

第1回 機構のヒント「スケーリング」

東京大学大学院 工学系研究科 機械情報工学専攻 助教授 下山 勲

従来から生物の機能や構造を工学的に実現しようとする試みは数多くあった。航空機のように、機械として実現されたものが、手本であった生物よりずっと高性能になったと考えられる例も多い。

マイクロマシンはこれまでわれわれが作れなかった微小寸法の機械である。従来の機械を外挿的にスケールダウンしてマイクロマシンを設計しても、期待した性能が得られないこともある。この理由の一つは、スケールダウンすることによって、支配的な力、つまり相対的な力の関係が変わるからである。たとえば、寸法が小さくなれば、慣性力に比べて粘性力が支配的になる。流体力を利用した移動では、寸法が小さくなると粘性力を利用したほうがよいといわれている。また、寸法が小さくなるとともに表面張力が大きくなって、シリコン基板に微小部品が固着することはよく経験することである。微小世界では摩擦力も大きくなるので、回転軸も回りにくくなる。

ここで目を自然界に向ければ、生物は自然選択による進化の過程で寸法に適した構造や機能を獲得したと考えられる。そのなかでも昆虫は、小さな寸法にもかかわらず、飛んだり、はねたり、あるいは逃避行動をとり、その動きには驚かされる。昆虫はマイクロマシンの寸法と同程度の大きさなので、マイクロマシンのちょうどよい手本だ。

そこで、特に昆虫に着目して、マイクロマシンの立場から生物学的なデータをながめてみよう。図1に示すグラフは、いろいろな寸法の生物が単位時間に消費するエネルギー（代謝エネルギー）の実測値である。このグラフは、生物が単位時間に消費し

た酸素の量を、酸素1リットルあたり20.1kJとしてエネルギーに換算したものである。図1から、代謝エネルギー P_{met} は体重 m の0.75乗に比例していることがよみとれる。

$$P_{met} \propto m^{0.75}$$

これは、寸法が小さくなるとともに、単位体重あたりの代謝エネルギーが増大することを意味している。図1の関係が生物全体に成り立つと素直に認めればいろいろ面白い結論が導き出せる。たとえば、水中で呼吸できない生物の潜水時間 T は、体内に蓄えられる酸素の量を酸素の時間当たりの消費量で割ったものである。

潜水時間 (T) = 体内の酸素量 / 時間当たりの酸素の消費量

体内の酸素量は体重に比例する。時間当たりの酸素の消費量は、代謝エネルギーに比例するので、体重の0.75乗に比例する。

$$\text{体内の酸素量} \propto m$$

$$\text{時間当たりの酸素の消費量} \propto m^{0.75}$$

したがって、潜水時間は体重の0.25乗に比例することになり、体重が増加するにつれて、潜水時間も増加することがいえる。

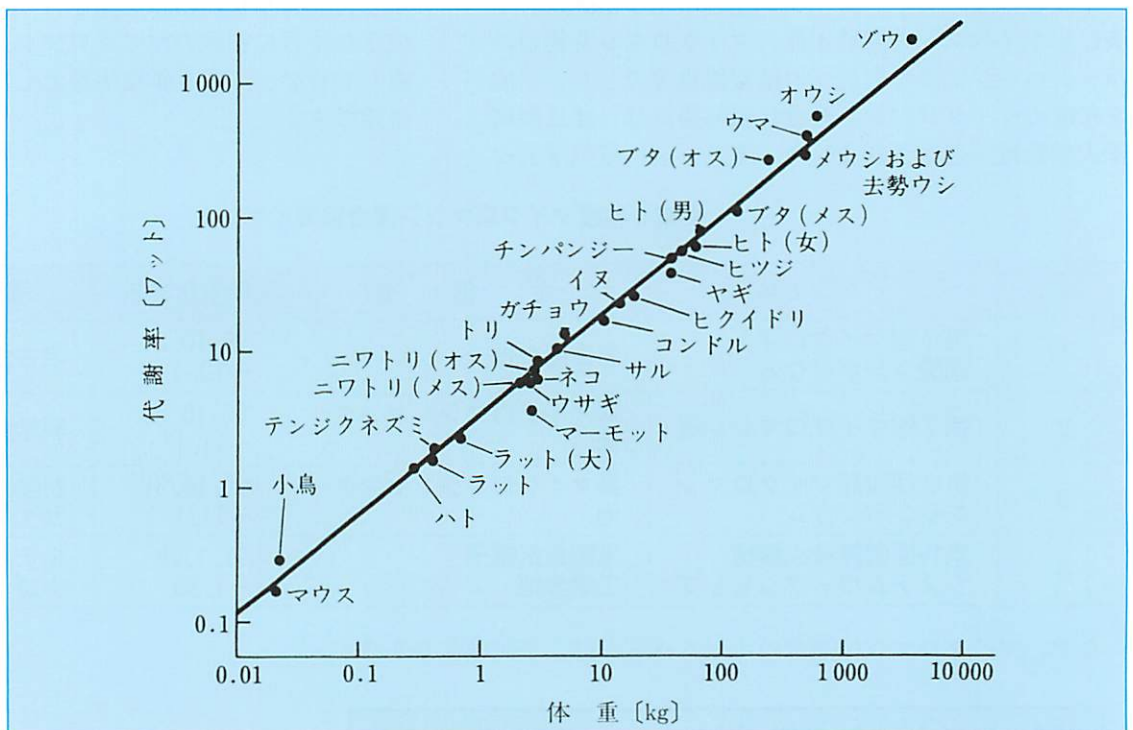


図1 哺乳類と鳥類の体重と代謝率を両対数グラフに描いたもの。1本の直線の上にいる。Benedictによる。シュミットニールセン著、下澤、大原、浦野訳、「スケーリング：動物設計論」（コロナ社）から転載

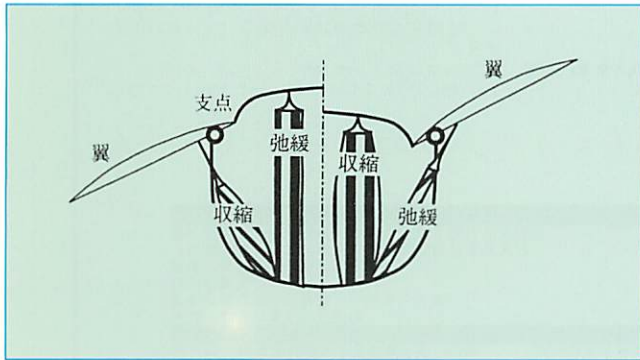


図2 昆虫の胸部の断面図

バッテリーに蓄えられるエネルギーの量も体積に比例するので、体重と潜水時間の関係はマイクロマシンでもそのまま成り立ちそうである。機械の寸法が小さくなるにつれて、摩擦や表面張力がエネルギー効率を低下させ、図1の代謝エネルギーの場合と同様に、機械内部でエネルギーがむだに消費され、効率が低下するといえるのではないか。バッテリーに蓄えられる単位体積あたりのエネルギーは一定なので、バッテリーで機械を駆動できる時間は、寸法が小さくなるとともに減少する。つまり、マイクロマシンをバッテリーのみで駆動するときには、駆動時間は短いものになるのではないか。長時間動かしたいマイクロマシンでは、一般的に言って、外部からのエネルギー供給が必須になると考えられる。

昆虫の構造としての特徴は外骨格である。昆虫の多くは胸の飛翔筋が直接翅を引くのではなくて、図2のように胸部の骨格の変形を介して翅の動きをつくっている。カイコガの胸部には約10種類の筋肉があって、それらの収縮のタイミングの違いで複雑な羽ばたきパターンを発生している。外骨格構造を使うと、アクチュエータを骨格構造のなかに平均的に置くことができるので、限られた体積を有効に利用できる。また、シリコン基板上の薄膜を折り紙のように折ると外骨格構造ができるのも面白い。ところで、昆虫が細胞でできた柔らかい皮膚をもてなかったのは、皮膚が厚く複雑すぎてスケールダウンできなかったからではないだろうか。

昆虫の飛翔もマイクロマシンにとって興味ある手本

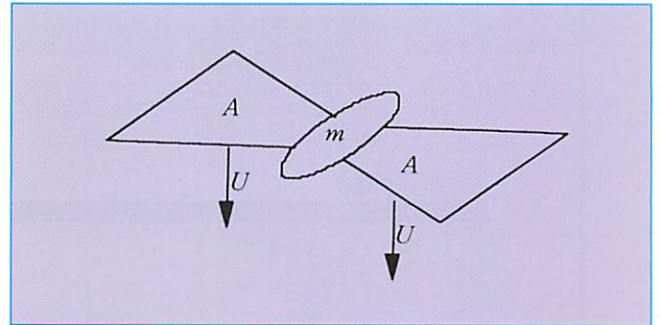


図3 飛行（羽ばたいて飛ぶ状態では、空気から翼が受ける力と重力がつり合っている）

である。図3に昆虫が羽ばたいているときの様子を示した。翼が受ける空気力 f_d が運動量変化によるものであるならば、それは次のように表される。

$$f_d \propto A U^2 \propto m$$

この力と重力がつりあって飛んでいるのだから、空気力 f_d は体重に比例することになる。体重 m が寸法の3乗に、翼面積 A が寸法の2乗に比例するなら、流速 U は寸法の0.5乗に比例する。

$$U \propto L^{0.5}$$

このとき、単位時間当たりの運動エネルギーの増加、つまり、単位時間に翼のする仕事 P は寸法の3.5乗に比例する。

$$P \propto f_d U \propto L^{3.5} = m^{1.17}$$

ところが、生物の代謝エネルギー P_{met} は体重 m の0.75乗に比例するので、飛翔に必要なパワー P と、供給可能パワーである代謝エネルギー P_{met} は、ある寸法を境に逆転し、寸法が小さくなるほど飛翔に必要なパワーが供給可能パワーに比べて小さくなる。つまり、エネルギー的には小さいものほど飛ぶのが楽になる。ただし、小さくなるほど代謝エネルギーに対する実効エネルギーの比（効率）が悪くなりそうなので、本当に小さいほど楽に飛べるかどうかは、一概にはいえないかもしれない。

以上述べた以外にも、昆虫から学べることは多い。そこで、次回以降、「昆虫の感覚器」、「昆虫の神経系」がマイクロマシンにどのようなヒントを与えるかを述べていきたい。

第2回 センサのヒント「感覚器」

東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻 助教授 下山 勲

1. 視覚センサ：複眼

昆虫の感覚器としてよく知られているものは、複眼であろう。複眼は図1に示すように複数の個眼が集まっ



図1 ハエの複眼

て出来たものである。ハエでは1万個程度の個眼が集まって複眼を構成していて、それぞれの個眼の中には光受容細胞がある。個眼のレンズを通った光情報は光受容細胞で神経系の情報に変換される。光受容細胞にはそれぞれ特異的に反応する光の波長があり、たとえば、紫外線よりの波長に敏感だったりする。これは、太陽光のもとで活動するには都合がよいと解釈されている。

ハエが複眼を通してどのように外界を見ているかは議論がある。個眼のレンズを通して入ってくる図2の

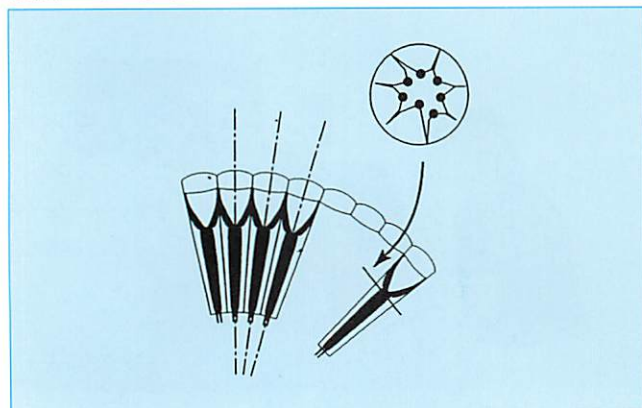


図2 複眼断面の模式図

ような光情報を受け取る光受容細胞の数が例えば数個なので、各個眼からの情報は光受容細胞の数で決まる数ビット程度の情報量であるらしい。人間の眼の光受

容細胞に比べてはるかに粗いので、ハエの複眼から得られる情報はモザイクがかかったようなものであるらしいが、これも議論があるようである。なぜ昆虫が複眼を自然選択の中で獲得したかはわからないが、多分広い空間角を単純ではあるが効率よくカバーするには都合がよいのであろう。

われわれの研究室では複眼を3次元で工学的に作るようとしている。そのための技術としては、マイクロレンズアレイ、光センサアレイ、光センサからの情報の処理回路、曲面の加工技術などが必須である。また、光センサアレイからの出力の情報の処理は、時間に関するローパス/ハイパスフィルタと、空間に関する視覚情報のネットワーク処理で実現できるという報告があり、これらの技術と知識を総合すると寸法が1mmくらいの複眼が可能であると考えている。この複眼は全空間を1個の複眼でカバーすることができ、光センサアレイからの信号処理もIC技術で同時に作り込める可能性がある。われわれの人工複眼は視覚情報のコントラストの違いを抽出するだけであり、形の認識や距離の計測などは考えていない。マイクロロボットにはほかのセンサも搭載できるので、これらを統合すれば障害物を避けて進む合目的なロボットもできそうである。

2. 風センサ：尾葉

人工的な風のセンサとしては熱線流速計がある。細いワイヤに電流を流すと、ワイヤのまわりの流れによってワイヤの温度が変動する。そこでワイヤの温度を一定に保つようにフィードバックをかければ、制御量を流速に換算できる。このような熱線流速計はMEMS技術を使ってすでに微小化されている。

ところで、ゴキブリやコオロギの尾葉は逃避行動を引き起こすための貴重なセンサである。たとえば、尾葉に風を吹きかければ、逃避行動が現れる。尾葉には図3に示すように細かい毛が密に生えており、風を受けると毛が倒れて、毛のねもとにある神経が活性化する。この毛を倒す力は空気の流体力であるが、これは空気の粘性の影響が強く出る、いわゆる低レイノルズ数の領域の現象である。コオロギは、毛の幾何学的な寸法を変えることで、空気の振動に対する周波数応答の特性を変えている。周波数特性の異なる毛が尾葉に密に生えているので、全体として逃避行動を引き起こすセンサになっている。

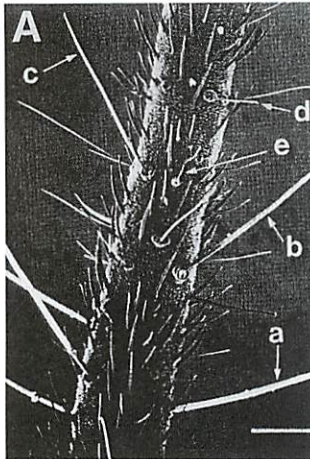


図3 コオロギ尾葉の感覚毛

(T. Shimosawa, M. Kanou: J. Comp. Physiol. A (1984) 155:485-493)

このように、マイクロマシンの特徴は、幾何学的な設計にある。通常の機械は、メカトロニクスということばがよく表すように、幾何学的な機械をソフトウェアに置き換えてきた。しかし、マイクロマシンでは寸法の制約から、機械の知能が幾何学的な機構に左右されることになる。

3. 匂いセンサ：触覚

図4の雄のカイコガの触覚は雌のカイコガが出す匂



図4 カイコガの触角

い物質（フェロモン）の高感度なセンサである。雄の

カイコガはフェロモンがない状態ではじっとしているが、フェロモンが触覚に届くとフェロモンの流れをトラックして雌に接近し交尾を行う。カイコガの寿命は羽化して1週間ほどであるが、この間、これ以外の行動はみられない。触覚に到達したフェロモンは触覚にある神経を活性化してフェロモン情報を脳に伝えるが、この触覚は非常に感度の高いフェロモン匂いセンサの役割を果たしている。昆虫ではこの例やアリ、モンシロチョウのように匂いで情報を受け取る例は多い。

人工的に作ったバイオセンサを小型化できれば、このような匂い情報の獲得も可能になる。化学物質を使えば、簡単にマーカを置くことができる。風や拡散によって情報が空間的に広がるので、これを都合よく利用できる場面もある。また、化学物質は小さな隙間や曲がった部分も通るのでこれを利用する手もある。

4. 特殊性の利用

昆虫にも人間の五感に相当するセンサが備わっている。それぞれは複眼や触覚のように単純であり、何でもできるというわけではないが、行動にとって不可欠なものである。マイクロマシンでも、これまでのロボットに期待していた一般性を追求するのではなく、目的を絞り込みそれに必要な単純な構造や機能を考えることが重要であると考えられる。

先日、マイクロマシンセンタの会議で、桃谷先生（京都国際大学）の折り紙の話がうかがう機会があった。その際、「生物学ではこれまで種の間で共通している一般的な事実が興味の対象であった。しかし、マイクロマシンの手本として、種を丁寧に観察すれば、これまで見過ごされてきた、種に固有の特殊性が大きなヒントになることもある。」という趣旨の発言があった（とわたしは解釈している）。これはとても印象に残った発言であった。生物学の教科書に一般的事実として書かれていること以外にも、それぞれの生物には、マイクロマシンの大きなヒントが隠されていそうだ。

参考文献

立田栄光、三村珪一、富永佳也、小原嘉明：昆虫の神経生物学、昭和55年、培風館

第3回 制御系のヒント「昆虫の神経系」

東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻 助教授 下山 勲

1. はじめに

昆虫は、小さな脳・神経系にもかかわらず生き延びるのに必要な行動の発現メカニズムを備えている。このメカニズムはマイクロロボットの制御系の大きなヒントを与えうるだろう。

昆虫の行動は、感覚器から脳に入った情報が引き起こす定型的行動（プログラム）と、反射的運動との組み合わせであると考えられている。その詳細は未だ定かではないが、近年、行動観察というマクロからのアプローチと神経生理というミクロからのアプローチを統合して、刺激から神経系を経て行動発現に至るメカニズムを統一的に説明しようとする考え方（神経行動学）がある。

2. 小さな制御系

マイクロマシンに搭載する制御系の重さと体積には制限があるので、高性能な制御系を組み込むことはできないだろう。マイクロマシンに要求される機能を吟味した、小さな制御系があるはずだ。そこで、例として、カイコガをとりあげ、その行動プログラムの本質を利用して、小さいながらもマイクロマシンを制御できる制御系はできないだろうか考えてみたい。

単純な環境下では、昆虫の定型的、反射的な行動が再現性よく現れる。たとえば、雄のカイコガはフェロモン源である雌に向かって進む。右の触角をパルス的にフェロモン刺激するとカイコガは図1のように体軸

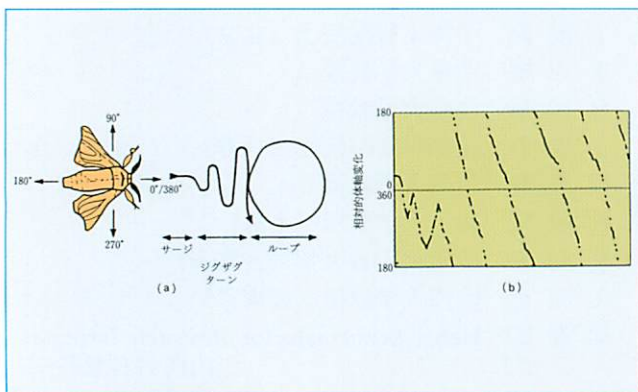


図1. フェロモン刺激によって定位行動するカイコガ (筑波大学 神崎亮平氏による)

を右左の順に変えながらジグザグに進み、さらに右回りに回転運動を始めることが知られている。このジグザグおよび回転運動の方向は左右どちらの触角を刺激したかで決まり、刺激した側が右か左かという情報は、

フェロモンによって次に触角が刺激されるまで記憶されることもわかっている。フェロモンが流れ状に複雑な濃度分布をもつ実際の環境下では、触角にフェロモンがあたるごとにカイコガはこのプログラムに従って行動し、センサ入力に対応した行動が次々に発現していくと考えられている。

神崎の生理学的実験によると、触角から脳に入ったフェロモンの情報は、左右の脳を結ぶ相互抑制性の神経を通して観測できる。フェロモンの情報は、ここから胸部におりて運動系に至り、定位行動を引き起こしている。人工ニューラルネットの見方からすると、この相互抑制性の結合がフリップフロップとして働き、フェロモンが触角にあたったという情報を次に触角にフェロモンがあたるまで記憶していると解釈できる。したがって、雌に向かって進む雄のカイコガの行動は、脳・神経系内にあるフリップフロップ的な記憶と、フェロモン刺激によってリセットを受けて走り始める基本行動プログラムであるとモデル化できる。複雑なフェロモン分布をもつ環境下ではこのメカニズムが刺激ごとに繰り返されてフェロモン源への定位行動が発現するという仮説をたてた。

カイコガの歩行や羽ばたきのような運動は、脳が直接制御しているのではない。脳の情報が胸部神経節におりにないようにしたカイコガでも、羽ばたきや歩行運動が現れるので、胸部にある運動神経系が運動を引き起こしていることがわかる。脳は、このような運動系に移動方向のようなマクロな制御情報を与えているわけである。

3. 定位行動する移動ロボット

カイコガの触角から作ったフェロモンセンサを図2

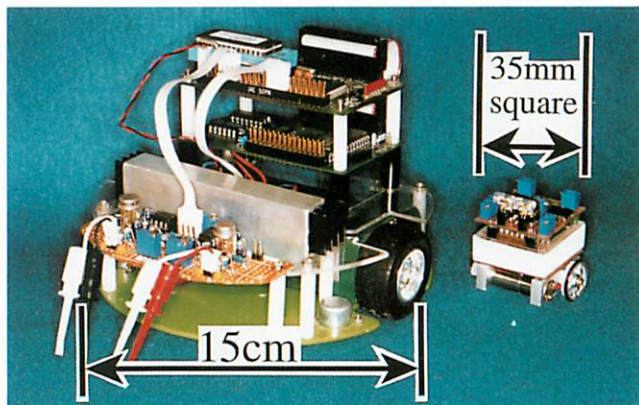


図2. フェロモンセンサを取り付けた移動ロボット

の移動ロボットの先頭部分につけて、前記の行動発現プログラムを確かめた。このフェロモンセンサは空気による刺激には反応せず、雌のカイコガの出すフェロモンにのみ反応する。フェロモンの単発刺激に対するカイコガの行動が、ジグザグ歩行を繰り返し、その後回転歩行するものなので、これを満足するようにロボットの行動をニューラルネットで図3のようにプログラ

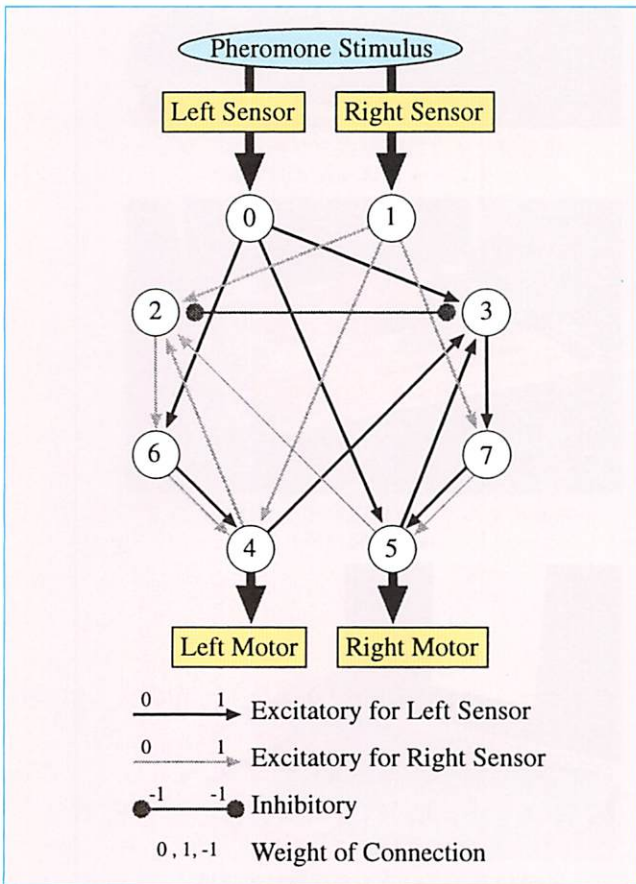


図3. 移動ロボットを制御するニューラルネット

ムした。左と右の触覚からの信号がセンサニューロン0、1にそれぞれ入り、モータニューロン4、5の出力がロボットのモータを動かす。ニューロン2、3を結ぶ抑制性の結合が、左右どちらの触覚が刺激されたかを内部に記憶するRSフリップフロップを形成する。ニューロン2、6、4あるいは3、7、5は順序回路を形成しており、1周期の回転歩行に対応する。次に、このロボットを実際のフェロモン分布のある環境下に置いたときの行動を調べて図4の結果を得た。この結果からフェロモンが断続的に触覚にあたる状態でロボットはジグザグ歩行を繰り返し、フェロモン流からそれてフェロモンが触覚に当たらなくなると回転歩行してフェロモン流をさがす。実際のカイコガにみられる行動がロボットにも発現した。

ところで、雄のカイコガが雌に向かう定位行動では、

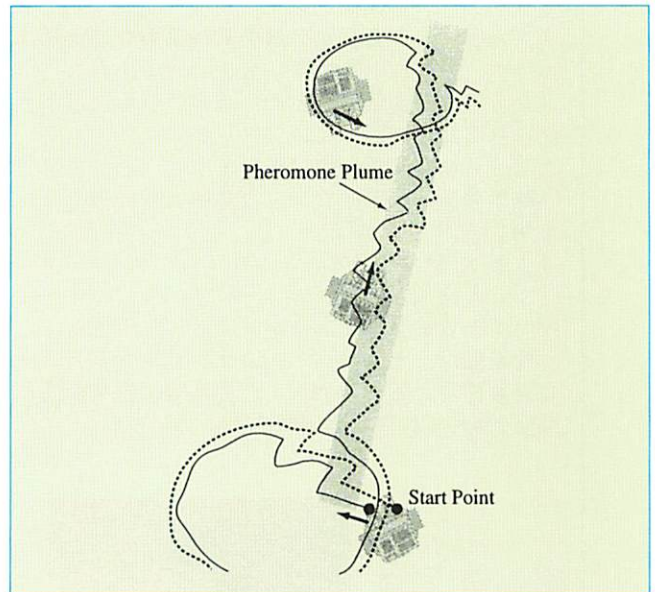


図4. フェロモン環境下で移動するロボット

雄が雌から離れているときにはフェロモンの情報を使っているが、近づくと触角以外の感覚器も使って交尾にまで至っている様子が観察できる。このような、複数のセンサに刺激が入るときに、センサからの情報をどのように使い分けるかの原理は未だ定かではない。また、ニューラルネットの計算は通常、各ニューロンに与える同期信号で同期をとりながら計算を進めていくが、実際のカイコガではこのような同期信号はないようなので、生物の神経が伝達する信号の中に時間の情報が含まれていると考えられている。このように、生物の神経系にはまだまだ手本とすべきものがある。

4. おわりに

ここでは、カイコガを中心に神経系とマイクロマシンの関連性について述べた。カイコガ以外にもマイクロマシンの参考になるものは多いと思う。前回にも述べたことだが、生物の一般的な性質同様に、種に固有の性質をマイクロマシンに役立てることも考えられる。

ところで、マイクロマシンのために昆虫の機能や構造を勉強しているうちに、マイクロマシンが、昆虫の脳研究の道具になる可能性のあることがわかってきた。これまでの脳研究では、脳と行動の関係が解析的に研究されてきた。しかし、いくら微細に神経や脳を解析しても、刺激に対する行動発現メカニズムを統一的に説明できていない。そこで、解析結果をマイクロマシンの形で統合し、昆虫の実際の行動と比較することによって、行動発現メカニズムを研究することができる。また、マイクロマシン技術で作った微小電極のようなセンサを使えば、これまで得られなかったデータが得られる可能性があるため、期待されている。