

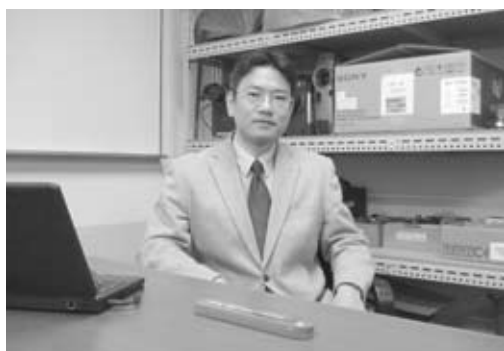


In Laboratory Now

研究室訪問 3

更なる制御の高みへ

山北 昌毅 研究室～機械制御システム専攻



山北 昌毅 准教授

現在私たちの周りには数多くの機械があり、そのおかげで快適な生活を送ることができている。しかし、近年これらの機械はより複雑化、高度化の一途をたどり、うまく作動させるためにはそれに適した制御を行わなければならない。そのためには、より高度な制御システムが必要となっているのだ。

山北研究室でのテーマは多岐に渡り、ロボットの制御をメインにアクチュエータも研究している。これらの研究を通して、より高度な制御方法を目指している。



制御工学とフィードバック

みなさんは制御工学という学問を知っているだろうか。対象の機械の仕組みを理論的、数学的に解析することにより、意のままに操って、自律的な動作を可能にさせる方法全般に関する学問のことをいう。

制御工学で重要な位置にあるものでフィードバックという、結果を原因に反映させて次の結果を調節するという概念がある。特に制御工学において、連続動作する装置でセンサを用いて装置から出力された結果を読み取り、その結果に応じた値を装置の次の入力要素に組み込むことで、出力の制御をより高精度なものとする。フィードバックによる制御の利点には下記で述べる目標値への収束の他に、対象の安定化、予期しない環境の変化への対応などがある。

それではフィードバックを用いた制御工学に関する簡単な例をあげてみよう。図1のように水の入った3つの排水口付きのタンクがある。一見、蛇口からの水の量を操作するだけで、AとCに入っている水の量を等しくすることは不可能に見えるかもしれない。しかし、それぞれのタンクの中に含まれる水の量や単位時間当たりの蛇口の

排水量、タンクからの流入量・排水量をセンサで測り、図1のようなフィードバック制御を行えばできるのである（ただし、図の操作はあくまでも概念図）。

だが、理論的に制御が可能であることが分かっていても、それは目標ではなく単なる前提にすぎない。さらに専門的な知識や能力を持っている人だけではなく、誰でも制御ができて、さらに効率性や最適性まで考慮に入れることが制御工学の最終目標なのである。

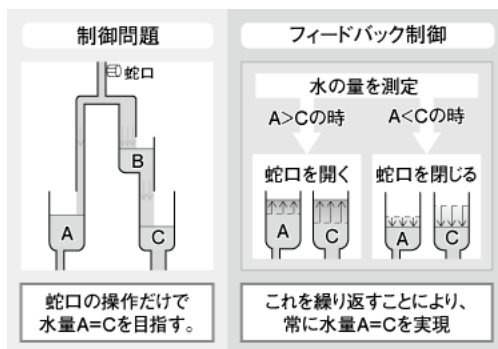


図1 フィードバック制御の例



山北研究室で取り組むロボット達

それでは山北研究室での具体的な研究の流れについて紹介しよう。山北研究室では、ハードウェア自体を作るというよりも、ソフトウェアを作りそれをハードウェアに反映させるという手法がメインだ。また、研究テーマは特定のものを追求するのではなく興味によって変更している。さらに、企業からの相談を受けての共同研究をテーマとすることもある。テーマが決まったら目標の仕様をどのように達成するかを考え、よりうまく動くように理論を組み、シミュレーションで検証する。しかし、現実にはものを動かす時に予想できない

要素が山のようにある。よって、シミュレーションを立てる際には、これらの不確定性を考慮しつつうまく動くように設計することが大切だ。この不確定要素への対処法に用いられる一つがフィードバック制御である。シミュレーションをうまく組み立てることができたら、次にハードウェアで試す。そして、ハードウェアでの結果がシミュレーション通りになるかどうかを確かめていく。これが山北研究室での研究の一連の流れだ。

以下では、山北研究室が取り組んできたロボットをいくつか紹介しよう。

アクロバットロボット（写真1）

まず、最初に紹介するロボットは、SMB (Super Mechano-Boy) というものである。これは両手両足に多数の関節があり、関節部のモータを制御することによって鉄棒の運動を行うことができるロボットだ。これまでの研究により、鉄棒にぶら下がった状態から身体を徐々に大きく揺らして大車輪をしたり、逆立ちの状態から姿勢のぶれをフィードバックして倒れないように維持することなどが可能になった。現在では鉄棒からの着地ができるように研究している。

SMB には前段階のロボットがあった。しかし、このロボットには足を横に開く自由度がないため、体が横に少し回転すると足が対応できず、着地できなかった。そのため、山北研究室では市販されている自由度の高いロボットに前のものと同じプログラムを入れて研究している。写真1で示されている現在の SMB は足が開くようになっていて、横方向のバランスもとることができる。シミュレーション上では鉄棒から飛び出し、空中回転をして、実際に人間が着地してバランスをとる時と同じように、つんのめりながら着地することができる（図2）。これは元々その動き自体をプログラムしているわけではなく、あくまでもフィードバック制御のもたらした計算結果にすぎない。着地時にロボット本体の状態を常にフィードバックし、倒れないようにしながらより衝撃を吸収するように各関節の動きを制御した結果として、つんのめるという動作が導かれる。すなわち、

状況に応じたフィードバック制御を行った結果として人間と同じような行動になるのだ。

SMB では手足が鉄棒についたり、離れたりといったように環境がいろいろと変わる。このように周囲の環境と接触する条件が多様に切り替わるシステムのことを可変拘束系という。SMB を作る上での最大の目的は、この可変拘束系に対して有効な制御システムを開発するということだ。

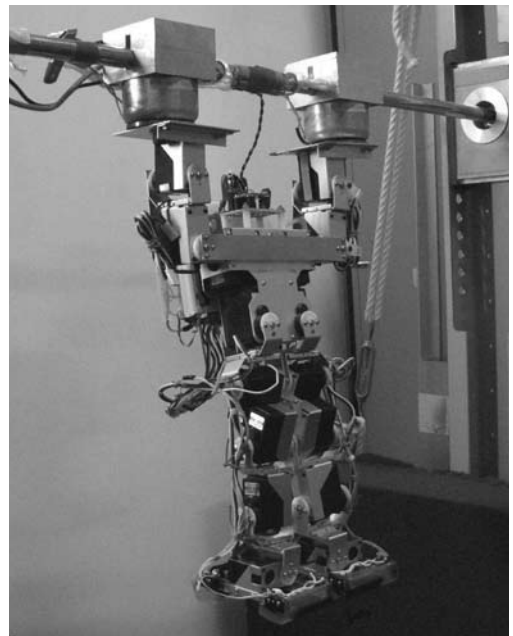


写真1 SMB

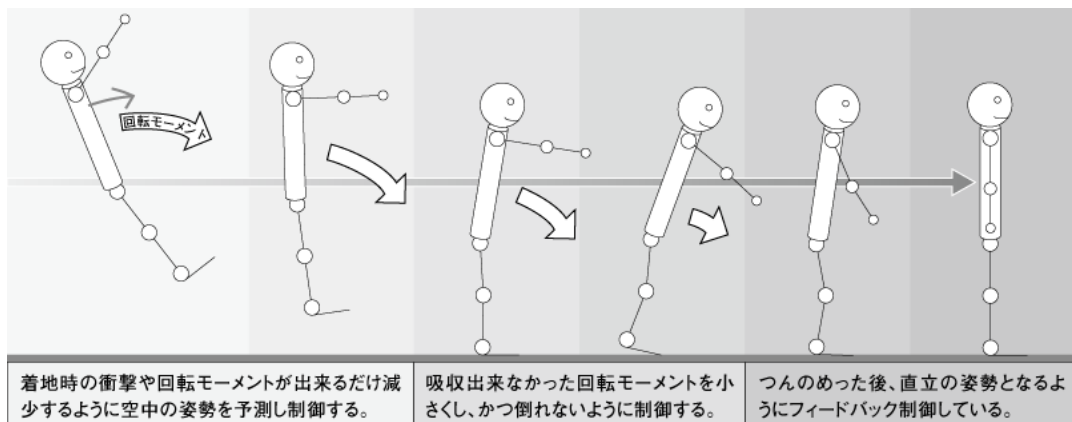


図2 アクロバットロボの着地のシミュレート

ランニングロボット (図3写真)

次に紹介するのはランニングロボット、通称 KenKen II だ。このロボットは外部研究機関との共同研究であり、いかに動物的な二足走行を実現できるかをテーマに作られている。

KenKen II はジャンプしながら走行する。この時に足首を曲げるのだが、ここにアクチュエータがついていないことが KenKen II の最大の特徴だ。アクチュエータとはエネルギーを使って動作する駆動源のことである。足首を曲げる動力としてアクチュエータを使うと、曲げるためのエネルギーを使わなければいけないが、KenKen II の足首の部分にはアクチュエータの代わりにバネが取り付けられている。そのため、着地するときボディにかかる重力によってバネが伸び、このバネが縮む力をジャンプして前進する時の力に当てることができる (図3)。すなわち、バネを使うこ

とでエネルギー効率がよくなるのだ。

KenKen II には前段階として KenKen I という一本足で走るロボットもいた。一本足だとバランスをとることができなくて、走るのを制御するのは難しいと思うかもしれない。しかし、実際には二本足で走るほうが難しい。なぜならば、足を増やすということは重量が増すことにつながり、時間当たりの着地の回数も増える。そうすると、着地のインターバルが短くなり、更に脚力を強化する必要があるからだ。あえて山北研究室がその難しい二本足のロボットを研究しているのは、単に効率的な走行を目指しているだけではなく、動物の自然な動きができる機構での走行も目的としているからだ。また、最終的に動物がどのようにして効率的に走っているのかを解析したいとも考えている。

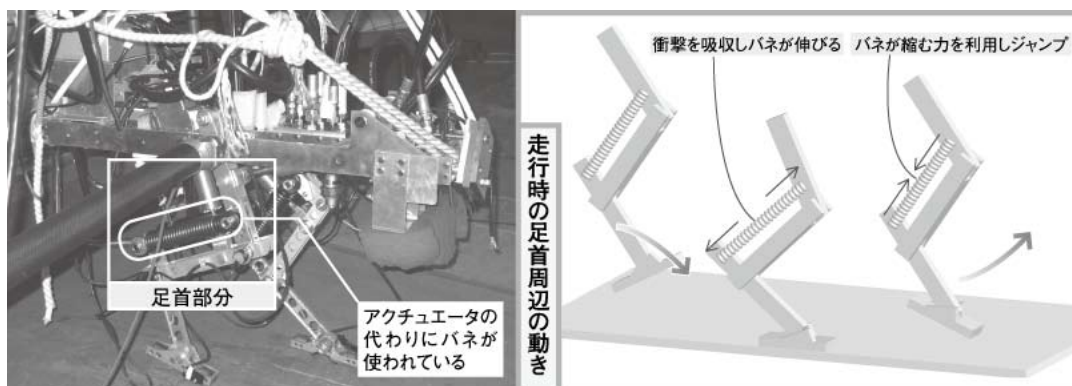


図3 KenKen II の蹴り上げ時の様子

バイクロボット (写真2)

最後に紹介するロボットはバイクロボットだ。普通のバイクは人が乗ってバランスをとらないと倒れてしまう。そこで山北研究室ではジャイロセンサによって感知した自身の傾きに応じて上部に搭載した振子を左右に振るというフィードバック制御を行うことで、無人での静止状態を保ち低速でも安定した推進ができるようにした。また、これによって人間が何気なく行っている運動の解明や、ウィリー走行のような高度な二輪車運転制御法の解明・実用化を目指しているのである。

このバイクロボットは市販のバイクを改造して作られているが、市販の製品は高度な事故防止機能を備えていたり、人への乗り心地を良くするために柔軟な車体にしてあるため、制御を行うのは難しい。それでもなお市販のものを使うのは、制御系の汎用性を重視しているためと、使いにくいからこそ持ちうる最高の技術を駆使して使いこなしたいという強い思いがあるからだ。また、これにはコスト削減というメリットもあり、減った分のコストを使って更なる研究を進めることにつながっているのである。

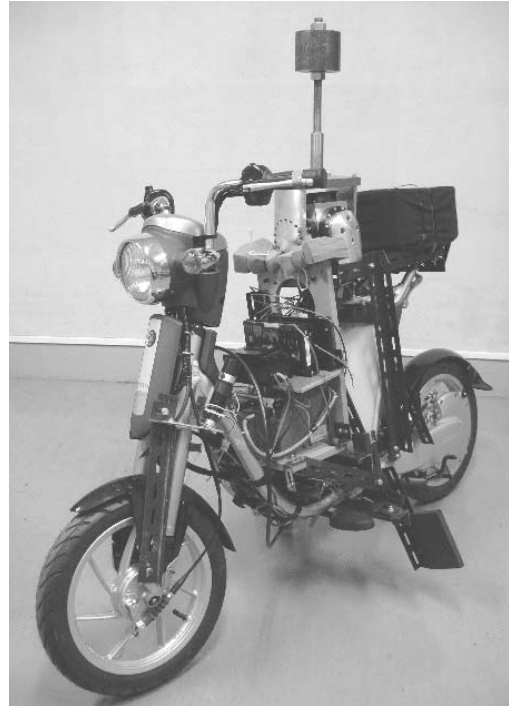


写真2 バイクロボット



高分子アクチュエータ

前章で説明したようなロボットの小型化などの実現を目指し、山北研究室ではIPMC (Ionic Polymer-Metal Composite) アクチュエータやバッキージェル (Bucky Gel) アクチュエータという高分子アクチュエータの研究も行っている。これには、柔らかい、応答速度が比較的速い、

耐久性に優れている、軽量、無音、低電圧動作、小型などの特徴がある。このため、柔らかい生物学的な動きが出せない、出力重量比が大きいなどの従来の電磁モータにある様々な問題を解決することができる。以下、この2つのアクチュエータについて紹介しよう。

IPMC アクチュエータ (図4)

IPMC とはフッ素系イオン交換樹脂膜の表面に金や白金などの貴金属をメッキしたものであり、1～3V程度の低電圧を加えることで高速に屈曲する。この屈曲運動を用いたのが、直動運動するIPMC アクチュエータだ。図4のようにIPMCを直列や並列に接続すると伸縮をする機構を構成することができる。これにより、変位や出力を持ったため、アクチュエータとして使用することも可能となった。

この屈曲はイオンの移動によるものなので、

水中もしくはそれに準ずる湿潤な環境下においての動作が基本となる。そのため湿潤を保つ手間がかかるのだが、IPMCにはそれを補う利点がある。それは、アクチュエータとしてだけでなくセンサとしても利用できる点だ。IPMCは外部からの刺激に応じた微小な電圧が発生する。この現象を利用してセンサとして使うことができる。IPMCはアクチュエータとセンサの両方として利用できるのも、より小型化の機構になり、多種多様な応用の可能性が広がっている。

山北研究室ではIPMCにドーピングを行い、アクチュエータとしての特性を変える研究をしている。ここでいうドーピングとはIPMC内に特定のイオンを含ませることをいう。例えば、IPMCアクチュエータを食塩水に短時間つけてナトリウムイオンを含ませておくと、より俊敏に動くように変化させることができる。同様に、テトラエチルアンモニウムを含めると、持続性をもつようになる。このことから、使用用途に応じて動作速度を大きくしたり、エネルギー効率をよくしたりすることができる。

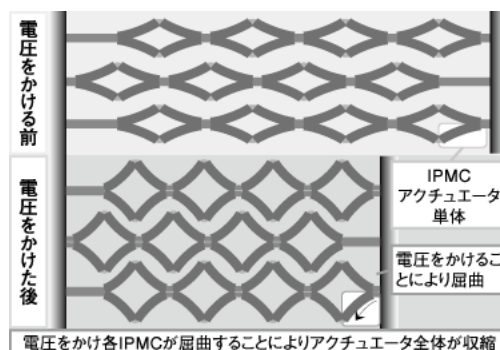


図4 IPMC アクチュエータ

バックキーゲルアクチュエータ (図5)

バックキーゲルアクチュエータとはバックキー氏が開発したゲルを元に作られたものである。その構造は、図5のように真ん中の電解質不揮発性層を挟むように電極を積層した3層構造であり、電極間に電位差を与えることによって屈曲する。このように電解液の層が露出しないために、バックキーゲルアクチュエータは空気中など乾燥した環境でも使用できるのだ。

また、バックキーゲルアクチュエータには大きな特性がある。プリント法が適用できる優れた成形性を持っている点だ。バックキーゲルアクチュエータにおけるプリント法というのは、専用のプリンタにインクではなく電解液や電極液を使い、紙に印刷するように積層させる手法のことである。さらに、コンピュータ制御やCADを使えば、複雑な形でも簡単に全自動で作ることができる。このようにプリント法を使うことには生産性が高く、製造コストが低くなるという利点がある。

さて、このように多くの利点をもつバックキーゲルアクチュエータだが、以前は自身の曲げ角度を検出できないという問題があった。検出できない場合は外部にセンサをつけないといけなくなり、小型化が難しくなってしまう。

そこで、この問題を解決しようとして研究を重ね、バックキーゲルアクチュエータ素子を変形させることにより電圧が生じるという逆の作動特性を活かし、

変位センサとしても利用できるということを発見した。この発見によりアクチュエータとセンサの機能を併せもつようになるため、コンパクトなフィードバック系を作ることができる。さらに、このセンサは柔軟・軽量で測定可能範囲が広いのだ。こうして、アクチュエータと変位センサを一体化した、センサ機能付き統合型ソフトアクチュエータの実現が可能になった。

制御の分野では常に一通りの方法でうまくいくということはない。よって、臨機応変に最適なものを考える創造力が必要となってくる。山北研究室が数多くのテーマを基に研究しているのは、視野を広くするとともに創造力をより豊かにするためなのだ。これからも山北研究室は様々なもの

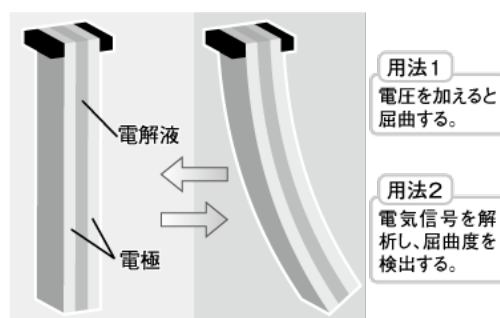


図5 バックキーゲルアクチュエータ

山北研究室では本文で紹介したロボットの他にも数多くのロボットがありました。紙面の都合により全ての研究に触れることができず深くお詫び

申し上げます。最後になりましたが、お忙しい中快く取材に応じて下さった山北先生に心よりお礼申し上げます。(江藤 大和)