

# アドバンスト制御の技術動向と富士電機の取組み

浅見 昭(あさみ あきら)

黒谷 憲一(くろたに けんいち)

黒岩 重雄(くろいわ しげお)

## ① まえがき

アドバンスト制御とは通常のPID制御やシーケンス制御を発展させた、あるいはそれと異なった新しいタイプの制御方式一般を指している。

大きく分けると、①2自由度PIDやI-PDなどの古典制御理論形のアドバンストPID制御、②最適レギュレータ、適応制御、 $H_\infty$ 制御などの現代制御理論に基づくもの、③エキスパートシステム、ファジィ制御やニューラルネットワーク<sup>(1)</sup>応用などのAI形制御がある。③のAI関連は別特集に譲り、本特集では主に①と②の数式形アドバンスト制御、なかでも現代制御理論に基づくものに関する動向や富士電機における取組み、応用事例を中心に紹介する。

## ② 最近の技術動向

今日では、デジタル制御装置の使用は一般的なものとなり、アドバンスト制御は実際の機器ならびに産業プラントに広く適用されてきている。

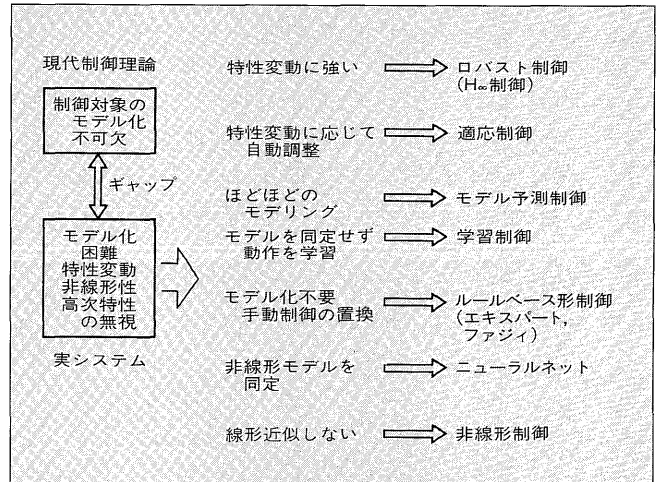
一方、制御の対象となる機器、プラント、システムはますます複雑なものとなり、しかも、制御の機能や性能は今まで以上に高いものが要求されている。したがって、アドバンスト制御技術に対する期待と要求は一層高いものとなってきた。

制御理論、制御技術に関するさまざまな研究は現在も進展中であり、その成果として多くの新しい理論や制御方式が生まれてきている。これらは今まで達成できなかった制御性能の実現や、適用対象外としてきた領域の自動化を進めるためのツールとして期待される。

アドバンスト制御技術の実システムへの適用という観点から最近の制御理論の動向を次に挙げるとともに、その概念を図1に示す。

- (1) 制御系設計理論ではその実用化を目的としたロバスト制御理論が進展し、なかでも $H_\infty$ 制御の実システムへの適用が活発に行われている。
- (2) 適応制御の適用範囲を広げるロバスト適応制御の研究

図1 最近の制御理論の概念



が進展してきた。しかし、現状では実用的な適応制御方式であるゲインスケジューリング方式が最も広く用いられている。

- (3) 実用的な必要から生まれたモデル予測制御、学習制御、繰返し制御などの適用と基礎的な理論づけが進展した。
- (4) デジタル制御装置の普及により、デジタル制御理論が著しく進展した。
- (5) 非線形制御理論が着実に進み、現実味を帯びてきた。

これらに共通するのは実用性の向上である。現代制御理論に限らず、数式形のアドバンスト制御では制御対象のモデル化が不可欠である。ところが実システムにおいては、モデル化が困難であったり、特性が変動したり、非線形性があったり、モデル化では無視した高次特性が影響を与えたりする。このため、制御設計時のシミュレーションではうまくいっても、実システムではうまくいかないという、いわゆる「理論と実際のギャップ」がよくいわれてきた。

### 2.1 ロバスト制御

これらに対して、実用性を高めるための第一の回答がロバスト制御である。ロバスト制御とは、制御対象の特性が変動しても制御性能を維持するようにあらかじめ制御系を



浅見 昭

昭和39年入社。情報処理システムの研究開発および応用システム開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所情報システム研究所長。



黒谷 憲一

昭和50年入社。制御システムの研究ならびに応用開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所情報システム研究所研究マネージャー。



黒岩 重雄

昭和41年入社。情報・計測・制御システムの技術開発企画部門を統括。現在、制御システム事業本部技術企画統括部長。

設計するものである。ロバスト制御を実現する手段として、現在最も注目を集めているのが  $H_{\infty}$  制御である。 $H_{\infty}$  制御は「 $H_{\infty}$  ノルム」という最大値規範を評価基準とするもので、ロバスト安定性を定量的に扱うことができる。

最近では  $H_{\infty}$  制御をさらに拡張して、「構造化特異値」を使うことにより、よりシャープなロバスト性能を得ようとする  $\mu$  シンセシスが注目されている。また、ロバスト制御を実現するうえで新たな課題として、モデルの不確かさを定量化する必要があるため、不確かさを含むシステム同定に対する今後の研究の進展が望まれている。

## 2.2 適応制御

第二は適応制御である。適応制御の代表的なものとして、モデル規範形適応制御 (MRAC) とセルフチューニング制御 (STC) があり、これらは制御対象の特性変動に応じて制御則を自動調整するもので、最も理想的といえるが、制御系全体の安定性の面で厳しい制約がある。その制約を緩和し、適応制御の適用できる問題の範囲を広げようというのがロバスト適応制御である。

さらに MRAC や STC などの適応制御は制御則が複雑なため、これを緩和する方式として単純適応制御 (SAC) が最近、注目されている。

一方、産業界では広い意味で適応制御に含まれるゲインスケジューリング制御やオートチューニングが受け入れられている。

## 2.3 モデル予測制御、学習制御など

第三は困難なモデリングの作業を軽減する制御方式である。石油化学プロセスを中心にプロセス制御の現場に応用の広がっているモデル予測制御はほどほどのモデルがあれば、現場での調整で良好な制御性能が得られる。むだ時間の長い系や干渉のある多変数系にも有効であり、モデルとしてインパルス応答モデルやステップ応答モデルなどプロセス現場で得られやすいモデルを使用するのも実用的な特徴である。

学習制御、繰返し制御は、同一あるいは周期的なパターンの動作に対し、制御対象のモデルそのものを同定せずに制御入力の動作を学習するものである。試行または周期ごとには目標値を変更できないので適用対象は限られ、また、フィードフォワード制御であるため、外乱に弱いといった欠点があるが、単純な学習で実現できるので応用例が増えている。

このほか、AI 形の範ちゅうに属すが、制御対象モデルに関する事前情報がほとんど不要で非線形システムを同定できるニューラルネットの利用や、制御対象モデルが不要なルールベース形制御が盛んに応用されている。ニューラルネットは一種の学習であるため、モデルを同定しての適応制御や制御動作そのものを学習する学習制御に応用されている。

## 2.4 デジタル制御

第四はデジタル制御装置を前提とした設計、解析であ

る。現代制御理論における状態空間法ではサンプル値制御は離散時間制御として定式化され、連続時間制御とは切り離されて閉じた理論体系が構築されてきた。ここでは、制御装置のサンプル時間で連続系である制御対象も離散化し解析、設計される。ところが、サンプル時間内においても連続系である制御対象は動作するので、本来、離散時間ではなく連続時間での解析、設計が望ましい。

このような離散時間制御を連続時間システムに結び付ける理論が進展した結果、新しいタイプのデジタル制御方式が生まれてきた。制御器の入力と出力で、あるいは制御チャネルごとにサンプリングの周期を変えるマルチレート制御やその特殊な場合の 2-Delay 制御などの時変形デジタル制御である。

また、デジタル制御を前提にして最適レギュレータ理論の枠組みから、未来情報を取り入れる予見制御、むだ時間を扱える状態予測制御などの理論づけが進展した。これにより最適レギュレータ理論がより広い範囲のクラスの問題を扱えるようになった。メカニカルな非線形システムに対してはデジタル加速度制御方式が提案されている。

## 2.5 非線形制御

第五は非線形なシステムを線形近似せず、非線形なまま扱うことである。その方法の一つが前述のニューラルネットなど AI 形の制御であるが、それとは全く別の方向で非線形システムの幾何学的理論という体系が発展している。ここから導かれたフィードバックによる厳密な線形化を用いると制御可能な範囲が近似線形化に比べて広がる。状態が大きく変わっても安定性が損なわれないような制御系や、動作点が変わっても応答性が変わらない制御系が設計できるようになる。

## ③ 富士電機の取組み

富士電機ではアドバンス制御の応用に積極的に取り組み、これらの技術を適用した多くの制御システムや機器を納入してきた。これによる実用的な効果はユーザー各位からも認められ、高い評価をいただいている。表 1 に主な応用例をそこで使われている制御手法とともに示す。

適用分野は大きく分けると、プロセス制御分野、電動機などとその応用システムの電機制御分野、各種の機器の制御分野となる。また、アドバンス制御を実現するコントロールシステムならびにその実現を支援する制御系設計ソフトウェアについて、富士電機の取組みを述べる。

### 3.1 プロセス制御

プロセス制御の分野では従来から単純な PID 制御が中心であり、大半のプロセスがこの制御方式で十分であるといえる。しかし、むだ時間や応答遅れが大きい、非線形性が強い、相互干渉が強い、外乱要因が多い、といったプロセスは単純な PID 制御では満足した制御性が得られず、運転員による手動操作を余儀なくされてきた。また、プロ

表1 数式形アドバンスト制御の応用事例

適用分野	応用事例	制御手法
鉄鋼	製鉄所エネルギーセンタ自動運転	逆ナイキスト法, 最適化制御
	酸素プラント制御	最適化制御
	製鉄所転炉排ガス回収制御	最適レギュレータ, ゲインスケジューリング制御
	連続焼鈍炉板温制御	ゲインスケジューリング制御
	棒鋼圧延プロセスのループ制御	H <sub>∞</sub> 制御, オブザーバ
上下水道	需要予測, 水運用制御	カルマンフィルタ, 最適化制御
	浄水場薬品注入制御	モデル予測制御
	配水圧力制御	ゲインスケジューリング制御, 最適化制御
電力	同期発電機制御	適応制御, 最適レギュレータ
	水力発電所の水位調整制御	ゲインスケジューリング制御
セメント	セメントキルン最適制御	最適レギュレータ
	原料調合最適制御	最適レギュレータ
化学	重合プロセス制御	モデル予測制御
電動機	電動機駆動制御	適応制御, オブザーバ
	軸ねじり振動抑制制御	H <sub>∞</sub> 制御, オブザーバ
機器	マニプレータの位置決め制御	学習制御, 適応制御
	光ディスクドライブ制御	H <sub>∞</sub> 制御

セス制御の分野では一般的に制御対象の動特性を物理モデルで精度よくモデル化するのが困難なため、現代制御理論の適用も限られていた。

こうしたなかで、富士電機では鉄鋼、セメントなどの分野を中心にプロセスの時系列データをもとに統計的な自己回帰式でモデル化し、最適レギュレータを使うという方法を数多く適用してきた。非線形性の補償には主にゲインスケジューリング制御を、多変数の非干渉化には逆ナイキスト法を用いてきた。

水処理などの分野ではカルマンフィルタを使って需要を予測し、それをもとに最適な運用計画を立てるという水運用制御を実用化し、多数納入してきた。また、水道の配水管網の圧力や残留塩素濃度を最適化する配水制御も実用化してきた。

最近ではエキスパートシステムやファジィ制御の適用の方が数式形のアドバンスト制御よりも多いが、単なる手動制御の置換えから数式形アドバンスト制御と組み合わせる互いの長所を有効に生かした方向に進んでいる。

一方、モデル予測制御が実用的なアドバンスト制御方式として期待され、富士電機においても、化学プラント、水処理プラントなどへの適用を進めてきた。今後しばらくはプロセス制御分野におけるアドバンスト制御の中心的技術になるものと考えている。

### 3.2 電機制御

プロセス制御分野に比べ、制御系が電気回路、機械系など、物理的なモデル化が可能なもので構成されているため、従来から種々のアドバンスト制御方式が適用されてきた。

富士電機においても電動機の駆動制御では適応制御やオブザーバを適用し、多変数の発電機制御に適応制御を実用化している。電動機応用システムである鉄鋼の圧延や巻取機の張力制御にもオブザーバを応用し、負荷急変時の速度インパクトドロップの補償や振動抑制に効果をあげている。

富士電機は H<sub>∞</sub>制御の実用化にもいち早く取り組み、まず、電動機駆動系へ適用した。電動機と負荷が弾性的に結合されている駆動系の速度制御により、軸ねじり振動が抑制できることを実験で検証した。多変数系では、多スタンド連続圧延プラントのスタンド間ループ制御に適用し、実用化のめどをたてた。さらに、電機制御分野に限らず、H<sub>∞</sub>制御の適用分野の拡大を図っている。

### 3.3 機器の制御

情報機器、FA 機器などの分野では制御装置に多くの費用をかけられないため、比較的単純な制御則が要求される。一方、一般に単純な定値制御でなく、経路制御であったり、速度制御と位置制御が組み合わせられた位置決め制御などの方法がとられるため、それほど単純ではない。このため、このような分野では機器の設計者がそれぞれの工夫を織り込みながら制御系の設計も含めて設計を行っている。

マニプレータなどは繰り返し同一の動作を行うため、学習制御を適用し、手先の振動抑制に効果を上げた。マイクロエレクトロニクスの進歩により、大容量のメモリが低価格で手に入るので、学習制御のように制御則は単純で動作を記憶する多くのメモリを必要とする制御方式はこのような分野に適している。

コンピュータ製品の小型化が進むなかで、ディスク装置などの情報機器に対しても、小型化、高速化、大容量化などのニーズが強い。このようなニーズを制御の面から反映させるためには、H<sub>∞</sub>制御が最も有効と考える。そのため、その例題として光ディスクドライブ装置の位置決め制御に H<sub>∞</sub>制御の適用を検討し、その有効性に見通しを得た。

自動販売機には種々の制御機構が組み込まれており、ここではファジィ制御の積極的活用を図っている。

### 3.4 コントロールシステム

プロセス制御では主にアドバンスト制御は制御用コンピュータあるいはワークステーションに搭載される。ワークステーションとして AI、ファジィも含めた種々のアドバンスト制御方式を容易に適用でき、DCS (分散形制御システム) とも連携した AI-AWS を使用する。

電動機応用システムでは高速な制御が必要なため、アドバンスト制御も含めた制御則を MICREX (富士電機製 DCS) に組み込む。電動機の駆動制御や各種機器ではマイクロコンピュータや DSP (デジタルシグナルプロセッサ) による専用の制御装置にアドバンスト制御が組み込まれる。

汎用のコントローラにおいても PID 制御パラメータの自動調整機能を組み込んでおり、これも一種のアドバンスト制御といえる。また、汎用の温度調節計にも非線形 PI

制御といえるファジィフィードバック制御を組み込んだ製品を提供している。

### 3.5 制御系設計ソフトウェア

アドバンスト制御の実現にはモデル化、制御系設計、シミュレーションなどの作業が不可欠であり、富士電機では早くからこれらをパッケージソフトウェア「SAPL シリーズ」として提供している。

古典制御、現代制御、データ解析はもちろんのこと、H<sub>∞</sub>制御、モデル予測制御、最適化などがそれぞれパッケージ化されており、富士電機の制御用 UNIX コンピュータ DS/90シリーズならびにワークステーションなどで動作する。

最近では PID 制御のパラメータ自動調整や最適レギュレータの重み調整を、より自動化する機能ならびにディジタル制御系設計の機能を付加した。

## 4 あとがき

数式形のアドバンスト制御は難解であり、特に最先端の理論を理解し、実用化を進めていくのは大変で時間のかかる作業である。したがって、制御性能の改善が必要であっ

〈注〉 UNIX オペレーティングシステムは、UNIX システムラボラトリー社が開発し、ライセンスしている。

たり、今までの制御方式では自動化がうまくいかない対象に適用すべきである。また、最先端で注目されている制御方式といっても万能なものはない。制御対象の抱えている問題点を十分に分析し、それに向いた方式をいかに応用するかが重要である。

今後は AI 形も含め各種の制御方式の長所を組み合わせ、定常時はもちろん、起動、停止などの非定常時、異常時まで自動化できる未来形制御方式の確立が望まれる。

富士電機は今後も、この分野において積極的になお一層の努力を傾注する所存である。関係各位の温かいご支援、ご指導をお願いする次第である。

なお、制御系設計ソフトウェアと代表的な応用事例については本特集に掲載されているので参照していただければ幸甚である。

### 参考文献

- (1) AI・ニューロ・ファジィ技術特集, 富士時報, Vol.66, No.5 (1993)
- (2) 木村英紀: 制御系設計理論の最近の進歩, 計測と制御, Vol.31, No.1, p.78-84 (1992)
- (3) アドバンスト制御・シミュレーション特集, 富士時報, Vol.61, No.4 (1988)
- (4) ファジィ技術特集, 富士時報, Vol.63, No.10 (1990)
- (5) 知識ベースシステム特集, 富士時報, Vol.64, No.8 (1991)

## 技術論文社外公表一覧

標 題	所 属	氏 名	発 表 機 関
接着剤・塗料における新架橋システム電気機器と高分子材料	富士電機総合研究所	元起 巖	高分子学会 (1994-1)
UPS の技術開発と市場動向	富士電機総合研究所	黒木 一男	ITI インターナショナル主催セミナー (1994-2)
主極鉄心形状変更による電磁加振力の低減	川崎工場 富士電機総合研究所	矢内銀次郎 遠藤 研二	電気学会 回転機研究会 (1994-2)
電子材料部会の研究技術動向	富士電機総合研究所	向江 和郎	日本セラミックス協会 (1994-3)
オゾンによる臭気物質の酸化分解に及ぼす腐植物質の促進機構に関する研究	富士電機総合研究所 "	森岡 崇行 本山 信行 星川 寛	日本オゾン協会年次研究講演会 (1994-3)
嫌気・好気活性汚泥法における亜硝酸菌の維持に関する動力学的考察	富士電機総合研究所 "	佐々木康成 森 豊	日本水環境学会年会 (1994-3)
データキャリアとその応用	計測・FA システム事業部	中村 雄有	日本機械学会 関西支部講演会 (1994-3)
制御用ソフトウェア開発実行環境 Object-power におけるオブジェクト指向技術の適用	富士ファコム制御 " "	大柴 正清 安藤 博文 石川 健一 金子 淳一	情報処理学会 第48回全国大会 (1994-3)
制御用ソフトウェア開発実行環境 Object-power における分散オブジェクト管理方式	富士ファコム制御 " "	大柴 正清 石川 健一 安藤 博文 金子 淳一	
制御システム開発への構造化分析手法の応用	富士ファコム制御	小平 和正	



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。