

# 生物に学ぶロボット制御

## 機械制御システム専攻 倉林 大輔 研究室

倉林 大輔 教授 1970年生まれ。東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。1998年、理化学研究所基礎科学特別研究員。2001年、東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻講師。2014年より、同教授。



倉林研究室では、新しく問題が発生した時でも自分で考え解決できるような賢いロボットの制御について、生き物に学ぶという手法で研究を進めている。まず、粘菌をモデルにした群れで動くロボットを紹介する。次に、カイコガの脳をロボットに接続することで、カイコガの匂い源を探るシステムを解明する研究について紹介する。

### 賢いロボット

皆さんはロボットと聞いてどのようなものを想像するだろうか。人間によって一から十まで厳密に制御されているものをイメージする人もいることだろう。このようなロボットはある決められた条件の下では、大きな力を発揮する。しかし、人間が想定していなかった事態が発生した場合、対応できずに本来の機能を失ってしまう。結局、人間の手を煩わせることになってしまうのだ。この問題を解決すべく、倉林研究室では自分で考え、その場に即して行動できるような賢いロボットを作ること目標としている。

倉林研究室の特徴の一つとして、このような賢いロボットを作るために、生物を参考をしているということがあげられる。一体生物のどのような機能をロボットに応用しようとしているのだろうか。これから、倉林研究室が取り組んでいる研究について紹介していく。

### 群れとして動くロボット

まず、集団での移動制御についての研究を紹介する。移動制御というと車の自動運転などのように、人間が起こりうる問題を予想し最適化を施すようなタイプのものがある。だが、それと比べると生物は別のタイプの移動制御システムをもっているようである。

例えば、粘菌は単細胞生物であり神経系をもたないが、餌に向かって移動したり逆に危険なものから逃げたりすることができる。これはどういうことだろう。どうして神経系をもたない単細胞生物が状況を判断し、移動制御を行うことができるのだろうか。

これには同期という現象が関わっていると考えられている。生物が同期というものを多く使っていることは感覚的に理解しやすいだろう。人間をはじめ多くの生物は概日リズムに同期して行動することはよく知られている。それ以外にもハチや

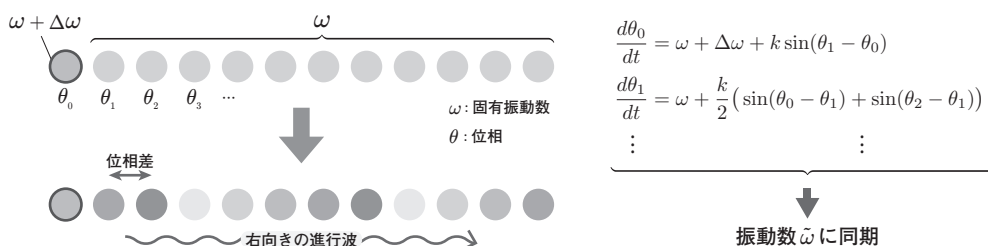


図1 蔵本モデルでの進行波の形成

左端の振動子の固有振動数を上げると、全ての振動子がある振動数 $\bar{\omega}$ に同期され、右向きの進行波が形成される。

ホタルが羽音や明滅を同期させることで仲間同士でタイミングをはかるといったものもある。

粘菌は体全体を常に収縮、膨張というかたちで振動させている。体の一部に刺激を与えるとその部分の振動数が変化し、振動にズレが生じ波ができて見える。例えば、餌などによる好ましい刺激の場合は刺激を受けた部位から周りの方向へ、危険な物質などによる刺激の場合は周りからその部位の方向への進行波が形成される。この進行波を逆行するように動くことで、餌の方に移動したり、危険なものから逃げるといったような移動制御を行なっていると考えられている。

これをロボットの移動制御に応用することを考えると、数学的なモデルで表現する必要がある。同期現象を記述するためには蔵本モデルというものがよく用いられている。

蔵本モデルでは、いくつかの振動子と呼ばれるものからなる系を考える。振動子は常に振動していて、時間依存した位相がある。また、それぞれが固有振動数というパラメータをもっていて、単体ではこの振動数で振動しようとする。振動子が

多数あるとき、周りとの位相のズレから振動数を調整することで同期しようとする。このときの振動数を調整するための数式は

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega + \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i - \theta)$$

のように表される。 $\omega$ は固有振動数、 $\theta$ は振動子の位相、 $n$ は周りの振動子の数、 $\theta_i$ は周りの振動子の位相である。 $k$ は自由に決められる定数であり、これが大きいと同期がされやすくなる。この式を見ると、周りの位相が進んでいるとき、振動数を高めるといった動作をすることがわかるだろう。

粘菌の体が多数の振動子の集合体であり、刺激によって固有振動数を変化させることを考えると、前述した粘菌における進行波の形成はこのモデルで説明できる。蔵本モデルにおいて同じ固有振動数をもつ振動子を並べた中に、一つだけ固有振動数の高いものがあるとき、位相にズレが生じることで全ての振動子の振動数が同期され、固有振動数の高いものからその周辺への方向に波が出来て見える（図1）。

このように数理モデルで表現できるようになるとロボットでの実装が容易になる。倉林研究室では蔵本モデルを用いて、群れで粘菌一個体のような移動制御をするロボットを作った。

蔵本モデルを実装するために、振動をLEDの点滅で表現し、周りのロボットの振動は全方位についている光センサで取得する。また、レーザーセンサによって周りのロボットを検知し、群れとしての機能を失わないように、ロボット同士がぶつからない程度に近づくようになっている（図2）。

そして、蔵本モデルによる進行波が形成されたら、その波の進行方向と逆に動くようプログラム

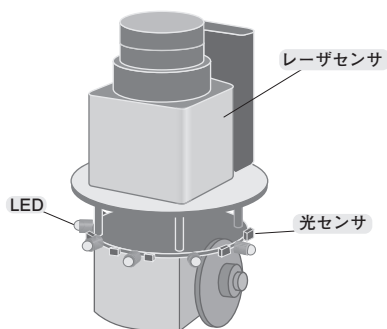


図2 作成したロボットの構造

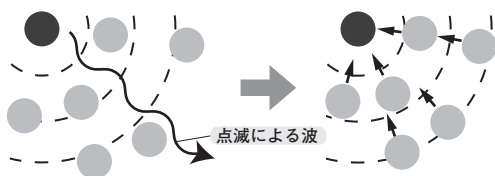


図3 同期モデルによる移動制御

固有振動数を変化させることで周りのロボットを遠近方向に移動させることができる。

されている。これにより、それぞれが固有振動数を上下させるだけで周りのロボットを近づけたり遠ざけたりすることができる（図3）。

また、このロボットにはもうひとつ別の移動制御が実装されている。このロボットは周囲にLEDがいくつか付いていてその位相を周りに伝えているが、この出力する位相を角度によって変化させる。つまり、バトランプのように光を発する方向を回転させる。すると、周りのロボットは極座標角度方向の進行波を形成する。こうすることで、周囲のロボットに遠近方向だけでなく周りを回るような指令を出すこともできる（図4）。

このようにして作ったロボット群は、実際に移動指令を出すロボットにアクセスせずに、周りの数個のロボットの情報を得ただけで移動指令を受け取ることができる。また、群れの中の数個のロボットが故障したり、群れにロボットを追加したとしても、支障なく運用することができる。

他にも、このような自己組織化的な移動制御アルゴリズムは、単純な命令によって集団の制御をするものなので、ロボットだけでなく人間などの集団を制御することなどにも応用することが期待される。

## 匂い源を探る

このように倉林研究室では生物のもつ効率的なシステムを機械に取り入れるような研究をしている。その中で、移動制御の他にも匂い源を探る機能について研究を進めている。

匂い源を探るというのは人間から昆虫まで動物には広く普遍的に存在する機能である。これを機械に取り入れることができれば、例えばガス漏れなどで有害物質の発生源を特定し対処するなど、人間にとっては危険な作業をロボットに任せられるようになる。だが、この機能をもつロボットは未だに生物がもつ性能には遠く及んでいない。そこで倉林研究室ではカイコガという昆虫を用いて匂い源を探る機能について研究している。

カイコガは絹糸の原料となる繭をつくる蛾として人間に飼われてきた昆虫であり、成虫になると食べることも飲むこともなく、羽があるのに飛ぶこともない。カイコガの雄は、雌のフェロモンを感知し、その源である雌のカイコガを探すことしかしない。

この特徴から、実験の際に餌の匂いにつられてその方向に移動するといった余計な行動をとらないため、研究には最適である。また、カイコガの触覚は雌の出すフェロモンを一分子から感知できると言われているほど非常に感度が高い。倉林研究室では、このカイコガの雄の脳を取り出し、ロボットに接続することでカイコガのもつ匂い源の特定システムを解明しようとしている。

生物の体には非常にたくさんの感覚器官が存在していて、その膨大な情報をフィードバックする

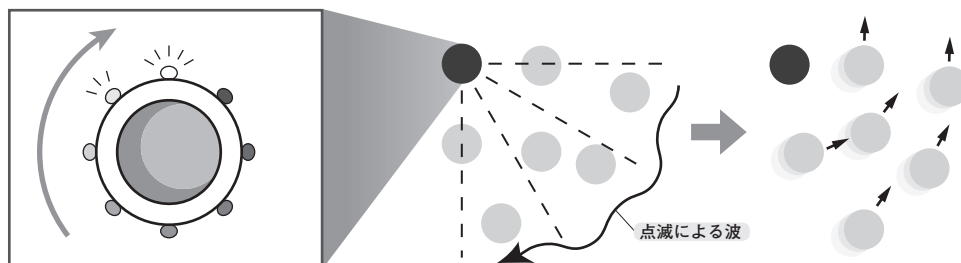


図4 極座標角度方向の移動制御

出力する位相を角度によって変化させることで、周りのロボットを極座標角度方向に移動させることができる。

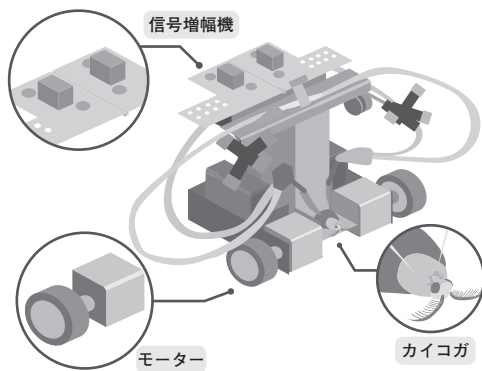


図5 カイコガを搭載したロボット

ことで体を制御している。それゆえ、生物の特定の機能を取り出して観察するのは非常に難しい。そこで、倉林研究室では匂い源の定位システムをモデル化するために、複雑なカイコガの体ではなくロボットを使うことによって研究を進めた。

まず、カイコガを解剖する。頭部を切り出し、必要な電気信号を取得しやすくするために神経を取り出す。この解剖したカイコガを制作したロボットに載せ、露出させた神経を吸引電極で吸引する。吸引電極というのはガラス管の中に生理食塩水を満たしたもので、これにより神経信号を得ることができる。このときの神経信号はマイクロボルト単位で表わされるほど微弱なので、アンプなどで増幅、調整する（図5）。

これを用いて、例えば右足を動かす電気信号で右の車輪のモーターを動かす、といったようにロボットを動作させている。モーターの出力は神経の発火頻度を単位時間積分した値の正数倍に設定している。このような微弱な神経信号は非常にノイズに弱いので、神経信号を取得するときは安定した場所で専用の大型の機械を使うものである。それを小型ロボットに載せ自立して動かすというのは非常に難しく、世界でも類を見ないという。

こうして動作させたカイコガロボットにおいて、リアルタイムで神経信号を計測しながら、モーター出力を突然2倍にしたり元に戻したりする実験を行なった。モーターの出力を2倍にするとカイコガは神経の発火頻度を減らし、移動に支障が出ないように調整していた。出力を元に戻したときも同様にカイコガは神経信号を元に戻るように調整

していた。この結果からわかることは、カイコガは自身の速度をフィードバックして移動を正確に行なっている可能性が高いということだ。

このようにシステムのモデル化をすることによって、カイコガが何をフィードバックしてどのように移動を制御しているのかがわかるのだ。これがわかればロボット単体で生物のシステムを再現することができる。

こうして作ったカイコガロボットで、性フェロモンの発生源を探索させる実験をしたところ、成功率は80%程度であった。だが、カイコガそのものの成功率は100%である。これは、解剖の際に神経を傷つけてしまうといった技術的な問題や、フェロモンが実験装置などに付着し、実験がうまくいかないといったことが原因であると予想される。また、カイコガはその神経的な動作アルゴリズムだけではなく羽による空気の流れの制御など、身体のもつさまざまな特性によってその定位能力を高めていると考えられる。

それ以外にもこのモデルでは、実験者側は空気中のフェロモンの状態を正確に把握することができないので、実際にどういう信号を受けて移動制御しているのかがわからない。そこで、カイコガを仮想空間に置いてシミュレートするといった実験も行なっている。これを実現するためには、カイコガの性フェロモンの感知を自由に操作できなくてはならない。

遺伝子組み換え技術によって、虫の触覚に光感受性タンパク質（チャネルロドプシン）を発現させることができる。このタンパク質は、特定の波長の光を検知して本来とは別の感覚神経に割り込んで信号を出すことができる。これをカイコガの触覚に発現させることで、人為的にフェロモンを感知した状態にさせることができる。

こうして遺伝子組み換えを行なったカイコガを、動きを検出するための回転するボールに載せ、チャネルロドプシンを反応させるライトを設置することで生きたカイコガをシミュレータの中に取り込むといった実験をした（図6）。

この結果、カイコガはベイズ推定に基づいたアルゴリズムを使って定位行動をしているようだということがわかった。このアルゴリズムは、匂い

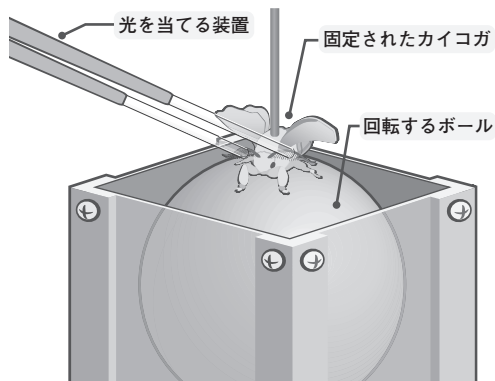


図6 カイコガをシミュレータに取り込む

カイコガを固定し、触覚に光を当て、その動きをコンピュータに取り込む。

源のある確率を推定しながら、情報量が多いと予想される方向に移動するというものだ。つまり、匂い源がありそうな方に移動するのではなく、匂い源の位置を確定するのに適した動きをする。

実験では、カイコガがこのアルゴリズムを使っているとしてシミュレートしたものと、実際のカイコガの動きを比較し、動作の一致を確かめた。

結果によると、カイコガがそのアルゴリズムを使っているとするとおおまかにはうまく一致する。だが、匂い源の位置が定まってくると、カイコガはベイズ推定によるアルゴリズムでの方向決定ではなく、実際に存在確率が高い方向に賭けて行ってしまうという。

ベイズ推定によるアルゴリズムを使ったときに、わざと存在確率の低い方向に進んだほうが情報量が多いことがある。

たとえば、匂い源があって風が吹いているとき、

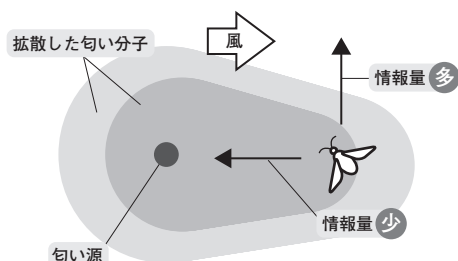


図7 匂い分布を移動する際の情報量の差

ベイズ推定によるアルゴリズムでは、匂い源が近くにあっても別の方向に進んでしまうことがある。

風向き方向に匂いが帯状にたなびく。ここを通るとき、帯状の匂い分布を遡ろうとする動きは、匂いの濃さにあまり差がないので情報量は少ない。逆に横切ろうとする方向には匂いに差があり、分布の形状という大きな情報を得ることができるので、情報量が多い。こうなってしまうと、実際の目的地と直交方向に動き、目的地の周りぐるぐると回ってしまいなかなか辿りつけないということになる（図7）。

これを回避するために、実際のカイコガはベイズ推定を使ったアルゴリズムによるものとは少し違った動作をするのだと推定される。

このような実験を通して、カイコガがもつ匂い源定位のシステムを完全に解明し、ロボットで再現することを目指して研究を続けている。

## 生物のもつ柔軟性

機械と生物を比べたとき、機械は特定の機能について優れているといえる。例えば、人間の脳でさえ単純な計算についてはスーパーコンピュータの計算速度には遠く及ばないし、長時間にわたって新幹線より速く走ることができる動物はいない。

しかし、停電や脱線などの事故が起きた時に対処してくれるかというそうではない。生物は足が一本なくなったとしても生きていくことができる。生物の強みはその頑健さ、柔軟性にある。

自己組織化ロボットは何機かが故障しても全体には支障なしに動き続けることができる。また、カイコガの強いフィードバックのシステムを学ぶことで、より頑健なロボットの制御システムが構築できるかもしれない。倉林研究室では生物のもつ頑健で柔軟なシステムをロボットに取り入れ、司令を与えられなくても自分で考え、行動するようなロボットを作る研究を日々続けている。

## 執筆者より

生物を用いたロボットなど、先生の研究は大変興味深いものでした。お忙しい中、快く取材に応じてくださった倉林先生に、厚く御礼申し上げます。

（澤田 海人）