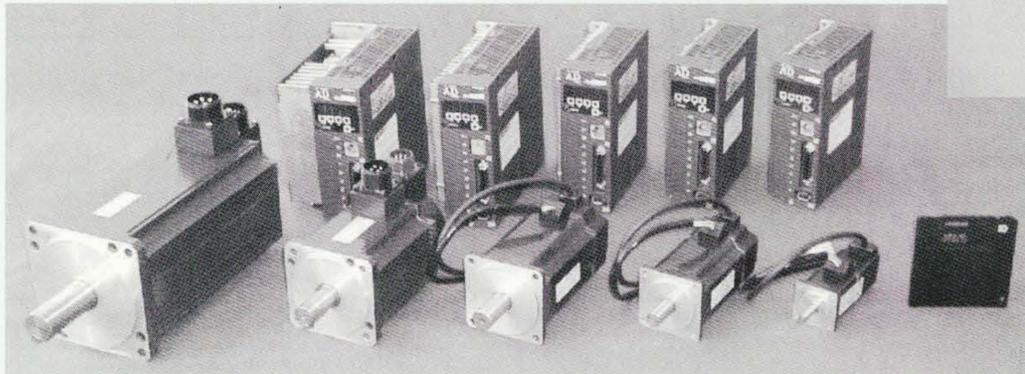


# 小型・高性能ACサーボドライブ「ADシリーズ」

High-Performance AC Servo Drive “AD Series”

酒井俊彦 Toshihiko Sakai 小林澄男 Sumio Kobayashi  
高瀬真人 Makoto Takase 松下鶴正 Tsurumasa Matsushita

新型ACサーボモータ「ADMシリーズ」(前列)と新型ACサーボアンプ「ADAシリーズ」(後列)  
(左から3 kW, 1 kW, 0.75 kW, 0.4 kW, 0.1 kW:右端のFDは寸法比較対照用)



多軸位置決めコントローラ「EHシリーズ」

注：略語説明 FD(Floppy Disc)

## 小型・高性能サーボドライブの製品群

「ADシリーズ」のサーボモータとサーボアンプは、機械の性能向上に不可欠な高性能ドライブ製品である。また、多軸位置決めコントローラとの組合せにより、さらに高機能化することが可能である。

近年、ACサーボドライブは、ネオジウム系永久磁石などの磁性材料技術の発展と、マイコンやパワー素子など半導体製品の小型、高速、高性能化、通信技術の発展、シミュレーション技術の発展などにより、大きく進歩している。例えば、ここ10年で容積は約 $\frac{1}{5}$ 、性能面では応答速度が約5倍となっている。日本電機工業会の調査によると、産業用ACサーボドライブのわが国のメーカー出荷台数は2000年度の実推で約100万台となっており、1991年度の約40万台に対して約2.5倍である。

一方、半導体製造装置をはじめとして、部品実装機や搬送機、加工機などの自動製造機械は近年目覚しく発展し、高性能化が進んでいる。ACサーボドライブに対するニーズは、高応答、高精度、小型、低振動、低騒音化はもとより、インタフェースのオープン化、試運転時間の短縮化、さらにグローバル化対応など広範囲にわたり、これがそのまま搭載機械の性能と価値を高めるものとなっている。

日立製作所は、これらの要求にこたえるため、分割コア高密度巻線技術による小型・軽量モータと、DSPを内蔵した32ビットシステムLSIによる高精度・高応答アンプから成る高性能サーボドライブ「ADシリーズ」を開発し、製品化した。

## 1 はじめに

日立製作所が開発した新型サーボドライブは、ますます高度化する半導体製造装置をはじめとする、高性能自動機械の駆動要素として必要な以下の特徴を実現することをコンセプトにしたものである。

- (1) 機械のスループット向上に寄与する高頻度・高速位置決めに適した小型・高出力化
- (2) 対象製品の微細化、高密度化に対応が可能な制御性能の向上、すなわち停止誤差の低減や回転むらの低減などのための回転の高精度化

- (3) オートチューニング機能による試運転時間の短縮化
- (4) グローバル展開に対応するネットワーク化と、米国のULやENなどの規格取得

ここでは、日立製作所が製品化した小型・高性能ACサーボドライブ「ADシリーズ」と、サーボドライブシステムを構築する上位コントローラへの取組みについて述べる。

## 2 小型・高性能ACサーボモータ「ADMシリーズ」

### 2.1 新型サーボモータ開発のねらい

上記のねらいを満たすため、新型サーボモータ「ADM

シリーズ」では、高密度巻線方式の採用、電磁界解析に基づく設計の高度化、高性能永久磁石の採用、高分解能エンコーダの採用など、新規開発技術を適用することによって従来機種に比べて大幅な小型化を図るとともに、制御性能を向上させている。主な特徴について以下に述べる。

## 2.2 特 徴

### (1) 小型・軽量化と低イナーシャ化

サーボモータの原理的構造としては、従来、回転子に永久磁石を用いた同期モータ、いわゆる「ブラシレス直流モータ」が採用されている。今回、「分割コア集中巻方式」により、固定子の寸法を大幅に小型化した。さらに、高精度巻線技術を新たに開発し、コイルの整列状態を極限まで高めることにより、ステータの出力密度をさらに向上させた。また、ロータについても、最新の永久磁石素材によって小径でも十分な磁束量を確保することにより、低イナーシャ化を図っている。これらにより、日立製作所の従来機に比べて同一出力特性でありながら、モータ質量比で35~50%、モータ容積比で29~48%、モータイナーシャ比で20~25%と小型・軽量化している。この比較を37ページの図に示す。

### (2) コギングトルクの低減

ブラシレス直流モータで避けられない特性として、「コギングトルク」がある。これは、回転角度に応じて磁気抵抗が変化するため生じる微小な回転トルク変動である。コギングトルクは、モータ制御に対してトルク外乱となるため、できるだけ小さいことが望ましい。このため、「ADMシリーズ」では、固定子のスロット数と回転子の極数との組合せを最適に設定することにより、この解決を図った。

集中巻ブラシレス直流モータでは、スロット数と極数

との組合せは3:2の整数倍とすることが一般的である。しかし、これ以外にも広い範囲の選択自由度があることがわかっている(日立製作所特許)。この知見を利用して、コギングトルクが最も小さくなる12スロット10極の組合せとした。これにより、コギングトルクを従来方式比で約 $\frac{1}{3}$ に減少させることができる。従来方式である12スロット8極とのコギングトルクの比較を図1に示す。

### (3) 低振動化・低騒音化

この開発では、電磁界解析の高度化も製品の高性能化に寄与している。特に、永久磁石のモデルを改良した解析ツールを適用することにより、コギングトルクの波形成分がきめ細かく把握できるようになった。これを設計に反映させて磁極歯先端形状の最適化を図った結果、振動騒音に寄与する成分を効果的に抑えることができた。

振動はV15以下、騒音レベルは、定格回転数無負荷状態で45 dB以下としている(750 W機の場合)。

### (4) 位置決め分解能の向上

位置検出素子として17ビット シリアル データ伝送方式の光学式エンコーダを搭載しており、高精度対応であるとともに、省配線化に適したものとしている。

表1 製品シリーズの構成と基本仕様

各種機械用途、幅広い負荷条件に対応するため、モータはまず3シリーズをラインアップした。

シリーズ名	出力範囲(kW)	定格回転数(最大回転数) (r/min <sup>-1</sup> )
ADMA 低慣性	0.05~5(13機種)	3,000(5,000)
ADMB 偏平	0.1~1(8機種)	3,000(5,000)
ADMC 中慣性	0.4~1(3機種)	1,500(2,000)

保護方式：IP55(軸貫通部、コネクタを除く)  
振動級：V15  
オプション：ブレーキ付き、オイルシール付き、ギヤ付き、絶対値エンコーダ付き、軸端形状

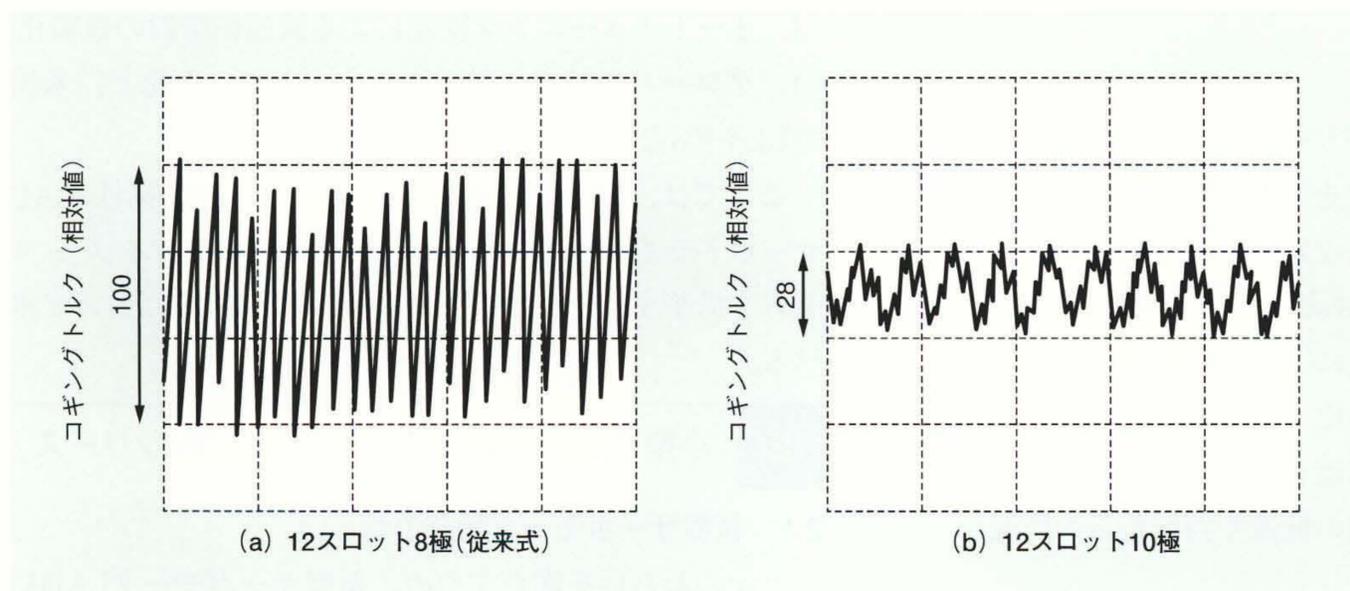


図1 従来方式と「ADMシリーズ」のコギングトルク比較  
スロット数と極数の組合せ最適化により、コギングトルクを約 $\frac{1}{3}$ に低減することができる(代表値)。

### 2.3 シリーズ構成と製品仕様

上記の特徴を反映した製品仕様を表1に示す。

このほかに、中慣性シリーズの1.5 kWから15 kW(8機種)の中容量クラスについても製品化対応が可能である。

## 3 高性能ACサーボアンプ「ADAシリーズ」

### 3.1 サーボアンプの概要

新型ACサーボアンプ「ADAシリーズ」では、高性能32ビットシステムLSIや小型パワー系部品を採用することにより、日立製作所の従来機種に比べて大幅な小型化を図り、機能・性能も飛躍的に向上させている。このサーボアンプの主な特徴は以下のとおりである。

- (1) 位置決め時間の短縮を図るため、速度制御応答周波数で500 Hzを実現
- (2) パルス列位置指令入力、アナログ速度指令入力、および多数の接点入出力信号(入力14点、出力8点)により、サーボシステム対応力を向上
- (3) システムの立ち上げと調整工数を低減するために、オンライン・オフラインのオートチューニング機能、状態モニタリング機能、および制御ゲイン設定機能を充実
- (4) 内蔵した表示器・オペレータ、またはパソコン上で動作する設定ツールにより、各種モニタリングやパラメ

ータの設定、操作が可能

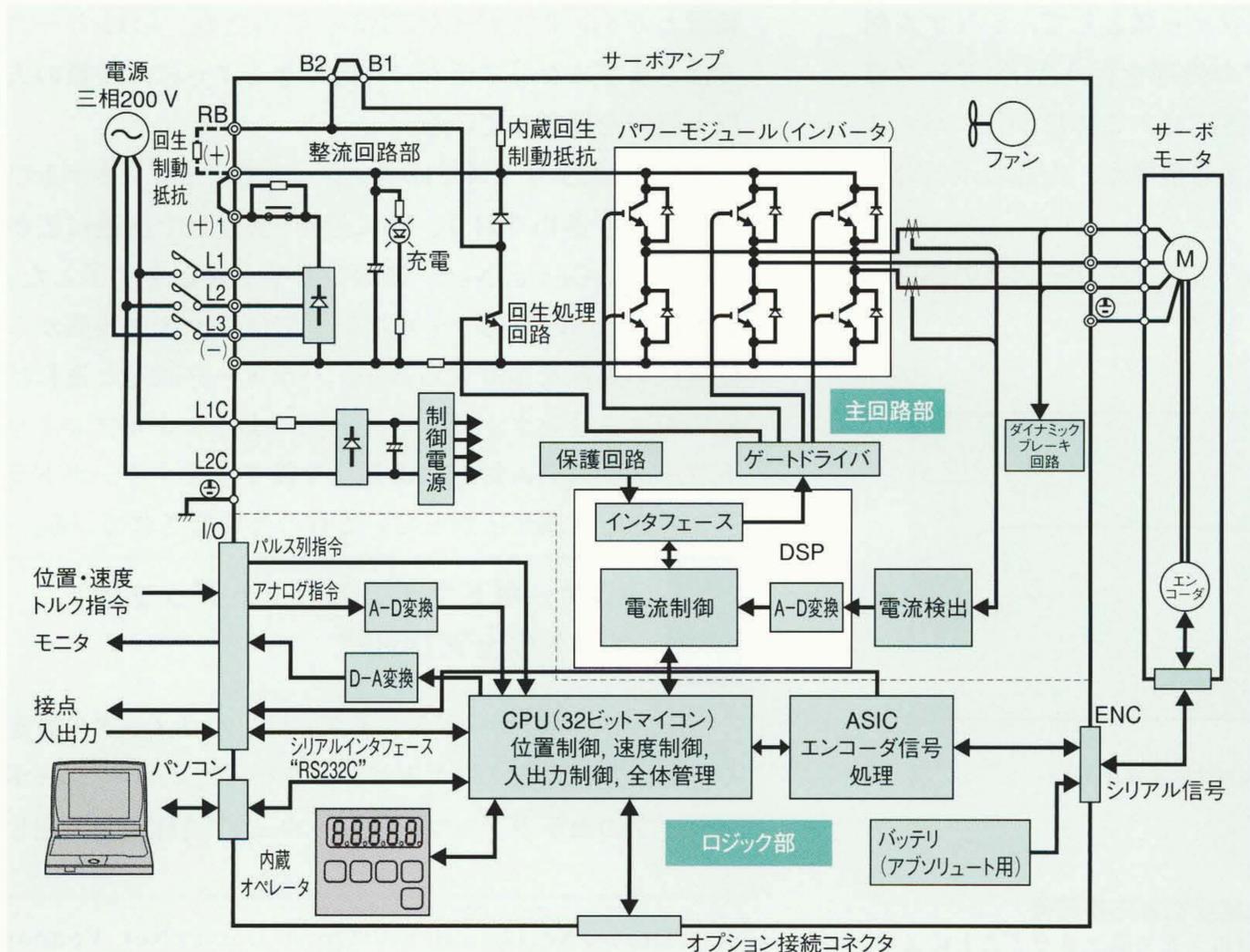
(5) EN規格(CEマーキング)とUL規格を取得

(6) オプションでオープンネットワーク対応やプログラム運転機能の搭載が可能

ADAシリーズのサーボアンプの内部ブロック図を図2に示す。

### 3.2 主回路部の制御

ADAシリーズのサーボアンプでは、高性能DSP(Digital Signal Processor)を用いて電流制御を含む主回路部の制御を行う。この電流制御では、モータ電流をロータの磁極に固定した $d$ 軸と $q$ 軸に分けて制御する直流ACR(Automatic Current regulator)方式を採用した。これにより、高速回転時でも高速で高精度な制御を実現している。DSPは、電流制御の結果としてモータ各相の電圧指令をPWM(Pulse Width Modulation)信号の形で出力し、これによってパワー素子のスイッチングを行う。このパワー素子に高いスイッチング周波数でも低損失なIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)素子を採用することにより、放熱部の小型化を図っている。DSPでは、この電流制御のほかに、回生制動回路の制御、ダイナミックブレーキ回路の制御、過電流検出や不足電圧検出などの異常検出を行っている。このように主回路部全体の管



注：略語説明  
 I/O (Input and Output)  
 M (Motor)  
 CPU (Central Processing Unit)  
 ASIC (Application Specific IC)

図2 サーボアンプの内部ブロック図  
 高性能システムLSIを中心とするロジック部と、電流制御を行うDSPを中心とする主回路部から成る構成により、小型・高性能を実現した。

理をDSPで集中して行うことにより、回路の小型化を実現した。

次に、主回路部とその上位制御系であるロジック部とは、常に制御指令や状態の情報をやり取りしなければならない。しかし、主電源に直結したDSPなどの主回路部と、人が接触する可能性のあるロジック部との間は、安全のために強化絶縁を採らなければならない。この絶縁回路をできるかぎり小型化するために、主回路部とロジック部の情報交換には双方向のシリアル通信を用いた。ただし、電流指令などの制御指令はできるかぎり高速で伝送する必要があるため、このシリアル通信は1 MHz以上の高速通信とした。

### 3.3 ロジック部の制御

ロジック部のCPUには高性能32ビットRISC(Reduced Instruction Set Computer)マイコンを採用することにより、速度制御と位置制御処理を高速のサンプリング周期で実行している。この結果、従来100 Hz程度であった速度制御応答周波数を500 Hz以上まで向上させた。ADシリーズで実際に測定した速度制御応答のデータを図3に示す。速度応答のゲインが-3 dBになるカットオフ周波数が530 Hzとなっていることがわかる。

ADシリーズのサーボアンプには、17ビット・回転の分解能を持つシリアル信号出力のエンコーダを採用した。このエンコーダインタフェースとして、シリアル信号を送受信し、受信データの処理を行うADシリーズ専用ASICを開発した。このASICは、このほかに、パルス出力位置モニタ信号を生成する機能や、内蔵表示器の制御機能も持っている。

サーボアンプを使うにあたっては、サーボ系の制御パ

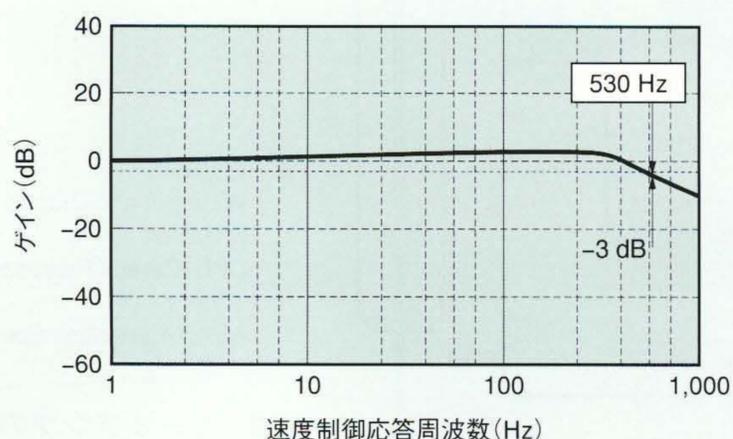


図3 ADシリーズで測定した速度制御応答結果

速度制御応答周波数を500 Hz以上まで向上させたことにより、位置決め時間を大幅に短縮することができる。

ラメータ設定が必須となる。この制御パラメータは、機械の慣性モーメントや剛性などに応じて決めなければならない。しかし、慣性モーメントなどの機械の諸定数がわかっていなかったり、実機でのばらつきなどがあるため、機械を動かしながら調整を行っているのが現実である。このような調整工数を削減するため、ADシリーズのサーボにはオフラインとオンラインでのオートチューニング機能を搭載している。特に、オンラインオートチューニングは、サーボドライブを運転しながら常に負荷の慣性モーメントを推定し、制御ゲインを自動的に負荷に適合した値に修正しながら運転する機能である。

ADシリーズのサーボアンプでは、以上のような標準機能のほかに、プログラム運転機能付きの製品も用意している。これは、位置決め運転命令や入出力制御命令、演算命令、プログラム制御命令などを使い、ユーザーがサーボの動作や機能をプログラミングできるようにするものである。この機能を用いることにより、ユーザーは特殊な機能もサーボ内に作り込むことができ、使い勝手を大幅に向上させたり、上位制御装置の負荷を大幅に軽減させることができる。

### 3.4 外部インタフェース

通常、ACサーボドライブは、上位制御装置と組み合わせたシステムで使用される。ここで重要なのが、上位装置とのインタフェースである。このため、ADシリーズではさまざまなシステムに対応できるように、多数の入出力信号を用意している。

また、ADシリーズではオプションでオープンネットワーク対応も進めており、特に近年FA分野で急速に広がりつつあるDeviceNet<sup>※1)</sup>にはいち早く対応を完了した。このDeviceNet対応サーボアンプでは、マスタ装置から位置決め運転を指令するほか、パラメータ設定と運転状態のモニタリングができる。上記のようなオープンネットワークシステム対応により、今後ますますサーボドライブの応用範囲が広がっていくものと期待されている。

## 4 ACサーボドライブのセットアップ用ソフトウェア“AHF”

ADシリーズのサーボドライブでは、パラメータの設定や位置、速度などのモニタリングを行うためのACサーボドライブのセットアップ用ソフトウェア“AHF”を用意し

※1) DeviceNetは、ODVA(Open DeviceNet Vendor Association)の登録商標である。

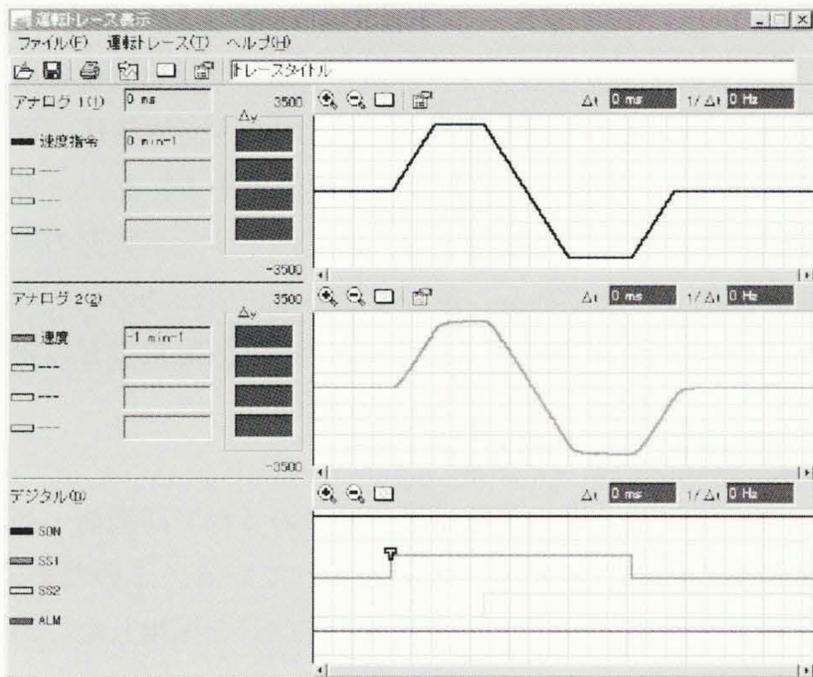


図4 運転トレースの表示画面例

パソコン上でサーボの動きを見ることができ、サーボ調整がしやすくなる。

ている。このソフトウェアはDOS/V<sup>※2)</sup>パソコン上で動作し、ADAシリーズのサーボアンプとシリアルインタフェース“RS-232C”で直接通信しながら、Windows<sup>※3)</sup>操作環境での操作を可能としたものである。この主な機能は以下のとおりである。

- (1) モニタ表示：サーボの運転状態、速度検出値、トルク指令値、入出力信号の状態、トリップ時情報などを1画面でリアルタイムに表示する。
- (2) パラメータ設定：サーボのパラメータを、リスト上で設定したり確認したりできる。また、設定データを一括でファイルへ保存したり、逆に再生してサーボアンプに設定することもできる。
- (3) 運転トレース：位置検出値、速度検出値、トルク指令値などの動作状態データや入出力信号の状態データをトレースし、グラフィカルに表示することができる(図4参照)。トレースを中断して表示するトリガ条件やデータサンプリング間隔なども自由に設定ことができ、特にサーボの調整時に威力を発揮する。
- (4) 試運転と調整：サーボ系単独で動作確認するためのジョグ運転や、原点復帰、オートチューニングなどを実行する。

このソフトウェアは、パラメータの設定作業や調整作

※2) DOS/Vは、日本アイ・ビー・エム株式会社の商品名称である。

※3) Windowsは、米国およびその他の国における米国Microsoft Corp.の登録商標である。

業を大幅に軽減し、サーボにとっては必須のツールである。また、上記機能の選択や各機能内での操作はメニュー選択方式としており、マニュアルなしで簡単に操作することができる。

## 5 上位コントローラ

サーボシステムを機械設備に採用する場合、サーボ機構を制御することに加え、機械全体を制御する上位装置が必要である。上位装置には、サーボ機構を主にコントロールする工作機用のNC装置などがある。しかし、一般機械では、PLC(Programmable Logic Controller)ベースの場合と、多軸で高機能なサーボ機構専用コントローラ装置と組み合わせられる場合が多い。このような2例について以下に述べる。

### 5.1 PLCをベースとしたサーボシステム

日立製作所の小型PLC「EH-150シリーズ」のCPU“EH-CPU448”は、プログラム容量48 kステップ、データメモリ容量51 kワード、演算速度最高0.1  $\mu$ s・ステップと高性能な装置である。同時に、各種モジュールも充実させており、サーボ機構を使用したシステムが容易に構成できる(図5参照)。これらのモジュールの用途別の特徴について以下に述べる。

#### 5.1.1 サーボモータ対応モジュール

サーボモータの位置決め動作を制御するための以下の2種類の位置決めモジュールを用意している。

##### (1) 1軸位置決めモジュール“EH-POS”

1軸の簡便なパルス列出力モジュールながら、最大周波数400 kパルス/s、位置決めデータ256点、S字加減速機能を持っているほか、絶対値エンコーダに対応しており、少軸のサーボシステムに適している。

##### (2) 4軸位置決めモジュール“EH-POS4”

1スロットながら、4軸を同時に制御できる。直線補間(4軸)、円弧補間(2軸)の補間機能を備え、アーチモーション・パス機能(近傍点通過機能)で多点(最大256点)を滑らかな曲線で動作できるなど、X、Y、Z、 $\theta$ といった多軸の各種機械に必要な機能を充実させ、コンパクト・高機能で安価なサーボシステムの実現を容易にしている。

#### 5.1.2 ネットワークモジュール

上位ホスト(パソコンや、ワークステーションなど)にサーボシステムに必要な各種制御データをダウンロードするほか、サーボシステムの状態モニタのためのイーサネットモジュール<sup>※4)</sup>やサーボアンプに直接接続することにより、簡単な位置決め動作が可能なDeviceNetモジュ

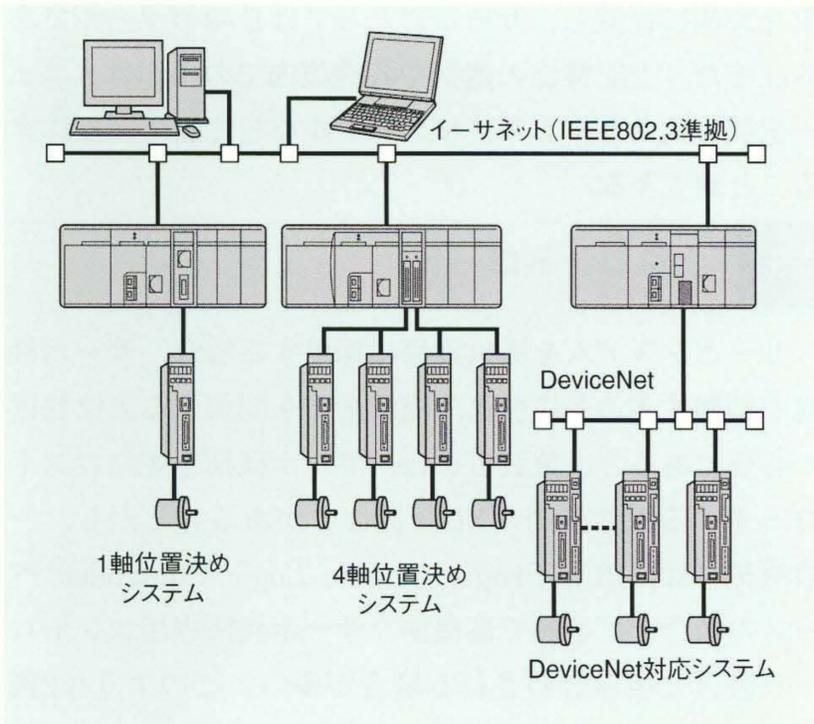


図5 PLCベースのサーボシステム例

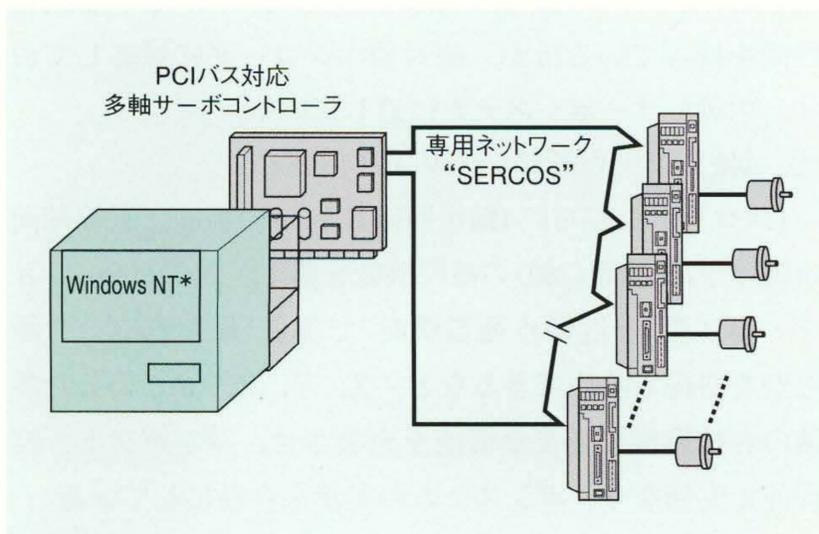
イーサネット経由の制御情報については、PLCがパルス列またはDeviceNet経由で各サーボに位置、速度の指令データを出す。

ール“EH-RMD”など、以下の各種ネットワークモジュールに対応している。

(1) イーサネットモジュール“EH-ETH”

IEEE802.3に準拠し、自動・イベント送受信機能と、日立製作所の専用プロトコル対応タスクコード通信の2種類の通信に対応している。

※4) イーサネットは、富士ゼロックス株式会社の商品名称である。



注：略語説明ほか

PCI(Peripheral Component Interconnection)

\* Windows NTは、米国およびその他の国における米国Microsoft Corp.の登録商標である。

図6 多軸サーボコントローラシステムの例

Windows NT搭載のPCのPCIバスにボードタイプの多軸コントローラを実装し、専用ネットワーク“SERCOS”を介して最大32軸/ボードまでサーボモータを制御する。

(2) DeviceNetモジュール“EH-RMD”

DeviceNet対応ADシリーズのサーボアンプと直接接続することにより、簡単な位置決め制御(S字加減速が可能)、速度、およびトルク制御が可能である。また、各種サーボパラメータの設定や、PLCからサーボ状態のモニタ機能も可能である。多軸で簡単な位置決めサーボシステムでの省配線やサーボアンプの分散配置などの要求に対し、安価なシステムが実現できる。

5.2 多軸サーボコントローラ

半導体実装設備や搬送設備分野での多軸で高機能・高性能な専用コントローラが求められている。このため、サーボ機構専用ネットワーク“SERCOS”を採用した。パソコンをベースにした高機能多軸コントローラシステムの例を図6に示す。

6 おわりに

ここでは、日立製作所の新型ACサーボドライブ「ADシリーズ」と、上位コントローラについて述べた。

サーボシステムの応用分野はますます広がっており、これに伴い、サーボドライブに対するニーズも多様化している。今後はいっそうの性能、機能、使い勝手の向上を図り、ユーザーのニーズにこたえる製品開発を進めていく考えである。

執筆者紹介



酒井俊彦

1985年日立製作所入社、産業機器グループ 開発本部 サーボ開発部 所属  
現在、サーボモータの開発に従事  
電気学会会員、計測自動制御学会会員  
E-mail : sakai @ gm.narashino.hitachi.co.jp



高瀬真人

1983年日立製作所入社、産業機器グループ 開発本部 サーボ開発部 所属  
現在、サーボ増幅器の開発に従事  
E-mail : takase @ gm.narashino.hitachi.co.jp



小林澄男

1970年日立製作所入社、産業機器グループ 開発本部 サーボ開発部 所属  
現在、サーボ増幅器の開発に従事  
E-mail : s\_kobayashi @ gm.narashino.hitachi.co.jp



松下鶴正

1979年日立製作所入社、産業機器グループ 開発本部 サーボ開発部 所属  
現在、多軸サーボコントローラの開発に従事  
E-mail : matsu @ gm.narashino.hitachi.co.jp