高度制御技術者養成のための教育プログラムの構築とその実践

Construction and Practice of Education Program for Training Advanced Control Engineers

片山 優^{*1} 山本 透^{*1} 間田 泰弘^{*1}
Masaru KATAYAMA Toru YAMAMOTO Yasuhiro MADA

Although PID control schemes are mainly used in lots of process industries, engineers desire to employ the advanced control theory, in order to obtain more highly efficient control performances. However, there are few cases where the advanced control theory is employed for real systems, because the theoretical framework of the advanced control is so difficult for them to understand and the cost to implement is quit expensive. Therefore, the engineers have compromised with the inadequate control performance. In this paper, contents required in training the advanced control engineers are first formulated, and the effective education program to train them is developed by considering the advanced control based on the classical PID control. Furthermore, the effectiveness of the education program is evaluated on the practice.

Keywords : Control Engineer Education, Engineer, Education Program, Control Theory, Advanced Control

キーワード：制御技術者教育，技術者，教育プログラム，制御理論，アドバンスト制御

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の発展に伴い、適応制御¹⁾やロバスト制御²⁾など、高度制御（アドバンスト制御）に関する理論的研究が盛んに行われている。このアドバンスト制御は、システムの不確かさを事後情報または事前情報として扱うことで、より高い制御性能やロバスト性を得ることができる。ところが、石油精製プロセス、石油化学プロセス、合成・繊維プロセスなどのプロセス産業の現場においては、アドバンスト制御に寄せる期待は大きいものの、実際にプラントに実装されるケースは極めて少ない³⁾。その理由としては、アドバンスト制御の理論体系が難解なために、現場の技術者にとって理解が困難であること、あるいはアドバンスト制御器が高次に及ぶため制御システムを新たに構築する必要が生じ、実装に多くの費用を要することなどが挙げられる。そのために、プロセス現場では、今なおPID制御法⁴⁾が広く用いられているのが現状であり、工場全体の制御ループの80～90%程度を占めているとも言われている³⁾。PID制御器はその構造が簡単であり、制御パラメータの物理的な意味（比例・積分・微分）が明確であるため、オペレータの蓄積されたノウハウを基に、その調整が可能であるといった大きな特徴を有している。ところが、オペレータによ

る調整にも限界があり、操業条件の変化や環境の変化により、十分な即応性やロバスト性を得ることが困難であるため、制御系の安定性を維持させている程度に止まっている。

著者らはこのような企業現場の現状に着目し、PID制御法に基づいたロバスト制御法⁵⁾、ならびにセルフチューニング制御法⁶⁾を開発した。このアドバンスト制御法をPID制御器として設計することで、次のような利点が得られる。

- 1) 現有のDCS（分散制御装置）をそのまま利用することができ、新たな制御システムを構築する費用がかからない。
- 2) 難解なアドバンスト制御理論を、直感的で分かりやすく捉えることができる。

これら2つの利点は、アドバンスト制御理論と現場における実装との間のギャップを埋めるものであり、これを教育プログラムに取り入れることによって高度制御技術者養成という側面から教育的な効果も期待することができる。

そこで本研究では高度制御技術者養成を目的に、アドバンスト制御理論をPID制御に結びつけた教育プログラムを構築した。さらに、企業での実践を通して、PID制御系の基本的設計法、ならびにアドバンスト制御系の設計法における学習効果について評価・考察した⁷⁾。

2. 高度制御技術者養成のための教育プログラム

2. 1 学習内容の位置付け

図1は、高度制御技術者養成のための教育プログラムを構築するにあたって必要と思われる学習の要素を分析し、系統化したものである。一般にPID制御器の設計においては、比例・積分・微分要素の3つだけで、制御器を設計することができる。しかし、実際にそれぞれの要素の特徴および調整法を考えようとしたとき、図1に示しているように、与えられた制御対象をモデリング(A)し、それを用いて時間応答(B)と周波数領域(C)の両方の側面から解析することによって、はじめてそれぞれどのような役割を果たしているかを知ることができる。すなわち、このモデリングから解析に至る過程は、制御理論の最低限の基礎的内容を表わしたことになる。

一方、アドバンスト制御技術であるセルフチューニング制御は制御対象の不確かさを逐次推定し、推定パラメータを用いて時間領域(B)における解析を通して制御系が設計される。また、ロバスト制御においても制御対象の不確かさを事前に見積もっておき、不確かさの範囲を考慮した上で、周波数領域(C)での解析を通して制御系が設計される。

このように考えると、教育プログラムの構築においては、アドバンスト制御の習得を目的としながらも、制御系設計の基礎的内容も十分に学習できるように配

慮する必要がある。つまり、図1に示すようにモデリング(A)から時間応答(B)と周波数応答(C)における解析、およびアドバンスト制御の内容は系統的に結びつけられている必要があると言える。

2. 2 教育プログラムの内容

前節での考察を経た結果から基本的な学習内容の系統をもとにした高度制御技術者養成のための教育プログラムの柱が構築されるが、その効果を高めるために次の配慮を行った。

- 1) PID制御に対応させて、アドバンスト制御を習得させる。
 - 2) アドバンスト制御の習得を通して、制御系設計の基本知識を身に付けられるようにする。
 - 3) 演習を取り入れることにより、習得度を高める。
- 以上の条件のもとに学習の流れを構築すると次のようなプログラムが考えられる。

- 1 システムの特徴とモデリング
 1. 1 フィードバック制御の基礎 (1)
 1. 2 プロセスのモデリング (1)
 1. 3 時間応答(M) (1.5)
 1. 4 周波数応答(M) (1.5)
 1. 5 システムの不確かさ (0.5)
- 2 PID制御器の基本設計
 2. 1 一次遅れ+むだ時間系(M) (1)
 2. 2 比例制御(M) (1.5)

図1 制御技術者が理解する必要がある項目の系統図

2. 3 比例+積分(PI) 制御(M) (1.5)
2. 4 比例+積分+微分(PID) 制御(M) (1.5)
2. 5 デジタルPID制御器 (0.5)
2. 6 従来のPIDパラメータの調節法 (1)
- 3 GPCに基づいたPIDパラメータの調整
 3. 1 GPCの基礎 (1)
 3. 2 GPCとPID制御の関係 (1)
 3. 3 PIDパラメータのチューニング(M) (1.5)
- 4 セルフチューニングPID制御器の設計
 4. 1 セルフチューニング制御の基礎 (1)
 4. 2 システム同定 (1)
 4. 3 セルフチューニングPID制御器(M) (1)
- 5 ロバストPID制御器の設計
 5. 1 ロバスト制御の基礎 (1)
 5. 2 ロバスト安定条件 (1.5)
 5. 3 ロバストPID制御器(M) (1.5)

各項目の末尾の(M)は制御系設計ソフトの一つであるMATLABによる演習を含んだ内容である。また()内の数値は割り当てる時間数を示している。したがって、本プログラムは計23時間で構成されている。実際にはこれ以外に最初に行う導入と最後のまとめに約1時間要するが、ここでは内容のみを示した。

また、本プログラムの構成は、1～3までが図1の制御系設計の基礎の部分を学習する一連の流れとなっているが、4と5に関しては、順序が逆になっても理解に対する問題は生じない。

本プログラムの特徴として、PIDパラメータの調整に際し、GPC(一般化予測制御)との関連に基づいた調整法を学習するようにしたことが挙げられる。これまでPIDパラメータの調整法には多くの方法が提案されているが、ここでは以下のような理由によりこの調整法を教育プログラムの核として取り上げた。

- 1) プロセス現場では、PID制御で良好な制御性が得られない場合には、モデル予測制御が用いられることが多い。GPCはモデル予測制御の一つであり、モデル予測制御による制御性がPID制御器で実現できる。このことは実装に際して余分な費用を必要としないことを示唆しており、実用性が極めて高い。
- 2) GPCはもともとセルフチューニング制御との関連で考察されたものであるから、セルフチューニングPID制御への拡張が明確である。
- 3) GPCに含まれる制御入力に対する重み係数の調整でロバスト安定性を評価することができ、設計の見通しがよい。

2. 3 MATLABによる演習

上記のように本教育プログラムでは、学習効果を高めるために必要な部分で学習した内容を理解させ、定着させるための演習を取り入れている。以下に実際に用いた数例を示す。図2、3はP、PI、PID制御の演

図2 P、PI、PID制御の応答

図3 P、PI、PID制御のボード線図

習の結果を示したものである。ここでは、プロセスの現場でよく用いられる「一次遅れ+むだ時間」系を例題として取り上げ、P制御、PI制御、ならびにPID制御を適用し、その制御結果(図2)とボード線図(図3)とを対応させることでそれぞれの制御法の特徴を理解させる。具体的には、

- 1) P制御では定常偏差が生じること、および定常偏差を小さくするために比例ゲインを大きくすると制御系が不安定に陥ることについて確認させる。
- 2) 次に、積分要素が付加されること(PI制御)によって、定常偏差が除去されること、および位相が遅れることで即応性があまり望めないことを確認させる。
- 3) さらに微分要素を付加すること(PID制御)により、位相が進み、即応性が改善されることを確認させる。

などが挙げられる。このような内容を学習することは、PID制御の基本的な構造および特徴を理解することには不可欠なことである。また、この基礎的な知識がア

ドバンスト制御の理解を容易にさせる。このように、この演習には重要な学習内容が含まれているため、演習の時間でも十分な指導を行い、さまざまなPIDパラメータを入力させて、PID制御系設計を体得させる。

次に、アドバンスト制御の一つであるロバスト制御の演習内容を以下に示す。先に述べたように、ここでは、制御入力に対する重み係数(λ)を調整することで、ロバスト安定性が評価できることを学習させる(図4)。さらに、様々な λ による制御応答を併せて出力させる(図5, 6)ことにより、ロバスト安定性と制

図4 ロバスト安定性の評価

図5 安定条件を満たしていない設計パラメータを用いて制御した時の応答 ($\lambda = 0.01$)

図6 安定条件を満たす設計パラメータを用いて制御したときの応答 ($\lambda = 10$)

御性(目標値応答)との対応を確認させる。すなわち、ロバスト安定性が満たされない λ を選択するとシステムの変動後(250ステップ以降)に制御系が不安定に陥ることが理解される(図5)。

ここでは2例を示したが、条件の異なる演習を適宜加えることによって、それぞれの内容に対して理解の一層の向上を図ることが可能となる。

3. 実践と評価

3.1 教育プログラムを実践した対象

本教育プログラムを評価するため、中国地区にある某企業(プロセス産業)の現場技術者9名に対して、本教育プログラムにしたがった研修を行った。

まず事前にアンケートを行い、被験者のレベルと経験を調べた。その内容と結果の一部を以下に示す。

[事前アンケート内容]

[1] 今までに制御工学の講義等を受けたことがあるか?

ア. ある 9人 イ. ない 0人

[2] プロセス計装(電装)等の開発に、これまで関与したことがあるか?

ア. ある 5人 イ. ない 4人

[3] 制御系設計に関する知識について、どの程度のレベルであると思うか?

ア. かなり知っている 1人

イ. ある程度知っている 4人

ウ. あまり知らない 4人

エ. 全く知らない 0人

[4] 制御系設計の開発に携わってみたいか?

ア. はい 9人 イ. いいえ 0人

[5] あるプロセスがハンチングを起こしているとき、これが気になるか?

ア. 気になる 9人 イ. 気にならない 0人

これらのアンケート結果より、今回対象とした技術者は、少なからずこれまでに制御工学について学習した経験があり、制御に関する知識をある程度習得していることが分かる。また、[5]の問いに対して「ア. 気になる」と答えた場合に、「それをどのように改善しますか?」という問いに記述式で回答させたところ、「原因の究明」と「PIDパラメータの再調整」という回答がほとんどであった。

さらに、各内容に対してどの程度理解しているかを確認するために事前テストを行った。得られた結果を表1に示す。この結果から、PID制御に関しては現場で扱っているということもあって、高い理解度を示しているが、そのための基礎となる制御理論に関する理解度が伴っていないことが分かる。またアドバンスト制御に関しても理解度は十分であるとは言えない。

表1 事前テストの結果

内 容	理解度 (正答率)
制御理論基礎全般	30.0%
周波数領域での解析	24.5%
時間領域での解析	41.1%
制御系設計	53.9%
PID制御	64.6%
アドバンスト制御	40.8%
モデル予測制御	36.7%
セルフチューニング制御	48.9%
ロバスト制御	36.7%

表2 事後テストの結果

内 容	理解度 (正答率)
制御理論基礎全般	61.3%
周波数領域での解析	48.4%
時間領域での解析	86.1%
制御系設計	76.6%
PID制御	75.9%
アドバンスト制御	75.6%
モデル予測制御	61.7%
セルフチューニング制御	75.0%
ロバスト制御	90.0%

3. 2 評価

以上のような被験者を対象に本研究で提案した教育プログラムを、4日間（一日約6時間）で実施し、事後に確認のためのテストをした。結果を表2に示す。なお、事後テストは事前テストと同程度のものである。これから、表1の事前テストに比べて制御理論の基礎的内容およびアドバンスト制御の理解度が高まっていることが確認でき、各内容とも本質に対する理解が大きく向上していた。とくに、ロバスト制御を例にあげると、事前テストではほとんどが空欄か誤った回答であったが、事後テストでは、「制御対象に対して許容される不確かさを持つ振動モデルを考え、範囲内のシステムの変動に対しても安定した制御系を設計することができる」などの回答が得られており、あいまいなイメージ的理解から本質的な理解へ変わっている様子が見受けられた。ロバスト制御の考え方は難解ではあるが、それに必要な制御理論の基礎的内容を関連させながら理解させることによって、理論的に対応しようとする考え方が育ったものと考えられる。他の内容に関しても同様な結果が得られた。

以上のような実践と評価の後で行った自由記述のアンケートから次のような回答が得られた。

[アンケート内容]

- [1] 今回、セルフチューニング制御やロバスト制御の内容をPID制御と関連させて学習したことで、セルフチューニング制御やロバスト制御のイメージがつかみやすかったか？

(回答)

- 1) とてもイメージがつかみやすかった。(50%)
- 2) 分かりやすかった。(33%)
- 3) イメージはつかみやすかったがすべてを理解するにはもう少し時間が必要。(33%) など

[2] MATLABでの演習は内容の理解に役立ったか？

(回答)

- 1) 各種グラフ等を出力し視覚化することでわかりやすくなった。(66%)
- 2) MATLABそのものを使ったことがあまりなかったので最初とまどったが、内容を理解する上では役立った。(33%)
- 3) MATLABをはじめて使ったのでプログラムに時間がかかった。(33%) など

[3] 今後のPIDパラメータの調整に今回の内容を活かしてみようと思うか？

(回答)

- 1) 活かしていきたい。(83%)
- 2) 機会があれば是非してみたい。(17%) など

以上のことから、試行した教育プログラムは概ね役に立ち理解しやすかったとの回答が得られた、またその内容を今後に役立てたいとの回答が多数得られたことから本プログラムの有効性が確認できたと思われる。

4. まとめ

本研究では、高度制御技術者養成のための教育プログラムを構築するにあたり、まず、技術者にとって必要な内容を系統化した。次に、この考察に基づいて、具体的な教育プログラムの内容を考察し、さらに、内容の理解を一層深めるために、MATLABによる演習を取り入れた。これによって、流れの中で配置した各学習項目が持つ意味や目標を見失わせることなく内容を系統的に理解させることができた。このプログラムの実践を通して、以下のような結果が得られた。

- 1) アドバンスト制御は現場技術者にとって理論体系が難解であるが、PID制御を対応させたことによって、そのイメージがつかみやすくなり理解度を深めることができた。
- 2) アドバンスト制御に関する知識だけでなく制御系設計に関する基本的な知識を習得させることができた。
- 3) MATLABによる演習は理解を深めるために効果的であった。

今後、このような理論と実装のギャップを埋めるような技術者教育を活発に行うことによって、現場における制御系設計が理論的に理解され、その習得した学習内容が活用につながるものと期待される。

参 考 文 献

- 1) Åström, K.J.: Theory and Applications of Adaptive Control-A Survey, Automatica, Vol.19, No.5 (1983), 471 - 486
- 2) 木村英記, 藤井隆雄, 森 武宏, ロバスト制御, コロナ社 (1994)
- 3) 計測自動制御学会: 制御技術動向調査報告書 (1996)
- 4) 須田信英: PID制御, 朝倉書店 (1992)
- 5) 片山 優, 山本 透, 間田泰弘: 多重ループ型ロバストPID制御系の実用的設計, 電気学会論文誌, Vol.123-C, No.2 (2003), 330 - 337
- 6) M. Katayama, T. Yamamoto and Y. Mada: A Design of Multiloop Predictive Self-Tuning PID Controllers, Asian Journal of Control, Vol.4, No.4 (2002), 472 - 481

- 7) 片山 優, 山本 透, 間田 泰弘: 制御技術者養成のための教育用教材の開発に関する一考察, 日本産業技術教育学会中国支部第32回大会 (2003), 8

著 者 紹 介

片山 優

2001年 岡山県立大学大学院情報系工学研究科博士前期課程修了 (電子情報通信工学専攻), 修士 (工学)

現 在 広島大学大学院教育学研究科文化教育開発専攻博士課程後期