

生工融合研究としての移動知

浅問 *

* 東京大学 大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1
 * Department of Precision Eng., The University of Tokyo, Hongo 7-3-1,
 Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
 * E-mail: asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード：移動知 (mobiligence), システムバイオメカニクス (system biomechanics), 総合的神経行動学 (synthetic neuroethology), ブレイン・マシン・インテグレーション (brain machine integration), 構成論的アプローチ (constructive approach).
 JL00121C/4912-0811 © 2010 SICE

1. はじめに

文部科学省科学技術研究補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」(略称:移動知)が,平成17年度~21年度に実施された¹⁾。その概要や研究の内容・成果などについては,すでに本誌の特集号で,何回か紹介してきた^{2,3)}。本稿では,特に移動知プログラムにおける生工融合の意義,考え方,構成論的アプローチなどについて述べるとともに,生工融合をどのように実施したか,そのポイントは何か,などの経験を述べる。また,移動知プログラムで得られた生工融合の具体的な方法論について紹介する。

2. 移動知研究

人間,動物,昆虫などは,さまざまな環境において適応的に行動することができる。このような適応行動能力は,これらの生物が生存する上で,最も基本的で必須な知的機能である。この適応的行動能力は,脳や身体の損傷によって損なわれることが知られている。パーキンソン病は,典型的な適応的運動機能障害の例であるし,自閉症や統合失調症なども社会的な適応機能障害であると考えられる。しかしながら,このような適応行動がどのようなメカニズムで発現するかはほとんど明らかになっていない。移動知研究では,まさにこのような生物の適応的行動がどのようなメカニズムで発現するのかを解明することを目的としている。

この研究では,生物が能動的に動くことで生じる,「脳」と「身体」と「環境」の動的な相互作用によって適応的に行動する知が発現するという作業仮説に基づいており,この考え方を「移動知」(Mobiligence)と呼んでいる。従来ロボティクスでは,認知主体はまず知覚を行い,環境を認識し,それに基づき行動を計画し,実行(移動・運動)すると考えるのに対し,移動知では,まず認知主体が能動的に動くことが重要であり,それによって環境との関係に関する豊富な情報を認知するとともに,それに基づいて,実時間で適応的な行動を生成すると捉える。

移動知研究では,さまざまな生物の個々の具体的な適応行動を対象として,環境の変化を認知し情報を生成するメカニズム(環境適応),環境に対して身体を適応させ制御す

るメカニズム(身体適応),他者ならびにその集合体としての社会に適応させるメカニズム(社会適応)の解明に関する研究を行うとともに,それらの背後にある,移動知生成の力学的共通原理の解明に向けた研究を行った。

3. 生工融合による構成論的アプローチ

では,移動知の解明という問題に対し,どのような研究アプローチで臨むべきなのか。

従来の脳科学,神経生理学,行動学,認知科学などの生物学研究・医学研究では,おもに分析的アプローチが用いられる。動物を用いた実験はその典型的な例である。しかし,動物実験では,動物を固定したり,その一部を摘出して実験が行われることが多く,その場合,得られる情報は,動物が静止した状態での脳単体の機能に限定される。すなわち,このようなアプローチによって,移動知研究で注目している,動いている状態での身体・脳・環境の相互作用を把握するには限界がある。そこで移動知研究では,神経生理学,生態学などの生物学の方法論と,システム工学,ロボティクスなどの工学の方法論を融合させ,動的な生体システムモデルを構成するという,構成論的・システム論的アプローチを取ることとした。

具体的には,これまでの脳科学,神経生理学,行動学,認知科学などの生物学研究・医学研究によって,さまざまな知見や仮説が得られているが,これに基づき,ロボティクスやシステム工学のダイナミカルシステムのモデリング技術やメカトロニクス技術を適用し,対象となる生体システムをモデル化し,シミュレータや実ロボット上に,あるいは生体要素と機械要素を組み合わせたハイブリッドシステムとして構築する。そして,このシステムをパラメータを変化させながら動作させ,実際に適応的運動や行動を構成できるかを確認することによって,それが生成されるメカニズムを理解するというアプローチをとることとした。これを生工融合による構成論的アプローチと呼ぶ。生工融合による構成論的アプローチの概念を図1に示す。

従来,サイエンスでは,過去の実験等で得られたデータから,仮説を生成し,その仮説に基づきさらに新たな実験系を構築し,実験を行い,仮説が成り立つかどうかを検証しつつ,また新たなデータを得る,という過程を繰り返す。

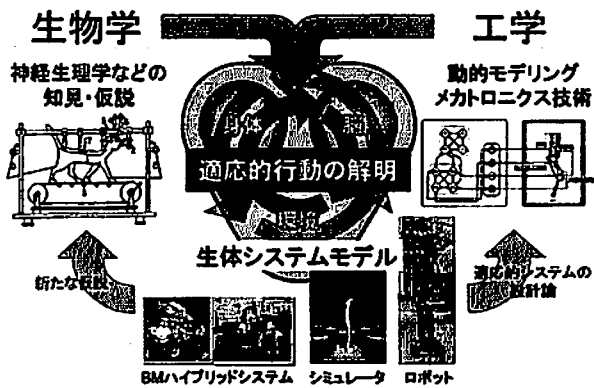


図1 構成論的アプローチの概念

それに対し、構成論的アプローチを導入し、シミュレータやロボット上で動作実験を行う際に、パラメータを変化させたり、多様な条件で実験を行うことで、仮説の検証や新たな仮説の導出を効率的に行うことが可能となる。

さらに、これによって得られた知見を、工学研究に対し、適応的に動作可能なロボットなどの人工物を設計するための新たな方法論としてフィードバックできることも重要なポイントである。

4. 生工融合のポイント

生工連携と言っても、それは容易なことではない。複数の学問領域の統合がいかに困難であるかについては、すでに指摘されている⁹⁾。では、そもそもなぜ生工連携は難しいのか、移動知において生工連携がなぜうまく機能したのか、そこで発生した問題をどのように克服したのか、などについて、これまでの過程を振り返りながら、そこで得られた経験を述べたい。

4.1 動機づけ

生物学研究の目的は、生命システムの構造や機能を明らかにすることであるが、従来の生物学の方法論や体系だけでは限界がある。工学と連携し、先端技術を導入し、構成論的アプローチを取ることで、仮説の検証・生成などを効率的に行うことが可能になり、その解明が進む。一方、工学研究の目的は、求められる機能を実現するための人工物の設計手法の構築であるが、従来の工学の方法論や体系からは、新たな設計手法を導出できない。生物学の最新の知見を参照することで、新しい設計論の展開が期待できる。

生工連携のもっとも大きな意義は、このように、それぞれ単独のディシプリンの中で限界となっていたブレークスルーを、相互に連携させることによって、互いに達成することにある。この生物学と工学が相互の知識や技術を必要とし、また相手に協力することが自らの目的を達成することになる、という構造自体が、生工連携がスムーズかつ積極的に行われた鍵であった。

その結果、生物学と工学でスパイラル上に、頻繁に双方の間を往復(キャッチボール)しながら共同で研究を進めたり、生物学研究者が、工学研究者と一体となって計測手段や装置の開発やモデル化の研究に携わったり、また工学研究者は、生物学研究者と一体となって生物実験なども行うという密な生工連携が行われることとなった。

4.2 価値観の共有

生工融合を具体的に行おうとすると、さまざまな問題が生じるが、それを正確に把握しつつ、1つ1つを解決していくことが重要である。

その1つの問題が、学術的立場、価値観の相違である。これまでも、医工連携など、いわゆる生物系の研究者と工学系の研究者によるプロジェクトを行ったり、研究拠点を設立するケースが多い。ただ、ここで重要なのは、そこには価値観の相違があることを認識することである。医学と工学の連携においても、双方の研究者が幸福になるような状況でないと、医工連携はうまく機能しない。そのためには、双方の価値観を理解・共有し、互いに尊重することが必要である。発注側と受注側というような関係でなく、対等な関係の構築が重要となる。

移動知の場合、生物系の研究者が、個別のメカニズムだけでなく、共通する根本的な性質を明らかにすることが重要であると認識して研究を行ったこと、また工学系の研究者が、生物系のいわゆるサイエンスの研究として、メカニズムの解明を行うことによって、これまで困難であった機能を実現する新しい手法のヒントが得られることを期待して研究を行ったことがポイントであった。

4.3 異分野コミュニケーション

生工連携において、異分野間コミュニケーションが1つの壁となる。移動知では、シンポジウム、ワークショップ、フォーラム、研究会、チュートリアル、セミナー、勉強会、実験実習プログラムなどを通して、数多くの相互の考え方や知識、技術を理解する努力を行った。

相互に理解すべきことは、専門用語だけではない。ベースとなる考え方や一般的な常識が異なっているために、意図が通じないという状況が生じる。専門用語に関しても、移動知若手の会を中心として、用語集の作成を行った。これは、移動知教科書シリーズ第1巻に収録されている⁶⁾。また、一般的に用いられる用語も、分野によってニュアンスがかなり異なるということも実感した。たとえば、「情動(Emotion)」という単語は、ロボット工学では、「心」を表現するような、かなり高い知能というイメージがあるが、脳生理学では、むしろ高次脳機能ではなく、生体システムを安定に保つための基盤的機能として用いられることが多い。

異分野コミュニケーションの問題の解決は、相互のコミュニケーションの機会を増やし、相手の分野の勉強をすることにつきる。

5. 生工融合研究の方法論

移動知研究で、さまざまな生工連携の研究の方法論が生み出された。そのいくつかを紹介する。

5.1 システム・バイオメカニクス (System Biomechanics)

神経生理学などの研究によって得られた生理学的知見に基づき、神経系のモデル化を行うとともに、人類学やロボティクスなどの工学的手法を用い、筋骨格系のモデル化を行い(解剖学やCTなどの計測データに基づく形状・構造のモデル、運動学・動力学モデルなど)、これらを統合したダイナミカル・モデルをシミュレータや実ロボット上に構築する。それらを動作させることにより、そのメカニズムの存在の可能性を生物学に示すとともに、適応性を実現する方法論や設計論を工学に示す。その概念を図2に示す。

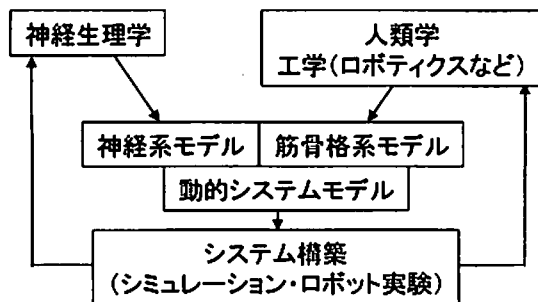


図2 システム・バイオメカニクスの考え方⁶⁾

移動知研究では、身体適応の研究において、本方法論が適用された。適応的歩行に関して、神経生理学研究から得られた歩行に関する脳神経系モデルと、ニホンザルの筋骨格モデルを統合することで、適応的歩行のメカニズムの解明に向けた研究が行われた^{7), 8)}。その結果、能動的運動によって得られた体性感覚、すなわち床からの反力のフィードバックに基づく筋緊張の制御が、姿勢制御に重要であるという知見が得られた。

5.2 総合的神経行動学 (Synthetic Neuroethology)

神経生理学などの研究で得られた、化学反応レベル、細胞レベル、個体レベル、群レベル(個体間の相互作用)などの、さまざまなレベルの断片的知識を、ロボティクスやシステム工学などの工学の手法を用いて統合し、マルチレベルのダイナミカル・モデルをシミュレータや実ロボット上に構築する。それらを動作させるとともに、行動学的にその検証を行うことにより、そのメカニズムの存在の可能性を生物学に示すとともに、適応性を実現する方法論や設計論を工学に示す。その概念を図3に示す。

移動知研究では、社会適応の研究において、本方法論が適用された。オスコオロギの闘争行動に関して、神経生理学研究から、フォロモン刺激による脳内のNO(一酸化窒素)濃度への影響、NO、オクバミン、セロトニンなどの物質と

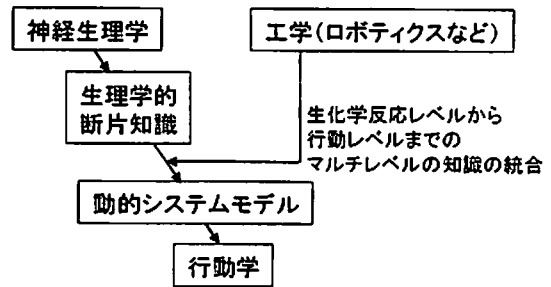


図3 総合的神経行動学の考え方⁹⁾

攻撃性との関係などの知見が得られた。それに基づき、脳内の化学物質生成メカニズムなどを反応拡散方程式によって、また個体間インタラクションを有限オートマトンでモデル化し、シミュレーションを行った結果、能動的行動によって生じたフェロモンによる相互作用と内部状態の更新に基づき、闘争・回避の行動選択が適応的に行われること、密度に応じて社会構造が変化すること、などが明らかになった⁹⁾。

5.3 ブレイン・マシン・インテグレーション (Brain Machine Integration)

生物学で得られる生体要素(脳、感覚器官、臓器、身体など)と、ロボティクス・メカトロニクス技術で得られる機械要素(センサ、アクチュエータ、プロセッサなど)を組み合わせ、それを多様に結合・融合させたブレイン・マシン・ハイブリッドシステム(サイボーグ)を構成することによって、生体要素の機能やメカニズムを明らかにするとともに、適応性を実現する方法論や設計論を工学に示す。その概念を図4に示す。

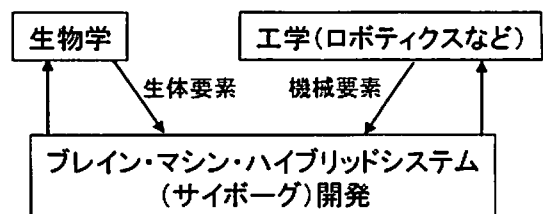


図4 ブレイン・マシン・インテグレーションの考え方¹⁰⁾

移動知研究では、社会適応や身体適応の研究において、本方法論が適用された。たとえば、カイコガの身体動作によって操縦されるカイコガ操縦ロボット、カイコガの脳によって直接操縦されるカイコガ脳操縦ロボットが開発され、オスのカイコガは時定数の異なる多重フィードバックと脳の可塑性によって、適応的 Gain 調整とメスの定位が可能であることが明らかになった¹⁰⁾。

6. おわりに

本稿では、移動知研究の概要や、そこで取られた生工融合による構成的アプローチについて紹介した。また、移動知の生工融合におけるポイントについて述べるとともに、具

体的な生工融合研究の方法論と成果などについて紹介した。

移動知という新しい研究領域を創成できたこと自体、大きな成果であり、用語・考え方・価値観が異なる生物・医学系の研究者と工学系の研究者が、共通の言語で相互に理解しあい、共通の目的の元に、密な連携による共同研究を実施できるようになり、かつ新規な研究成果が得られたことは、きわめて重要な成果である。

移動知研究の成果の詳細については、移動知教科書シリーズ¹⁾をご参照いただきたいが、移動知研究は、さまざまな学術分野への貢献を果たした。生物学・医学分野においては、適応的歩行や社会適応行動をはじめとして、分析的方法論では得られない数多くの重要な知見が得られた。

また、さまざまな生物を対象とした個別の適応的運動・行動のメカニズムの理解に関する研究に加え、受動歩行ロボットや粘菌様ロボットの研究などを通して、ある共通原理が見えてきた。従来は、「制御対象としての身体」と「制御則としての脳」とは、分離して捕らえていた。しかし、実際の生物には、潜在的多義性 (Latent Ambiguity) とも呼ぶべき、あいまいな構造が存在し、それが能動的運動・行動によって生じた身体・脳・環境の相互作用によって、実時間で動的かつ自己言及的に決定されていく機構 (制御対象と制御則を分離できない機構) が存在することが明らかになった。このメカニズムは、生物に埋め込まれたものであり、それを決定する制御を陰的制御則、またそのメカニズムをバランスの力学と呼ぶこととした。これらは、適応性を実現する上での新たな設計原理を示唆するものであり、工学分野での貢献である。

移動知は、その他の分野に対しても多大な貢献を果たした。人類学に対しては、歩行と脳の機能獲得の重要な示唆を与えることができたし、また、認知科学に対しては、ダイナミクスを導入し、数理的モデル化に関する知見を与えることができた。

移動知研究では、生存脳機能において、情動や、神経回路をつかさどる神経伝達物質や神経修飾物質、能動的運動・行動による体性感覚フィードバックが重要であることなどが示唆されたが、今後このような示唆に基づき、移動知の後継プロジェクトを立ち上げるなどして、研究領域をさらに発展・拡充するとともに、生工融合研究を進化させ、加速していきたいと考えている。

最後に、本特定領域の成功は、貴重なコメントいただいた評価委員 Prof. Sten Grillner (Korolinska Inst.), Prof. Avis H. Cohen (Univ. Maryland), Prof. Rolf Pfeifer (Univ. of Zurich), 森 茂美先生 (生理学研), 鈴木良次先生

(金沢工大), 北村新三先生 (神戸大), 領域の運営に献身的に携わっていただいた領域幹事の太田 順先生をはじめとする総括班の先生方, 素晴らしい研究を推進した研究者の先生方, すべての賜物である。この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

(2010年9月13日受付)

参考文献

- 1) 文部科学省科学研究費補助金 (特定領域研究) 「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」平成 17~21 年度研究成果報告書 (2010)
- 2) 計測と制御「特集：移動知：能動的な移動機能をもたらす創発的知能」, 計測自動制御学会, 44-9 (2005)
- 3) 計測と制御「特集：生物の社会適応機能の解明とその工学的応用」, 計測自動制御学会, 46-12 (2007)
- 4) 計測と制御「特集：身体・脳・環境の相互作用による適応的ロコモーション機能」, 計測自動制御学会, 48-9 (2009)
- 5) 吉川弘之, 内藤耕: 「産業科学技術」の哲学, 東京大学出版会 (2005)
- 6) 浅間一, ほか (編著): 移動知—適応行動生成のメカニズム (移動知シリーズ第 1 巻), オーム社 (2010)
- 7) K. Takakusaki, N. Tomita and M. Yano: Substrates for normal gait and pathophysiology of gait disturbances with respect to the basal ganglia dysfunction, *Journal of Neurology*, 255, Suppl 4, 19/29 (2008)
- 8) N. Ogihara, H. Makishima, S. Aoi, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya and M. Nakatsukasa: Development of an Anatomically Based Whole-Body Musculoskeletal Model of the Japanese Macaque (*Macaca fuscata*), *American Journal of Physical Anthropology*, 139, 323/338 (2009)
- 9) 藤井喬, 川端邦明, 背沼仁志, 鈴木剛, 足利昌俊, 太田順, 浅間一: クロコオロギの行動選択機構のモデリングに関する研究 (喧嘩行動実験による神経機構モデルの考察), 第 14 回ロボティクスシンポジウム, 35/41 (2009)
- 10) 高嶋淳, 峯岸諒, 倉林大輔, 神崎亮平: 身体・脳環境の相互作用に能動的に介入する脳-機械融合系の構築, *日本ロボット学会誌*, 28-4, 445/454 (2010)
- 11) 浅間一, ほか (編著): シリーズ移動知, オーム社 (2010)

[著者紹介]

淺 間 一 君 (正会員)



工学博士 (東京大学)。

1984 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。86 年理化学研究所化学工学研究室研究員補, 同副主任研究員を経て, 2002 年東京大学人工物工学研究センター教授, 09 年同大学大学院工学系研究科教授。IEEE Robotics and Automation Society AdCom member, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門部門長など歴任。日本機械学会フェロー, 日本ロボット学会フェロー。

VOL.49 2010

計測と制御 12

特集 生体計測技術が拓く異分野融合研究

●総論

特集に向けて

●解説

生工融合研究としての移動知

工学的手法を応用した人類進化研究の新展開

身体活動時系列にみる動物行動の組織化とその生成機序

生体信号を用いた認知過程の解析

脳卒中リハビリテーションと脳機能計測インタフェース

機能的近赤外分光法 (fNIRS) の新技術

近赤外分光法 (NIRS) による共生情報システムの評価とデザイン

●リレー解説

SICE, JIS原案作成に参画

第3回: 粘度関連のJISの見直し (JIS改正原案作成委員会WG2の報告)

第4回: 密度・比重関連のJISの見直し (JIS改正原案作成委員会WG3の報告)

●部門だより

第39回制御理論シンポジウム

●製品紹介

産業用サーバ FS10000S model 2000/株式会社 東芝



ニホンザルの筋骨格モデル

THE SOCIETY OF
INSTRUMENT AND
CONTROL ENGINEERS

公益社団法人計測自動制御学会 SICE

URL : <http://www.sice.or.jp/>

