

小西 正躬

1. 自動制御の歴史

1877年、イギリスでジェームス・ワットにより蒸気機関が発明されました。ワットはこれに続いてロンドン郊外に蒸気機関で動く製粉工場を作っています。従来、風車小屋で臼をひき小麦粉を作っていたのが、蒸気機関を利用したことにより大規模な製粉工場が実現しました。ところで、小麦粉は回転する臼で麦をひき砕くのですが、小麦粉の粒の大きさを整えるには、臼の回転速度を一定に保つ必要がありました。この問題を解決するために、ワットは蒸気機関の蒸気を送るパイプに調節弁をとりつけ、この弁の位置を蒸気機関の回転と連動させて調節する機構を発明しました。この機構の説明を図1に示しています。これがワットの遠心调速機と呼ばれるもので、産業において自動制御がはじめて用いられた歴史的な発明とされています。

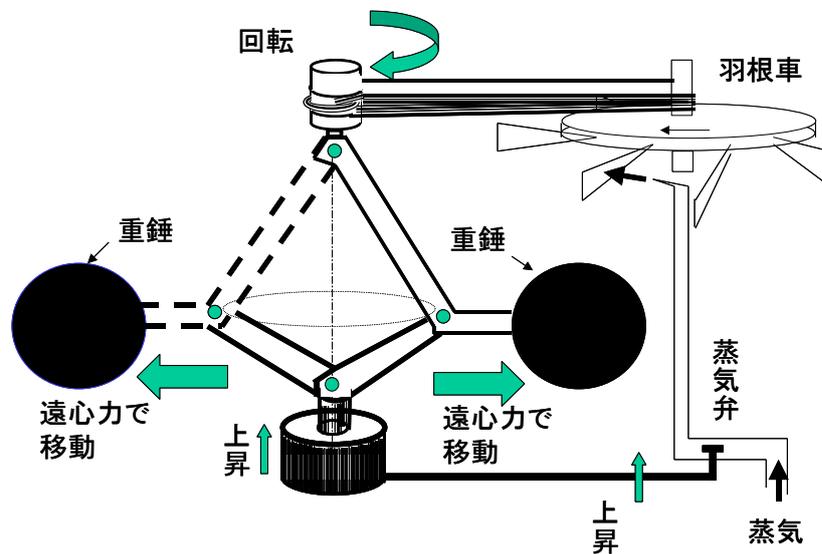


図1 遠心调速機の構成

ワットの発明した蒸気機関は、やがて船の動力に使われ巨大な船が続々と建造されました。さらに、船の動力に利用するだけでなく船の舵を切ることにも利用されるようになりました。船のそう舵手が望むように舵を切る制御のことを、サーボ機構と呼んでいます。ラテン語では、召使をサーブというのですが、これにならって舵をきる制御がサーボ機構とよばれるようになりました。現在では、サーボ機構による自動制御は船の舵の操作に限定されることなく、旋盤やロボットの制御など、社会の広い範囲で用いられています。ところで、サーボ制御は平和な目的以外に戦争での新しい武器にも用いられました。たとえば、魚雷の潜行深度を一定に保ったり、標的の動きに応じて方向を変える誘導制御などです。また、第二次世界大戦でのドイツの飛行爆弾 V2 も、空の軍事目的にサーボ制御が利用された例です。海から空へ展開した自動制御は、現在では、宇宙での活動でも利用が進んでいます。

2. モータを使った物体の移動制御

モータは回転運動をする機構ですが、これを用いて物体の移動制御を行うことができます。図2にモータの回転運動の動作原理を示しています。モータは、磁場の中に置かれた導体に電流が流れる時に発生する力を利用したものです。図2に示すように、磁場の中に置かれたロータに矢印の方向に電流が流れると、手前に回転力が発生します。

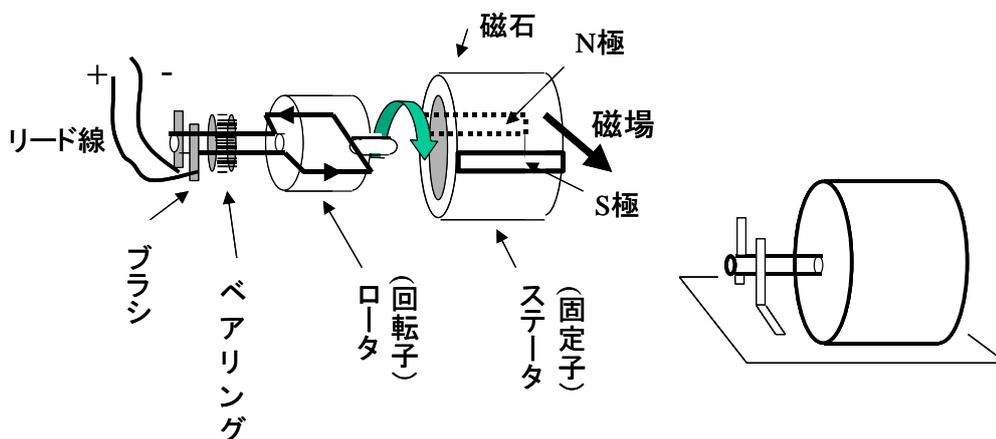


図2 直流モータの動作原理

モータには直流モータや、交流電源を用いる交流モータなど、種々のものがあります。大きな駆動力を発生させるものや、回転数の精密な指定ができるものなどがあり、用途に応じて使用されています。

[モータの回転数の計測]

モータに発電機を接続すると、モータの回転により発電が起こります。この発電による電圧を計測すると、モータの回転数を計ることができます。このほかに、モータの回転に応じてパルスが発生させ、そのパルスの数を計ることにより回転数を知る方法などもあります。

[回転角や移動量への変換]

モータの回転力を利用して物体の回転角度や移動時の位置の制御を行うことができます。

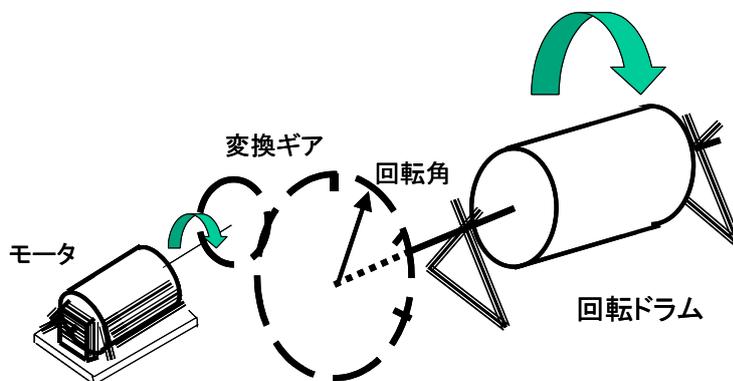


図3 モータの回転を利用したドラムの回転操作

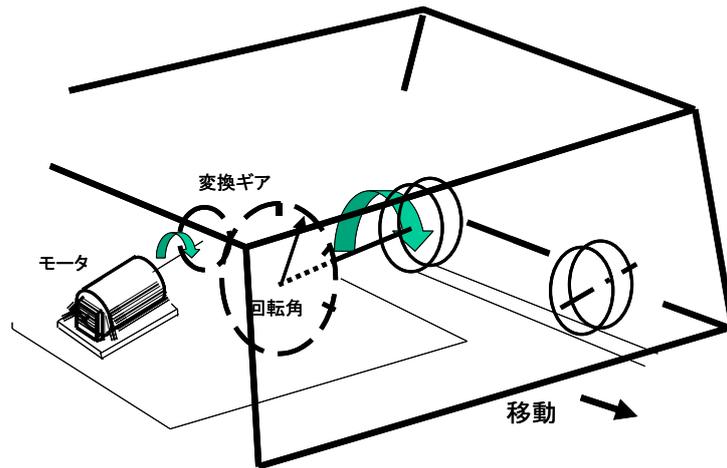


図4 モータを利用した物体の移動操作

図3と図4に、モータの回転運動を利用した回転ドラムの操作と物体の移動操作の例をそれぞれ示しています。

[モータを利用した物体の移動制御]

図5に示す装置では、モータの回転運動を起動するとコンベア上に置かれた物体の移動が開始され、回転運動が止まるとその移動が止まることとなります。また、モータの回転速度を調節すると物体の移動速度を制御することができます。このように、モータを利用した物体の移動制御ができます。

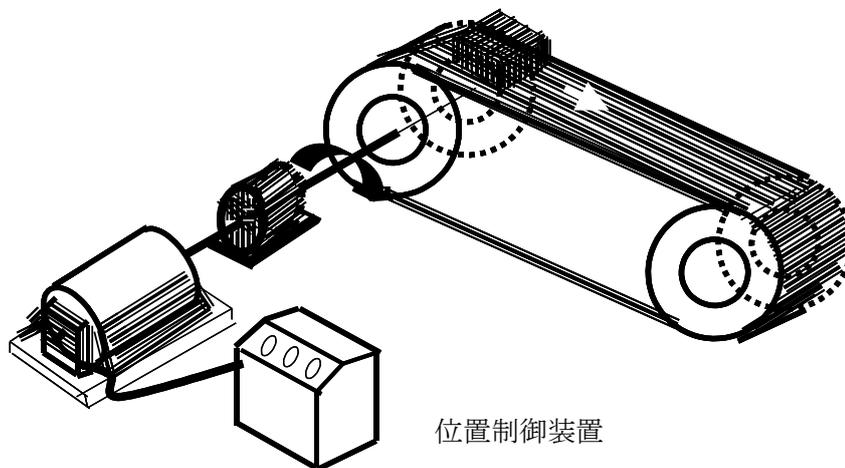


図5 モータを利用した物体の移動速度と位置の制御

3. 自動制御の基本（フィードバック制御）

水道の蛇口の下に容器を置いて、容器内の目盛り線のところまで水を入れることを考えてみましょう。水道の蛇口を開けると容器に水が入り、次第に水面が上がってきます。目盛り線で水面を止めるためには、容器内の目盛りと水面を見比べながら、ちょうどよいところで蛇口を閉めなければなりません。しかも、蛇口を開けたり閉めたりするためには何回か蛇口を回さなければならないので、目盛りと水面を見比べながら

少しずつ蛇口を閉めることとなります。これがフィードバック制御と呼ばれる調節動作ですが、人間は日常のいろいろな場面でこのような制御動作を行っています。車の運転操作や、ボートを栈橋に近づけるためのオール操作にもフィードバック制御は利用されています。このように、人間がなにげなく行っている動作の中には、制御動作が多く含まれていることが分かります。また、人間の体には制御の仕組み（システム）が多く組み込まれていることも知られています。たとえば、健康な状態では体温が平熱に維持されています。もし、外気温度が上がれば発汗により体温の上昇を防ぎ、外気温度が下がれば皮膚が収縮することで体温の低下を防ぐ制御が行われています。以下で、フィードバック制御と呼ばれる制御の仕組みを本格的に説明しましょう。

図6は、人間によるフィードバック制御の仕組みを示しています。人間には目や耳などの五感があり、制御したい対象に関する現在の状態を感知し計測することができます。この計測結果は目標の値と比較され、現在の状態量と目標の偏差が認識されます。この偏差に基づいて、偏差を解消するための修正動作が決定されます。以上に述べた認識と決定は、人間の頭脳の中で行われます。このようにして決定された修正動作は手や足に指令され、具体的な修正動作が行われます。これらの操作は、フィードバック制御といい、最終的に対象の状態が目標に一致するまで連続的に繰り返されます。

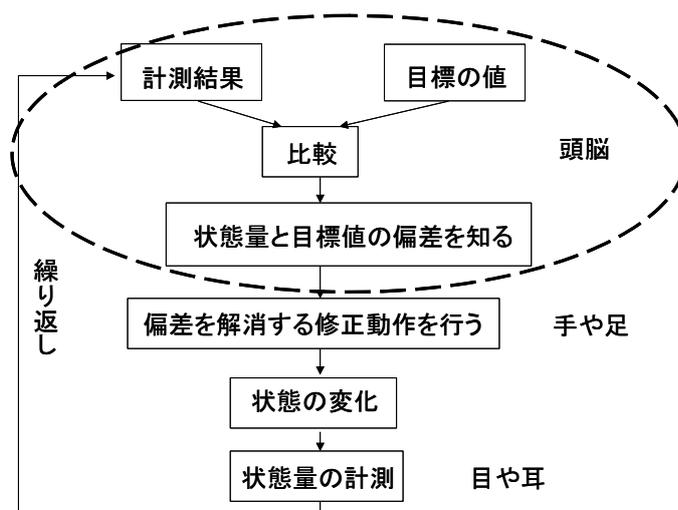


図6 人間におけるフィードバック制御の仕組み

以上に述べた人間によるフィードバック制御は、一般のサーボ制御においても同様に行われています。図7に、フィードバック制御の構成要素と相互の関係が示されています。

図7に示すように、フィードバック制御の構成要素は、比較器、制御装置、制御対象、計測器となっています。人間の機能と比べてみると、比較器と制御装置は頭脳に、操作量は手足の動きに、計測器は目や耳に対応しています。図7のように、フィードバック制御の構成要素を並べ、構成要素間の情報伝達の様子を矢印で示した線図を、制御のブロック線図と呼んでいます。

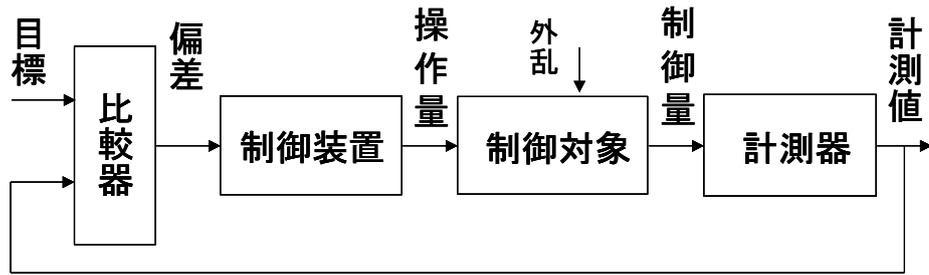


図7 フィードバック制御の構成要素と相互の関係

どのように複雑なサーボ制御であっても，図7の形のブロック線図に表すことができます。この様子を次の節で見て行くことにします。

4. 社会におけるサーボ制御の利用例

図8には，船の航行中に航路の方向を変更するための操舵制御の例が示されています。この船は，当初東から西に流れる海流に対して角度 α を保って航行していたのが，港に近づいたため海流に対して角度 $\alpha + \beta$ に航路変更をする必要が生じました。この為に，舵を角度 δ だけ切って航路変更を実現する自動制御が行われます。

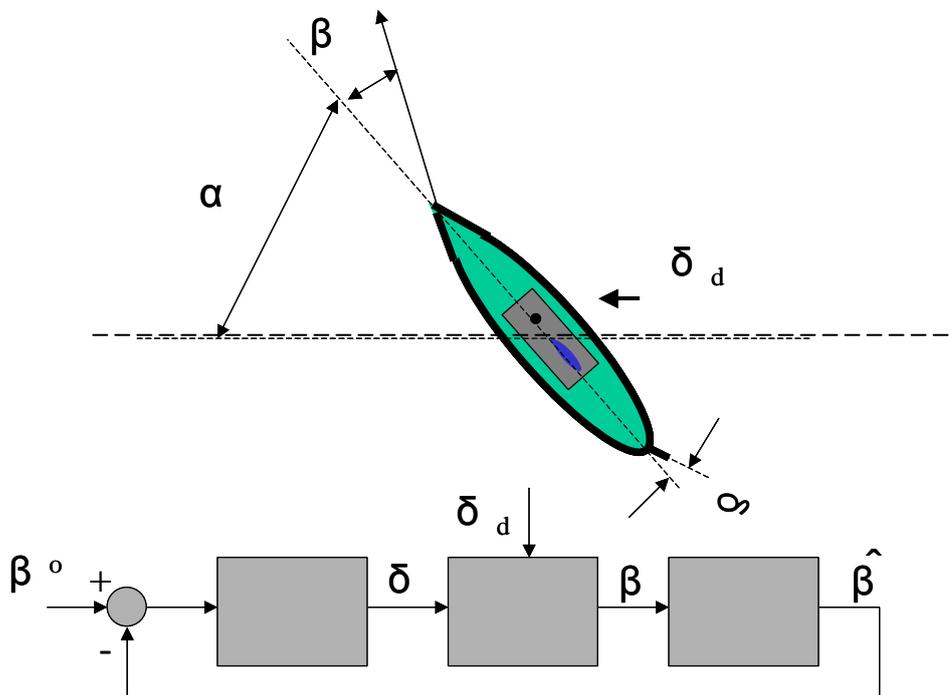


図8 船の方向変更のための操舵制御

図8の下半分には，このような船の舵角フィードバック制御のブロック線図が示されています。すなわち，フィードバック制御のための目標値は方向修正目標角 β^o ，操作

量は舵角 δ ，制御量は進路変更角 β です。この変更角はジャイロにより計測され，その値が目標角度と比較され，その偏差に基づいて操作量が計算されます。

図9には，サーボ制御の他の例として，人工衛星からのデータを受信するアンテナの追尾制御が示されています。人工衛星の移動角 θ だけ追尾アンテナの方向を変更しなければなりません。この例では，追尾アンテナ付近に吹く風は追尾制御の外乱となります。この外乱は，アンテナの方向変更の妨げとなりますが，外乱が存在するときのアンテナの追尾角変化を目標角と比較し，操作量にフィードバックすることにより外乱の影響を補償した制御が実現されています。

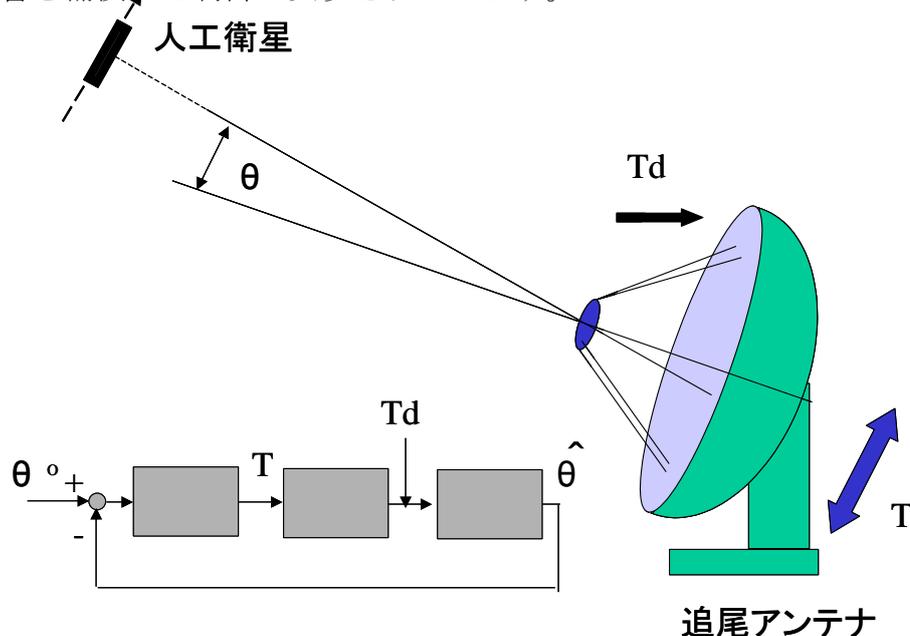


図9 人工衛星観測アンテナの追尾制御

5. あとがき

以上に述べましたが，サーボ機構を用いた自動制御はジェームス・ワットの遠心调速機に始まり，現在に至るまで数多くの適用が行われてきました。本稿では説明していませんが，サーボ制御は電車の運転や航空機の運航などにも広く活用され，安全性と快適性の向上に役だっています。産業においても，工場内の生産の自動化にサーボ制御があらゆる場面で応用され生産効率を高めるとともに，製品の品質安定化に貢献しています。また，家庭においても冷暖房器の温度・湿度の制御や，冷蔵庫の温度制御，音楽CDプレーヤーの回転数制御など，ほとんど全ての電化製品でサーボ制御が利用され社会生活に欠かせないものになっています。

なお、講義では制御システムに関わる最近の話題についても説明しようと思います。