

自律運動からみる自然知性

池上高志

Takashi Ikegami

東京大学大学院 総合文化研究科 東京 153-8902

Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, Tokyo 153-8902

生命の自律運動は、単なるノイズでもカオスでもなく、環境との相互作用の中でうまれる複雑なダイナミクスである。実際の生物（ハエ）で観察される自律性の例を紹介し、可能なシミュレーションモデルとして「身体化されたカオス的遍歴」によるダイナミックな相互作用様式を提案する。さらにそれを、ロボットシステムへの実装する。最後に自律運動の進化的な起源をさぐるために、自律的な運動をする油滴の化学実験を紹介し、自律的な運動の全体のシナリオを議論する。

1. はじめに

生命システムには、目的のない動き、揺らぎ、遊び、気まぐれ、としか分類できない運動パターンがある。一方目的を持った動きを設計する際に、そうした揺らぎは余分なものである。例えば、自動販売機で缶ジュースを買おうとしたら、揺らぎがあって押した通りのジュースが出てこない、あるいはいくつも出てくるなどは、うまく動かない壊れた自動販売機とである。コンピュータのチップや飛行機やロケットの制御では精密な動きが要求され、ノイズは極力抑えられる。

このような人工システムの設計においては、プログラム可能でインプットとアウトプットの明示的な関係性が重要視され、それ以外は余分なでも不確定性/ノイズとなる。進化ロボットクスにおいても、あるセンサー入力とモーター出力の対のパターンを進化させるが、その結果外部からの命令なしに動くのが「自律的ロボット」で、そこでも運動の構造の揺らぎは邪魔物である。

しかし自然システムでは、このような図式が逆転している。バックグラウンドに揺らぎのダイナミクスがあり、その揺らぎの一部が時に構造化して、意味付け可能なセンサーとモーターの関係が出現する。しかし、大事なのはあくまで揺らぎのダイナミクスである。自然システムにとって大事なものは、その揺らぎのダイナミクスを維持することである。

この小論では、そのような状況に応じて意味付け可能なセンサーとモーターの構造を作り出す揺らぎのダイナミクスを考え、それをもとに生命の自律性 = 自然知性について考えて行こうということにある。そこで、i) 生命はどのような運動の揺らぎを持っているのか、ii) それは構成可能であるか、iii) 進化的にみた生命の自律性の起源とはなにか、それを順番に考えて行きたい。

2. ハエの自律運動

ハエの運動には自律運動がある。例えばイエバエを深さが2センチほどの幅が50センチくらいのアクリルのケースで飼う。アクリルのケースの中には、砂糖水を数滴たらしおこう。すると、ハエは砂糖水を吸ってはまたふらふらと歩き出し、また砂糖水にひっかかるという運動を示す。このハエの砂糖水から砂糖水への飛び移りのダイナミクスは、しかし単にランダムな運動にはみえない。それを実証するため、われわれはアクリルケースの上からビデオ撮影し、その飛び移りの軌跡を解析した。その結果次のことが分かった [Takahashi08]。

Contact: ikeg@sacral.c.u-tokyo.ac.jp

i) ハエの運動は頭の向きと動く速度の2つの（ほとんど独立にみえる）変数で表すことができる。頭の向きの時系列と速度の変化の時系列を、Auto Regression法を用いて解析した。その結果ダイナミクスは5 - 6次元と0 - 1次元の状態を遷移していることがわかる。

ii) ハエの軌跡の空間分散を取ると、ブラウン運動ならば動き始めてからの時間に比例するが、ここでは時間のあるベキ（大体1.5くらい）に比例する。

つまり、ハエは実効的な自由度を変遷させながら運動しており、その結果としての軌跡は「異常拡散」を示している。実は砂糖水がなくてもハエの異常拡散は観測される。このことはハエは環境の情報によらずにある不規則な運動を生成するダイナミクスを内部的に持っていると考えられる。

このハエの例は、非常に簡単で測定可能な生命の自律性の例であり、また揺らぎがメインであり、意味付け可能な運動（砂糖水に停留する）というのは、その一部分で現れるにすぎない。このようなハエの自律性の定量化は、最近 [May07] によっても報告されている。

ところで [Swenderen04] では、ハエの脳活動が足の運動とつねに強く関係つけられているのではなく、しばしば数時間に渡って「つながり」が切れる（弱くなる）ということもハエの神経活動と足の運動の相関をh調べることで明らかにした。こうしたハエの内部ダイナミクスの情報は貴重である。ハエは脚を介してつねに環境と強く結合しているわけではなく、強く結合したり弱く結合したりを繰り返す。そのことがこの実験から示唆される。これは次に示すような [Ikegami07] の理論とよく呼応している。

3. 自律性の理論

環境によらないシステムの揺らぎの起源、としてまっさきに考えられるのは、ある種のカオス力学系の存在であろう。しかしあるアトラクターに落ちてしまって状態が変化しないのであれば、そこには生命固有の揺らぎは見えてこない。さきのハエの例から分かるように、大事なものは必要に応じて意味付け可能な振る舞いを示すバックボーンの揺らぎの構造である。

われわれは高次元の非線形力学系の示す、典型的なダイナミクスとして「カオス的遍歴」というものを知っている。これは、擬似的なアトラクター間を自律的に遷移していく遍歴のダイナミクスである。数学的には明らかでない部分もあるが、経験事実としてあるいはシミュレーションの事実として、そのようなカオス的遍歴はよく観測され、多くの特徴づけが行われている。しかし多くのカオス的遍歴もシステムの環境との相互

作用を仮定していない。

そこで、ここでは環境と相互作用しつつ、カオスの遍歴としての特徴も持ったシステムを考えてみる。これは内部に不安定な(カオスにもなりうる)系を用意し、それを使って空間を動き回る移動体を設計することである。この内部ダイナミクスとして、FizHugh-南雲 (FHN) 方程式を用い、相互に「伝達速度の異なる」パルスを送り合うランダムなネットワークを用意した。次にこれを搭載したシミュレーション上の仮想ロボットをデザインし、その運動を解析する。その結果

i) システム内部の状態(カオスのか周期的か)によって、環境から(この場合は下地のパターン)の入力を受け付けるかどうかが決まる振る舞いが観測できた。

ii) 仮想ロボットの運動は、擬似的な周期運動とカオス的なものを経巡る、遍歴状態を示す。

この運動を仮想ロボットが、環境と相互作用することでかえって出現するカオスの遍歴であることから、身体化されたカオスの遍歴、と呼ぶことにする。これはさきの [Swenderen04] のハエの実験と似通ったところがあり、身体化されたカオスの遍歴は、環境とのダイナミックな「カップリング/デカップリング」を行うところに特徴があるといえる。理論的にはこれが生命の自律性の(必要)条件になると考えられる。

環境とのカップリング/デカップリングが示す気まぐれな振る舞いを、われわれは「音の環境」における運動に置き換え、実際のロボット(zmp社製のmiuro)に実装した。それは頭にipodを乗せてその音楽を入力として、ダンスのパターンを変遷させていくロボットが生まれた。詳しくは[Aucouturier08]を参照してもらいたい。

4. 油滴の自律運動

生命の自律性はいかにして進化したのか。われわれはある種の化学反応が自己組織化のすえに、自発的に運動を開始するシステムを構成してみせた[?]。それを可能にするのは、化学者Pier Luigi Luisiの考えた特殊な化学のスープ(脂質2重膜ではなく、1重膜であるミセルを含む水溶液)である。このスープの中に、無水オレイン酸を主成分とした油に、ニトロベンゼンを混ぜ、Luisiのスープの中に入れ、かつpHを10より大きくしたところで、油滴の自発運動を確認することができた。

無水オレイン酸は、水と反応してオレイン酸(両親媒性分子)をつくり、それが油滴表面上を覆って、油滴が水溶液中で安定に維持される。それと同時に、この油滴内部に対流(球体の油滴の南極から北極に向かって直線的に流れが生じ、表面内側に沿って北極から南極に向かって流れが生じる)が生まれ、全体として油滴は北極のある方向に動き出す。オレイン酸の皮膜はちょうど南極にあたる部分でオレイン酸の「尻尾」をつくり、北極にあたる点を頭にして動くのである。こうした対流構造の生成には、表面張力の違いから生じるマラゴニー効果が原動力と思われる。

こうした油滴の運動は、環境の条件や油滴そのもののサイズによってその振る舞いを変化させる。例えばpHの勾配が環境にあるとその勾配を登るような(phの低いほうから高いほうへ動く)振る舞いを見せるし、上の運動は数百マイクロメートルの大きさだが、数センチの大きさにしてやると、豆がはじけるような奇妙な振動運動をその場で繰り返す。したがって、油滴は運動開始と同時にすでにセンサーという外界に対する感受性を獲得していると考えられる。

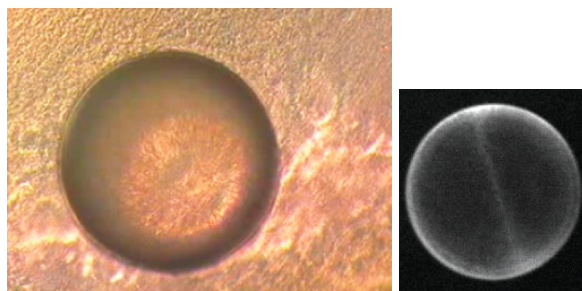


図1: 数百マイクロメートルのサイズを持つ油滴が化学反応を起こし、生じる両親媒性の分子が膜を作り油滴を覆う(左: 約数百マイクロメートルの油滴全景)。油滴は自律運動を生成し、油滴の内部には対流構造が生成される(右: 蛍光物質を入れて対流構造を視覚化)

5. まとめ

環境の意味というのはもともとそこにあったものではないし、システムの内部のみで生成されるものでもない。環境とのダイナミックなカップリングとデカップリングを介して、システムは意味を作り出し、それを発展される。それは、自律運動によって自動的に生まれる自然な知性の形である[池上高志 07]。この自然知性が進化の中でどのように多様化していくか、その基底をなす複雑なダイナミクスはカオスを超えているか、そうした問題が今後のテーマとなる。

参考文献

- [Takahashi08] Takahashi, H. Horibe, N. Ikegami, T. and Shimada, M. "Analyzing House Fly's Exploration Behavior with AR methods" (submitted to JPSJ, physics/0702170).
- [May07] May, A., Hsieh, C., Sugihara, G., and Brems, B. "Order in Spontaneous Motion", PlosOne (2007) Issue 5. e443.
- [Swenderen04] van Swinderen B., Nitz, D.A., Greenspan, R.J. (2004) Uncoupling of Brain Activity from Movement Defines Arousal States in Drosophila, Current Biology 14, 81-87.
- [Ikegami07] Ikegami, T. "Simulating Active Perception and Mental Imagery with Embodied Chaotic Itinerary", Journal of Consciousness Studies 14 (2007) No.7 pp.111-125
- [Hanczyc07] Hanczyc, M., Toyota, T., Ikegami, T., Packard, N. and Sugawara, T. "Chemistry at the oil-water interface: Self-propelled oil droplets" J. Am. Chem. Soc.; (2007); 129(30) pp 9386 - 9391
- [Aucouturier08] Aucouturier, J.-J. and Ogai, Y. and Ikegami, T. Using chaos to trade-off synchronization and autonomy in a dancing robot, in (Aucouturier, J.-J., ed.) Trends and Controversies, IEEE Intelligent Systems, vol. 23, No. 2, 2008, pp. 74-85.
- [池上高志 07] 池上高志「動きが生命をつくる」(青土社, 2007)