

昆虫ロボット——マイクロマシンの夢——

工学院大学機械システム工学科

三浦 宏文

Insect Robot—Dream of Micromachine—

Hirofumi Miura

Kogakuin University, Department of Mechanical Systems

1. 自動機械とロボット

ロボット時代と言われ始めて久しい。1980年が、我が国のロボット元年と呼ばれ、その頃から、生産の場でロボットが活躍し始めた。しかし、それらロボットは自動機械とでも呼ばれるべき程度のものが多く、ロボット研究者にとっては、いささか迷惑な点もなくはなかった。

では、自動機械とロボットとはどう違うのか。筆者の基本的な考えはつぎのようなものである。

Fig. 1 の上の図はピアノを弾くロボットであるが、これは制御が大変である。かなり重い腕を素早く動かして必要な鍵盤の場所まで持ってゆき正しい位置で止めて、正しい指を下ろすということを行なわねばならない。正しい位置で止めるには、どこでブレーキをかけ始めるか、など厄介な制御が必要で、それなりの高級なコンピュータを装備しなければならないだろう。

しかし、単にピアノを機械で弾くこと、あるいは、ピアノを弾く機械を作ることだけが目的であれば、Fig. 1 の下のような機械を作

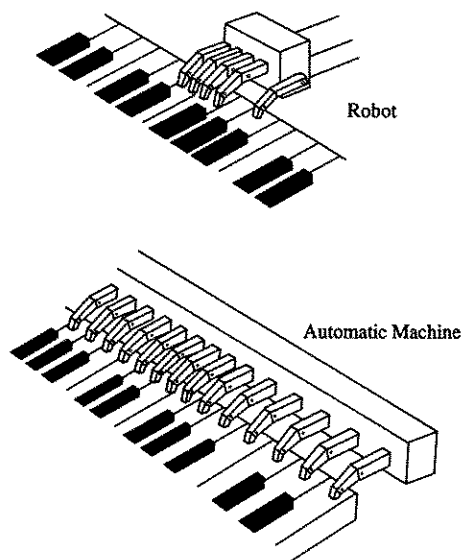


Fig. 1 Robot and Automatic Machine.

る方がずっと賢明である。制御は簡単、間違いもずっと少ないだろうし、低級コンピュータで十分だし、第一安くできるだろう。自動機械あるいはオートメーションというのはこのようなもので、人間がどのように行なっているかには関係なく、安く、速く、正確に物が作ればそれで良いのである。

一方、ロボットには、人間が行なっているよ

うにやってもらいたいという気がするのである。すなわち、人間があることを行なうときに、どのような知能を使っているのかを究明し、その知能をロボットにプログラムとして与えるのがロボット研究のおもしろさだと考えた。無意識のうちに使っている知能もあるかもしれない。それが何であるかを探ることは本当に楽しいことだった。

上記のような考えに基づいて、いろいろなロボットを製作してきた。その内のいくつかのロボットをFig. 2に示しておいた。けん玉ロボットは素早く正確に動く知能をさぐるものだった。一千万円以上する工業用ロボットでもけん玉はできない。素早く正確に動く知能を入れてやれば手作りのロボットでも95パーセント以上の成功率で玉を受けた。

棒立てロボットは学習する知能をロボットに持たせようとした研究であった。長さも重さも知らされない棒を数分の学習で立てられるようになる。

竹馬ロボットは動バランスを取る知能を持っている。このロボットは、世界で最初に動バランスで歩いたものとして、米国のボストンにあるコンピュータ博物館に今も飾られている。

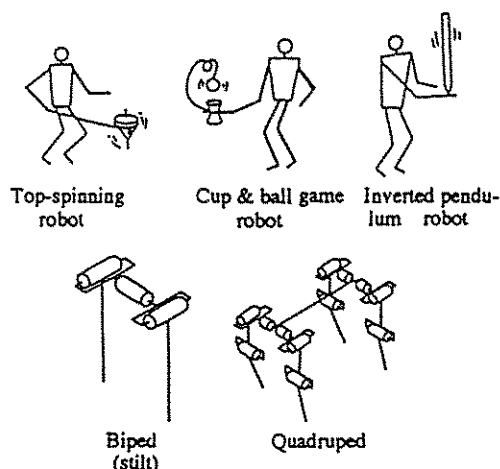


Fig. 2 Some Examples of Intelligent Robots which have been developed at the author's lab.

四本足の動物が、消費エネルギー最小になるように、動バランスで歩いていることが分かったのも、四本足ロボットを作成しているときだった。こま回しロボットは、コツを掴むロボットであった。人間がこまを回すところを見せるとコツを掴みこまを回すようになるのである。

2. 知能ロボットから昆虫へ

上述のようなロボットをいろいろ作成してきたが、果たしてこれらを賢いロボットと呼んでいいのか、という疑問を持ち始めたのは4年程前であった。すべて、人間が作った学習プログラムに従って動いているだけで上達したいなどという意識を持っているわけではない。

それでは、果たしてロボットに、巧くなりたいうような意識あるいは意志を持たせることができるのだろうか？ 筆者は現在のコンピュータの能力や人工知能(AI-Artificial Intelligence)の技術では、まず無理だろうと考えた。では、どうすればよいのか、を考えているときに台所でゴキブリを見た。昆虫は殆どすべての行動が反射(Reflex)によって決まっています。複雑な論理によって導きだされた行動を取るわけではない。にも拘わらず、人の足音を聞くと急いで冷蔵庫の下へ逃げ込む様子や、そこで、こちらを向いて、人が遠ざかっていくのを待っている様子を見ると、けん玉ロボットやこま回しロボットよりも、ずっと知的に見え、誠に印象的であった。まさに、生きているという感じがした。

そこで、昆虫ロボットを作ってみるのも、ロボティクスにおけるAIの行き詰まりを打破する、ひとつの方策かと考えた。昆虫の神経細胞の数は10万位で、これなら今日のコンピュータでも何とかできるかもしれない。

3. 昆虫規範型マイクロロボット

昆虫ロボットを作ろうと思ったきっかけは、もうひとつあった。半導体製造技術を利用して、ミクロンオーダーの寸法の機械部品を作るという試みが欧米でスタートしたのがこの頃だった。単なる機械の小型化ではなく、これだけ微小な世界では新しい機械技術というものが生まれる可能性があるのではないかと思った。

小さいロボットを作るとすれば、昆虫のような小さな生物をモデル（規範）とすれば、おそらく、いろいろな意味で都合のよい設計ができると思われる。

研究室で蟻やバッタ、ごきぶりなどを飼育して、観察するという研究を始めて8年が過ぎたが、今のところは、昆虫を規範とすることは誤りではなかったと確信している。以下に、昆虫を規範（モデル）としているいくつかの点を述べてみたい。

4. 外骨格構造

まず、構造の面について述べよう。昆虫は外骨格構造が基本である。人間や動物は内骨格である。手や足の構造を見ると、内部に骨があり、その周りに筋肉がついている。そして、関節のところで骨がジョイントになって回転することによって手や足が曲げられる。従って、Fig. 2 のロボットはそのような構造で関節のところにモーターが付けられる。

しかし、トンボなどを調べると、Fig. 3 のような構造になっている。外骨格で作られた箱のような空洞の中に筋肉がついていて、その収縮と弛緩によって外骨格を弾性変形させて翼を羽ばたかせているのである。しかも、翼のてこの支点となっているところは、ジョイント（回転節）になっているのではなく、弾性係数の非常に小さい膜によってつながれた弾性ヒンジになっており、この部分が曲げ変形させられているのである。

回転節では、必ずすべり摩擦が存在するが、

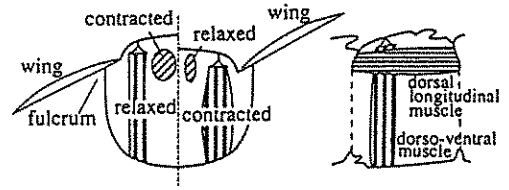


Fig. 3 Cross section of an insect thorax. Distortion of the thorax causes beating of wings.

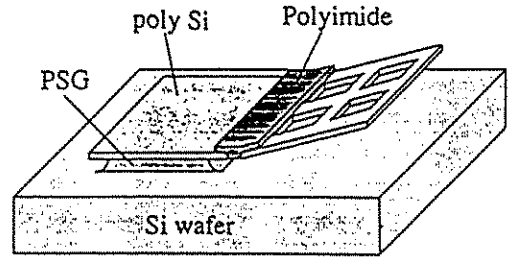


Fig. 4 Basic model of the external skeleton. Three dimensional structure is constructed by bending along the polyimide hinges.

弾性ヒンジではすべり摩擦はない。寸法が小さくなると、慣性力などに比べて、摩擦力が大きくなり、支配的な影響を与えるようになる。そこで、摩擦力が発生するような構造をできるだけ避けたいのである。昆虫の構造は、まさにその理屈に合っているようである。

目下のところ、Fig. 4 のような構造のものを作って、ヒンジを形造っている。IC 製造技術によってミクロンオーダーでこのような構造を作ることができる。しかし問題はある。そもそも、IC 製造技術は薄膜技術といわれる通り、2次元技術である。一方、ロボットを作るには、3次元構造が必要である。しかし、従来のIC 製造技術（製膜技術、たとえばCVD—Chemical Vapor Deposition）によってブロック（3次元構造材料）を作ることは不可能なのである。

そこで、筆者らの研究室では、「折り紙構造 (origami-structure)」というものを提唱している。これは弾性ヒンジの部分を折曲げて、3次元構造を作ろうとするものである。

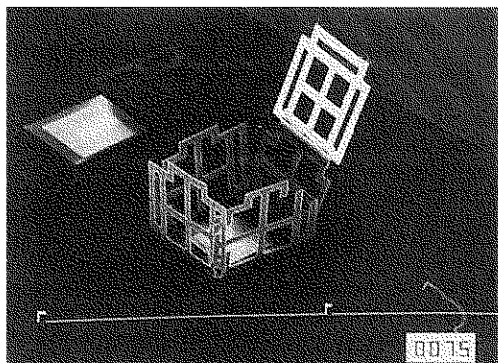


Fig. 5 Micro-cubic box.
(0.3 mm × 0.3 mm × 0.3 mm)

Fig. 5 にそのひとつの例を示す。展開図を平面状の板として作り、折り目に相当するところにスリットを入れ、ポリイミド（現在はこの材料を用いているのであって、もっとよいものがあると思われる）を細くつけて、折り紙細工のように立体構造を作っている。今のところ、1ミリ以下の大きさの各種の構造ができあがっている。さらに昆虫構造を調べて、いろいろ工夫してゆきたい。

5. マイクロ羽ばたき機構（蚊ロボット）

一枚の板から3次元機構を作り出す簡単な例として、羽ばたき機構を上げておく Fig. 6 がそれである。アルミ（Al）の膜を蒸着によって羽の中央部に付けてあり、これを電極として基板（シリコンウエハ）との間に交流電圧をかけると、図でTで示した方向に動きそれが拡大されて羽ばたきが起こる。折り目のところはポリイミドでできているが、弾性を持っている。ポリイミドは熱硬化性なのである角度だけ曲げて熱を加えてやると、そこで固まってくれるのでこのような機構が簡単に製作できるのである。機構の機械的な固有振動数と交流電圧の周波数を一致させると共振が起こり大きく羽ばたく。このような機構で「マイクロ人工蚊」の作成に成功した。実際に飛ばすことを目指し

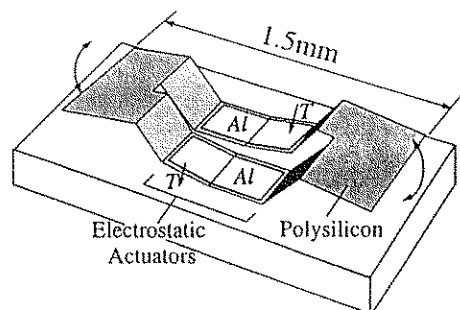


Fig. 6 Schematic figure of beating mechanism.

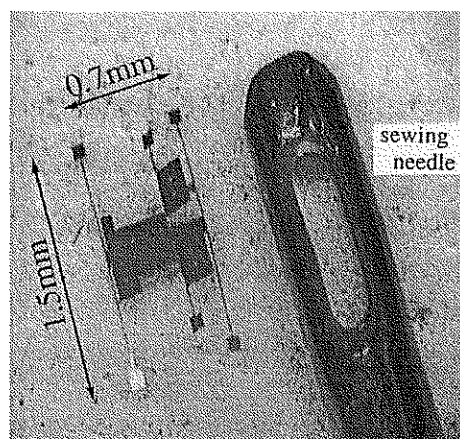


Fig. 7 Micro-ant-robot.

ている。

6. マイクロ歩行機構（蟻ロボット）

Fig. 7 はマイクロ人工蟻である。右に写っているのは縫い針の穴なので大きさは見当が付くだろう。大体1ミリである。左右の前後の4本の足で体を支え、左右の中足が床面を蹴って前に進む。中足には他の4本の足を通して床から微小振動が伝えられ、共振して大きく動くように設計されている。右だけ、あるいは左だけ動かすこともできるので、旋回することもできる。センサーなどを付ければ機械を分解しないで検査することなどに使えるのではないかと考えている。

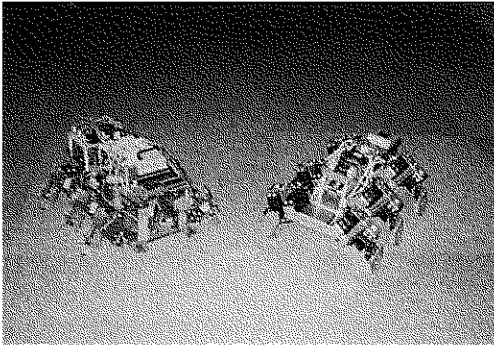


Fig. 8 Hexapod-robot.

Fig. 8は、寸法は30センチ位の大きなものであるが、昆虫のような6本足歩行を実現するものである。詳しいことを書く紙面は無くなったが、昆虫のように、ゆっくり歩くときは波状歩容（wave gait：6本の内1本だけが持ち上げられて前へ踏み出す。持ち上げる足が後ろから前へ波のように伝わっていく）で歩き、早くなるに従って、交互3脚歩行（altern-

ative tripod：左前、右中、左後を一組、右前、左中、右後を一組として同時に3本の脚を交互に前に踏み出す）へと自然に変わっていく。コンピュータで制御されているのではなく、隣の足のみとの情報交換ができるようになっていれば（実際の昆虫もそうになっているらしい）、6本の足の協調が自らとられて、このように歩行するのである。歩いているところは本当の昆虫のようである。

7. む す び

ここ十数年の筆者の研究室のロボットに関する研究活動を概観してきた。ロボットへの夢は尽きることはないが、これらの研究の行く末には、人工生命の実現へと繋がっていくのではないかと考えている。多数の昆虫ロボットを作って、それらに何らかの群知能を与えて、渡り鳥のような行列歩行や蟻のようなえさ集めなどを行なわせてみる研究も少しずつ進んでいる。