

TR-o-0016

099

「非線形動力学のApplicabilityワークショップ」
報告

奈良重俊、森裕平、ピーター・デイビス

1989. 8. 30.

ATR光電波通信研究所

概要

1988年12月16日(金)、17日(土)の両日ATRにおいて、ATR光電波通信研究所通信デバイス計算物理グループの主催によりワークショップを開催した。ワークショップの目的は、非線形動力学、特にカオスの科学の工学的応用への新しい可能性を探ることにあつた。また、このテーマの発展段階と性格に顕みてワークショップは、クローズトでインフォーマルなものとした。ここでは、話題提供者の話の内容の概要を報告する。

目次

§1はじめに	5
§2 話題提供の概略	
2.1 Peter Davis (ATR光電波通信研)	10
complex dynamics と情報処理－chaotic switch を中心にして	
2.2 相沢洋二 (早大・理工・応物)	12
ルールダイナミクスへのアプローチ	
2.3 山口陽子 (東大・薬)	14
ホロビジョンについて	
2.4 合原一幸 (電機大・工・電子)	16
ニューラルネットワークとカオス	
2.5 森裕平、P. Davis、奈良重俊 (ATR光電波通信研)	18
神経回路網におけるリミットサイクル型メモリとそのメモリダイナミクス	
2.6 津田一郎 (九工大・情報工・知能情報工)	20
脳の理解に非線形動力学は有効か?－なぜ私はカオスにこだわるのか?	
2.7 倉光正己 (京大・工・電気)	22
非線形振動子の結合系のダイナミクス	
2.8 大塚建樹 (NTT基礎研)	24
非線形機能デバイス－Towards Phase Space Engineering	
2.9 土屋和雄 (三菱電機中研)	26
制御理論と非線形動力学	
§3 おわりに	28

「非線形動力学の Applicability ワークショップ」

日時 1988年12月16日(金)、17日(土)

場所 ATR第171会議室 ツイン21 MIDタワー 17階

プログラム(話題提供30分以内、残り討論)

[12月16日(金)]

開会13:00~13:15

セッション(I) 司会:戸田幹人(京大・理・物理)

13:15~14:15 Peter Davis(ATR光電波通信研)

14:15~15:15 相沢洋二(早大・理工・応物)

15:15~16:15 山口陽子(東大・薬)

16:30~17:50 ATR 四研究所見学

18:00~20:00 懇親会

[12月17日(土)]

セッション(II) 司会:三宅誠(ATR視聴覚機構研)

10:00~11:00 合原一幸(電機大・工・電子)

11:00~12:00 森裕平、P. Davis、奈良重俊(ATR光電波通信研)

12:00~13:00 津田一郎(九工大・情報工・知能情報工)

セッション(III) 司会:篠本滋(京大・理・物理)

14:00~15:00 倉光正己(京大・工・電気)

15:00~16:00 大塚建樹(NTT基礎研)

16:00~17:00 土屋和雄(三菱電機中研)

(IV) 閉会 ~17:10

参加者リスト 順不同、敬称略

篠本 滋	(京大・理・物理)
合原一幸 *	(電機大・工・電子)
津田一郎 *	(九工大・情報工)
相沢洋二 *	(早大・理工・応物)
山口陽子 *	(東大・薬)
池田研介	(京大・基研)
戸田幹人	(京大・理・物理)
倉光正已 *	(京大・工・電気)
土屋和雄 *	(三菱電機中研)
大塚建樹 *	(NTT基礎研)
三宅 誠	(ATR視聴覚機構研)
川人光男	(ATR視聴覚機構研)
Peter Davis *	(ATR光電波通信研)
森 裕平 *	(ATR光電波通信研)
奈良重俊	(ATR光電波通信研)
會田田人	(ATR光電波通信研)
藤本	(ATR光電波通信研)
古濱洋治	(ATR光電波通信研)

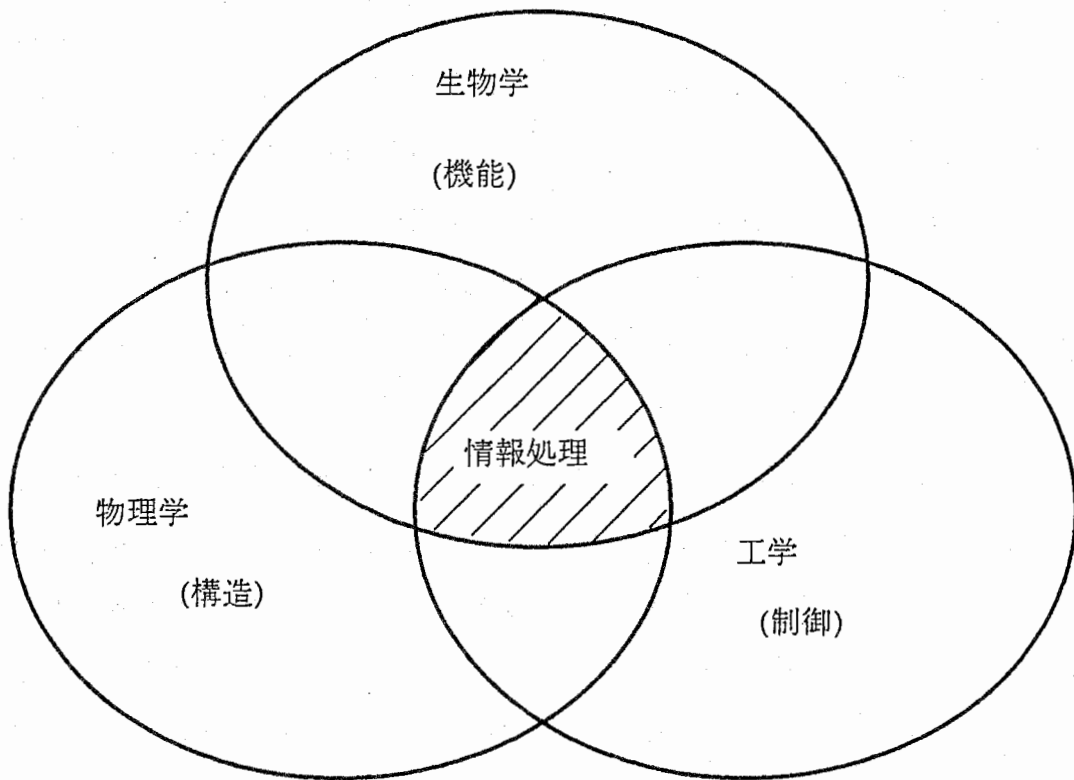
* の付いた方々は話題提供者です。

§1 はじめに

まず、我々が標題のワークショップを開こうとするに至った動機を述べることにしたい。

我々は研究の対象としての情報処理を図1に示すように三つの視点の絡んだ複合したものとして捉えたいと考えている。

図1



情報処理が最も卓越した形で実現されているのは生体において他にはないことは衆目の一致するところであろうが、生体における情報処理で重要な点は、“機能(function)”である。生体は、外界からの様々な情報(刺激と言ってもよい)の入力に対し、意味を付与させ、それらを極めて柔軟に取扱い、外界に対する反応としての出力に変える“機能(function)”を持っている。他方、工学的な視点での情報処理は、広い裾野を含んでいるがそれらを象徴的に表す言葉として我々

は、極めて広い意味合いでの“制御(control)”を取り上げる。原始的な道具から高度なコンピュータに到るまで我々人間によって作られた工学の重要な点は、何かを“制御”して何かを“させる”ことにある。そこには生体の機能に原型を見られることが多く、最近のようにより人間に近い機械を求めようとする動きにおいては、制御に関しての情報処理は決定的に重要な役割を持つ。その意味で、図1において生物学と工学の情報処理に対する視点は切り離すことはできないと考えられる。同様なことは、物理学と他の二つとの関係についても言えるだろう。物理学は、人間のもつ情報処理能力を用い、生体の外で起こる自然現象を因果律と論理だけを頼りに記述しようとして発達したものである。しかしその記述能力の発展と共に当然のことながら生体それ自身の内部で起こる現象にもその目は向けられ、物理学的な法則を用いて理解されつつある部分は決して少なくない。そこでこの視点は、構成要素への分解とその全体への再構成という形で現れるところの、ミクロからマクロなスケールを通じての“構造”的な見方である。しかしながら生存を目的とする生体全体への再構成は未だ原始的な段階であり、遅々として進んでいない。それは構成要素の集合体としての生体は物理学的に見ると、入力と出力のあいだの関係に高度の非線形性を持った構成要素の膨大な集合体から成る、あまりにも“複雑な非線形動力学系(complex nonlinear dynamical system)”であり、それら全体を情報の流れやその制御を含めて統一的に取り扱う“方法論(methodology)”を我々は今のところ持っていないからである。その意味で、構成要素全体を生存という最終目的に向かって統一する、情報処理を含めた制御原理を物理学的に明らかにする視点において、生物学と物理学は切り離すことはできないと考えられる。また翻って、我々は生体以外にも自然界において様々な挙動を示す“複雑な動力学系に頻繁に遭遇しているが、それらの中にも生体と同様に物理学的立場から、構成要素の集合体としての全体像を捉えるのが困難な場合が多く見受けられる。それらは多分に、力学変数のもつ情報の流れのミクロからマクロなスケールを通じての“構造”的な見方の全体像が描けない場合を含んでいる。こうした意味で、自然現象(生体を含む)やそのほかの複雑な非線形動力学系の物理学的立場での構造的な見方の確立とその工学的再構成(柔軟な情報処理をさせることができるという意味での応用)-Applicability-はお互いに切り離すこと

はできないと考えられる。それが図1に示される我々の情報処理の研究に対する視点なのであり、また我々がワークショップを持ちたいと考えた動機である。我々自身としては、物理学的立場からのアプローチの限界を意識しつつも現段階で持っている非線形動力学の方法を発展させながら、情報処理に対し、その動力学の構造とその上のダイナミックスという見方のもとにアプローチを行い、その解明と再構成のための“方法論(methodology)”を発見すべく努力して行こうと考えている。

上に述べたような視点において、我々は各分野の研究者による相互の議論や共同研究が不可欠と考えている。しかしながら、異分野の研究者の間の議論はしばしば、その描くイメージや概念の異質性のために議論のキャッチボールが妨げられる場合が多い。またその相互の議論や共同研究は、短いタイムスケールで結論を出せるものでないことも事実である。

我々はその存在を認めた上で、異分野の研究者の参集を依頼し、このワークショップを計画し実行した。ここにその内容を総括したい。

会議自身が上のような問題意識と位置づけにもとづいているため、少人数による徹底した議論の共通な土俵づくりを最重要視した。その結果として、非公開少人数のワークショップとせざるを得なかった。実際、我々が声をお掛けしなかった方々からも出席の希望があったが、当初の方針を貫くためあえてお断りしたことをおわびの気持ちと共に記しておくことにする。ともあれ、全体的には、率直な意見の交換により、お互いが何に“こだわり”を持っているかが浮き彫りにされたと思われる。また、お互いの研究に対し、問題意識の違いからの批判を通じて刺激を受けると共に、共通の土俵を作ることの難しさも明らかになったことは率直に認めなければならないと思われる。

以下に、各話題提供者によるお話しの概略を示すことにする。ただし以下の要約は、我々三人のノートからのものであって、もしこれを読まれた方が疑義を持たれたりまちがいを発見されたとき、それらの責任はすべて我々三人にあるこ

とをおことわりすると共に、各話題提供者のオリジナルの論文を見ることをお奨めしたい。

なお非線形力学の科学的研究及びその応用を目指す分野は、最近世界的にも注目を集めつつあり、欧米には非線形現象研究の活発な学際的研究機関がある。例えば、

Center for nonlinear studies (Los Alamos National Laboratories, U. S. Department of Energy and University of California)

Complex systems Research Institute (University of Illinois)

Center for complex systems (Atlantic University, Florida)

Center for nonlinear studies (Manchester University, UK)

Center for nonlinear dynamics (University of Texas at Austin)

Institute for nonlinear science (University of California, San Diego)

などがある。また学際的非線形現象研究の国際会議も同様に増えている。後の文献中にその Proceedings 等を挙げてあるが、例えば、Haken, 1985、Caianiello, 1986、Farmer *et al.*, 1986、Langton, 1987、Kelso *et al.*, 1987、Deng *et al.*, 1987、Rensling *et al.*, 1987、Koslow *et al.*, 1987 などがある。

他方、日本における複雑な非線形現象研究の会議は

カオスとその周辺 (京都大学基礎物理研究所長期型研究会)

複雑なシステムの理解をめざして (統計数理研究所研究会)

非線形にみられる分岐現象と力学系理論 (京都大学数理解析研究所共同研究会)

などがある。

世界的に見てもその協力的研究態勢は十分なものとは言い難い。それをより促進するのも我々がこのワークショップを持ちたいと考えた動機の一つである。

ただし、このリストはワークショップ開催時点のものであり、また漏れているものも多数あると考えられることをお断りしておきたい。

文献

K. Tomita, "The significance of the concept 'chaos'", *Prog. Theor. Phys. Supplement* 79, 1 (1984).

富田和久 [カオスの意義] 日本物理学会誌・第40巻第2号99-118

J. S. Nicolis, "Chaotic dynamics and information processing", *Rep. Prog. Phys.* 49, 1109 (1986).

M. Conrad, "What is the use of chaos?" in *Chaos* (ed. A. V. Holden) Manchester University Press, Manchester (1986).

S. Wolfram "Complexity Engineering" in *Evolution, Games and Learning : Models for adaptation in machines and nature*, *Physica* 22D, 385 (1986).

H. Haken (ed.), *Complex systems - Operational Approaches in neurobiology, physics and computers*, Springer-Verlag (1985).

E. R. Caianello (ed.), *Physics of Cognitive Processes*, World Scientific, Singapore (1987).

D. Farmer, A. Lapedes, N. Packard, B. Wendroff (ed.), *Evolution, Games and Learning : Models for adaptation in machines and nature*, *Physica* 22D, (1986)

C. Langton (ed.), *Artificial life*, Addison-Wesley (1989).

H. Degn, A. V. Holden and L. F. Olsen (eds.) *Chaos in biological systems*, Plenum Press, N.Y. (1987).

L. Rensing, U. an der Heiden and M. C. Mackey (eds.), *Temporal disorder in human oscillatory systems*, Springer-Verlag, Berlin (1987).

S. H. Koslow, A. J. Mandell, and M. F. Schlesinger (ed.), *Perspectives in biological dynamics and theoretical medicine*, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 504 (1987).

J. A. S. Kelso, A. J. Mandell, and M. F. Schlesinger (ed.), *Dynamic patterns in complex systems*, World Scientific, Singapore (1988).

「カオスとその周辺」、研究会報告、物性研究 51, No. 6 (1989).

2.1 Peter Davis、『Complex dynamics と情報処理：— chaotic switch を中心にして』

任意の系に於て入力と出力の関係からその系の機能を定義しようとする場合を考える。通常は、特定の入力に対しては一過性の場合を除くと定常な出力が得られ、入力側の無限小の揺らぎに対しての出力の安定性は問題とはならない。しかしカオスを含む系に於ては入力側の観測不能なずれが出力に有意な影響を及ぼす。その意味においてはカオスを含む系は制御不能である。

しかしながら、部分的な制御は可能である。著者は、一例としてとりあげた高い次元を持つ振動モードが多数存在する非線形動力学系において、それらのモードに対し低い次元で付与されている情報(特徴)の変化に対応してのモード間のスイッチを起こさせることを考え、モード間のカオスの遷移を部分的な制御下でどう利用できるかを示す(このスイッチをカオティックスイッチと呼ぶ)。制御ループとして、系の出力から“特徴”を抽出しそれを入力として与えられた“特徴”と比較し、そのずれを系の振動モードの多安定な basin 間の intermittency をきめるパラメータ(とりあえずは一個)に帰還させるものを用いる。出力と入力のマッチングがよければパラメータを basin 間の遷移を減少させる方向に変化させることにより、系は入力情報と一致したモードに落ち着く。

これは、多モード系における“search access”の一つのタイプであって“direct access(終状態が入力情報によって直接指定される)”とは異なっている。後者は完全に収束する過程のみであるが、前者はストカスティックであり、収束と発散の両方の存在するダイナミックスが用いられている。これをカオティックサーチと呼ぶとする。収束と発散の両方のバランスはサーチの効率と系の適応性に対し重要な役割を持つ。

このやり方は多次元空間におけるポテンシャル面での“熱雑音”を用いたストカスティックな緩和による方法(Kirkpatrick, Geman and Geman, L. Davis)と類似したところがある。そこでは、収束はポテンシャルの坂を滑り降りることであり、発散は雑音とそれによる basin 間の飛び移りである。両方のバランスは温度的な制御パラメータによってなされる。カオスを利用する方法がより有効であることを議論したいが、そのためには効率というもののきちんとした定義をしなくてはならないので、大きな困難が予想される。適応性は部分的な収束を利用することによって、完全な収束をさせる場合より高められる。部分的な収束とは、与えられた部分的特徴条件のもとでの範囲では収束しているが、条件をつけられていない特徴の部分は intermittent なカオスのまま留まっている状態を示すものとする。

具体例として、以下の微分差分方程式で記述される遅延帰還型光共振器を考える。

$$(d/dt)\phi(t) = -\phi(t) + \mu F(\phi(t - T_r))$$

$$F(\phi) = [1 + \cos(\phi + \phi_0)]$$

この高次元系において、励起パラメータ μ をあげると、振動状態の分岐のカスケードを経て光乱流が生じる。講演では、① ϕ_0 を一時的に変調させて系に種信号を入れることによる多安定振動モードの direct access と、② 検出された feature の評価を μ に適応的帰還をさせることによる光カオス自身を使った多安定振動モードの search access、の二つの計算機によるシミュレーション例を示した。

そのほかのトピックス—①他の系に一般化すること ②学習を取り入れるべく拡張すること ③ここに述べたような機構が生体系に存在するかどうか ④カオティックメモリ:与えられた特徴を持つメモリパターンを複数呼び出して、不必要に収束しない(maximum dynamical entropy principle) ⑤カオティックロジック:拘束条件下でのカオス的狀態は、ファジイ論理でいうメンバーシップ関数の意味での拘束下のカオスとなっている。 ⑥ホリスティックな情報としての条件つきカオス ⑦非線形インターフェイスとコミュニケーション:相互拘束する系 ⑧カスケード構造:たとえば言語動力学

文献

- P. Davis and K. Ikeda "Bifurcation and dynamical memory" preprint (1988).
P. Davis "Functional chaotic switch in delayed-feedback model" preprint (1989).
P. Davis, "Chaotic switch and information processing", 物性研究 51, No. 6 (1989).
S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", Science 220, 671-680 (1983).
S. Geman and D. Geman, "Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-6, 721-741 (1984).
N. H. Packard, "Adaptation toward the edge of chaos", in *Dynamic patterns in complex systems* (ed. J. A. S. Kelso, A. J. Mandell and M. F. Schlesinger), World Scientific, Singapore, 293 (1988).
H. Szu, "Fractal distributions useful for search algorithms", in *Dynamic patterns in complex systems* (ed. J. A. S. Kelso, A. J. Mandell and M. F. Schlesinger), World Scientific, Singapore, 121 (1988).
L. Davis (ed), *Genetic algorithms and simulated annealing*, Pitman, London (1989).
池田研介、『光カオスは応用可能か?』、光学、第17巻10号 508-515 (1988).

2.2 相沢洋二、『ルールダイナミクスへのアプローチ』

ではセルラーオートマトンにおけるルールの動力的モデルについて説明し、ルールダイナミクスから EEG へアプローチする可能性について考察する。

大きいシステムでは、局所的に異なったルールが支配しており、そのそれぞれが時間とともに変化する。例えば、成長、進化、学習のような発展系を思い浮かべたい。これらのことは、単にシステムのパラメーターが変化したからルールが変わるというようなものではなく、しくみは複雑である。ここでは単純なモデルの例として、2レベルのセルラーオートマトンを考える。

扱うオートマトンシステムは、パターンがくりかえし変化する様子が $X(t+1) = F(X(t))$ で表されるものである。 $X(t)$ はベクトルであり、各要素は1, 0の2状態をとり、この要素は前の状態の3近傍によって決定される。時刻 t における状態であり1次元とする。関数 F はルールであるが、ここでは X の各要素において隣接要素からのカップリングのみを考慮したものとする。このカップリングを内蔵する関数 F は時間に依存して変化する。

こうして関数 F とベクトル X はそれぞれが1ステップ毎に変化する。関数 F は5種類の特定の関数 f の線形結合であらわすことができる。

$$F = \sum_{k=1}^5 \varepsilon_k f_k$$

各 ε は1, 0のどちらかであるので、 F の形は32種のきめられた関数系のうちのひとつになるといえる。この一つ一つをルールと呼ぶことにする。このモデルでは、 $X(t)$ で表されるスピンドイナミクスと、 $\varepsilon_k(t)$ で表されるルールダイナミクスがカップルしながら両方の系が変化していく仕組みとなっている。実際にシミュレーションを行い $X(t)$ が時間とともに変化していく模様を見てみると、一定の時間はあるルールが支配するがしばらくすると変化する様子を見られる。

このようにルールが一定期間支配するが永続せずに他のルールとおきかわっていき状態下での $X(t)$ の時系列は、脳波の時系列に出てくるパターンとよく似た面がある。例えば、スパイクのあとには波のような形がくるといった特長が似ている。これらの類似性から、ルールダイナミクスのアプローチで脳波を理解できる可能性がある。この類似性は、非線形動力学の分野と、脳波や進化など生物学の分野との橋渡しとして有望と考えられる。

以上のことにもとずいて、つぎの側面から研究の夢を思い浮かべることができる。

- (1) 発展系はどう記述されるか?----- 即ち、生物の進化、成長、学習などは、ルール空間におけるその変化のダイナミクスで表現できる可能性がある。

- (2) 因果律にたいする疑問、特定時空間における因果律の分離不可能性 -----
個々の因果律は、絶対的不変の存在ではなく、たえずルールの変更がおき
るという意味での変化をうけている。例えば、近似的に normal mode が
 n 個あると考えたとしても、現実には、そこに必ず interaction があり、
個々のものは独立して一定に振動しつづけることができず、変化する。[
可積分系では、分離された各々の変数それぞれがお互い独立な因果則(力
学的発展方程式)に従っている。非可積分系では、決して独立な因果則への
分解は出来ない。個々の因果則はお互いに他との相対的關係でのみ意味を
持つ。]
- (3) Active elements の形成と自己組織化 ----- 例えば、生物が成長して脳や
心臓が形成される際に、別々の時間に異なったルールが現れるような自己
組織化である。

文献

Y. Aizawa and Y. Nagai, "Rule dynamics and Fuzzy attractor : New approach to EEG ", YKIS '88, 2nd Yukawa Int. Sem. *Cooperative Dynamics in Complex Physical Systems*, Aug. Kyoto (1988).

相沢洋二、『生命と過程』、ヒューマンサイエンス第1巻 ミクロコスモスへの
挑戦 (石井威望、小林 登、清水 博、村上陽一郎、編集) 中山書店 (1984).

D. Farmer, T. Toffoli, S. Wolfram, (ed.), *Cellular Automata*, *Physica 10D* (1984).

S. Wolfram (ed.), *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific, Singapore (1986).

2.3 山口陽子、『ホロビジョンについて』

ここでは生物活動の自己組織性について、ホロビジョンを例にして述べる。ホロビジョンとは、外界からの入力信号にたいして、情報を統合し、記憶された情報と比較して解釈するシステムである。

モデル化の第一歩としては、リミットサイクルに引き込まれる用なダイナミックスで、ホロビジョンを記述することが、この自己組織的なメカニズムを記述することに有効と考えられる。近年、大脳皮質の視覚野にきれいなシンクロナイゼーションがあることが発見されたことは興味深い。

ホロビジョンによる処理には3つのレベルがある。入力パターン素情報のレベル、イメージ合成のレベル、そしてメモリーレベルである。外部からの入力はピクセルパターンである素情報に分解され、最初のレベルに表現される。次のイメージレベルで素情報は統合される。このレベルは各ユニットが非線形振動子でありそれらがカップルしたシステムである。このイメージレベルは階層構造をなしており、各階層はピクセルパターンにおける方向性を取り出す働きをする。ここで、各ユニットは、ピクセルパターンが特定方向へ続けて存在する場合に相互に発火を強化するしくみであり、このレベルで素情報は統合され、方向を持った線情報になる。これはこのレベルであるイメージが形成されることに相当し、各ユニットに蓄えられている方向の情報が、出力波形における位相となって、メモリーレベルへ送られる。メモリーレベルでは、既に長期記憶されているパターンと比較されるが、情報はたえずフィードバックされ、イメージレベルではフィードバックされたものを取り入れて再検討がおこなわれ、結果をメモリーレベルへ送るということが繰り返される。最終的にメモリーレベルにあるひとつのパターンに引き込まれ選択されるしくみである。

すなわち、ホロビジョンの特長は、イメージレベルにおいて、非線形振動子間の「引き込み」によって線が合成され、線の方が各素子間の位相関係として「自律的に形成」され、さらにメモリーレベルでもフレキシブルな長距離秩序との照合が「引き込み」によって行われることである。

講演では、具体例として、方向を持って素情報が並んでいる図や、多角形に、応用した場合を示し、位相コーディングされる様子や、モード間の競争が起こり、メモリーが選択される様子を示した。メモリーレベルにおいて、線分のこまかい情報を解釈するためには、時間別に階層的にメモリーと比較するしくみがさらに必要である。

理想としては、解釈がおきる際にいわゆる引き込みが行われるが、これは単にある特定のリミットサイクルに引き込まれるということでモデル化が終了すべきものではなく、結果をもとに発展していくものであり、これを含んだモデル化が望ましい。

文献

3-level holovision

H. Shimizu, Y. Yamaguchi, I. Tsuda and M. Yano, "Pattern recognition based on holonic information dynamics : Towards synergetic computers " in *Complex systems - Operational Approaches in neurobiology, physics and computers* (ed. H. Haken) pp 225-229 Springer-Verlag (1985).

H. Shimizu, Y. Yamaguchi, *Physica Scripta* **36**, 970 (1987).

4-level holovision

Y. Yamaguchi, H. Shimizu Technical report of IEICE MBE 86-136, 309 (1987).

H. Shimizu, Y. Yamaguchi, Satoh in *Dynamic patterns in complex systems*, (ed. J. A. S. Kelso, A. J. Mandell, M. F. Schlesinger) pp. 46-72 World Scientific, Singapore (1988).

M. Ohsuga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, "Entrainment of two coupled Van der Pol Oscillators by an External Oscillation -- As a basis for Holonic control ", *Biol. Cybern.* **51**, 325-333 (1985).

山口陽子、『生物における自立分散制御』、SICE, JSS 5-2、921-924 (1987).

山口陽子、『生物リズムと引き込み』、ヒューマンサイエンス第3巻 生命現象のダイナミズム pp.3-36 中山書店 (石井威望、小林 登、清水 博、村上陽一郎、編集)(1984).

A. Yuzurihara, Y. Yamaguchi, H. Shimizu, "Recursive cycle of multiple pattern formation in the entrainment of oscillators - A model of slow waves in the intestine". *J. Phys. Soc. Jap.* **57**, 4450-4451 (1988).

清水博、『情報圧縮と自己組織化』、日本物理学会誌 **39**, 718-725 (1987).

山口陽子, 清水博、『ホロニックコンピュータ』、生物物理 **27**(1), 36-41 (1987).

山口陽子、『生物リズムと引き込み』、ヒューマンサイエンス第3巻 生命現象のダイナミズム (石井威望、小林 登、清水 博、村上陽一郎、編集) 中山書店 (1984).

2.4 合原一幸、『ニューラルネットワークとカオス』

神経回路あるいは、parallel distributed processing system において、Hopfield 型や back propagation 型のように、評価関数を決めてシステムを一点のアトラクターへ収束させる方法が多く注目を集めてきた。しかし、システムがリミットサイクルやカオスへ行くようなものについて調べることも、興味深いテーマである。

ここでは、神経回路におけるカオスについて、ヤリイカの神経を使った測定結果、数値解析、および電子回路によるシミュレーションの結果について報告する。

生物の中におけるカオスの役割はまだ明らかでない。しかし、講演者らの仕事は、カオスを利用するためのわく組みを作るものである。

一つのニューロン細胞の応答を調べる方法に、Hodgkin-Huxley 方程式を時間的に追いかけていく方法がある。この方程式を使ってシミュレーションし、パラメーター V (膜電位) と m (ナトリウムの活性化変数) を二次元にプロットして平面上で追って見ると、periodic attractor に引き込まれるものや、quasi-periodic に引き込まれるもの、あるいはカオスになるものなどがあり、これらは初期状態にも敏感に依存している。また、イカの巨大神経について、膜電位応答を同様の二次元にプロットしてみると、やはり periodic や quasi-periodic など似たアトラクターが現れ、実験的証拠も得られた。(講演ではこれらの図を示す。)

次に、このような現象を一次元のマップで描き出すことができるかどうかを考えたい。一つの変数でニューロンの発火を追う方法として Cananiello 方程式 (1961) と Nagumo-Sato 方程式 (1972) があり、後者はニューロン出力が発火後指数関数的に減衰することを表現している面で扱いやすく、一次元のマップが可能である。Nagumo-Sato 理論を基にして、ニューロンの内部状態を表す変数 $y(t)$ の漸化式に、部分的な一次元の組合せを用いると、ニューロンの興奮頻度のパラメーター依存性は悪魔の階段をなす。また、これから少しずれた graded response function を用いると、ニューロンの興奮頻度は大まかには悪魔の階段であるが、ステップの位置に resonance overlap chaos が発生することがあった。対応して、パラメーター変化による応答の分岐図を描くことができ、カオスの位置では黒く塗りつぶされ、また最大リアプノフ指数は正であった。

こういったカオスニューロンを電子回路で実装してシミュレーションした。

3つのカオスニューロンを組み合わせるとシミュレーションした場合は、多安定な複数の basin の間で、chaotic burst transition が起きた。10個のカオスニューロンを組み合わせるとシミュレーションした場合もカオスは観察されまたパラメーター変化に伴ったヒステリシスが観察された。

文献

合原一幸、『ニューラルコンピュータ』、東京電機大学出版局、1988年、：カオスニューラルネットワークを参照

K. Aihara, A. Ishibashi and M. Kotani, " Chaotic Dynamics in Alpha Rhythm of MEG ", Proc. of the 6th International Conference on Biomagnetism (1987).

K. Aihara and G. Matsumoto, " Forced Oscillations and Routes to Chaos in the Hodgkin - Huxley Axons and Squid Giant Axons ", *Chaos in biological systems* (ed. H. Degn, A. V. Holden and L. F. Olsen), Plenum Press, N.Y. (1987).

W. J. Freeman, " Simulation of EEG patterns with a dynamic model of the olfactory system", *Biol Cybern.* 56, 139-150 (1987).

A. Babloyantz, A. Destexhe and J. A. Sepulchre " Self-organization and information processing of neural networks ", in Proc. INNN Conf. p70 (1988).

A. Babloyantz, C. Nicolis and M. Salazar, *Phys. Lett.* 111A, 152 (1985).

G. Matsumoto, K. Aihara, Y. Hanyu, N. Takahashi, S. Yoshizawa and J. Nagumo, " Chaos and Phase - locking in Normal Squid Axon ", *Phys. Lett.* 123A, 162 (1987).

H. Degn, A. V. Holden and L. F. Olsen (eds.) *Chaos in biological systems* Plenum Press, N.Y. (1987).

L. Rensing, U. an der Heiden and M. C. Mackey (eds.) *Temporal disorder in human oscillatory systems* , Springer-Verlag, Berlin (1987).

2.5 森裕平、P.Davis、奈良重俊、『神経回路網におけるリミットサイクル型メモリとそのメモリダイナミクス』

Neural Netのような情報処理系を非線形動力学系とみなしたときに、情報処理系と動力学的構造とを対応づけることが、処理系の制御の面でも構造を調べる面でも有益である。ここでは、記憶想起の際にリミットサイクルに収束するようなモデルを例にして、その力学的構造を調べる面から研究を始めた。

扱ったモデルでは、記憶させたい発火パターンの組を表すベクトル、 $\{\xi\}$ 、について、異なったベクトル間の直積をとり、それをサイクルになるように和をとった非対称な行列をシナプス結合行列、 T 、として、変数パターン、 S 、に対して掛け算してはクリッピング($\Theta(x)$ は $x > 0$ ($x < 0$) で $+1$ (-1)となる階段関数で)するというを同期的にくり返して、メモリーのretrievalを行なった。

$$S_i(t+1) = \Theta \left\{ \sum_{j=1}^N T_{ij} S_j(t) - h_i \right\}, \quad T = \sum_{\mu=1}^L \sum_{\lambda=1}^M \xi_{\mu}^{\lambda+1} \otimes \xi_{\mu}^{\lambda}$$

こういったリミットサイクル型メモリーを持つNeural Networkモデルについて、①ノイズ除去能力のperformanceを、よく知られたauto correlationモデルと比較し、また、②このneural netからある分岐構造を持ったカオス的な軌道が作れるかについて考察した。

このモデルでは、ノイズのはいったパターンから出発して、retrievalを行なうと、最後に特定の一つのパターンに収束するのではなく、サイクル状に記憶させた数個のパターンを経めぐるとなようなサイクルに収束する。performanceをしらべるために、初期パターンのノイズ量を変化させてretrieval overlap値を調べたところ、このlimit cycleモデルの法が性能が良かった。計算結果の例として、 $N = 400$ ビットのベクトルで全体で30パターンを記憶させた場合について、種々の初期条件から疑似アトラクターにいく場合のヒストグラムを図1に示す。これは初期重なり20%のもの5000個から出発してパターンのupdatingを行ない、リミットサイクルに収束したパターンと、記憶させたものとの重なりを横軸にプロットしたものである。リミットサイクルにしない自己相関型モデルの場合を同時に示す。その場合は、84%の場合が疑似アトラクター(spurious minimum)へ行く。我々の場合で、 $M = 3$ パターンずつに分けて $L = 10$ 個のリミットサイクルにした場合は27%と減り、また、 $M = 10$ パターンずつ $L = 3$ 個のリミットサイクルにした場合は8%と減る。残りは記憶させたものへ収束する場合である。このことからリミットサイクル式の場合は疑似アトラクターにかかわらずに収束する場合が多く、またこれ以外の場合は記憶させたパターンと直行に近いことが分かった。

この理由はlimit cycle型モデルにおいては、変数パターンが近づいていく記憶させたパターンが、1ステップ毎に入れかわる構造であるために、self-

annealing (self-averaging) 効果が起こり、spurious attractor ができにくくなるためである。

次に、このモデルにおいて、synapse connection の range を少なくすることによって、変数パターンが渡り歩く軌道をふらつかせて chaos を発生させたい。そして chaos のパラメータダイナミクスに基づいた方法で neural net を制御したい。こういったねらいのもとに、chaos になる可能性を調べた。

range = r を順に小さくしていくと、 $r \approx 120$ 程度のあたりで、突然記憶させたパターンやその近傍がアトラクターでなくなり、また $r \leq 40$ 程度で、ある空間領域をうめつくすような様子がみられた。とくに $r = 6$ の場合についてくわしく調べた。そして、①ふらつく軌道は、full range にした場合のすべての引き込み領域を、訪問することと、②それにもかかわらず、軌道は、周期的にならないこと、また、③初期変数ベクトルの 1bit の違いが、異なる独立した軌道へと分かれていくことを確かめた。これらのことから、軌道は chaos like なものであるといえる。こういったモデルにどのような情報処理機能をもたせるかが今後の課題である。

文献

Neurocomputing — Foundations of Research —, (ed. J. A. Anderson and E. Rosenfeld), The MIT Press (1988).

S. Amari and K. Maginu, *Neural Networks* 1, 63 (1988).

R. Meir and E. Domany, *Phys. Rev. A* 37, 608 (1988).

P. Peretto and J. J. Niez, in *Disordered Systems and Biological Organization*, (ed. E. Bienenstock, F. Fogelman-Soulié and G. Weisbuch) Springer. (1986).

I. Tsuda, E. Koerner and H. Shimizu "Memory dynamics in Asynchronous Neural Networks", *Prog. Theor. Phys.* 78, 51-71 (1987).

H. Gutfreund and M. Mézard, *Phys. Rev. Lett.* 61, 235 (1988).

Y. Mori, P. Davis, S. Nara, "Pattern retrieval in a neural network with embedded limit cycles", *J. Phys. A: Math. Gen.* 22, L525-L532 (1989).

2.6 津田一郎、『脳の理解に非線形動力学は有効か?—なぜ私はカオスにこだわるのか?』

脳のような複雑なシステムにおいては、観測方法が異なれば、現れる現象やモデル化が異なってくる。それゆえ、(講演者は)このようなものの構造を(一般的に)式ではっきりと表すことを試みようとは考えない。また、脳の中のカオスは、これまでのような方法ではコントロールできないものである。脳のダイナミックスは進化し、成長する。(講演者は、津田は)こういったものの入出力関係もまた(単純に)書き表すことを試みようとは考えない。ここでは、脳のような複雑なシステムの解釈について新しいアプローチ方法が必要であることを強調したい。

講演者はこれまで、脳に関して、カオスシソーラスのような、言語における関係の形成について、またカオティックメモリーのような、メモリーの連想想起の際、系がダイナミックに変転する現象等について、研究してきた。

講演者が提案したカオティックメモリーは、生理学的事実を参考にした、記憶表現のダイナミックスに関する、ニューラルネットモデルである。このモデルにおいて、はじめにニューラルネットにいくつかのパターンを埋めこんでおく。記憶想起する際、あるパターンにとどまったとすると、そこで connection の強度 C_{ij} を変化させることにより、その位置のエネルギーを順次上昇させ (compensation)、しばらくするとそこから離れていくような時間発展のアルゴリズムを設定しておく。すると(想起する際) spurious attractor にとどまったときには、エネルギーのくぼみが浅いのですぐに compensate してそこから出ていくが、記憶させたパターンのアトラクターに行き着いたときは、compensate に時間がかかり、そこに長くとどまる。従って、spurious attractor は global attractor と区別できるしくみとなっている。ここで、はじめに記憶させたメモリーはある時刻で表面上消えるが、情報としては残っているため他の時刻での想起の対象になりうる。このモデルでは、一般的な自己相関型(不完全 $A \rightarrow A$)とは異なり、自由連想(刺激 $A \rightarrow [a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_2b \rightarrow b_1 \rightarrow b_2 \rightarrow b_3 \rightarrow b_3e \rightarrow e_1 \rightarrow e_2 \dots]$) 的な応答を示した。この例における経路は次々に hamming distance の近い pattern を結んでいったものとなっている。この系における遷移は、平均発火率についてのローレンツプロットを取って観察するとサイクルのようなものを描いており、(系の次元が非常に高いにもかかわらず、) サイクルマップで表されるような一次元カオスになっていた。こういった性質は、記憶させたパターンそのものよりも、学習のさせ方 (teaching schedule) や、形成された basin の相対的な大きさに依存する。

文献

津田一郎、『脳の情報力学過程に対するカオスの可能な役割』、エピステー
マー、II2号、自己組織化特集、1 (1987)

I. Tsuda, E. Koerner and H. Shimizu, "Memory dynamics in Asynchronous
Neural Networks", Prog. Theor. Phys. **78**, 51-71 (1987).

I. Tsuda and J. S. Nicolis, "Chaotic dynamics of information processing : The
Magic number seven plus-minus two revisited", Bull. Math. Biol. **47**, 343-365
(1985).

I. Tsuda and H. Shimizu, "Self-organization of the Dynamic Channel" in
*Complex systems - Operational Approaches in neurobiology, physics and
computers* (ed. H. Haken), Springer-Verlag (1985).

I. Tsuda and J. S. Nicolis, "Computational linguistics - Zipf's law in chaotic
dynamics", 日本物理学会秋 4p-c5-6 (1988).

K. Matsumoto and I. Tsuda, "Extended information in one-dimensional maps",
Physica **26D**, 347-357 (1987).

2.7 倉光正己、『非線形振動子の結合系のダイナミクス』

講演者は、多数の能動素子の結合したネットワークとその解析のための(統一された)方法に興味を持っている。こうした大規模に結合した振動子系の応用については、例えばメモリやパターン認識などに使うといった仕事がある(Scott)。この系の情報処理機能に関する重要な問題は、『容量はどれぐらいか?』、『どんな安定モード(複数)がたつか?』、『そのモードの数はどれぐらいか?』ということである

ここでいう振動子系とは、共鳴あるいは非共鳴のいずれにせよ、 n 個の共振器からなる n 個の自然周波数(モード)をもつようなものが負荷として能動素子につながれた系を考える。例えば、3次の非線形性を持つ能動抵抗とインダクタンス、容量からなる系があげられる。その結合系は次のような方程式で記述される。

$$d^2 v_j / dt^2 + n_j^2 v_j = \mu(1 - v^2) dv / dt, \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad v = v_1 + \dots + v_N$$

$N = 1$ の場合は、一個の安定な周期振動を行うファン・デア・ポール振動子となる。その時、 μ が小さいと正弦波的となり、逆に μ が大きいと緩和振動型となる。多モードの場合には、モード数の増加と共に、複雑な多安定性を示すようになり、カオスとなる場合をも含む。

全ての μ の値に対して、あるいはい種々のモードの組合せに対して、またこのような能動素子のアレイに対して、安定な振動の存在を説明できるわかり易い理論が必要とされている。講演者はこれまで、“能動的素子は矩形波を好む = 損失極小化原理”を提案し、これらの系に適用してきた。

平均ポテンシャルを系の散逸関数(損失分)の時間平均と定義すると、それは時間の経過と共に減少する。系に生じる安定な振動は平均ポテンシャルの極小点として求められることが既に講演者らによって示されている。非線形能動素子は損失分を小さくするため、高調波成分を用いて、できるだけ矩形波に近い振動波形を生じさせようとする。

- (1) 非線形性が弱い極限においては、上の“平均ポテンシャル法”は厳密に適用されて安定モードに対する“損失極小”原理が導かれる。
- (2) 非線形性が強い場合には、損失極小原理による取扱いは安定なモードの特性を調べるのに、依然として部分的適用可能性を残してはいるものの、実際の解析は難しくなる。

「矩形波を好む能動的素子」----多数の共振回路と1個の能動的素子で構成された発振器に生じる同期振動は、能動素子の損失を極小とする理想的波形となり、一般に、能動素子の電圧の関数として定義されるあるポテンシャル関数の極小間で電圧が切り換わる矩形波、あるいは階段波である。このような、生じ得る波形のすべてを、その波形の特徴に基づき記号列で表現することができ、いろいろな場合についての記号列を用いて初期値を計算すると、シミュレーションにより振動を出し分けることができる。

上のような場合の自然な延長として、次のような興味深いトピックスがでてくる。

- (3) カオス出現の条件はどんなものか?
- (4) 生物学的な振動子との関連は?
- (5) 振動子そして振動モードの情報の符号化(coding)の新しい方法は?

文献

- M. Kuramitsu and F. Takase, "Analytical method for multimode oscillators using the averaged potential", *Electronics and Communications in Japan* 66-A, 10-19 (1983).
- M. Kuramitsu and F. Takase, "Analysis of ladder oscillators using the averaged potential", *Electronics and Communications in Japan* 67-A, 1-10 (1983).
- M. Kuramitsu and F. Takase, "The analysis of the square array of Van der Pol oscillators using the averaged potential", *Int. J. Non-linear Mechanics* 20, 395-406 (1985).
- M. Kuramitsu and K. Yokota, "Self-excitation of square waves in 2-degrees of freedom oscillator with strong nonlinearity" in *Dynamical Systems and Singular Phenomena* (ed.) G. Ikegami, World Scientific 87-103 (1987).
- M. Kuramitsu and F. Takase and H. Nitta, "Mode-locking in a multimode oscillator with rational ratio frequencies: Wave-shaping by mode-locking", *IEEE, Int. Symp. on Circuits and Systems Proceedings* 1153-1156 (1983).
- A. C. Scott, "Tunnel diode arrays for information processing and storage", *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics* SMC-1, 276-275 (1971).
- R. K. Brayton and J. K. Moser, "A theory of nonlinear networks" I, II, *Quart. Appl. Math.* 22, 1-33 & 81-104 (1964).

2.8 大塚建樹、『非線形機能デバイス—Towards Phase Space Engineering』

講演者は、現在のところ真の意味での『非線形デバイス』は未だ用いられていないと考える。そこで、非線形機能学 (nonlinear functionology) なるものを提唱したい。即ち、個々のデバイスの機能は単純であっても、それらの集合したシステムは十分に複雑かつ豊かな機能を持ち得ることに注目し、それを応用しようということである。

非線形屈折率を持つ媒質(セル)をリング共振器に分配させお互いに結合させた素子(非線形分布光学素子系)では、論理フリップ・フロップ、記憶、パターン認識機能などが協同的に発現する。

環状に配列された非線形誘電媒質からなる素子を提案。非線形誘電媒質からなるセルは、両端におかれた半透明鏡を通して導入されるお互いに逆方向に伝播する光ビーム(強度 μ_f, μ_b)によって結合している。各セルの状態は光が媒質を通過する時に生ずる位相 ϕ_k (k はセル番号、 $\phi_N = \phi_1$)で指定される。 $\mu_{f(b)} = \mu_{f(b)}$ (信号) + $\mu_{f(b)}$ (バイアス)である。位相 ϕ_k に対する方程式は、

$$(d/dt)\phi_{k,f,b} = -\phi_{k,f,b} + \mu_f F(\phi_{k-1,f}) + \mu_b F(\phi_{k+1,b})$$

$$F(\phi) = [1 + 2B \cos(\phi + \phi_0)],$$

(1) $\mu_f = \mu_b$ の場合: 入力強度がある臨界値を越すと ϕ_k の空間的パターンがカオスになる。一つのパターンから他のパターンへの書換えが各セルの入力ビーム強度あるいは各セルの線形屈折率の変調によって容易に実現できる。

(2) $\mu_b = 0$ の場合: $\mu = \mu_f$ が十分小さいなら、光双安定系として作動させることができる。刺激が単結合方向に伝播して将棋倒しのようなドミノ・ダイナミックスを引き起こす。ドミノ・ダイナミックスを利用すると、正の刺激パルスだけでオン、オフのスイッチ動作や、スイッチを交代に繰り返すマルチ・バイブレータとしての機能を実現できる。また、2個のセルからなる系で基本論理演算 (AND, NAND, OR, NOR) が可能な四端子素子を構成することもできる。

(3) 3個のセルを双方向に結合させた光3重安定素子でのパターン認識の機能: 一般に、セル数 (N) が奇数の時、双方向結合では光入力強度の増加により N 個の安定状態に分岐するが、セルに双方向に入射する光強度の非対称性が増加すると動的な不安定性が誘起される。 $N = 3$ の時、 $(0, 0, 0)$, $(1, 1, 0)$, $(0, 1, 1)$ および $(1, 0, 1)$ の入力パターンマッチング動作が可能である。つまり、容量は1セル当たり2/3ビットであり、双方向から入射する空間パターン符号列が一致した時だけ系は安定な出力を示し、他の場合は不安定化が起こり間違いを即座に検出できる。3

セルで1素子とした時、この素子が S 個の場合、認識可能なパターン数は 2^{2S} である。

(4)ある条件下では、時空間カオスとそれへの移行ルートが観測される。そこには、複雑な basin 構造を持った周期軌道の多数の共存(準安定を含む)がみられる。basin 間の遷移を誘導できたならば、それは周期軌道のなかでサーチを行うのに有用であろう。

講演者は、相空間の構造を設計(design)あるいは制御することにより、新しい機能をもたらすような工学(phase space engineering)を提唱したい。

文献

K. Otsuka and K. Ikeda, " Self-induced spatial disorder in optical systems ", Phys. Rev. Lett. 59 194-197 (1987).

K. Otsuka and K. Ikeda, " Cooperative dynamics and functions in a collective optical element system ", preprint (1988)

K. Otsuka and K. Ikeda, " Hierarchical multistability and cooperative flip-flop operation in a bistable system with distributed nonlinear elements " Opt. Lett. 12, 599-601 (1987).

K. Otsuka, " Pitchfork bifurcation and all optical digital signal processing with coupled element bistable system ", (1988)

新上和正、『位相空間上のポテンシャル風景と時間相関』、日本物理学会秋の分科会講演予稿集4p-c5-2(1988).

池田研介、『光カオスは応用可能か?』、光学、第17巻10号 508-515 (1988).

池田研介、大塚健樹、佐々木敬介、『半導体レーザとカオス』、光通信理論とその応用、光通信理論研究会編、森北出版、東京、(1988)7章

2.9 土屋和雄、『制御理論と非線形動力学』

制御工学とは次のように定義される。即ち、『ある環境でのぞましい機能を実現するための制御系を設計することである』。制御工学の最前線は非線形動力学と非常に近い関係にある。

全制御系 = センサー系(感覚情報処理系) + 処理系(環境理解/行動計画系) + 可動系(運動制御系)。このような制御系は四つの処理レベルを持っている。それらは: 第0過程、入出力を与える; 第I過程、安定化(外部からの加算的な環境ゆらぎに対して); 第II過程、適応(ゆっくりしたパラメータの変化で表し得る環境の変動に対して); 第III過程、学習制御(予めきちんとは定義されていない機能に対して)である。

そこに生ずる問題は、ある種の『最適な』状態を捜すことに帰着されることが多い。歴史的には、1. 古典的な制御理論、2. 現代の制御理論(1960年代以降、計算機を必需品とするような場合)の二つに分類される。しかし、これらはいずれも一個の basin しか持たない場合しか取り扱っていない。

上に挙げた例の第I過程の技術でいえば、最適フィルター(カルマンフィルターなど)や最適レギュレータ(LQGなど)がある。これらは、航空機や原子力プラントといった類いに多く現れる、線形の比較的低次元(主要なモードが大体10個以下)の系に有効に応用されてきた。第II過程の技術でいえば、MRAS、非線形フィルターなどがある。第III過程でいえば、何らかの最小化問題に使われる神経回路モデルがあげられる。

それでは現代の制御理論の次に来るものはどんなものであろうか?

イメージ的には、例えば冗長性及び非線形性を持ち、多数の basin を有し、高い次元を有するもので特徴づけられる。もう少し具体的には、ベナード不安定性、馬の複数の走行モードにおける速度 vs エネルギーの効率、感覚細胞の感度とそのダイナミックレンジ、外界をモデル化された内部表現の形で取りこんだ時の概念形成、などなどの現象に付随して現れるような問題が解明されて後に備えられるような機能が考えられる。

例: 次世代ロボットとして自律移動ロボットが考えられている。自律移動ロボットとは、時々刻々変動する環境の中で目的検索行動を行なうロボットである。一例として現在研究開発されている宇宙用の自律移動ロボット。とくに環境に対する柔軟性と速応性が要求される。新しい原理に基づく情報処理方式の研究が望まれている。生物の神経回路系における情報処理は情報がパターンとして

コーディングされているため、入力に対する柔軟性が高く、また、処理が並列的に行なわれているので適応性も早くなる事が期待されている。感覚情報処理系及び運動制御系に対しては現在その作動原理及び機能の明確になっている様々の神経回路モデルが直接適用可能と思われる。環境理解/行動計画系に対して直接適用可能な神経回路モデルは未だ提案されていない。それ故今後、神経生理学等を参考にしながら環境理解/行動計画系の機能を明確にする事が自律移動ロボット開発において重要となるだろう。

文献

土屋和雄、田中建一、清水優子、『神経回路によるマニピュレータの運動制御 - Motion control of a manipulator based on neural models』、計測自動制御学会第7回自律分散システム研究会 p101 (1988).

田中建一、清水優子、土屋和雄、『神経回路によるマニピュレータの運動制御 - Motion control of a manipulator with redundancy using neural networks』、JAACE '88-5 第32回システムと制御研究発表講演 p183 (1988).

T. Poggio, V. Torre and C. Koch, "Computational vision and regularization theory", *Nature*, 317(26), 314-319 (1985).

J. J. Hopfield and D. W. Tank, "Neural computation of decisions in optimization problems", *Biol. Cybern.* 52, 141-152 (1985).

D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams, "Learning representation by back-propagating errors" *Nature* 323, 533-536 (1986).

M. A. Arbib, "Modelling neural mechanism of visuomotor coordination in frog and toad", in *Competition and Cooperation in Neural Nets*, (ed. S. Amari and M. A. Arbib) (1982).

J. Albus, "A new approach to manipulator control: the Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)" *J. of Dynamic systems, Measurement and control*, Trans. of the ASME, 97, 220-227 (1975).

D. F Hoyt and C. R. Taylor, "Gait and the energetics of locomotion in horses", *Nature* 292, 239-240 (1981).

§3 おわりに

本ワークショップの内容的な面からの結論は、敢えて出すことは控えておきたい。我々の持つ動機をベースにした研究は緒についたばかりと考えられるからである。

忙しい中、ワークショップへの参加を快く承諾して下さった参加者の皆さんに、及び話題を提供して下さった方々に心からお礼を申し上げます。

本ワークショップは、藤本研究室長、古濱社長の暖かい励ましと支持なくては開催までこぎつけることはできませんでした。お二人に厚く感謝いたします。