

オートチューニング機能付き サーボアンプ及びサーボモータの開発

Development of Servo Amplifiers
with Auto-tuning Function and Compact Servo Motors

技術本部 黒丸 廣志*¹ 前川 明寛*²
奥田 幸人*³
神戸造船所 加藤 義樹*⁴ 平野 雅弘*⁵

エレクトロニクス新製品の一つとして、サーボアンプ及びモータを開発した。本報では、サーボアンプ、モータの小型化技術及びサーボアンプのオートチューニング機能について述べる。サーボアンプは、周辺デジタル回路も内部に取込んだ ASIC の開発により最大 70% に、モータは高速電流制御の開発により最大 65% に小型化できた。また、運転中にモータ電流や回転数からモータを含む駆動部全体の慣性や摩擦を推定し、制御定数を自動的に最適値に更新するオートチューニング技術をサーボアンプに組込むことにより、モータの立ち上り特性を 30% 短くできた。また、回転速度むらも半減できた。

This paper details how we used new ASIC with built-in peripheral circuits to downsize servoamplifiers 30%, and high-speed current control to downsize servo motors 35%. Auto-tuning automatically optimizes control parameters by calculating load inertia and friction, and successfully improved rising characteristics 30%, and reduced velocity ripple 50%.

1. ま え が き

当社はサーボシステムを幅広く採用しており、制御理論やサーボ制御技術の導入が盛んである。工作機械、産業機械、一般機械で使用されるサーボシステムの多くは AC サーボモータシステムである。

AC サーボモータについては、高性能永久磁石の出現により、小型高効率モータの開発が可能となってきた。

一方、サーボモータを駆動するサーボアンプについても、安価で高速のマイコンや DSP (Digital Signal Processor), ASIC (Application Specific IC) の出現でデジタル化、多機能化が可能となり、またパワー半導体もロジック系とのインタフェース回路が一体となった IPM (Intelligent Power Module) の出現により小型化が可能になってきている。

この度、当社ではコンパクトなサーボアンプ及びサーボモータを開発した。

本報では、サーボアンプ及びサーボモータの小型化技術とサーボアンプのオートチューニング技術、すなわち、運転中に慣性や摩擦を推定し、制御定数を自動的に最適値に更新する技術について述べる。

2. 小型化技術

今回開発したサーボアンプ及びサーボモータの一例を図 1 に示す。

2.1 サーボアンプ

サーボアンプの主要諸元を表 1 に、サーボアンプの内部回路構成を図 2 に示す。

サーボアンプは大きく分けて主回路、電源回路、制御回路の 3 要素から構成されている。

主回路はダイオードモジュール、平滑コンデンサ、インバータ

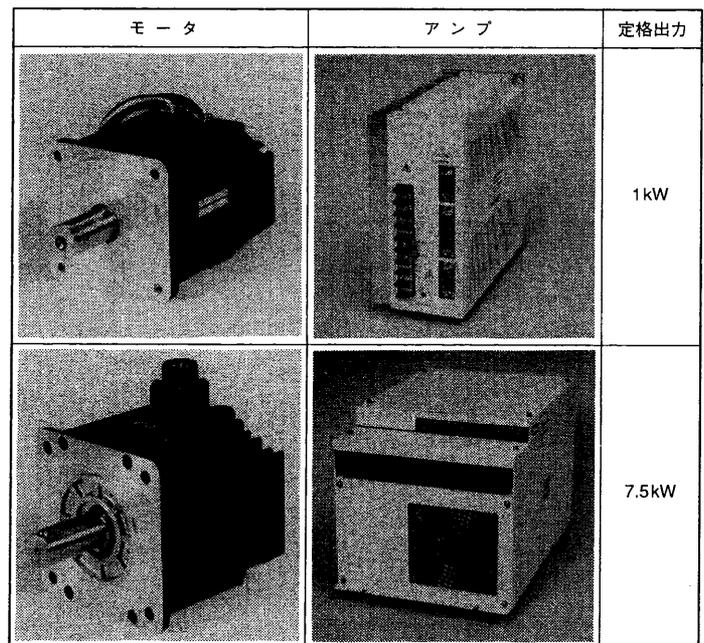


図 1 サーボモータ及びサーボアンプ 開発したサーボモータ及びサーボアンプの一例を示す。
Servo motors and servo amplifiers

用 IPM 等のパワー素子等から構成されている。

電源回路は制御電源用 DC/DC コンバータ、回生処理回路、パワーモジュール駆動回路等から構成されている。

制御回路は高速 32 bit RISC チップと ASIC 等から構成され、サーボアンプの主要な制御はここで処理される。周辺デジタル回路を ASIC 内部に取込むことにより、制御回路を約 112 cm² の基板 1 枚に集約した。サーボアンプは、最大で体積比 70% に小型化できた。

*1 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター主査

*2 高砂研究所制御システム研究室 工博

*3 高砂研究所制御システム研究室

*4 電子・宇宙技術部装置制御設計課

*5 電子・宇宙技術部情報・電子機器設計課

表1 サーボアンプの主要諸元
Major dimensions of servo amplifiers

	G 030 B	G 050 B	G 075 B	G 100 B	G 150 B	G 200 B	G 300 B	G 600 B (開発中)	G 200 C
定格出力電流 (A)	5.7	9.4	14.0	23.0	34.0	45.0	68.0	138.0	75.0
最大出力電流 (A)	17	28	42	57	85	112	170	345	112
対応モータ (kW)	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5, 11	22	37.0
使用電源	三相 AC 200 V~230 V ±10%~-15% 50/60 Hz							三相 AC 400 V ±10% 50/60 Hz	

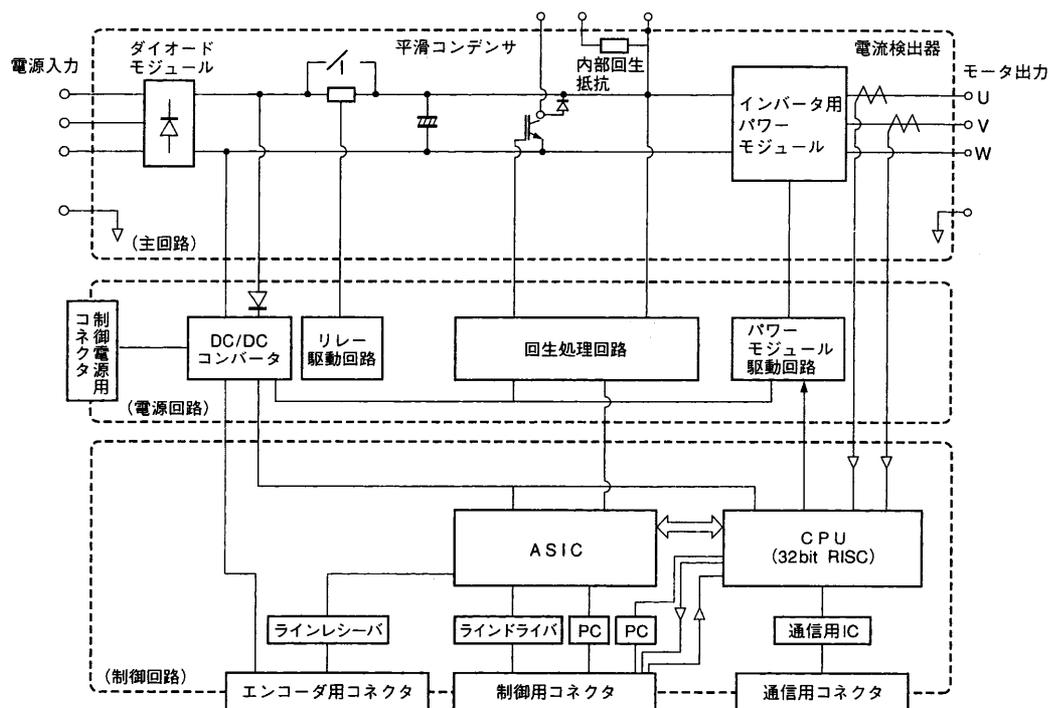


図2 サーボアンプ内部構成 サーボアンプは大きく分けて主回路、電源回路、制御回路より構成されている。
Block diagram of servo amplifier

後述のサーボモータの多極化に伴い、電流制御周期の高速化が必要となった。高速化を実現するための手段として、サーボシステム用に開発された高速 32 bit RISC チップの採用、電子ギヤ及び速度演算の ASIC 処理、さらに、2 軸電流制御手法（3 相電流を座標変換により 2 軸電流に変換し、制御する）を採用することで、高速電流制御が実現できた。

2.2 サーボモータ

表2に今回開発したサーボモータの主要諸元を示す。

サーボモータを小型・高出力でかつ低コストに製造するためには、出力に対するモータ体積比であるエネルギー密度を大きくとることと、サーボモータの構造を簡易にするために電機子巻線を配置するスロット数を極力減らし、作業性の高い巻線方式を採用することが必要である。

ロータ外径と巻線方式を同一とし、ステータ鉄心の磁束密度、電機子巻線の電流密度及びその他の電気的特性をほぼ同一とした場合に、エネルギー密度の値を大きくするためには、サーボモータの極数を多くする必要がある。しかしながら、多極化を進めると、電気的な周波数は回転速度と極数とに比例するため、電機子インダクタンスによる電圧降下が大きくなり、高速回転を維持することが困難となる。結果として、主磁束設定量の低減、電機子電流設定量の増加を行って出力トルクを維持するような設計となる。このためサーボアンプの電流容量が大きくなり、システム

表2 サーボモータの主要諸元
Major dimensions of servo motors

サーボモータ 型番	定格回転数 (rpm)	定格出力 (kW)	瞬時最大 トルク (Nm)	フランジ角 (mm)	全長 (mm)	重量 (kg)
8 CC 102 G	3 000	1.0	9.5	80	111	2.5
1 MC 152 G	3 000	1.5	14.3	100	154	3.9
1 MC 202 G	3 000	2.0	19.1	100	166	4.5
3 MC 302 G	3 000	3.0	28.6	130	154	6.5
3 MC 402 G	3 000	4.0	38.2	130	166	7.5
3 MC 502 G	3 000	5.0	47.7	130	170	8.4
8 MC 752 D	1 500	7.5	119.4	180	250	25.0
8 MC 113 D	1 500	11.0	175.0	180	282	30.0

コストが割高になる。同一トルク発生時のサーボモータの極数と電流の関係から、サーボモータのエネルギー密度を上げるための多極化とサーボアンプの電流容量の増加関係を考慮し、電流増加の少ないモータ極数を採用した。さらに、省スロットでかつ巻線作業を自動機で行える集中巻線方式を採用することとした。エネルギー密度と比例関係にある巻線係数をスロットごとに求め、従来モータ並みの巻線係数が得られる 12 スロットを採用することとした。

従来製品に対し、今回、最大で体積比 65% と大幅な小型軽量化を実現している。

3. オートチューニング技術

表3 オートチューニング手法
Auto-tuning techniques

	高速応答制御	回転むら低減制御
検出信号	●モータ指令電流 ●モータ回転角度	●モータ指令電流 ●モータ回転角度
原理	モータ駆動部の慣性をオンライン推定し、その値に応じて速度制御ゲインを更新する。	繰返し運転時に周期的に加わる外乱トルクをオンライン推定し、フィードフォワード的にモータ指令電流を補償する。
対象	工作機械・ロボット等加減速を伴う運転を行うもの	印刷機械・紙工機械等一定速度運転を行い、かつ、トルク変動に周期性があるもの
効果	立ち上り特性（応答性）を改善	定速性能を向上

サーボモータの制御性への要求として以下の項目がある。

- (1) 立ち上り時間が短いこと（速応性）
- (2) 外乱や負荷変動の影響を受けにくいこと（ロバスト性）
- (3) 回転むらが小さいこと（定常特性）
- (4) 発振や著しいオーバershootを伴わないこと（安定性）

一般的に速応性を高めたり、外乱の影響を抑制するためには、サーボ系のゲインを高く設定する必要がある。しかしながら、必要以上にサーボ系のゲインを高くすると安定性が損なわれ、著しいオーバershootが生じたり、ときには発振に至ることがある。したがって、従来は、速応性、ロバスト性、定常特性をある程度犠牲にし、サーボ系のゲインは低めに設定せざるを得なかった。

これに対して、近年、安価で高速なマイコンやDSPの出現により、サーボアンプにインテリジェンスを持たせることが可能になった。このインテリジェンスの一つがオートチューニングである。

オートチューニングとは運転中にモータ電流や回転数などからモータを含む駆動部全体の慣性や摩擦を推定し、所定の制御則に基づいて、オンラインで自動的にサーボ系のゲインを更新し、安定性を維持しつつ、速応性、ロバスト性、定常特性を改善する機能である。

本オートチューニングは外乱オブザーバ⁽¹⁾をベースとしている。外乱オブザーバでは、式(1)、(2)によりモータ回転速度及びモータ電流から外乱トルクを推定する。

式(2)の右辺第1項が、本来負荷で発生すべきトルク、右辺第2項が実際に発生したトルクである。

その差は、外乱トルク推定値 τ_{dis} となり、駆動系の摩擦力や慣性の公称値と実際の値との差により生じる。

$$\alpha(t) = \frac{d}{dt}v(t) \tag{1}$$

$$\tau_{dis}(t) = Kt_n \cdot i_a(t) - J_n \cdot \alpha(t) \tag{2}$$

ただし、

$v(t)$: モータ回転速度

$\alpha(t)$: モータ回転加速度

$\tau_{dis}(t)$: 外乱トルク推定値

$i_a(t)$: モータ電流

Kt_n : モータトルク定数公称値

J_n : モータ慣性公称値

t : 時間

この外乱トルクを補償すべく、外乱トルク推定値 τ_{dis} から式(3)により補償電流 i_{cmp} を求め、元の電流指令 i_{ref} に加える。

$$i_{cmp}(t) = \frac{1}{Kt_n} \tau_{dis}(t) \tag{3}$$

この補償電流により、摩擦力や慣性の差に起因するトルク損失が補償される。

筆者らは外乱オブザーバを用いた、次の2種のオートチューニング機能を開発し、サーボアンプに実装した。

- (1) 高速応答制御
- (2) 回転むら低減制御

高速応答制御は、加減速運転を伴う装置や機械、回転むら低減制御は、モータを一定速度で運転する装置や機械を対象としている。これらの内、どちらか一方を、目的に応じてユーザが選択して使用する。

これらの特徴を表3に示す。

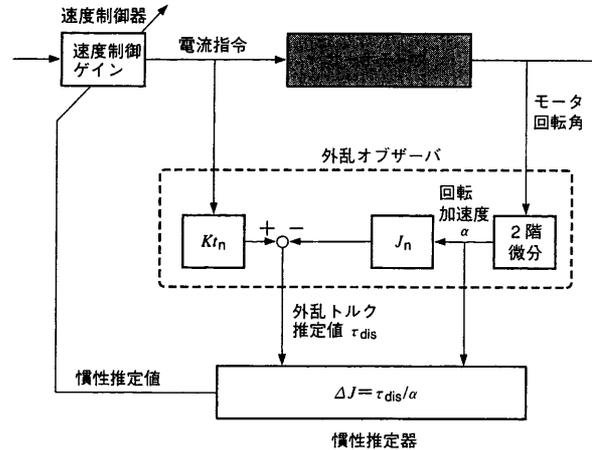


図3 高速応答制御の構成 電流指令とモータの回転角度から慣性推定値をオンラインで求め、速度制御ゲインを更新する。 Block diagram of quick response control

3.1 高速応答制御

高速応答制御は、工作機械やロボットのように加減速運転を伴う装置や機械の駆動部の慣性をオンライン推定し、推定した慣性に応じて速度制御ゲインを更新することにより実現される。本制御は、図3に示すように外乱オブザーバと慣性推定器で構成される。外乱オブザーバでは、電流指令とモータ回転角から外乱トルク推定値及びモータ回転加速度を求める。慣性推定器では、モータ回転加速度と外乱トルク推定値から慣性推定値を求める。慣性推定値は、速度制御器に送られる。速度制御器では所定の制御則に基づき、モータ単体の慣性値にて最適となるように初期設定されていた速度制御ゲインを、慣性の増加に応じて高める処置をとる。

サーボモータが装置や機械に取付けられると、サーボモータの駆動対象となる慣性は増加するので、速度制御ゲインがオンラインで自動的に高い値に更新され、速応性が改善される。

本高速応答制御法をG030Bサーボアンプに実装し、750Wモータを駆動した場合の結果を図4に示す。速度750rpm、加速・減速時間250msの加減速運転を行った。図4(a)はモータ単体の慣性に比べ約20倍、(b)は約40倍の負荷を取付けた場合である。

いずれの負荷を取付けた場合も、速度制御ゲイン更新開始後、加減速時のモータ回転速度の応答性が1周期の運転で速やかに改善されている。図4(b)の40倍の負荷を取付けた場合では、立ち上がり時間は、更新開始前0.3sから2周期目以降0.2sと約30%改善されている。それに伴い、電流指令値も立ち上り特性を改善すべく機敏に responding している。

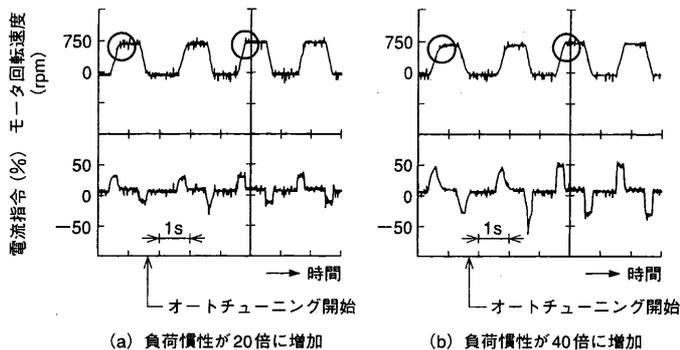


図4 高速応答制御試験結果 負荷慣性が20倍及び40倍に増加した場合の応答を示す。共にモータ回転速度の速応性がオンラインで改善された。
Experimental results of quick response control

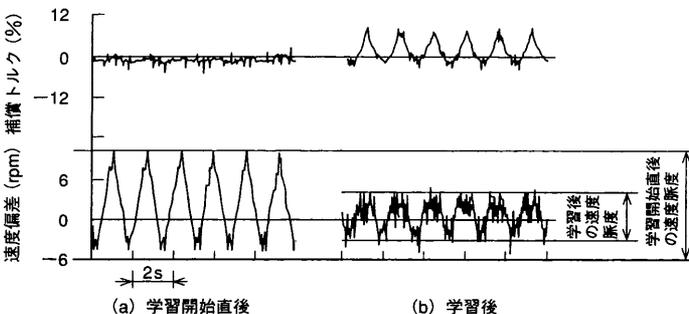


図6 回転むら低減制御試験結果 学習により補償トルクが次第に増加し、最終的に速度脈動が半減した。
Experimental results of velocity ripple canceller

3.2 回転むら低減制御

回転むら低減制御は、印刷機械や紙工機械のようにモータを一定回転数で回転させ、一連の作業を繰返し行う装置を対象としている。本制御は運転時に周期的に加わる外乱トルクをオンライン推定し、フィードフォワード的にモータ電流を補償することで回転むら低減を図る。その構成は図5に示されるように、外乱オブザーバと回転むらトルク推定器から成る。

外乱オブザーバは、式(2)に従い外乱トルクの推定値を出力する。回転むらトルク推定器では、まず、繰返し作業1回当たりのモータ総回転角 θ_p とモータの回転角 θ_m より作業角 θ_w を求める。作業角とは、一連の繰返し作業を完了する間を一周期(角度 2π)としたときのモータ回転角である。モータ総回転角は、サーボモータが組込まれた装置ごとに異なるため、ユーザに入力してもらう。次に、外乱トルクと学習係数により、所定の作業角での学習トルクを求める。繰返し作業1回当たり学習トルク分ずつ補償トルクが更新される。

以上の学習動作は、外乱トルクが所定値以下となるまで継続される。この作業角ごとに回転むらトルクテーブルを更新し学習する点が本制御の特徴である。

回転むら低減制御を G 030 B アンプに実装し、減速器を介して偏心負荷を取付けた 750 W モータを一定の速度目標値にて駆動した場合の結果を図6に示す。学習を開始後、徐々にトルク補償が行われる [図6(a)]。十分に時間が経過し回転むらトルクテー

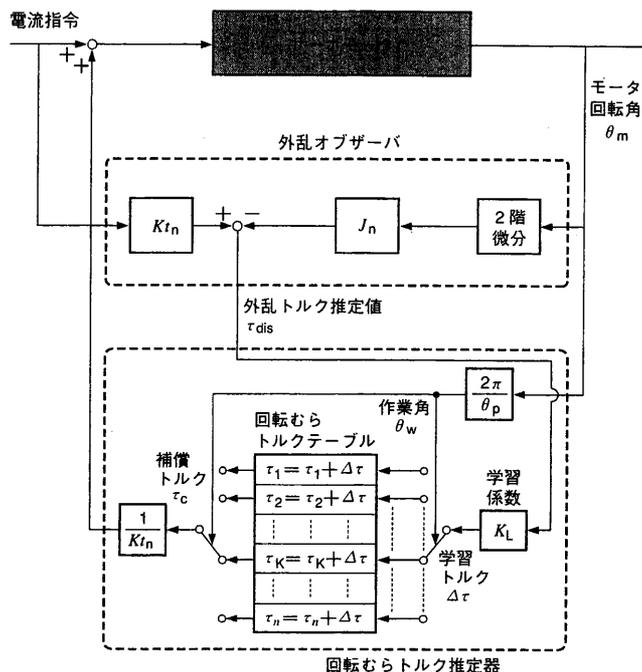


図5 回転むら低減制御の構成 電流指令とモータの回転角度より補償トルクをオンラインで求め、徐々に電流指令を更新する。
Block diagram of velocity ripple canceller

ルの値がほぼ収束した学習後 [図6(b)] では、速度偏差の回転むらが半減している。このとき、補償トルクは速度偏差と同相、すなわち速度偏差が最大時に補償トルクが最大となり、回転むらを低減していることが分かる。

4. む す び

開発したサーボアンプ、モータの小型化技術及びサーボアンプのオートチューニング技術について述べた。サーボアンプは ASIC を開発し、周辺デジタル回路を内部に取込むことで、体積を最大で従来の 70% にコンパクト化できた。サーボモータは、高速電流制御の開発により、極数を増加させ、体積を最大で従来の 65% にコンパクト化できた。

また、運転中に制御定数を自動的に最適値に更新するオートチューニング機能として、高速応答制御と回転むら低減制御の2種をサーボアンプに組込んだ。高速応答制御は工作機械やロボットなど加減速運転を伴う装置や機械を対象に、立ち上り特性を改善する。試験の結果、わずか一周期の運転で立ち上り時間が 0.3 s より 0.2 s へと、約 30% 改善された。一方、回転むら低減制御は、印刷機械、紙工機械など一定速運転を行い、かつ、トルク変動に周期性がある装置や機械を対象に回転むらを低減し、定速性能を向上させる。試験の結果、十分に時間が経過し、学習が完了した状態では速度の回転むらが半減できた。

今後、さらに適用製品の拡大を図っていきたい。

参 考 文 献

(1) 大西公平, メカトロニクスにおける新しいサーボ技術, 電気学会論文集, Vol.107-D, No.1 (1987) p.83