

第9講：パターン認識と適応制御（1）

（林産加工学分野 澤田 豊）

われわれは日常無意識のうちに色々な制御のお世話になっている．ここでは身近なところで使われている制御技術について概説する．さらに，木材の機械加工関連での最近の研究例を紹介する．

1. 制御とは

1.1 身近な制御いろいろ

まず身近な例をいくつか考えてみる．

水道の蛇口の下に空のバケツを置き，これに必要な量だけ水を入れる場合を考えてみる．蛇口をひねると水が出始めてバケツに水がたまって水面が次第に上がってくる．目標とするところで水面の位置を止めるためには，水面を見ながら，適当なところで蛇口を閉めて水を止めなければならない(図 1)．

蛇口を完全に閉めるためには，何回か回す必要があるから，水面が目標とする位置まで来てから閉め始めると，目標を通り過ぎてしまう．そこで，水面が目標位置に近づいてきたら，少しずつ蛇口を回していき，目標位置のところでピッタリと水面を止めなければならない．



図 1. バケツに水を入れるのも制御

このようなことは，われわれは日常しばしばやっていることなのだが，これを制御技術の言葉で表すと，蛇口（蛇口についているバルブ）によってバケツに入る水の流量を加減することで，バケツの水位を制御するということになる．

次に，自転車に乗る場合を考えてみる．自転車のスピードは，ペダルを踏む（こぐ）力を加減することと，ブレーキを握る力を加減することによって制御する．また，進行方向の制御はハンドルの操作が基本になっていることは明らかである(図 2)．

自転車自体は自立できないため，倒れずに進んでいくためには，姿勢を制御する必要がある．つまり，体重（重心）を左右に微妙に移動させて，自転車が倒れないようにする．この姿勢の制御は，倒れないためだけではなく方向の制御にも関係しており，ハンドル操作とうまく連動した体の動きによって，方向を制御しているのである．ハンドルから両手を離していても曲がったりできる

のは姿勢の制御に連動して方向も制御しているからである。

さて、ここまではわれわれの行動の中にある制御の例をあげた。次に日頃お世話になっているエアコン（クーラ）について考えてみる。

エアコンは部屋の温度を制御するものである。エアコンを動作させている部屋では、部屋の空気がエアコンの室内機を通してファンによって吹き出されることによって循環している。このときエアコンに接続された温度計によって空気の温度を測定し、これがセットされた温度よりも高くなると室外機が作動し、室内機の中に



図 2．自転車に乗るのも制御

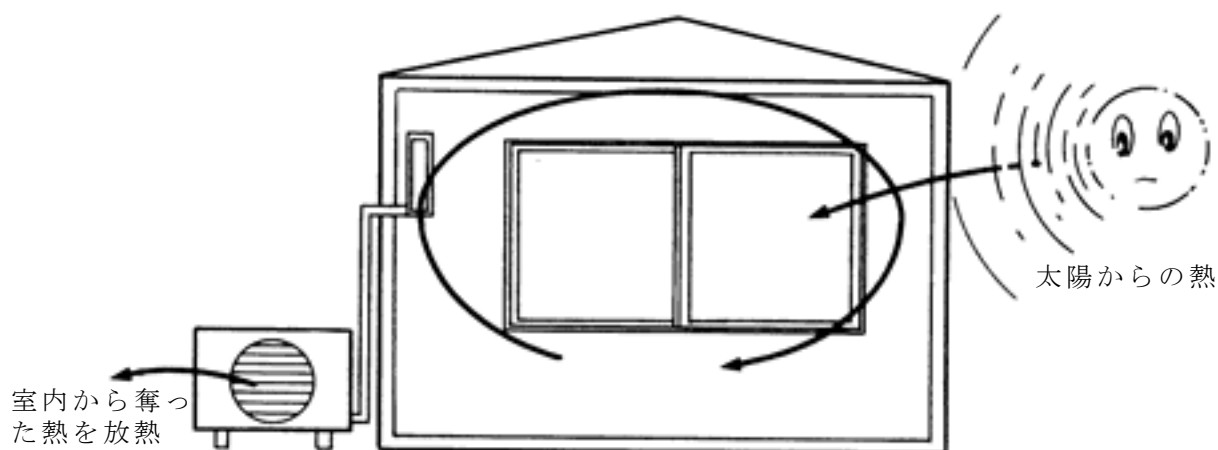


図 3．エアコンによる室温の制御

あるラジエータ（放熱器）で空気から熱を奪い、冷却された空気を室内機のファンから送り出して部屋の温度を下げる(図 3)。

逆に、部屋の温度がセットした温度より低いときは、室外機は停止したままになっている。しかし部屋の温度は、窓から入ってくる熱などによって次第に上昇してくる。これがそのうちセットした温度よりも高くなれば室外機が作動しはじめ、再び部屋の温度は下がり始める。このようにエアコンによって部屋の温度は自動的に制御されるのである。

1.2 制御の意味するところ

このように考えてみると、普段われわれが何気なく使っているもの、あるいは行っている行動には、制御という要素がたくさん含まれていることに気が付

く．これらの制御に共通して言えることは，もし制御をしなかったら，それ自身の性質で決まる動きをしたり，ある状態を取りつづけたりとするところを，制御を行うことによって，われわれの役に立つ（目的とする）ような動きや状態に変化させるということである．

例えばバケツに水を入れる例では，蛇口をあるところまで開いて放っておけば，水面はどんどん上昇し，やがてあふれることになる．自転車の場合，倒れないようにする努力をやめれば，すぐに倒れてしまう．エアコンを使わなければ，部屋の温度は外気温や天気の問題で決まってしまう，どうすることもできない．

制御とは何かということを一般的に説明すれば，“制御とは，対象をそのままに放置すれば，それぞれのルールに従って変化するところを，われわれが積極的に対象に働きかけることによって，われわれの意図するように対象の動きを変化させることである．”となるであろう．

ちなみに広辞苑第五版（岩波書店 1998）では，以下のように書いてある．

制御・制馭・制禦：(1) 相手が自由勝手にするのをおさえて自分の思うように支配すること (2) 機械や設備が目的通り作動するように操作すること

馭という字は，馭者という言葉からもわかるように，もとの意味は馬をたくみにあつかうことである。禦という字は「ふせぐ」という意味で他の二つと少し意味が違う．

1.3 その他分野にある制御

制御は技術的な分野だけでなくいろいろな分野で行われている．

例えば，車の流れや人の流れを制御するために交通信号が用いられている．また，グループで行動するとき，リーダを作る事が多いのも，リーダがグループの動きを制御するためである．このように社会システムでも制御が行われている．

経済の分野でも制御が行われている．円高ドル安になりそうな場合，日本銀行が市場に介入して極端なドルの値下がりを抑えたりするのはまさに為替相場の制御である．下宿生が毎月の仕送りの範囲内で，次の仕送り日までの日数を考えながら，支出を加減するのも立派な制御である．

制御は英語では **control** であるが，コントロールといえなじみが深いのが，野球のピッチャのコントロールであろう．野球中継を見ていると「このピッチャはコントロールがいいですねえ．」という解説者の言葉をよく耳にする．野球

に限らずスポーツの分野では制御のない競技はないといってもいいだろう。

われわれ人間の体でも、実に巧妙な制御が行われている。例えば、健康状態では体温が常に 36℃ 前後に保たれている。これは体温を一定に保つ制御が体内で行われている結果である。爬虫類などのいわゆる変温動物ではこの制御がないために外気温の変化にともなって、大幅に体温が変化することになる。

このように、制御は技術の分野だけでなく、生物、社会、経済その他あらゆる分野で自然にあるいは人工的に行われている。

1.4 自動制御

現在、技術の分野では多くの場合、制御は人手を使わず、コンピュータや機械によって自動的に行われる。このような制御を自動制御（オートマチックコントロール）と呼び、人手で行う制御は手動制御（マニュアルコントロール）と呼ぶ。上にあげた例ではエアコンによる部屋の温度の制御は自動制御であり、バケツに水を入れる、あるいは自転車に乗るときの制御は手動制御である。

同じことを手動でも自動でもできる場合もある。バケツに水をためる制御は手動でできるが、ほぼ同じことが水洗トイレのタンクでは自動的に制御できている。

しかし、中には手動では制御できるのに、自動的にはできないものもある。自動車の制御では、混んだ道路でドライバが簡単にやっている自動車の制御を、自動的にやろうとすると、今の技術ではまだ不可能である。自転車はもっと難しいであろう。

（引用：「自動制御とは何か」：示村，コロナ社）

2. 制御システムの構成

2.1 制御の対象

飛行機やロケットのような巨大なものも、冷蔵庫やエアコンなど身近なものも、動作の仕組みや複雑さは違っていても、そのシステムすなわち制御システムの構成はどの場合もほとんど同じと考えてよい。

エアコンで部屋の温度を自動的に調節（制御）する場合、制御の対象（制御対象）となるのは部屋である。交通システムならその制御対象は車と人、生体システムなら人体という具合に、制御の場面に応じてさまざまである。

制御を行うためには、まず制御対象の何を制御するのか、そして何によってそれを変化させるのかという 2 つをはっきりさせる必要がある。エアコンの場合は制御対象が部屋であり、制御すべき量（制御量）はその部屋の温度である。

では、この制御量をどうやって制御すればよいだろうか．部屋の温度を変化させる原因はいくつか考えられる．エアコンの室内機での熱の授受，窓，天井，壁，床を通しての室外との熱の出入り，室内にある物体（人，照明器具など）からの発熱，ドアの開閉に伴う空気の出入りなどが部屋の温度を変化させる原因になる．

しかし、これらの原因をよく見てみるとわれわれが制御の目的で利用できるものとそうでないものがあることがわかる．つまり、エアコンからの熱の授受は運転の仕方によってわれわれの意思で変えることができるが、それ以外はどうすることもできない．このように、制御量に影響を与えるもののうち、制御の目的にわれわれが利用するものを操作量とよび、人の力が及ばないものを外乱という．

以上のことを制御の分野でよく使われるブロック線図で表現すると図 4 のようになる．この図では矢印の向きが重要である．操作量と外乱の矢印は制御対象に向かっており、制御量の矢印は制御対象から出る方向になっている．これは室内機での熱の授受によって制

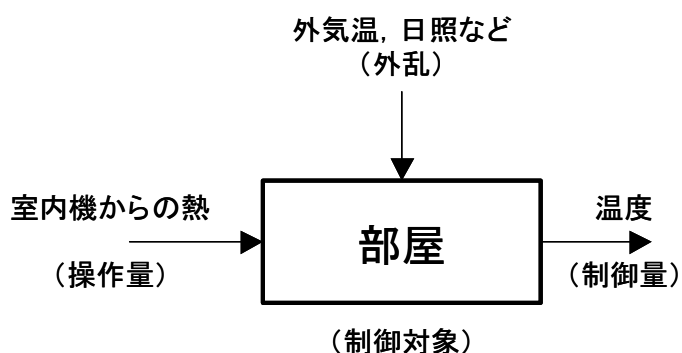


図 4. 部屋のブロック線図

御量である部屋の温度が変化すること，あるいは外気温の変化が制御量に影響を及ぼすことを表している．この矢印はその向きに応じて入力あるいは出力ということもある．

2.2 アクチュエータとコントローラ

制御量を制御するために人為的に制御対象に加えるのが操作量だが、このためには操作量を変化させる仕組みが必要になる．これはアクチュエータ（actuator）とよばれる．バケツに水を入れる場合は水道の蛇口（バルブ）であり，エアコンで室温を制御する場合はエアコンがアクチュエータである．自転車の場合はペダルを踏む足とブレーキを握る手が速度を制御するアクチュエータとなる．ハンドルを曲げる腕は進行方向を制御するアクチュエータであり，左右に傾ける上体が姿勢制御のアクチュエータである．

アクチュエータには操作量を変化させるための信号（制御信号）を送らなければならない．この制御信号を送るのがコントローラ（controller）である．要求された制御量に対して、それを達成するためにどのような信号をアクチュエータに与えなければならないかを考え、制御信号を出力するところである(図

5).

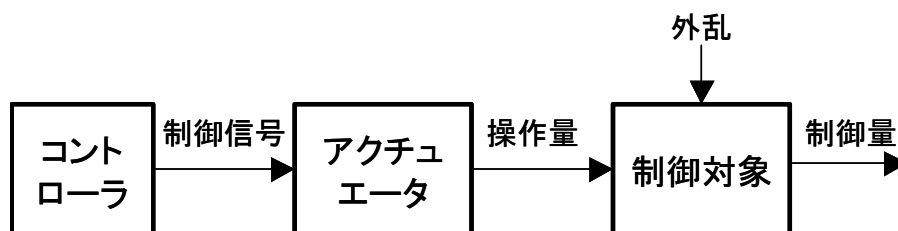


図 5. コントローラ，アクチュエータ，制御対象

2.3 制御のシステム

さて，コントローラが制御信号を出力する際に，制御の目的に合うような信号にするためには，コントローラにはいくつかの情報が必要となる．バケツに水を張る例を考えてみると，まず制御対象であるバケツの大きさが分かっているとどれくらいの速さで水面が上昇するか分からない．バケツの直径が大きいほど水面の上昇する速度が遅いことは想像できる．さらに，蛇口の特性も知らなければならない．すなわち，蛇口のハンドルをどれくらい回せば，流量がいくらになるかという関係である．さらに，肝心なのはどれだけ水を入れるかという制御量の目標値が与えられていなくてはならない．また，現在の水の深さも知る必要があるだろう．これによって目標とする水位との差が分かり，制御信号を決定する重要な情報となる．

コントローラの役割は「制御対象とアクチュエータの特性をもとに，要求された方法で，制御量を与えられた目標値に一致させるための制御信号を決定し，アクチュエータに伝達すること．」である．制御量を目標値に一致させるということは，別の言い方をすれば目標値と制御量の差，すなわち偏差をゼロにするということである．

2.4 フィードバック制御とフィードフォワード制御

偏差をゼロにするようにコントローラが動作するためには，現在の偏差の量を測らなくてはならない．これは制御量を測らなくてはならないことを意味する．バケツの例では物差しを立てておけば水位を知ることができる．つまり，このような制御量を測定するセンサが必要になる．温度制御の場合は温度計，速度制御の場合はスピードメータなどである．

これをブロック線図で表すと図 6 のようになる．図を見て分かるように制御量の情報がセンサを介してコントローラに戻っている（フィードバック）．このような制御システムをフィードバック制御という．つまり「フィードバック制御」とは「フィードバックによって制御量を目標値と比較し，それらを一致させるように訂正動作を行う制御」ということができる．

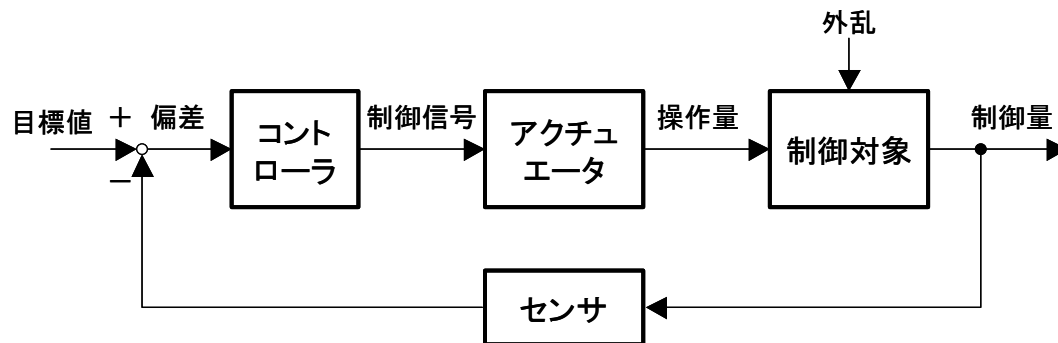


図 6. フィードバック制御システム

人がバケツに水を張る場合，目というセンサで現在の水位を図り，脳で目標とする水位との偏差を計算し，蛇口を握る手を介してバルブの調節をするというフィードバック制御である．しかし，このシステムには外乱がないと考えれば，フィードバック制御しなくても目的を達成することができる．つまり，目標の深さまで水を入れるためのバルブ操作をあらかじめ計算しておいて，そのとおりにコントローラからバルブに制御信号を出していけば，水位は計算通り変化し，目的を達成できるはずである．この制御をブロック線図で表すと図 7 のようになりフィードバック制御とは異なり情報が一方向に伝達されていることが分かる．このような制御システムをフィードフォワード制御という．

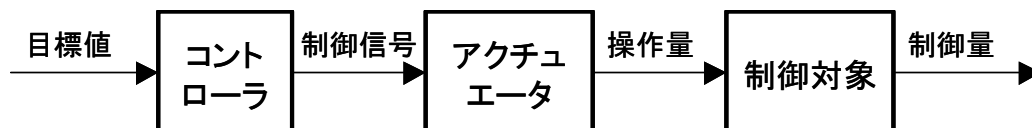


図 7. フィードフォワード制御システム

フィードフォワード制御では制御の途中で計算には入っていなかった外乱が制御対象に加われば，制御量は予定通りにはならない．この制御は外乱のある場合には使えないのだろうか．そこで，外乱が制御対象に与える影響をあらかじめ予測し計算しなおして制御信号を決定すれば，フィードフォワード制御で

も目的の制御量を得ることができる．すなわち外乱を測定するセンサから得られる情報を元に，制御対象に与える影響を予測し，その影響が制御量に現れる前に操作量の訂正を行うことができる．このように考えると，「フィードフォワード制御」は「外乱の情報によって，その影響が制御対象に現れる前に必要な訂正動作を行う制御」ということができる．

2.4 蒸気機関とフィードバック制御

蒸気機関といえばワット（James Watt 1736-1819）が有名であるが，蒸気機関そのものはワット以前にすでに発明されており，実際にも使われていた．しかし，ワット以前の蒸気機関では効率が悪かったり蒸気機関によって発生させた回転力にむらがあったりした．ワットは回転力のむらをなくすために大きなフライホイール（はずみ車）をつけたのである（図 8，図中の F がはずみ車）．

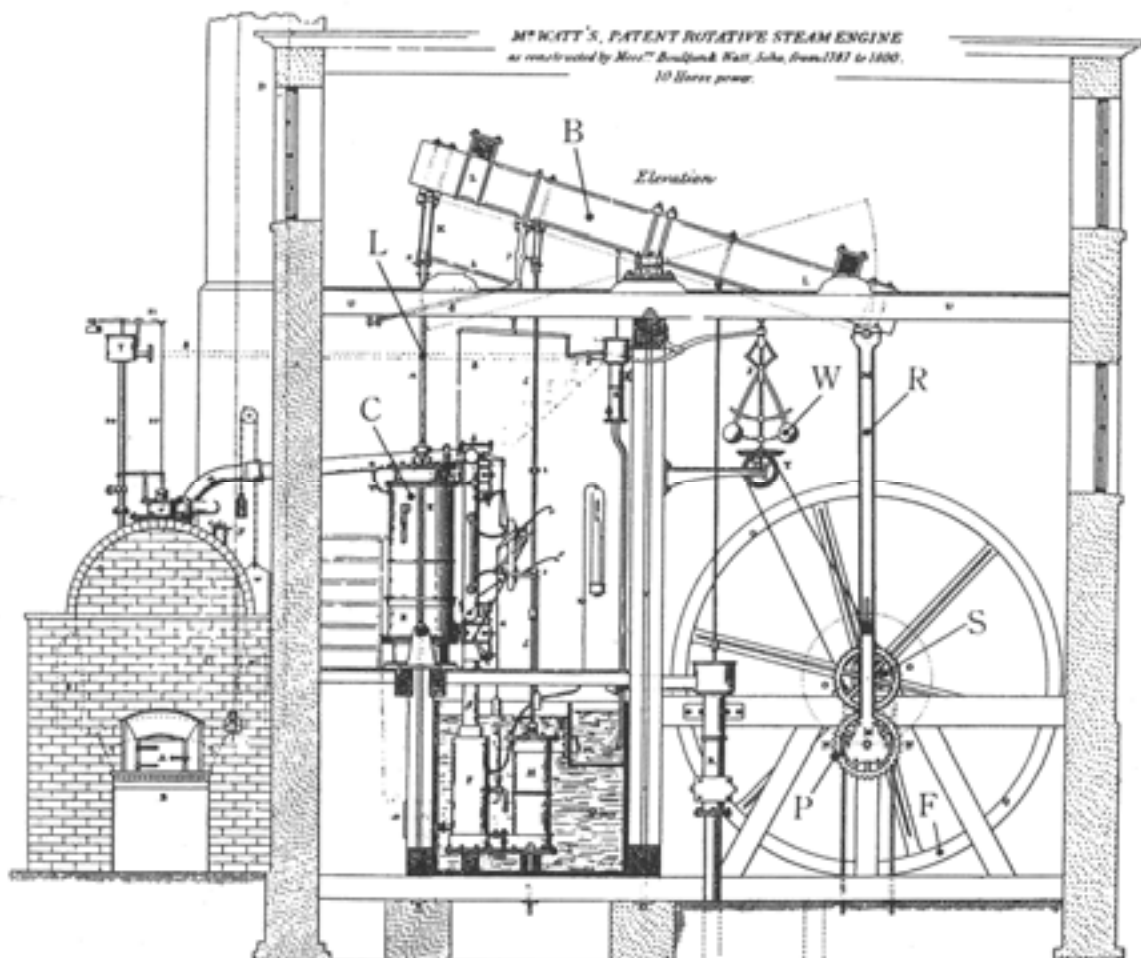


図 8. ワットの蒸気機関

また，蒸気機関がこれに接続された機械を動かす際に，負荷の変化に応じて

回転速度が変わってしまうことが問題になっていた．負荷の変化は回転速度にとっては外乱となるのである．ワットは製粉工場の臼の制御にヒントを得て，回転速度を遠心力に変換し，その力を利用してバルブを操作するガバナ（governor）を考案した（図 9）．これは回転速度をおもりの開く角度によって測定し蒸気バルブを調節するフィードバック制御にほかならない．

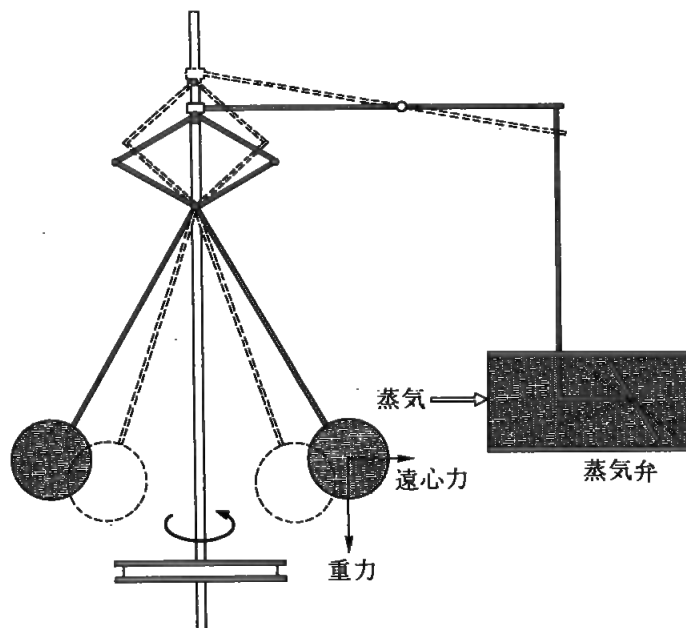


図 9. 自動速度調節器（ガバナ）

3.5 ご飯を炊く

ご飯を炊くということは，米と水が入った釜が制御対象で，操作量はこれに加える熱，ご飯の炊き上がり具合が制御量となる制御といえる．

はじめ ちょろちょろ なか ぱっぱ
じゅうじゅう いうたら ひを ひいて
あかご ないても ふた とるな

というのは昔から言い伝えられている，ご飯を上手に炊く秘訣である．今では自動炊飯器が普及したため，忘れられているかもしれない．この秘訣を見るとご飯を炊く制御はフィードフォワード制御であることが分かる．フィードバック制御できそうにも思えるが，できない．それは，炊き上がり具合を測るセンサがないからである．ふたを取って味見することは秘訣によって禁じられている．結局フィードフォワード制御しかできないのである．

（引用：「自動制御とは何か」：示村，コロナ社）

3. からくりと制御

わが国には 19 世紀半ばに蒸気機関が伝わったと見られている．この蒸気機関とともに近代制御技術が入ってくる前に，少しではあるが制御技術があったとされている．記録として残されているのは「機巧図彙（きこうずい）」という細川頼直の書いた時計とからくり人形に関する書物である．この本の中には多くのからくり人形が集められ，その構造と作り方が詳細に書かれている．中で

も茶運人形(図 10)は、複雑な動きが歯車やカムを中心とする正確に組上げられたメカニズムによって制御されている。一連の動きはフィードフォワード制御であるが、テンプ（天府，テンポが語源？）と呼ばれる蒸気機関のガバナに似た調速機構がある。このテンプの仕組みは、今でも機械式の時計では形状は違うが調速機構として使われている。

また、心地よい音色を響かせるドラム式のオルゴールではゼンマイの力が変わってもドラムが一定の速度で回転するように、風切羽根がついている。これは歯車の回転速度が高くなればこの回転するはねにかかる空気抵抗が大きくなり、逆に速度が低くなれば抵抗が小さくなることから速度を一定にすることができるのである。



図 10. 茶運人形

4. 適応制御

これまでの制御では、制御対象の特性が変わることは想定していなかった。適応制御は字の示すとおり、制御対象の特性が変動したら、それに応じて制御のやり方を変えて、常にうまくいくようにする制御方法である。つまり、コントローラを制御対象の特性に適応させていこうとするものである。したがって、適応制御を実現するためには、制御対象の特性を測る仕組み、その情報に基づいて制御の仕方を変えられる構造のコントローラ(アダプティブコントローラ)が必要になる(図 11)。

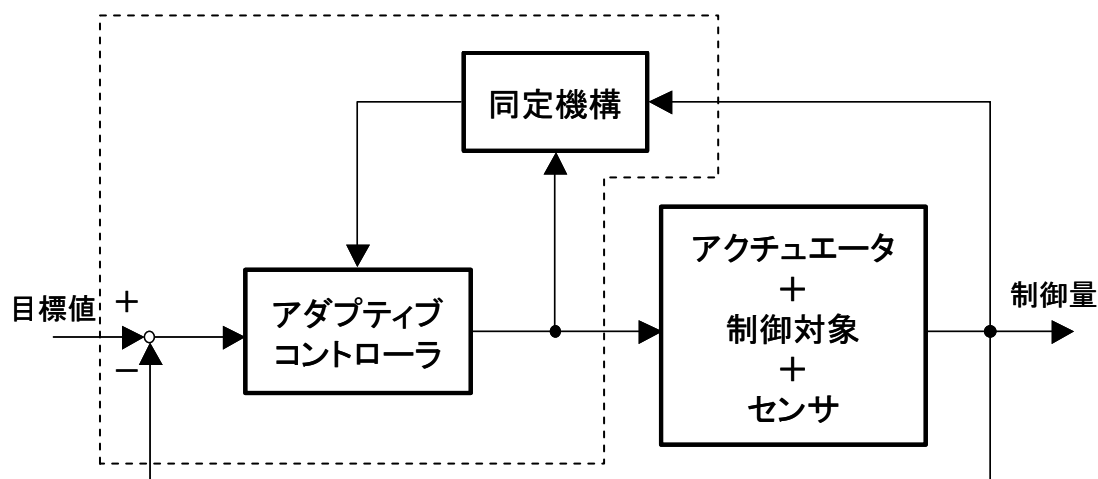


図 11. 適応制御の仕組み

システムの特性は，入力に対して状態や出力がどのように反応するかということである．したがって，システムの入力と出力のデータが得られれば，それを処理してシステムの特性を知ることができる．同定の結果に基づいてコントローラの特性を変えて常に最適な制御をするというのが適応制御の基本的な考え方となる．

実際のコントローラや同定機構はコンピュータの中にソフトウェアとして作っておくことになるので，コンピュータの仕事になる．結局，図の点線で囲んだ部分はコンピュータ内のソフトウェアで実現されるものである．

(「自動制御とは何か」：示村，コロナ社)

5. 木材加工機械における適応制御の研究例

5.1 ルータ加工における適応制御切削技術（高田ら 1987）

NC ルータ切削では，逆目領域での切削肌が不良となり次工程の研磨作業に多大な時間と労力が費やされる．そこで，加工面性状の安定化を図る目的で，NC 機械にセンサを取り付け，センサからの情報をもとに繊維傾斜角 θ を判断し，適正な送り速度に逐次変化させる制御切削の可能性を検討した．

この研究例では NC ルータの XY テーブルに荷重計を取り付け，X 方向，Y 方向の荷重計の出力から切削抵抗を測定し，

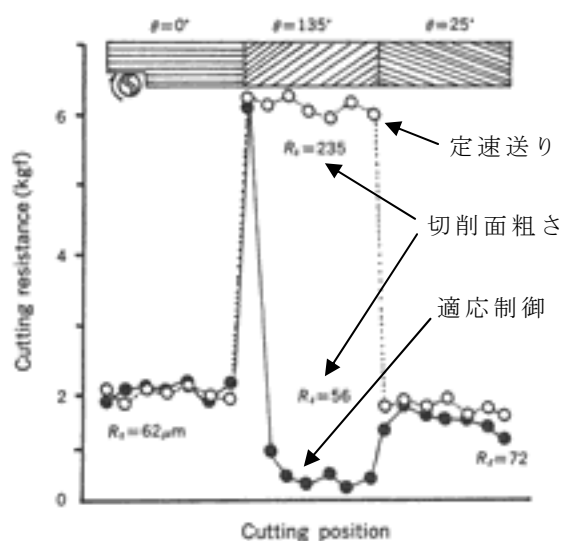


図 12. 切削位置と切削抵抗の関係

この値から間接的に繊維傾斜角 θ を判断する．あらかじめ設定された表面粗さの許容値を基準とした繊維傾斜角 θ と送り速度のデータと照合して適正な送り速度に変化させることを試みた．

5.2 木工用帯鋸の適応制御加工（趙ら 1993）

木工用帯鋸盤を用いて，挽き曲がりの制御に対して鋸変位を監視因子，挽き材面の粗さの制御には AE 計数率を監視因子とし，送材速度を制御変数として適応制御加工しその加工性を検討した．

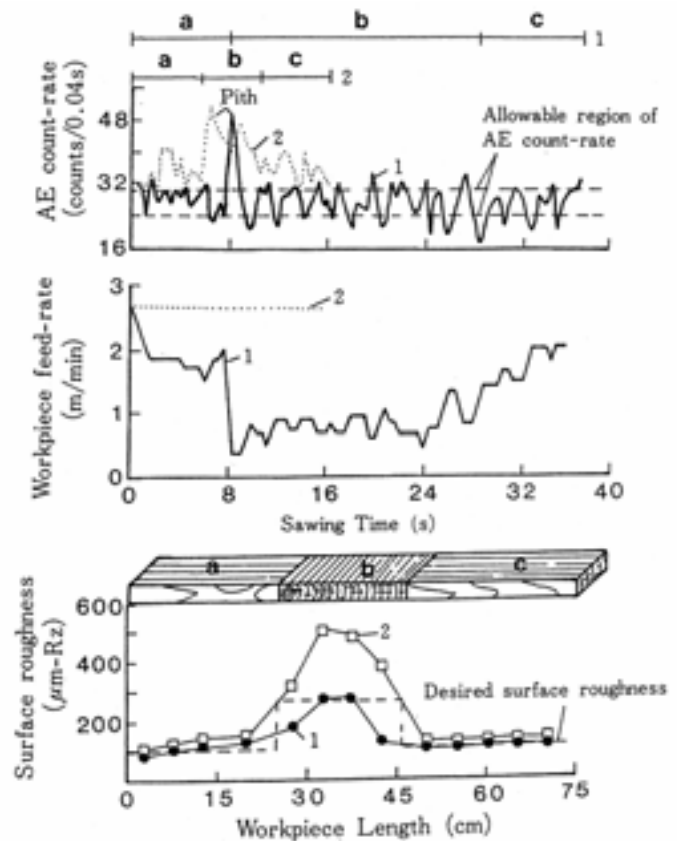


図 13. 制御時と非制御時における挽き材時間と AE 計数率，送材速度の関係，および挽き材各部における表面粗さの挙動

引用：「木工用帯鋸の最適化適応制御加工に関する研究（第 4 報）
最適化適応制御システムの開発とその加工性」
趙 春瑞，田中千秋，中尾哲也，西野吉彦，高橋 徹
木材学会誌 39(12) pp.1356-1362