

システムとしての触覚に学ぶ

前野 隆司 (慶應義塾大学)

1. 「システムとしての生命に学ぶ」とは何か?

本特集のタイトル「システムとしての生命に学ぶ」とはどのような意味であろうか。最初に私なりに考えてみたい。まず明確にすべき点は、生物に学ぶことと生命に学ぶことの違いである。いま私が死んだとしよう。すると、私の死体は生物というモノではあるが生命という現象ではない。これより、「生きていること」を陽に捉える視点が生命の視点と言えそうである。では、生きているとはどのような状態であろうか。医学的には、脳が活動している状態、すなわち、脳死でない状態のことであろう。つまり、脳からの指令に基づき、身体がダイナミックに環境（外界）と相互作用し、その結果を自己のために生かしている状態が、生きている状態であると考えられる。では、システムとしての生命に学ぶとはどういう意味であろうか。単に生物の身体の形状や構造、あるいは断片的な機能に学ぶのではなく、それらを組み合わせたシステムとしての特性に学ぶ、ということであろう。つまり、生物が環境とのダイナミックな相互作用に基づいて学習・適応することによって生きているありさまにこそ学ぼうという視点である。また、生物個体の発生や成長、あるいは種の進化といった、もう少しマクロなケースも含まれよう。しかし、ロボットのような機械だって、既に環境とダイナミックに相互作用している。では、そのような既存の機械と、システムとしての生命に学んだ機械の違いは何であろうか。それは、ダイナミックな相互作用の複雑さと階層的整合性の程度の違いであろう。すなわち、定量的な情報から定性的な情報（さらには情報表現できない身体性）に至る階層性を含む情報の多様性や、拘束条件の多様性、目的関数の多様性といった複合的で非線形な特徴を有する複数の情報の間のバランスを暗黙裡に取ることによって、全体として環境適応性・

耐故障性に優れたロバストなシステムである点が生命それ自体の特徴であり、ここに学ぶことこそが、システムとしての生命に学ぶ視点であると考えられる。つまり、例えば、ある人がコップに入ったジュースを飲む場合(図1)、ジュースとヒトは多様な階層でインタラクションしている。すなわち、手ではコップを落とさずに把持し傾けるための制御を行ないつつ、唇や咽喉ではジュースをこぼさずに飲み込む制御を行う。同時に、ジュースを飲んでおいしいと思ったり、くつろいだり、何かを思い出したり、次に何をしようかと考えたりと、様々なことを行っている。このとき、運動制御から知覚・思考に至る、階層性の異なる多様な目的関数・拘束条件に基づいて、低次から高次に至る多様な場の振舞いが同時に生成され、同時にバランスよく処理されている。すなわち、カテゴ

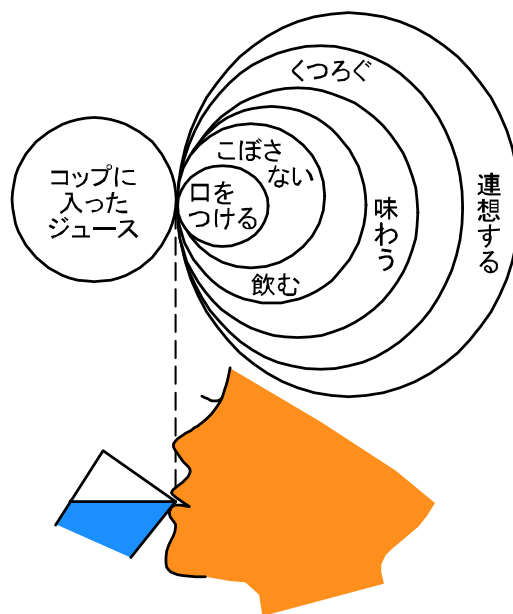


図1 コップに入ったジュースを飲む人に誘発される階層的な知覚と行為

リーの異なる情報が同時にロバストに処理されている。非構造化環境への適応性に優れたこのような振舞いこそが、システムとしての生命に学ぶべき点であると考えられる。

2. 「システムとしての感覚（触覚）に学ぶ」とは何か？

生物の断片的な機能に学ぶのではなく、生命システムとしての全体のバランスの取れた振舞いに学ぶ視点こそが「システムとしての生命に学ぶ」視点なのだとする、本解説の主題である「触覚」という断片に学ぼうという姿勢は、生命ではなく生物に学ぶ単なるバイオミメティクスに陥っているのではないかという疑問がわく。確かに、触覚を単なるセンシングと捉えるならば、それは従来型のモノの視点である。しかし、ここで重要なのは、単に触覚のセンサ機能に学ぶのみならず、センサを含むシステムの複合的な振舞い自体に学ぶことである。つまり、センサを単にフィードバックのための手段と捉える「五感（またはその中の触覚）に学ぶ」視点ではなく、センシングとは多様なチャンネルを通して脳が身体・環境とインタラクションする場であり、その結果として自己に多様な変化をもたらす場であると捉えることこそが、「システムとしての感覚（触覚）に学ぶ」視点であると

考える。

生物のセンサそのものに学んで人工センサ設計を行う視点は単なるバイオミメティクスであるが、図 2 に示したように、センサ情報に基づき身体と外界の変化に対処するフィードバック制御に学ぶのが、昆虫のような反射的な制御に学ぶ視点、すなわち、生命に学ぶ第 1 歩であると考えられる。古くウィナーのサイバネティクスも、原点は「生物と社会科学におけるフィードバック機構と循環的因果律システムに関する会議」から始まったといわれる。ただし、フィードバック制御そのものは、身体と外界の変動に対して場当たりの対処するシステムに過ぎない。これに対し、センサから得られたフィードバック誤差を陽に逆モデル（フィードフォワードモデル）の学習のために生かすフィードバック誤差学習を通して環境適応性を向上させることが、もう少し高度なシステムとしての生命に学ぶ第 2 の視点であると考えられる。さらに、構築された逆モデルと順モデルを接続して、順逆計算により脳内でイメージトレーニングや思考を行う点に学ぶことが、さらに高次のシステムとしての生命に学ぶ第 3 の視点であると考えられる。ここでは外界のセンシングは用いられないものの、以前センサから得た情

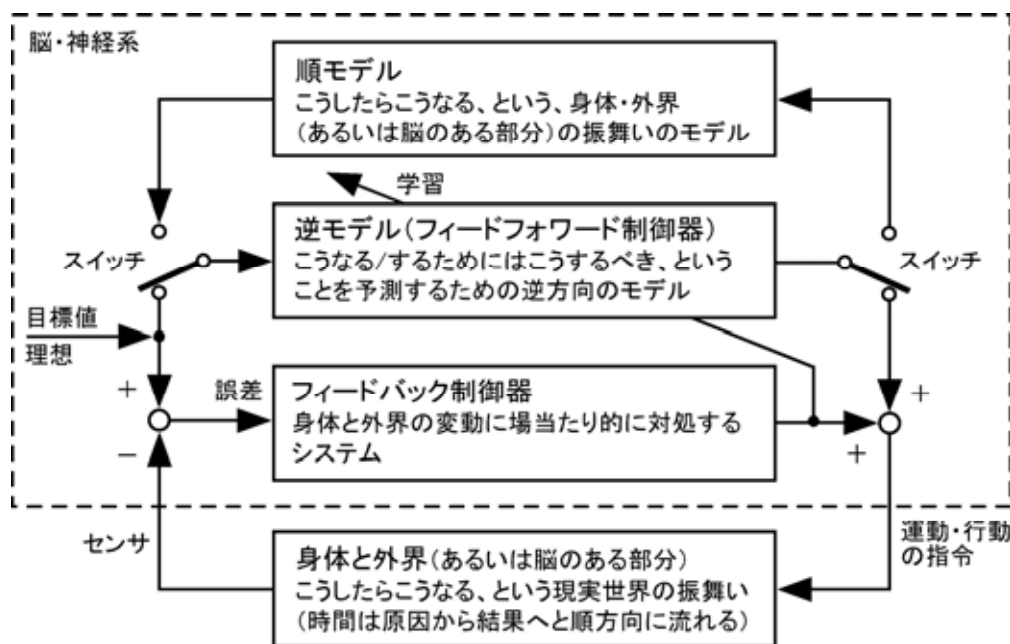


図 2 生物のフィードバック制御とフィードフォワード制御

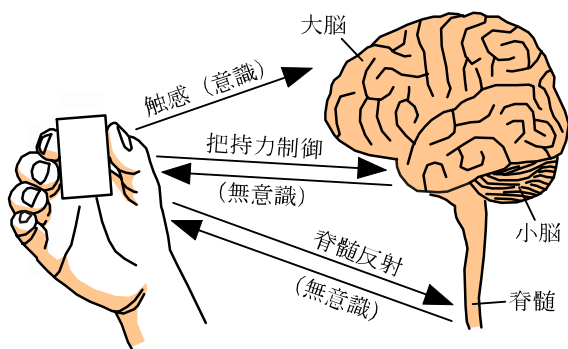


図3 3つの触覚

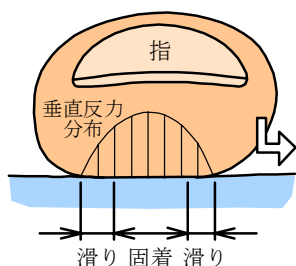


図4 接触面の固着・滑り分布

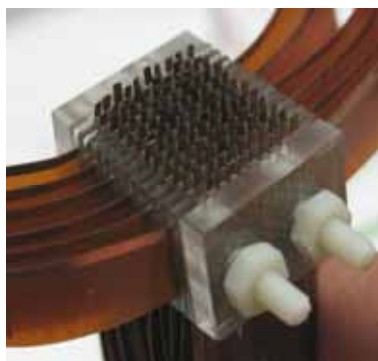


図5 分布振動刺激呈示装置

報が用いられている点が重要である。つまり、脳の内部の情報処理は、常にセンサから獲得した身体・環境情報からボトムアップに構成されていくのである。システムとしての感覚に学ぶとは、システムとしての生命に学ぶことのサブシステムなのではなく、そのものなのであるといってもよいであろう。以上のように、多様な環境変動と自己の変化に適応するための仕掛けとしてのセンシングシステムに学ぶことが、システムとしての感覚に学ぶ視点であると位置づけられる。

五感の中のひとつである触覚は、当然、以上の3つの点に関連していると考えられる。触覚はおそらく五感の中で最も原始的な感覚であると同時に、高次の知覚にも関与している。すなわち、触覚は、少なくとも、フィー

ドバック制御のみに着目した場合においても、図2のような複合的な構造を有している。そのことが、システムとしての触覚に学ぶべき本質的な点であると考えられる。すなわち、触覚（触覚、痛覚、温覚、自己受容感覚を含む広義の触覚）には、大きく分けて3つのフェーズがある。図3に示したように、1つ目は、痛みに対する反射や伸張反射のような脊髓反射経路である。2つ目は、後で述べる局所滑り感覚に基づく把持力制御のようなケースである。3つ目が「つつる」「ざらざら」や「こり」「しこり」を大脳皮質の感覚野で知覚する際のような触覚の知覚・認知である。前の2つは意識されることなく下位中枢で制御が行なわれる反射的な経路である。

以上のように、複数のチャンネルを介して階層性の異なる多様な制御系に寄与している点が、触覚（感覚）の興味深い点である。

3. システムとしての触覚に学ぶ研究の例

システムとしての生命に学ぶことの例題として、私の行っている触覚関連研究の一例について述べる。創造性の源泉はアナロジーだと言われる。「システムとしての触覚に学ぶ」というこの例題が、他の分野の研究者・技術者のために何らかの形でヒントになれば幸いである。

ここで述べる例は、図3の中央に描かれた無意識的な把持力のフィードバック制御の研究である。ヒトは、摩擦係数および質量が不明の物体を把持し持ち上げる際に、指-物体間の接触面の初期局所滑り状態（図4）を検出し、反射的な制御のために用いている。すなわち、ヒトは、物体表面の摩擦係数が小さい場合には初期局所滑りが生じ易いので把持力（法線方向の力）を大きく増加させるのに対し、摩擦係数が大きい場合には把持力を小さめに保つことが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。ここで重要な点は、ヒトは初期局所滑り領域のサイズ変化を意識下で知覚できないという点である。

このため、筆者ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、図5のようなICPF（高分子ゲル）アクチュエータの周辺部と中央部に異なる振動刺激を発生させる触覚ディスプレイを作成した。本装置を図6のように指に装着させ、中央部には5Hzの振動刺激を発生させることによりヒト指に圧縮された感覚を呈示した上で、ある瞬間に、周辺部にはマイスナー小体の感度最大周波数付近の30Hzの閾下刺激（ヒトが振動を知

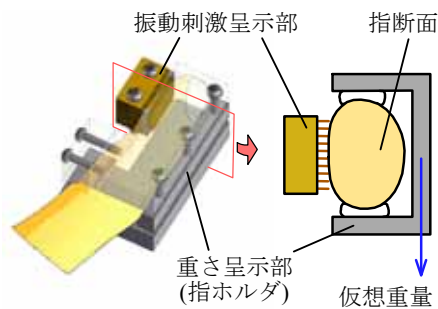


図 6 触覚・力覚刺激の分離独立呈示装置

覚できない振幅の振動刺激)を、指の側面には重さ変化に相当する力覚刺激を与えた。すると、ヒトは、接触部周辺における 30Hz の仮想的局所滑り刺激を意識下で知覚できないにも関わらず、把持力を増強させる反射運動を行なった。つまり、ヒトは、触覚刺激の変化を意識しないまま、いわば自動的に把持力の調整を行う場合があることを明らかにしたといえる。

以上の知見は、ヒューマンマシンシステムの操作性向上につながると考えられる。マスター・スレーブシステムによりヒトが遠隔ロボットを操る場合、スレーブロボットが把持した物体の摩擦係数を、操作者は知覚できない。本研究で用いたような、接触面の一部に対する振動刺激を用い、把持対象物の滑り落としやすさに応じて把持力調整反射の量を調整する制御系を構成すれば、ヒトは無自覚的にマスターシステムを操り、摩擦係数の違いに対応できると考えられる。重要な点は、操作者は摩擦係数の違いを自覚しないにもかかわらず、適切な力を加えて遠隔ロボットを制御できる点である。ヒトが意識下で判断して遠隔操作を行うという一般に想定される遠隔操作系と異なり、フィードバック時間の短い、より下位の反射経路を利用しているため、意識下の制御に干渉せずに協調制御を複合化・高速化できる可能性がある。このようなやり方は、ヒトの無意識的な制御を機械の制御に組み込む試みと捉えることができる。言い換えれば、ヒトの身体と機械の相互作用チャンネルを増大することによって、機械の身体化を促進する試みであるということもできる。

ヒトに無意識的に機械を操作させるという試みは、一見これまででない手法であるように感じられるかも知れ

ないが、実は、よく行われる制御である。

例えば、助手席に座った恋人と会話しながらドライブするとき、カーブでハンドルを切るのは無意識的なフィードバック制御である。また、視覚における周辺視は無意識に近い。そこに何か動きが見えたときのみその情報を利用する様は、触覚における局所滑りの利用とよく似ている。ただし、視野内に見えているものは意識下にあるように感じられるので、この点は触覚の場合と少し異なるのかもしれない。また、聴覚におけるカクテルパーティー効果は、多くの人の話し声の中から注意を払った声にのみ着目できることを示すものであるが、みかたを変えると、意識されない雑音の中に何か注目すべき情報がある場合に無意識的に利用される可能性があるということを示唆している。ヒトは匂いに順応するため、慣れた匂いに気がつかないが、実は無意識的に蓄積されるストレスに関連しているという知見もある。寝ているとき、目覚まし時計の音で目覚めることはできるが、家のそばを走る車の騒音では目覚めない。鍵をかけたかどうか、ガスコンロを消したかどうか思い出せないのは、無意識のうちに定型動作を行っているためであると考えられる。

以上のように、振り返ってみると、私たち人間は無意識にいろいろなことを行っている。むしろ、ヒトの制御構造の中では意識の方が脇役なのではないか⁽⁵⁾とさえ考えることができよう。

触覚の話に戻ると、ここで述べたのは、図 3 の中央の把持力制御メカニズムに関する研究であるが、システムとしての触覚の構造を理解するためには、図 2 の制御系の全体構造を明らかにする必要がある。そのためには、その部分構造をシステムという視点から明らかにしていく必要がある。このための例題として、筆者らは、触り心地には無意識的な持ち替えが寄与しているのではないかと、触感の知覚には触察速度が寄与しているのではないかと、機械の操作時には操作知覚と運動知覚の連関が重要なのではないかと、触り心地や持ち心地の脳内モデルはどのような知覚刺激によりアフォードされるのか、といった研究も行っている。いずれにせよ、単に触覚のセンシングや呈示の研究を行うのではなく、システムとしての触覚メカニズムの原理原則を解明することが、システム

全体のバランスのために重要であると考えている。

4. おわりに

システムとしての生命に学ぶためには、脳・身体・環境のインタラクションの場であるところの感覚・触覚センシングに学ぶことが重要であることを述べた。本研究は、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」⁽⁶⁾ の文脈の中で行われたものである。

「生命化」とは、システムとしての生命のもつロバストネスを人工システムに構造として埋め込むことを目指すものであり、人工生命、自律分散、創発、身体性、コネクショニズム、モデルベース制御、ソフトコンピューティング、ゲシュタルト、構造主義といった要素の延長線上にある、システムデザインのための新たな包括的パラダイムであると考えている。本稿が、システムとしての生命に学ぶ方法論構築のための一助となっていれば幸いである。

参考文献

- (1) Roland S. Johansson, *Sensory Control of Dexterous Manipulation in Humans, Hand and Brain*, edited by A. M. Wing, P. Haggard, and J. R. Flanagan, New York: Academic, pp.381-414 (1996)
- (2) 広光慎一, 前野隆司, 物体把持時におけるヒト指腹部の固着・滑り分布と触覚受容器応答, 日本機械学会論文集(C 編), 68 巻 667 号, pp.202-207 (2002)
- (3) 昆陽雅司, 中本雅崇, 前野隆司, 田所諭, ICPF アクチュエータを用いたヒト指腹部への分布振動刺激に基づく把持力調整反射の誘発, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌 11 巻 1 号, pp. 3-10 (2006)
- (4) 前野隆司, 昆陽雅司, 中本雅崇, 田所諭, どのような閾下分布触覚刺激がヒト指の把持力調整反射を誘発するのか?, 第 11 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 179-185 (2006)
- (5) 前野隆司, 脳はなぜ「心」を作ったのか, 筑摩書房 (2004)
- (6) <http://www.coesys.keio.ac.jp/>