

知能的行動における陰的制御と陽的制御



研究ノート

大須賀 公一*

Implicit Control and Explicit Control in Intelligent Motion

Key Words : Intelligent, Motion, Control, Implicit, Explicit

1. はじめに

オーストラリア北部ノーザンテリトリー（ダーウィンが首府）には高さ数mにもなる巨大な蟻塚群を構築するシロアリが数種類生息している [1]。この蟻塚一山には数百万匹ものシロアリが住んでおり、無数の役割分担された部屋が作られ、吸気や排気のためのネットワークも構成され、いわば一大都市国家が建設されていると言えよう。図1参照 [2]。

あの小さなシロアリたちのどこにあのように巨大な構造物を設計し建築する能力が備わっているのだろう。この種の問いかけは人類に古くから投げかけられてきた素朴な疑問である。我々はこの謎を解く



図1 磁石シロアリの蟻塚 [2]

ためにしばしば、シロアリを実験室に連れ帰り彼らの脳を詳細に解析する。そして驚愕する。「この小さな脳（微小脳）のどこにも蟻塚を建設するための設計図は埋め込まれていない、しかも非常に高い能力を持ったシロアリが少数いて彼らが全シロアリを指揮しているようにも思えない。」と... 実に不思議である。一匹のシロアリの脳の中には蟻塚の設計図は描かれていないのに彼らを蟻塚の「場」においてやるとあたかも役割を認識しているかのように蟻塚の中における自分の役割を果たすように行動する。しかも、その行動は様々な環境の変化に対してもリアルタイムに適応しているように見える。ところがそのシロアリを「場」から離すとそのような能力は消失してしまうように見える。

本稿では、このような基本的に素朴な不思議に対する解へ少しでも近づこうと筆者らが最近考えていることを紹介したいと思う。そして、そこで考察することが現在の知能ロボットと呼ばれるロボットが知能を持っているように見えない一つの理由ではないかという推察を行ってみる。

2. 生物の制御系

我々は、生物が持っている知的な行動・運動能力を理解するためには、それが運動を前提に構築されているはずだから、生物を制御系として捉えた時に見えてくる制御則を深く理解するところからは始めるべきである、という考え方を持っている。すなわち、生物を図2のように捉えようという発想である（実は後ほどこの考え方は肯定的に否定されることになる）。

さて、前章であげたシロアリの例は、生き物が持っている「リアルタイム環境適応機能¹」という一種の知的能力の一具現化である（知能的行動）。そしてそのとき感じた不思議さのポイントは「脳の中



* Koichi OSUKA

1959年11月生

大阪大学・大学院基礎工学研究科・物理系専攻修士課程修了（1984年）

現在、大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻 教授 工学博士 制御工学・ロボット工学・レスキュー工学

TEL : 06-6879-4878

FAX : 06-6879-4878

E-mail : osuka@mech.eng.osakau-u.ac.jp

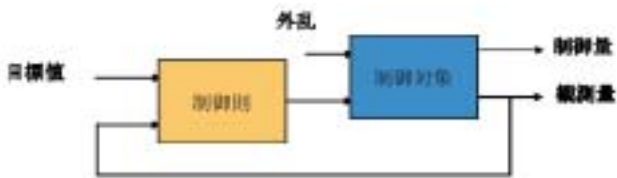


図2 従来の制御系の表現

には、その生き物が行っている作業に関する行動・運動制御プログラム（制御則）が陽に全て記述されているわけではないのに、結果的にはそのプログラムを越えた行動・運動が発現している（ように見える）」というところである。

このような例はまだ他にもある。たとえば、図3はトレッドミルの上に置かれた猫である。この猫は、トレッドミルの速度に応じて歩行パターンを変化させる能力を有している。すなわち、トレッドミルの速度が遅いときはウォークという歩行パターンで歩き（同図左）、少し早くなるとトロットになり（同図中）、より早くなるとギャロップになる（同図右）。この説明ではなんら驚くべきことはないが「実はこの猫は除脳ネコである [3]」と言われたらどうだろうか？ すなわちこの猫は、常識的には制御則であるとされる大脳が除去されているのである。それにも関わらず、ある種の環境適応能力（地面の移動速度に応じて歩行パターンを変化させる）を有していることを本実験は示唆している。その理由の有力な説明の一つとして、残留神経系の中にCPG(Central Pattern Generator)が構成されており、それが歩行パターンの変化を生み出している、という説がある。確かにCPGは大きな効力は果たしていると考えら

れる。しかし、近年、(脳神経系が全く無い) 4脚受動的動歩行²の存在が実験で示された [4]。そして、本機の詳細シミュレータによると傾斜面の変化に応じて歩行パターンが変化するシミュレーション結果が得られている。すなわち、脳神経系が無くても、身体のみで上に見た除脳猫と同様の行動が発現する可能性を示している。加えて、2脚の受動的動歩行の存在性と分岐現象 [5] や安定解析 [6]、成長に対する適応性 [7] などが報告されており、さらには、2脚の受動的走行のシミュレーションや実験によってその存在性が示されてきている [8]。

これら歩行現象の例は先のシロアリの例よりももっと極端で、いわゆる制御則が全く無いのに制御されているかのように思える。特に2脚受動的動歩行については、定性的な説明ではなく、安定化のためのフィードバック構造がシステムに内在していることが理論的に示されている [6]。しかも脚機構と斜面を切り離すとフィードバック構造は消失する。ちょうどシロアリを蟻塚という「場」から引き離すと蟻塚を構築する能力が消えるのと同様である。

これらの状況を鑑みると、(1) 生物の制御系においては、制御則が独立に区別されているとは限らず、制御対象や場との境界が不明瞭になっているのではないか、(2) いわゆる制御則が除去されても何等かの制御則と見なせる要素が制御対象と場との間に残ることもあるのではないか、(3) その要素は制御対象と場とが分離すると消失するものではないか、という考えが自然に生まれてくる。

以上の考察から、生物を制御系として捉えたときの表現としては、図2のような通常の制御工学で見



図3 除脳猫 (T. G. Brown, 1939) [3]

¹ 動くことができる生物が持っている、無限定環境下におけるリアルタイム環境適応能力のことを「移動知」と呼ぶこともある。これは科研費特定領域のプロジェクト(領域代表: 浅間一, 期間: 平成17年~22年) [9] で生まれた造語である。

² アクチュエータを持たない脚構造が緩やかな坂道を歩き下る現象で、このような現象そのものは古くから知られていたがロボットの分野で強く認識されるようになったのは1990年くらいからである [10]。

られるブロック線図ではなく図4のように捉えるべきではないかという考えに至る。ここで重要なのは、(a)「場」を陽に考慮している、(b)「制御対象」、「制御則」、「場」が重なっている、点である。筆者らは(a)(b)を併せて「不可分問題」と呼び、生物制御系を考える上で重要な観点の一つであると推察している。



図4 生物制御系の捉え方

3. 陰的制御と陽的制御

本章では、先に問題提起した「不可分問題」を解く方法を考察することによって、これまで述べてきた生物制御系が有する不思議さに迫ってみよう。

「不可分問題」において最も重要なポイントは制御対象と場（さらには制御則）とが「重なっている」という定性的な感覚をどう捉えるかである。これに対して筆者らは次のような考え方を提案している[11][12]。すなわち、図4のように見える制御系は少し斜めからみる（図5左）と、実は図5右のように制御対象、制御則、場の間隔があいており、その間に第4の要素が存在しているのではないかと、という考え方である。この第4の要素は、(a) 制御則・制御対象・場の間に埋め込まれており、(b) これらの相互作用によって生まれ、ある種の制御則として

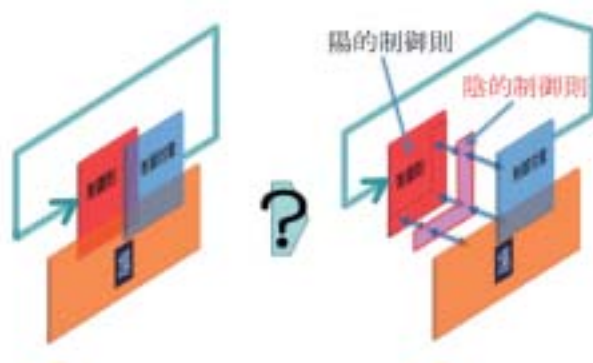


図5 陰的制御と陽的制御

働き、(c) 相互作用がなくなるとそれと共に消失するものである、と捉える。ただし、図5左（あるいは図4）のように前から見ると他の要素と重なっており、その存在に気づき難くなっていると考えられる。その意味で（もし存在するならば）この要素を「陰的制御則」と名付け、これまでの制御則をあらためて「陽的制御則」と呼ぶことにする。そして、『「制御則」とは「陰的制御則」と「陽的制御則」を併せたものである』とする。これが本稿の最も言いたいポイントである。

なお、本稿では紙面の制約上定性的な記述でとどめているが、いくつかの具体的な例に対して実際に陰的制御則を定式化している。文献[11][12]などを参照されたい。

4. 生物の環境適応機能と陰的制御

これまで生物制御系における制御則を漠然と一体化して捉えていたのを、前章で導入した「陰的制御則」と「陽的制御則」からなると考えると、いくつかの不思議に対して納得のゆく解釈が可能になると考えている。

まず、シロアリについては、彼らの微小脳は小さな陽的制御則を意味し、その彼らが巨大な蟻塚を構築する能力が発現しているのは、シロアリ（制御対象）と蟻塚（場）との相互作用によって陰的制御則が表出し、陰的制御と陽的制御を併せて高度な行動が可能になっていると解釈できる。

また、除脳猫やそのもっとも極端な現象である受動的動歩行においては、陽的制御則がほとんど無く（あるいは全く無く）すべて陰的制御則で歩行を実現していると思わせる。ここで興味深いのは、この陰的制御則はトレッドミルの速度や斜面の傾斜角の変化、すなわち場の変化、に対して歩行パターンを適応的に変化させる能力を持っているという点である。

さらに、これらの例において重要でありかつ環境適応機能を発現する契機になっているのが、陰的制御則が持っている「制御対象と場との相互作用によって表出し、その相互作用が無くなると消失する」という性質である。これはすなわち、場の変化は陰的制御則の変化として制御対象に影響が及ぶことを意味し、それゆえ、その上位に制御性能をさらに高めるべく構築される陽的制御則は、陰

的制御則の変化に適應するように設計されるという設計指針が生まれると解釈できる。あるいは、全体の制御性能を得るために必要な制御計算を陰的制御則に委ねているとも解釈でき、その結果、単純な陽的制御則によって所望の行動が実現できるという考え方も成り立つ。

まとめると、『生物の環境適應機能の発現には陰的制御則の存在が不可欠であり、生物はこの陰的制御則を活かすことができる陽的制御則を構成している(図6参照)。そしてその機能の理解には陰的制御則と陽的制御則のどちらかがわかればいいのではなく、両方を併せた考察が必要である。すなわち、これまでの研究で抜けていたのは陰的制御則である』という仮説の提案である。

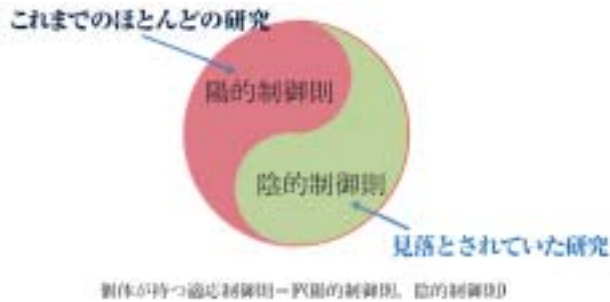


図6 知能的行動における双対構造

5. ロボットの知能化と陰的制御

本稿では生物のリアルタイム環境適應機能に注目し、そこに存在する「不思議」を起点に議論してきた。そして前章末の「まとめ」のような仮説を紹介した。そこでの議論の前提には生物が想定されているが、実は、本稿の内容は生き物のみならずロボット等のように環境適應機能を付加しようとしている知能機械システムの制御系設計にも通ずることに気がつく。すなわち、ロボットにおいてもリアルタイム環境適應機能を実現することは生物の場合と力学的には同様な状況であるはずなので、その実現のためには陽的制御則の高度化を目指すことに加えて、陰的制御則の存在を陽に意識してそれを巧く取り込むことが重要である、という結論が得られる。もちろん、ロボット身体と環境との相互作用の重要性はこれまでも意識され、議論されてきているが「陰的制御則」という考え方をもちことでより問題が明確になるのではないかと考えている。

6. おわりに

様々な動くものをみていると、なぜこんなに簡単な制御則しか内蔵されていないのに、このように合目的な作業が実現できるのだろうか、と疑問に思うことがある。この感覚は生物でも人工物でも味わうことがある。特に微小脳しか持っていない昆虫の動きなどをみるとしばしばそのように感じる。このようなとき、筆者らは、制御対象と場の相互作用によって陰的制御則が生まれており、それが陽的制御則を補完しているように見える。ロボットに対してリアルタイム環境適應機能を期待する場合も、まさに同じような問題に直面すると言えよう。いくら陽的制御則の能力を高めても昆虫のような環境適應能力が見えてこない理由の一つに陰的制御則を考慮してこなかったことがあるのではないだろうか。

ここで紹介した議論はまだまだ仮説の段階で、今後はより多くの実例の探索と理論解析、そして、生物における陰的制御則の発見を目指す必要がある。また、従来の制御工学のように「場」を制御系の外と考えるのではなく、一体化して陽に考慮する制御系を考えると興味深く、いわゆる制御理論が外に広がって行くに違いない。

謝辞：本研究は、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應的運動機能の発現 - 移動知の構成論的理解 -」で得られた成果に基づいている。また、本原稿の内容は、石黒章夫氏(東北大学)、鄭心知氏(ASTEM)、杉本靖博氏(大阪大学)、大脇大氏(東北大学)らとの議論の中で生まれた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] マイク・ハンセル(長野, 赤松共訳): 建築する動物たち--ビーバーの水上邸宅からシロアリの超高層ビルまで, 青土社(2009)
- [2] <http://australianpelican.blog54.fc2.com/blog-entry-520.html>
- [3] T. G. Brown: Decerebrate Cat Movie (1939), in Video: The Basal Ganglia and Brainstem Locomotor Control, by E. Garcia-Rill(1989)
- [4] K. Nakatani, Y. Sugimoto, K. Osuka: Demonstration and Analysis of Quadrupedal Passive Dynamic Walking, Advanced Robotics,

- Vol.23, No.5, pp.483-501(2009)
- [5] 大須賀, 桐原: 受動的歩行ロボット Quartet II の歩行解析と歩行実験, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, pp.737-742(1999)
- [6] 杉本, 大須賀: 受動的動歩行の安定性に関する一考察 - ポアンカレマップの構造解釈からのアプローチ, システム制御情報学会論文集, Vol.18, No.7, pp.255-260(2005)
- [7] M. Iribe and K. Osuka: Design of the Passive Dynamic Walking Robot by Applying its Dynamic Properties, Journal of Robotics & Mechatronics, Vol.19, No.4, pp.402-408(2007)
- [8] 小山, 山口, 大脇, 石黒: 弾性要素を活用した受動走行の実機実現, 日本機械学会 ROBOMECH2009, 2P1-D05(2009)
- [9] 移動知 HP:<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>
- [10] T. McGeer: Passive Dynamic Walking, Int. J. of Rob. Res., Vol.9, No.2, pp.62-82(1990)
- [11] 大須賀: 制御系における「埋め込み問題」とは? - 生物/人工物の運動制御機能の理解に向けて, システム/制御/情報, Vol.53, No.12, pp.494-499 (2009)
- [12] 大須賀, 石黒, 鄭, 杉本, 大脇: 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, Vol.28, No.4(2010,5) (掲載予定)

