

●中央職業能力開発協会会長賞

# モータサーボシミュレーションソフトウェア

埼玉県立川越高等技術専門校 電子制御システム科 **藤田 敦**

### 1. はじめに

本シミュレーション教材は筆者が平成12～13年度の2年間、職業能力開発総合大学校研究課程在籍中に、研究の一環として試作したソフトウェアである。当時、筆者が抱えていたテーマの1つは学校を修了した在職技術者の継続技術教育を、どのように支援していくかということである。

モータ制御を専攻した筆者は、工場の生産ラインを担当する社会人に対して、モータサーボ技術教育の導入時にその基本を理解させられる教材を開発し、指導者へ提供することを考えた。本報告では教材開発の目的、試作教材の特徴、機能および評価について述べる。

### 2. 教材開発の目的

工場では生産ラインがFA (Factory Automation) 化され、精密な位置決めを必要とする機械が並び、生産の合理化が図られている。生産ラインの設計や管理を担当する立場の技術者は、機械の動きを制御するための制御装置や基本的制御方法、すなわちサーボモータを使った位置決め制御技術を理解しておく必要がある。

本教材開発の目的は、モータサーボ技術を学習するうえで必要となる教授内容を、学習者に対し理解させるためのシミュレーション教材を開発し、技術教育指導者へ提供することである。

ここで、学習者としては、生産ラインの設計や管理をする製造設備技術者やモータ制御について学習途上の学生を想定している。モータサーボ技術を学習するうえで、モータ理論、制御回路、制御理論の基本的知識を有していることが望ましい。

### 3. モータサーボ技術の教授内容

モータのサーボ技術を学習するうえで必要となる教授内容は、基本的内容と発展的内容とに分けられる。基本的内容を学習した後、発展的内容を学習することが導入教育として良いと考えている。

基本的内容の主要な点は以下の5点とした。

- (1) 3相のブラシレスモータを等価DC (Direct Current) モータとして扱う。

機械の動きを制御するモータでFA (Factory Automation) 機器に利用されているものとしては、主要なものにブラシレスモータがある。ブラシレスモータを深く理解するには、DCモータの理解から始めたほうがよいと考えている。ブラシレスモータは3相AC (Alternating Current) モータ、あるいは等価DCモータの2つのモデルとして表すことが可能である。3相ACモータモデルの扱いは、3相交流の制御について考えなければならないため、学習者にとってその内容を理解することは難しい。一方、等価DCモータモデルの扱いは、単線に流れる電流や電圧の制御を考えるだけでよいため、3相モータの扱いに比べ学習者にとっては理解しやすい。

(2) モータの主要パラメータを計測すること。

モータの特性に影響を与えるパラメータの種類、物理量や、その機能を理解させる。

(3) PID制御技術。

これは、モータ制御の安定性、速応性、定常特性を最適化するために広く使われている技術である。

(4) タコジェネレータによる速度検出。

速度検出器にはタコジェネレータとエンコーダがモータ制御に使われる。エンコーダは位置検出器としての機能も備えているため、モータ制御では主としてエンコーダが使われている。しかし、エンコーダによる速度検出は電子回路を使った信号処理が含まれるため、学習者にとってはタコジェネレータに比べその内容を理解することは難しい。そこでエンコーダの速度検出機能は発展的内容で扱うことにする。一方、タコジェネレータはモータと同じ形状を持つため、スリム化の限界から最近では使われないが、速度検出器としてはきわめて敏感に反応し、優れた基本性能を有している。タコジェネレータはエンコーダに比べモータ制御が容易なため速度検出機能の学習のために基本として扱う。ただし、エンコーダによる位置検出は、モータ回転量に応じてパルスを出力するだけの機能であり、学習者にとっては理解しやすいため基本として扱う。

(5) FA現場における位置決め制御システム。

モータの位置決め制御システム構成は、基本形の構成が決まっているのでこれを理解させる。よく使われている位置決め制御法としては、目標位置と現在位置を比較して、その偏差量を安定にゼロに近づける方式がある。この方式は偏差カウンタ方式と呼ばれている。

基本的内容を学習した後の発展的内容の主要な点は以下の2点とした。

(1) 3相ブラシレスモータを3相ACモータモデルとして扱う。

ブラシレスモータを3相ACモータとみて、微分方程式によってできるだけ厳密に過渡解析を行う。

(2) エンコーダによる速度検出。

F/V (Frequency/Voltage) 変換を使った復調技術

やデジタルカウンタを使った計測方式があり、その重要性や問題点を体得させる。

## 4. 教材の検討

### 4.1 現在ある教材の問題点

モータサーボ技術教材としては、シミュレーションで学習するものや、実際にモータを回してサーボ技術を学習するものが主としてある。企業の研修や大学等の授業でよく使われているのは、取り扱いの手軽さと使いやすさから、前者のシミュレーション教材であると思われる。この教材には製品化されているもの、例えばMATLABやフリーウェアとして無償で使えるものが存在する。これらをシミュレーション教材として活用するとき以下の問題点がある。

- (1) 制御量信号をアナログからデジタルへ変換するときの操作性が複雑で使いづらい。
- (2) 3相交流を扱う伝達関数表現が事実上不可能。
- (3) 教授内容が精選されていない。

### 4.2 開発教材のコンセプト

本教材のコンセプトは以下のとおりである。

- (1) 前章で記したモータサーボ技術の基本的および発展的内容を総合して学習できる。
- (2) イラストやアニメーションを取り入れたもので学習者にとって理解しやすい。
- (3) モータサーボ技術教育の導入時に活用できる。

## 5. 試作したソフトウェア

### 5.1 本シミュレーション教材の全体構成

図1は本教材フォームの全体構成図である。中央真ん中のフォームが起動時に開くメインフォーム (frmMain) で、マウスでフォーム内を選択すると各フォームが開く。各フォームの名称と機能は、左上: frmMotor (モータ選択やパラメータ設定), 左中: frmSensor (速度および位置センサのパラメータ設定), 左下: frmControler (DCモータモデルの制御系パラメータ設定), 中央下: frmComputer (位置

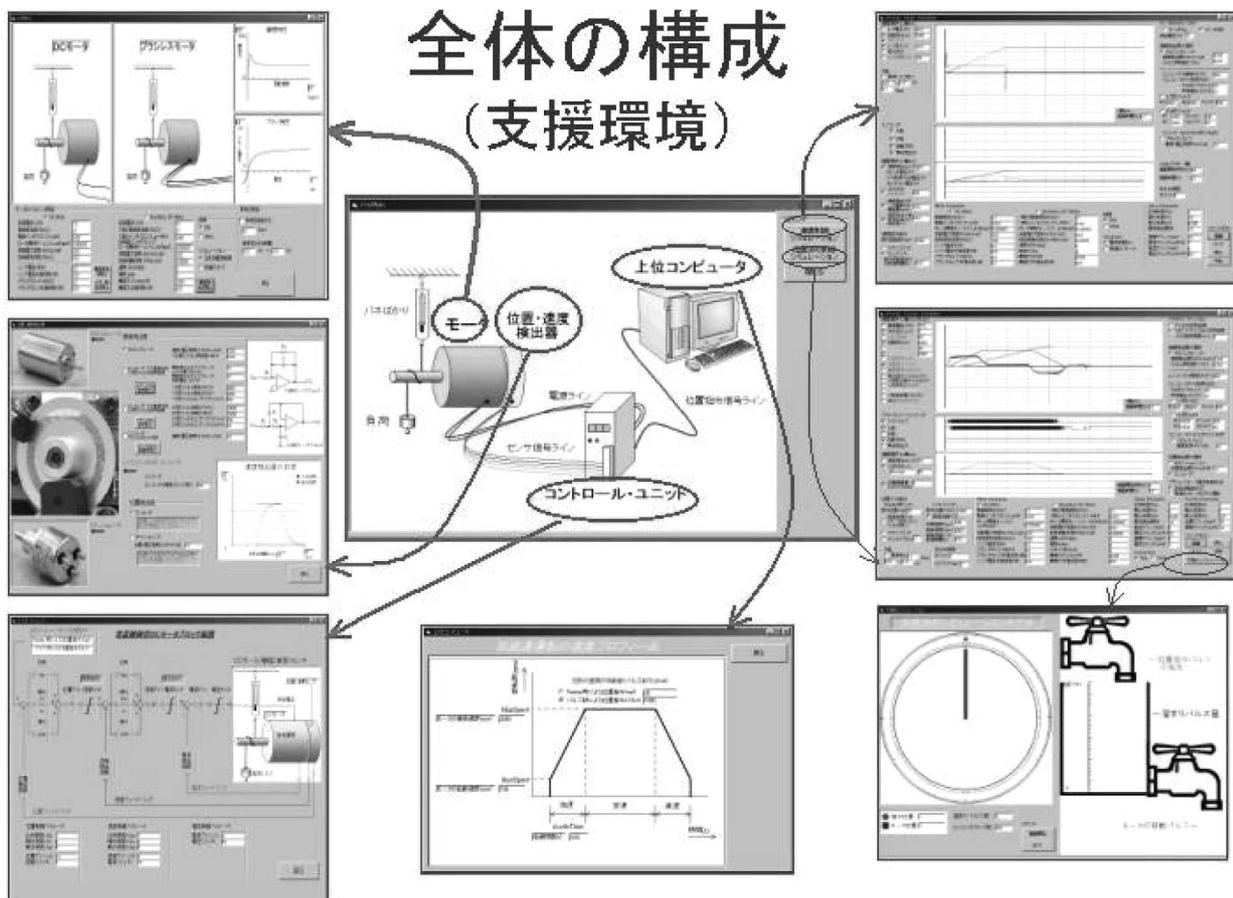


図1 本教材フォームの全体構成

指令と速度プロフィールを設定), 右上: frmSpeedSim (速度制御シミュレーションを行う), 右中: frmPosSim (位置決め制御シミュレーションを行う), 右下: frmSim (可視化シミュレーションを実行する)である。

## 5.2 本シミュレーション教材の主な特徴

(1) 本教材で扱うモータをブラシレスモータおよびDCモータとした。

ブラシレスモータとDCモータは、主要パラメータ ( $R_a$ : 巻線抵抗値,  $J_M$ : 慣性モーメント,  $K_E$ : 逆起電力定数) を仲立ちとして密接な関係がある。また、本教材ではブラシレスモータの特性を理解するためには、その基本であるDCモータの性質を理解することから始めることが適切としている。

図2は本教材のシミュレーションの基盤になるDCモータの等価回路の一例である。図中に現れる6個

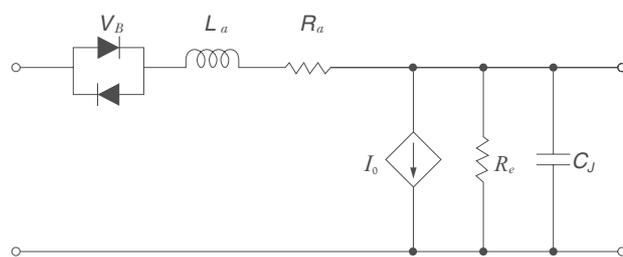


図2 DCモータの等価回路

の要素の意味と重要度について述べる。

- ①  $V_B$ : ブラシ電圧降下。最近のDCサーボモータにおいてはかなり低い値であり、初歩的な段階では無視できる。ブラシレスモータを使う場合は駆動回路のトランジスタにおける電圧効果に相当するが、MOSFET利用の回路を使う場合には素子のON抵抗に相当し、巻線抵抗の一部としても扱える。
- ②  $L_a$ : インダクタンス。数十mH以下であれば、無

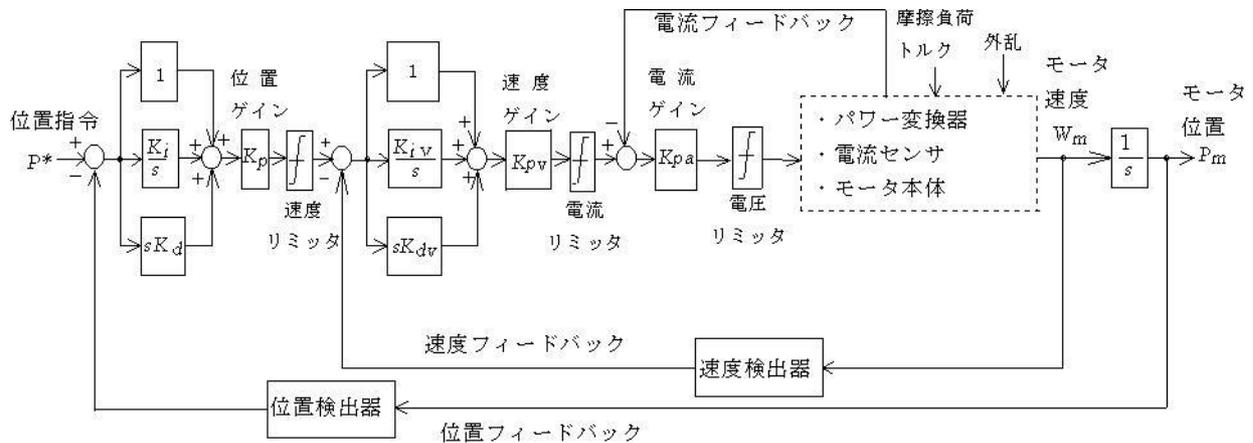


図3 本教材におけるDCモータのPID-PID位置決め制御システム構成図

視（0とします）しても特性に影響を与えないパラメータである。

- ③  $R_a$ ：巻線抵抗。重要なパラメータである。
- ④  $R_e$ ：粘性抵抗。粘性摩擦を等価の電気抵抗として表すパラメータである。
- ⑤  $C_j = J_M / K_E K_T$ ：慣性モーメントの影響を等価静容量で表すパラメータ。逆起電力定数にも関係し、動特性や制御特性に関して重要なパラメータである。
- ⑥  $J_M$ ：慣性モーメント。重要なパラメータである。
- ⑦  $K_E$ ：逆起電力定数（=トルク定数 $K_T$ ）。トルク定数と等価でかなり重要なパラメータである。
- ⑧  $I_0$ ：電流シンク。モータの鉄心内で起きている磁気ヒステリシスとクーロン摩擦に打ち勝つために必要な電流であり、本教材では適切な値を設定しておく。

ブラシレスモータは、3相ACモータモデルとして正確に扱うことも可能であり、等価のDCモータモデルとして（近似的に）扱うこともできる。本教材としての基本的な手法は等価DCモータモデルとするが、3相モータとしての扱いも可能とする。3相ACモータモデルとして扱った場合のパラメータを、等価DCモータモデルのパラメータに変換することは容易であり、本教材では各モデルの選択に応じてパラメータの変換を行っている。

パラメータ計測の詳細、および数値計算で用いられるブラシレスモータモデルとその微分方程式については、著書である文献<sup>1)</sup>に記載したものを適用し

ている。

- (2) 制御系の構成をPID-PID位置決め制御システムとした。

目標位置でモータを安定に停止させるには、まず、モータ速度を制御する必要がある。そのためには、図3の速度制御系にPID制御要素を組み込み位相補償を行うことを考えた。本教材では速度制御シミュレーションを独立して行うことが可能である。次に、モータの位置決めを制御するために、図3の位置制御系にPID制御要素を組み込んだ。位置および速度制御系にそれぞれPID制御要素があるため、このようなシステムはPID-PID制御システムと呼ばれる。

位置、速度それぞれのフィードバックループで位相補償の効果を確認できることは、P・I・Dそれぞれの働きを学習者が理解するうえで重要であると考えた。また、各フィードバックループに、速度・電流・電圧のリミッタを追加した。これは実際のハードウェアシステムを考えた場合、モータや制御回路には仕様が定められていて、シミュレーションと実際を関連づけることは、教育的に重要であると考えた。

以上の検討から構成された本シミュレーション教材の位置決め制御システム構成図を図3に示す。ここで、 $K_p$ 、 $K_{pv}$ 、 $K_{pa}$ は位置・速度・電流の各制御系の比例ゲイン、 $K_i = 1/T_I$ 、 $K_{iv} = 1/T_{IV}$ は積分係数、 $K_d = T_D$ 、 $K_{dv} = T_{DV}$ は微分係数、 $s$ はラプラス変換記号( $d/dt$ )、 $T_I$ 、 $T_{IV}$ は位置・速度制御系の各積分時間、 $T_D$ 、 $T_{DV}$ は位置・速度制御系の微分時間、 $s$ または $s$ 分の1

は、微分または積分方程式をラプラス変換したときの演算子である。位置指令は $P^*$ 、モータの位置は $P_m$ 、モータの速度は $W_m$ である。 $P_m$ は $W_m$ を積分して得られる。デジタル化への対応では、位置指令の $P^*$ 、モータ位置の $P_m$ にアナログ量からパルス列への変換処理が、本教材では組み込まれている。

図4に本教材で適用されているブラシレスモータの制御パラメータ設定フォームを示す。

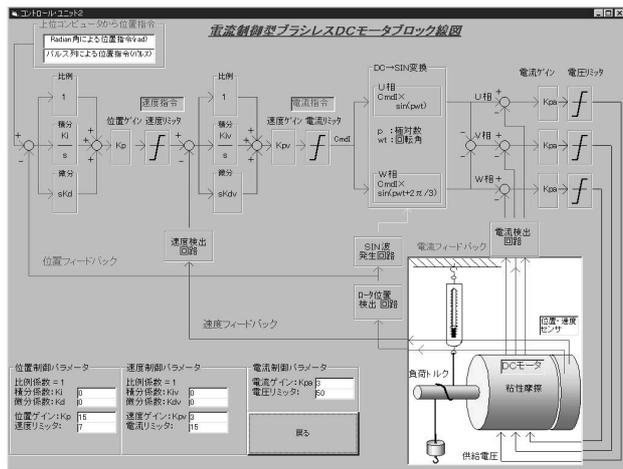


図4 電流制御形ブラシレスモータ位置決め制御システムフォーム

(3) 偏差カウンタ方式位置決め制御の働きをアニメーションにより可視化した。

偏差カウンタを使った位置決め制御の概念が理解できていないモータ制御の初心者のために、図5に示す可視化シミュレーション環境を準備した。モータの動きを可視化することにより、自らが設定したパラメータ値の効果を確認することができる。パラメータ値の設定と効果の確認を繰り返すことにより、各パラメータがモータ制御に及ぼす影響について、理解することができるようになる。図5の左側イラストにおいて、外側の目盛りのある円形が位置、赤い丸印が指令位置、内側の目盛りのある円形がモータを表し、モータの位置は青の棒印である。可視化シミュレーションを実行すると、位置指令に対するモータの追従性や位置決めに対する定常偏差や振動現象などが確認できる。

図5の右側イラストは、指令情報であるパルス列

を「水流」に置き換え、偏差カウンタの機能を理解しようとするものである。図上部の水道の蛇口からは位置指令に当たる水が出され、その水流の太さがモータ速度指令の大きさを表す。上部水道から出された水は、偏差カウンタの機能に当たるタンクに溜まる。その後、下部水道の蛇口からはモータの動きに当たる水が出され、その水流の太さがモータ速度の大きさを表す。モータが動き出すにはまずタンクに水が溜まる必要があり、タンクに入る水の量とタンクから排出される水の量が均衡したところで、タンクの水の高さはほぼ一定化する。この高さに影響を与える制御系の要因は位置制御ループのゲインである。アニメーションにより、偏差カウンタやゲインの働き、モータ起動時の遅れの現象をイメージとしてとらえることができる。

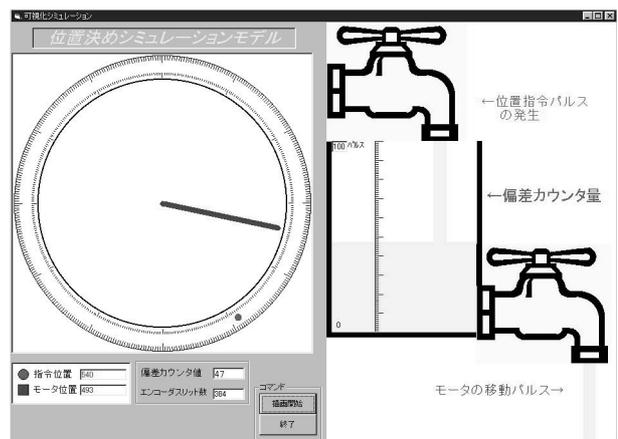


図5 可視化シミュレーションフォーム

### 5.3 教材の機能

本教材の機能は以下のとおりである。

- (1) モータの種類：(a) 3相ACモータとして扱ったブラシレスモータ（スター・デルタ結線，正弦波駆動方式），(b)等価DCモータとして扱ったブラシレスモータ，(c)DCモータ
- (2) 速度センサ：(a)タコジェネレータ，(b)エンコーダ（F/V変換方式1次・2次遅れフィルタ，デジタルクロックパルスカウンタ方式）
- (3) 位置センサ：(a)ポテンシオメータ，(b)インクリメンタル式エンコーダ

- 
- (4) 制御系：(a)電流制御系，(b)速度制御系，(c)位置制御系（速度と位置制御系ではPIDパラメータおよびリミッタの設定が可能）
  - (5) 指令：(a)速度：①ステップおよびランプ入力（アナログ），(b)位置：①パルス入力（台形波速度指令），②アナログ入力（台形波速度指令），③ステップおよびランプ入力（アナログ）
  - (6) 外乱：(a)負荷トルクの設定，(b)コギングトルクの設定
  - (7) 表示：(a)モータ特性（電圧，電流，回転速度，トルク，速度・位置指令），(b)エンコーダおよび単安定出力，(c)タコジェネ出力，偏差カウンタ量出力，偏差アナログ量出力
  - (8) シミュレーション：(a)速度制御，(b)位置決め制御，(c)位置決め制御における可視化

## 6. 試行および評価

本シミュレーション教材はモータサーボ技術の基本的内容を学習者へ理解させられるかどうかを検証する目的に評価を行った。

評価の方法は本教材を使った研究授業を行い，その後アンケート調査を実施した。研究授業の実施要領は下記のとおりである。

- (1) 期 日：平成13年11月7日(水) 13:00～16:00
- (2) 場 所：職業能力開発総合大学校
- (3) 人 数：13人
- (4) 被 験 者：コンピュータ制御高度化研修に参加した公共職業訓練施設で電気・電子・制御・情報・メカトロニクス系の訓練科を担当する職業訓練指導員。指導員を被験者とした理由は，モータ制御の基本的知識があり，指導者として本教材を活用したときの評価も期待できるためである。
- (5) 実施方法：偏差カウンタ方式について記載された資料を配布し，資料の読後，プリアンケート調査を実施した。その後，筆者の指導による本教材を用いた授業を行い，最後にポストアンケート調査を実施した。

質問内容・結果等は文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

結果として以下のことが認められた。

- (1) 本教材はモータのサーボ技術を学習するうえで必要となる基本的内容を，学習者へ学習させることができる。
- (2) 本教材はモータを安定に制御することや偏差カウンタの機能を使った制御方法について理解を深めることが可能である。
- (3) 本教材のみでは各制御要素の役割は理解できても，その効果の理論的な解釈を学習者へ与えることは困難である。
- (4) 本教材は図と活字のメディアとの併用により，教育的効果が向上することが明らかになった。
- (5) 市販製品のMATLAB Simulinkとの比較では，モータ制御の初心者には導入段階において本教材のほうが理解しやすいことが認められた。しかし，モータ制御の経験者からは，必ずしも本教材のほうが理解しやすいことは認められていない。

## 7. おわりに

本シミュレーション教材は各パラメータを入力するだけで瞬時にモータ出力過渡応答を確認できることから，短期間に理解を深める教材として広く活用できると思われる。

しかし，本教材はF/V変換における信号処理の扱いをはじめ，いくつか改善点を残す試作段階でもある。今後，残された改善点を順次解決することにより，本教材の成果が能力開発施設等の教育に貢献できるよう努力していきたい。

### 〈参考文献〉

- 1) 見城尚志他：「実験とシミュレーションで学ぶモータ制御」，日刊工業新聞社，第5章，2001.
- 2) 藤田敦：「モータサーボ技術教育の導入に関する教材開発」，職業能力開発総合大学校 研究論文，2002.

