にある
- ・部品寸法公差や組立精度の変動を一定量許容する設計が必要である

これらを解決し目標とするモータ性能を満足する設計を行うには、モータの各部形状寸法が、性能および性能安定性にどの程度影響するのかを定量的に把握する必要があった。そこで、今回の開発では、タグチメソッドをベースとした独自の科学的設計手法を導入した。また、組合せ実験は有限要素法による¹⁾ 磁界解析シミュレーションを用いた。

同手法により、開発機種では、ステータ磁路部の寸法、形状比率の最適点を求めることで磁気飽和を改善した。また、ロータのマグネット形状とステータ内径部の形状を改善し、コギングトルクの低減と漏磁束の緩和を実現した。さらに、ロータ、ステータの仕上がり精度の不均一に対する特性変動も許容内に収めることができた。

この結果、従来機種に対して同一出力で積厚30%削減を実現しながら、コギングトルクを1/3に低減、トルク飽和率95%を達成した。

第1表 モータ特性比較
Table 1 Comparison of motor specifications

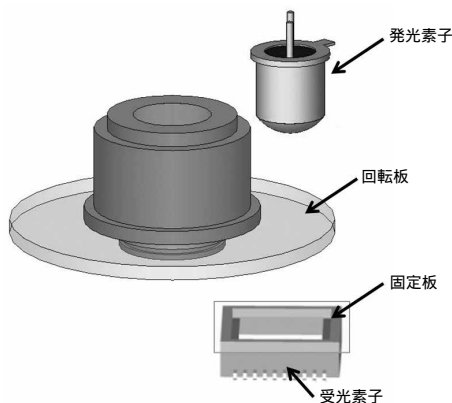
	開発機種	従来機種
モータ出力 [kW]	1.0	
モータ寸法 [mm]	フランジサイズ	
	全長	138 / 150
質量 [kg]	5.2	6.8
コギングトルク [%]	0.5	1.5
トルク飽和率 [%]	95	90

3. エンコーダの技術開発

エンコーダにおいては、前述したサーボシステムの開発コンセプトの内、特に高速高応答、低振動、および分解能向上の実現に向けて20 bitの高分解能を目指すとともに、信号精度の向上に関する要素技術の開発に取り組んだ。

3.1 低歪（ひずみ）率正弦波の生成

光学式エンコーダは一般的に、第3図に示すように発光素子・回転板・固定板・受光素子を組み合わせて構成される。発光素子が照射した光は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が、その入射する光の強度は回転板の回転に応じて変動する。回転板はモータ軸に連結されているため、変動する信号を2値化や内挿処理することにより、モータ軸の回転位置情報の信号を得ることができる。



第3図 エンコーダの基本構成

Fig. 3 Basic structure of encoder

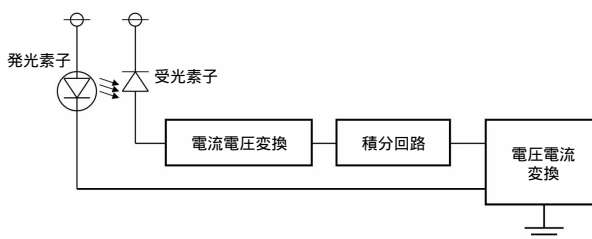
エンコーダの高分解能化の手段として、回転板および固定板のスリットパターンを微細化することが挙げられるが、高分解能化するにつれて光の回折現象や回転板および固定板の機械的誤差の影響を受け、生成される信号のSN比が低下する課題があった。

そこで、開発機種のエンコーダでは、モータ1回転当たりの信号のパルス数を従来に比べ小さく設計してSN比を確保するとともに信号を内挿処理することにより、高分解能信号を生成することとした。内挿処理では正弦波の逆関数を利用するため、変動する信号が正弦波に近いほど高精度な位置情報が得られる。したがって、固定板のスリットパターンを改善することで、正弦波信号の精度向上を目指した。

従来の回転板と固定板のスリットパターンは、基本的に長方形に近い扇形をしているため、回転板が回転した際に得られる信号は三角波が鈍った信号となり、高調波成分を含む。この高調波成分が、位置情報の精度が低下する要因となる。したがって、この信号の高調波成分を低減させるため、固定板のスリットパターンを径方向に分断して少しずつ周方向へずらして階段状とし、各領域から入射した光による信号が互いに高調波成分を打消し合う形状とした。このスリットパターンの変更により、従来のスリットパターンに比べて正弦波信号の歪率の改善を実現した。

3.2 光量補正回路による位置精度向上

受光素子が生成する正弦波信号の振幅は、発光素子が照射する光量により決定される。発光素子が照射する光量は、経年劣化や温度上昇などの影響を受けることにより減少する。これは、正弦波信号の振幅低下につながり、内挿処理の角度演算誤差を生じ、位置精度の低下を招く。そこで、第4図に示すように、受光素子からの出力電流を発光素子の駆動部にフィードバックし、発光素子の光量を一定にする設計を行った。



第4図 光量補正部ブロック図

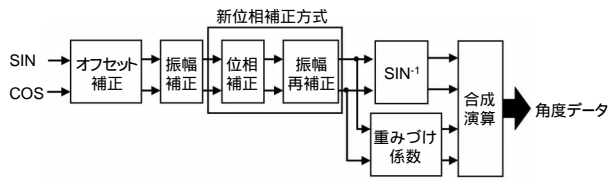
Fig. 4 Block diagram of compensation circuit of light intensity

本設計を行うことにより、発光素子は保証寿命内において正弦波信号を一定振幅に維持することが可能となった。また、温度変化による発光素子の光量変化に対しても適応可能となり、高い位置精度を安定して実現した。

3.3 位相ずれ許容度の改善

エンコーダでは、電気角で90°位相をずらして生成した2種類の正弦波信号から回転位置情報信号を生成している。その精度を悪化させる要因として、位相ずれがある。この位相ずれは回転板や固定板の組立ての機械的誤差により発生し、この誤差はゼロにすることはできない。そのため、より精度の高い位置情報を得るには、電氣的に正弦波信号の位相を補正することが効果的である。

本エンコーダでは、第5図に示すように、内挿演算処理を行う際に、正弦波信号を元にオフセット補正、および振幅補正によって正規化しているが、角度データへ変換する前に変換後の角度データに対して位相補正を行った結果と比較して、変換精度の良い方に重みづけをして合成演算を行っている。この演算処理方式のみの場合、入力される正弦波の位相ずれが大きいと、角度データに歪が生じることにより、合成演算精度が悪化する。位相補正と振幅再補正の処理を加えている位相補正処理では、双方の信号のクロスポイントを活用して位相差が電気角90°となるように信号を再生しており、また振幅再補正処理では、位相補正処理にて変化した振幅を再補正して正規化している。これらの補正処理により、正弦波信号の位



第5図 信号位相補正ブロック図
Fig. 5 Block diagram of signal phase compensation

相ずれ許容度の向上を実現した。

4. サーボアンプ

- サーボアンプにおいては、
- ・リアルタイムオートチューニング機能の進化
 - ・速度応答周波数の向上
 - ・微小振動の抑制
- を図った。以下、その詳細を説明する。

4.1 リアルタイムオートチューニング機能の進化

リアルタイムオートチューニング機能とは、剛性パラメータ1つを調整するだけでゲインなど複数あるパラメータを一括して調整することができる機能であり、装置の早期立ち上げが実現できる。

開発機種では、この機能を従来機種²⁾より進化させた。その主な内容は、以下の通りである。

- ・共振振動を自動抑制する適応フィルタの機能拡張
- ・摩擦負荷の位置決め用途など適応範囲拡張
- ・調整中の発振を自動検知し安定化させる発振自動安定化機能の搭載

ここでは、適応フィルタの機能拡張、発振自動安定化機能について詳細を説明する。

〔1〕適応フィルタの機能拡張

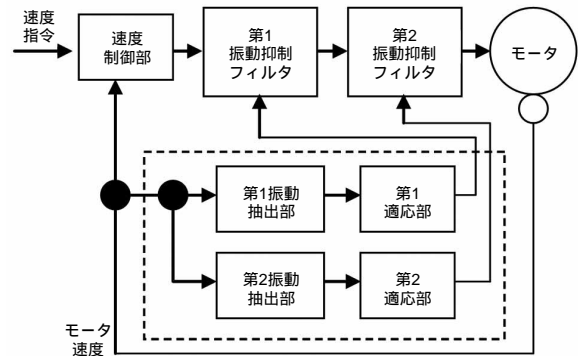
最近の装置は、小型化・軽量化により、共振しやすい傾向が強く、共振周波数をもつ装置ではゲインを上げると振動が生じ応答性を満足できない。共振周波数は、装置によって異なるため個別調整が必要である。適応フィルタは、モータ速度から共振振動周波数をリアルタイムに推定し、共振振動を抑制するよう振動抑制フィルタを自動設定する機能である。この機能を用いることで、ユーザーは共振振動に対する調整を意識することなくゲイン調整が可能となる。

開発機種では、適応フィルタを従来の1つから2つへ拡張し、より多くの装置の調整を容易にした。

機能拡張に向けての課題は、2つの適応フィルタが異なる共振周波数に対応するよう動作させることであった。単に並列に並べると同じ共振周波数に適応するが、これは

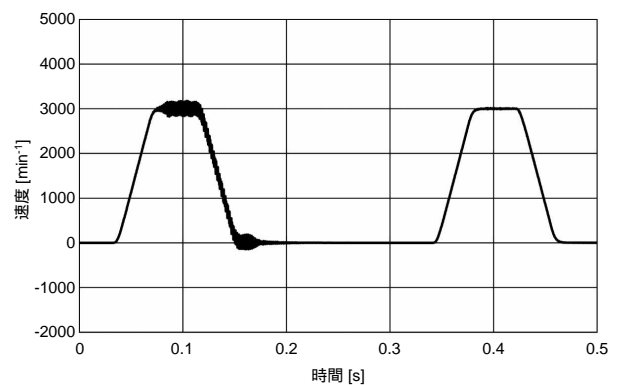
制御としては不安定方向に働く。そこで、2つの振動抑制フィルタの前段に相異なる周波数帯域の振動成分抽出する振動抽出部を付加することで解決した。

適応フィルタの制御ブロック図を、第6図に示す。各振動抽出部では、モータ速度に含まれる共振振動成分を抽出する。対応する適応部は、抽出された共振振動成分が抑制されるよう振動抑制フィルタ設定値を更新する。



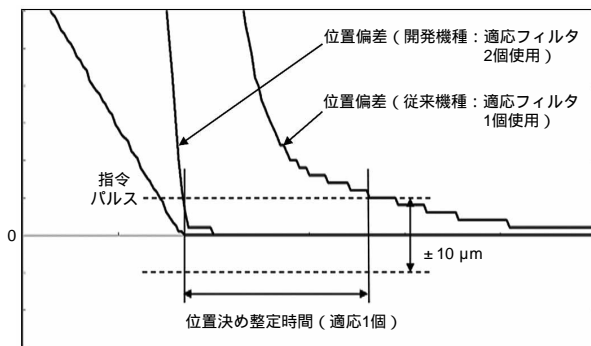
第6図 適応フィルタの制御ブロック図
Fig. 6 Block diagram of adaptive filter

1.2 kHzと2.4 kHzに共振周波数をもつ実験装置に適用したときの適応フィルタの動作波形図を、第7図に示す。2つの共振振動が生じるが、振動検知とともに共振周波数の推定値の更新処理が始まり、短時間で共振周波数の推定が完了する。増加していたモータ速度の共振振動は抑制され、2回目の動作パターンでは振動が抑制されている。



第7図 適応フィルタ使用時モータ速度波形
Fig. 7 Waveform of motor velocity using adaptive filter

同じ実験装置を用い、リアルタイムオートチューニング機能にて調整した位置決め波形図を示す(第8図)。適応フィルタにより自動的に2個の共振振動の抑制ができ、ゲインを上げることができたため、±10 μmの整定幅に



第8図 位置決め動作波形

Fig. 8 Waveform of positioning

対し指令パルスの吐き出し完了とほぼ同時の位置決め整定時間が得られた。従来1つの共振振動にのみ対応する方式に比べ、大幅な整定時間の短縮が可能となった。

【2】発振自動安定化機能

装置の調整時において、適応フィルタで対応できる限界を超えて高い剛性パラメータを設定する状況が考えられる。その場合、過大な振動が発生し装置にダメージを与える可能性がある。本機能は、そのような状態からすばやく振動を抑え安定な制御状態にする機能であり、業界初の機能として搭載した。

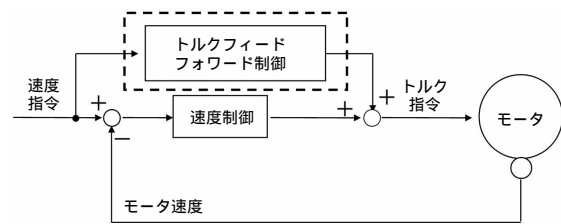
この発振自動安定化機能は、調整途中の安定動作時の設定を記憶しておき、装置限界を超えたパラメータ設定により発生した振動を検知すると、自動的に記憶していた安定動作時の設定に変更するものである。これにより、ユーザーが安心して調整を行うことを可能とした。

4.2 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、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。

開発機種では、制御周期の短縮や制御タイミングの最適化による制御遅れ時間の短縮、トルクフィードフォワード機能の搭載により速度応答周波数が2 kHzとなり、従来比で2倍の性能向上を実現した。

具体的には、高性能CPUの採用と新規LSIの開発により、制御遅れ時間を従来の半分以下に短縮し、フィードバック制御系の応答性を向上させた。また、トルクフィードフォワード機能では、速度指令への追従に必要なトルクを負荷モデルにより算出し、速度制御の出力に加算することで速度指令に対する応答性を向上させた（第9図）。



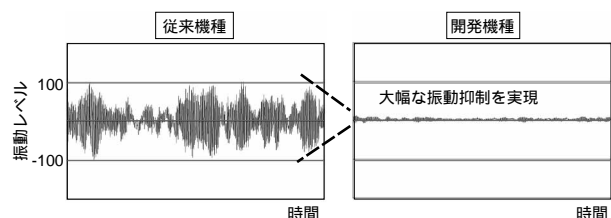
第9図 トルクフィードフォワード制御ブロック図

Fig. 9 Block diagram of torque feedforward control

4.3 微小振動の抑制

半導体装置などの加工プロセスの微細化に伴い、従来では問題視されていなかった微小な振動が装置の精度に影響を与えるようになり、このような微小振動でさえも抑制できる高精度な制御が要求されている。

開発機種では、モータ動作状態の検出部（エンコーダ、電流検出器）と、検出した情報を用いてサーボ制御を行うソフトウェア演算部の精度をともに向上させることで、サーボ制御処理全般の高精度化を実現した。第10図に、サーボロック時（一定の負荷をかけたままでモータが停止状態を保持するよう制御された状態）の振動レベルの比較結果を示す。第10図は、従来機種の振動レベルを±100としており、大幅に振動レベルが低減していることがわかる。



第10図 振動レベル比較

Fig. 10 Comparison of vibration levels

5. まとめ

本稿では、ACサーボシステムの技術開発として、サーボモータの小型高性能化、ロータリーエンコーダの高分解能化と信号精度向上、サーボアンプの制御性の改善および追加機能について述べた。

開発機種では上記技術テーマが採用されており、従来機種に対して大幅な性能向上を達成するとともに、業界最高レベルの性能を実現した。

ユーザーにおいては、装置の振動低減やタクト時間短縮、調整作業の簡素化などが期待でき、これまで採用が

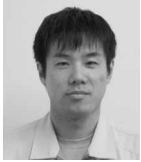
実現しなかったアプリケーションへの適用も、採用の可能性が広がると考えている。

今後は要素技術をさらに発展させ、小型化の追求や制御技術の開発を進めるとともに、高効率化を通じた消費電力の削減を推進し、更に環境に配慮した商品の開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 中田高義 他：電気工学の有限要素法（第2版）（森北出版）(1982).
- 2) 田村真也 他：ACサーボモータ&アンプ「MINASTM A4シリーズ」 Matsushita Tech. Journal 51, No.1, pp.13-16 (2005).

著者紹介



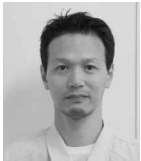
吉良嘉洋 Yoshihiro Kira
モータ社 産業モータビジネスユニット
Industrial Motor Business Unit, Motor Company



西園 勝 Masaru Nishizono
モータ社 産業モータビジネスユニット
Industrial Motor Business Unit, Motor Company



岡井洋樹 Hiroki Okai
モータ社 産業モータビジネスユニット
Industrial Motor Business Unit, Motor Company



田澤 徹 Toru Tazawa
モータ社 モータ開発研究所
Motor R&D Lab., Motor Company