

非線形力学系として統合されたロボットの情報処理と制御—運動の制御理論から知能の制御理論へ

中村 仁彦*

* 東京大学 大学院 情報理工学系研究科
東京都文京区本郷 7-3-1

* Graduate School of Information Science and Technology, University
of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

* E-mail: nakamura@ynl.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

人工知能は計算機科学の中心的課題として、心理学、哲学、生物学、神経科学、認知科学、脳科学、ロボティクスと広く関わってきた。ロボティクスでは R. Brooks の研究が、生物や行動科学の観点で関心をもたれている。心理学、哲学では J. J. Gibson のアフォーダンスで代表される生態学的アプローチや H. Bergson のイメージと動的図式など認知過程で身体の実たす役割がクローズアップされている。脳科学においても非侵襲的計測法により、運動を伴わない認知活動時に運動野が活性化されることが観測されることなどが報告されている。最近では、意識や心の問題も量子脳理論などの形で力学現象として、関心をもたれることも多い。

ヒューマノイドロボット研究の進展とともに、機械の知能を全身で実現する技術の開発も急務になってきている。本稿ではロボットの知能の問題について、1つの力学的視点を解説したい。

2. 「表象なき知能」

ロボットシステムの内部の情報の流れは「認識」、「計画」、「制御」という階層構造をもち、情報は1つの処理の終了を待ってつぎの処理に送られるという固い順序構造をもつと考えられていた。認識はセンサによる観測を通して外界とつながり、計画は大規模、小規模をとわず何かの最適化問題を解決して、制御に受け渡すリファレンスを生成する。制御はモータを介して仕事をして外界に働きかける。高度な計画や巧みな制御は、ときとして知能と呼ばれることがあったが、むしろ技能・技量とよぶべきものであろう。もっと「もやもや」としたいわゆる知能の問題については認識に含まれると考えられていた。認識の1つの分野はロボットが存在する環境のモデルをもち、センサ信号と照合して自分のおかれた状況を計算することであった。環境モデルを既知とせず、その獲得や、修正を自動的に行うことも重要な問題であった。

「表象なき知能」の概念をもって上述のような分業的階層構造を色あせさせたのは R. Brooks¹⁾ である。分業的階層構造ではセンサ信号からモータ制御までの経路にはそれぞれの階層で大きな計算をもつ。したがってロボットの行動

キーワード：ロボット(robot)、知能(intelligence)、制御理論(control theory)、非線形力学(nonlinear dynamics)、脳型情報処理(brain-like information processing)。

JL 0006/01/4006-0426 © 2001 SICP

はのろまで退屈なものにならざるをえない。彼はセンサ信号からモータ制御までの経路を極端に短くして単純な反射的な動きを数多く用意し、それらの間で抑制・被抑制構造をもたせた²⁾。彼はこれをサブサンプリング・アーキテクチャと名付け、これが知能の構成法であると主張した。環境の変化に敏感に反射行動が切り替わるため、彼のロボットは複雑な幾何環境におかれたときに素早く反応して、まるで昆虫や小動物のように環境に応じた多様な行動を見せて、人々を驚かせた。

Brooks の主張は以下の3つの点にある。

- (1) このロボットは環境や自分自身のモデル表現を一切もたない。
- (2) 複雑な行動は計算の複雑さから発生するのではなく、環境の複雑さから生じる。
- (3) 高度な知能もこのような構成を重ねることで実現できる。

彼の主張は以下の点で深い示唆に富むものであろう。

- ・知能の即時性
- ・実環境に開放されたシステム設計
- ・実環境の多様性に対する表現の脆弱性

計算速度という観点では近年のコンピュータは大きな飛躍を遂げている。時間をかけた(つまり準静的な)厳密性を追求する問題解決ではなく、実時間で一応の答えを見つけてタイミングを失することなく行動に反映させることが生物の知能であるという点において、第1の示唆は生きている。

第2、第3の示唆はともに実環境の問題である。知能の構成において、環境をモデル化して取り扱うことは危険である。モデル化には仮説に基づく低次元化が必要であり、それに基づくシステム設計はしばしば脆弱でロバスト性に欠ける。そのため整備された研究室や工場での実験は有効でも、実環境の多様性の前では使い物にならない。このような実環境の多様性に対して開放された、つまり多様性の前で立ち往生しないようなシステム設計が必要である。

従来の分業的階層構造のシステムは集中的であり、どこかで情報が滞ってしまうと、その後の計算は不可能となり、すべてが機能しなくなる。一方、Brooks のシステムは並列分散的であり(川人³⁾はこれを階層構造ではなく、重層構造だと説明する)、どこか一部に問題が生じても残っている

ネットワークである程度の機能を果たすような、生物的な特徴をもっていた。このためロボティクス、人工知能だけでなく、生物学、心理学、脳科学まで広い周辺領域にわたって行動と知能の問題を提起した。感覚系から運動系への情報のつながりをセンサリ・モータ系と呼ぶ。彼の構成論で最も大きなメッセージはセンサリ・モータ系を集中的でなく、並列分散的に構成することがシステムのロバスト性を高め、環境の多様性に寛容なシステムを作る秘訣であるという点であると理解している。

このように刺激に対する反応則を内蔵した機械はデカルト・オートマトン、それにフィードバック・コントローラを加えたものはクレイク・オートマトンと呼ばれる⁴⁾。

Brooks のロボットは、同じネットワークと環境が与えられると同じ結果を出すクレイク・オートマトンであり、これはチューリングマシンと等価であるといわれる。つまり、さまざまな工学的・実用的な構造の特長をもつ設計論であるものの、知能の発現について何か本質的な「トリック」をもつわけではなく、計算機が通常行うアルゴリズムを駆使して到達できるところ以上のところへわれわれを導くものではない。

3. センサリ・モータ・マップ

3.1 反射的ロボットハンド

サブサンクション・アーキテクチャは実世界に立脚した知能の構成論であるが、目的や意味のある行動を発現させるための設計論につながらないことが大きな課題であった。重点領域研究「感覚と行動の統合による機械知能の発現機構の研究」(95-97年、代表：井上博允)において、著者はセンサや知能の問題に制御理論的な接近を試みた。トラッキングビジョン等の画像処理ボードも市販され、知能に不可欠なビジョンセンサを普通のセンサとして使えるようになっていたのは幸いだった。

知能の即応性は重要であるが、計算機の性能が高くなれば従来の制御アルゴリズムを反射行動のように集めて分散ネットワーク的に扱うことができる。意味のない細かな反射行動をたくさん集めてホモジニアスな分散ネットワークを作り、これに自己組織化や学習によって目的のある行動を発現させるよりも、目的に合った制御アルゴリズムを集めた粒の粗い行動から構成したヘテロジニアスな分散ネットワークを作るほうが意味のある行動を発現させやすいのではないかと、これまで多くの研究成果が蓄積されている制御アルゴリズムを使わない手はないとも考えた。

文献⁵⁾では、図1のように3関節3指ハンドを用いて、目の前にやってくる物体を何でも握むハンドを研究した。これはセンサ信号と多少の計算を要するいくつかの行動を結ぶ写像を教師あり学習で獲得する問題であった。センサ情報としては関節角度センサ、各指先の3軸力センサのほか、上方および側面に置かれた2台のビデオカメラの画像を4

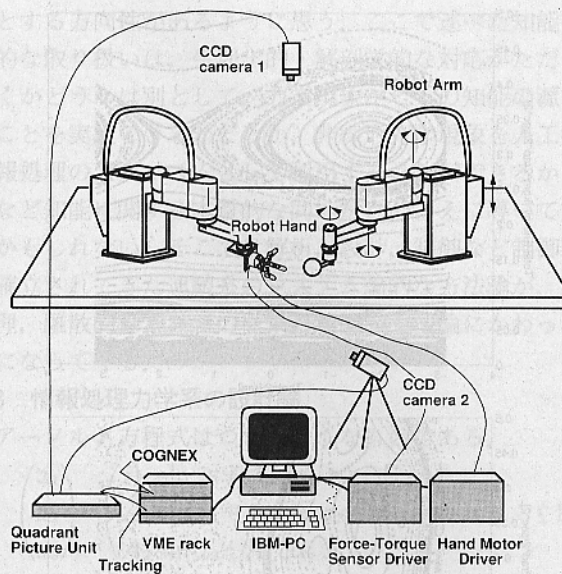


図1 反射的ロボットハンド

画面分割機で合成したトラッキングビジョンとコグネックス社のビジョンシステムの両方に送って得られる面積、重心、主軸方向などさまざまな画像情報が含まれていた。指の行動は、3指同時の開閉、指ごとの開閉や、主要な関節の単独回転などの単純なものであった。写像は、動径基底関数で表現する。そのパラメータを、センサ信号の数の次元をもつユークリッド空間（センサ空間）中に行動の数だけばら撒かれた点の座標で表わすというものであった。ある点の座標はそれが代表する1つの行動と各センサとの相関を表わした。学習は準静的にこれらの点群をセンサ空間の中で移動させて行った。行動は選択的に選ばれるのではなく、動径基底関数によって相関値が計算され、それによって複数の行動が重ね合わされて生成されるという特徴をもっていた。

文献⁷⁾では球と、横長の直方体を把握する学習を交互に繰り返すことで、どちらも把握できる汎化された点配置を獲得することができた。実験は物体を糸で吊り下げたり、細い棒の先に取りつけたりして、揺れながらハンドに近づくものであった。パラメータの調整やその後の学習は簡単ではなかったが、分散ネットワーク的に構成されたロボットハンドのコントローラは、このような実環境の多様性をもつ状況でも、物体を把握することができた。

3.2 センサリ・モータ・マップと力学系

著者らは非可積分力学系の制御の問題として、自由関節マニピュレータの2次非ホロノミック性について研究を行っていた^{8)~10)}。そこに現われるカオス的な挙動の面白さ(図2)に引かれて、その応用として提案したものがカオティック移動ロボット^{11),12)}である。これはアーノルド方程式¹³⁾を移動ロボットの運動方程式に組み合わせることで、そのエルゴード性を獲得し、図3のように地図やモデルを

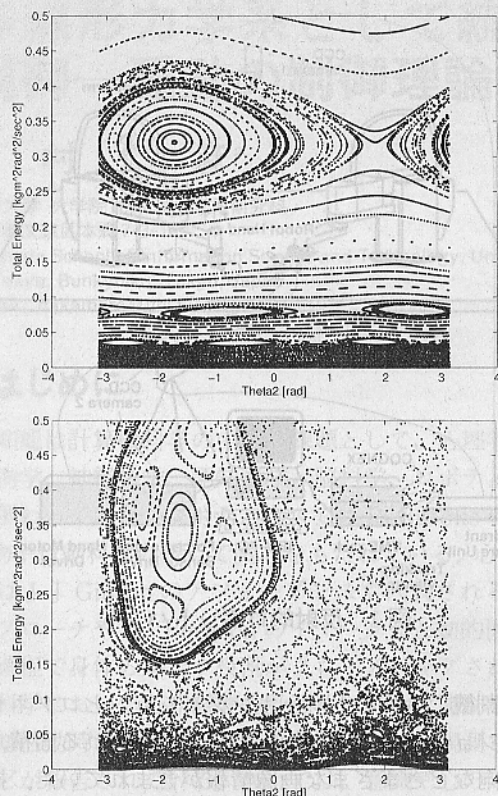


図2 自由関節マニピュレータのカオスの挙動

もたなくても閉空間を隅々まで動き回るロボットを実現したものである。

文献⁵⁾ではセンサ空間において点群を自己組織化するために、図4のような力学系を導入するアイデアを紹介した。この力学系には当初は天体力学系の保存運動やカオス挙動を用いることを考えていたが⁶⁾、天体力学系の運動は当然ながら3次元空間に限られ、センサ情報の数と用意した数の反射行動をその中に埋め込むのは困難に思われた。また、シミュレーションして見ると天体力学系の挙動は近傍の天体にきわめて強い影響を受ける特徴的な性質があり、写像を目的に向かって変化させるような方法を構築するのは難しい。非線形力学系の非可積分性やカオス性などを利用した学習や自己組織化が行えないかが著者の関心であったが、十分な議論はできていなかった。

4. 知能の制御理論へ

4.1 パラダイムシフト

1996年12月に発表されたHONDA P2は26関節（自由度）をもち6個の非駆動座標と合わせて、32個の一般化座標をもつシステムである。この研究が10年間1つの企業において極秘に行われていたことには大きなカルチャーショックを感じた。技術的にも、このような大規模なシステムを自己完結的に実現した実装技術と、難しいとされていた2足歩行が高い完成度で実現されたことに驚いた。

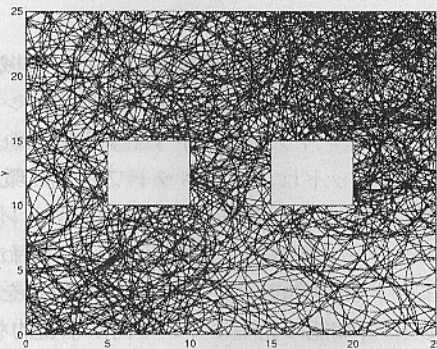
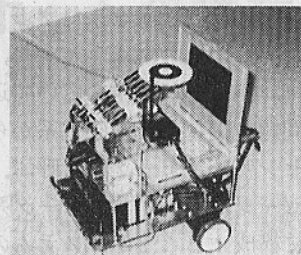


図3 カオティック移動ロボット：実験装置とシミュレーション結果

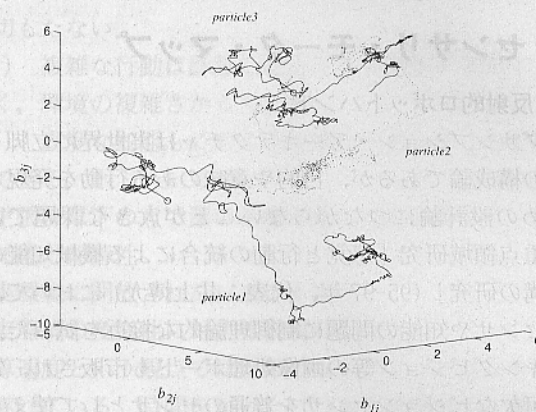


図4 センサ空間への力学系の導入

これによってロボット制御の技術目標は大きな変化を求められるようになると思われ、著者には感じられた。ロボット制御のさまざまな理論、アルゴリズム、計算法が実験室環境のただか6自由度の問題で十分一般的であるという心理的な上限が取り払われ、大規模系に対してもある程度の実時間性があり、自由度の数に関わらず効率や性能の最適性が保証されるようないわゆる「本物」のアルゴリズムや計算法が求められるのではないかと。これらのヒューノイドの全身の自由度を使いこなす制御のパラダイムが求められるようになるのではないかと。前者については本章の最後で少しふれる。はじめに後者の問題を考えよう。

ヒューノイドでは、2足歩行、腕を使った操作、指での把握、膝を曲げたり腰を屈めたりしながらの作業、全身を使っている表現などなど、さまざまな運動が求められる。自律的な高度知能をもたない作業遂行ロボットであるとして

も、これらの動作はあらかじめ完全に決められた順番で呼び出されるのではない。ヒューマノイドが歩いていて作業する場合に、すでに実験室で固定されたロボットのような整備された環境での精度を期待することは無理である。運動は状況に応じて変形され、修飾され少しずつ異なった運動として現れるようであれば、このような実環境で使い物にならない。

それぞれの動作を丁寧に作りこんだとしても、これらを単純な状態遷移によって切り替えるのではなく、状況によって変形、修飾して発生させるコンピュータのオペレーティングシステムのようなメカニズムはどのように作られるのであろうか。これはすでに立派な知能の問題であるし、設定の仕方によっていくらかでも深くなる問題ではないか。著者は個々の運動の制御理論から、システム全体を統括する制御理論へのパラダイムシフトが求められているように思う。

4.2 知能の力学的問題

著者らはこれを前節で述べた、センサリ・モータ・マップに力学系を設計する方法で実現できるのではないかと考え、1つのプロジェクトを推進している。以下は、現在研究中の著者らのプロジェクト(「自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」科学技術振興事業団「戦略的基礎研究推進事業(CREST)」)の方向性についての説明である。

従来から蓄積されてきた腕の制御理論、指の把握や操りの制御理論、動的歩行制御理論、ステレオビジョン・アクティブビジョンの理論、接触や衝突の制御理論等々を積極的に利用する。これらをプリミティブ(自律行動単位)と呼ぶ。これらはそれぞれがフィードバック制御系である。またパラメータによって可変構造をもつように作ることが必要である。プリミティブを荒い粒度のノードとしてネットワークを構成する。このネットワークに非線形力学構造を設計し、カオスや引き込みを用いて自己組織化する。

この問題には、

- (1) ヒューマノイドの運動プリミティブの開発
 - (2) それらを実時間で実行するアルゴリズムやソフトウェアの開発
 - (3) プリミティブをノードとするネットワークの開発
 - (4) ネットワークの非線形力学系のモデル化
 - (5) ネットワークの自己組織化や制御理論の開発
- などの課題が存在している。この中で(4)と(5)は特に挑戦的な課題である。この接近法的重要性はこのあとに広がる知能の本質の理解やその人工物への実装を通じての実証につながるかもしれないという点にある。

次章で解説するように、最近の認知科学における「身体性」やそこから発展する「記号・言語」や「コミュニケーション」の問題、さらに脳科学における「意識」、「心」の問題の底流には、脳の情報処理を力学現象としてとらえよ

うとする方向性があるように思う。ここで述べた知能の力学的な取り扱い、生理学的・解剖学的な対応がただちにつくかどうかは別として、力学現象がヒトの知能の源であることを実証できるかどうか、非線形力学現象を人工物の情報処理のメカニズムとして利用することができるかなど知能に関する本質的な問いかけの答えに導いてくれるかもしれない。そこでは解析、設計、制御など制御理論で確立されてきた連続系のシステム論的な方法論が、記号処理、離散的探索などの従来の知能の方法論にかわって重要になってくる。

4.3 情報処理力学系の設計論

アーノルド方程式はつぎのようなものである。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_3 \sin x_3 + A_2 \cos x_2 \\ A_1 \sin x_1 + A_3 \cos x_3 \\ A_2 \sin x_2 + A_1 \cos x_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 A_1, A_2, A_3 は定数である。この方程式は非圧縮性完全流体の運動を表すオイラー方程式の3次元トーラス上の定常解である。3次元トーラスとは周期境界条件が満たされた $[0, 2\pi]^3$ の3次元空間である。保存系であるが A_1, A_2, A_3 の値と初期条件によって、周期運動や乱流的(カオス的)運動など多様な挙動を示す。たとえば、係数の1つ A_2 が $|A_2| \ll 1$ となる場合は周期運動、 $|A_2|$ が大きい場合にはカオス的な運動となる。オイラー方程式は挙動の多様性と構造の単純さを合わせて持っている点が強みである。このため挙動の解析が容易である。

関口と著者は^{14), 15)}、アーノルド方程式を非線形挙動のモデルとして力学的情報処理を設計する試みを始めている。アーノルド方程式は保存系で無限個の周期解をもつものの、このままでは境界条件によって挙動がすべて決定されてしまい、挙動を変化させたり、引き込みを生じさせたりすることができない。文献¹⁶⁾では、1対のアーノルド方程式に入出力構造をもたせて結合系²⁶⁾を設計し、これに引き込み現象やカオスの挙動を発現させることができることを示した。

文献¹⁶⁾では図5に示すような、結合系を応用した情報処理の例を提案した。結合系的一方をセンサ・アーノルド系、

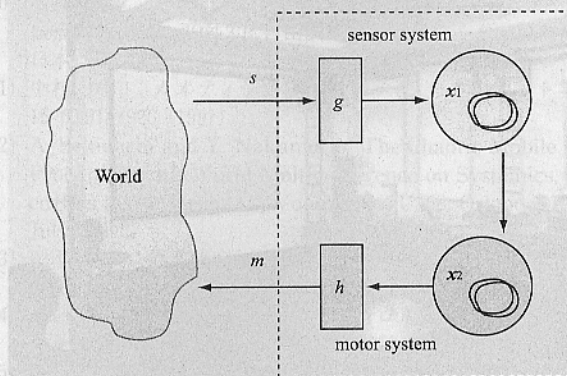


図5 アーノルド方程式の結合系と力学的情報処理

他方をモータ・アーノルド系と考えモータ系からセンサ系へと向かう結合を切断して環境へ開放する。モータ系の出力は写像 h を介してモータを駆動して、実世界に作用する。一方、実世界から得られたセンサ信号は写像 g によってセンサ・アーノルド系の入力となる。もし、合成写像 $g \circ (World) \circ h$ を単位行列にすることができれば、この実世界に開放された結合系は、開放前の結合系とまったく同様の挙動を示すことになる。非開放系を設計することで、開放系の挙動を制御することができることになる。

実際は (World) は伝達特性をもつため、合成写像を完全に単位行列とすることは実用的には容易ではなく、これが結合系の挙動を複雑にすることは想像できる。ロボットの行動制御にこのような力学的な情報処理系が利用可能かどうか現在検討を進めている。

4.4 ヒューマノイドと人間の運動計算と計測

ヒューマノイドの大自由度系に力学的な情報処理を実装する前提として、運動学や動力学的計算を着実に効率的に行うことが求められる。また人間の運動の時空間パターンに基づいてヒューマノイドの運動を生成することで、人間と共存する状況で人間に違和感のない親和的運動を行わせることができる。将来、これによって運動パターンを通して人間とコミュニケーションを行う問題に近づくことができる。著者らの CREST のプロジェクトではこれらの目的で以下のような研究開発を並行して行ってきた。

- (1) 構造可変リンク系の運動計算法とその並列計算
- (2) ビヘイビアキャプチャシステム

上記(1)ではヒューマノイドや人間を剛体リンク系とし

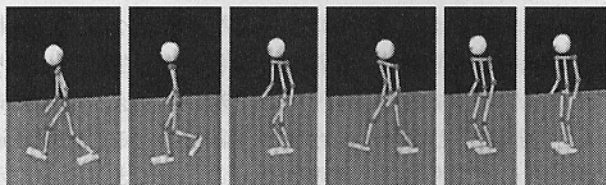


図6 ダイナミックフィルタによる運動パターン生成

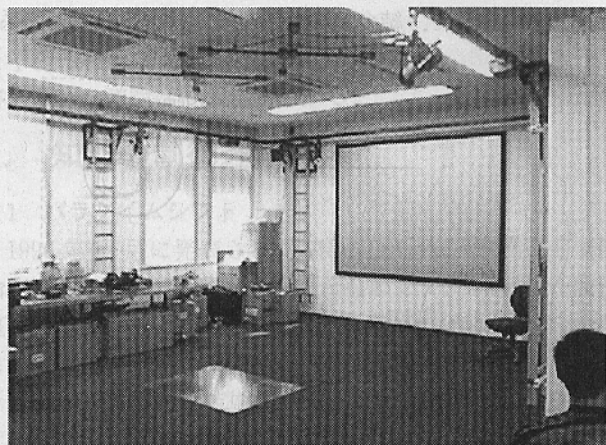


図7 ビヘイビアキャプチャシステム

て扱い運動学や順・逆動力学を計算する。運動の途中での任意な拘束の変化を許し、閉リンクになったり開リンクになったりした場合でも同じように計算することができる効率的なアルゴリズムを開発した^{17),18)}。また、その順動力学計算を、リンク数に比例した $O(N)$ の計算量で行う方法を開発した¹⁹⁾。これらのアルゴリズムは NEDO の「人間協調・共存型ロボットシステム (HRP)」の仮想ロボットプラットフォームの計算エンジンとして採用されている^{21),20)}。また、CG の制作環境への応用も行われつつある²²⁾(図6)。

上記(2)では人間の運動の時空間パターンと力情報、さらに運動のきっかけになる視覚情報を同時・実時間で計測することを目指している。高速度カメラとダイレクトドライブ式のパンチルト機構を用いた光学的モーション・キャプチャシステムとそのデータからの運動再構成計算法の開発^{24),25)}を行った。さらに床反力計とアイマークレコーダ、無線脳波・筋電計測器、3次元画像提示を統合した同時・実時間計測環境(ビヘイビアキャプチャスタジオ)を構築した。図7に計測環境を示す。

5. 力学と脳型情報処理

W. Freeman^{29),30)} はウサギの嗅覚神経系(嗅球脳波)において研究し、嗅ぎなれたにおいては秩序が見られ、新しいにおいを嗅ぐ際にはカオスが観測されることを発見した。また、嗅球の神経回路モデルをつくり実験で得たカオス現象を再現することに成功した³¹⁾。

津田²⁷⁾ は「カオスの脳観」の中で少数自由度の秩序状態(不完全なアトラクターで完全に安定でないもの)の間を高自由度の乱れた状態を経由しながら渡って移る様子をカオスの遍歴(Chaotic Itinerancy)とよび脳の情報処理の原理と指摘した。さらに金子との共著²⁸⁾のなかで、カオスの遍歴は力学系が記号列を生成するプロセスではないかとの論点を示し、カオスとシンボル・論理の関わりを示唆した。カオスの遍歴と見られる現象は流体の乱流(!)や光乱流の挙動の中にも現れるとしている。一方、Freeman³²⁾はこのような活動を「心」の存在であるとして、論理とは異なると考えている。

一方、R. Penrose^{33),34)} は非アルゴリズム的な動力学的法則が心の物理学の基礎であると考えている。この動力学はニューロンの電気活動よりもずっと小さな世界で働き、神経細胞の中で細胞の骨格を成すたんぱく質でできた微小管がその役割を担っているといわれる。そこでは量子効果による非線形な動力学が意識や心の情報処理を行っているという。量子脳理論と呼ばれる説である。非チューリング・マシンのなつまり非アルゴリズム的な情報処理の源を量子力学の非決定論的側面にあると理解されて受ける批判を Penrose は認めていない。彼は量子力学が、アインシュタインの一般相対性理論によって修正された新しい「量子重力論」が脳理論の構築には必要であるとしている。

認知科学の中でも運動や力学に関わる問題が重要である³⁵⁾。力学と脳の情報処理に関しては川人ら³⁾の一連の研究が有名である。大脳皮質領野間に双方向結合があるとの解剖学的な知見に基づいて、人の速い視覚情報処理を説明する双方向性計算理論を立てた³⁹⁾。これを小脳の運動制御の神経回路モデルに展開し、運動の動力学的順・逆モデルをもち運動誤差を計算して利用する順逆緩和型神経回路モデルを提案している。ここでも運動と力学が脳の情報処理の重要な問題であることが主張されている。

N. Bernstein³⁶⁾は運動の問題を自由度の問題と文脈の問題に分けた。後者は筋肉の指令が同じでも現れる運動はその前後の運動によって干渉を受け変化する。この文脈をとられることが必要であるという指摘である。後者は、多くの筋肉の自由度を脳が集中的に制御するのは現実的でなく、筋肉間の干渉構造(協応構造、あるいはsynergy)を作り上げて制御する自由度数を抑えている。この協応構造を獲得するのが学習や熟練であるとの考えである。この観点から動的運動の力学を利用した自己組織化の原理が注目されている³⁸⁾。このような考え方は、J. J. Gibson³⁷⁾の affordanceで有名な生態学的アプローチに結びついている。

哲学者 Bergson は「物質と記憶」⁴⁰⁾のなかで視覚的な記憶と運動の筋肉感覚を「運動図式」と呼び、それらを時間の流れの中で統合するのが「動的図式」であるとした。運動のパターンを身体(物質)の世界に開いてその関係を獲得することが人間の認知活動であるという考えである。守永はこの図式が言語活動を可能にしていると説明する⁴¹⁾。つまり、図式は感覚器から入ってくる情報を記憶に結び付けて、分節化するために用いられる。この分節化が言語活動の源であるとの説である。

知覚と運動とを統合した記憶とそれによって行われる分節化は、こうして記号や言語、コミュニケーションの問題につながる。Peirce は記号と対象との関係を3つに分類している⁴²⁾。対象との類似性によって成り立つ「アイコン」、対象からの触発によって成り立つ「インデックス」、法則によって対象と関わる「シンボル」である⁴³⁾。運動のパターンの記憶から、それが対象ともつ関係、さらに一般的な法則にまで、記憶が抽象化していくのが人間の脳の特徴である。T. Deacon はむしろ、コミュニケーションが進化圧となって脳が発達した側面を指摘し、言語と脳の共進化説を唱えている⁴⁴⁾。

模倣学習はロボティクスでも、従来から関心をもたれていた研究分野であるが、大型の類人猿においてミラーニューロンが発見され生得的に模倣の能力をもつことが人間や類人猿の脳の機能的特徴を表わしていると認められるようになった。また人間の乳児の発達学習から、模倣が人間のコミュニケーションの始まりであり、多くの発達が模倣を基礎に築かれていくと考えられている。このように模

倣がブートストラップとなって、Bergson の動的図式が始まり、分節化、記号化、言語化へとつながると考えられる。運動や力学と認知をつなぐ身体性が、脳の高度機能に密接に結びついている。このような観点から、著者の研究室でも、力学的な模倣の理論とその記号化、さらにそれを用いた他者行動の理解の研究をはじめている^{45)~47)}。

6. おわりに

知能の根源に、運動と力学の身体性とその情報処理のメカニズムとしての非線形力学現象があると考えられる。どのような設計によって、力学現象を情報処理として目的的に利用できるかが、現在の脳科学においてもロボティクスにおいてもグランドチャレンジである。制御理論のさまざまな手法がこの問題に対して、アプローチを可能にするというのが著者の考えである。知能の制御理論の確立を目指したい。(2001年5月8日受付)

参考文献

- 1) R. A. Brooks: Intelligence without Representation, Artificial Intelligence, 47, 139/160 (1991)
- 2) R. A. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2-1 (1986)
- 3) 川人: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
- 4) P. N. Johnson-Laird: Mental Models, Cambridge University Press (1983)
- 5) 中村, 山崎: 反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用, 日本ロボット学会誌, 15-3, 448/459 (1997)
- 6) 山崎, 林, 中村: 単純反射動作の組合せによるロボットハンドの把持制御, 第13回日本ロボット学会学術講演会, 493/494 (1995)
- 7) Y. Nakamura, T. Yamazaki and N. Mizushima: Synthesis, Learning and Abstraction of Skills through Parameterized Smooth Map from Sensors to Behaviors, Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2398/2405 (1999)
- 8) 中村, 濃沼, 鈴木: 自由関節を持つ平面アームのカオス的挙動と非線形制御—ドリフトを持つ非ホロノミック機械の制御—, 日本ロボット学会誌, 14-4, 602/611 (1996)
- 9) Y. Nakamura, T. Suzuki and M. Koinuma: Nonlinear Behavior and Control of a Nonholonomic Free-Joint Manipulator, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 13-6, 853/862 (1997)
- 10) 中村, 鈴木: 非ホロノミック機械系の平均化法による挙動解析と振幅変調制御—平面2R自由関節マニピュレータの位置制御—, 日本ロボット学会誌, 16-3, 407/416 (1998)
- 11) 中村, 関口: カオティック移動ロボット, 日本ロボット学会誌, 15-6, 918/926 (1997)
- 12) A. Sekiguchi and Y. Nakamura: The Chaotic Mobile Robot, Proc. of the 4th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Volume9, 463/468, Orlando, Florida, July (2000)
- 13) 岡本, 藤井: 岩波講座 応用数学 対象5—非線形力学, 岩波書店 (1995)
- 14) 関口, 中村: Arnold 方程式を用いたロボットの行動制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-31-030 (2000)
- 15) 関口, 中村: 非線形力学系の軌道パターンを利用したロボットの行動制御, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 791/792

- (2000)
- 16) A. Sekiguchi and Y. Nakamura: Behavior Control of Robot Using Orbits of Nonlinear Dynamics, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, May (2001)
 - 17) 中村, 山根, 永嶋: 構造変化に伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算, 日本ロボット学会誌, 16-8, 1152/1159 (1998)
 - 18) Y. Nakamura and K. Yamane: Dynamics Computation of Structure-Varying Kinematic Chains and Its Application to Human Figures, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 16-2, 124/134 (2000)
 - 19) 山根, 中村: 仮想仕事の原理を用いた並列化可能な高速順動力学計算法, 第18回 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1137/1138 (2000)
 - 20) 山根, 中村: ネットワーク分散計算による動力学シミュレーションの高速化, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-79-126 (2000)
 - 21) K. Yamane and Y. Nakamura: Dynamic Filter-Concept and Implementation of On-Line Generator for Human Figures, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1, 688/695 (2000)
 - 22) Y. Nakamura and K. Yamane: Real-Time Interactive Motion Generator of Human, First International Symposium on Adaptive Motions of Animals and Machines, E-21, Quebec, August (2000)
 - 23) 藤原, ほか: ビヘイビアキャプチャシステムの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-79-118 (2000)
 - 24) 岡本, ほか: ビヘイビアキャプチャシステムにおけるリアルタイムモーションキャプチャ, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-79-119 (2000)
 - 25) 星野, ほか: トラッキングモーションキャプチャ, 第18回 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 385/386 (2000)
 - 26) L. M. Pecora and T. L. Carroll: Synchronization in Chaotic Systems, Phys. Rev. Lett., 64-8, 821/824 (1990)
 - 27) 津田: カオスの脳観, サイエンス社 (1990)
 - 28) 金子, 津田: 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店 (1996)
 - 29) W. Freeman, and W. Schneider: Changes in Spatial Patterns of Rabbit Olfactory EEG with Conditioning to Odors, Psychophysiology, 19, 44/56 (1982)
 - 30) W. J. Freeman: Simulation of Chaotic EEG Patterns, Non-linear Dynamic Model of the Olfactory System, Biological Cybernetics, 56, 139/150 (1987)
 - 31) Y. Yao and W. J. Freeman: Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics, Neural Networks, 3, 153/160 (1990)
 - 32) W. J. Freeman: Societies of Brains: A Study in the Neuroscience of Love and Hate, Lawrence Erlbaum (1995)
 - 33) R. Penrose: The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics. Oxford University Press (1989) (林 訳: 皇帝の新しい心: コンピュータ・心・物理法則, みすず書房, 1994)
 - 34) 矢崎サイエンスオフィス(編): 最新脳科学, 最新科学論シリーズ, 学研 (1997)

- 35) 川人, ほか: 岩波講座 認知科学 4 運動, 岩波書店 (1994)
- 36) N. Bernstein: The Co-Ordination and Regulation of Movements, Pergamon Press (1967)
- 37) J. J. Gibson: The Ecological Approach to Visual Perception, Houghton Mifflin Company (1979) (古崎, ほか訳: 生態学的視覚論: ヒトの視覚世界を探る, サイエンス社, 1985)
- 38) M. T. Turvey: Coordination, American Psychologist, 45, 938/953 (1990)
- 39) 外山, 杉江(編): 脳と計算論, 朝倉書店 (1997)
- 40) H. Bergson: Matière et mémoire (1896) (田島 訳: 物質と記憶, ベルクソン全集 2, 白水社)
- 41) 守永: 生命, 未知なる同胞 ベルクソンの身体図式論, 現代思想, 29-3, 318/341 (2001)
- 42) C. S. Peirce: Collected Papers II. Elements of Logic, C. Hartshorne and P. Weiss, eds., Belknap (1978) (パース著作集 第2巻, 勁草書房)
- 43) 遠藤: プロセスとシステム パース, ホワイトヘッドのプロセス形而上学から, 現代思想, 29-3, 306/317 (2001)
- 44) T. W. Deacon: The Symbolic Species: The Co-Evolution of Language and the Brain, W. W. Norton & Company (1997) (金子 訳: ヒトはいかにして人になったか: 言語と脳の共進化, 新曜社, 1999)
- 45) 江崎, 戸嶋, 中村: 自己行動要素による他者の行動理解 (アナロジーによる概念の形成と抽象化), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-65-109 (2000)
- 46) 稲邑, ほか: ミメシスループと原始シンボルを用いた全身行動の生成, 第18回 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 801/802 (2000)
- 47) 戸嶋, ほか: 他者行動の観察と自己行動要素による原始シンボルの生成, 第18回 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 803/804 (2000)

[著 者 紹 介]

なかむら よしひこ
中 村 仁 彦 君 (正会員)



1954年9月22日生, 82年京都大学大学院工学研究科精密機械工学専攻博士課程退学。同年より87年まで同大学助手。87年より91年3月までカリフォルニア大学サンタバーバラ校 助教授, 準教授。同年4月より東京大学に勤務。現在, 同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 教授。工学博士。ロボットの運動学, 動力学, 制御, および知能の問題, 特に非ホロノミックロボット, 脳型情報処理, ヒューマノイドやCGの運動・力学計算, 外科手術用ロボットなどの研究に従事。科学技術振興事業団 戦略的基礎研究推進事業「自立行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」の研究代表者。システム制御情報学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 日本コンピュータ外科学会, IEEE, ASMEなどの会員。