

生命模倣ロボティクス —生命のボトムアップ的設計原理に学ぶ

Life-Inspired Robotics

前野隆司
慶應義塾大学

MAENO Takashi
Keio University

1. はじめに

人生 (life) に根源的な目的はない。いや、夢を叶えることが目的だ、とか、楽しく生きること自体が目的だ、世のために尽くすことが目的だ、等々、いろいろなことを言う人がいるが、そうではない。それらは、その人が自ら創造して設定した目的に過ぎない。いや、子孫を残すことが目的だ、という人がいるが、それもちがう。ある生物種の子孫が繁栄したからといって、そのことに何らかの根源的意味があるわけではない。これも人が自ら創造した人類の目的 (の仮説) に過ぎない。つまり、生物の生命 (life) を現象として見たとき、この現象に対して外部から与えられたトップダウンの目的は存在しない。

(創造主のようなトップダウン的存在がいなければ、の話だが……。宗教の話はここでは置いておこう。) 生命 (または人生) の目的は、生命というシステムの内部で自己言及的に生成されたものなのだ。また、人はただ生きているだけ、社会はただ人が集まっているだけであり、その秩序は、外部からコントロールされた結果として形成されたのではなく、システムの内部でボトムアップ的に自己組織化されたものなのだ。言い換えれば、生命 (または人生) は、それを構成する個々の要素の相互作用により全体系の秩序が形成されるボトムアップ的設計原理に支配されているからこそ、創発的・ゲシュタルト的な面白さを維持しているのだということができる。

一方、従来の人工物のデザイン (構造デザイン) では、対象とする人工物の機能と用途に応じて設計目的や仕様があらかじめ設計者によりトップダウンに与えられる。このようなやりかたは、対象とする人工物の設計方法と使途が明確な場合には有効であった。しかし、設計者の知識や能力によって規定された探索範囲内に設計解空間が限定されてしまうため、生物の進化や適応のような創発的ダイナミズムは期待できない。また、未知環境で使われるロボットのように、非構造化環境に適応する必要のある人工物のデザインには適用困難な場合が多い。このため、ロボットのように、目的関数と解空間が多様で、発展の余地が大きい人工物のデザインを行なう際に、生命のボトムアップ的設計原理に学ぶこと (言い換えれば、“人工システムのデザインを生命化すること” [注1]) に大きな意義があると考えられる。

このため、筆者が主宰するバイオリボティクス研究室 [注2] (Keio BioRobotics Laboratory) では、(構成員の人生のデザインと並行して、) 生命に学ぶアクチュエータ・センサ・ロボットのボトムアップデザインに関する研究を行ってきた。本稿ではその一部を紹介する。

2. 形と運動生成のボトムアップデザイン

人工物をデザインする際に、生物の形態ではなく、生命システム自体にこそ学ぶべきだという論点が本特集の主題である。確かに、単に形態に学ぶだけのバイオミメティクスには限界がある。魚や鳥の形状・構造・運動・行動といった表面的な特徴に学ぶだけでは、船や飛行機は設計できない。結果として表出する特徴ではなく、それを生み出す原因に学ぶことが重要である。では、これらの表面的特徴は何に起因するのだろうか。

図1に示したように、生物の形状・構造・運動・行動といった特徴は、生命の2つの性質の結果として表出される。すなわち、柔軟性・自律分散性・冗長性・階層性といった静的な性質と、適応・形態形成・自己組織化・成長・進化といった動的な性質である。これらの性質は、従来の人工物が中央集権的で適応・進化困難であったことと対照的である。では、これら2つの生命的特徴は何に起因するのだろうか。

それは、生命のデザインがボトムアップ的であるという点に集約されよう。図1に描いた生命の特徴は、すべてボトムアップ的設計原理から導き出された特徴であるということができる。

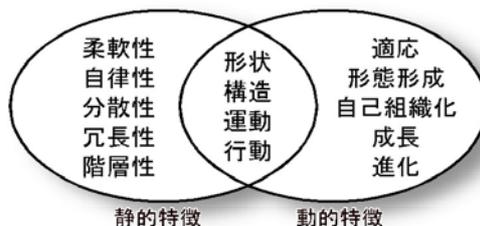
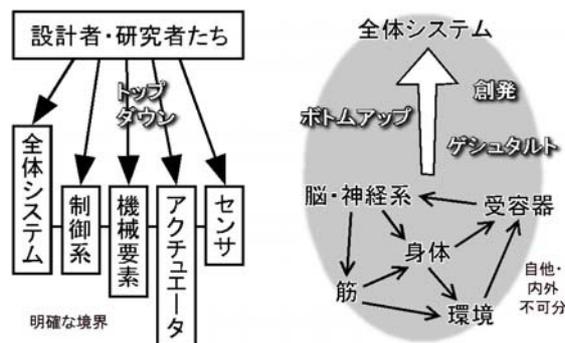


図1 生命の何に学ぶか?



(a) 従来の人工物デザインの例 (b) 生命のデザインの例

図2 従来の人工物設計と生命の設計

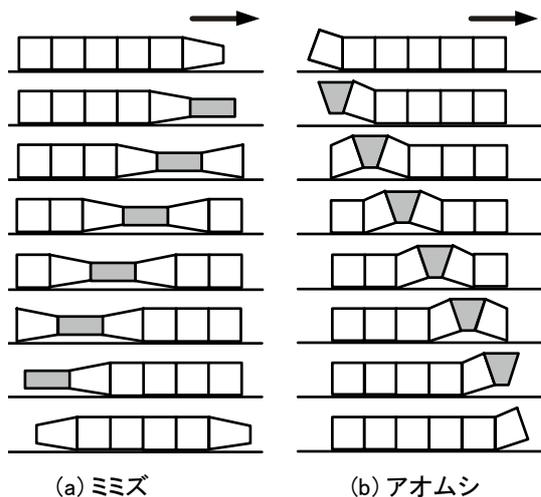


図3 ミミズとアオムシの移動パターン

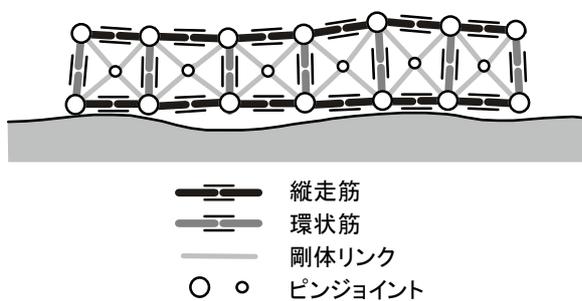


図4 柔軟細長動物の多リンクモデル

図2に、従来の人工物のデザインと、生命のデザインの比較図を示す。図2(a)に描いたように、人工物のデザインはトップダウン的である。たとえばロボットをデザインする場合、個々の部品はその部品専門の設計者によりデザインされる。ロボットの設計者はそれぞれの部品のデザイン法や内部の原理を知らなくても、それらを組み合わせて使う方法を知っていればよい。それぞれの設計者の分担範囲には明確な境界があり、デザイン対象である部品やシステム間の境界も明確である。もちろん、設計者間のコラボレーションにより、境界に相互乗り入れが行なわれる結果、ボトムアップ的に設計解が改善されることはあるものの、それぞれの設計者が全員のコンセプトに完全に関与するというようなことはありえない。個々の設計者というトップダウンの存在の意思により、あらかじめ設定された個々の設計目的や仕様に合致したデザインが行なわれるのが普通である。この結果、システム全体の最適性はある程度犠牲にならざるを得ない。

一方、生物のデザインはボトムアップ的である。コンピュータ(脳・神経系)やアクチュエータ(筋)、センサ(受容器)が部品として単体でデザインされることはない。また、生物の個体そのものが環境条件と独立に単独でデザインされることもない。生物では、脳・神経系も筋も受容器も身体も、環境条件に応じて同時にボトムアップ的にデザインされるのである。すべては完全に関わりあっていて、全体系の動的平衡状態として解が得られている。このように、システムを構成する個々の要素間

の非線形相互作用により全体システムの秩序が形成され、全体系の振舞いが個々の要素の機能や性質に影響を及ぼすような系を、複雑系・創発系などと呼ぶ。

マニアックな例だが、筆者が行ったアオムシ、シャクトリムシ、ミミズのデザインの研究について述べよう。これらの生物は、いずれも体節の繰り返し構造から成る細長く柔軟な身体を持ち、縦走筋と環状筋の拮抗関係により体の形状と剛性を変化させる。興味深いことに、アオムシ、シャクトリムシ、ミミズの移動様式はいずれも異なる。図3(a)に示したように、ミミズは太さ変化を後方に伝播する蠕動運動により前進するのに対し、アオムシは体の一部を少しだけ持ち上げる曲げ運動を前方に伝播することにより前進する。また、ミミズ、アオムシがそれぞれ後退波または進行波を利用するのと違って、シャクトリムシは曲げの定在波により前進する。すなわち、体全体を同時に曲げたり伸ばしたりしながら前進する。

いずれも細長く柔軟な生物であるのに、なぜこのような移動様式の違いが生じたのであろうか。この疑問を明らかにするために、筆者らは柔軟細長生物に運動パターンを創発的に獲得させるシミュレーションを行なった[注3]。すなわち、図4のように、柔軟細長生物を多リンク系にモデル化した。まず、縦走筋と環状筋をモデル化し、体壁内の液体の代わりに剛体リンクを配することにより、2つの筋の力学的拮抗関係を表現した。また、各体節ごとにフーリエ級数状のリズム生成器を配した。フーリエ級数の係数を変化させれば柔軟細長生物が任意の運動を行なえるので、これを設計変数とした。このモデルに対し、移動距離が最大の個体が生き残るという評価関数の下で遺伝的アルゴリズムによる準最適化計算を行なった。すなわち、適切な運動パターンを進化的に獲得した個体が生き残るような条件下で解を探索した。

柔軟細長生物の体の剛性を3水準に変化させて、遺伝的アルゴリズムによる準最適化計算を行なった結果を図5(a)~(c)に示す。図より、剛性の小さいモデルでは太さ変化の後退派を伝播するミミズ型の移動形態が、剛性が中くらいのモデルでは曲げ前進波を伝播するアオムシ型の移動形態が、剛性の大きいモデルでは伸縮の定在波を利用し体を持ち上げて移動するシャクトリムシ型の移動形態が、それぞれ獲得されていることがわかる。また、実際にミミズ、アオムシ、シャクトリムシを引っ張り試験してみた結果、剛性は、

$$\text{ミミズ} < \text{アオムシ} < \text{シャクトリムシ}$$

の順になっていた。これより、それぞれの柔軟細長生物は、それぞれの体の剛性に適合した運動パターンを進化的に獲得したということが出来る。

また、図5(b)に示した剛性が中程度のモデルに、管路内で移動するという条件下で運動パターンを探索させたところ、太さ変化の後退派を伝播するミミズ型の移動形態が得られた。平らな地面の上ではアオムシ型の移動運動を行っていたモデルが、管路内ではミミズ型の移動運動を呈したという現象は、それぞれの生物が運動パターンをボトムアップ的に獲得する際には、身体条件のみ

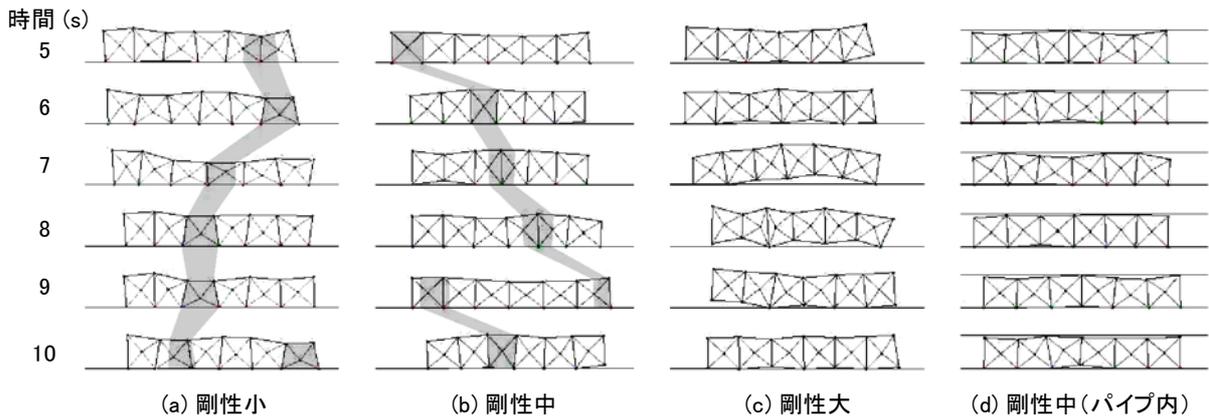


図5 柔軟細長動物の移動パターンの進化的計算結果

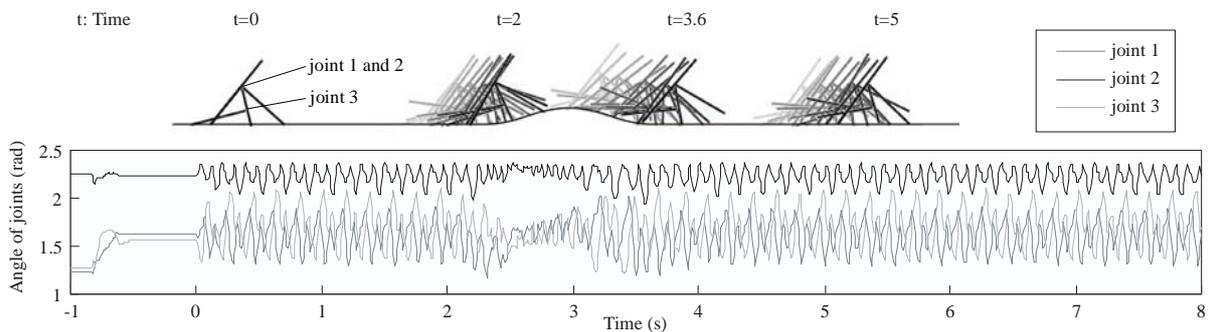


図6 遺伝的プログラミングにより創発した2次元リンク型移動ロボットのトポロジーと移動パターン

ならず、環境条件に大きく依存することの一例であるといえる。

以上に、生物の形態・運動パターン・神経発火パターン・環境条件が同時にボトムアップ的にデザインされていることの例を述べた。このように、生物のシステムデザインにおいては、トップダウンに候補が提示されていなくても、環境条件や身体条件に合致した設計解が創発的かつボトムアップ的に得られている。このような生命的設計原理を、ロボットのような人工物デザインに適用すれば、設計者が思いつぎうる範囲を超えた創発的かつロバストな解が求まる可能性があると考えられる。

そもそも、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、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、ロボットのためのデザイン」を目指した研究を行っている。人間というトップダウンの設計者の奴隷であったロボットを解放する試みである(ちなみにロボットの語源は奴隷)。

図6に研究例を示す。図6は、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た例[注4]である。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。図6は解の一例であり、思いもよらないユニークな形状のロボットが、平面内および正弦波状の段差を乗り越えて進んでいる様子がわかる。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える。

同様な考え方を二足歩行ロボットに適用した例を図7に示す[注5, 6]。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

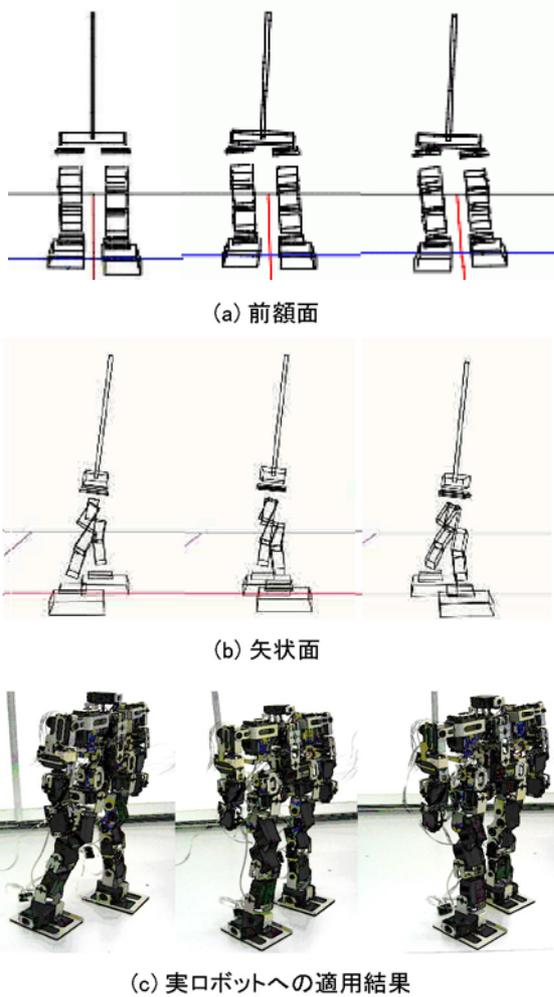


図7 遺伝的アルゴリズムにより創発した二足歩行ロボット(PINO)の体型と歩行パターン

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、図のように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められている。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という研究は、他に例を見ない。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た、“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メタ・ヒューマノイドロボットの開発が可能になると考えている。

3. 運動制御のボトムアップデザイン

2章では、生物やロボットの身体のボトムアップデザインについて述べた。この章では、ロボットの制御のボトムアップデザインについて述べる。

旧来の人工物制御は一般に中央集権的かつトップダウンに行われるが、生物の制御は自律分散的かつボトムア

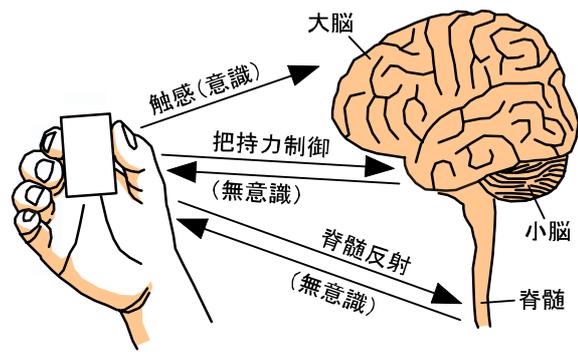


図8 3つの触覚

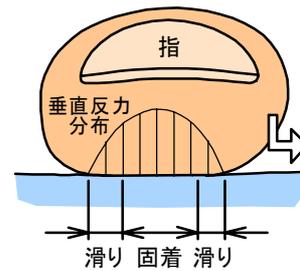


図9 接触面の固着・滑り分布

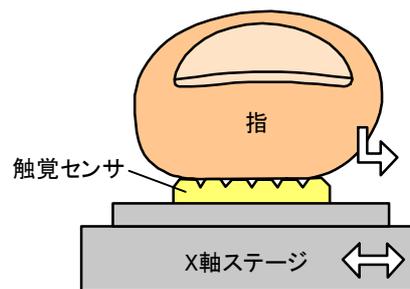


図10 静摩擦覚ディスプレイ(触ミラー)

ップである。生命の特徴のひとつとして、ボトムアップ的な構造により変動する環境にしたたかに適応してきたという点が挙げられる。したがって、自律分散的かつボトムアップな制御系を用いれば、変動する環境下においても自律的・適応的な制御が行えるものと考えられる。

たとえば、触覚情報は、図8に示したように中枢神経系により分散的に処理されている。すなわち、つつる、ざらざらといったテクスチャは大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 [注7]。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ボトムアップ的・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・機械協調系に陽に取り込むことの一例として、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

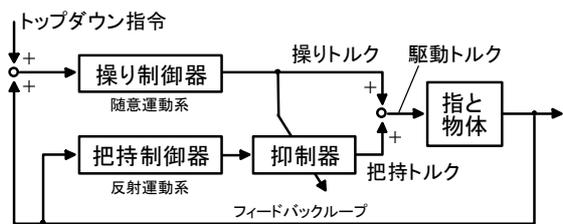
ディスプレイ（触ミラー）の研究開発を行ってきた[注 8,9,10]。

ヒトは、図 9 に示したような接触面の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、たとえば、図 10 に示した静摩擦覚ディスプレイ（触ミラー）の研究[注 9]では、触覚センサにより接触面の固着・滑り情報をモニタし、X 軸ステージにより固着・滑り分布を任意の範囲に制御した。つまり、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ができた。この結果、ヒトは、無意識下で把持力を調整し、対象物を握り落とさないような制御を行うことを確認した。

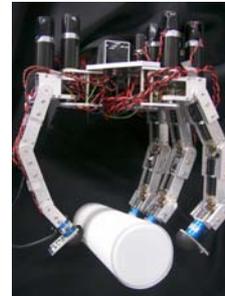
このような触覚ディスプレイをマスター装置とし、固着・滑り状態を検出できる触覚センサをスレーブ装置として遠隔触覚伝送装置を構築すれば、ヒトの無自覚的（無意識的）な制御を人工物の制御に組み込むことができる。いかえれば、ヒトに無意識的かつ反射的に人工物の制御を行わせるような新たな人間・機械協調系を構成することができる。すなわち、ヒトは、遠隔ロボットの触覚センサが滑りやすいものを触っているのか、滑りにくいものを触っているのか、という違いを、滑り領域の割合という情報として無意識下で受け取り、無意識のうちに把持力のフィードバック制御を行うと考えられる。

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く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、「人工物のための人間」という視点をもっと積極的に捉えて良いのではないか、「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。

また、図 11 に示した、随意運動による反射運動の抑制を模倣したロボットハンドの把持・操り制御の研究[注 11,12]では、ヒトの階層制御に学んだ新たな人工物制御法を提案している。すなわち、対象物を滑り落とさないことを目的とする反射的・無意識的な把持力制御系と、物体を持ち替えるという随意的・意識的な制御を行う操り制御系を、階層的に構成している。ヒトの神経系は、随意運動制御系から反射運動制御系への抑制的なパスを有することが知られているので、図 11 では、上位の操り制御系が下位の把持力制御系を抑制する抑制器を構築している。つまり、物体を持ち替えるという操り運動を行う際には、物体から指を離す制御の邪魔をする働きがあ



(a) 把持・操り制御のブロック線図



(b) 多指ロボットハンド

図11 随意運動による反射運動の抑制に学ぶ把持と操りの制御

る反射的な把持力の安定制御機能を抑制し、一時的な不安定な状態を生成することによって、持ち替えを実現するのである。このような制御系を用いれば、コップに水を入れる場合や、物体に外乱が加わる場合のように、環境変動が生じた場合に、反射的・無意識的な把持力制御系が対応できるため、ロボットハンドに頑強性を付加することができる。

以上のように、集中管理的・トップダウン的な従来型人工物制御系と異なる、分散的・ボトムアップ的な生命的制御系のデザインが有効であることを述べた。このような分散的な制御系は、Brooks のサブサンクションアーキテクチャ[注 13]のような考え方の拡張といえる。

4. 心のボトムアップデザイン

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の制御系と異なり、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、本当はそうであろうか。3章で述べた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[注 14,15]。

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。従来の心のイメージ図

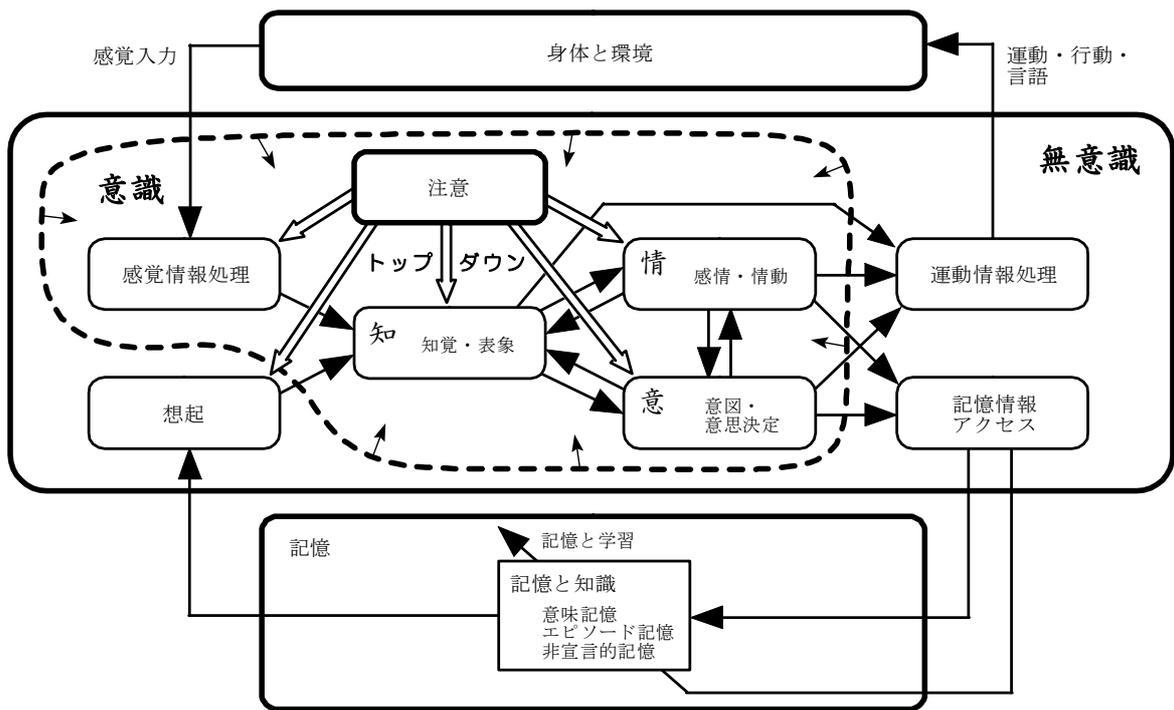


図12 「無意識」との境界が不明確でトップダウンに「注意」を払った部分に注目する「意識」を仮定する従来の心のモデル

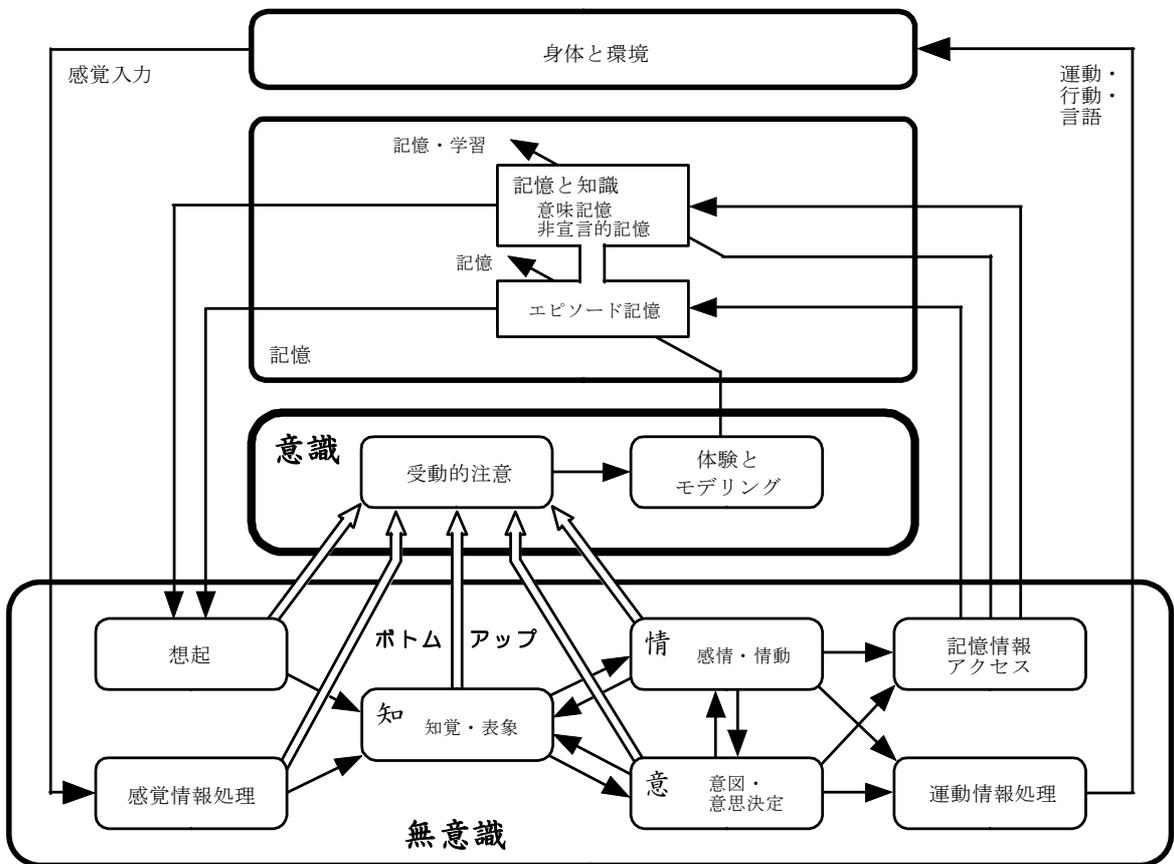


図13 「意識」の外にある「無意識」の自律分散計算結果にボトムアップに「注意」を払う受動的な「意識」を仮定する心のモデル

を図 12 に示す。図 12 では、「意識」は「注意」を向けた対象に応じてその有効範囲を破線の範囲内で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、図 13 に示したように、「意識」は「無意識」下の自律分散的・ボトムアップ的・無目的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が生じたのか、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[注 14]。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・無目的的「心」を作り出すことも困難ではないと考えられる[注 15]。意識を持ったロボットを作ることとは今後の課題であるものの、究極の謎であると思われる「意識」の問題がボトムアップ的デザイン原理により説明できるという点は、生命模倣ロボティクスの大きな発展可能性を示唆するものであると考えている。

5. おわりに

生命のデザインは、身体も制御系も心も、ボトムアップの構成原理に基づいていることを述べた。また、生命のデザイン法に学べば、ロボットなどの人工物を生命化することができることの例を述べた。今後、生命的・ボトムアップ的なデザイン論が時代の要請を受けて大きく発展することを期待したい。

謝辞 本稿で述べた筆者の研究の一部は文部科学省 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」[注 1]の援助による。記して謝意を表す。

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) <http://www.maeno.mech.keio.ac.jp/> (慶應義塾大学前野研究室ホームページ)
- 3) 江淵智浩, 土屋学, 前野隆司, 山崎信寿: 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第三報, 柔軟生物の構造・環境・移動パターンとの関係), 日本機械学会論文 68 巻 667 号 C 編, pp. 920-926, 2002
- 4) 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
- 5) 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

- 6) 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, 1 A1-L1-54, 2004
- 7) 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
- 8) 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ー学会誌, 9 巻 2 号, pp. 72-77, 2004
- 9) 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
- 10) 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
- 11) Kazuto Imazeki and Takashi Maeno: Hierarchical Control Method for Manipulating/Grasping Tasks using Multi-fingered Robot Hand, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3686-3691, 2003
- 12) 今関一飛, 前野隆司: 随意運動による反射運動の抑制を模倣したロボットハンドの把持・操り制御, 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, 2 A1-L1-12, 2004
- 13) R. A. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation.*, vol. 2, no. 1, pp. 14-23. 1986
- 14) 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
- 15) 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