

# 機械とロボットの生命化

## アクチュエータ・センサから心まで

### Life Inspired BioRobotics from Actuators, Sensors to Mind

前野 隆司 (慶應義塾大学)

Takashi MAENO, Keio University, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

#### 1. はじめに

慶應義塾大学理工学部では「知能化から生命化へのシステムデザイン」を目指した21世紀COEプログラムが進行中である[1]。本COEでは、機械から建築・都市にいたる人口システムの生命化を目指している。これは、20世紀の科学技術が高性能化から知能化へと発展したのに対し、21世紀には知能化から生命化へのパラダイムシフトが必要になるとの認識に基づいている。つまり、従来の知能化とは、高性能化された機械やロボットに既知の知能的アルゴリズムを埋め込んで高度な設計・制御や情報処理を行うことを目指したものであった。しかし、知能化されたシステムは意外に環境適応性や耐故障性がもろかった。これは、従来のシステムが基本的には単一機能を目的とし、単一環境下で単一機能を達成するためのアルゴリズムのみが埋め込まれていたためである。言い換えれば、設計目的や機能についての情報は設計者のみが知っており、システム自体には問題構造が埋め込まれていなかったため、想定外の状況には適応不可能であった。一方、生命体は、多目的・多入力多出力・冗長多自由度・非線形複雑系であり、多様な入出力チャンネルを介して人間や他のシステムを含む環境条件と一体化した生命体自体に複合的な処理を並列分散的に行うメカニズムが埋め込まれているため、環境適応性、耐故障性に優れる。このため、システム自体に問題への適応構造や環境との協調構造を複合的に埋め込むことを生命化と定義する。たとえば、従来の単なる自律分散制御とは異なり、抽象度やカテゴリーの異なる制御系の協調構造をシステムに埋め込むことにより、非構造化環境においても適応能力の高いロバストなシステムを構築することができる。また、単なるセンサフュージョンとは異なり、多チャンネルの受容機構を埋め込むことにより、複合的な環境適合制御を行うことができる。単なる設計最適化とは異なり、創発的・進化的なシステム設計方法を用いることにより、システムの身体に環境共生的な価値を埋め込むことができる。以上のように、生命化とは、システムに多目的・複合機能・協調構造・多様な入出力チャンネルを生命さながらに埋め込むための方法論なのである。私は、本COE拠点の一員として、主にアクチュエータ・センサ・ロボットの生命化研究を行ってきた。本講演ではその内容について概説する。

#### 2. アクチュエータの生命化

アクチュエータ生命化のためのプラットフォームとして、多自由度アクチュエータの開発を行う必要がある。多自由度アクチュエーションにより複雑な環境とのインタラクションが可能となるからである。このため、筆者らは、多自由度超音波モータの開発や、超音波モータを用いた20自由度ロボットハンドの開発を行ってきた。告白すると、アクチュエータの場合、多自由度化を行うだけでも研究課題が山積している。このため、現状では生命化のための基盤技術を構築したに過ぎない。今後は、これらを用いて、環境と複合的に相互作用する多自由度系の生命化を行っていく予定である。

#### 3. 触覚センサの生命化

感覚情報は、中枢神経系により分散的に処理されている。たとえば、触覚を例にとると、つるつる、ざらざらといったテクスチャは脳新皮質の体性感覚野で処理される結果、質感はヒトの心に意識される。一方、重さや摩擦係数が未知の物体を把持し持ち上げる把持力制御は脳幹や中脳で無意識的に制御される。痛い、熱いといった刺激に対する反射は、やはり無意識的に脊髄で制御される[2]。このように、触覚というひとつの感覚について考えてみても、ヒトは階層的・自律分散的な制御を並列的に行っていることがわかる。

無意識的・反射的なヒトの制御を人間・機械協調系に陽に埋め込む生命化研究の一例として、筆者らは、物体と接触した指表面の固着・滑り分布をヒトに呈示することにより、ヒトの無意識的な把持力制御を誘発する局所滑り覚ディスプレイ(触ミラー)の研究開発を行ってきた[3-6]。

ヒトは、接触面内の初期局所滑り領域を無意識下でモニタし、局所滑り領域が拡大しつつあるときには無意識的(反射的)に法線力(把持力)を増大させて全体的な滑りを回避する一方、局所滑り領域が小さいときにはあまり法線力を加えないような把持力制御を(やはり無意識的に)行い、物体を握りつぶしてしまうことを回避している。このため、筆者らは、接触端部の局所滑り領域が大きい“滑りそうな”状態や、逆に局所滑り領域が小さい“滑りにくい”状態を作り出すことによって、ヒトの無意識下での把持力調整に基づく把持力制御が誘発されることを確認した。

このような触覚ディスプレイをマスター装置とし、固着・滑り状態を検出できる触覚センサをスレーブ装置として遠隔触覚伝送装置を構築すれば、ヒトの無自覚的(無意識的)な制御を人工物の制御に組み込むことができる。いいかえれば、ヒトに無意識的かつ反射的に人工物の制御を行わせるような新たな人間・機械協調系を構成することができる。すなわち、ヒトは、遠隔ロボットの触覚センサが滑りやすいものを触っているのか、滑りにくいものを触っているのか、という違いを、滑り領域の割合という情報として無意識下で受け取り、無意識のうちに把持力のフィードバック制御を行うと考えられる。

人工物のために人間の側が変えられてきた、という歴史的事実を、従来、人間工学等の分野では否定的に捉えてきた。自動車が普及したから道路を平らで広いものにして歩行者を脇役に追いやらざるを得なかった、というように。だから道具のデザインはもっと人間にとって使い勝手が良くなければならない、という主張である。これに対し、私が行っていることは、「人工物のために人間」という視点をもっと積極的に捉えて良いのではないかと、「人間のための人工物」という視点に執着するのみの時代は終わったのではないかと、という指摘なのである。いわば、ヒトのためのロボットから、ロボットののためのヒトへ、である。このような双方向的な視点からボトムアップに社会空間や地球空間を捉えることが、生命系全

体のデザイン論につながると考えられる。

#### 4. ロボットの身体生命化

アクチュエータ, センサ, 構造部材, 軸受といったロボットの構成要素は, そもそも, 生物のそれとは機能も構造も大きく異なる。したがって, ロボット全体のデザインも, 本来は, ヘビ型, 魚型, ヒト型のような表面的生物模倣型ではなく, ロボットの構成要素に合致した“ロボットらしい”ロボットとなるべきであろう。ところが, 従来のロボットは, ロボットのために用いることができる構成要素の組み合わせ最適化問題としての最適設計が行われていなかったため, 十分に“ロボットらしい”とは言えなかったと考えられる。このため, 筆者らは, 「ロボットの, ロボットによる, ロボットののためのデザイン」を目指した研究を行っている。

たとえば, 遺伝的プログラミングを用いて, リンク型ロボットの形態と運動パターンを同時に進化的に求める研究を行った[7]。ロボットの形状は, 平面内で任意の位相構造を獲得することのできる2次元リンク型とした。このようなロボットを選択した理由は, 身体と神経系の形態と運動パターンが環境に応じて創発的にデザインできることを示すことのできる単純なロボットであるからである。神経系とリンクの接続関係を Lisp 言語のように木構造で表現し, そのパラメータを遺伝子として, なるべくエネルギーを使わずに一定の時間内に最も遠くまで移動できるロボットを求めた。多峰性のある解空間の中から進化的計算によりボトムアップ的に解を探索したことにより, 設計者が意図した枠内の設計を行うトップダウン的手法では得られないようなユニークな解が得られている。なお, 本ロボットに用いるアクチュエータや構造部材の出力や物性値は, 実際に作製することを前提として与えているため, 計算機上で求めた設計解形状のロボットを実際に作成することが容易である。つまり, 人工生命の分野でこれまで使われてきた手法を, ハードウェアとして実現可能なロボットに適用した例であるということができる。

同様な考え方を二足歩行ロボットに適用する研究も行っている[8, 9]。アクチュエータのサイズや出力パワーを制約条件として与え, 最も効率的に速く歩けるロボットの身体・神経系構造と運動パターンを同時に獲得させた結果, スムーズな歩容で歩行できるロボットの形状と歩行パターンが求まった。気分がいい方をすれば, 設計者がロボットの形状や歩行パターンを与えるのではなく, 二足歩行ロボット自身が自身の形態と運動パターンを獲得したはじめての研究である。この手法を拡張し, さまざまなアクチュエータ, センサ, 機械要素を選択できるようにするとともに, 単に効率よく歩行するだけでなく, 環境変化に応じた解決の多義性やロバスト性などを獲得させれば, ヒトを模倣した従来のヒューマノイドロボットを越え, “ロボットらしい”形態と運動パターンをロボット自身が創発する, ロボットの生命化が可能になると考えている。

#### 5. ロボットの心の生命化

Brooks のサブサンクションアーキテクチャは, 従来のトップダウン的制御系と異なり, 反射的かつ自律分散的な制御系を組み合わせることにより昆虫のような行動を生成できることを示したため, 発表当時は大きな脚光を浴びた。しかし, そのような制御系はヒトの知的制御のような複雑な制御には適用できない, という批判を浴び, 現在ではあまり注目されていない。しかし, 本当にそうであろうか。階層的な制御系を拡張すると, 実は, ヒトの心をも説明できるのではないだろうか。私は, 従来ヒトの行動制御の中心であると思われてきた「意識」を受動的なシステムと捉えることにより, 反射的・自律分散的な制御の考え方を心のアーキテクチャに拡張できると考えている[10, 11]。

心は「知」「情」「意」「記憶と学習」「意識」より構成されるといわれているが, 一般に「意識」は「知」「情」「意」や「記憶」に対し「注意」を向けるトップダウンの存在であると考えられてきた。「意識」は「注意」を向けた対象に応じてその有効範囲を変幻自在に変えることのできる存在である。このような「意識」は脳内のあらゆる情報処理に注意を向け理解することのできる存在でなければならない。つまり, 「意識」はあらゆる情報をバイディングできる(結び付けられる)万能な存在でなければならないことになる。このような「意識」は設計困難である。このため, 何千年もの間, 「意識」は謎だと言われ続けてきた。

これに対し, 筆者らの心のモデルでは, 「意識」は「無意識」下の自律分散的・ボトムアップ的・無目的情報処理結果を受け取り, それをあたかも自分が行ったかのように錯覚し, 単一の自己の経験として体験した後にエピソード記憶するための受動的・追従的なシステムであると考えられる。このように考えると, 従来「心」の謎であるといわれてきたバイディング問題, フレーム問題, 意識の自己言及性の問題を解決できるのみならず, なぜなんのために哺乳類の意識は生じたのか, という疑問や, 独我論が問題にしてきた私(自己意識のクオリア)の問題をも解決することができる[10]。また, ロボットの脳であるコンピュータに意識を持った生命的・無目的「心」を作り出すことも困難ではないと考えられる[11]。意識を持ったロボットを作るとは今後の課題であるものの, 究極の謎であると思われてきた「意識」の問題が生命的デザイン原理により説明できるという点は, ロボットの心の生命化の可能性を示唆するものであると考えている。

#### 6. おわりに

機械・ロボットの生命化の例を述べた。今後, 生命的・ボトムアップ的なシステムのデザイン論が時代の要請を受けて大きく発展するものと考えている。

#### 参考文献

- (1) <http://www.coesys.keio.ac.jp/>(文部科学省 21 世紀 COE プログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」ホームページ)
- (2) 前野隆司: 無意識のための触覚センサ・触覚ディスプレイ, 日本機械学会年次大会講演資料集 Vol. 8, 触・力覚のセンシングと提示技術に関するワークショップ, pp. 427-428, 2004
- (3) 前野隆司: 触覚のモデリングと有限要素解析, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 9 巻 2 号, pp. 72-77, 2004
- (4) Isao Fujimoto, Yoji Yamada and Takashi Maeno: Tetsuya Morizono and Yoji Umetani, Study on A "Tactile Mirror" for Displaying Static Friction Sensation with Tactile Perception Feedback, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1233-1238, 2004
- (5) 毛利優之, 前野隆司, 山田陽滋: 局所滑りディスプレイを用いたヒト下位中枢への「滑りそう」な触感の呈示法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 1A1-H-34, 2004
- (6) 中本雅崇, 前野隆司, 昆陽雅司, 田所諭, 分布型振動刺激を用いた局所滑り覚呈示による無意識下の把持力制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, 1P1-N-100, 2005
- (7) 遠藤謙, 川内野明洋, 前野隆司: 進化的計算法を用いたリンク型移動ロボットの形態と運動パターンのデザイン法, 日本ロボット学会誌 22 巻 2 号 pp. 273-280, 2004
- (8) Ken Endo, Takashi Maeno and Hiroaki Kitano, Co-evolution of Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot using Evolutionary Computation -Evolutionary Designing Method and its Evaluation-, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 340-345, 2003
- (9) 遠藤謙, 北野宏明, 古田貴之, 前野隆司: 2 足歩行ロボットの進化的設計: サーボモジュールの実装と実ロボットへの適用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 1A1-L1-54, 2004
- (10) 前野隆司: 脳はなぜ「心」を作ったのか—「私」の謎を解く受動意識仮説, 筑摩書房, 2004
- (11) 前野隆司: ロボットの心の作り方(受動意識仮説に基づく基本概念の提案), 日本ロボット学会誌 23 巻 1 号, 2005, pp. 51-62