

# サーボシステムに生きる制御技術

井出 勇治  
Yuuji Ide

今井 裕五  
Yugo Imai

北原 通生  
Michio Kitahara

山崎 悟史  
Satoshi Yamazaki

## 1. まえがき

サーボシステムは、モーションコントロールを構成する要素の一つであり、サーボシステムに求められるのは、指令通りに動く事である。サーボシステムは、モータとそれをコントロールするアンプからなる。そして、モータの先には機械が結合されており、機械が指令通りに動く事が要求されている。機械には、外乱やねじり共振、摩擦が存在し、指令通りに動くためには何らかの工夫が必要になる。これらの要求を満足させるには、制御理論の適用が欠かせない。制御理論は、PID 制御を中心とする古典制御から、オブザーバに代表されるアドバンスト制御に移行しつつある。さらに、近年は、デジタル制御を念頭においた制御理論が展開されつつある。本稿では、当社最新のサーボシステムである Q シリーズで展開した制御技術について概説する。

## 2. Q シリーズにおける制御技術

Q シリーズは、高精度、高応答、高効率などを目標にかかげて開発を行った新サーボシステムである。Q シリーズでは、PI 制御を基本としながらも、オブザーバを始めとする現代制御理論、システム同定理論を適用し、高性能化を図った。

### 2.1 高精度、高効率トルク制御

トルク制御の基本となるのは電流制御である。Q シリーズでは PWM 周波数を従来の 2 倍にし、電流ループサンプリング周期も 1/2 とする事により、電流制御系における無駄時間を削減し、電流ループ応答を従来の 2 倍に高めている。また、d 軸電流の定常偏差補償の追加、dq 軸演算式の見直しなどにより、dq 軸制御演算を高精度化している。これら、dq 軸電流を制御し、最適なトルクを出力させるのがトルク制御系である。従来は、高速領域で、回転速度に応じて弱め界磁を行っていたが、今回、トルク指令もその関数とし、トルクが小さい時には d 軸電流を小さくするような工夫を加えている。これにより、無負荷運転時のモータ電流を低減し、電力損失を削減している。これと、モータ自身の効率アップ、主回路半導体の損失低減などにより、高効率なトルク制御が実現できている。

### 2.2 指令追従制御

トルクをコントロールし、指令追従性を向上させるのが、位置、速度制御系である。この制御系においても、サンプリング周期を 1/2 とし、無駄時間を削減する事により、ハイゲイン制御が実現できるようになっている。これにより、速度制御系の応答は、図 1 に示すように従来比 1.5 倍の 606Hz を達成している。また、速度制御器を見直し、位置決め整定時間が短縮されるような工夫をしている。図 2 は、モータに負荷イナーシャをつけた状態で、計測した位置決め整定時間である。位置決め完了幅を 12 パルスとした状態で、0.6ms の整定時間が得られている。この位置決め整定時間の短縮と共に、モータのパワーレートを最大 2 倍に向上した事、および、最高回転速度が  $5000\text{min}^{-1}$  に向上したことにより、PTP 制御におけるヒットレートが飛躍的に向上している。

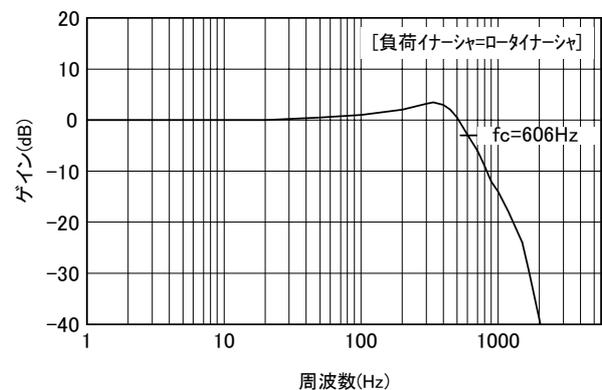


図 1 速度周波数応答

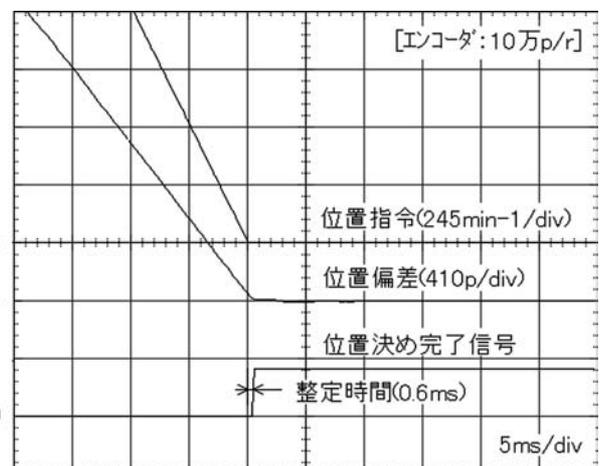


図 2 位置決め整定特性

位置制御器においては、フィードフォワード系の構造変更などにより、指令追従性を高めた制御を行う事ができる。これにより、CP制御での位置制御の追従性を当社従来比2倍に向上させる事ができている。また、定常偏差が0になるような制御モードも選択できる。図3は、このモードでの位置偏差を示したものである。

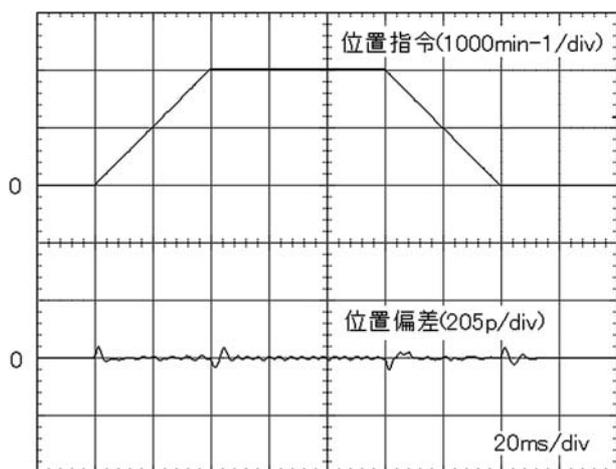


図3 偏差最小化制御特性

また、位置決め精度向上のため、エンコーダ分解能を大幅に向上させた。インクリメンタルエンコーダは、従来の8000P/R(4通倍後)から、最大163840P/R(4通倍後)に分解能を向上している。アブソリュートエンコーダは、従来の13ビットから17、21ビットに分解能を向上している。モータでも、コギングトルクを従来比1/3に低減した。これらの、エンコーダ分解能の向上やモータコギングトルクの低減により、滑らかで高精度な制御が実現されている。なお、当社インクリメンタルエンコーダはパラレル通信方式を採用しているため、無駄時間が非常に少ないという特長がある。

### 2.3 外乱抑圧

ハイゲイン速度制御により、外乱抑圧特性が向上しているが、さらなる特性改善の一つとして、外乱オブザーバを設けている。これは、モータ速度とトルク指令から負荷トルクを推定し、トルク指令に補償を加える事により外乱抑圧性を向上させるものである。これにより制御系は2自由度制御系となっており、指令応答と外乱応答を独立に調整できるようになっている。図4は、10min<sup>-1</sup>で回転しているモータに、定格トルク相当の負荷トルクを印加した場合の速度の変化を示したものである。外乱抑圧補償が無い場合は負荷トルクの印加、徐荷に伴い速度変動を生じているが、外乱抑圧補償を行った場合は、ほとんど速度変動が無くなっている事がわかる。

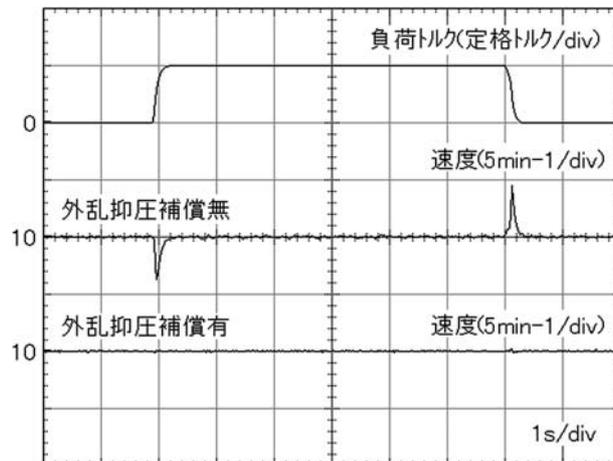


図4 外乱抑圧特性

### 2.4 振動抑制

基本制御系の性能改善により、剛性の高い機械系を駆動する場合の特性は当社従来品と比較すると格段に改善されているが、近年の機械は、高速化、低コスト化などを目指しており、低剛性の機械も増えている。2慣性系はこのような低剛性の機械を代表するモデルである。図5はその構成を示しており、モータ側と負荷側がねじれのあるバネ系により結合されている。このような2慣性系では、目標値追従性や外乱抑圧性を向上させようとすると、モータ側は指令通りに動こうとするが、負荷側には振動を生じてしまう。制御の目的は、負荷側を指令通りに動かす事であるため、この振動は好ましくない。そこで、オブザーバを用いて振動成分を抽出し、制御系に補償を加える事で振動を抑制する制振制御を搭載している。この制振制御により、従来と比較すると、より高い応答特性を得る事ができ、剛性の低い機械においても追従性の向上を図ることができる。また、オブザーバの適用が困難な周波数領域においては、ノッチフィルタを2段用意している。周波数の上限、下限とも当社従来品に対し、それぞれ2倍、1/2倍の周波数まで対応できるように改良している。さらに高周波領域に対しては、トルク指令ローパスフィルタで対応する。Qシリーズでは、このフィルタの次数を高次化し、急峻な遮断特性も選択できるようにしている。

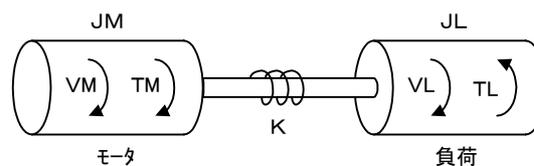


図5 2慣性系

## 2.5 機械特性解析

振動抑制を行うためには、共振周波数や反共振周波数が既知である必要がある。Q シリーズでは、パソコンを用いて、機械系の周波数応答特性を解析できるソフトウェアの開発も行った。トルク指令としてランダム信号を与え、検出した速度信号をFFT処理する事により、周波数特性を計測する。計測は数秒で実行でき、従来のアナライザを用いていた場合と比較すると、短時間で機械特性の解析が行える。

## 2.6 オートチューニング

Q シリーズでは、安定性を主眼におき、オートチューニングのレベルアップを行った。オートチューニングでは、負荷イナーシャを推定し制御パラメータを自動調整する。低加減速ではイナーシャの推定が困難になるが、アルゴリズムの見直しにより、従来比 1/5 まで検出できる範囲を拡大した。また、イナーシャ比の推定範囲を従来の 31 倍から 127 倍まで拡大し、さらに、推定イナーシャに対し制御系がより安定に推移するよう関数を変更した。これらにより、従来と比較すると、より汎用的なオートチューニングが実現でき、広い範囲に適用できるようになっている。

## 3. むすび

本稿では、Q シリーズの制御技術について概説した。Q シリーズの制御技術の特長は次の通りである。

- ・高精度、高効率トルク制御
- ・指令追従制御  
(速度周波数応答 600Hz、位置決め整定時間 1ms 以下)  
(CP 制御での位置制御追従性、当社従来比 2 倍)
- ・高分解能エンコーダ、低コギングモータによる滑らか運転
- ・外乱オブザーバによる高剛性制御
- ・制振オブザーバ、高帯域 2 段ノッチフィルタ、高次トルク指令ローパスフィルタによる機械振動の抑制
- ・機械特性解析機能搭載
- ・リアルタイムオートチューニングの性能向上

なお、Q シリーズは、ロータリーモータのみならずリニアモータにも適用でき、半導体製造装置やチップマウンタ、工作機械などへの適用において、従来機と比較して格段な性能向上が図れるものと思われる。

サーボシステムに対する性能要求は年々厳しくなっている。一方、制御理論も日進月歩で進化している。今後は、新たな制御理論の適用と、各種機械に、より適合するサーボシステムの構築に向けて努力していく所存である。



井出 勇治

1984年入社  
サーボシステム事業部設計第2部  
モータ制御装置の開発設計に従事。



今井 裕五

1998年入社  
サーボシステム事業部設計第2部  
モータ制御装置の開発設計に従事。



北原 通生

1991年入社  
サーボシステム事業部設計第2部  
モータ制御装置の開発設計に従事。



山崎 悟史

2001年入社  
サーボシステム事業部設計第2部  
モータ制御装置の開発設計に従事。