

2.2.2 生物規範型ロボティクス

（1）研究開発領域の定義

生物は、進化という壮大な試行錯誤の過程を通して、優れた機能や能力、構造を獲得してきた。生物規範型ロボティクス（Bio-inspired Robotics）は、生物に内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、発現する性能の向上を図ることを指向する研究開発領域である。広義には、バイオミメティクス（生物模倣）と捉えることができる。

（2）キーワード

バイオミメティクス、バイオ・インスパイアード・ロボティクス、ロボティクス・インスパイアード・バイオロジー、モーフォロジカル・コンピューテーション、バイオハイブリッド、バイオメディカル、機構系の賢さ

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

本領域はロボットの設計・開発に革新的なブレークスルーをもたらす原動力・先導的役割を担う意義を持つ。強力な計算パワーに依拠してサーボモーターを高速かつ高精度で動かすことを基盤とした現在のロボットは、生物とは異質の方向に進化し続けてきたと言える。現在の制御スキームの成否は、いかに適切な制御指令値を作り出すかに依存するため、制御アルゴリズムは大規模化・複雑化・精緻化の一途をたどる。しかし、近年の計算パワーの飛躍的向上を持ってしても、例えば、DARPA Robotics Challenge（2015）で見られたように、実環境下で優れた性能が達成できないでいる。

一方で、生物は、高度な中枢神経系を持たない種であっても、オープンで不確定な実世界環境下で、驚くほどしなやかかつタフな振る舞いを見せる。有限な計算資源しか持たない生物は非構造環境下であっても即時適応的に振る舞う。しかし、このような振る舞いの発現メカニズムの本質は依然として解明されていない。生物規範型ロボティクスの意義は、生物の皮相的な模倣から、生物特有の振る舞いの発現メカニズムの本質の追究へと変化している。生物規範型ロボットの構築は、単に構築するだけでなく、理解を伴った上で構築することが求められている。

〔研究開発の動向〕

生物は、種の数も膨大なだけでなく、一個体を取り上げてもさまざまな興味深い構造や機能を内包している。生物規範型ロボットに関係する研究トピックも必然的に多岐にわたるが、ここでは、センサー、アクチュエーター、形態、機構、制御という切り口から本領域の研究開発の動向を述べる。

センサー

昆虫の複眼に着想を得た視覚センサー¹⁾、多数の圧力センサーを実装したロボットハンドなど、生物に着想を得たさまざまなセンサーシステムの研究開発が行われてきた。以下、代表的な研究アプローチを三つ採り上げる。

第一は、感覚モダリティーの種類と感覚器（センサー）の数に着目したアプローチである。生物には、多種多様な感覚モダリティーに対応したセンサーがあり、なおかつ膨大な規模で全身に遍在している。今後は、異なる感覚モダリティーのセンサー情報を活用することが、既存のロボットでは実現し得ない適応的運動機能の生成を試みる研究開発において重要となる。ソフトロボティクス分野においては、フレキシブルな基板上に多数のセンサーを実装する技術の開発などが精力的に行われており²⁾、新しい流れを創り出すことが期待される。

第二は、生物の感覚器官そのものを活用して、工学的には達成し得ない高精度なセンサーを構築する、ハ

イブリッド的なアプローチである。これに関して特筆すべき事例としてカイコガの触覚をロボットに実装する研究が挙げられる。カイコガの触覚はフェロモン分子にも敏感に反応するという事実に着目して、ガス漏れや麻薬の検知などへの応用も試みられており³⁾、今後の発展が注目される。

第三は、生物の感覚情報処理の原理の解明を目指した研究である。一例としてコオロギの尾に存在する多数の微小毛が担う感覚情報処理に着目した研究が挙げられる⁴⁾。また、ゴキブリは、人間がわずかに近づいただけでも、それを敏感に察知して逃げてしまう。このような優れた探知能力はこれらの微小毛の基部に存在する感覚器によるものである。この研究では、複数の感覚器の情報を集めて確率共鳴に基づく情報処理を行うことで、個々の感覚器のS/N比の問題を克服して検知精度を著しく高められることが明らかになった。生物学と情報処理理論の融合を通して、生物に内在するメカニズムを明らかにした優れた研究と言える。

アクチュエーター

筋肉はモーターに比べて驚異的な柔軟性とパワーウェイトレシオを持つ。筋肉の優れた機能の工学的実現を目指して、さまざまなタイプのアクチュエーターの開発が試みられてきた。広く使われつつあるのが、マッキベン型アクチュエーターに代表される空気アクチュエーター (PMA: Pneumatic Muscle Actuator)⁵⁾ と呼ばれるアクチュエーターであり、筋肉同様に大きな力を発生することができる。最近では、細径の空気圧アクチュエーターを束ねた新しいタイプのPMAの開発が進められており、アクチュエーターを配置する自由度がさらに向上しつつある⁶⁾。このような研究を通して、生物のごとく全身にアクチュエーターを張り巡らせることを可能とする技術の創成が期待される。

一方で、PMAの動特性には遅延時間や強い非線形性があり、制御はモーターほど容易ではない。このような問題の軽減化を目指して、化学反応を活用したアクチュエーターや⁷⁾、生物の筋肉そのものを活用してウェットなアクチュエーターを創るという試みもなされている^{8), 9)}。特に後者は、生物由来の材料ゆえに自己修復機能をも自然に併せ持つことが期待できる。このような新しい試みを通して、生物に比肩し得る軽量かつフレキシブルなアクチュエーターの早期の実現が待たれる。

形態

車輪型のロボットを除けば、多くのロボットは何らかのかたちで生物の身体構造やロコモーション様式から着想を得たデザインが施されていると言える。ここでは特に動物の指や羽、ヒレに着目した生物規範型ロボットを三つ採り上げる。

ヤモリが、垂直な壁を苦もなく移動できるのは指に生えた微小な毛が壁面と分子間力で結合できるためである。この生物学的知見に着想を得た壁面移動ロボットが開発されている¹⁰⁾。生物の身体に潜む構造を模倣することによって、壁面移動ロボットの新たなソリューションを示した意味で特筆すべき優れた研究である。

飛行ロボットは小型化に伴い、プロペラ等の推進器を使うのが困難となる。限界を打破するために、昆虫や小型の鳥のような羽ばたきロボットの研究が進んでいる^{11), 12)}。小型飛行ロボット実現への新しいアプローチとして注目を集めている。

ヒレや身体の屈曲を活用した水中ロボットの開発も行われている¹³⁾。広く用いられているスクリューと違い、水底の砂を巻き上げないといった利点があるため、探査等に活用できると期待されている。

今後も、生物の身体構造や動きに着想を得ることで、既存のロボットが抱える問題を克服できる新しいタイプのロボットの開発が待たれる。

機構

機構系に工夫を施すことで、いわば賢い機構系を構成してロボットに優れた運動機能を発現させようとする試みについて紹介する。端的な事例は、歩行という高度な運動機能が機構系のみから生み出されることを示した受動歩行機械である¹⁴⁾。受動歩行機械は、力ずくの制御に偏重していたロボティクスにおいて振る舞い

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

生成における機構系の役割について再考を迫るきっかけとなった。高速走行を可能とする受動走行機械も報告されており、注目に値する成果である¹⁵⁾。

受動歩行機械の振る舞いには、関節の受動性が重要な役割を果たしている。機構系に何らかのかたちでソフトネス・柔軟性を持たせることから興味深い振る舞いを生み出している事例として、脚に柔らかさを持たせることで優れた環境踏破性を実現したRHex¹⁶⁾やSprawlita¹⁷⁾、i-Centipod¹⁸⁾なども特筆すべきである。

動物の解剖学的特徴を機構系の設計に反映させることで、優れた運動能力を生み出そうとする試みも報告されている。前述の空気圧アクチュエーターは、その柔軟性を活用して二関節筋のように関節をまたいで配置することが可能である。これを活用して優れた運動能力を生み出す脚式ロボットが報告されている^{19), 20)}。

制御

ここでは、特にロボットの移動（ロコモーション）のための制御を採り上げる。生物規範型ロボットにおけるロコモーション制御は以下の二つに大別できる。

第一は、機構系には生物から着想を得た工夫が施されてはいるものの、制御系には生物に範を置く方策が特に用いられていないアプローチである。具体的には、機構系に柔らかさを持たせることで、フィードフォワード制御といった、いわば「決め打ち」の簡便な制御方策であっても優れた環境適応性が生み出されることを示した研究が多数報告されている。生物規範型ロボットと深く関係するソフトロボティクスの分野において、大部分の研究がロボットの適応能力を機構系の賢さにほぼ全面的に委ねており、制御方策は簡便なものにとどまっているというのが現状である。既存研究のほとんどはこのアプローチに基づいている。

第二は、生物規範型の制御方策を積極的に取り入れるアプローチである。リズムミクなロコモーションを生み出すことを担っているCPG（Central Pattern Generator）と呼ばれる神経回路に着想を得て、結合振動子系などをベースとした自律分散的な制御方策を採用した研究などはこのアプローチの代表的な事例である^{21), 22)}。制御指令値に従ってアクチュエーターを中央集権的に制御するという、これまでのロボット制御のアルゴリズムとは一線を画したアプローチである。今のところ、制御系の素過程が結合振動子系にほぼ限られている。ここには重大な理由と課題が山積しているため、「（5）科学技術的課題」のところで詳述する。以上のように、生物規範型の制御方策は依然として未成熟の段階にあり、その理論体系の構築は喫緊の課題であると言える。

[論文や特許の動向]

論文に関しては、領域全体の論文数は300件（2012年）から1,000件（2021年）に単調増加している。国別推移は、2021年は1位中国、2位米国、日本は3位グループに位置する。Top1%、Top10%の論文も同様である。論文上位機関には、シンガポール、米、仏が上位に、次いで中英、日本は16位に東大が入る。

特許に関しては、特許ファミリー件数は、2013年時点で韓国、中国、米国の順だったが、中国が60%に至るまでシェアを拡大し単独トップになっている。日本は徐々にシェアを伸ばし、米韓日の2位グループに入った。Patent Asset Indexシェアはトップだった米国と2位の中国の順位が入れ替わり、日本、韓国と続く。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

ソフトロボティクス

ソフトロボティクスは、新興学問領域であり、柔らかな身体がもたらす知的能力に焦点を当てた研究が大きな流れを形成しつつある。前述のように、さまざまな新しい要素技術に関する研究が進行中である。本領域とも密接に関係している。しかしながら、大部分の研究は生物の構造模倣（ハードウェア技術）に関するものであり、生物が示す優れた能力の発現機序の理解を試みる研究は極めて少数にとどまっている。このような中で、morphological computationや陰的制御（implicit control）、手応え制御（tegotaе-based

control) といった、生物規範型ロボットの制御と深く関係する新しい概念が提唱されていることは注目に値する。今後は、概念レベルにとどまった議論に終始するのではなく、数理言語化を通して生物規範型ロボットならではの制御原理の理論的基盤を構築していくことが期待される。(詳細は、研究開発の俯瞰報告書2021年版2.2.1 ソフトロボティクスを参照)。

バイオハイブリッド・ロボティクス

バイオハイブリッド・ロボティクスは、生体もしくは生体材料からできた部品と人工物からできた部品を組み合わせて、生体特有の運動や感覚といった機能をアクチュエーターやセンサーとして利用するためのシステムに関する研究領域である。バイオハイブリッド・ロボティクスには、生体そのものを利用する研究と、生体の一部を部品として利用する研究に大別される。生体そのものを利用する研究は、DARPAのHI-MEMS (Hybrid Insect Micro-Electro-Mechanical Systems, 2006) が有名である。甲虫に移植した小型のマシン (MEMS) でインターフェースを構築し、電気パルスを与えることでその行動を制御する。研究成果をミシガン大学やジョージア工科大学が実証報告した²³⁾。一方で、生体の一部をアクチュエーターとして利用する研究は、1995年に東大の竹内らがハイブリッド昆虫ロボットとして公開した²⁴⁾。2000年代に筋肉そのものを使う研究が始まり、日本では昆虫細胞でマイクログリッパーを実現する研究²⁵⁾や、マウスの心筋を使って動くエイ型の遊泳ロボットも出た。また、生体をセンサーとして利用する研究として、細胞を使ったタンパク質センサーがある。細胞の膜タンパク質が外側にあるタンパク質に反応して、極微弱なイオン電流を1秒間あたり1000万倍に増幅する。これを利用して、肝臓のがんマーカーを呼気から検出することに成功した²⁶⁾。生物は化学反応のかたまりなので、生物学的なリアクションをリアクターとして利用する細胞を使った治療が注目されている。リアクターは生体外でも同じ反応を起こすことができれば創薬にも利用が可能になる。現状は小さいチップしかできないためスケールアップが必要だが、細胞そのものを工業的に生産 (増殖) できれば、将来的に培養肉としての用途も広がる。さらに、細胞を使ったプロセッサによる計算機も考えられる。神経工学界では以前から、神経細胞の出力をリザバーに入力して処理する、神経細胞由来の脳型コンピューターの研究が始まっている²⁷⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム

生体が持つ精妙かつ優れた機能の解明を中心とする基礎研究を国際的に協働して推進することを目的として設立されたヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム (HFSP) 機構 (本部：フランス・ストラスブール) がサポートする国際共同プロジェクトは、生物系の研究分野においては世界的に広く知られている。2017年に採択された国際共同プロジェクトのうち、生物規範型ロボティクスに深く関係する国際共同プロジェクトが2件採択された。一つは、サンショウウオのように水陸両用のロコモーションを示す動物種から適応的運動機能の解明を試みる研究、もう一つはフンコロガシが示す多様かつ適応的な振る舞いの発現機序の解明を目指す研究である。これらはともに、生物学とロボティクスの両者に資する研究プロジェクトである。生物学の基礎研究サポートをするHFSPがロボティクスに関係する研究テーマを選んだことは、ロボティクスと生物学の新しいありようと言える。

NSF Engineered Living Systems

米国ではNSFが、研究・イノベーションの新興フロンティア (EFRI) プログラムにおいて、バイオインスパイアードおよびバイオエンジニアリングシステムに関する学際的基礎研究の支援を開始した²⁸⁾。二つのテーマがあり、Brain-Inspired Dynamics for Engineering Energy-Efficient Circuits and Artificial Intelligenceは、ニューロモルフィックデバイスなど、生物学的知性の柔軟性、堅牢性、効率性を模倣し、情報処理のエネルギーコストを低減させる、脳に着想を得た工学的学習システムの研究である。また、

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

Engineered Living Systemsは、安全性と持続可能性を高める生体システムおよび技術における細胞、植物、その他の生物のバイオエンジニアリングにより、自己複製、自己制御、自己治癒、環境応答性など、バイオハイブリッド・ロボティクスの新しい可能性を追求する。

(5) 科学技術的課題

センサー、アクチュエーター、形態（マテリアルも含む）、機構、制御という観点から生物規範型ロボティクスが抱える科学技術的課題について述べる。

センサー

生物のもつ膨大かつ異なる感覚モダリティーのセンサー情報を活用することで、既存のロボットでは実現し得ない適応的運動機能の生成を試みる研究開発が重要である。量的な変化と、そこから質的な変化を生み出すセンサー技術の創成が喫緊の課題であり、そのためのハードウェア的・ソフトウェア的な課題として、以下のトピックが重要となる。

- 1) 超多数のセンサーを高密度かつ分散して実装する技術
- 2) 異なる感覚モダリティーのセンサー情報を縮約・統合化する情報処理技術ならびに、それを活用し得る制御スキーム
- 3) 柔らかな身体の状態を検知するセンサー技術とそれらの情報を活用するための新規な知覚情報処理スキーム

上記3) に関して補足する。生物と同様の柔軟性を身体に持たせると、今後のロボットは連続体的な特性を持つように変容していこう。これに伴って、物理量がベクトルからテンソル場へと変化することを反映し得るセンサーの構築技術や、感覚情報処理の在り方を考察していく必要がある。

併せて、これらの膨大なセンサー出力を最大限に活用し得る、センサーリッチなフィードバック制御の理論体系の創成も重要な課題である。

アクチュエーター

生物が示すしなやかな動きの源の一つは、筋肉という柔軟かつ軽量のアクチュエーターが多数身体内に張り巡らされていることに起因している。ミミズの体表からは、推進のために剛毛と呼ばれる硬い毛針のようなものが飛び出すことが知られているが、1本の剛毛の根元には10本以上の筋肉が付いていると言われている。このことからわかるように、生物規範型ロボットの究極の姿は、多数の軽量かつ柔軟で、生物に比肩し得るパワーウェイトレシオを持つアクチュエーターが物理的に離れた身体部位間をも結び付けつつ、全身にくまなく張り巡らされたものである。

このようなことを可能とする、新規な原理に基づくアクチュエーターの開発が強く望まれる。電磁力や形状記憶合金をベースとしたアクチュエーター、PMA以外にも、化学反応や生体由来の材料を用いたアプローチは、ブレークスルーを生み出すことが期待される。さらに、身体中に大量のアクチュエーターを配置できることを可能とする技術の創成も待たれる。

形態（マテリアルも含む）

前述のように、ヤモリの指に見いだされた構造を模倣することで垂直な壁面を自在に動き回るロボットや、羽ばたき機構を模擬することにより小型の飛翔ロボットが構築できたことなどは、生物規範型のアプローチによって新しいソリューションを提供し得ることを示す好事例である。個々の生物種が示す優れた能力の背後には、進化過程を経て獲得してきた、まだわれわれが知り得ぬ構造的な工夫が数多く伏在しているはずである。このことを改めて深く考えさせられる興味深い研究成果が最近発表された。それは、驚異的な跳躍能力を示

すノミのような小型節足動物の脚の基部に「歯車」状の構造が見つかったというものである²⁹⁾。すなわち、歯車はわれわれ人類が発明するずっと以前から生物が使っていた訳である。これ以外にも、シャコが示す超高速のパンチ³⁰⁾ やアギトアリというアリの一種が示す超高速のアゴの動き³¹⁾ (これは動物界最速の動きと言われている) などの背後にある構造的な工夫を解明した研究も、今後ロボティクスへの応用が期待される興味深い事例である。生物学者と協働しながらこのような事例やそこに内在する工夫を掘り出していく息の長い試みが今後ますます重要となってくるだろう。その分、波及効果は極めて大きいはずである。

その他の課題として、生物的な特性を持つマテリアルの開発が挙げられる。筋肉のようなアクチュエーターに関係するマテリアル以外にも、例えば、

- 1) 粘弾性をリアルタイムで改変できるマテリアル
- 2) 自己修復能力や成長機能を有するマテリアル
- 3) 伸縮に富みつつも靱性に富むマテリアル

などが開発されれば、ロボティクスの分野に大きなインパクトをもたらすと期待される。

機構

現在の制御理論は、制御器と制御対象を分離することで構築された理論体系を基盤としている。制御対象である機構系は制御器によって制御される対象に過ぎず、振る舞いを生み出す主体はあくまでも制御器である。一方で生物は、制御対象である機構系（筋骨格系）も制御器（脳・神経系）と同様に振る舞い生成の一翼を担っており、制御器と制御対象が混然一体となったシステムとなっている。これによって生物は、限られた計算資源にもかかわらず、実世界環境下で驚くほど適応的な運動能力を示すことができるのである。振る舞い生成の一翼を担わせることが可能な機構系の賢さについての深い理解が望まれる。さらに、制御系と機構系の有機的な連関を初動段階から考えていくことも必要であろう。

制御

ここには重大な問題と課題が山積しているため、詳しく述べる。認識すべきことは、生物に範を置いた制御方策の理論的基盤はいまだ脆弱であるという事実である。そもそもなぜこのような状況に至ったのか、その理由を分析すると以下ようになる。

現在のロボット制御は、環境や身体特性の徹底した既知化に基づいた、いわば「閉じたシステム」に立脚した制御理論体系を基盤としている。ロボットが工場などの構造環境下から生活環境のような非構造環境下へと稼働の場を拡大するにつれ、環境を認識するためのアルゴリズムが肥大化し、必然的に制御アルゴリズムはますます大規模化・複雑化・精緻化の一途をたどっている。工学者は、このような「閉じたシステム」に立脚する制御理論体系ではオープンで常に不確定性や曖昧性を内包する非構造環境に対峙する際には問題が生じることは十分に理解してはいる。しかしながら、代替となる理論的基盤が不在であり、なおかつ強力な計算パワーに頼ることができることも相まって、この思考の枠からなかなか抜け出せないでいる。

生物は限られた計算資源にもかかわらず、驚くほど多様かつ適応的な振る舞いを示す。これは、生物の制御系（脳・神経系）には、機構系（身体系）に実装され、そして環境に置かれて初めて意味のある振る舞いを生み出すような制御則が脳・神経系にコード化されているからである。すなわち、生物の制御系は「開いたシステム」を基盤としており、現在のロボットの「閉じたシステム」とは根本的に異なっている。これが生物規範型の制御系を考察する際に遭遇する大きな壁となっている。この点をもう少し敷衍したい。後の説明の便宜上、陽的制御（explicit control）と陰的制御（implicit control）という概念を紹介する³²⁾。陽的制御とは、制御系に明示的に（プログラムとして）記述されている制御則のことである。一方、陰的制御とは、身体と環境の相互作用の中に隠伏的に埋め込まれている制御則のことであり、morphological computationやphysical computation、non-neural computation、unconventional computationなどと呼ばれることもある。受動歩行機械は陰的制御則のみで動いているロボットと考えることができる。こ

れまでのロボットの制御系の設計は、基本的に陽的制御則の設計に集約されており、問題の所在が明確であるという利点があった。一方、生物規範型の制御を考える際には、陰的制御の存在を前提として陽的制御のアルゴリズムを考えなければならない。しかしながら、これを実行するための理論的基盤が全くない。

生物規範型の制御の典型例が、生物口コモーションをつかさどるCPG (Central Pattern Generator、中央パターン発生器) と呼ばれる神経回路に着想を得た自律分散的な制御であろう。現在広く行われているロボット制御のように、制御指令値を明示的に作り出す必要がなく、制御系と機構系そして環境との相互作用の中から振る舞いを生み出すことができるという優れた特長を有している。しかし、素過程として用いられる数学的ツールが結合振動子系にほぼ限られているのが問題である。さらに、センサー情報をどのようにフィードバックするかについては依然として設計論が不在であり、アドホックに設計されているのが現状である。これも生物規範型制御が実用化につながることを阻んでいる大きな障壁の一つとなっている。

生物規範型の制御は自律分散制御と密接に関係している。しかし、自律的な個体の振る舞いと自律個集団の振る舞いを結び付けるロジックが依然として存在していない。この理論的基盤の脆弱性が生物規範型制御の理解と構築の大きな障害となっている。

以上を踏まえ、制御に関する今後の科学技術的課題を以下に挙げる

- 1) 環境の複雑化に呼応して制御系の設計がますます複雑化するという、現在のロボティクスが抱える呪縛から逃れるブレークスルーを与えることが、生物規範型制御に期待されている。このためには原点に立ち返った研究が必要である。すなわち、有限なリソースで全身に遍在する膨大な運動自由度を実時間で巧みに操りながら、無限の変化の様相を示す実世界環境と合理的に折り合いをつけるという、進化過程の初期に生物が獲得したもっとも根源的な知の基盤の本質を丁寧に解き明かす必要がある。このためには、動物を動物たらしめる適応的運動機能の生成原理とは何かを徹底的に問いかける理学的な視座が不可欠となる。このような研究は必然的に長期にわたる試みとなるが、ここから生み出されるロボティクスへの波及効果は非常に大きいと期待される。
- 2) 生物は膨大な運動自由度を巧みに操りながら、リアルタイムで環境と折り合いをつけつつ適応的に振る舞っている。大自由度制御とリアルタイム性という背反する要請を同時に満足するためには、自己組織化理論 (理学) と制御理論 (工学) が有機的に融合した新規な理論体系の構築が喫緊の課題である。このような理論基盤が構築できた暁には、オープンで曖昧性や不確定性を内包する実世界環境下で、全身に遍在する運動自由度をリアルタイムで統御することも可能となるだろう。
- 3) 中央集権的な制御と自律分散制御が有機的に連関した新規な制御理論の構築が必要である。高次脳機能に基づく制御 (central control) と局所センサー情報に基づく自律分散的な制御 (peripheral control) が調和的にカップリングすることで、大自由度システムを合目的かつ即時適応的に制御することも可能となるだろう。その理論的基盤の構築は喫緊の課題である。

現在の生物規範型制御の多くは結合振動子系を基盤とした、いわゆるCPG制御である。しかしながら、どのような感覚モダリティーに関する情報をどのようにフィードバックするかに関しての設計論が不在である。この現状を打破するためのシステムテックな設計論の構築や、結合振動子系以外の基盤となる制御系の数理モデルに関してもブレークスルーが強く求められている。実際、生物は、周期的な運動のみならず非周期的な運動をも発現することが可能である。振る舞いの多様性は現在のロボットから欠落している。この問題を解決可能な理論的基盤も必要である。

4) 生物規範型制御の理解と発展に向けては、陽的制御と陰的制御の間で有機的なカップリングを形成する必要がある。生物における制御には、身体と環境とセットになって初めて意味を持つことがコード化されている。陽的制御だけを考えればよかったこれまでのロボティクスに対して、このような制御のあり方に関して理解と数理言語的に説明可能な理論の創成が喫緊の課題である。

(6) その他の課題

生物規範型制御として現在広く使われている、結合振動子系を基盤としたCPG制御は、多賀らによって提唱された³³⁾。このような革新的なアイデアが工学系ではなく、理学系の研究者（当時、多賀氏は薬学部に所属）から出されたことは示唆的である。工学を中心に研究してしまうと、構築・実現を最優先され、生物の皮相的な模倣に陥りがちである。生物に内在する、まだわれわれが知り得ぬ発現メカニズムの本質を明らかにして理解の階梯を一段一段と上がっていくためには、理学的志向を持つ生物学や数理科学の研究者らとの長期に渡る有機的な協働が必須であろう。

ここで、生物学だけでなく、数理科学の研究者についても言及したのは理由がある。生物規範型ロボットの分野においては、生物学とロボティクスの研究者の、いわゆる生工連携が必要であることはいうまでもない。しかしながら、生物学とロボティクスの研究者を単に寄せ集めても、両者の間で着目している対象や言語に関して往々にして齟齬が生じるだけである。触媒が必要なのである。それが数理科学の研究者である。ものごとの本質を抽出するためには数理モデリング（数理科学区分2.7.1「数理モデリング」参照）が必要である。具象と抽象をつなぐことに長けている数理科学者は、生物規範型ロボティクスにおいては特に重要である。

以上を踏まえて課題を2点述べる。

第一は、将来の応用研究・開発そして事業化への道を切り拓くために、また、わが国がロボティクスの分野において強力なイニシアチブを発揮していくためには、生物学や数理科学の研究者らとの有機的な協働を行う基礎研究への手厚く息の長いサポートが必要である。具体的には、ロボティクスと生物学、そして数理科学が三位一体となった研究プロジェクトへの積極的な支援が重要である。JST CRESTの数学領域では、数学と生物学、ロボティクスが三位一体となったプロジェクトが採択された実績がある。このようなプロジェクトからは複眼的視座を持つ有能な若手研究者の育成が期待できる。

第二は、生物規範型ロボットに関する、ロボティクスと生物学の学際的な連携である。生物規範型ロボット（bio-inspired robotics）が指すのは、生物が進化過程という壮大な試行錯誤の場を通して獲得した人知を超える工夫をロボティクスに生かすという考えである。一方で、ロボットをツールとして使うことで、生物学に対して資する成果を積極的に生み出していくというアプローチも考えられる。これは、robotics-inspired biology^{34), 35)}という呼称が与えられており、近年活発化している研究領域である。このアプローチでは、生物の身体機構や神経回路を模したロボットを創り、実際に生物と同様の環境で動かす実験を行うことで、従来の生物学的手法のみでは検証困難であった動力学特性等を実世界でシミュレートし計測することが可能となり、生物の振る舞いに対する理解が深まる。最近では、このようなアプローチに基づいて絶滅動物の運動様式の復元を試みる興味深い研究が報告されており^{36), 37)}、古生物学も含めて生物学とロボティクスの両者が対等かつ有機的に結び付いた新しい学問領域の創成が大いに期待できる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	科研費新学術領域「ソフトロボット学」の発足に伴い、身体の柔らかさに注目した基礎・応用研究において、生物学者、材料科学との連携が加速するものと期待できる。トレンドとしては上向きの印象を受けるが、諸外国に比べて研究予算の手厚いサポートがさほどないことが懸念事項の一つである。

	応用研究・開発	○	→	ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」に関連して、福島県にロボットテストフィールドが設置されるなど共用研究設備も充実し、災害対応を想定した生物規範型ロボットの研究成果が多く報告されている。一方で、ロボットの事業化に向けた流れは依然として弱い。
米国	基礎研究	◎	↗	国防省などからの潤沢な研究予算配分を背景に、著名な研究室から研究成果が多く報告されている。NSFが、新たな研究領域（Engineered Living Systems）としてバイオインスパイアードおよびバイオエンジニアリングシステムに関する学際的基礎研究の支援を開始した。
	応用研究・開発	◎	↗	生物規範型の二脚ロボット（Agility Robotics社）や四脚ロボット（Boston Dynamics社）の市場販売が開始されるなど、物流分野を中心に実社会での本格的な用途拡大が期待される。これらのベンチャー企業の多くは、大学の基礎研究開発を母体としている。
欧州	基礎研究	○	↗	米国と同様に生物規範型ロボットを扱う著名な研究室が多数存在し、多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	○	→	ETHで開発された四脚ロボットANYmalに代表されるように、災害対応や研究開発向けの脚ロボットベンチャー企業が登場している。
中国	基礎研究	○	→	IEEE Cyborg and Bionic Systems (CBS) など中国系のコミュニティが運営する生物規範型ロボットに関する国際会議も長く続いており、継続した研究が遂行されている。また、関連するソフトロボティクスの分野でも多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	ベンチャー企業Unitree Robotics 社が、米国社製などと比較して安価な四脚ロボットを市場投入するなど、生物規範型ロボットの事業化への攻勢が強まっている。
韓国	基礎研究	○	→	新しく設立されたソフトロボティクスに関する国際会議RoboSoft の第2回大会が2019年に韓国で開催されるなど、一定程度の存在感および研究成果を示している。
	応用研究・開発	△	→	DARPA Robotics Challengeの本戦（2015年）にて韓国のチームが優勝したものの、それ以降、生物規範型ロボットの実世界応用に関する事業化や研究プロジェクトについては大きな動きがない。産業用ロボットへ注力している傾向が見受けられる。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

1) Dario Floreano, et al., “Miniature curved artificial compound eyes,” *PNAS* 110, no. 23 (2013): 9267-9272., <https://doi.org/10.1073/pnas.1219068110>.

2) Martin Kaltenbrunner, et al., “An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics,” *Nature* 499, no. 7459 (2013) : 458-463., <https://doi.org/10.1038/nature12314>.

3) Noriyasu Ando, S. Emoto and R. Kanzaki, “Odour-tracking capability of a silkworm driving a mobile robot with turning bias and time delay,” *Bioinspiration & Biomimetics* 8, no. 1 (2013): 016008., <https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/1/016008>.

4) 下沢 樞夫「昆虫のセンシングと行動」『日本ロボット学会誌』6 巻 3 号（1988）：240-244., https://doi.org/10.1007/978-4-431-54444-4_10.

doi.org/10.7210/jrsj.6.240.

- 5) Bertrand Tondou and Pierre Lopez, “Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators,” *IEEE Control System Magazine* 20, no. 2 (2000) : 15-38., <https://doi.org/10.1109/37.833638>.
- 6) Shunichi Kurumaya, et al., “Design of thin McKibben muscle and multifilament structure,” *Sensors and Actuators A: Physical* 261 (2017) : 66-74., <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.047>.
- 7) Shingo Maeda, et al., “Self-Walking Gel,” *Advanced Materials* 19, no. 21 (2007) : 3480-3484., <https://doi.org/10.1002/adma.200700625>.
- 8) Yuya Morimoto, Hiroaki Onoe and Shoji Takeuchi, “Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues,” *Science Robotics* 3, no. 18 (2018) : eaat4440., <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat4440>.
- 9) Masahiro Shimizu, et al., “Muscle Tissue Actuator Driven with Light-gated Ion Channels Channelrhodopsin,” *Procedia CIRP* 5 (2013) : 169-174., <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.034>.
- 10) Sangbae Kim, et al., “Smooth Vertical Surface Climbing With Directional Adhesion,” *IEEE Transactions on Robotics* 24, no. 1 (2008) : 65-74., <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.909786>.
- 11) David Lentink, “Bioinspired flight control,” *Bioinspiration & Biomimetics* 9, no. 2 (2014) : 020301., <https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/2/020301>.
- 12) Hao Liu, et al., “Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371, no. 1704 (2016) : 20150390., <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0390>.
- 13) Robert K. Katzschmann, et al., “Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish,” *Science Robotics* 3, no. 16 (2018) : eaar3449., <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar3449>.
- 14) Tad McGeer, “Passive Dynamic Walking,” *The International Journal of Robotics Research* 9, no. 2 (1990) : 62-82., <https://doi.org/10.1177/0278364990000900206>.
- 15) Dai Owaki, et al., “A 2-D Passive-Dynamic-Running Biped With Elastic Elements,” *IEEE Transactions on Robotics* 27, no. 1 (2011) : 156-162., <https://doi.org/10.1109/TRO.2010.2098610>.
- 16) G. Clark Haynes, et al., “Laboratory on legs: an architecture for adjustable morphology with legged robots,” *SPIE Proceedings* 8387, Unmanned Systems Technology XIV (2012) : 83870W., <https://doi.org/10.1109/10.1117/12.920678>.
- 17) Jorge G. Cham, et al., “Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing,” *The International Journal of Robotics Research* 21, no. 10-11 (2002) : 869-882., <https://doi.org/10.1177/0278364902021010837>.
- 18) 大須賀公一, 他「ムカデ型ロボット i-CentiPot」『第8回横幹連合コンファレンス』(横断型基幹科学技術研究団体連合, 2017), D-2-4., https://doi.org/10.11487/oukan.2017.0_D-2-4.
- 19) Koh Hosoda, et al., “Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure,” *Autonomous Robots* 28, no. 3 (2010) : 307-316., <https://doi.org/10.1007/s10514-009-9171-6>.
- 20) Kenichi Narioka, et al., “Development of a minimalistic pneumatic quadruped robot for fast

locomotion,” in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (IEEE, 2012), 307-311., <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6490984>.

- 21) Shunichi Kurumaya, et al., “Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles,” *ROBOMECH Journal* 3 (2016) : 18., <https://doi.org/10.1186/s40648-016-0061-3>.
- 22) Gentaro Taga, et al., “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment,” *Biological Cybernetics* 65, no. 3 (1991) : 147-159., <https://doi.org/10.1007/BF00198086>.
- 23) Alper Bozkurt, et al., “MEMS based bioelectronic neuromuscular interfaces for insect cyborg flight control,” in *2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (IEEE, 2008), 160-163., <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2008.4443617>.
- 24) 竹内昌治「ハイブリッド昆虫ロボット」『日本機械学会主催ロボティクス&メカトロニクス講演会'95, 6』(日本機械学会, 1995), 576-579.
- 25) Yoshitake Akiyama, et al., “Atmospheric-operable bioactuator powered by insect muscle packaged with medium,” *Lab on a Chip* 13, no. 24 (2013) : 4870-4880., <https://doi.org/10.1039/C3LC50490E>.
- 26) Tetsuya Yamada, et al., “Highly sensitive VOC detectors using insect olfactory receptors reconstituted into lipid bilayers,” *Science Advances* 7, no. 3 (2021) : eabd2013., <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd2013>.
- 27) Yuichiro Yada, Shusaku Yasuda and Hirokazu Takahashi, “Physical reservoir computing with FORCE learning in a living neuronal culture,” *Applied Physics Letters* 119, no. 17 (2021) : 173701., <https://doi.org/10.1063/5.0064771>.
- 28) U.S. National Science Foundation (NSF), “NSF invests in bio-inspired and bioengineered systems for artificial intelligence, infrastructure and health,” <https://beta.nsf.gov/news/nsf-invests-bio-inspired-bioengineered-systems>, (2023年3月9日アクセス) .
- 29) Dai Owaki and Akio Ishiguro, “A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping,” *Scientific Reports* 7 (2017) : 277., <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00348-9>.
- 30) Shinya Aoi, et al., “Adaptive Control Strategies for Interlimb Coordination in Legged Robots: A Review,” *Frontiers in Neurorobotics* 11 (2017) : 39., <https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00039>.
- 31) Malcolm Burrows and Gregory Sutton, “Interacting Gears Synchronize Propulsive Leg Movements in Jumping Insect,” *Science* 341, no. 6151 (2013) : 1254-1256., <https://doi.org/10.1126/science.1240284>.
- 32) Katsushi Kagaya and Sheila N. Patek, “Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements,” *Journal of Experimental Biology* 219, no. 3 (2016) : 319-333., <https://doi.org/10.1242/jeb.130518>.
- 33) Hitoshi Aonuma, Koichi Osuka and Kyohsuke Ohkawara, “Mechnisms of ultra-high speed movement in the trap jaw ant,” in *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)* (IEEE, 2017), 15-18., <https://doi.org/10.23919/SICE.2017.8105578>.
- 34) 大須賀公一, 他「制御系に埋め込まれた陰的制御則が適応機能の鍵を握る! ?」『日本ロボット学会誌』28 巻 4 号 (2010) : 491-502., <https://doi.org/10.7210/jrsj.28.491>.
- 35) Nick Gravish and George V. Lauder, “Robotics-inspired biology,” *Journal of Experimental*

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス

Biology 221, no. 7 (2018) : jeb138438., <https://doi.org/10.1242/jeb.138438>.

36) 多賀厳太郎『脳と身体の動的デザイン：運動・知覚の非線形力学と発達』（東京：金子書房, 2002）.

37) John A. Nyakatura, et al., “Reverse-engineering the locomotion of a stem amniote,” *Nature* 565, no. 7739 (2019) : 351-355., <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0851-2>.

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス