最近の制御工学の進歩*

榎 木 義 一[†]

1. 結 言

第2次大戦中に主としてアメリカにおいて、高射砲の自動照準、航空機の自動操縦装置などの軍事目的のための急速な進歩をとけた自動制御技術が、戦後化学工業、鉄工業などの平和産業のための生産設備に適用され、各種の工業プラントにおける温度、圧力などの物理量を外部からのかく乱を排除して希望する値に保持し、製品の均一化と精度の向上、人間の筋肉労働の代行ならびに危険作業よりの解放などに利用されるようになった。最近においては、工場規模の増大、複雑化に伴って、工業プラントはますます多様性をおひ、同時に人工衛星をはしめとする一連の宇宙技術の開発は、より高級な制御方式の確立を要請している。一方自動制御とは別の過程をたどって発展してきたエレクトロニクスの技術は、大型万能電子計算機の形となって現われ、これが情報処理速度を従来では考えおよばなかった水準にまで向上させ、さらにその処理能力の容量を一段と拡大して、経営管理の数理的計画を可能にするに至った。このようなエレクトロニクスの技術と、自動制御技術との間に緊密なつながりの起こるのは当然のことであり、電子計算機のもつ情報処理能力と速度とを利用して、自動制御はいまや大きくその方式を変化しつつある。この動向を詳細に観察するならば、自動制御の基礎概念か、フィードバック制御方式から適応制御あるいは計算制御という新しい独特の方式に移行しつつあるのを見いだすことかできる。

しかしながら、自動制御がその初期において示したように、統一的な見解のもとに急速な進展をみせない理由は、従来の制御理論で解決不可能な非常に多くの問題が存在しているからである。各種の工業分野において、上述のような数多くの成果をもたらした自動制御かなせ新しい胎動を示しはじめたか、その原因が生産規模の増大と複雑化ならびに制御の精度の向上にあるにしても、これが従来の制御方式にどのようなことを要求し、またそ

のために自動制御にたすきあわれわれか、どのような解決に迫られているかを概観しよう。

2. 自動制御の発展過程

本節においては、自動制御が新しい発展段階をたどりはじめた必然性を追求するため、まず制御方式が現在の形態をととのえるに至った過程を回顧し、つきに新しい動向を促進した原因について考察を行なってみる。

すてによく知られているように自動制御とは、制御しようとする物理量(制御量)をたえず計測し、これを希望状態と比較して希望状態からの偏差を取り、これに応じて修正動作を自動的に行ない、つねにその物理量を希望状態に保持しようとするものであり、第1図に示した

(第1図) 自動制御系の基本的構成

ような回路構成をとってきたのである。すなわち上述の「計測して希望状態と比較する」こと、および自動的に修正することか自動制御の本質的特徴となり、第1図のフィードバック回路が、自動制御の基礎概念として確立されたのである。

第1図に示した自動制御の基礎概念を実現する実際技術面においては、第2次世界大戦の期間には、軍事目的のためのサーボ機器の発達か促進されたことは当然であるか、平和の到来とともに各種の平和産業に自動制御か深く浸透し、各種の生産プロセスにおける温度、圧力および流量などの物理量の制御は、すべてこの構成を油圧式または空気圧式計装によって実現していたのである。

* Modern Development in Control Engineering 本稿は5月23日大阪にて行なわれた(第17回)年次大会特別講演の内容である

[†] Y. Sawaragi, 京都大学工学部 教授 工学博士

その後プロントの規模が漸次拡大されるに伴って、いわゆる集中管理方式が確立された。集中管理方式は制御すべきプラントの規模の増大、すなわち空間的拡大と、制御量の多数化に対して非常に有力な対策であったが、同時に電子式計装を促進する原因ともなった。すなわち集中管理方式は、パネル面上に多数の計器を集中せしめることになり、またこのことは同時に限られたパネル面積に収めるための、個々の計器の小型を必然的に要求した。したがって電子工学が自動制御、とくにプロセス制御の面にも浸透してきたことは当然である。すなわち自動制御における信号の電子化を含めたデータ搬送技術の改善各種物理量への変換を目的とする変換器ならびにパネル技術の開発に促がされて、より多くの信号を同時に、しかも迅速かつ正確に搬送しようようになり、このことが空気圧式プロセスオートメーションから、全電子式プロセスオートメーションへの移行という全般的な傾向を助長したのである。

上述の自動制御の基礎概念を、全電子式計装という形において具体化するまでの過程において、その背景となった制御理論を概観してみよう。制御理論の初期においては、第1図のフィードバック回路を通過する各信号に対して、目標値という基礎状態からの微小変化分だけを考慮することによって、制御回路がすべて線形回路とみなされるという前提のもとに、われわれはラプラス変換を導入した。このラプラス変換という演算子は、自動制御理論において伝達関数をうみだし、初期の制御理論の中核となったことは周知のとおりである。すなわち初期のいわゆる線形制御理論は、第1図の制御方式を第2図のようなブロック線図で表現して、インディシャル

その後間もなく非線形制御理論の開発を要請してきた。その理由は、実在の制御系において線形制御理論ではとうてい説明のできない多くの現象が認められたからである。これは上述のような規準状態からの微小変化信号のみを考慮するという基礎概念が、実際の制御系に必ず存在する非線形特性を考慮せざるをえなくなったため、根底から通用しなくなったことにほかならない。とくに微小入力に対して顕著な非線形特性を示す第3図(b)および(c)に示した伝達特性をもつ要素が制御回路に存在するときは、上述の線形制御理論に対する前提はまったく無力となることは明らかである。ここにおいて検出端摩擦、操作部の飽和などのような各種の非線形要素を考慮にいて考察をすすめる非線形制御理論の確立が必要となったわけである。

すでに述べたように、線形制御理論はラプラス変換に基礎をおく伝達関数を用いることによって、周波数応答法という有力な手法を骨子として、その体系化が行なわれている。したがって非線形制御理論においても、このような周波数応答法の拡張的適用がまず考慮されたことはきわめて当然である。すなわち定常応答の解析手法として R. J. Kochenburger の提案した記述関数法²⁾を中核とした非線形制御理論が体系化されたのである。

記述関数法が非線形制御系の定常応答に注目しているのに対し、特定の入力たとえばステップ入力に対する非線形制御系の過渡応答を厳密に追跡しようとするのが位相面解析法³⁾である。この方式は位相面上の制御方程式の解曲線の形状から図式的に制御系の特性を決定するもので、とくにリレー制御系の解析、設計に威力を発揮した。

さて非線形制御理論によって、非線形制御系の本質的な特長である入力依存性がはあくされたことは大きな収穫であるが、この事実によって、われわれは非線形制御系の解析に統計的手法を導入せざるを得なくなった。すなわち実在の制御系に印加される入力は、その大きさが時間に対して不規則に変化する信号である。したがって

(a) 飽和特性

(b) リレー特性

(c) 履歴特性

(第3図)

非線形伝達特性の例

(第2図) 自動制御系ブロック線図の基本型式

応答、周波数応答などの動的な特性を解明し、同時にこのような種々の解析結果から、外乱の影響をなるべく早期に除去し、目標値信号に忠実に追従するような制御装置の伝達関数、たとえば $G_o(s)$ を決定するというシンセシスの手法を確立したのである。

このように美しい体系化を完了した線形制御理論は

非線形要素の応答を、正弦波入力を対象とした等価伝達関数法によって評価すると、大きな誤差を伴うことが容易に想像される。このような必然性のもとに統計学的非線形制御理論の確立が要請された。換言すれば制御回路信号を正弦波信号、ステップ信号のように時間に対して明確に記述されうるようないわゆる **Deterministic Process** として取り扱ってきた立場から、**Stochastic Process** として取り扱うという立場に進化したのである⁴⁾

上述のように自動制御理論は、わずか十数年の間に、線形制御理論から定常不規則入力に対する非線形制御系の統計学的制御理論にまで発展した。しかって自動制御においては、もはやなんらの問題もないように思われるであろうが、実情は非常に多くのしかも解決困難な問題が存在しているのである。たゞ現状においてはこれらの諸問題の存在と、その重要性を認めながらもこれに対する十分の対策を樹立しえないために、現段階の技術によって、これらを不完全なから処理しているにすぎない。以下にその問題を逐次明らかにしながら、われわれの計算を述べることにする。

まず上述の諸成果を実際に適用するにあたって考えねばならないことは、制御系入力あるいはそれに対する応答の統計的パラメータを計算するための実際技術についてである。たとえば自動制御系に第4図に示したような

(第4図) 不規則信号の一例

定常不規則入力か印加されているときには、このような入力信号をはじめとして、その制御系の応答あるいはその他の制御回路信号の自乗平均値、あるいは自己相関関数というような統計的パラメータを知る必要がある。たとえば目標値信号 $v(t)$ の自己相関関数 $R_v(t)$ は

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v(t) v(t+\tau) dt \quad (1)$$

のように定義されているから、(1)式で示される計算を実行する必要がある。しかしながらこのような統計的パラメータの実際の計算は量的に非常に膨大なものになり、かつ複雑な手続を伴うものである。従来のような単純な机上計算で、その結果を求めていたわれわれにとって、これはまことに困難なものである。このような見地から統計学的制御理論は、もっとも実際に即したものの意義とその重要性を認識されながら、その実際応用

が活発に行なわれなかったことかうなずけるであろう。しかしここにエレクトロニクスの技術を背景とする電子計算機が登場したのである。一見ゆきつまった感のある自動制御は、すでに述べたようにわれわれの想像の域をこえた情報処理能力と、速度をもつ電子計算機の援助のもとに、計算機制御方式の形態へとふたたび前進を開始したのである。

3. 計算機制御方式の発展段階

まず自動制御の姿を計算機制御方式の方向に推進したいくつかの原因を以下に別記してみよう。

(1) データ搬送技術の改善

初期においては、とくにプロセス制御の面において空気圧式の信号伝送方式が開発されたことは周知のとおりである。とくに空気圧式伝送方式における各機器の動作出力範囲が、 $0.1 \sim 1.2 \text{ kg/cm}^2\text{-G}$ に統一されていたことは、長らく空気圧式プロセスオートメーションを支持する原因となっていた。しかし最近では各種物理量の電気信号への変換を目的とする変換器ならびにパルス技術の開発にうながされて、より多くの信号を同時に、しかもじん速かつ正確に搬送しうろようになり、このことか空気圧式プロセスオートメーションから全電子式プロセスオートメーションへの移行という全般的な動向を助長している。

(2) フィードバック制御理論の発展とその応用

すでに述べたような発展過程をたどってきた自動制御理論は、最近において、さらに高度な学問体系を形成しつつある。

(3) 自動分析計(オンライン分析計)の開発

従来までは製品の品質は、通常実験室において分析されていたものであり、これに要する時間は数時間を数えた。これらの操作はすべて人間によって行なわれていた。ので、時間的な遅れはもちろんのこと、人間による誤差の発生と相まって、自動制御系の回路要素として用いることはとうてい考えられなかった。しかしようやく最近にいたって、自動式品質分析計の実際技術が開発され、ひとつの制御回路要素としての使用が可能になりつつある⁵⁾。

(4) 計算機の導入

汎用ティンタル計算機の利用は、複雑なプロセスの最適化制御のためのひとつの有力な武器となっている。すなわち利用法がオフラインであろうとオンラインであろうと、これまで人間が行なっていた情報処理能力をはるかにりようかしていることから、経済性に立脚したブ

ラント操業をめさす、いわゆる最適化制御に大きな役割をはたすことは明らかである

このような要因のもとに電子計算機かどのような形で自動制御と結びつきをもったかを以下に述へよう

(5) 適応制御の確立

一例として航空機の航路制御を考えてみる このときは航空機の速度とか、あるいはその高度、風速、その他の気象条件により、機体の動特性が非常に異なってくることも認められる 第1図のフロノク線図において、われわれが調整しようとしている制御装置以外の要素、とくに制御対象は伝達関数によって完全に表現され、特定数およびその他のパラメータは、その入力および時間に対しては、全然変化せず一定であると考えてきた。しかたしてこのような状態において設定された理想的制御性能を満足するように、制御要素のパラメータを定める方式では、制御性能がいちしるしく低下することは想像に難くない 制御対象の動特性の変化は、上述のサーボ系に限らず、プロセス制御系においてもわれわれのしはしは経験するところであるか、このような事例を総合すれば、制御系は目標値変更、外乱などの環境の変化の影響を受けて、それ自身つねにその特性が変化しているということであり、しかたしてこれを無視した最適制御のための各種のパラメータ調整は無意味であるということである 幸にもわれわれがこれまで成功してきた制御系は、目標値変更、外乱などの環境の変化に対して、その特性は非常にかんまんに、しかも小さな変動しか起こさなかったのて、これを無視することかてきたのである。しかし上述のような環境の変化を受けて、制御系自身の特性が変化する場合がきわめて多く、またそれらに対する自動制御の要求もますます厳格なものとなってきた この対策としては、制御装置のパラメータを、たとえば航空機の高度、速度または気象条件に応じて適当に変えて

やらねはならない。すなわちわれわれは環境の変化をたえず監視し、つねにそれに追従してゆくか、あるいは環境の変化に伴って起こった制御系の変化をつねに相殺して、たえず初期に設定した最適の状態を保持していくとか要求される。このような要求に応じて出現したのか適応制御方式である。適応制御系の基本的構成は第5図に示すように

① 不規則に変化する環境の影響をうけて、時々刻々変化する制御対策の動特性の判定(要素Ⅰ)

② 動特性の評価に基づく制御性能の計算(要素Ⅱ)

③ われわれの定めた最適制御規範と、②における結果との比較

④ ③の結果に基づく制御要素パラメータの修正量の計算(要素Ⅲ)

となる。これを第1図に示した従来の制御方式と比較すれば、適応制御はすなわち計算制御方式であり、このような on-line computer の機能が、従来のフィードバック方式から一步を進めて、前向き回路による制御方式を示唆していることか認められる

4. 計算制御方式の現状

計算制御方式は前節で述べたような過程をたとして現在に至ったのであるか、この現状をいまい少し詳細に観察してみよう。まず第1に注目せねはならないことは多くのプラントにおいては、制御の対象となる系の動特性を数学的に詳細にあらわすことのできない場合かしはしはあるということである しかたしてつねに最適制御を保持するために、制御対象の変動に基づく制御性能の変化をどのように検知し、パラメータ修正をとどのように実施するかということか問題である。単に外乱の制御パラメータにおよぼす影響を消去するに止っていたか、この考えをさらに拡張一般化したのか最適化制御方式である。

最適化制御方式と呼ばれているものは、上述のような複雑な挙動をする制御対象を含むプロセスに対して計算機を導入し最適な操作状態を保つように、調節計の設点を変えていく方式である 第6図は最適化制御系の基本的構成を示したもので、図中の制御性能計算機は、最大にたもうとする制御性能指数(performance Index $P I$ と略記する)たとえば製品の品質、製品のもたらす利益などを計算するものである

また最適化制御装置は

(1) $P I$ の最大(最小)となるプラントの動作点を自動的に探さくする。

(第5図) 適応制御系の構成

(第6図) 最適化制御系の基本的構成

(2) (1)の結果に基づき、プラントの動作点をその点に変更し保持する。

という2つの機能を当然具備していなければならないかとくに自力でP Iの極値を探さくするという(1)の機能か、この最適化制御の特質のように思われる。しからはこの極値探さく機能はどのような理論を背景にし、またどのような形で実現されているのであろうか。

最適化制御における極値探さくの手法は、大別すると連続法と不連続法とに分けることかてきる。連続法は、一定の連続した探索信号をプラントの入力信号に重畳し、入力に小さい変化を与え、この変化かP. Iに与える変化から極値の位置を連続的に知ろうとする方法で、(1)頂点保持法、(2)相関法と呼ばれるものかこれに属する。(1)の頂点保持法は装置か簡単なこと、速応性の高いという反面、ノイズに対して比較的弱く、これを改良するとハンチングロスか増加するという欠点かある。(2)の相関法はノイズに対してきわめて強くハンチングロスも少なくすむものであり、また探索信号として正弦波を用いると、その周波数を変えることによって多変数系にも容易に適用てきるきわめてすぐれた方法である。

つきに不連続法による極値探さくの手法についてであるが、これは極値の位置の探さくか、空間的にも時間的にも不連続に行なわれるもので、①最急傾斜法、(第7図)②こう配法(第8図)および③試行法かこれに属するものである

前節で述べたような計算機制御方式は、生産システム全体の自動制御という、さらに広い視野にたつならは、どのような形で実現されるべきであろうか。一例を大規模な生産設備と広大な市場をもった石油工業にとって、オートメーション化されたもっとも進んだ生産体系を示すことにしよう

ひとつのコンピュータによって、この企業全体を最適に経営するための種々のパラメータの値を計算して、そ

(a) 最急傾斜法

(b) 改良型最急傾斜法
(第7図) 極値探さくの過程(1)

こう配法 \$U_1\$
(第8図) 極値探さくの過程(2)

の結果に基づいて操業か行なわれることはもちろんであるが、このような方法の実施か困難であるときは、この操業体系をいくつかの小さな単位に分割し、おのおのの単位を合理的に経営すべく、それぞれコンピュータを働かすことの方が容易である。しかしこのような方法をとったときには、全体としての最適性かややもすれば失なわれるおそれがある。もっとも望ましい方法は階級性的ある制御系を使うことである。すなわちより高いレベル

(第 9 図)

にある制御系は、より低いレベルにある制御系に命令するのであるが、もちろんこの命令がどのように実行され、どういふ結果が得られたかということが、低いレベルにある制御系からフィードバックされてこなければならない。第9図がこの概念を示すものである。第9図に示したように最高のレベルにその企業体のすべての操作を模擬するモデルが計算機の中に仕組まれる。この計算機は非常に大きなものであるから、いろいろな精溜設備に原油を分かち与えることを決定し、そのおのおのの精溜設備において得られる品質ならびに生産量を定め、さらに精溜設備から市場までの運搬が、どうなされるべきかも指示されるべきである。

つぎのレベルにおける制御は、各精溜設備内で行なわれる。すなわち各精溜設備内においても、またコンピュータが働いて、その精溜設備だけの最適な経済運転が行なわれる。さらに低いレベルの制御は個々のプロセス条件量を制御するものであり、またこの結果はより上位にある制御系にフィードバックされていることはもちろんである。

5. 結 言

ここに述べたように今後の自動制御は、環境の変化に応じてその特性がたえず変化する制御対象（すなわち Indescribable system）に対して、なんらかの方法でその動特性を検知しながら、環境の変化によって生じた制

(第 10 図) Dual Mode Control System のブロック線図

御系内の変化を相殺して、たえず初期の目標値に制御量を一致させるか、あるいは目標値の変動に忠実に追従していくという方針を、計算機の力を導入して動的な見地で達成しようとするひとつの適応過程 (adaptive process) における制御という方向に向かっている。これを要約すれば System Identification を行ないながら、動的最適化を実現しようとする Dual Mode 方式であり、第

(第 11 図) 自動制御の理論体系

10 図のようなブロック線図で、この理念を表現することができる。

このような自動制御の新しい動向に対して、自動制御理論は

(1) 非線形最適制御理論

- (2) 統計学的線形ならびに非線形制御理論
- (3) 統計学的決定理論を導入した制御理論
- (4) Pontryagin の最大原理あるいは Dynamic Programming を基礎とした最適制御理論

という新しい理念を加えた計算機制御理論ともいうべきひとつの理論体系へ近づきつつあるといえよう。第 11 図は、上述のような理論体系の流れを説明したものである。

注

- 1) R.C. Oldenbourg, H. Sartorius: Dynamik Selbstätiger Regelungen; Verlag von R.

Oldenbourg, Munchen (1951)

- 2) R. J. Kochenburger; AIEE Trans., 69, 1 (1950)
- 3) I. Flügge-Lotz: Discontinuous Automatic Control; Princeton University Press (1953)
- 4) Y. Sawaragi, N. Sugai & Y. Sunahara: Statistical Studies on Non-Linear Control Systems; Nippon Printing & Pub. Co., Ltd., Osaka, Japan (1962)
- 5) H. W. Slotboom, Jr. Application of Automatic Control in the Chemical and the Oil Industry: Survey Paper of 2nd IFAC Congress, Basle (1963)