解 説

マイクロロボットのスケール効果

Scale Effects in Microrobots

下 山 勲* *東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻

Isao Shimoyama* *Department of Mechano-Informatics The University of Tokyo

1. はじめに

半導体加工技術に代表される微細加工技術によって微小な機械部品ができるようになって、マイクロロボットが現実味をおびてきた。しかし、寸法の小さなマイクロロボットに適した構造や機能について議論すべきことは多い。

生物のもつ構造や機能と、生物のスケールとの関係はこれまでによく研究されてきた[1]~[5]。生物は、自然選択のなかで進化をとげたものであり、その構造や機能はスケールに適したものであるといわれている。ここでは、生物のスケールを参考に、微小スケールにふさわしいマイクロロボットの構造や機能について議論する。もちろん、生物のような機能を持つロボットができるかどうかは不明であるが、マイクロロボットを作る上での一つの指針になるものと考えられる。

2. スケール効果

幾何学的に相似なもののあいだで、力や質量などの量が寸法と共にどのように変化するかを次のように表す。たとえば、立方体の一辺の長さを代表寸法として L で表せば、「立方体の体積 V は寸法 L の3乗に比例する」という。面積力のような L^2 に比例する量と、体積力のような L^3 に比例する量では、 L が十分大きいときには体積力が、十分小さいときには面積力が支配的に現れる。スケール効果の議論では、仮定しだいで乗数が変わるので、仮定を正確に把握することが大切である。

2.1 エネルギー消費

生物が歩行や飛翔などの運動で消費する単位時間あたりのエネルギー（仕事率＝パワー） P は寸法の2乗から2.25乗に比例する[3]。消費エネルギーが体積に比例しない理由の一つは、寸法が小さくなるとともに、消費エネルギーに対する有効エネルギーの比、つまり効率が悪くなるから

であると考えられる。

$$P \propto L^2 \sim L^{2.25} \quad (1)$$

マイクロロボットに必要なパワーにも式(1)の関係があり、また、バッテリーに蓄えられるエネルギー U は体積に比例する、つまりエネルギー密度一定と仮定する。

$$U \propto L^3 \quad (2)$$

幾何学的に相似なマイクロロボットがバッテリーによって駆動できる時間 t は式(3)のように求められ、サイズが小さくなると駆動時間が短くなる。

$$t = U/P \propto L^1 \sim L^{0.75} \quad (3)$$

これに対して太陽電池のように、外部からのエネルギーの流れを受けるものでは、パワー P_s は面積に比例するので、スケールダウンしても式(1)で与えられる必要なエネルギーを供給できる。したがって、マイクロロボットのエネルギーは内蔵バッテリーと外部からのエネルギー供給を併用するものになると思われる。生物も寸法が小さくなると外界から頻繁にエネルギーをとっているようである。

数値例をあげると、化学電池ではエネルギー密度は約100[Wh/l]（ニッカド電池相当）であり、これは10⁸[J/m³]、つまり、100[MPa]にあたる。

電界の強さ、磁束密度がそれぞれ100[V/μm]、0.1[T]のとき、電場や磁場のエネルギー密度は次式のように10[kPa]になるが、化学電池のエネルギー密度に比べると小さい。

$$1/2\epsilon_0 E^2 = 1/2 \times 8.9 \times 10^{-12} \times (10^8)^2 \approx 10^4 [\text{Pa}]$$

$$1/(2\mu_0) B^2 = 1/(2 \times 1.3 \times 10^{-6}) \times (10^{-1})^2 \approx 10^4 [\text{Pa}]$$

弾性体の歪みエネルギーについていうと、ヤング率100[GPa](Alは70[GPa])の材料を0.1%だけ歪ませたものが10[kPa]に相当する。

このように考えると、電磁場のエネルギー密度が他に比べて特別優れているとはいえない。しかし、電磁エネルギーは電磁波によって運ばれるので、単位断面積を単位時間に通過するエネルギーは大きなものになる。

エネルギー密度 e のエネルギーが波動などによって速度 u で運ばれるとき、単位断面積を単位時間に通過するエネルギー、つまり単位断面積を通過する仕事率は eu で

原稿受付 1996年10月9日

キーワード: Scale Effect, Micro-robot, Micro-machine, Micro-fabrication, MEMS

*〒113 東京都文京区本郷7-3-1

*Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

与えられる。電磁波のように u が光速 $c=3\times 10^8[\text{m/s}]$ であるときには、 e の値が小さくても eu は大きな値になる。たとえば、電磁波の安全基準では $10[\text{mW/cm}^2]$ という値が示されている。また、太陽光ではこの値は $1[\text{mW/mm}^2]=10^3[\text{W/m}^2]$ であるが、このときの太陽光のエネルギー密度は $10^{-5}[\text{Pa}]$ という小さな値である。

寸法が $1[\text{mm}]\times 1[\text{mm}]\times 1[\text{mm}]$ でエネルギー密度が $100[\text{Wh/l}]$ のバッテリーに蓄えられるエネルギーの量は、 $1[\text{mW/mm}^2]$ のエネルギー流を面積 $1[\text{mm}]\times 1[\text{mm}]$ で 100 秒間受けたものに相当する ($10^8[\text{J/m}^3]\times 10^{-9}[\text{m}^3]/10^{-3}[\text{W}]=100[\text{s}]$)。

太陽光の $1[\text{mW/mm}^2]$ に相当するエネルギーの流れを、運動エネルギーの移動、たとえば圧力波や流体の流れによって得るためには、エネルギー密度が $10[\text{kPa}]$ の流れでは $0.1[\text{m/s}]$ の移動速度を持てばよい。

2.2 知能

人間の神経細胞の数は 10^{10} から 10^{12} 程度であるが、昆虫の神経細胞の数は 10^3 から 10^5 程度といわれている。神経細胞は分子の大きさで制限されるので、小さな生物に多くの神経細胞を持つものはない。

マイクロロボットの場合も、通常のロボットほど複雑な制御装置は付けられない。昆虫は高等脊椎動物に比べて単純な神経系を持ち、反射的・定型的に行動している。マイクロロボットの知能もこれを目指すべきと考えられる。昆虫は神経細胞が少なく、神経の可塑性がないにもかかわらず、合目的な行動を取り、餌を集め、外敵から身を守り、生殖し、意志を持っているかのごとく行動し、さらに社会性を持つものまでいる。

2.3 ジャンプ

昆虫の脚を観察すると、昆虫学の教科書に記述がある跳躍機構の存在が確認できる。時間をかけて脚の弾性体に蓄えた弾性変形のエネルギーを、一瞬で出力することで跳躍している。この原理は、マイクロロボットの跳躍に適用できると考えられる。

跳躍の高さは、生物の寸法 L にらず一定であるといわれている[4]。例えば、質量 m のバットが、脚の筋肉に蓄えた弾性エネルギーを使って高さ h まで跳躍するものとする。ばね定数を k 、ヤング率を E 、断面積を S 、長さを l 、変位を x とすれば、弾性エネルギーは次の式で与えられ、代表寸法 L の 3 乗に比例することがわかる。

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}\frac{ES}{l}x^2 \propto L^3 \quad (4)$$

跳躍の最高点での位置エネルギーの増加は mgh であり、弾性エネルギーがすべて位置エネルギーに変わるものとするれば式(5)が成り立つ。

$$mgh = \frac{1}{2}kx^2 \propto L^3 \quad (5)$$

質量 m も代表寸法 L の 3 乗に比例するので、跳躍の高さ h は寸法によらないという結論になる。跳躍する微小機械では体長の何倍も跳躍できる可能性があるわけで、微小 3 次元空間の移動方法として、車輪や歩行に比べて跳躍が都合のよいものの一つであるといえる。

脚の構造のモデルを図 1 に示す。屈曲筋と伸長筋を同時に収縮させ、弾性体にエネルギーを蓄え、伸長筋の収縮が完了した後に、屈曲筋を弛緩させ、弾性体に蓄えたエネルギーを一度に放出している。また、膝関節が開くのを防ぐために屈曲筋が使われているが、屈曲筋の張力は伸長筋の張力よりもかなり小さくてよい。これは Heitler's lump という突起に起因するものである。

2.4 固有振動数と寿命

幾何学的に相似な力学的振動系の固有振動数 ω は長さの -1 乗に比例する。

$$\omega \propto \sqrt{\frac{k}{m}} \propto L^{-1} \quad (6)$$

したがって、マイクロロボットの固有振動数は通常のロボットに比べて大きくなる。われわれの経験によると、寸法が $1[\text{mm}]$ 程度の構造物の固有振動数は約 $1[\text{kHz}]$ である。

材料の破壊が変形の繰り返しの回数 N で決まり、 N が寸法によらないなら、寿命 τ は寸法に比例する。

$$\tau \propto N/\omega \propto L^1 \quad (7)$$

したがって、昆虫の翼のような振動部分を持つマイクロロボットの寿命は通常のロボットに比べて短いと結論できる。マイクロロボットに寿命が期待できないときには、使い捨てのロボットシステムになるであろう。これは、生物のサイズが小さくなるにつれて寿命も短くなる傾向に対応していると考えられる[5]。

2.5 回転軸

通常のロボットの可動部分はベアリングで支えられている。しかし、マイクロロボットでは、面積に比例する摩擦力が無視できなくなり、効率が非常に悪くなったり、回転しないものになる。微小寸法では潤滑油も(粘性)摩擦力の増加をもたらす。これに対して、弾性変形する柔軟なジョイントによって剛体部をつないだ構造では、弾性体内の内部摩擦はあるものの、回転軸にくらべて効率のよいジョイントを作ることができる[6]。いままでに発表されたマイクロロボットの可動部分は、弾性変形を利用したものになっている。

図1 バットの後脚の跳躍モデル

図2 昆虫の胸部の断面図[7]

2.6 骨格

圧縮、座屈いずれの場合も、骨を破壊する力 F は面積に比例するので、寸法が小さくなるほど体重 mg に比べて骨の強度 F は大きなものになる。逆に寸法が大きくなると骨は自重を支えきれなくなる。マイクロロボットは、寸法が小さいので自重を支えるのは強度的に楽になる。

$$F \propto L^2 \quad (8)$$

$$mg \propto L^3 \quad (9)$$

骨格には外骨格と内骨格があるが、マイクロロボットのような小さな構造では昆虫やクモのような外骨格が有利であると考えられる。外骨格構造は、弾性体で結合された骨を筋肉で直接引っ張って相対的な位置・姿勢を変え、目的の変形を得るものである[7]。たとえば、カイコガの胸部には約10種類の筋肉があり、これが順次収縮して翼が羽ばたく。

2.7 エネルギー供給用ワイヤ

弾性体の復元力 F は相似な変形に対して寸法の2乗に比例する。

$$F \propto L^2 \quad (10)$$

したがって、ワイヤの太さを寸法に比例して細くしても、ワイヤを使ってエネルギーを供給する限り、寸法の2乗に比例するワイヤの復元力は体重に対して相対的に大きくなり、移動の障害になる。つまり、移動するマイクロロボットのエネルギーの供給はワイヤを使わない方法が望ましい。

2.8 アクチュエータ

静電アクチュエータでは、かける電圧が一定という条件のもとで発生力が寸法によらないことがいえる。電磁モータでは、発熱があるのでコイルに流せる電流値に上限があり、発生力は寸法の2乗に比例することが知られている。これらは重力のような体積力に比べて、微小世界で支配的になると考えられる。さらに、空気圧などの圧力利用のアクチュエータも力が面積に比例するので、微小になれば有利に働くと思われる。

2.9 速度と流体力

生物の移動速度 v と寸法の関係は次式で与えられる[3]。

$$v \propto L^{0.5} \quad (11)$$

これは、寸法の小さな生物の移動速度は小さいという意味である。流体から受ける抗力 F_D はレイノルズ数が大きい場合は式(12)になる。

$$F_D \propto v^2 L^2 \propto L^3 \quad (12)$$

また、レイノルズ数が小さい場合には式(13)になる。

$$F_D \propto v L \propto L^{1.5} \quad (13)$$

レイノルズ数は式(11)のとき

$$Re = \frac{vL}{\nu} \propto L^{1.5} \quad (14)$$

したがって、寸法が小さくなるにつれて、レイノルズ数は小さくなり、式(13)で表される領域に入ると自重に比べて F_D が支配的な力になる。

空中を羽ばたいて飛ぶ昆虫について、空気力で自重を支えるためには、羽ばたき速度を U 、抗力係数を C_D として、次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2} C_D \rho A U^2 = mg \propto L^3 \quad (15)$$

昆虫のレイノルズ数は約1000で C_D は定数とみなせる領域である。式(15)より、 $U \propto L^{0.5}$ となり、移動速度の場合に似た結果になっている。

3. おわりに

マイクロロボットの寸法に適した機能を寸法効果の観点から論じてみた。次元解析による議論は非常に荒っぽいので役に立たないという主張もあるが、細かい議論をする前に、ここで述べたような全体の見通しを得ることは重要なことだと思う。われわれの研究室では、マイクロロボットのよい手本は昆虫であると考え、昆虫の機能を解析し、その後、その本質を工学的に再現してきた。将来、飛翔し社会性をもつ人工昆虫ができれば、という夢をもっている。

参考文献

- [1] Thomas A. McMahon and John Tyler Bonner: On Size and Life. p.150, Scientific American Books, 1983.
- [2] T.J. Pedley: Scale Effects in Animal Locomotion. Academic Press, 1977.
- [3] Knut Schmidt-Nielsen: Scaling-Why is animal size so important?. Cambridge University Press, 1984. (下澤, 大原, 浦野訳: スケーリング動物設計論. コロナ社, 1995.)
- [4] M. Smith, (押田訳): 数理生物学序説. みすず書房, 1970.
- [5] 本川達雄: ゾウの時間ネズミの時間. p.6, 中公新書, 1993.
- [6] Kenji Suzuki, Isao Shimoyama and Hirofumi Miura: "Insect-Model Based Microrobot with Elastic Hinges," Journal of MEMS, vol.3, no.1, pp.4-9, 1994.
- [7] R.F. Chapman: The Insects, Structure and Function. Harvard University Press, 1982.

下山 勲 (Isao Shimoyama)

1955年1月6日生。1977年東京大学工学部機械工学科卒業、1977年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。1977年東京大学工学部講師、1978年同大学助教授、現在に至る。この間、ロボットの研究に従事、日本機械学会、計測自動制御学会会員。(日本ロボット学会正会員)