

自動制御の考え方

線形制御から最適化制御・学習制御へ

大阪大学教授 西村 正太郎

1. はしがき

オートメーションとか技術革新という言葉も、今では耳なれて、わが国でも機械工業や化学工業はもちろん、電力の発生供給、鉄道、航空機の運転、あるいは一般事務処理にも新しい技術がとり入れられている。

自動制御は、このような新しい技術にあずかつて、大きい役割を果たしているが、これは機械や装置の動作を自動的に制御するところが、単なる自動化、機械化と違う。従来の自動化というのは、洗濯機の自動停止や街路照明の自動点滅のようなもので、洗濯物の汚れがどれだけとれたか、街路の照明が暗いとか明るいとかには関係がない。また機械化というのも、手や車で人が運んでいたのを、コンベアに置きかえたようなものである。機械や装置の動作の結果をやかましくいわないところには、これで差支えないが、精密な動作を要求するところには、常時動作の結果が目的に一致しているかどうかを監視して、くい違いがあれば訂正しなければならない。自動制御は、この監視と訂正動作を自動的に行なわせるところに大きい特長がある。

自動制御では、この監視は機械や装置の動作の結果を測定可能な物理量の検出という形で行なっている。しかし、単に計器で測定値を指示するだけでなく、訂正動作に利用するために、測定値を都合のよい物理量に変換し、これをフィードバックして目標値と比較し、くい違いすなわち誤差があればこれをなくするように機械や装置を操作する。

自動制御系は、本来このような考え方で構成され、理論的には系の各部の特性が線形であるとして組み立てられて来た。ここで線形というのは、制御される物理量はもちろん、系の各部の動作をあらわす変量の間に、重ねの理が成立すると考えることである。いわゆる線形の微分方程式で各変量の間の関係があらわされることを意味する。これが線形フィードバック制御理論で、一つのきれいな理論体系にまとめられている。

このような理論は、自動制御の基本的な概念を理解するのに役立つ、また実際に応用して多くの成果を収めたけれども、すべてが期待通りであつたとはいえない。その原因は、主として次のような点にあつたといえる。

(1) 制御の対象となる現実の機械や装置の特性が一般に線形でない、場合によっては、特性が複雑で、変量の数値的關係が正確につかみにくいことがある。

(2) 制御系を線形理論で構成すると、制御の良さすなわち制御性能に限度があつて、これを乗り越えてさらにすぐれた制御動作を期待することが出来ない。

(3) 制御の対象となる機械や装置には、運転中に外部条件によつて特性の変化が起りうるので、最も良い制御状態を維持するためには、しばしば運転条件を変更しなければならないことがある。初期のフィードバック制御では、このような変更は人手に委ねられている。

こうして自動制御の考え方も、初期の線形フィードバック理論ではもの足りなくなつて、現在では適応制御、さらには装置が学習機能をもつた制御系という考え方が行なわれている。

ここでは、従来の線形制御の考え方を少々ふりかえつてみて、現在の適応制御、さらに学習制御の考え方が生まれてきたいきさつと、これらの考え方の問題点をあげてみよう。こういう新しい考え方を実際に応用して、飛躍的な成果を収めたという例はまだ少ないが、実際の自動制御技術は、今後こうした方向に進むものと思われる。関心をもたれる方々の御参考になれば幸いである。

2. 線形制御理論とその問題点

自動制御系はいろいろな面から分類されるが

(1) 工作機械や自動平衡計器、船舶の操舵等に見られる機械的な位置、回転角の制御を行なうサーボ機構

(2) 化学プロセスに多い温度、圧力、流量、濃度などの制御を行なうプロセス制御

(3) 発電機の電圧や周波数、電動機の手速度やトルクなどの制御を行なう自動調整

の三つに大別されてきた。これらは制御の対象となる機械や装置と、制御系を構成する各部の機器が違ふけれども、線形制御の理論では共通した考え方でまとめられている。強いて違いをいえば、サーボ機構では目標値の変化に対する追従性に、プロセス制御や自動調整では、目標値に追従することよりも、外乱の影響をなるべくうけないようにすることに関心もたれている。しかしいずれにしても制御系の各部の変量の関係が、信号の伝達と

いう見方で扱えるので、理論的には通信工学ですでに完成されていたフィードバック理論を適用することが出来たからである。特に制御系の各部の特性を線形と見なすと、変量の間の関係をあらわす微分方程式が線形となり、ラプラス変換という手段で、これが代数方程式に変換され、解析が極めて簡単になるという利点がある。しかし、制御系を設計するとすると、電気信号の伝送だけが目的でないから、自動制御に特有の問題が出て来る。

まずはじめに重要なことは、制御の対象とする機械や装置の、何を操作して、どの物理量を制御するかという問題である。サーボ機構では、この問題は比較的明瞭であるが、化学プロセスの自動制御では、目的が製品の組成や品質を一定に保つことであつても、これらの量を直接検出することが困難なら、むしろこれらと一定の関係にある温度や圧力を制御する方が有利であろう。しかし、そのためには制御という立場からみたこのプロセスの特性に関する数値的な関係を把握する必要がある。この特性がまた同じ制御の対象でも、何を操作量とし、何を制御する量とするかによつて変わるから面倒である。それでも、とも角制御の対象とするプロセスの特性がわかれば、検出器や操作機、増巾器などを選定し、制御系を構成することが出来る。これらの制御用の機器の特性は通常よくわかっているから、制御系全体の動作を知ることが出来る。

次に制御系の安定性の問題がある。制御系を構成する各部の機器は、それ自身単独では安定でも、制御系にはフィードバックがあるから、不安定になる可能性をもっている。しかし、これはフィードバック理論の中心となつた安定判別の方法が確立されているから、殆んど問題にならない。不安定な制御系は制御の目的にあわないからである。

次の問題は制御の精度である。元来、自動制御は目標値に対する追従性、外乱に対する不感ensitivityに重点を置くにしても、定常的な静特性はもちろん、過渡的な動特性も重要で、常に目的通り動作して、誤差が許された範囲内に納まることが望ましい。しかし、線形制御系では、例えば感度をあげると定常状態では精度がよくなるけれども、不安定に近付くので過渡状態では行きすぎたり、振動したりして誤差が大きくなるように、通常相反する性質をもっている。これをどのように調和させるかが問題である。

制御系の補償という問題は、不安定な系を安定化するのにも必要であるが、さらに精度をあげ、調和のとれた制御をするためにも重要視されている。プロセス調節計にはこの意味の補償機構があつて、いわゆる比例動作、積分動作、微分動作などを行なうと同時に各動作のきかせ方を調節することが出来るようになってゐる。比例

帯、積分時間、微分時間の設定変更がそれである。もちろん、サーボ機構にもこれと同じ考え方の補償方法が用いられている。しかし、線形制御という考え方に立つ以上、いろんな補償を加えても、制御性には限度がある。

ここで最後に問題になるのは、制御性能、制御の良さということである。元来、ことの良しあしは、対象や周囲の情勢によつて判定の基準が異なり、幾分主観的である。制御の良さの判定は、主観的抽象的であつては困まるので、誰もが納得する数値的な値で定義するが、しかし、制御の対象や条件によつて内容が異なる。ここに制御性能の判定基準がいろいろ提案され、甚だ賑わいを呈している理由がある。思いつくままにあげても、第1表のようにいろいろな最適調整条件が提案され

第1表 最適調整条件

	最適調整条件	名称
誤差面積 によるもの	$\int_0^{\infty} \{\varepsilon(t)\}^2 dt$ が最小	I S E* 法
	$\int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt$ "	I A E "
	$\int_0^{\infty} t \{\varepsilon(t)\}^2 dt$ "	I T S E "
	$\int_0^{\infty} t \varepsilon(t) dt$ "	I T A E "
	$\int_0^{\infty} t \varepsilon(t) dt = 0$	Nims** "
周波数応答 によるもの	Mp=1.3	M P "
	Mp 一定でバンド巾最小	H G "
	位相余有 $>40^\circ$	P M "
	位相余有最大	K "

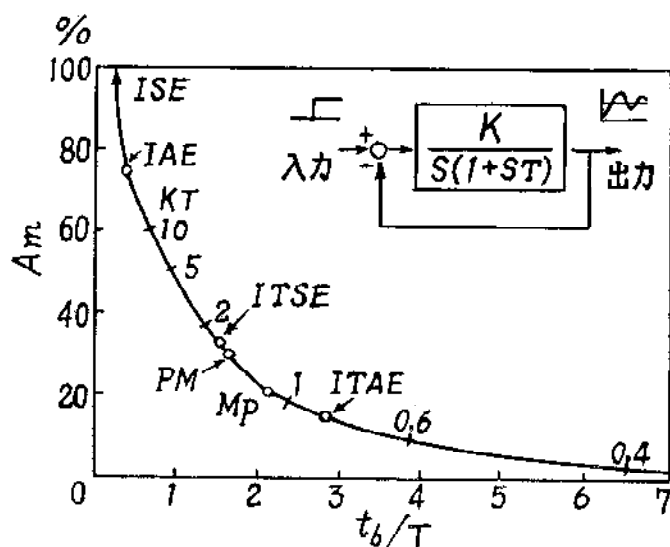
$\varepsilon(t)$: 誤差

* Integral of square error の略、他も同様

** 提案者名

ている。誤差面積によるものというのは、制御系の応答試験で、入力を急変したときの出力の過渡応答から誤差を求め、例えば I S E というのは誤差の自乗の時間積分すなわち誤差の自乗面積が最小になるような調整が最もよいとするものである。また周波数応答によるものは、制御系に正弦波状入力を加え、定常状態でそのゲインや位相が周波数とともにどのように変化するかを求め、例えば Mp 法は閉回路をなす制御系のゲインの最大値 Mp が 1.3 になるのがよいとするものである。その他、ジューグラニコルズの限界感度法なども、調節計の実的な最適調整値をきめる方法として、よく知られている。

これらの最適調整条件は、お互いにどんな関係にあるのだろうか。第1図は、制御系の1例として図中のブロック線図に記したように、いわゆる1形2次系の過渡応



第1図 過渡・応答線図の1例

答波形で、最大行き過ぎ量を目標値のパーセントであらわした A_m と、はじめて目標値に到達するまでの立ち上がり時間 t_b を系の開回路時定数 T の倍数であらわしたものの関係、系の開回路ゲイン K と時定数 T の積をパラメータとして描いたもので、 KT の小さい程、行き過ぎは小さくなるかわりに立ち上がり時間が長く、目標値におちつくのに時間がかかることがわかる。(1) この曲線上に、いろいろ提案されている最適調整条件に相当する KT の値を記入してみると、左上から右下に、ISE, IAS, ITSE, PM, Mp, ITAE 法の順になる。これでは、同じ系でも最適といわれる調整条件によつて、過渡応答波形は大分異なることになる。ISE, IAEなどは行き過ぎは許しても、立ち上がりの早いのがよいとしているのに対して、ITAEなどは立ち上がりはおくれても、行き過ぎを抑えることを狙ったものであるといえる。

3. 適応制御

線形制御理論による自動制御系の設計では、系の各部分は一定の線形特性をもっているという考え方に立っている。しかし、現実には非線形の性質をもつものが多いこと、応答速度と安定性を同時に良くすることが出来ないこと、また各部の特性が運転中に環境の変化で変わることなど、はじめにのべたようにいろいろ問題を含んでいる。

これを解決しようとして、いろんな方式が考えられているが、その一つが広い意味の適応制御である。生物が生活環境に順応する機能をもつように、制御系が自から適応性をもつならば、線形制御の考え方にはなかつた制御が期待できる。

しかし、適応制御を考えると、まず問題になるの

は、何に順応するか、制御性能をどこまで追及するか、また適応という判定をどこに求めるかということである。これらの狙いをどう組み合わせるかで多くの方式が考えられる。Aseltine (2) は何に順応するかによつて次のように分類している。

(1) 消極的な適応制御

これは、線形制御の考え方に準ずるもので、非線形性の活用がその考え方の中心になつている。

(2) 入力変化に適応する制御

これは、制御系の入力の変化に適応するため、入力の変化速度や統計的性質を常に測り、最適の調整条件をみだすように系のパラメータを調節するものである。

(3) 極値を狙う最適制御

これは、系内のある量の極値を狙うもので、適応制御中では比較の実用化されている。

(4) 系の変数変化に適応する制御

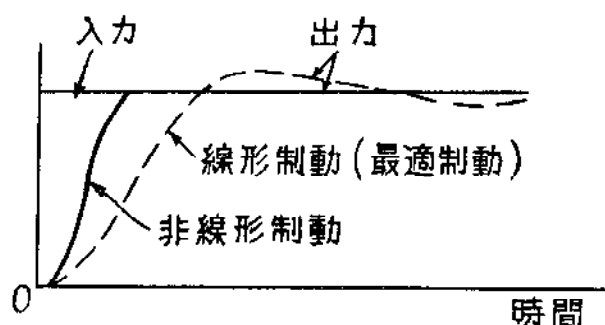
これは、系内のある変数の変化に適応して、系のパラメータの調整を行なうものである。

(5) 系の動特性の変化に適応する制御

これは、系の一部あるいは全体の動特性の変化に適応するものである。

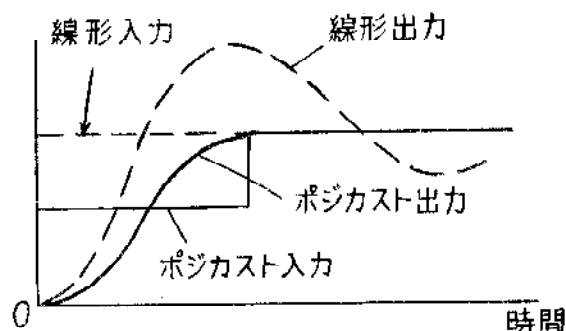
以上の分類は重複するところもあり、またこの他にも適応制御といえるものがあるかもしれないが、これにいろいろな判定基準を組み合わせると、多くの方式がえられる。

現実の制御系の各部の機器は殆んどが多少とも非線形特性をもつので、線形理論では近似的な解析しか出来ない。非線形になると理論的取り扱いが非常に困難になるが、制御性能がよくなるなら非線形も大いに利用すればよいというのが(1)の考え方で、例えば第2図のような過渡応答で誤差の大きい間は制動を小さくして制御される量を速やかに目標値に近付け、誤差が小さくなれば制動をかけて丁度目標値で止める。線形制御では誤差に無関係にゲインや制動は一定にしておくから制御性能に限度がある。



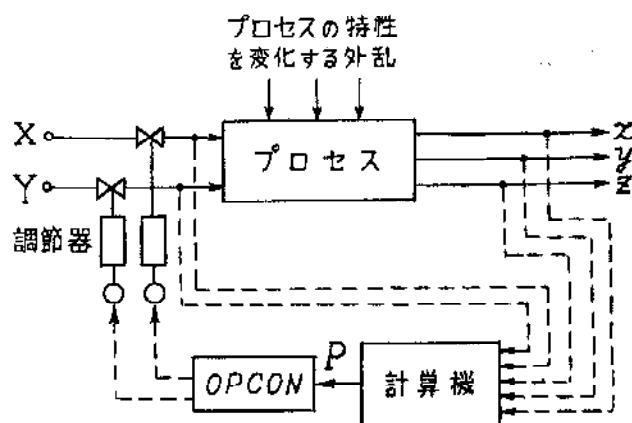
第2図 非線形制御の過渡応答

目標値がステップ状に変わる場合に振動的な系に特に有効な方法にポジカスト法がある。(3) 制御系に目標値の変化をそのまま加えないで、第3図のポジカスト入力のようにはじめは行きすぎを見越して小さいステップとして加え、出力が目標値に到達したとき目標値に相当するステップ入力に切り替えれば、そのまま誤差のない定常状態に入ってしまう。これは(2)の例とみることも出来る。



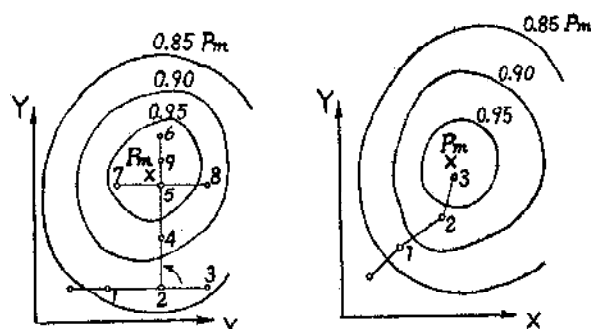
第3図 ポジカスト制御

自動制御で制御される物理量は、位置や温度、圧力など簡単に検出できるものとは限らない。製造工業なら製品の品質、生産量、生産コスト等の極値を狙つてもよい。これが(3)の場合で、いろんな操作量が複雑に関係し、市場の状況なども関連する。こういう場合には試行



第4図 OPCON によるプロセス制御

法が適当である。OPCON はその一例で、第4図のようにプロセス入力が X, Y で、出力が x, y, z であるとき、例えば収率 P を最大にするなら、 P と X, Y, x, y, z の関係を計算する単能計算機で、運転中絶えず P を計算し、 P のこれまでの最大値 P_m と比較する。もし環境が変化して P が下がれば、それを上げるように調節器を働かせる。例えば試みに X を少し増してみても、その結果 P が上がれば、さらに X を増す。逆に P が下がれば X を減してみる。 Y についても同様である。 P の極値が別の X, Y の値に相当する別の値 P_m に変化して

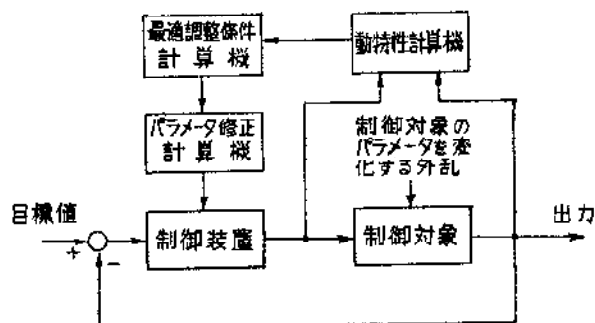


第5図 試行法の例

も、いつも極値を追って調節器が働く。

入力 X, Y の試行法にもいろいろあり、第5図のようにはじめ Y を固定して X を変えて P を計算し、次に Y を変えて P を計算して P_m に到達する方法や、 X, Y 同時に変えて P の増加分が最大になるように X, Y の変化量をきめる方法などがある。

制御系が環境の影響をうけるというのは、系の変数または、系の特性をあらわすパラメータの値が変化するというのが最も常識的な解釈である。(4)や(5)はこの意味で



第6図 自己最適化制御系

適応制御の代表ともいえる。これは例えば第6図のように、制御の対象の入力、出力の情報から、その特性を知り、系全体の調整が最適条件からどれだけずれたかを、動特性計算機と最適調整条件計算機で求め、そのずれからパラメータの修正量を知って、制御装置のパラメータを自動的に調整する。このように環境の変化に順応して、制御系自身が常に最適調整条件を自動的に維持するから、自己最適化制御ともいわれ、多くの研究が発表されている。

4. 学習制御

学習という考え方が自動制御に入ってきたのは比較的新しい。自己最適化制御は、生物の適応性に着目したものであるが、学習制御はさらにその学習能力に着目したものである。学習という言葉には、多分に心理学的な要素が含まれている。これを工学的に解釈するとき、いろいろな問題があり、提案者の間でもまだ解釈が異なる点も

あつて、今後の研究にまつところが多い。

Box の提案した **Evolutionary Operation** (略して **EVOP**)⁽⁴⁾ は最適化制御であるが、管理者が常時最適条件を検討し、次に移るべき方向を決定し、長期間にわたる試行の結果から、設備の更新の目安をも得ようとするものである。人間の判断、決定が入っているが、生物の進化論の言葉で、常時制御系が最適状態を保つ順応性を持ち、装置の更新による突然変異も含めて、適者生存、自然淘汰を行なおうという考え方である。この考え方の中に、管理者はある段階ごとに、もつと情報を待つべきか、あるいは操作を修正すべきかを決めるが、ここに人間のもつ洞察力が働いている。これは学習制御の目的を示唆している。

こう考えてくると学習する自動制御系というのは、適応制御系である上に、最適調整条件を固定しないで、系の応答の改善のためには、これを自ら修正する。あるいは系が自己の応答動作や周囲条件を検討し、自ら動作の一般的な計画を変更しうるものといえる。いいかえれば、学習制御系とは、経験によつて合目的に行動を変容する制御系であるといえる。⁽⁵⁾ 例えば、極値を狙う場合でも、はじめ最適条件からはずれていて、動作しはじめると試行錯誤的に極値に近づく。ここまでは適応制御である。この系を一旦停止して、はじめの状態に戻して再出発させたとき、もしこの系が前の経験を生かして、不必要な試行を省いて極値に近づくなら、これは学習機能をもっているといえる。経験を活用することが学習制御に重要な意味をもつ。経験は環境や系自身の特性に関する知識を豊富にするから、経験を活用しうる制御系は、はじめ設計されたときの能力が、行動をはじめ経験を積みにつれて修正され、当初もつていた以上に達することが期待出来る。

いわゆる 2 時間領域制御系⁽⁶⁾ は、経験を活用しているという点で学習制御の考え方に通ずるものがある。これは実時間で動作している単純な自動制御系を、例えば高速度アナログ計算機で模擬し、実時間に比べて極めて短時間内に現実の系の時々刻々の動作を予知して、常に最適状態を保とうとするものである。

工学的に利用出来る制御系の経験というのはどういうものか、それをどう活用するかということで、いろいろな方式が考えられるであろう。また新しく動作を修正するための評価、選択、経験の記憶、行動の修正法などが考えられなければならない。

しかし、このような学習制御が実現されたとき、本来の意味の電子頭脳をもつた自動制御がはじめて可能になるであろう。制御系が自らの経験を活かして、制御に必要な時間を短縮し、誤りをおかす確率も減少し、安全を計りつつ利益を最大にするなど、初期の制御系には考え

なかつた能力をもつことになるであろう。

5. むすび

自動制御系の規模が大きくなり、目的が高度になると、初期の自動制御の考え方では満足出来なくなり、技術的内容も複雑になつてくる。最近のエレクトロニクスの進歩がこれを実現する期待をもたせてくれるが、その指導原理、考え方は別に求めなければならない。ここでは、線形のフィードバック制御の考え方から、適応制御、さらに学習制御の考え方を簡単にのべて、これらの考え方の移り変わりにふれたが、その根底には生物学、心理学、あるいはこれらの工学的な体系として有名なサイバネクスに考え方のよりどころを求めていることがわかる。個々の機器、装置の開発と、これらの自動制御の考え方の進展とが、自動制御技術の次の発展の基礎になると考えられる。

参考文献

- (1) 山口、藤井、小川：サーボ系に対する最適調整条件の比較、制御工学第 4 巻 p. 207, 1960
- (2) J. A. Aseltine : A Survey of Adaptive Control System, Trans. I.R.E., PGAC-6, p. 102, 1958
- (3) G. H. Tallman, O.J.M. Smith : Analog Study of Dead-beat Posicast Control, Trans. I.R.E., PGAC-4, p. 14, 1958
- (4) G. E. P. Box : Evolutionary Operation : A Method for Increasing Industrial Productivity, Applied Statistics, Vol. 6, p. 81, 1957
- (5) 織田、中村：学習制御に関する基本的検討、名古屋大学工学部自動制御研究室報告 IX, p. 71, 昭和36年12月
- (6) 西村、藤井、前田、塚本：2 時間領域制御系について、第 4 回自動制御連合講演会前刷 No. 151 1961. 11.