

2.2.6 自律分散システム

(1) 研究開発領域の定義

生物の世界では個体が群れになって全体として意図を持って行動しているように見えることがある。例えば、ムクドリやイワシが数千とか数万匹集まって全体として大きな生物のように見える団体行動をとることはよく知られている。このような生物の群れには中央で統率する司令官のような存在はいないにもかかわらず、全体として目的を持っているかのように行動する。さらに、シロアリの巨大な蟻塚にみるように、集団になると個々の個体が持っている能力を上回る能力が発現する。生物が単独で行動する方が有利か、集団で行動する方が有利かは状況によって異なり、その選択には数理が隠されている¹⁾。

生物の集団行動は、工学的には「自律システム」として捉えることができる^{2), 3)}。このようなシステムを自律分散システムという。広義的には、そのシステムに隠されている制御メカニズムを明らかにし、大規模な人工システムや社会システムなどの人工物の制御に役立てるための研究開発領域であるが、本稿ではロボットに焦点を当てて記述する。

(2) キーワード

自律分散システム、創発システム、システムバイオロジー、自己組織化、群システム、スワームシステム、マルチエージェントシステム、群知能、スワームインテリジェンス、移動知、陰的制御と陽的制御、環世界

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

人類は何万年も前からさまざまな道具を発明し、それは操り人形、カラクリ機械、時計技術、オートマタ、ロボット、あるいは自動車や飛行機などの交通機関へと進化してきた。これらの人工物は技術革新を経て、多種多様な人工物が多数関わる大規模なシステムへと発展してきた。そこでは、個々の人工物が独立に存在するのではなく、何らかの形で互いに連携する大規模ネットワークシステムになってきたのである。

このように、人工物の世界でも自然界における生の集団行動と同型のシステムが自然発生的に生まれてきた。当初は、賢く振る舞うように造られた個々が、ある程度以上の数の規模になると動かなくなる。また、少数の高性能な制御器を備えた個体が全体を考えて全体を制御する中央制御の方法ではできることに限界があることもわかってきた。そこで群行動をする生物たちが注目され、上述の「自律分散システム」という概念が明確化されることになる。

「自律分散システム」は人類の進化と共に社会の複雑さが増してきた中で必然的に生まれてきた概念である。その奥には自然界の「群れをつくる生物」たちの成功例が見据えられている。1980年後半に「自律分散システム」という概念が提案されたとき、このようなシステムが持つメリットが多く述べられた。例えば、伊藤によると⁴⁾、「自律分散システムは、システム全体を統合する管理機構を持たず、システムを構成する各要素（サブシステム：個とも呼ぶ）が分散して存在し、自律的に行動することにより要素間の協調をとり全体として任務を達成する（秩序を生成する）システムである。」と説明されている。さらに、このようなシステムが実現されれば、「システムの一部が故障したり、システムに課せられた目的や取り巻く環境に変更が生じたりしても、自己組織的に協調行動を変更させて任務を遂行することができるので、極めて高い柔軟性、多様性、耐故障性を持つことが可能となる。そのため、「自律分散システム」の研究には、多くの期待が寄せられている。」と述べられている。本領域の意義は、大規模・複雑化する昨今のシステムを合理的に制御するための有力な手法を生み出すことがロボティクスにおいても期待できるという点にある。

[研究開発の動向]

「自律分散システム」は、高い柔軟性や多様性、耐故障性を持つと期待される。群れをつくる生物たちはそ

のような能力を持っているように見える。そのため、自律分散システムという概念が明確になって以来（約30年）、この期待を現実のものとするべくさまざまな研究開発が進められてきている。

特に本領域は日本で生まれたこともあって、世界的にみても、日本における研究動向が参考になる。以下、歴史的流れを見ていく。

まず、「自律分散」という言葉がわれわれ工学の世界に広められたきっかけをつくったのは、1984年に書かれた森（欣）らの論文であると言われている²⁾。それ以前にも、エネルギーシステム、交通システム、あるいは計算機システムなどにおいて、いわゆる中央制御装置が全体を制御するシステムから、いくつかのサブシステムが自律的に動き全体として調和して働くシステムが、構築されてきた。また、1975年には森（政）らによって「みつめむれつくり」というロボットが研究されていた^{5)・6)}。ここで紹介されたロボットは個々のロボットには全体を知る能力はないが、近傍のロボットと自分との関係で行動が決まり、全体の個体数や周りの環境との相互作用によって群れ全体の行動様式が変化するという「群ロボット」であった。

「自律分散システム」という概念が工学分野で表に出てきたのが、1980年前後である。森（欣）の論文²⁾では、改めて各サブシステムが自律可制御性と自律可協調性を持つシステムを自律分散システムと定義した。そして、このような条件を制御理論的に考察し、その適用例としてLAN（Local Area Network）を紹介している。

1985年頃、日本学術会議自動制御研究連絡委員会の委員で当時の制御工学やシステム工学を牽引していた5名（市川惇信氏（東工大）、北森俊行氏（東大）、茅陽一氏（東大）、須田信英氏（阪大）、伊藤正美氏（名大）（所属はいずれも当時））によって、「自律分散システム」をこれから構築すべきシステム研究における「新しいパラダイム」にしよう、という発案が生まれ検討が始まった⁷⁾。その動きは、文部省科学研究費補助金の重点領域研究「自律分散システム（領域代表・伊藤正美）：1990-1993」として大規模にスタートした⁸⁾。このプロジェクトでは、自律分散システム論という新しい学術領域を目指して、工学に加えて、理学（生物学、物理学、数学）などの研究者により、各分野における事例研究を集積し、「自律分散システム」という新しい概念の明示化と理論構築のための枠組みを模索した。さらに、長田らによって、「自律分散をめざすロボットシステム」⁹⁾で、ロボットにも自律分散の考え方が浸透し始めていることが示された。また同時期に、福田らは、ロボットの機構学的構造をセルと称する自律的機能単位（サブシステム）に分割可能な構造にすることにより、タスクや作業環境に応じて形態を自己組織化することが可能になる分散型ロボットを提案した^{10)・11)}。また石黒らも、真正粘菌やクモヒトデの自律分散的な行動様式をヒントに、粘菌様群ロボットやクモヒトデロボットを提案した^{12)・13)}。

このように1980年後半～1990年前半まで、「自律分散システム」という魅力的なパラダイムの枠組み（もし理想的な自律分散システムが構築されたらどのような能力が発揮できるか）が検討されつくした。この流れは、後述する「創発システム」や「自己組織化システム」、そして「移動知」などとながっていく。まずは、自律分散システムの理論的側面について考察する。

1989年に湯浅・伊藤らは¹⁴⁾複数の非線形なサブシステムが影響を与え合うような自律分散システムを想定して、その系が勾配系（ポテンシャルを持つ）になるための条件を求めている。そして、自律分散システムがある目的に沿って動いていることをある状態がポテンシャルの最下点に落ち着くことであるとした。ある意味、平衡状態が存在することを要求していることになる。一般に非線形システムの場合、必ずしもポテンシャルを持つとは限らないので、そのための条件を求めるといえるものである。ただ、この段階では場（環境）の影響は考えていない。

続いて、伊藤・湯浅・伊藤らは¹⁵⁾上の結果を拡張して、場の変化に応じて全体システムの挙動が変化して、ある意味適応することの考察をしている。まず、場が変化しない状態で、ポテンシャルが存在して考えている変数が最下点に落ち着いているところから始めている。この状態で場が変化すると、変数がポテンシャルの最下点からずれる。そこで、システムの内部パラメーターを調整して新たなポテンシャルを作り、そのポテンシャルの最下点に落ち着くようにする。伊藤らはそれを「適応」と呼んだ。要するに、「新たな平衡点を探す」と

いうことである。

上述の2件はこのような自律分散システムに対する期待を少しでも数理で説明しようとした初期の研究である。その後は、多くの場合、ヒューリスティックにシステムを作り込み、試行錯誤の循環による構成論的なアプローチがとられ、理論的研究の後が続かないまま現在に至っている。

それに対して、問題を適切に限定（例えば、エージェントが置かれている環境は一様に外乱として捉えたり、個々のエージェントはシンプルな数理モデルで近似したりする）すれば、問題を制御理論の枠組みに持ってきて理論展開することができるようになる。「マルチエージェントシステムの制御¹⁶⁾」などはその好例で、うまく問題設定することで学術的な研究領域を構成する試みが精力的になされている。一方で、理論的考察を厳密にしようとするほど、問題が限定的になっていく（逆に言うと、問題を限定化することで理論体系が構築できる）。

【論文や特許の動向】

論文に関しては、領域全体の論文数は約300件（2012年）から約750件（2019年）でピークに到達し以後横ばい。国別の比較では、論文数、論文数シェアとも米国が1位独占、次いで中国、日本は3位グループの中位。Top1%、10%論文も米国がトップ、中国、英国、ドイツが続く。日本は5位グループと低迷。論文数上位機関では、フランスがトップ、米国と中国、英国が入る、日本は広島大学が17位に入る。

特許に関しては、特許ファミリー件数は、米中2強に韓日が続く。中国は他の領域に比べ早い時点（2014年）には米国を抜きトップとなり、2022年では50%超のシェアを確保。米のシェアは30%強から20%まで低下。

（4）注目動向

【新展開・技術トピックス】

自律分散システムという概念が生まれ、さまざまな研究が展開された中で、「自律分散システムが自律的に動き始めると、システム全体として新しい機能が生まれるのではないか」という期待から、「創発システム」という考えが提案された¹⁷⁾。実際、さまざまな生物の行動を見ているとそのような機能を持っているように見える。例えば、微小脳しか持たないアリは1匹ではそれほど高度な行動ができるとは思えないが、集団になると群全体が予想を超える能力を発揮することはよく知られている¹⁸⁾。

「創発」を人工物で実現しようと「群ロボット」という考え方が生まれた。源流は、前述の1975年に森（政）らによって開発された「みつめむれつくり^{5), 6)}」というロボットである。その後、自律分散システム、創発システムという考え方が明確になり、さらに計算機、センサー、アクチュエーターなどの高性能化などによって当時は難しかったことが実現できるようになった結果、一つの研究領域へと発展した¹⁹⁾。群れをなすエージェントが知能を発現するということに焦点を当て「群知能」や「スワームインテリジェンス」などという生まれる²⁰⁾。

自律分散や創発という考え方は生物の行動にヒントを得ていることから、生物そのものに焦点を当て、これらの概念をより深く理解しようとする試みも始まる。例えば、北野らは生命現象は従来の要素還元論的に遺伝子やタンパク質、謝物、細胞などが単に集まったものであると捉えるのではなく、それらから構成されるネットワークシステムであると捉える「システムバイオロジー」という概念を提唱した²¹⁾。また、浅間が領域代表を務めた「移動知」プロジェクトでは、生物の知能は脳そのものから生まれるのではなく「脳・身体・環境の相互作用」によって生まれるという考え方が提案された^{22), 23)}。このプロジェクトでは、生物が持っている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能力は動くことで生じる身体、脳、環境の動的な相互作用によって発現されると捉え、そのような知能を移動が重要であるという意味をこめて、「移動知」と呼んだ（図2-2-3）。

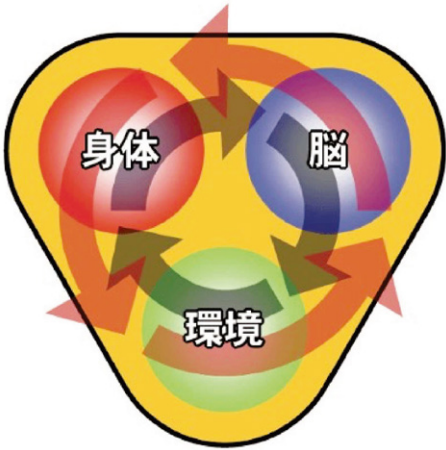


図2-2-3 移動知のコンセプト

「移動知」プロジェクト²²⁾ のパンフレットより作成

さらに、小林が代表を務めた「生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開²⁴⁾」では、現実の複雑な環境の中を生物のように自在にこなやかに動き回るロボットを造るには生物同様なやかな動きを生み出す制御のからくりを数理的に解明しなくてはならないという考えのもと、大自由度ロボットの自律分散的制御法の創出を目指した。このプロジェクトを受けて連続して小林が代表を務めた「環境を友とする制御法の創成²⁵⁾」では、生物のように無限定環境の中を動き回ることのできる移動ロボットの設計原理を構築するには徹底した環境の既知化に基づく従来のロボットの制御法に根本的な問題があると考えた。本プロジェクトでは、従来の工学の王道ではなく生物に学ぶ道を選び、「階層制御」「手応え制御」「陰陽制御」という三つのコンセプトを提唱して、新たな学問領域を創成しようとした。

以上の研究動向をまとめてみると、自律分散システムを構成する際、当初は個々のエージェントをどのように設計するか、という観点だったのが徐々に、そのモノを取り巻く環境（他個体も含む）との相互作用を外乱として捉えるのではなく制御に資する作用を生み出すモノである、という考え方にシフトしてきたことになる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

自律分散システムに関連する注目すべき研究開発プロジェクトは以下の通り。

(a) ソフトロボット学の創成：機電・物質・生体情報の有機的融合（2018-2022）

文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）

領域代表：鈴森 康一（東京工業大学）

概要：近年、生体システムが持つ「やわらかさ」を指向する研究が同時多発的に生まれてきている。これらはいずれも「自律分散システム」と大いに関係がある。本領域では「やわらかさ」を目指す新しい学問の種を融合し、従来の「硬さ・パワフルさ」を目指す科学技術とは真逆とも言える価値観に立脚した大きな学術の潮流を創りだし、「やわらかさ」に立脚する学術領域「ソフトロボット学」を構築しようとするものである。

(b) 多細胞間での時空間的相互作用の理解を目指した定量的解析基盤の創出（2019-2024）

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業（CREST）

研究総括：松田道行（京都大学）

概要：近年、細胞や生体分子の網羅的かつ定量的な解析が可能になりつつある。それにより、個別の遺伝子や分子に着目した研究から、より複雑な解析へとライフサイエンスの方法論が認められつつある。

本領域では、細胞間や分子間のネットワークの時空間的な理解に資する新たな技術や理論を構築し、多細胞動態の解明に関する研究開発を推進しようとしている。またこれらの研究開発を通じて多細胞の動態を予測・操作するための技術基盤を構築することを目指している。

(c) サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション (2021-2026)

文部科学省 科学研究費補助金 学術変革領域研究 (A)

領域代表：橋本浩一 (東北大学)

概要：本領域では、なぜ渡り鳥は道に迷わないのか、魚はなぜ大集団で回遊できるのかなど、生物の移動や集団行動にまつわる謎を明らかにしようとしている。そのために、生物に行動記録計 (データロガー) やGPS装置などの機器を取り付け、生物自身の生態や周囲の環境情報などを記録する「バイオリギング」の展開や、多様な階層ナビゲーションモデルを提案し、人間を含む生物およびモノの移動情報を分析するための情報学的基盤を整備することを目指している。

(d) 多様な細胞の集団動態から切り拓く群知能システムの革新的設計論 (2021-2023)

文部科学省 科学研究費補助金 学術変革領域研究 (B)

領域代表：加納 剛史 (東北大学電気通信研究所)

概要：生物は「群れ」になると、あたかもその集団全体が意思を持った一つの個体であるかのように知能的に振る舞う。この振る舞いは、群れの構成要素の間の局所的なやりとりによって創発的に生み出されているように見え、「群知能」と呼ばれている。本領域では、そのような「群れ」に対して、多くの研究が「均質な自律個」を想定するのとは異なり、さまざまな性質を持つ自律個を考える。そして、それらが変動環境下において適切な役割を自身で見つけながら秩序を創発し、高い機能を発揮し続ける「ヘテロな群知能システム」の設計原理を明らかにすることを目標としている

(e) 多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット (2020-2025)

科学技術振興機構 内閣府 ムーンショット型研究開発制度

プロジェクトマネージャー：永谷 圭司 (東京大学)

概要：本研究では、月面や被災現場を含む難環境において、想定と異なる状況に対して臨機応変に対応し、作業を行うことが可能な協働AIロボットの実現を目指す。このプロジェクトは、ここ30年、自律分散システムや移動知などの研究を中心にさまざま考えられてきた概念の集大成的な位置付けであると言える。その中で、浅間らによって体系づけられようとしている「動的協働AI」は、1990年来、浅間らが夢に描いていた自律分散システムの具現化になっており、大須賀らによる「開いた設計」という概念は2010年来提唱されている「陰陽制御」^{19), 20), 21)} がベースになって構築されようとしている。これらの概念は次項で簡単に触れる。

(f) 米国 National Robotics Initiative 3.0 :

Innovations in Integration of Robotics (NRI-3.0) (2020~)

概要：米国での統合ロボットシステムの開発と利用を加速する基礎研究をサポートすることを目標に掲げたファンディングプログラムで、全米科学財団 (NSF) を中心とした複数省庁の共同によって開始された。ロボットと人間の協調チームやマルチエージェントシステムなど、自律分散システムをテーマとした研究も進行中である。

(g) 欧州 Horizon 2020 (2014 ~ 2020)、Horizon Europe (2021 ~ 2027)

概要：Horizon 2020 では、ICT分野の重点項目5件の一つとして「先進インターフェース・ロボット、

ロボティクス・スマート空間」を掲げている。本資金により、群ロボットで代表される自律分散システムは、精密農業システム（イタリア）、海洋環境モニタリング（クロアチア）、水中環境探査（英国）、都市交通検出（スペイン）、都市建設（ドイツ）などにおいて優れた応用研究成果を挙げている。後継の枠組みとして2021年に開始したHorizon Europe（2021～2027）においては、官民協働イニシアチブである「欧州パートナーシップ」の一環として、人工知能・データ・ロボット技術に対し、官民合わせ26億ユーロの投資が行われる予定である。

（5）科学技術的課題

自律分散システムは、生物をヒントにしながら同時に人工物の発展からの必然性も相まって、多くの研究者や技術者を魅了し、創発システムや自己組織化システム、群ロボットなど新たな概念が生まれ、現在継続的に研究が進められている。近年の計算機システムの高性能化・小型化および、アクチュエーターや素材の高性能化によって、これまで実現不可能だった自律分散システムを具現化できるようになってきた。今後も発展する傾向が見込める中、科学技術的課題として具体的な集大成と設計論について述べる。

（a）集大成に向けた取り組み

前述のムーンショット（多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット）において浅間らが精力的に研究開発を進めている「動的協働AI」というテーマは、これまで当該分野でさまざま行われてきた検討結果の集大成になっている。このプロジェクトでは、災害現場において複数の建機が活躍する方法について考察している。具体的には、そのような現場においては直感的にヒトであれば、ある場合は建機が個々に働き、別の状況では建機同士のチームを編成し、さらに能力不足な建機があれば他の建機たちが助っ人に回る、ということをするだろう。浅間らはこのようなスキームを階層的に実現しようとしている。具体的には、最上位には人間を設定し、現場に向かうほどシステムを自律化することを考える。このようなことは20年ほど前から考えられてはいたが、当時のさまざまなハードウェアの能力が貧弱で実現できなかった。それが近年の計算機や通信機器の高性能化によって具現化できるようになってきたのである。

（b）「開いた設計」

設計論がないという課題は自律分散システムという概念が生まれた当初から言われ続けており、いまだに解決していない。したがって、多くの場合、ヒューリスティックにシステムを作り込み、試行錯誤の循環による構成論的なアプローチがとられ、現在に至っている。また、このような概念は生物の行動からヒントをもらっているという観点からみると「生物のことがわかっていない」という課題も残されている。そもそも1万匹なら群れで1千匹なら群れでないのかといった問いに対して答えがない。群れをどのように定義するのかなど、群れの本質的な問題が解決されていない。群れは局所情報から大域情報を知り得ているのではないか、個体は群れを同定できるか、群れは身体性を持つか、など未解決な問題が山積していると松野は述べている²⁰⁾。

ここでは、自律分散システムが抱えている課題の本質を探る。自律分散システム、創発システムなどを構成することは、必然的に多数の要素の集積や無限定環境下（変動したりあらかじめ定められない環境）で移動するシステムの構成を意味する。すなわち、システムの設計時に「境界条件が閉じていない」ために、不良設定問題にならざるを得ないのである。そこで必要になるのが、境界条件が閉じない状況での設計法「開いた設計」なのである（図2-2-4）^{26), 27)}。なお、境界条件が閉じている設計問題は良設定問題になり、以前からのモノづくりの基本である。ここではそのような設計を「閉じた設計」と呼ぶ。

従来の工学が得意としてきたのは「閉じた設計」であり、「開いた設計」論は問題が難しく、まだ完成していない。その本質の一つが「環境の存在」であり、「身体と環境との相互作用」であると考えられる。人工物の設計においては、ターゲットの対象物自体（身体）に注目することはもちろんであるが、それと同等に「身体とそれが置かれている環境との相互作用」に注目すべきである。

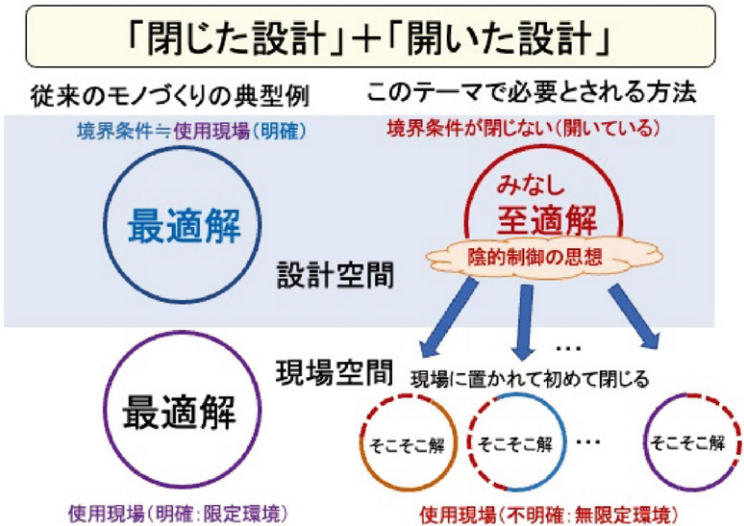


図2-2-4 閉じた設計と開いた設計

出典：計測自動制御学会：第22回システムインテグレーション部門講演会（SI2021），3H3-10（2021）

(6) その他の課題

自律分散システムの守備範囲は広く、生物から人工物、さらには社会システムまでカバーし得る考え方である。概念が生まれた背景には生物の存在があるが、工学の分野で概念が明確化されてきたことから、主に工学的な研究課題として発展してきた。その過程で、群ロボットや群知能やスワームシステム、スワームインテリジェンスなど、ますますロボット指向が強くなってきた。結果的に、閉じた設計をすることになり、周りの境界条件を明確にするために、外界の様子を俯瞰的に観察するためのさまざまな高性能センサーや高速演算可能な計算機を要求する。また、多くのデータから制御戦略を計算するために、ビッグデータを活用した人工知能などを導入する。自律分散システムにおいても、個々のエージェントの位置情報などを要求し始め、生物の制御スキームからはどんどん離れてゆく。この路線でもある一定以上の成果は期待できるが、究極的な行き先には「フレーム問題」が横たわっていることも確かである。

一方、生物は上のような戦略はとっていない。限られた身体能力と限られた計算資源のもとで、自在にしながらに無限定環境である自然環境の中を巧みに移動する。俯瞰的に観察して行動を決めることはしないで、自身の内部で感じる外界を解釈してできることをするだけである。

以上のようなことを考えると、今後、当分野で注力すべきは「環境との相互作用を明示的に意識する（陰陽制御、図2-2-5）^{28), 29)}」こと、および「その個体自身の内部に入ってモノゴトを考える（環世界）^{30), 31)}」という姿勢だと考えられる。陰陽制御とは、図に示すように、身体と環境との相互作用を敵ではなく味方になるように、すなわち制御側になるよう、うまく振る舞う、という考え方である。また「環世界³²⁾」はユクスキュル（1864～1944）が100年ほど前に提唱した、生物は自分自身の知覚のみで環境を理解しているという考え方である。近年では、認知科学やロボティクスにおいてもその重要性は認識されている。

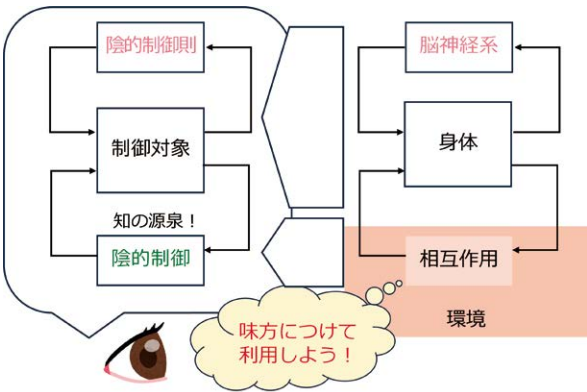


図 2-2-5 陰陽制御

当該分野に欠如しているのは「設計論」である。自律分散システムには、複雑なシステムを縦割りの設計するのではなく、横断的に「統合による設計をする」という考え方である「システムインテグレーション」が妥当な選択である。そのような設計論が当初から望まれていた。古くは1970年代、吉川は一般設計学序説（あるいは一般デザイン学）^{33), 34), 35)} で「各分野の設計活動の背後には、統合（シンセシス）に関する一般的な方法が存在するはずである（中略）一方、統合に関する一般的な方法はまだ解明されていない。」と述べている。そして、そこでは「統合に関する一般的な方法（原理）を解明することをことに目標をおく」とし数学的に考察を深めている。

このような問題提起は、まさに「自律分散システム」のシステムインテグレーション的方法論（学理）を構築しようとする試みの源流であり、規範にすべき考え方である。とは言え、まだ「一般デザイン学」は完成しておらず考察を加える余地がある。その一つが「環境の存在」であり「身体と環境との相互作用」である。人工物の設計においては、ターゲットの対象物自体（身体）に注目することはもちろんであるが、それと同等に「身体とそれが置かれている環境との相互作用」に注目すべきである。

(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	◎	→	自律分散システムの研究を最初に行った国の一つとして、この分野の基礎研究を高い水準で維持し続けている。特にムーンショット型研究開発制度の目標3である「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」のプロジェクトでは、土砂災害対応や月面インフラ構築用の動的協働AIロボット群の開発が進んでいる。同時に、基盤研究や重点研究領域などの研究助成による自律分散システムの基礎研究も行われ、成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	↘	応用開発研究の面では、日本は世界でもトップクラスの研究水準で維持する。ムーンショットプロジェクトのCAFÉプロジェクトや、動的協働AIの開発だけでなく、NEDOの助成によるさまざまな自律分散型システムの実用化に関する研究も行われている。また、株式会社ispaceとジグソー株式会社の月面・小惑星探査型「宇宙群ロボット」の共同開発（2016年から）や、NTTとJAXA（宇宙航空研究開発機構）の地上と宇宙をシームレスにつなぐ超高速大容量でセキュアな光・無線通信インフラの実現に向けた共同研究などが進んでいる。株式会社トライアートとトヨタ自動車九州株式会社は工場内での複数メーカーのAGVどおしが交差点での優先走行を自律的に判断する「分散型優先走行制御システム」の開発に成功したと報告している。しかし、具体的な研究成果の産業化や社会実装においては、他国との競争力に見劣りする傾向にある。今後の巻き返しが期待される。

米国	基礎研究	◎	→	NSFやDARPAなどのfunding Agencyの投資による自律分散システムの研究は、依然として高いレベルを維持している。例えば、コロンビア大学のLiは、統計学の法則を利用して、簡単な自律分散制御で移動・運搬・障害物対応を行うロボット群を提案している。また、National Robotics Initiative (NRI) 3.0やRI (IIS: Robust Intelligence) などの研究プロジェクトで、ロボットと人間の協調チームやマルチエージェントシステムなど、自律分散システムをテーマとした研究も進行中である。
	応用研究・開発	◎	→	NASA、米軍、そして民間企業やスタートアップ企業は、自律分散システムの応用研究開発の分野で高い競争力を維持している。宇宙開発の分野では、NASAが小型ロボットの群れで異星の海に生命の痕跡を探るプロジェクトに多額の資金を提供し、DARPAが進めるOFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET) プロジェクトでは、自己分散システムの幅広い軍事利用が実現されている。
欧州	基礎研究	○	→	Horizon 2020、Horizon Europeなどの欧州の大規模プロジェクトの資金を受け、自律分散システムに関する多くの研究プロジェクトが進行中である。
	応用研究・開発	◎	↗	ヨーロッパは、自律分散システムの産業的な研究開発において、非常に強いポジションを占めている。また、Horizon 2020などの資金により、群ロボットで代表される自律分散システムは、精密農業システム (CANOPIES、イタリア)、海洋環境モニタリング (クロアチア)、水中環境探査 (英国)、都市交通検出 (スペイン)、都市建設 (ドイツ) などにおいて優れた応用研究成果を挙げている。
中国	基礎研究	○	→	中華人民共和国国務院は「人工知能新世代発展計画」を発表し、「群知能」が人工知能分野の重要な研究方向であると明言している。科学技術省も「科学技術イノベーション2030における『新世代人工知能』主要プロジェクトの案内」の中で、人工知能分野の現在進行中の5大研究方向の一つとして「群知能」を挙げている。また、「共融ロボットの基礎理論と肝心な技術研究重大な研究計画」の資金援助により、自律分散システムに関する研究・論文数は増加し、論文の質も向上している。
	応用研究・開発	○	↗	一方、DJIに代表されるテクノロジー企業は、物流、農業、輸送などさまざまな分野で活用されるドローンについて、自律分散型システムに基づく製品開発に注力している。同時に、習近平の中国共産党第20回全国代表大会報告には、「科学技術を基盤とする中小・零細企業の成長に資する有利な環境を作り、イノベーションチェーン、産業チェーン、資本チェーン、人材チェーンの深い統合を目指す」と明記され、自律分散システムを技術的中核とする零細企業や新興企業の発展に有利な社会条件が整備される。
韓国	基礎研究	○	→	韓国研究財団(NRF)の資金援助により、ヘテロジニアス・マルチエージェントシステムの研究に代表される自律分散システムの基礎研究において、一定の成果が得られている。
	応用研究・開発	△	→	サービスロボットの分野に大きな投資をしており、その中でも自律分散型システムによるサービスロボットの研究は一定の成果を挙げている。また、米国との協力により、自律分散システムが軍事利用されるようになり、一定の研究成果が得られている。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	カナダやシンガポールなどは高いレベルを維持している。一方、インド、ブラジル、UAEなどの国も徐々に軌道に乗り始めている。
	応用研究・開発	△	→	インド、シンガポール、ブラジル、UAEなどでは、作物栽培、米の品質管理、スマート工場などで自律分散システムを活用している。ロシアは、宇宙探査に応用するための自律分散システムの開発のポテンシャルを持っている。

(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) テレンド ※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) 今福道夫「生物集団における群知能：動物集団の知能行動」『計測と制御』31 巻 11 号 (1992) : 1185-1189., <https://doi.org/10.11499/sicejl1962.31.1185>.
- 2) 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一「自律分散概念の提案」『電気学会論文誌. C』104 巻 12 号 (1984) : 303-310., <https://doi.org/10.11526/ieejeiss1972.104.303>.
- 3) 森欣司『自律分散システム入門：システムコンセプトから応用技術まで』(東京：森北出版, 2006).
- 4) 伊藤正美「「自律分散システム」研究の動向と課題」『計測と制御』31 巻 1 号 (1992) : 214-218., <https://doi.org/10.11499/sicejl1962.31.214>.
- 5) 東京工業大学「みつめむれつくり（沖縄国際海洋博覧会 1975年）」YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=-OCgbrbcQHQ>, (2023年3月9日アクセス) .
- 6) 森政弘「日本のロボット研究の歩み 1975 Locomotion（ロコモーション）：みつめむれつくり」ロボ學, <https://robogaku.jp/history/locomotion/L-1975-1.html>, (2023年3月9日アクセス) .
- 7) 伊藤正美, 須田信英, 市川惇信『自律分散宣言：明日を拓くシステムパラダイム』(東京：オーム社, 1995).
- 8) 伊藤正美「自律分散」『文部省科学研究費補助重点領域研究成果報告書』(文部省, 1994).
- 9) 石川正俊, 他『自律分散をめざすロボットシステム』長田正 編著 (東京：オーム社, 1995).
- 10) 福田敏男, 中川誠也「セル構造を有する自己組織化ロボット：その基礎概念とセル間の粗接近制御および形態決定方法について」『電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌）』107 巻 11 号 (1987) : 1019-1026., https://doi.org/10.1541/ieejeiss1987.107.11_1019.
- 11) 福田敏男, 植山剛「分散型ロボットシステム：通信量からみたシステム組織の集中と分散」『日本ロボット学会誌』10 巻 3 号 (1992) : 329-333., <https://doi.org/10.7210/jrsj.10.329>.
- 12) Akio Ishiguro, Masahiro Shimizu and Toshihiro Kawakatsu, "A modular robot that exhibits amoebic locomotion," *Robotics and Autonomous Systems* 54, no. 8 (2006) : 641-650., <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.02.011>.
- 13) Takeshi Kano, et al., "A brittle star-like robot capable of immediately adapting to unexpected physical damage," *Royal Society Open Science* 4, no. 12 (2017) : 171200., <https://doi.org/10.1098/rsos.171200>.
- 14) 湯浅秀男, 伊藤正美「自律分散システムの構造理論」『計測自動制御学会論文集』25 巻 12 号 (1989) : 1355-1362., <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.25.1355>.
- 15) 伊藤聡, 湯浅秀男, 伊藤正美「自律分散システムの適応理論」『計測自動制御学会論文集』35 巻 5 号 (1999) : 684-692., <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.35.684>.
- 16) 石井秀明, 他『マルチエージェントシステムの制御』東俊一, 永原正章 編著, システム制御工学シリーズ 22 (東京：コロナ社, 2015).

- 17) 北村新三, 喜多一「創発システム」『計測と制御』40 巻 1 号 (2001) : 94-99.,
<https://doi.org/10.11499/sicejl1962.40.94>.
- 18) 小林亮「生物に学ぶ自律分散制御: 粘菌からロボットへ」『計測と制御』54 巻 4 号 (2015) : 236-241., <https://doi.org/10.11499/sicejl.54.236>.
- 19) 松野文俊「群行動の理解と群ロボット研究」『日本ロボット学会誌』35 巻 6 号 (2017) : 428-431.,
<https://doi.org/10.7210/jrsj.35.428>.
- 20) 松野文俊「群行動の理解から群知能の創出をめざして」『計測と制御』59 巻 2 号 (2020) : 141-144.,
<https://doi.org/10.11499/sicejl.59.141>.
- 21) 北野宏『システムバイオロジー: 生命をシステムとして理解する』(東京: 学研メディカル秀潤社, 2001).
- 22) 文部科学省「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(浅間一)」
https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/chukan-jigohyououka/1301311.htm, (2023 年 3 月 9 日アクセス) .
- 23) 浅間一, 他 編著『移動知: 適応行動生成のメカニズム』シリーズ移動知 1 (東京: オーム社, 2010).
- 24) 小林亮「科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST): 生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開 (2008-2014)」<http://kobayashi-lab.jp/index.html>, (2023 年 3 月 21 日アクセス) .
- 25) 小林亮「科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST): 環境を友とする制御法の創成 (2014-2020)」<http://jst.team-kobayashi-crest.jp/index.html>, (2023 年 3 月 21 日アクセス) .
- 26) 大須賀公一「3H3-10 人工物の「開いた設計」とは?」第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2021) (2021 年 12 月 15-17 日), <https://sice-si.org/conf/si2021/index.html>, (2023 年 3 月 9 日アクセス) .
- 27) 大須賀公一「建設機械の「開いた設計」とは?」『計測と制御』61 巻 9 号 (2022) : 684-687.,
<https://doi.org/10.11499/sicejl.61.684>.
- 28) 大須賀公一, 他「制御系に埋め込まれた陰の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>.
- 29) 大須賀公一『知能はどこから生まれるのか?: ムカデロボットと探す「隠れた脳」』(東京: 近代科学社, 2018).
- 30) 大須賀公一, 他「1D1-1「環世界ベースド制御学の創成」に関する一考察」第 35 回自律分散システムシンポジウム (2023 年 1 月 22-23 日), <https://sites.google.com/sice-das.org/das35th/%E3%83%97%E3%83%AD%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%83%A0>, (2023 年 3 月 9 日アクセス) .
- 31) 小林祐一『ロボットはもっと賢くなれるか: 哲学・身体性・システム論から学ぶ柔軟なロボット知能の設計』(東京: 森北出版, 2020).
- 32) ユクスキュル, クリサート『生物から見た世界』日高敏隆, 羽田節子 訳 (東京: 岩波文庫, 2005).
- 33) 吉川弘之「設計学研究」『精密機械』43 巻 505 号 (1977) : 21-26., <https://doi.org/10.2493/jjspe1933.43.21>.
- 34) 吉川弘之「一般設計学序説: 一般設計学のための公理的方法」『精密機械』45 巻 536 号 (1979) : 906-912., <https://doi.org/10.2493/jjspe1933.45.906>.
- 35) 吉川弘之『一般デザイン学』(東京: 岩波書店, 2020).

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ロボティクス