

資料

ACサーボモータコントローラの試作と動作試験

川島 崇宏*・大峠 忍*

1. 目的

労働人口の減少や働き方の変化といった社会情勢の変化へ対応するために日本の製造業にはより一層の効率化が求められており、それを実現するためには高いレベルでのFA (factory automation) の推進が必須となる。

FAのあらゆる場面において用いられるサーボモータは、ランニングコストまで含めて考えて低コスト化が可能なACサーボモータが今後主流となっていくものと考えられる。ACサーボモータはDCサーボモータに比較して駆動制御が複雑であるため、高度な自動化システムや生産ロボットを構築する際には高性能な制御装置が必要になる。

高度なFAシステムに用いられるACサーボモータの制御には市販の高性能なPLC (programmable logic controller) が使用されることが多い。市販の高性能PLCは汎用性が高く、機能も豊富で、多岐にわたる応用が可能である反面、必要のない機能が含まれたり、性能過剰になったりすることがあり、カスタムの自由度の面では不満が残ることも多くある。また、モータ自体の価格（よく用いられる0.4kW程度のもので3~5万円）に比較してそれを制御するためのPLCの価格が高い（20万円程度）こともACサーボモータ導入の障壁となっている。

ACサーボモータのコントローラ（以下サーボコントローラと表記する）は、汎用のマイコンとFPGAもしくはCPLDを用いて自作することができ¹⁾、PLCを用いるのに比べて大幅にコスト低減が可能である。そこで、本報では必要な機能のみに絞った安価なサーボコントローラを、汎用のマイコンとFPGAを搭載した17,000円弱のボードを使って試作し、動作試験を行ったのでその結果を報告する。

2. 方法

2.1 機能仕様

表1に、試作するサーボコントローラで制御の対象とするACモータ（山洋電気製R2AA06040FXS00M）の仕様を示す。このモータは、三相200V、60Hzの動力電源を使用する3000rpm回転の汎用的なACモータである。ロータの

表1 ACモータ（山洋電気製R2AA06040FXS00M）の仕様

項目	仕様
電源電圧	三相 C200V~230V 50/60Hz±3Hz
定格出力（連続）	0.4 kW
定格トルク（連続）	1.27 N・m
瞬間最大ストールトルク	4.8 N・m
定格回転速度	3000 rpm
最高回転速度	6000 rpm
定格電機子電流	2.8 A
瞬間最大ストール電機子電流	10.8 A
極数	10
ロータリエンコーダ分解能	2000 PPR (インクリメンタル)

回転位置検出器として2000パルス/回転の分解能を持つインクリメンタルエンコーダが付属している。出力はFAで用いられることの多い0.4kWとした。

図1に試作するサーボコントローラの機能（制御）ブロック図を示す。それぞれの機能は次のとおりである。

2.1.1 パーソナルコンピュータ（以下PCと表記する）

PCからUSBでサーボコントローラに目標位置指令のコマンドを送る。PC側はUSB、マイコン側はボード搭載のUSB-UART変換回路を利用してソケット通信を行う。

2.1.2 サーボコントローラ

速度軌跡計算器とPI制御の速度制御器、ベクトル制御による電流（トルク）制御器から構成する。電流制御系の外に速度制御系を構成する。

2.1.3 モータ駆動アンプ

三相交流入力の変圧器と三相のフルブリッジ・インバータによる構成で、各相の電流を測定するために電流検出抵抗を付ける。

2.2 ハードウェア全体構成

図2にハードウェアの全体構成を示す。構成要素は、サーボコントローラ、モータ駆動アンプ、サーボコントローラとモータ駆動アンプを中継するPM_IFボード、サーボコントローラ搭載のAD変換器への入力信号の中継をするADC-IFボード、ACモータである。サーボコントローラにはACアダプタを用いて直流電圧5Vの電源を供給する。

*次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクトチーム（現:電子・電気技術科）

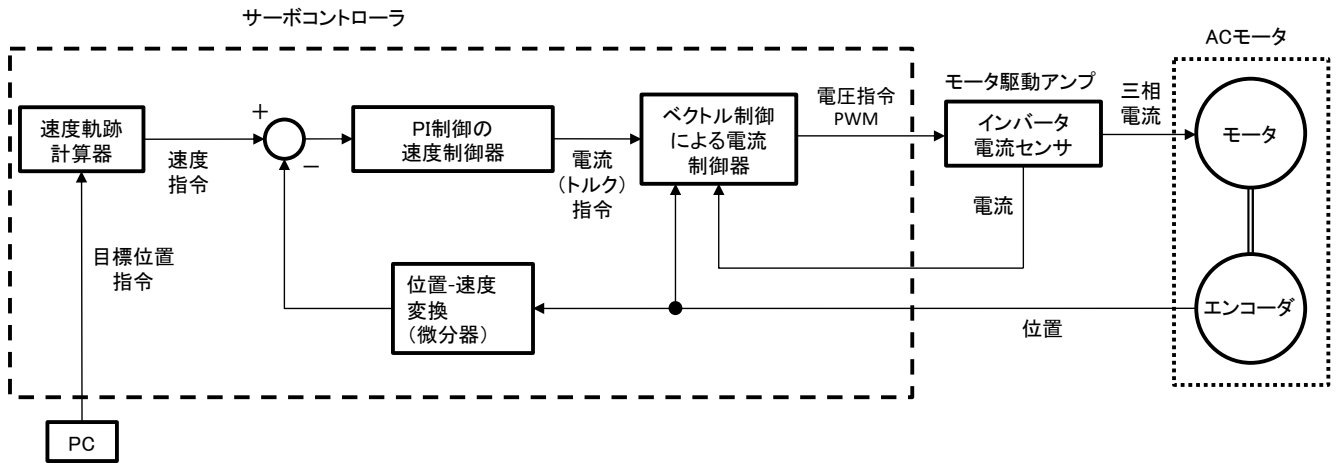


図1 サーボコントローラ機能ブロック図

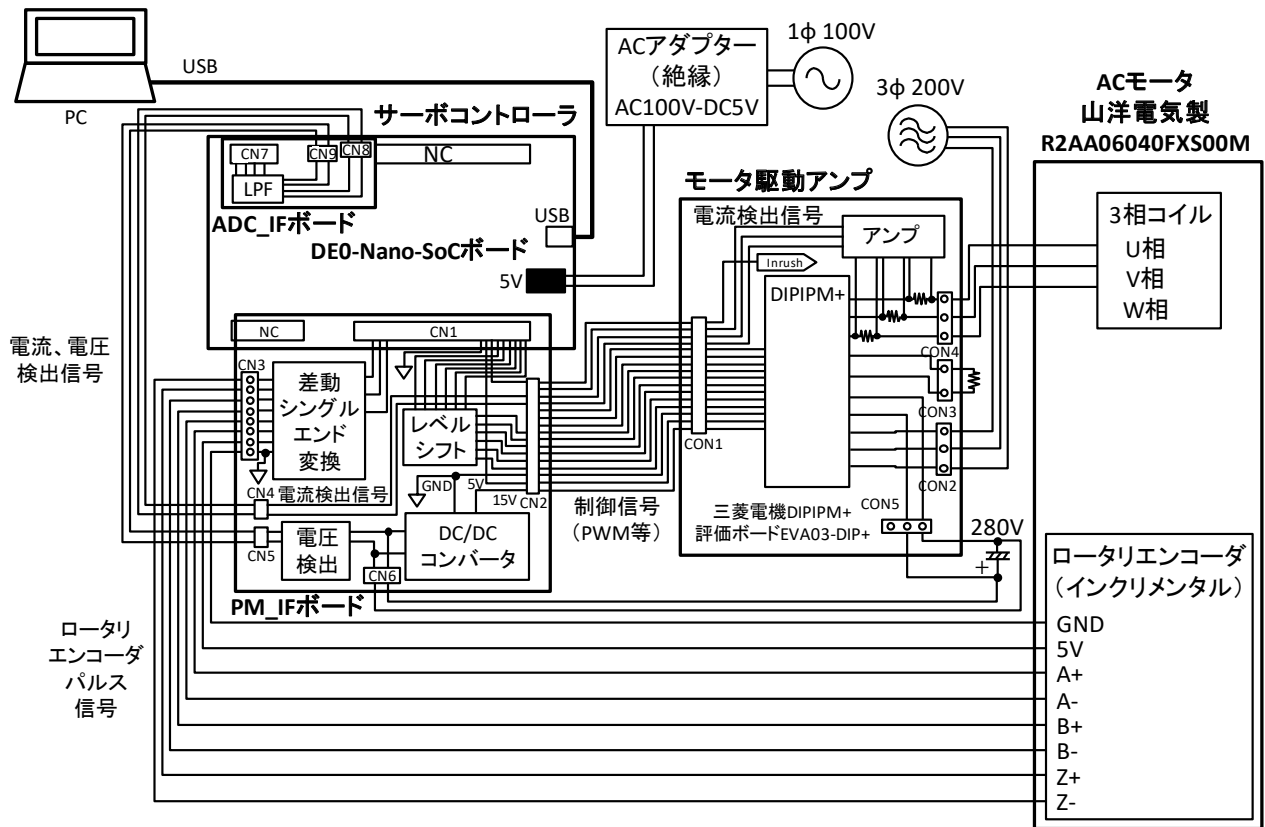


図2 ハードウェア全体構成

モータ駆動アンプには、モータの動力として三相200Vの交流電源を入力する。サーボコントローラには、Intel社（旧Altera社）製ARMマイコン搭載FPGAであるCyclone V SoCの開発ボードDE0-Nano-SoCボード（Terasic社）を使用し、目標移動距離の指令等のためPCとUSBケーブルで接続される。モータ駆動アンプには三菱電機製IPM（インテリジェントパワーモジュール）のDIPIPM+シリーズPSS15MC1FTとその評価ボードEVA03-DIP+を用いる。

図3にDE0-Nano-SoCボードを、表2.1、表2.2 にその仕様

を示す。Cyclone V SoCは、マイコンによるデジタル演算処理に加えて、FPGAでユーザが任意のデジタル回路を作成でき、処理をソフトウェアとハードウェアに最適に割り振ることで効率化や高速化が可能である。このボードには、FPGAのコンフィギュレーションデバイスやプログラマに加えて、イーサネット、micro SDカードソケット、UART-USB変換器といったマイコンの外部アクセスツールが搭載されている。その他にも、AD変換器や加速度センサ、LED、ボタン、スイッチなど多岐にわたる開発を

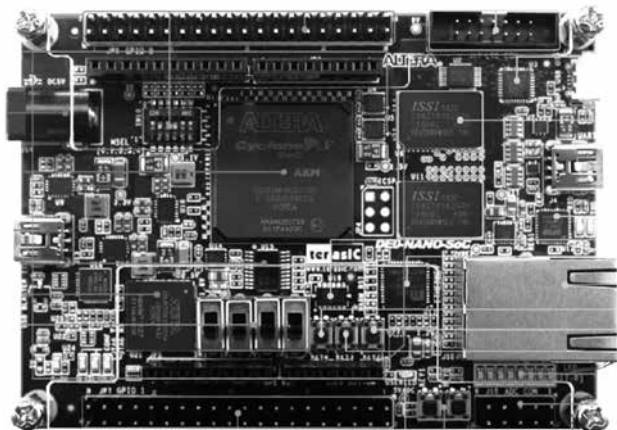


図3 DE0-Nano-SoCボード

可能とするツールが搭載されている。

2.3 ソフトウェア全体構成

図4にサーボコントローラのソフトウェアの全体構成を示す。構成要素はFPGAで作成されるモジュールによって実装される機能とマイコンのプログラムによって実装される機能の2種類に分かれる。それぞれの構成要素の機能ブロックの括弧の中に記載しているのは、FPGAの場合では機能を司るモジュール名、マイコンの場合では関数名である。FPGAで実装する機能は、PWM信号生成、AD変換、ロータリエンコーダパルスカウント、割り込み周期生成、ハードストップである。マイコンで実装する機能は、初期設定、電流ループ、速度ループ、UART通信処理、エラー処理である。

各要素の機能は次のとおりである。

2.3.1 FPGAで実装する機能

2.3.1.1 PWM信号生成

モータ駆動アンプの中の三相インバータを構成する6つの半導体スイッチングデバイスのスイッチングを制御するためのデッドタイム入りのPWM信号を、クロック信号のカウンタを用いて生成する。生成するPWM信号の周波数、デューティ、デッドタイムはマイコンから取得する。また、異常検出時の停止信号を受けた場合には、マイコンから受け取ったデューティの値に関わらずデューティ0のPWM信号を生成し、インバータを停止させる。

2.3.1.2 AD変換

コントローラボード上のAD変換器(LTC2308)と通信し、AD変換された電流検出信号及び電圧検出信号をマイコンで取得できるようにする。

2.3.1.3 ロータリエンコーダパルスカウント

モータ付属のロータリエンコーダから送られてきたA相、B相、Z相の3つのパルス信号をカウンタし、モータの回転速度やロータ位置についての情報源となるパルスカウント値を出力する。また、A相とB相のパルスの位相関係

表2.1 DE0-Nano-SoCボードFPGAサイド仕様

項目	仕様
デバイス名	Cyclone V SE 5CSEMA4U23C6N
ロジックエレメント数	40,000
ロジック用クロックソース周波数	50 MHz
組み込みメモリ	2,460 Kbits
PLL	5 個
ハードメモリコントローラ	2 個
コンフィギュレーションデバイス	EPCS128
オンボード USB-Blaster II (プログラマ)	JTAG Mode USB mini-B 接続
AD 変換器	LTC2308 (12-bit, 500ksps, 8ch, 0V ~ 4.096V, SPI 通信)

表2.2 DE0-Nano-SoCボードマイコンサイド仕様

項目	仕様
デバイス名	デュアルコア ARM Cortex-A9
搭載メモリ	1 GB DDR3
HPS 用クロック周波数	925 MHz
イーサネット	10/100/1000 Base-T (KSZ9031RN)
SD カード	micro SD カードソケット
UART	FT232R (UART-USB 変換), USB mini-B 接続
OTG	SMSC USB3300 USB micro-AB 接続
加速度センサ	ADXL345

から回転方向の判別を行い、回転方向をパルスカウントの符号に反映する。

2.3.1.4 割り込み周期生成

マイコンサイドで行う電流ループと速度ループの割り込み処理開始のタイミングを与えるパルス信号を、クロック信号のカウンタを用いて生成する。電流ループの割り込み処理(割込1)開始要求はPWM信号と同期して行い、速度ループの割り込み処理(割込2)開始要求はその20倍の周期(割込1要求の20回に1回の頻度)で行う。

2.3.1.5 ハードストップ

異常検出時にPWM信号生成器に停止信号を送り、迅速にモータ駆動アンプを停止させる。

検出対象となる異常状態は過電流、過電圧、電圧低下の3種類で、異常検出時にはエラーの種類に応じたエラーフラグ信号を出力する。

2.3.2 マイコンで実装する機能

2.3.2.1 初期設定

スイッチング周波数やデッドタイム、制御パラメータの初期値、保護機能の動作閾値など各種機能の初期設定を行う。

2.3.2.2 電流ループ

割り込み要求1の受け付け時に実行する。行う処理は次

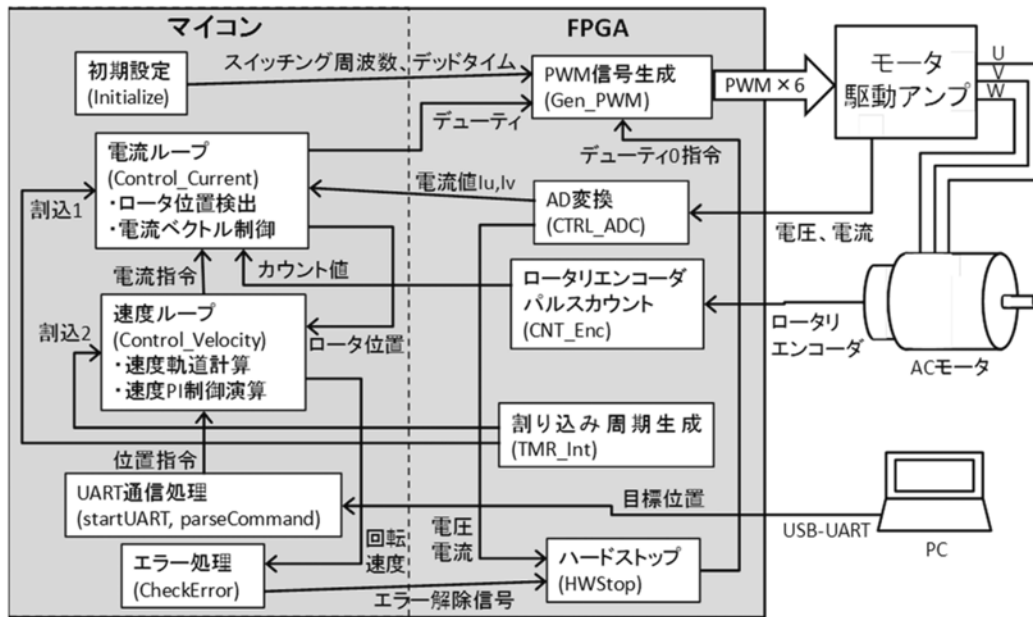


図4 ソフトウェア全体構成

のとおりである。

・ロータ位置検出

FPGAからロータリエンコーダパルスカウント値を取得し、現在のロータ位置（角度）を検出する。

・ロータ回転速度算出

現在と過去のロータ位置の差分をとり、その間の時間で除算することで現在のロータ回転速度を算出する。

・電流検出値取得

FPGAからU相電流値 i_u とV相電流値 i_v のAD変換結果を取得する。W相の電流値 i_w については、三相交流で成り立つ $i_u+i_v+i_w=0$ の関係より算出する。

・電流ベクトル制御演算

取得した各相電流値とロータ位置からベクトル制御¹⁾の座標変換を行い、d軸電流（界磁電流）、q軸電流（トルク電流）を算出する。算出した各軸の電流成分についてPI制御演算を行い、各軸の電流指令値に追従するために必要な各軸の電圧指令値を算出する。その後、d軸、q軸各軸の電圧指令値を逆変換してU相、V相、W相の各相電圧指令値を算出する。なお、今回の試作ではモータ制御の際にリラクタンストルクの活用や高速回転時の弱め界磁制御を行わないものとする。そのため、d軸電流指令値を0として、界磁への操作を行わないようにする。q軸電流指令値には速度PI制御演算で算出されるトルク電流指令値を適用する。

・PWM信号のデューティ設定

電流ベクトル制御演算によって算出された電圧指令値から各相のデューティを算出し、PWM信号生成器へ送る。

2.3.2.3 速度ループ

割り込み要求2の受け付け時に実行開始する。処理中に

割り込み要求1が生じた場合には電流ループの処理を優先して行い、電流ループ処理終了後に処理を再開する。

行う処理は次のとおりである。

・速度軌道計算

PCからUARTで送られてきた目標位置から、そこに至るまでの速度軌道を生成する。生成される速度軌道は目標位置の距離によって2種類ある。図5に、アクチュエータの移動速度上限値を V_{MAX} としたとき、速度を V_{MAX} に到達させるのに十分な長さの移動距離がある場合の速度軌道を示す。この軌道では加速期間（時間 t が $0 \sim t_1$ の期間）、減速期間（ t が $t_2 \sim t_3$ の期間）ともに正弦波状に速度変化させる。速度が V_{MAX} に到達してから減速期間に入るまでの間（ t が $t_1 \sim t_2$ の期間）は速度を V_{MAX} 一定とする。

加速期間と減速期間は目標位置に依存しない固定値としており、FAST、MIDDLE、SLOWの3種類設定できる。FASTは、加速期間、減速期間ともに0.5秒の速度軌道を生成する。MIDDLEでは1秒、SLOWでは2秒で加減速する。

目標位置までの距離が短く、速度が V_{MAX} に到達する前に減速する必要がある場合は、加速期間及び減速期間を据え置いて、最高速度を減少させることで移動距離を調節する。その場合の速度軌道を図6に示す。この軌道では速度一定の期間は存在せず、加速した後即座に減速し停止する間にアクチュエータが移動する位置が目標位置と一致するような最高速度 V_{MAX} を算出して速度軌道を生成する。

・速度PI制御演算

生成された速度軌道上の現時点の速度からロータ回転速度指令値を算出し、電流ループで算出された現在のロータ回転速度と差分をとり、PI制御の演算を行う。算出される制御量は、電流ループの電流ベクトル制御演算で使用する

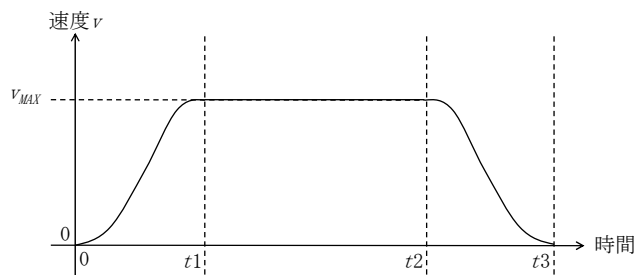


図5 移動距離が十分長いときの速度軌道

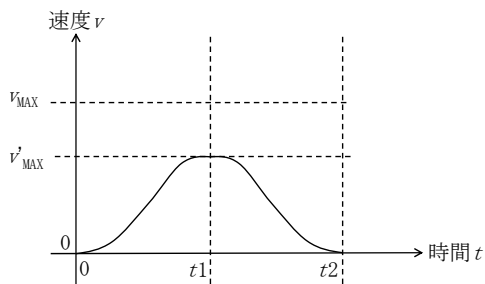
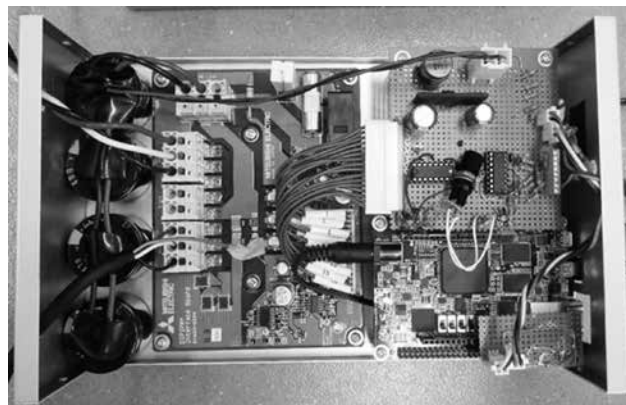
図6 移動距離が短く、 V_{MAX} まで加速できないときの速度軌道

図7 試作したハードウェア回路

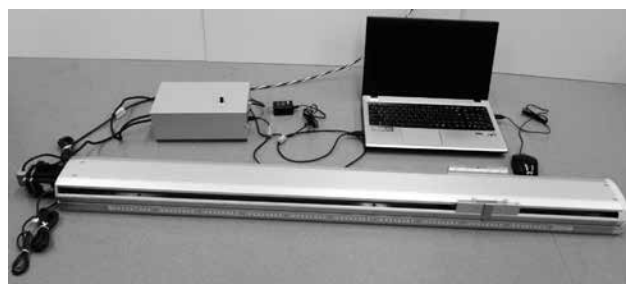


図8 電動アクチュエータ動作試験システム

トルク電流指令値となる。

2.3.2.4 UART通信処理

PCのUSBとコントローラボード搭載のUSB-UARTを介してUARTで通信し、PCから目標位置データを受け取る。startUART関数でUARTの通信を開始し、parseCommand関数でデータの受信と内容の解釈、データ抽出を行い、抽出したデータから目標位置を取得し、速度ループの速度軌道計算で利用する。

2.3.2.5 エラー処理

FPGAで過電流、過電圧、電圧低下の異常検出をした場合と、電流ループで算出されたロータ回転速度が上限を上回った場合に、コントローラを緊急停止状態に切り替えるとともに、発生した異常の種類をエラーフラグで通知する。

2.4 動作試験システム

図2に示すハードウェアの回路部分を実際に設計、試作したものの写真を図7に示す。回路はアルミ製の箱に入れ、底面にパワー半導体モジュールの放熱のためのヒートシンクを装着した。

ACモータはCKD株式会社製の電動アクチュエータETS-14-10-105-EM4NAANに装着した。表3にその仕様を示す。電動アクチュエータには矢印とスケールを取り付け、移動距離が測定できるようにした。図8に動作試験に用いたアクチュエータシステムの写真を示す。

3. 結 果

図9に加減速の速さMIDDLE（加減速期間1秒）の条件で、目標移動距離600mmを送信して動作試験を行った際

表3 電動アクチュエータETS-14-10-105-EM4NAANの仕様

項目	仕様
ボールねじリード	10 mm
ボールねじ外径	16 mm
ボールねじ精度等級	C7
ストローク	1050 mm
本体幅	135 mm
最大可搬質量	水平 88 kg, 垂直 22 kg
最高速度	250 mm/s (モータ回転速度 1500 rpm)
推力	694 N

の時間に対するモータ回転速度（回転数z [rpm]）及びアクチュエータ移動距離（位置y [mm]）のグラフを示す。このグラフはマイコン上で算出した値をUARTによる通信で受け取ったものをPC上のGUIで表示させたものであり、1200ms付近と3000ms付近に通信時に混入したノイズによるデータ受信異常によるものと思われる異常値が含まれていることが確認できる。

モータ回転速度は1秒（1000ms）間に緩やかなカーブで上昇して、電動アクチュエータの仕様上の最高速度1500rpmに到達した後1500ms程度の間一定制御が働いて1500rpm付近の値で推移し、その後1秒間で緩やかに下降している。200rpm以下の速度では、図5に示す目標軌道のように緩やかな速度変化をしておらず、加速時は0rpm付近から急峻に立ち上がっており、減速時は急峻に0rpm付近へ立ち下がっている。このことから、200rpm以下の低

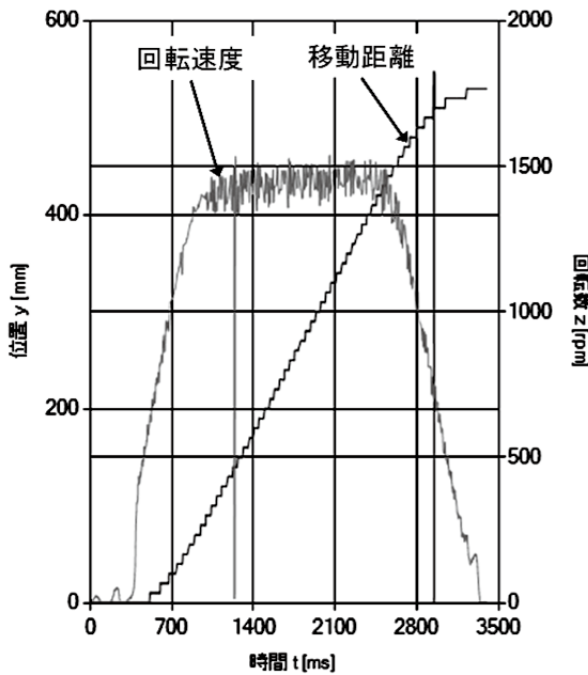


図9 目標移動距離600mmの時のモータ回転速度、移動距離軌道

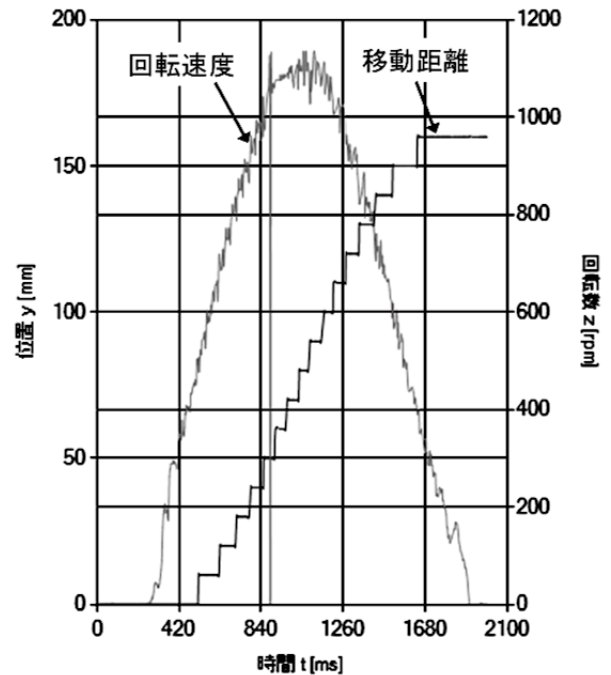


図10 目標移動距離200mmの時のモータ回転速度、移動距離軌道

速度領域を除いた速度域においては、設定した加減速の速度で図5に示すような速度軌道に沿った速度制御がおおよそ実現できていることが確認できる。一方、200rpm以下の低速度では精密な速度制御が実現できておらず、目標の速度軌道が実現できていなかった。

移動距離の軌道については、低速度領域以外では正弦波状に加速・減速が行われていることからおおよそS字カーブを描いていることがわかる。最終的な到達位置は500mm付近で、目標とする600mmまで至っていない。これは、加速の初期と減速の後期のモータ回転速度が200rpm以下の低速度領域において、速度が指令値に追従せず0付近にあったことで、その期間の移動距離が少なくなったことが主な原因と考えられる。

図10に加減速の速さMIDDLEの条件で、目標移動距離200mmを送信して動作試験を行った際の時間に対するモータ回転速度及びアクチュエータ移動距離のグラフを示す。このグラフにもデータ受信異常によるものと思われる異常値が900ms付近のところに含まれている。

モータ回転速度は、この場合も200rpm以下辺りの低速度領域で図6に示す目標軌道のように緩やかな速度変化ではなく、加速時は0rpm付近から急峻に立ち上がっており、減速時は急峻に0rpm付近へ立ち下がっている。200rpm以下を除いた速度域では正弦波状の緩やかな軌道で上昇して、その後すぐに下降しており、移動距離が短い場合も200rpm以下の低速度領域を除いて図6に示す速度軌道が実現できていることが確認できる。

移動距離については、この場合も目標値に対して大幅に不足している。原因は、図9の場合と同様に、加速の初期

と減速の後期のモータ回転速度が200rpm以下の低速度領域の期間における移動不足と考えられる。

以上の結果から、現状の制御システムでは、速度が200rpm以下程度の低速度になると精密な速度制御が困難になり、加速期間初期と減速期間後期に速度が指令値に追従しないため、アクチュエータが目標位置まで到達しないという問題が発生した。市販されているACサーボモータの目標位置到達性能は通常誤差1%未満にはなるため、本報の試作サーボコントローラの位置制御の誤差20%程度ではあまりに誤差が大きく、実用化するためには大幅な性能改善が必要となる。一般的に、モータを定格回転速度に比較してかなり低い回転速度で精密に制御することは困難であるため、目標位置から生成した速度軌道への追従に頼るのみの現状の制御方法ではこの課題の解決は難しいものと考えられる。そのため、今後は目標位置軌道も生成し、現在位置との誤差を検出して、その誤差を補正するように速度指令値を補正するような制御方法に改める必要があると考えられる。

謝 辞

本報で報告した試作を行うに際して、資材提供及び有益なご助言、ご助力を頂きました島根自動機株式会社、ホシザキ株式会社、株式会社イワタクリエイト、並びにGUIの作成、提供をいただきました名城大学に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 石島勝. 小型ACサーボ・モータの制御回路設計. 第3版, CQ出版, 2014, 200p.