

不可能を可能にする 制御理論のために

機械制御システム専攻 三平 満司 研究室

三平 満司 教授 1960年千葉県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士課程修了。2000年より、同理工学研究科機械制御システム専攻教授。



対象を自由自在に操る制御理論は、今や機械分野だけに留まらず、電力、化学、経済などのさまざまな分野で必要とされている。ある一つの制御理論は、すべての分野で同一に用いることができるのだ。三平先生は、制御理論の中でも解析が難しいとされる非線形システムを制御するための理論を研究している。そのために、他の研究者とは違ったアプローチを試みている。

制御とは何か？

自動車工場では、ロボットアームにより無人で自動車の組み立てが行われている。飛行機の操縦では、コンピュータにより軌道の保持や修正が行なっている。ロボットアームも飛行機も、あらかじめ決められた動きをする。この動きを決めているのが制御である。制御の目的は、対象を規定したとおりに動かすことである。

機械化、情報化の進んだ現代では、さまざまなところに制御が必要とされている。例えば、化学分野では化学プラントに制御の理論が使われている。また、電力分野では送電線の電圧を一定に保つために制御の理論が使われている。さらに、経済分野でも景気を安定させるために、景気に合わせた金利の変更を制御の理論にもとづいて行なっている。このように、ロボットや機械分野以外でも制御の理論は使われているのだ。

さまざまな分野で使われている制御を統一的に

考えるものが制御理論である。制御理論に欠かせない概念に、フィードバックがある。フィードバックとは、出力をもとに次の入力を決めることである。化学プラントの例では、反応による温度変化という出力から、ボイラーの発熱量という入力を決定する。発電所の例では、送電線の電圧という出力が一定になるように、発電量という入力を決定している。このように、出力を次の入力に反映するのがフィードバック制御である（図1）。

制御では、システムにおける入力と出力の関係を関数として扱う。目標とする出力を得られるような入力をするのだが、さまざまな要因により実際に得られる出力は目標値からずれてしまう。このずれを修正するために、出力をフィードバックして目標値と比較し、次の入力に反映している。

制御システムは、関数の形によって、次の2つに分類される。関数が線形であれば線形システムと呼ばれる。安定な状態からの少しのずれを修正するような制御は線形システムとなる。一方、関

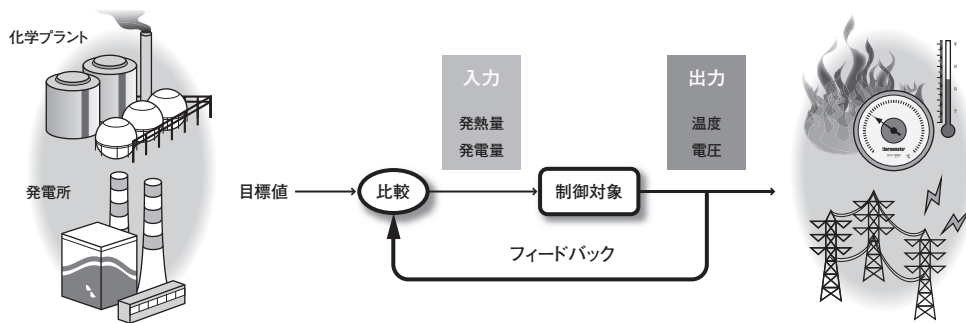


図1 フィードバック制御

出力をフィードバックし、目標値と比較することで、次の入力を決定する。これを繰り返す事で、出力を目標値に近づける。

数が非線形であれば非線形システムと呼ばれる。安定な状態から大きな変化が起こることが想定され、それを修正するような制御は非線形システムとなる。現実のシステムの多くは、この非線形システムで表される。

線形システムの関数は行列によって表されるため、行列の特性を使うことで関数が扱いやすくなる。そのため、線形システムの解析方法はほとんど確立されている。一方で非線形システムは、関数が複雑で扱いづらいため、解析方法が確立されていない。

現在、多くの非線形システムは、線形システムに近似することで、実用上問題なく制御されている。ところが、非線形システムの中には、線形近似した場合の誤差が大きく実用的でないシステムもある。このようなシステムを制御するためには、非線形システムを厳密に解析する必要がある。

三平先生の研究の目的は、このような一般的に

は制御が難しいとされているシステムの制御理論を構築することである。具体的には、非線形システムを、線形近似による解析ではなく厳密に解析する理論を研究している。

時間軸変換という試み

三平先生は、非線形システムを制御する理論を構築するためにさまざまなアプローチを試みている。その一つに、時間軸変換がある。

通常、システムは実際の時間を基準に作られている。非線形システムも一般的には実際の時間を基準に作られているが、制御するための関数が複雑になる場合があり、そのままでは制御が難しい。そこで、実際の時間の代わりに新たな軸を作り、それを基準にすることで、非線形システムを線形の関数として表せることがある。この軸の変換を時間軸変換という(図2)。新たな軸は時間

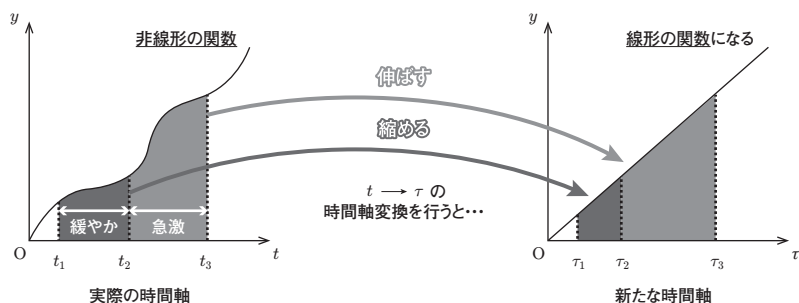


図2 時間軸変換

時間軸を線形にするために、実際の時間軸 t を部分的に伸ばしたり縮めたりして新たな時間軸 τ を作る。

を瞬間ごとに引き伸ばしたり、押し縮めたりしたものが主である。このように時間の縮尺を変える以外にも、位置などといった、時間とはまったく違う軸を新たな軸として考える場合もある。三平先生は時間軸変換を用いて、非線形システムの代表的なモデルの制御を試みた。

時間軸変換が有効な例として、多重トレーラーのバック走行の制御がある(図3)。多重トレーラーのバック走行の制御は非線形のシステムとして表され、線形近似が難しいシステムとされている。しかし、時間軸変換を用いて時間軸をトレーラーの位置の軸に変換することで、このシステムを線形システムとして表すことができる。これは線形近似とは違い、軸の変換であるため、厳密に同一のシステムを表したまま線形の関数にすることができるのだ。このように時間軸変換を行うと、非線形システムを線形システムとして表すことができる。この手法を用いることにより、多重トレーラーのバック走行を容易に制御することができるようになる。

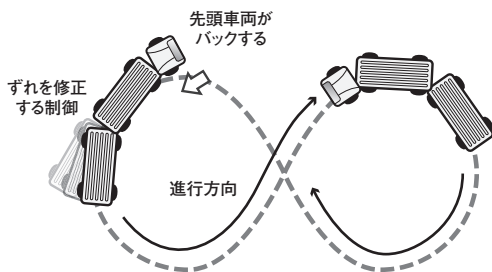


図3 多重トレーラーのバック走行実験

最前車両のみ動力をもつトレーラーを八の字にバック走行させる実験。時間軸変換により制御できることが実験でも示された。

また、自動で車両の縦列駐車を行う場合も、車両の動きを制御するために時間軸変換を用いることができる。車両はその構造上、真横に移動することができないため、縦列駐車をするには、一度前進してから後退する、という動きをしなくてはならない(図4)。これを実際の時間の軸で表そうとすると、とても複雑な関数となる。

これを解決するために、多重トレーラーのバック走行の制御と同様に、時間軸を車両の位置の軸

へと変換した。実際の時間の軸は単調増加しかできなかったが、車両の位置を軸とすることで、前進を軸の正の方向への変化、後退を軸の負の方向への変化で表現することができる。これにより関数が簡単なものとなり、車両の縦列駐車も制御しやすくなる。

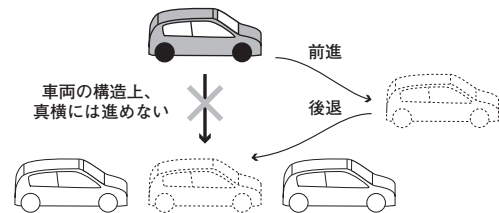


図4 車両の縦列駐車

車両は構造上、真横には動けないため、一度前進してから後退する、という動きをしなくてはならない。

このように時間軸変換を用いることで、非線形システムを線形システムとして表すことができる。時間軸変換によって、一部の解析が難しいとされる非線形システムを厳密に制御することが可能になるのだ。三平先生はこの時間軸変換という手法により、さまざまな非線形システムの厳密な制御を実現しようとしている。

あえて不安定化する

三平先生は、一般的に制御が難しいとされている非線形システムについて研究することで、他の研究者には制御できないものを制御しようと考えている。そのためには、他の研究者とは違ったアプローチが必要である、というのが先生の考え方だ。先生が他の人と違う視点で研究をしているのは、非線形システムの制御に限ったことではない。先生はさまざまな研究において、それまでの制御の常識を覆すようなアプローチをとってきた。その一つに不安定化の利用がある。

通常の制御は、常に対象の動きを安定な状態に維持しようとする。すなわち、対象の動作をどの瞬間で止めても安定な状態となるように制御する。そのためには対象の動きをすべて計画し、それに従うように制御する必要がある。しかし、三平先生は対象の動きすべてを安定化させるのでは

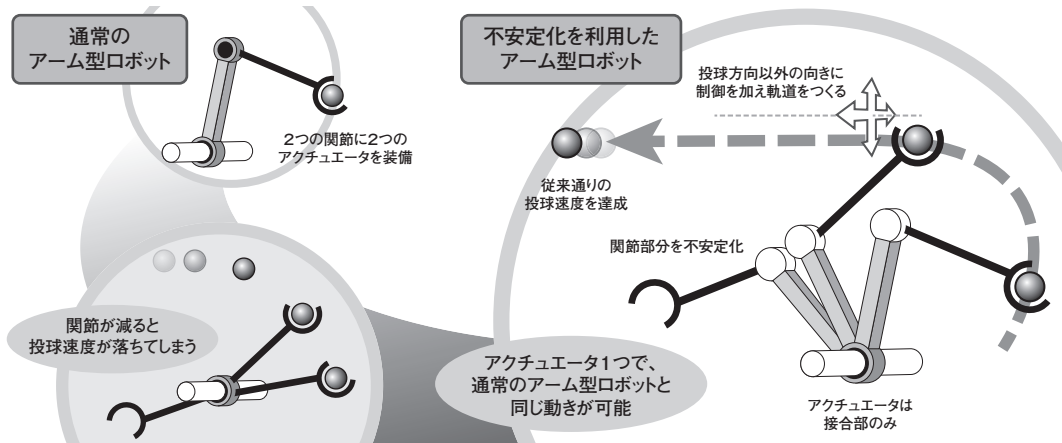


図5 アーム型ロボットの投球実験

通常のアーム型ロボットに比べ、関節が一つのアーム型ロボットはアクチュエータの数を減らすことができるが、投球の速度が落ちる。不安定化を利用することで、1つのアクチュエータでも投球の速度を保つことができる。

なく、あえて一部に不安定な部分を残すことで、対象の動きをうまく制御できるのではないかと考えた。

不安定化が効果的に利用できた例として、アーム型ロボットによる投球がある（図5）。通常、アーム型ロボットで人間のようにボールを投げるには、人間の腕における肩と肘にあたる部分に1つずつモーターなどの駆動装置が必要となる。このモーターなどの駆動装置を総称して、アクチュエータという。アーム型ロボットの投球では、肩と肘のアクチュエータによりボールの軌道を制御するのだ。

アクチュエータ一つひとつに対して制御が必要となるため、通常、より効率的な制御を行うためには、アクチュエータの数を減らすことを考える。しかし、図のようにアクチュエータを1つ減らした、関節が1つのアーム型ロボットでは、投球の速度が落ちてしまう。三平先生のアーム型ロボットはこの問題を解決することに成功した。

三平先生のアーム型ロボットは関節が2つだが、通常のアーム型ロボットとは違い、アクチュエータを肩の部分にのみ搭載し、肘の部分は自由に動くようになっている。また、ボールを進行方向以外にのみ不安定化させ、進行方向にはあえて不安定化したまま制御をしている。これにより、アクチュエータ1つでも通常のアーム型ロボットと同様に、ボールを前に投げ出すことができるよ

うになっている。このように、動きをすべて制御しなくても、肩のアクチュエータのみで、通常のアーム型ロボットの投球速度を保ったまま、投球を制御できるのだ。

アーム型ロボットの投球制御のほかに、人間型ロボットの走行制御においても不安定化が効果的に利用できた。通常の人間型ロボットは、走行する際の重心の動きや足の動きなどをすべて計画し、それに従って動くように制御している。そのためには多くの部分の制御が必要となる。

一方、三平先生の人間型ロボットの走行制御は、腰の高さのみを制御し、体の傾斜は不安定な状態にしている。腰の高さを一定に制御することで、体を前に傾けるだけで自然と走り出す（図6）。また、通常の人間型ロボットの走行に比べ、制御が必要となる部分が少なくなるので制御が簡略化される。さらに、腰の高さのみを制御したロボットの走行は、より人間の動きに近いものとなり、素早い動作となった。

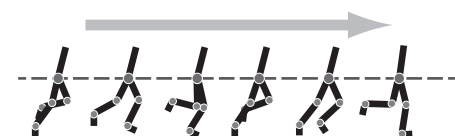


図6 人間型ロボットの走行シミュレーション

腰の高さが一定になるように制御する。体が前傾すると自動的に走り出す。

このように不安定化をうまく利用すると、少ないアクチュエータで制御することができるため、必要な動力が少なくなる。また、制御を必要とする部分が少なくなるため、より単純な制御が可能となる。

三平先生は、不安定化のような常識を覆す発想からより良い制御を実現することを目指している。また、非線形システムのように、一般に制御が困難なものを制御しようと研究を行なっている。三平先生は他の研究者が目を付けていないところに注目し、研究を進めることを常に意識しているのだ。

先生のスタンスと制御のこれから

ここまで三平先生の研究に対するアプローチや考え方を述べてきたが、三平先生の研究の目的は具体的な目標の実現ではなく、制御理論の構築である。制御は多くの分野に利用される横断的なものであるから、一つの制御理論をさまざまな分野に応用することができるのである。

制御分野と機械分野の研究は似たものに思われがちだが、そこには明確な違いがある。ロボットなどの機械分野は、目標となる具体的なものがあって、それを作るために試行錯誤を繰り返している。しかし、制御分野は作ることが目的ではなく、機械、電力、化学反応などのさまざまなものを同様のモデルで表し、同一の理論で操ることを目的としている。

三平先生は、さまざまな分野に応用できる点に制御という学問の魅力を感じている。先生の研究の目的は、試行錯誤から特定の目標の制御を実現することではない。さまざまな分野で使うことができる統一的な制御理論を作り、制御という学問自体を発展させることにあるのだ。制御はまだまだ発展の余地を残した学問なのである。

三平先生は、制御という学問全体の課題としてスマートグリッドを挙げている。スマートグリッドとは、電力の流れを供給側、需要側の両方から制御し、最適化するための送電網のことである(図7)。昨今、電力の供給不足からエネルギー問題が頻繁に取り上げられ、このスマートグリッ

ドにも注目が集まっている。

スマートグリッドが実現されれば、余分な電力を貯蓄したり、不足している電力を供給したりといったことが可能となる。これにより、発電所における余剰な電力の削減や、発電量が不安定な自然発電の効率的な利用の実現などのメリットが生まれる。

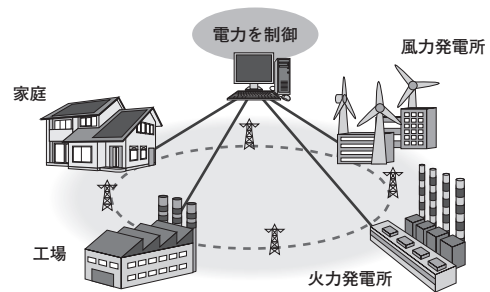


図7 スマートグリッド

各発電所や家庭での太陽光発電による電力供給と、工場、家庭における電力需要の双方を制御する。

スマートグリッドによる電力のやり取りを可能にするためには、送電網全体を制御しなければならない。これには、今までとは違った制御の考え方が必要となる。スマートグリッドの実用化には制御の発展が必要不可欠なのだ。

制御の発展は他のさまざまな分野の発展につながっていく。今後の制御の発展、そして三平先生の研究のさらなる躍進が期待される。

執筆者より

制御理論の研究は理学的で難解であるにも関わらず、三平先生は私にもわかるよう丁寧に教えていただきました。また、三平先生の研究内容だけではなく、制御という学問全体に関して興味深いお話を伺うことができました。

読者の方々には、この記事を通して、少しでも制御という学問について理解を深め、興味をもっていただければ幸いです。

最後になりますが、お忙しい中、取材に快く応じてくださった三平先生に御礼申し上げます。

(藤田 哲平)