考える情熱を育てる制御理論教育の実践報告

— 図解と実験を併用した体験学習の紹介 —

Practical Report of Control Theory Education to Teach Thinking Enthusiasm
— Introduction of Learning System to make Diagrams and Experiments —

常 深 信 彦^{※1} 本 田 昭^{※2} 城 谷 聡 美^{※3} 長 崎 仁 典^{※4}
Nobuhiko TSUNEFUKA Akira HONDA Satomi SHIROTANI Yoshinori NAGASAKI

自動制御理論は広い技術分野を下支えする基礎工学に属し、本来は実学でありながら、現実には単位系をもたない複合的な教理式が多いため、一般に難解な学理とされてきた。この工学教育に対する“苦手意識”は以前から企業内技術者にもみられたが、今日のような“思考なしにパソコンで解析できる”時代をむかえ、一層顕著になってきた。この報告は、企業内教育の立場から技術者が自ら“苦手意識”に挑戦し、自ら考え、自ら体験し、自ら感動する制御理論に関する実践教育の紹介である。

キーワード：体験学習、実践教育、サーボ制御、自動制御理論、工学教育

Automatic Control Theory which belongs to basic engineering for supporting broad technical fields and which is fundamentally practical science is considered to be generally complicated field as it has actually lots of multiple formulas with no unit. Though “weak subject awareness” has existed among in-house engineers before, it becomes further more conspicuous now since the age “problems can be solved without thinking by computers” has come now. This thesis reports practical training of engineers challenging “weak subject awareness” and trying to think, experience and to be impressed on his or her own.

Keywords : Learning with Experience, Practical Education, Servo Control, Automatic Control Theory, Engineering Education

1. はじめに

サーボ制御技術は、ハードでもソフトでもない姿の見えない技術であり、制御理論の本質は、物理学に依った基礎工学である。ところが学理としての制御理論は、各種の制御対象に適用させるために汎用理論として作られているので現実性に乏しく、しかも表1の波形解析数理解マップからもわかるように高度な数理解析が多い。さらに、この道を目指す学生や技術者にとって難解と感じさせるのは、座学のみによる学習、すなわち制御の本質を、数理解算のみに頼って理解させようとする教育プロセスに問題があると痛感している。その意味でこの論文は、これまでの制御技術教育に対する警鐘であり、同時に筆者らが推進してきた“図解と実験による考える体験学習”についての実践教育の報告である。

2. 考える体験学習への誘導

教育問題は常にその時代の社会環境が背景にある。

長年この問題に係わってきた筆者らの観点からすると、理工系教育は特に時代背景の影響が大きいように思う。第1の問題は、“基礎学力の低下”である。制御理論の理解には高校数学の十分な習得が絶対条件となる。この問題については、8. おわりにで論じることにする。第2の問題は、“考える情熱を持って挑戦する若者”が激減している現実だ。

確かに技術的背景も時代とともに変わってきている。彼らには学ぶべきことも多い。たとえば、アナログ制御、デジタル制御、伝達関数法、状態空間法など、同じ制御理論の中でも思考体系の異なったものを数多く学ばねばならず、初心者が戸惑ってしまうのも当然だ。だからといって考える努力なしに制御系設計ソフトをもてあそばれては困る。そこで教える側が各論に先立ち、これから学ぶ制御理論の体系を示し、学習者が自ら考え、夢を持って学んでいくように誘導していくのが教師側の責任である。

3. 制御技術教育の理念

制御技術そのものには学理体系はない。強いて言えば、自動制御理論の実現技術がそのものである。したがって、制御技術教育とは、難解な制御理論を“いか

平成14年12月18日受付

※1 株式会社日立製作所 技術研修所

※2 本田昭制御技術指導センター

※3 システムシミュレーション研究所

※4 株式会社デンソー・デンソー工業技術短期大学校

表 1 制御理論解析用波形解析数理マップ

解析対象波形	連続時間関数 $f(t)$		離散時間関数 $f(NT)$	スペクトル密度関数
	$F(s)$	$F(\omega)$	$F(z)$	$\phi_{yy}(\omega)$
解析法	伝達関数 過渡応答 ラプラス変換	伝達関数 周波数応答 フーリエ変換	離散伝達関数 パルス列応答 Z 変換	ブラックボックス スペクトラム応答 相関関数計算

に具体的に、実用的に、いかに実感を持って理解させていくか”に尽きるのである。その点を教育理念と考え、次のアルゴリズムを策定した。

(1) 具体的な制御対象や制御システムを想定し、カリキュラムを進める。(例えばモーターの速度制御)

(2) 学習対象となる、制御機能やシステムはすべて図式構造で表し、図式化されたブロックをもとに数理式を組み立てる。

(3) 理論解析は、開ループと閉ループを同時併行で進め、図式考察と数理考察両面から理解を深める。

(4) 可能なかぎり、演習とモデル実験により考える体験学習を行う。

4. 考える体験学習の環境づくり

目に見えない制御理論の挙動を実感するためには、実機で実験するに勝るものは無いが、現実に製品の実機を教育の場で利用することは難しい。そのため学習用自動制御実験装置を自ら開発し、市場にも供給した。

現在もこの実験装置は、大学や企業内教育に広く利用されている。更に本装置を用いた専門技術書を出版し、研修に役立てている [1][2][3]。図 1 に学習用自動制御実験装置の構成を、表 2 に本装置を使って学習できるアイテムを示す。

自動制御シミュレータ

モーターユニット

図 1 学習用自動制御実験装置

表 2 学習用実験装置で体験できるアイテム

(1) 制御対象の動特性計測	(2) P制御, I制御の理論と実験	(3) 安定性解析
(4) ハイゲイン位置決め制御	(5) 非線形特性の体験実験	(6) 安定性改善実験
(7) 離散系サーボ実験	(8) 外乱抑圧の論理と試験	(9) ハイテクの基礎実験

5. サーボ制御技術教育実践の報告

ここで紹介する内容は、企業内で実施している短期間タイプの技術教育の基礎コースである。およそ30時間（3～4日）を前提とし、実験装置は3人／式を標準としている。研修テーマは、図2に示すフィードバック制御システムとし、研修スタイルは、座学、実験、演習を基本としている。制御対象は、実験装置の関係から、図1中に示すDCモーターユニットとし、具体的なテーマには、サーボ制御システムを選んだ。

具体的な実践カリキュラムには、導入から最後まで一連の体系があり、6. 1から6. 5に学習のステップを対応させてある。

5. 1 制御対象の過渡応答と伝達関数

- (1) DCサーボモーターの入出力の動特性は電気系のLCR回路で近似できる。したがって、図3(1)のDC入力を印加した時の過渡特性は、図3(2)のモーターのステップ応答特性と同じ波形になる。
- (2) 図3の過渡応答特性の数理解は、微分方程式の特別解から誘導されるが、これがはなはだ厄介なため、制御理論では演算子 s を用い、図3(3)、(4)のように図から直接、伝達関数を求める。すなわち微分方程式を経由させない。

このように制御系の機能図を演算子 s で表わせば、後はブロック図から計算のみにより伝達関数が求まる。よって、演算子 s の持つ意味が理解できていれば、微分方程式を前段階でたてる必要もなく、特別にラプラス変換計算を行う必要も無い。

図2 フィードバック制御システムの基本構造

5. 2 制御対象とコントローラー

自動制御の目的は、制御対象を思い通りにコントロールすることにある。そのためには、前項のように制御対象（ここではモーター）の機能性能を把握し、その上で制御目的を実現するコントローラーを設計する。同じ制御対象に対しても制御目的が違えばコントローラーの設計思想も変わる。このように制御の目的とコントローラーの関係は不可分なため、現実のシステムではより複雑になってしまい、初心者戸惑わせる。

そこで本教育では、基本制御技術に立ち戻り、制御理論に忠実な速度追従を目的とした(1)比例制御、(2)積分制御、続いて(3)不安定系位置制御、(4)安定問題の理論と解析、そして最終的に(5)高速安定化サーボシステムの設計とコントローラーの設計へと学習ステップを進めていく。

6. 学習ステップの紹介

6. 1 比例制御と積分制御

フィードバック制御の基本となる比例制御は、図4(1)からわかるように、指令値に対して定常偏差を生ずる。ブロック線図から推論できるように、偏差はゲイン K に逆比例している。図4(2)の積分制御は、定常偏差を補償しようとするもので積分器のエネルギータンクがその作用を果たしている。(実験データ参照)

その反面、積分動作は、位相遅れ(-90°)が加算されるため、図4(1)、(2)のステップ応答および周波数応答特性を比較すればわかるように、積分制御は明らかに振動形になっている。

この論理は、伝達関数式の上で理論的にわかるので

図3 機能図から伝達関数を求める

図4 比例制御と積分制御の比較

あるが、双方を同じパラメーターの下で実験して比較すれば、体験学習を通して明らになる。

6. 2 I型3次系位置決めサーボの構造と特性

メカトロ技術分野で用いられる、位置決めサーボのシステム構造は、速度ループを内部に持ち、外回りに位置ループをもたせた、I型3次系サーボ方式となっている。この方式を用いると刻々と変化する、速度推移をも含めて、位置（移動量）を指令通り制御できる。ところが、その一方でI型3次系の閉ループは、理論上不安定条件をもっている。

最終的には、速度ループをPI方式にすればよいのだが、ここで示す安定化問題は、制御技術の中で最大の課題である。よって、まず学習の間では不安定とは何かを示し、それを踏まえて安定化理論を考えさせながら進めていく。

6. 3 伝達関数の不安定性を考える。

線形制御理論の下では、閉ループ内の位相遅れがある限界を超え（ -180° ）かつ、開ループゲインが $G=1$ 以上だと系は発散形、いわゆる不安定になる。この意味で制御系の安定性は、系のゲインと位相遅れに依存している。与えられた制御システムが安定であるか否かを調べる理論を安定判別理論という。

安定判別理論は大きく分けて、二つに分かれる。

(a) 閉ループ状態での伝達関数の分母の係数配列から判別する。（特性根による判別。図6(1)の〈例解〉）

(b) 開ループの位相推移とゲインから判別する。（ナイキスト法とよばれ実用性が高い。図6(2)の〈例解〉）

ここでは、つぎの〈例題〉を用いて安定限界を求める。

図5は、内部に積分制御の速度ループをもったI型3次系の位置決めサーボシステムである。このままの状態の伝達関数では、ループゲイン K をあげると不安定になる。（位相遅れ角が -180° を超えるため）よって、 K の安定限界を理論と図解で求め、実験確認をする。

図6(3)は安定限界（ $K=5$ ）の実験確認である。速度ループの伝達関数

$$\omega_{out} = \frac{25}{s^2 + 5s + 25} \omega_{ref}$$

位置決めシステムの伝達関数

$$\theta_{out} = \frac{25Kp}{s^3 + 5s^2 + 25s + 25} \theta_{ref}$$

〈閉ループ表示〉

〈開ループ表示〉

図5 I型3次系位置決めサーボシステム図(補償前)

＜例解＞ I型3次系の安定判別

(1) 特性根から求める(手計算)

下記の特性方程式からゲインの安定限界を手計算で求める。一般的に3次方程式の求解は難しいが安定限界に限り、純虚根は未定係数法を用いて簡単に求められ、その結果が安定限界になる。

$$\theta_{out} = \frac{25K_p}{s^3 + 5s^2 + 25s + 25K_p} \theta_{ref} \quad (K_p = 5)$$

特性方程式 $s^3 + 5s^2 + 25s + 25K_p = 0$

未定係数式 $(s + \alpha)(s^2 + \beta) = 0$

上式を係数比較し、 $\alpha = 5, \beta = 25$ より

安定限界 K_p を求める。 $\alpha \cdot \beta = 25K_p \therefore K_p = 5$

(3) 実験確認

位置指令

(2) は開ループ・ボード線図を用い、手描きで推論したものである。安定限界は $K=5$ で $G=1$, 位相遅れ -180 度になっている。」

〈開ループ特性の手描き図解〉

$$G(s) = \frac{25K_p}{s^2 + 5s + 25} \times \frac{1}{s}$$

$$G(j\omega) = \frac{25K_p}{(j\omega)^2 + 5(j\omega) + 25} \times \frac{1}{j\omega}$$

$\omega = 5$ を代入すると $K_p = 5$ で $G(j\omega) = -1$

図6 安定限界解析(例解)

6. 4 位相補償による安定性改善

“位相遅れ”という概念は初心者にとってはわかりにくいものである。よって6. 3では、〈例解〉によって位相とゲインの関係を理論と図解および実験により解説した。要するに位相遅れは、特性を劣化させることがこれからわかる。

遅れ位相を改善するには二通りの方法がある。

(1) 遅れを起こさせない。

(2) 発生した遅れ位相を進み位相で打ち消す。

であるが実用的には(2)が多く用いられる。(PI補償など)ここではPI補償を原理から学ぶ。位相進み補償の動作原理は積分動作の機能を低域で打ち切り、見かけ上進み位相を加算した方式にする。

図7の動作原理からわかるようにPI補償方式は、位相遅れなしに定常偏差を補償している。図8は、I制御とPI制御の特性差を比較したものである。

$$e_o = K \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i} \right) e_i = K \left[\frac{1 + j\omega T_i}{j\omega T_i} \right] e_i$$

図7 PI補償原理図(位相進み補償)

6. 5 高速安定位置決めサーボの設計

高速安定位置決めサーボを制御理論の立場から言えば “ハイゲインで定常偏差がなく過渡応答の小さい安定な系の位置決めサーボを作る” ということになる。この実現には、6. 1～6. 4 に述べてきた一連の技術が

すべて有効に活用される。このように制御システムに用いられている論理や技術の一つの目的の下で組み合わせることにより、学習者はその本質を理解できる。

要はPI補償をもったハイゲイン速度サーボの外回りに位置ループを作ることである。この実現によって

図 8 I 制御とPI制御の比較（速度ループ特性）

図 9 実験装置を用いた高速安定な位置決めサーボPI速度ループ付I型3次系サーボシステム（補償後）

図10 実機モータによる位置決め試験

図8からわかるように位相特性は無補償にくらべ90度改善され、位置決めシステムはハイゲインの下でも安定になる。図9は、実験装置にあわせて、PI付き速度サーボを内部にもたせた位置決めサーボである。速度ループにPI ($T = 0.25s$) をもたせた位置決め制御システムであり、図8からわかるように速度ループ特性は、非振動で位相も90度しか遅れていない。この実験装置において、ループゲイン K を可変して実験した。可変範囲は、 $K = 2.5, 5, 10, 20$ とし、周波数特性データは、MATLABを使って、ステップ応答データは、実験で各々求めた。図10(1)の開ループ特性からわかるようにゼロdBクロス点で3次系でもほぼ -90° であるので、極めて安定といえる。したがって図10(2)の閉ループ特性にも共振は見られない。図10(4)は、実機モータのステップ応答波形であり、小さな過渡特性はみられるが、動特性は極めて安定である事がわかる。

7. 考える体験学習の効果

一連の筋書きに沿って制御技術を考えさせながら体験させる学習を企業教育の中で実施してきた。具体的な姿の見えない制御技術を、本教育実施前の座学と計算のみを頼りとする学習方式から制御対象を具体的に示す体験学習に移行することより、“何を目的に何をどのように制御するのか”を学習者が自ら積極的に考え、理解していくようになり、理解度と満足度が向上した。使用した実践教材を通して、図解化と実験の必要性を技術者に訴えた。今日の若い技術者には、パソコンの制御系設計ソフトを使って、“考える”努力なしに、結果だけを求めてしまう傾向がある。特にこのような技術者には、この考える学習をすすめており、効果をあげている。

8. おわりに

前にも触れたが、制御理論の解析には、厄介な計算がともなう。高校レベルの基礎解析力が不足していると、初心者は確実に戸惑う。例をあげれば、代数式の分数計算、複素数の有理化、ベクトルの複素面表示、三角関数の位相角、さらに回転力学、対数関数など、苦手な若者が急激に増加する傾向にある。したがって、学習対象によっては事前学習が必要となる。その一方で自ら“考える”過程なしに制御系設計ソフト(MATLABなど)を用いて解を機械的に求める傾向が増加している。パソコン活用が時代の流れとはいえ、好ましいことではない。学習者には極力、鉛筆を持って手計算することを奨めている。本文の中にあえて手計算で記述したのも、そのためである。要は、学習者

が“考える情熱を持って挑戦し、理解し、得られた感動を自覚する”ことにある。

参考文献

- [1] 本田昭, 城谷聡美: 図解と実験で学ぶ制御数学の基礎と演習, 日刊工業新聞社 (1992.8).
- [2] 本田昭, 城谷聡美: 図解と実験で学ぶサーボ制御の理論と実践, 日刊工業新聞社 (1995.11).
- [3] 本田昭, 城谷聡美: 図解と実験で学ぶデジタルサーボの理論と実践, 日刊工業新聞社 (1998.6).

著者紹介

常深 信彦

1968年 大阪大学基礎工学部制御工学科卒業
現在 株式会社日立製作所 技術研修所・プランニングマネージャ

本田 昭

1953年 山形大学工学部電気工学科卒業・技術士
現在 本田昭制御技術指導センター・センター長

城谷 聡美

1982年 東京理科大学理工学部情報科卒業
1995年 横浜国大工学部大学院電子情報工学修士課程修了
現在 システムシミュレーション研究所・代表取締役

長崎 仁典

1983年 防衛大学校工学部電気工学科卒業
現在 株式会社デンソー・デンソー工業技術短期大学校・指導員