

組込みコンピュータを用いた教育用サーボモータ制御 システムの開発について

岸山 誠司 白土 浩 久良 修郭

近畿大学産業理工学部
sira@fuk.kindai.ac.jp

概要

本稿では、本質的な制御理論に対する理解を深めるという観点から、モータ制御系を、構成要素の相互的な関連を通して学ぶことができる実験用教材について述べる。組込みコンピュータを用いた実験装置を製作し、装置内のアンプ、コントローラ、モータ制御装置の挙動を組込みコンピュータ上のプログラムにおける各種パラメータにより変化させることで、実環境下において制御挙動が不安定になる事例を再現し、その原因について言及する。

1 まえがき

大学や高等専門学校教育で学ぶ制御工学では、制御対象をモデル化した上で、制御理論に基づいて伝達関数を導出し、コンピュータシミュレーションにより入出力特性を解析するというフレームワークを学ぶ。すなわち、例えば、モータ制御の場合、制御コントローラや各種センサによる情報をボード線図上に記述することで伝達関数を導出し、MATLABやC言語などによりプログラミングすることで動特性を検証している。

実環境下におけるモータ制御では、モータ特性や制御コントローラの仕様、アンプ特性等が制御理論で予測される動作を超えた挙動を示すことが多い。さらに、制御理論は連続値系を対象とした理論であるが、コンピュータ制御では組込みコンピュータ等を用いた離散値（サンプル値）制御となるため、挙動を安定的にするための手法は経験的要素として試行錯誤的にならざるを得ないという問題がある。

制御理論では線形性を前提として各種理論が構成されている。このため、産業用ロボットのメカトロサーボ系制御を対象とした種々の制御理論における基本原理についても、大学等で学ぶ初等制御理論で十分説明できる。しかし、実際の制御装置（例えば、

モータ・制御コントローラ・アンプ）の動作特性における線形性の補償には重大な技術課題を含むため、線形区間は入出力の一部のみとなる。このため、市販装置を利用した技術開発では、各種装置における線形性の保証範囲の検証と非線形動作領域がシステムに及ぼす影響について理解する必要がある。

以上のように、現状のサーボ系システムにおいて、制御装置特有の特性や非線形特性、コンピュータ制御（サンプル値制御）に起因する制約が数多く存在するため、理論通りに動作することは少ない。

本稿では、理論と実際の現象を比較することで本質的な制御理論に対する理解を深められるのではないかと、という観点から、モータ制御系システムを、構成要素の相互的な関連を実機演習を通して学ぶことができる実験用教材の開発を目指す。すなわち、まず、位置制御系システムを対象とし、組込みコンピュータを用いた実験装置を製作する。そして、装置内のアンプ、コントローラ、モータ制御装置の挙動を組込みコンピュータ上のプログラムにおける各種パラメータにより独立可変とすることで、実環境下において制御挙動が不安定になる事例を再現する。最後に、その原因をパラメータの組合せやプログラムの調整により実現できることを確認する。

表1 モータ (UGRMEM-02SA) の仕様

定格出力 [W]	60
定格回転速度 [r/min]	3000
定格電圧 [V]	25
定格電流 [A]	3.9

表2 組込みコンピュータ (T-SH2MB; SH7145F) の仕様

クロック周波数 [MHz]	50
キャリア周波数 [KHz]	25
PWM 信号のデータ幅 [bit]	10

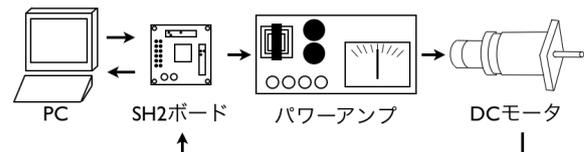


図1 実験用モータ制御システムの構成図

2 実験用モータ制御システムの構成

本システムでは、慣性負荷が取り付けられた永久磁石型の直流サーボモータを制御対象としている。ここに、モータの仕様に関しては表1に示す通りである。モータには速度発電機および、A, B相方式の光学式パルス発生器が取り付けられている。組込みコンピュータにより実現されるモータの位置(回転角)制御系のハードウェア構成を図1に、ブロック線図を図2に示す。また、組込みコンピュータの仕様を表2に示す。図2に示すようなモータの電流ループまでを考慮した制御系は現在のメカトロニクス機器制御用のモータ制御方式としては最も一般的な構成である。位置制御系は比例制御、速度制御系は比例積分制御、電流制御系においても比例積分制御となっている。制御系構成において、位置、速度、電流のループはすべてソフトウェア制御となっており、速度、電流ループについてはハードウェアでも実装できるようにしている。

ソフトウェアサーボの実現において重要なサンプリング時間間隔は組込みコンピュータ (SH2) に実装されているタイマの割込み信号を利用している。また、このタイマの時間間隔はソフトウェアの設定により変更することが可能である。このことは、制御実験の教材としては欠かすことのできない機能である。制御系の特性に大きく影響する電力増幅器にはここでは線形電力増幅器を利用している。このアンプへの電圧指令は10ビットのPWM信号を使用している。

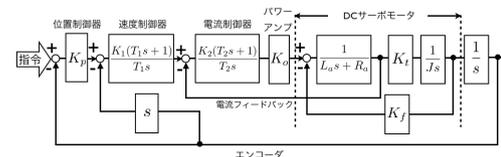


図2 制御系のブロック線図

3 制御系の近似と制御定数

図2に示すブロック線図をサンプル値制御として実装する場合、多くの遅れ要素を考慮する必要がある。制御系全体の伝達関数としては高次系となることが推測される。しかし、高次系のシステムを理論的に議論する事は非常に難しく、殆どの場合、シミュレーションと実際の挙動が一致しない。このことは、実際のサーボ系システムの動作において高次部分の精密な近似に基づいた制御よりも、初等制御理論でも議論可能な1~2次程度の近似されたシステムを対象とする制御理論の方が良好となる可能性があることを示唆している。事実、ブロックの簡略化や詳細部の省略による伝達関数の低次元化が提案されており、実際のサーボ系システムにおいて、制御最も簡略化された1次系の制御理論で十分であるということからも裏付けられる [1]。

高次の制御系を1次として近似する場合、制御定数 (K_p) の決定が重要となる。これは図2, 3中、 K_p は同一名変数であるが、後者では簡略化された

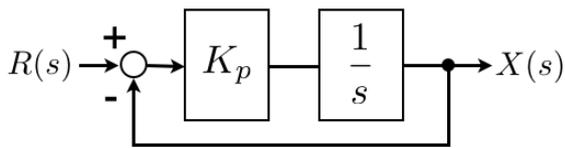


図3 1 フィードバック系のブロック線図

ブロック線図部分の情報が内在するためである。

次に制御定数の決定法の一例を示す。まず、ステップ状の指令に対する応答の整定時間を測定する。整定時間の1/4が制御系の時定数となることから制御系のゲイン K_p が求められる。

4 検証実験

制御理論と実環境で発生する差異について、大きく分けて3つの原因が考えられる。1つ目はモータに起因するものである。モータを実環境下で動作させる場合、クーロン摩擦およびモータのすべりなどがこれにあたる。2つ目はパワーアンプに起因する差異である。パワーアンプの入出力特性を原因とし、出力が飽和することにより制御性能に影響を及ぼす。3つ目がコントローラに起因するものである。コントローラからはPWM(Pulse Width Modulation) 信号が出力されているが、デューティ比と出力電圧との間に比例関係が成り立たない場合がある。またサンプル値制御する場合、サンプリング時間の設定も重要となる。以降、この3つの原因に関して、検証実験により確認する。

4.1 モータにおける非線形応答

ここでは、モータを実環境下で動作させる場合に発生する問題について検証する。図4にモータに対し、PWM 指令により駆動電圧を正負なめらかに変動させたときのモータ回転数を示す。図中、横軸はPWM 指令、縦軸はモータ回転数を表す。図において、PWM 指令が38%～59%の範囲において駆動電圧が変化しているにも関わらずモータ回転数が変化していないことが読み取れる。このように、本来、モータ回転数は電圧に対して比例関係であることが線形性の条件であるにも拘らず、実際には非線形応答を含むことが分かる。また、この領域は正負

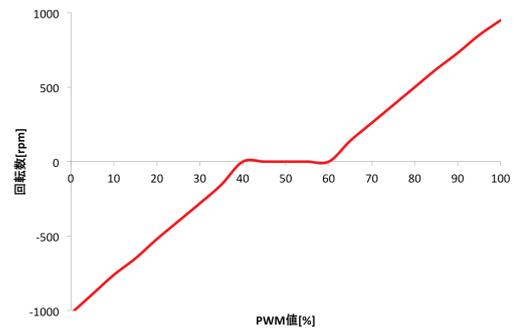


図4 PWM と回転数の関係

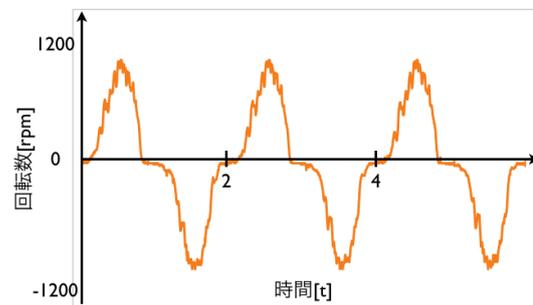


図5 内部ループ未実装時の時間応答波形

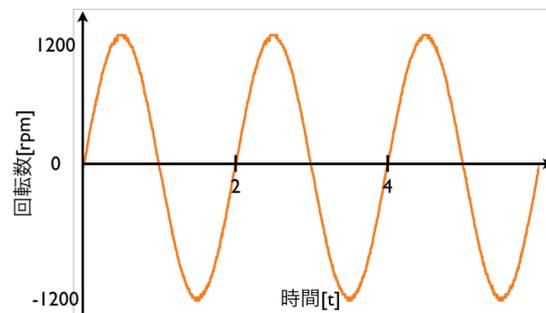


図6 内部ループ実装時の時間応答波形

非対象である点に注意されたい。

図5では、PWM 指令値として sin 波を用いた際の時間応答を示す。図中、横軸は応答時間、縦軸は回転数となっている。図から分かるように、先ほどの非線形応答部分が時間応答においても現れていることが分かる。このような、非線形応答については、位置制御系の内部ループとして電流制御ループを加えることで図6の様に補償可能である。

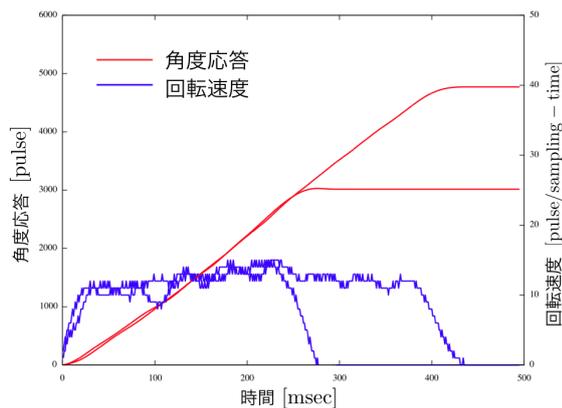


図7 位置制御系における非線形応答

4.2 パワーアンプにおける非線形応答

市販のモータ制御システムにおいて実際に起こる非線形動作について検証する。本実験では、PWM信号の出力に制限をかけることによりモータの回転速度を制限している。このことは、最大回転数より大きな指令値を与えても、一定速度以上は回転しないことを意味する。実験により観測した非線形動作の波形を図7に示す。この制御系において、モータの回転速度が線形動作の範囲内であれば、回転角応答は非線形動作となることがわかる。このような非線形動作を含む制御系は制御理論で議論することができないため、実験による観測波形から現象の意味を明確にする必要がある。

4.3 コントローラにおける非線形応答

コントローラにおいては、サンプリング周波数の決定が非常に重要である。久良らは1次近似されたシステムにステップ状の指令値を入力する場合を対象とした設定法を提案している [2]。しかし、図8に示すような2次フィードバック制御系において、同様の設定を適用した場合、速度制御ループにおいて断続的なトルク変動が生じ、モータ振動に繋がる可能性がある。

この場合、位置制御ループのサンプリング周波数を高くすることでトルク変動幅を抑えられる。

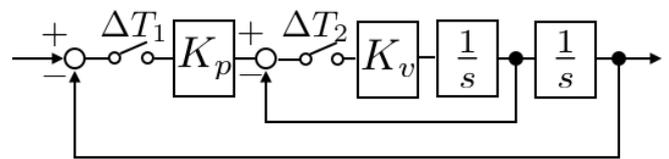


図8 2次フィードバック系のブロック線図

5 まとめ

本稿では、本質的な制御理論に対する理解を深めるという観点から、サーボ系システムを、構成要素の相互的な関連を通して学ぶことができる実験用教材として製作した。そして、組込みコンピュータで実行させるプログラムの可変パラメータとして、装置内のアンプ、コントローラ、モータ制御装置の挙動を制御することで、実環境下において起こりうる制御挙動が不安定になる事例をそれぞれ再現した。さらに、これらの現象を改善するための方策についても提示し、適用することで挙動が安定することを示した。

参考文献

- [1] 中村政俊, 後藤聡, 久良修郭:”メカトロサーボ系制御”, 森北出版 (1998)
- [2] 中村政俊, 香田英之, 久良修郭:”サーボ系による連続経路制御のサンプル値制御における適正サンプル周波数の決定法”, 計測自動制御学会, **Vol.28**, 5, pp. 649 – 651(1992)