

01-R 015

新情報処理技術に関する総合的調査研究 —自律・協調WG報告書—

平成2年3月

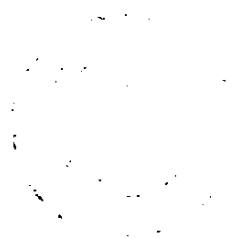


財団法人 日本情報処理開発協会



この報告書は、日本自転車振興会から競輪収益の一部である
機械工業振興資金の補助を受けて平成元年度に実施した「新情
報処理技術に関する総合的調査研究」の成果をとりまとめたも
のであります。





序

過去30余年にわたる情報処理技術の進歩は著しく、その成果を支えに社会の情報化も急速に進展し、コンピュータは今やわれわれの社会活動にとって不可欠のものとなった。しかしながら、その利用範囲の拡大や多様化にともない、情報処理機能の一層の高度化が求められ、特に最近では、固定化した逐次処理型の情報処理機能から、人間にとって親和性に富む、より柔軟性の高い知的な情報処理機能への変革が、強く期待されるようになった。

このため、従来のコンピュータが不得手とする、人間の脳が行っているような、高度かつ多彩な情報処理の実現に向けて、必要とされる機能、計算原理および実装技術、さらには、革新的な情報処理技術と社会の係わり等を含めた総合的な調査研究を、平成元年度から開始した。

本年度は、通商産業省における新情報処理技術調査研究委員会の下部機構として、当協会に基礎技術、新機能、社会応用の3分科会および超並列・超分散処理、学習、光技術・新デバイス、3次元情報処理、認識・理解、自律・協調の6ワーキンググループを設置して調査研究を実施するとともに、大学・研究所への研究委託、海外調査等により、21世紀を目指す革新的な情報処理技術がいかにあるべきかを、ニーズ、シーズの両面から追求し、新しいナショナルプロジェクトとしての可能性を検討した。

最後に、本調査研究に多大なご協力を頂いた各分科会およびワーキンググループの委員各位に厚く御礼申し上げる次第である。

平成2年3月

「自律・協調WG」委員名簿

(順不同)

	氏 名	役 職
主査	井上 博允	東京大学工学部機械工学科教授
幹事	高瀬 國克	工業技術院電子技術総合研究所 知能システム部行動知能研究室長
幹事	船橋 誠壽	(株)日立製作所 システム開発研究所 第一部 主任研究員
委員	浅川 和雄	(株)富士通研究所 システム研究部第一研究室長
	岩田 洋夫	筑波大学構造工学系 講師
	遠藤 経一	(株)東芝 システム・ソフトウェア技術研究所 研究第二部システム第一担当主任研究員
	久田 光彦	北海道大学理学部生物学科 動物生理学 教授
	廣瀬 通孝	東京大学工学部 産業機械工学科助教授
	矢野 雅文	東京大学薬学部 薬品製造工学 助教授
	和田 充雄	工業技術院製品科学研究所 基礎人間工学部生体システム課長

目 次

1. まえがき	1
2. 自律協調作用を有する情報処理技術に関するニーズ	3
2.1 生産・流通ネットワーク	3
2.2 高度情報活用システム	4
2.3 自律協調ロボット	5
3. 生体系における自律協調	6
3.1 生物の自己組織性	6
3.1.1 はじめに	6
3.1.2 生体における自己組織	7
3.1.3 中枢神経系における自己組織	8
3.1.4 今後の展望	9
3.2 大脳生理学からのアプローチ	10
3.2.1 脳における自律と協調	10
3.2.2 脳地図	10
3.2.3 情報の脳内表現	13
3.3 行動科学からのアプローチ	19
3.3.1 行動レベルにおける自律と協調	19
3.3.2 自己と非自己の認識	19
3.3.3 生体リズムの同調	20
3.4 バイオロジカルアプローチ	24
3.4.1 神経系の構成	24
3.4.2 同定可能性	25
3.4.3 司令神経	25
3.4.4 ノンスパイク・ニューロンの存在	27
3.4.5 行動間の階層的協調とその神経基礎	28
3.4.6 学習の神経機構	28
3.4.7 メモリメカニズムとインプリンティング	31
3.5 分子生物学的アプローチ	33
4. 自律協調作用の工学的実現法	35
4.1 学習	35
4.1.1 自律協調システムの学習法	35
4.1.2 例題学習のポイント	35
4.1.3 今後の課題	37
4.1.4 まとめ	38
4.2 神経回路網	38
4.2.1 ニューロコンピュータとは	38
4.2.2 階層ネットワークの機能	40
4.2.3 自律協調システムへの応用	42
4.3 システムの統合化手法	46
4.3.1 シナジェティクス	46
4.3.2 ホロニックシステム	49
4.3.3 協調と非線形現象	50
4.3.4 工学的統合化手法	53

4.4 分散協調情報処理	55
4.4.1 モデル	55
4.4.2 分散型システム	58
4.5 運動制御とセンサフュージョン	60
4.5.1 センサフュージョン	60
4.5.2 運動制御	63
4.6 自律分散型コンピュータ	68
4.6.1 自律分散システムの基本概念	68
4.6.2 自律分散システムの実現例	69
5. 研究開発課題	73
5.1 感覚行動システムにおける群情報処理技術	73
5.2 自律協調型知能情報処理システム	74
5.3 自律的複合知能ロボット	75
5.4 多次元感覚情報処理技術	75
5.5 情報パーソナル化のためのニューロエンジニアリング	76
6. むすび	77

1. ま え が き

近年のコンピュータ技術の進歩は目覚ましく、その処理速度や記憶容量は飛躍的な向上を続けており、応用領域も拡大の一途をたどっている。この進歩は主にコンピュータを構成するデバイス技術の急激な発達に基づくものであり、計算原理自体は依然としてチューリング機械の理論の上に構築されたものが多く、応用面の拡大に伴って機能上の限界も強く意識されるようになってきた。

情報処理の究極の目標の一つに、人間の様な多面的、柔軟かつ統合的な処理機能の実現が挙げられる。しかし、人間の脳の処理機能とコンピュータに実装した機能との間には、原理、質、量いずれを取っても大きなギャップがあり、今後の画期的な技術の開拓が強く望まれている。人間の脳が行う情報処理は、意識下で行う直観的並列分散の情報処理と、意識上の論理的直列集約的信息処理、という2つの側面を持っていると言われる。これは、いわゆる右脳と左脳の機能に対応するものである。従来型の逐次的情報処理では左脳的機能の実現に向けて精力的な挑戦が続けられ、ある程度の成果は蓄積されてきている。しかしながら、パターンの認識や、直観的な情報の処理、多自由度系の自律的かつ協調的制御など、人間の右脳あるいは小脳が行っている情報の処理については、コンピュータで実現できるレベルはいまだ初歩的な段階にあるといわざるを得ない。その理由は、従来型のコンピュータが基礎を置いている逐次処理の計算原理が、これらの諸機能の実現に必ずしも適していないからだと考えられる。

新情報処理技術調査研究では、従来のコンピュータが不得意な、人間の脳が行っているような高度、柔軟、かつ多彩な情報処理を実現するために必要な、新機能、計算原理、デバイス、実装技術について調査し、併せて、社会の要請、および、この新情報処理技術が社会へ及ぼす波及効果、等についても検討する。本調査研究は以下に示すような総合的な大枠のもとで実施することとされた。

基礎理論基礎技術に関しては、(1) 超並列・超分散処理、(2) 学習、(3) 光技術・新デバイス、の3項目を取り上げて検討する。

新情報処理に求められる新機能については、(1) 3次元情報処理、(2) 認識・理解、(3) 自律・協調、の3項目に関し調査検討する。

新情報処理技術の応用分野を明確にすると共に、その社会的インパクトについて調査検討する。

この大枠のもとで、自律協調ワーキンググループは、多自由度系の制御に見られるような、部分的な要素がシステム全体と調和を取りつつ機能する自律的かつ協調的な情報処理機構について、脳神経系やバイオシステムをも含む幅広い観点から多角的に調査を行った。

本報告書は、自律協調ワーキンググループが、平成元年度に行った調査をまとめたものであり、以下にその要約を示す。

自律協調機能を有する情報処理技術は、高度の生産・流通ネットワーク、高度の情報活用システム、自律協調ロボット、など、高度に発達した将来の日常生活を支援していくための新システムを実現するために必要であり、社会の側に根強いニーズが存在している。

自律協調機能の最高の手本は人間を頂点とする生物における情報処理である。まず、自律協調のメカニズムを調べるために、生物の自己組織性、生体系における自律協調に関する脳生理学、行動科学、生物学、分子生物学など、いろいろな観点からのアプローチについて幅広く調査した。次に、自律協調作用の工学的実現法として、学習、神経回路網、システムの統合化原理、分散協調的情報処理、運動制御とセンサフュージョン、自律分散型コンピュータ、等の諸技術について現状および将来の可能性について調査検討した。

新情報処理技術を研究開発プロジェクトとしてとらえるときどのようなテーマが考えられるだろうか。本WGでは、自律協調機能の実現のために、適当と考えられる研究開発課題の例として、群知能情報処理システム、自律的多機能複合知能ロボット、多次元感覚情報の収集統合及び提示技術、情報パーソナル化のためのニューロエンジニアリング、等を取り上げることが提案している。

以上が本報告書の概略であり、第2章から第5章にその詳細をまとめる。

2. 自律協調作用を有する 情報処理技術に関するニーズ

自律協調作用に関連した情報処理技術に対するニーズを、産業社会の将来像の観点、および、情報の活用、ロボットの活用といった横断的観点から検討する。

2.1 生産・流通ネットワーク

今後の産業社会は、生産力の潤沢化、要素技術の成熟化を背景として、消費者との結び付きを格段に強くしてゆく傾向にある。

「マーケットイン」という言葉に代表されるように、消費者ニーズの把握、顕在化、商品企画が重要となっており、実験的に商品を市場に出すといった生産形態（実験室型量産）が増大する。この動きは、ライフサイクルが従来とは比較にならない程短いことを前提とした商品の出現を意味しており、これに対応して生産設備は迅速に編成替えされるものになってゆかねばならない。

一方、商品構造が確立した分野では、生産者と消費者が渾然一体となった形で、オンライン的に生産・市場を運営するプロシューマ型生産へと移行してゆく。すなわち、消費者の嗜好の多様化の進展を反映して、消費者自らが、店頭で自分の好みにあった商品を設計（店頭CAD）し、生産を委ねるといった生産形態である。各所にデザインセンタを配備しつつあるASIC（Application Specific Integrated Circuit）商品はその始まりととらえることができる。また、電力リアルタイム課金のように、経済メカニズムをリアルタイムで働かせて需給調整をはかるといった動きは、このようなプロシューマ型生産の特別な形態と位置づけられよう。

このような産業社会への移行によって、生産者と消費者を結び付ける巨大な情報ネットワークが構築されてゆく。ここにおいては、巨大化によって必然的に起こってくる異種計算機間の結合がなされなければならないし、かつ、これら計算機資源を広い範囲の環境変化の中で効率的に活用する広域的な運用管理をすることが必要となってくる。さらに、このようなネットワークは一挙に構築されるような性格ではなく、段階的に拡張されるとともに、部分的な保守・置換が逐次になされねばならないが、これらの過程で全体システムを休止させることはできないし、部分的な障害が全体システムの破滅につながるものな

いように、高いフォールトトレランス性をもっていなければならない。これらの要求を満足する運用構成管理ソフトウェアは、当然のことながら一つのハードウェア上に存在する訳ではなく、分散的なハードウェアを前提として、自律協調的に機能するものでなければならない。

生産設備に付帯した情報系も、商品ライフサイクルの極端な短期化によって、迅速かつフレキシブルに再編成されなければならないし、設備の巨大化に伴って発生する設備の新陳代謝、成長に追従できるものでなければならない。ここにおける情報系も、機能的には上述した広域ネットワークと同じような要件を満たさなければならない。

2.2 高度情報活用システム

産業・社会に関連した情報量は爆発的増大が進み、これらの中から有用な情報をいかに的確に選択し、活用するかが問題となってくる。また、これら大量の情報を人類共通の財産としてどのように継承してゆくかということも大きな問題となってくる。さらに、情報の独占的な集約は社会的な力の差異を著しく大きなものにするため、誰もが情報に容易にアクセスできるような基盤を形成、整備してゆく必要がある。一方、これら情報にアクセスするためのマンマシンインタフェースは、現段階では、人間の感覚モダリティのごく一部に作用するだけで、情報の伝達容量はきわめて低い水準であるし、利用者の個性をまったく無視したものとなっている。

これらの問題点を解決するには、データベースの構築に関しては、感覚的情報を含めた形で有用な情報を蓄積してゆくための能動的な情報収集機能が必要になってくるし、このようにして収集した情報を高次に再構成して格納蓄積するデータベースの自己組織化機能が必要となってくる。利用者インタフェースの観点からは、多次元的な感覚情報を提示して擬似体験ができる人工現実感の実現、利用者との自然な対話ができるとともに、利用者の個性に自然に適合する、あるいは、より積極的に利用者がその性向を育てて情報のパーソナル化がはかれるインタフェースが必要である。

これらの要請を包括的にみると、どのようにして多次元的な情報を人間の多様な知性のモダリティに適合した形で収集、蓄積、検索、表示してゆくかという、多次元情報の自律協調作用化に集約される。

2.3 自律協調ロボット

ロボット技術に対する期待は、従来の生産現場の自動化から、家事労働の省力化、宇宙空間などニューフロンティアでの作業遂行といった領域に大きく広がってきている。

社会がいかに豊かになってもサービスコスト（人件費）が比例して高騰することにより、老人や病人の在宅看護などによる過酷な生活条件を緩和することは難しい。とくに、今後、高齢者社会をひかえてこの問題は深刻なものとなってくる。一方、女性の社会進出は一層進み、家事労働の負担の解消の期待も増大してくる。根本的には、生活関連のサービス機能を自動化することが必須であり、これら問題解決の切り札としてロボット技術の飛躍的な進展が望まれる。

21世紀にむけて、人類の営存空間は宇宙、深海、地下など大きく広げられようとしている。このような環境の下では、人間は直接的な作業をすることは到底できず、ここにおける諸作業をロボットにゆだねざるを得ない。しかし、大空間での精緻な作業を遂行できるロボット技術は未成熟な段階である。

生産の場面へのロボットの導入は、すでに長い歴史を持つが、これらが活躍しているのは生産活動の中のごく一部にすぎない。生産設備の保守点検、改修といった非定型、かつ、高度の熟練を必要とする作業は、依然として人間の手に委ねられたままとされている。熟練技術者の高齢化、生産設備の高信頼化、商品のライフサイクルの短期化といったことを背景として、設備の維持管理の自動化は強く望まれており、高度な知能をもったロボットの出現が期待されている。

これらのロボット技術に関する要請の大きな共通点として、複雑な環境の下での器用な作業遂行能力の実現をあげることができる。今日のロボット技術はあらゆる機構や知能を一つの個体に埋め込もうとしてもはや限界に達し始めた観があり、ここで述べたような要請に応えられるとはとても思えない。これにブレークスルーを与えるには、ロボット個体ではなく自律協調作用をなすロボット群として目標とする機能を達成するシステムの実現を目指してゆくことが有力なアプローチと考えられる。

3. 生体系における自律協調

3.1 生物の自己組織性

3.1.1 はじめに

自己組織の理論的研究はペルーゾフ・ジャボチンスキー反応、レーザー発振や熱対流などいわゆる散逸構造の形成といったシステムにおいて行われてきた。このシステムの特徴は系が均一な要素からなり、秩序が無秩序な状態から生じることである。ここで働く原理は Haken により提出されたスレービング原理である。この原理はマイクロな要素が協調と競合をしようことにより、巨視的な秩序が現れ、この巨視的な秩序が系を構成するマイクロな要素の振舞いを規定してしまうことを言う。ここで現れる秩序は系に与えた拘束条件によって規定されている。したがって系の振舞いを規定するにはこの拘束条件を動かすことになる。しかしながらこの巨視的な秩序は揺らぎが成長することによって起きるので、ペルーゾフ・ジャボチンスキー反応においてはどのような空間パターンを作るのかといったことまで制御できるわけではない。しかも物理学や生物物理を中心に発達してきたこれまでの自己組織化論は境界条件を固定したもとのパターン生成であって、それは単なる散逸構造に過ぎないという考えもあるほどである。

生物の形態形成や脳における情報処理はもっと柔軟で、そこにおける自己組織性はその境界条件をも自律的に変化させていく発展的なシステムである。生物は様々な階層を持つが、各階層においてそれを構成する要素は一般的には均一ではない。その意味では生物は複雑系であるといえる。生命は細胞からといわれるように、未だかつて無秩序状態から生命が誕生したことはない。したがって生物システムと前述の物理システムと大きく異なることは、秩序から秩序が生まれることであり、生物システムはその環境も、また生物システム内部も時々刻々変化し、発展することである。多くの異質の要素からなるシステムがある調和を持って変化していく現象もまた一種の自己組織であると見なせる。システム論的観点から見ると超分散超並列システムが自律的に運営されていることになる。この自己を制御する情報はシステム自身が作り出しているわけであるが、そのメカニズムは不明な点が多い。

3.1.2 生体における自己組織

(1) 発生・形態形成

生物の発生や形態形成は通常の場合かなり一定の軌跡を描きながら進行する。したがって一見機械的に発生、分化、形態形成は進むように見える。この物質的な基盤は遺伝子であるDNAにあるので、DNAによってすべてが規定されているように思われる。しかしながら、生命はそれを構成する物質（分子）の特性にあるのではなくてそれらの関係で決まり、しかも成体の持つ情報は受精卵のDNAに含まれる情報に比べるとはるかに大きくなっていて、この情報が何処からくるのが問題となる。物質間及び細胞間の関係情報は外部から与えられるわけではないので、生物は形態形成に必要な情報を自ら作り出さざるを得ないことになる。この立場はいわゆる自己組織という考えである。

英国のWaddingtonの流れをくむWalpert、Goodwinらは形態形成の場には位置の情報が必要であることを主張している。生体の分化を行わせる物質が必要であるとしてこれをMorphogenと呼び、この濃度勾配あるいは濃度の空間パターンにより部分が全体との関係を知り得るとした。この考えは多くの現象を定性的に説明する。Morphogenの物質的な実体は何かを分子生物学的に追求し実際に分化促進物質が判っているような場合もある。しかし大事なことはこの化学物質のパターンがどの様にして作られるかであり、空間パターンの生成が単なる反応拡散系によって作られると見なすだけでは十分ではない。発生や形態形成には極性すなわち異方的な反応の場が必要であり、それは受精卵に始まり引き継がれ発展していく。反応の場により発現するDNAが規定され、それによりまた反応の場が新たに作られるという情報の循環が重要となる。生体のように多くの異なる要素からなるシステムを制御するには要素間に関係を与えることが必要で、この関係の与え方は種々の与え方が可能であると思われる。しかし巨視的に発生・形態形成が進行するには、少なくとも巨視的なスケールでの関係性の与え方が必要なことは自明で、その一つがMorphogenと言われる物質の空間パターンであるかも知れない。しかし系に秩序（パターン）が生まれるには拘束条件が必要で、しかもこの拘束条件が各生物の自己の歴史性に依存しているのが特徴である。Morphogenの種類も、同一個体でも場所により異なるし、同じ場所でも数種類に及ぶかも知れない。これらの情報の交流や循環に関してはまだ判っていないことが多い。特に発生現象と分子生物学、特に遺伝子発現との関係が明らかにされなければならない。

植物の場合も同様である。植物は成長の過程で外部環境が大きく変化する。その植物

の置かれた場所やそれ以外の外部環境の変化にしたがってその形を決めなくてはならない。この時形を決める情報はやはり生体内で作られることになる。植物は自らが根の周りに作る電場の変化を通じて外界の変化を知り、それに従って伸張が起きていることが示されている。これも一種のパターン生成による制御である。

3.1.3 中枢神経系における自己組織

近年脳科学はめざましく発展しており、脳を構成する要素である神経細胞の性質、神経細胞のネットワークの構造及び機能発現に関するシナプスの構造変化や化学的変化等が次々に明らかになってきている。この中枢神経系は極めて融通無碍に計算を行い、情報処理をし、環境変化に耐えうる性質を持っている。しかも脳は150億にもものぼる神経細胞からなり、この様な膨大な数からなるシステムが均質な要素ではなく異質な要素からなることが特徴となっている。この様な複雑性は複雑な外界を制御するのに必要であると思われる。なぜなら生物を取り巻く外界は予想不可能という意味でindefiniteであるので、生物がそれに対応するには生物もまたそれに優る複雑性が必要となるからである。そういう意味では生物もまたindefiniteなシステムでなければならない。生物はある環境の外界においたときに初めて意味のある存在となるからである。そういうシステムが情報を処理しようとするれば、生物の内部をdefiniteにする拘束条件は何か問題となる。拘束条件がなければ、系はシステムの内部に関係をつけ、ある秩序を自己組織して系をdefiniteにすることができないからである。

(1) 構造的拘束条件

脳の機能を決めるものは広い意味での構造である。しかしながらこの構造は機械と異なってそのモジュール構造を変えることが出来る。機械の場合は目的を人間が最初から与えるわけで、機械の各モジュールの機能も構造も決まっているいわゆるdefiniteな系である。脳の場合はある環境においたときにシステム全体の機能発現のあり方が決まるわけで、機能発現に従ってモジュールの大きさが決まると考えられる。特に脳の発生過程で神経回路網が完成していく際はこの変化は大きいことが実験的にも示されている。このことは脳の発生途中に限ったものではなく、成体になってからも環境が大きく変わったり、システムが損傷を受けた場合などは脳は時間的にも空間的にもモジュールの大きさ、機能を変えることが出来ると考えられている。ということは、ある機能が限定されている場合はモジュール構造を観測することができるが、システムの機能自身が変化

する場合はモジュールの境界、モジュールの機能も変化することを意味する。この回路網の自己組織性こそが脳の機能を柔軟にしている因となっている。

(2) 拘束条件の時間的变化

中枢神経系の情報処理はその構造変化と大きく関係していると思われる。これがいわゆる人工の産物である機械との違いであろう。ただし、この時間変化といってもいろいろな時間スケールでの変化が存在している。情報処理の最中にお互いの関係性を変えるという意味での各結合の変化は、海馬や小脳でみられる一種のヒステリシスを示すシナプス変化に比べるとはるかに早く起きるだろうし、機能分担の変化などといった大きな変化は数カ月のオーダーで起きる。この構造変化は言うまでもなく生体における情報処理と密接に関係しており、ソフトの変化の法則性とハードの変化の法則性が何らかの形で結び付いているはずである。生物の情動的活動と大きく関係しているといわれるアミン神経系はまさしく脳全体に投射しており、それはほとんどがニューロンとシナプスを作っていないことと考え合わせると、神経回路網の活動の場を全体との関連で調節していると考えることが出来る。これは情報の価値付けとも大きく関係しており、非常に重要になると思われる。神経回路網はこの場の上で働くことになり、神経回路網とその働きを規定する場の関係が情報を双方向的にやり取りすることになる。この様にダイナミックに変化する情報を処理する際にいま持っている構造だけでは十分対応できない場合も考えられる。生体は情報を処理しているときはその全体性を不安定化するような揺動を常に受けていることになる。全体の整合性を取るという意味で感覚からの入力をほとんど断ち切った状態、すなわち睡眠状態が必要なのかも知れない。数時間といった時間オーダーを必要とする構造的な自己組織に必要な時間が睡眠かも知れない。

3.1.4 今後の展望

いずれにせよ生物の自己組織性の研究は規定不能問題を解くための重要な鍵となることが予想される。そしてその発展は新しい生命論を切り開くことになるだろうし、新しい技術を提供する宝庫でもある。そのことはまたわれわれが現在持っている方法論の枠組みだけでは記述することが出来ないことをも意味している。

神経回路網における情報処理が上に述べたように非常に柔軟なものであるとすると、その動的な現象を構成する要素を何に取るかが問題となる。神経細胞が多様であるとしても基本的には同じ構造をしているから、その多様性を表せる要素を発見することが大事とな

ろう。生物の場合は進化論的にみて様々な進化の段階の生物があり、またその中でも様々な現象があるのでその中からより単純な実体概念（モデル）をつくり、それを組み合わせることにより現象を説明することが必要となろう。機能も神経回路網もおおよそ判っているものがすでに存在するのがこれらの研究の助けになる。この様な研究を通じて神経回路という構造的な拘束条件を与えたときの生物の持つ柔軟性、多様性の一部が判ると思われる。

しかし高次の情報処理はこのモデルだけではおそらく判らないと思われる。それにはもっと全体にわたった構造の自己組織現象を通じてしか判らないことも多いはずで、この現象を表す系を用いて初めて拘束条件の発展則や自律的生成が明らかになって来るとと思われる。自己を制御する情報を自分で生成出来るような系が幾つも組合わさった系では、階層内の情報統合だけでなく、異なる階層間の情報統合や行動をするための情報生成メカニズムが必要となる。そのためにはシステム自身の自己表現が必ず必要となると思われ、自己イメージの生成が研究として重要となるであろう。現在一部の研究はすでに上述の問題に正面から取り組んでおり今後の発展が待たれる所である。

3. 2 大脳生理学からのアプローチ

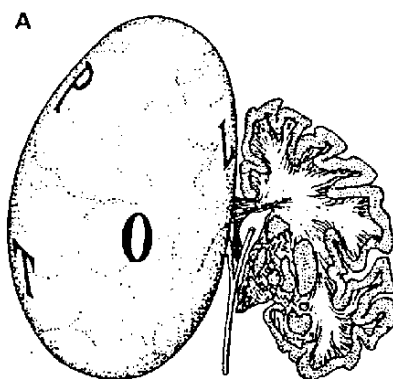
3. 2. 1 脳における自律と協調

人の脳は数十億のニューロンが互いに結合しあってできているが、大脳の皮質には種々の作用に対して特定の機能を有する領域が存在し、それらは自律的に機能すると同時に互いに協調関係があることが明らかになっている。最も大きな機能分化としては、論理的（記号的）処理を行う左半球と直感的（非記号的）処理を行う右半球があり、それぞれの皮質には様々な認知・判断に関与する多くの領域が存在している。この章では脳の構造についてこれまでに得られている知見を概観し、そのような構造において情報がどのように処理されるかという問題に対するいくつかの仮説を紹介する。

3. 2. 2 脳地図

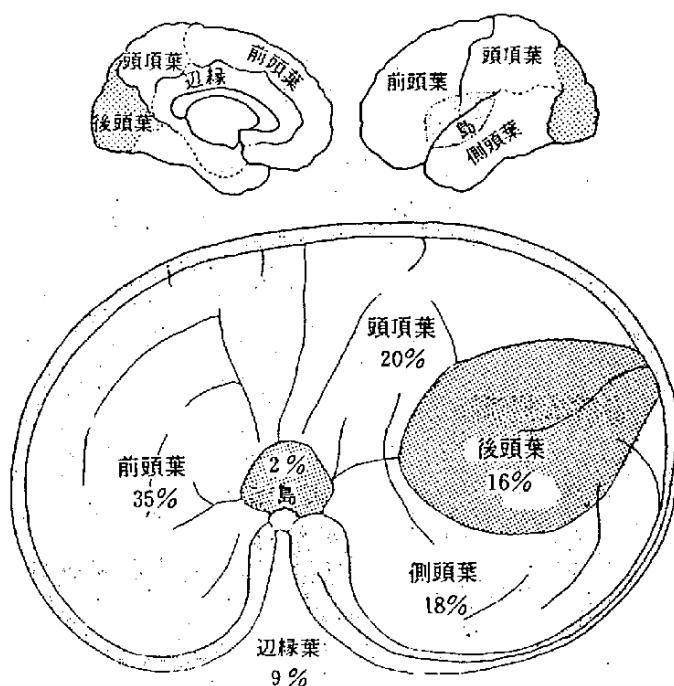
大脳皮質の機能局在の様子を2次元的に表現したものは脳地図と呼ばれる。皮質をこのように表現することの主たる長所は、外界を2次元的に反映させている脳の能力に着目することにより、脳の構造をより簡単に描くことができるという点にある。脳地図は大脳半

球を図表3.2-1のように風船状に膨らまし、脳室間孔から外側に広げると、図表3.2-2のような平面的な地図をつくることができる。



〔Aは膨らませた左半球、左半球白質と皮膚下のすべての経路と核を取り除き、脳室間孔から「ふくらませ」て皮質を平らにしてつくる。〕

図表3.2-1 二次元脳地図の作り方

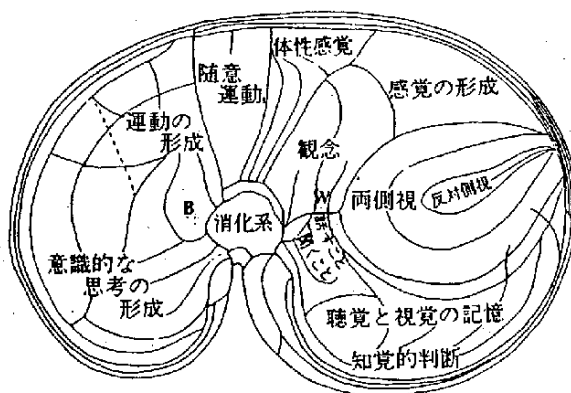


〔二次元地図（下）ともっと普通の三次元図（上の二つ）、全皮質表面の割合にも注意せよ。6層構造の新皮質の帽子には3層構造の辺縁系のつぼ（ふち）がついている。〕

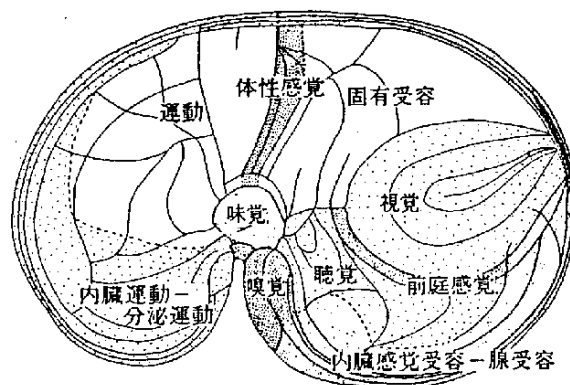
図表3.2-2 平面的な脳地図

脳地図の領域を分割する試みは今世紀初頭より行われており、様々な観点による地図が描かれてきた。脳研究の過程においては古い用語を捨てることなく新しい用語が付け加え

られ、また、役割に応じて呼び方が変わるため、同一の部分に対していくつもの名称が通用している。これらの脳地図の中で、高次の機能に着目してつくられたものとしては、ペンフィールド(Penfield, 1959) によるもの(図表3.2-3)とフルベク(Hrbek, 1976)によるもの(図表3.2-4)が挙げられる。ペンフィールドは、覚醒している患者の脳を弱い電流で刺激した実験を通じて、頭頂部には「観念」に関する機能があることを示唆している。しかし、この領域のラベルは本質的には心理学的なものであり、生理学的なラベル付けの行われている他の領域に比べると推測の段階を脱していない。フルベクの脳地図は、感覚作用と運動作用に重点を置いている。そして、脳の機能を抽象的認知という考えを排除して入力と出力の立場からのみ眺めようとしている。ペンフィールドが「観念」や「知覚的判断」、「意識的思考の形成」と名付けた場所は、フルベクはそれぞれ「固有受容」入力、「内臓感覚受容-腺受容」入力、「内臓運動と分泌運動」出力としている。頭頂部の連合皮質の多くの役割を、抽象的認知でなく「内臓的」知覚と運動過程であると見ている点がペンフィールドのものとは対象的である。



図表3.2-3 ペンフィールドによる脳地図



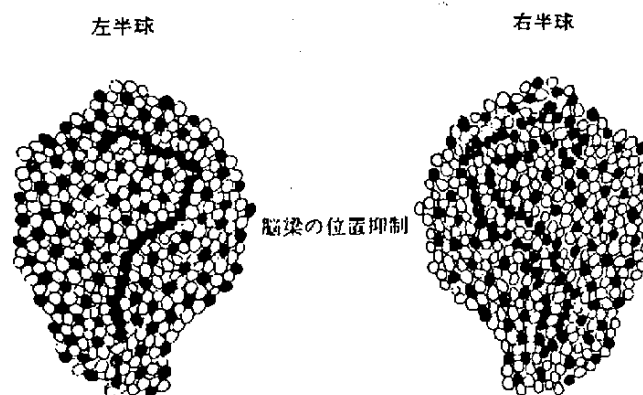
図表3.2-4 フルベクによる脳地図

3.2.3 情報の脳内表現

(1) ブレイン・コード

「ブレイン・コード」とは、脳の中で、イメージや感情といった心理学的に意味のある情報が伝達されることにかかわる基本的な規則をさす。これは、個々のニューロンが互いに連絡しあう時の基本的な規則である「ニューロン・コード」に比べて、巨視的に見たニューロン群の活動パターンを議論の対象とする。言い替えれば、脳地図に表された各部位間の相互作用に関する規則を研究するものである。

クック(Norman D. Cook)は右脳と左脳をつなぐ脳梁の抑制的機能に着目し、脳梁に異常のある患者を観察することにより、半球間を通過する情報を分析している[1]。皮質のある部位に発生した神経情報のパターンが、片方の半球からもう一方の半球に伝わる際、脳梁の同所性抑制と呼ばれる作用によって、鏡像的に反転したパターンが2つ再生されることが明らかになっている(図表3.2-5)。この現象は、皮質の間で相対的な位置を保持している平行繊維を神経情報が通過する場合は、必然的に起こることが指摘されている。このような神経情報の二重反転のメカニズムは、「ブレイン・コード」を構成する一部であると主張されている。

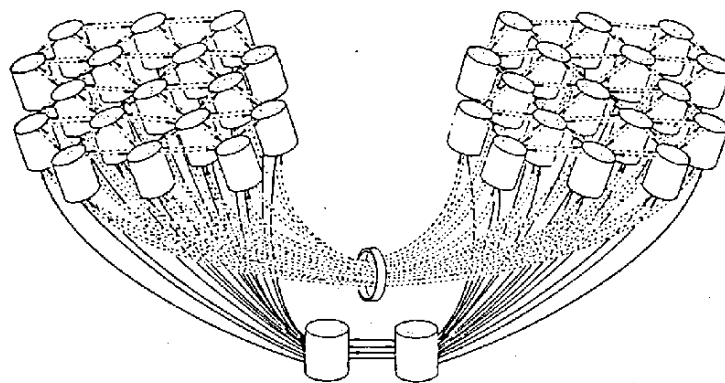


〔左の図は、何らかの活動をしている際の皮質コラムの全体的形態を示す。右の図は、脳梁の位置抑制によって生じる皮質の状態、位置的抑制によってのみ、左のパターンが2度反転される。〕

図表3.2-5 ここで考えられている半球間コミュニケーションのメカニズム

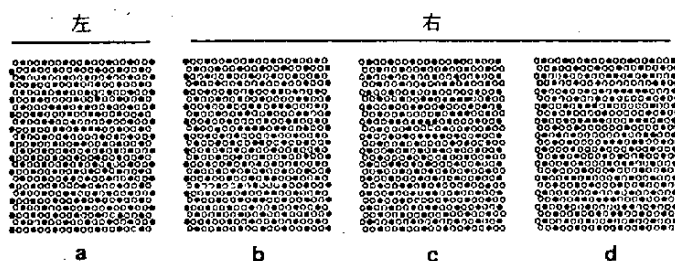
脳梁の効果は簡単なコンピュータ・シミュレーションによって確認されている。このシミュレーションでは、図表3.2-6のように皮質がコラム単位で構成され、各コラムは皮質の全表面上に蜂の巣状の配列で密につまっていることを仮定している。そして、あ

る特定のコラムへの興奮性の影響は皮質-皮質間繊維を通して到達すると仮定する。片側の大脳半球におけるネットはホップフィールド網と同様に全ての神経細胞が互いに影響し合うようになっている。両半球のネットは脳梁の機能をはたす同所性神経細胞でつながれており、その抑制作用を調節することにより左右のネットの安定状態を変化させることができる。このシミュレーションの結果、脳梁の影響が抑制的であるほど安定したネットには左右差が大きくなり、逆に脳梁が興奮的である場合には左右半球は同じ安定状態になることが確認されている。この結果は、両半球に解剖学的な左右差がなくても、機能的な左右差が生じることを示している。さらに、このシミュレーションにおいて、前述の二重反転のパターンが観測されている。図表3.2-7のaのような皮質活動が左半球に発生したとき、右半球にはcやdのような二重反転のパターンが生じている。



皮質「シリンダ」は6列にびっしりつまって配列されており、反対側の相同的シリンダと求心性および遠心性の結合を持つ。全ての皮質シリンダは興奮性および抑制性の入力を受けている。

図表3.2-6 コンピュータ・シミュレーションのために仮定された皮質構造の一部分



脳梁機能に関する3つの仮設によって、ある刺激を受けた時に作られる典型的な皮質パターン。左(a)には、たとえば言語の生成の時に作られるような、左半球に一側性に作られた皮質活動のパターンが示してある。右には、(b)脳梁同所性興奮、(c)脳梁同所性抑制、(d)脳梁拡散抑制によって作られる左半球の皮質活動のパターンが示してある。

図表3.2-7 皮質パターン

そして、脳梁の抑制作用が強いほど、反転されたパターンのでる頻度が高いことも確認されている。

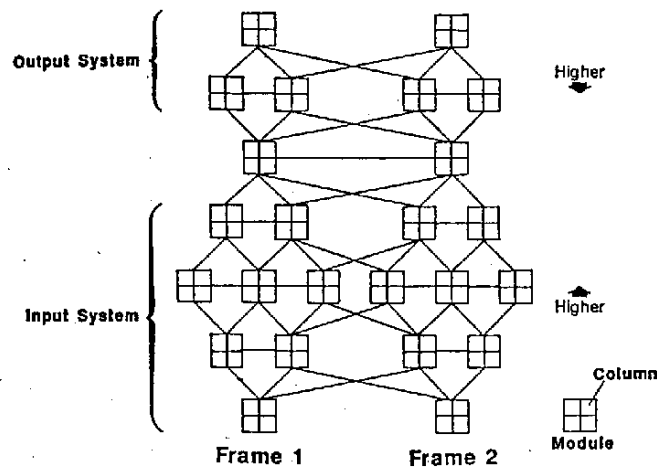
クックはまた、脳のメカニズムが自然界における様々なシステムと類似性を有することを下表のように指摘している。

自然界の機構のレベル	原 子	細 胞	動 物 体
制御中枢	核	*	脳
内的制御要素	中性子	DNA	右脳
外的制御要素	陽子	RNA	左脳
周囲構造	電子	タンパク質	身体構造
制御規則	原子コード	遺伝子コード	ブレイン・コード

(2) 多重知性の脳構造モデル

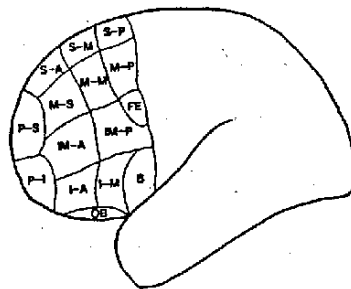
脳地図に表された各領域の機能と、高次の精神活動の関係をモデル化する試みとして沢口の提案する「フレームモデル」がある。このモデルにおいて議論される知性とは、人間を含めた動物が対象を知覚し記憶し、その知覚や記憶に基づいて対象に効果的に働きかける行動特性をさしている。知性には言語的知性、音楽的知性、論理数学的知性といったものが複数並存し、それらは互いに独立して働くことができる。この事実は「多重知性」または「精神のモジュラリティ」と呼ばれる。フレームモデルとは、多重知性の脳新皮質内構造を神経科学的にモデル化したものである。「フレーム」とは知性を実現する脳新皮質構造の実体であり、階層的に組織化された構造単位（モジュール）からなり、モジュールはコラムという皮質の最も基本的な単位が集まって構成されている。図表3.2-8 はフレームの構造を簡単に示したもので、コラムからなるモジュールが階層的に結合することによって各フレームが形成されること、そして、フレーム群は互いにある程度の連絡を持ちつつも相対的に独立していることが模式的に表現されている。この構造は、現代の神経科学において得られた知見と整合するものであり、特にPET (Positron Emission tomography)による最近の研究により言語野が階層性とモジュラリティをもつことが明らかになっている。高度な精神活動を担う前頭前野は図表3.2-9 に示されるように15の機能領域に分割されているが、このモデルに従えばこれらの機能

領域は各フレームを形成するモジュールに相当する。



2つのフレームを描いてある。各フレームはモジュールからなる。モジュールは脳新皮質の最も基本的な単位であるコラムから形成される。各フレームは階層的に構造されており、入力系と出力をもつ。各フレームは互いに独立しているが、フレーム間には弱い結合がある（相対的独立）。

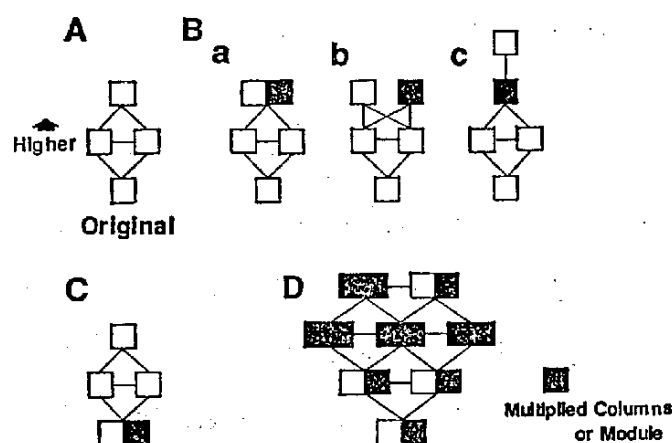
図表3.2-8 フレームモデル



各機能領域は異なった高次行動（思考など）で賦活される。フレームモデルでは各機能領域は最高次のモジュールに相当する。全部で15個の機能領域がある。

図表3.2-9 ロランドによるヒト前頭前野の機能領域の区分、左外側面図

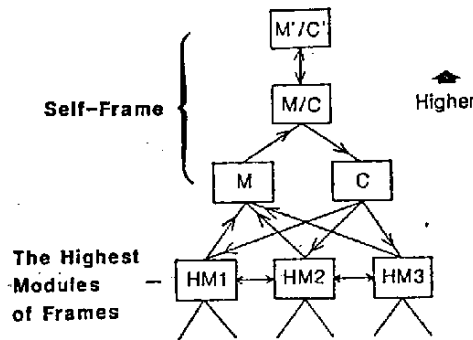
霊長類を含めた高等哺乳類における大脳新皮質の進化様式を説明する仮説は「コラム重複説」と呼ばれる。この説はコラムと呼ばれる皮質の構造的・機能的単位が重複して数が増えることにより進化的拡大をもたらすという考えに基づくもので、これまでに神経科学の分野で得られた多くの証拠に合致している。フレームモデルにおいては、コラム重複によって数が増えるとともに結合様式が変化してフレームの階層構造が高次化するという特徴により進化が説明される（図表3.2-10）。



A：オリジナルなフレーム。B～D：コラム重複によるフレーム変化の例。
 B-a：高次モジュールの拡大。B-b：高次モジュールの多重。B-c：高次モジュールの多重による階層構造の高次化。C：低次モジュールの拡大。Dは以上の各変化が組合さった変化で、こうした組合せがフレームの実際の進化様式だと考えられる。

図表3.2-10 コラム重複によるフレームの進化様式

沢口は人の最も高度な精神活動である自我や自意識も多重知性の特殊な知性であると考え、自我を実現するフレームを定義している。この自我フレームは他のフレームと同様にコラムから成るモジュール群によって階層的に構造化されているが、その役割は他のフレームの高次モジュール群を監視し制御することである（図表3.2-11）[2]。



自我フレームは他のフレーム群の最高次モジュール（HM）を監視するモジュール（M）、制御するモジュール（C）、MとCを監視し制御する高次なモジュール（M/C）、およびM/Cをさらに監視する最高次モジュール（M' /C'）からなる。

図表3.2-11 自我フレームのモデル

(3) ホログラフィ仮説

K. H. プリブラムは脳内のイメージ形成機構のモデルとして、コヒーレント光を用いた光学ホログラフィの原理を導入している。神経活動の接合部パターンにおいては、重ね合せ、すなわち近接した接合部パターンの間の空間的相互作用が生じている。これが光学系におけるホログラムと同じ特性を示す。この仮説は二つの事実によって裏付けられている。まず、幼児が運動視差や両眼視差によって与えられる情報を生まれながらにして記録できるということ。そして、成人の場合は、うまい文脈が与えられると非常に多くのことが詳しく思い浮かんでくることである。しかしながら、この仮説に基づく神経性ホログラフィ過程の情報処理能力を示す定量的データは得られていない[3]。

(4) 脳のマクロモデル

脳の高次機能に着目したマクロモデルとしては様々なものが提案されているが、従来情報処理とは相反すると考えられてきた感情の機能を中心にすえる立場にたつものが見られるようになっている。

(a) アーヅ理論

戸田は、感情は言語以前の野生環境において人間が進化の過程で合理的に得たものであり、現代の文明環境にはまだ適応していないことを指摘している。しかし、感情は個人を動かす生得的システムであり、そのエンジンとなる基本的プログラムを「ア

ージ」と名付けている。アージは遺伝的に構造が決定されており、状況別に問題解決を行う機能をもっているという仮説を立てている[4]。

(b) モニターとしての感情

K. H. プリブラムは感覚受容器に刺激を与えるものが「外なる世界」であるのに対し、主観的感情の支配する世界を「内なる世界」とよんでいる。そして、内なる世界をモニターするメカニズムとして、抑制的な相互作用をもつニューロン群が興奮性の動揺をジャイロスコープのように管理しているという仮説を提案している[3]。

認知科学の分野でも同様な指摘が見られ、D. A. ノーマンの提案する人間の情報処理のマクロモデルでは、人間の認知・行動活動において情動的要因の関与が重要であることを主張している。

【参考文献】

- [1] N. D. クック：ブレイン・コード、紀伊國屋書店（1988）
- [2] 沢口俊之：知性の脳構造と進化、海鳴社（1989）
- [3] K. H. プリブラム：脳の言語、誠信書房（1978）
- [4] 戸田正直：感情と情報、数理科学No.288（1987）

3. 3 行動科学からのアプローチ

3. 3. 1 行動レベルにおける自律と協調

生物は一つの個体として自律的に機能すると同時に、複数の個体が協調して社会を形成する。このような状況の中では外界に対する自己の認識という高度な精神活動が要求される。この章では、自己の認識という問題に関する様々な分野におけるアプローチを概観するとともに、個体間の協調原理の一つとして生体リズムの同調を紹介する。

3. 3. 2 自己と非自己の認識

心理学の分野においては、自己認識の問題に関して、幼児やサルが鏡の中に写った自分をどう認識するかといった研究が行われてきた。また、より成長した子供の場合は、社会的なかかわり合いのなかで自覚される自己認識として自我同一性（アイデンティティ）を形成することが知られている。これらの過程に関しては、現象を観察し分析するという研

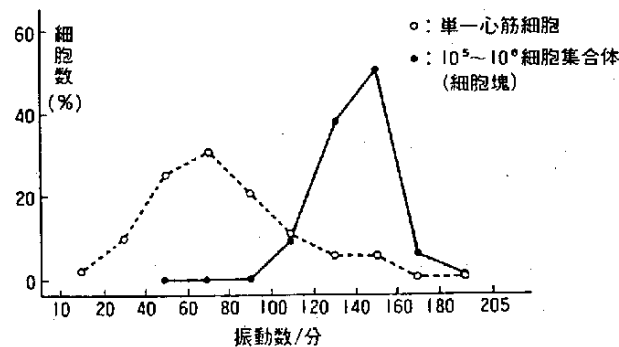
究は従来より行われてきたが、基本原理をモデル化するという試みは実現していない[1]、[2]。

認知科学においては、自己認識とは「意識による主観的体験の自覚」とされている。この場合、意識とは知覚された情報を処理する階層構造の最上部に位置する管理系を意味する。人間は知覚された外的世界のモデルをつくるが、自己認識を行うと、このモデルの中に自分自身のモデルを埋め込むことになる。このような処理様式は、文法規則に関して論じられた話題の一つである、一つの構造を別の構造の中に再帰的に埋め込むことに類似している。自己のモデルには、自分自身の行動歴、素質、嗜好、能力といったものが記述されており、自分がどのような意図をもっているかや、自分にどんな選択ができるかを知ることができる。

人工の情報処理システムにそれ自身を理解させるということを行わせるには、自己記述能力が必要になる。M. ミンスキーは、解釈プログラムをもたせることによって、仮定的な状況下におけるそれ自身の行動をそれ自身の記述から計算できるような自己記述チューリング機械をつくることが可能であることを指摘している[3]。

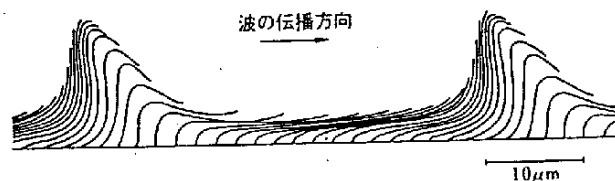
3.3.3 生体リズムの同調

人間に呼吸や心臓の拍動といった固有のリズムが存在するように、生物とリズムは不可分な関係にある。生物の世界にはリズムを通じた協力関係が存在し、そのリズム間の協力性をもたらす機構は「引き込み現象」と呼ばれる。この現象は生体の活動の多くの場面で観測される。例えば、心筋細胞は一個一個分離した状態にすると、各々が自律的に振動しその周波数はまちまちである。ところが、しばらく放置しておくと細胞同士が集合してきて細胞塊をつくり、塊全体が1つのリズムで伸縮運動をする。すなわち、本来ばらばらであったリズムが相互作用のもとに同期するという現象がみられる(図表3.3-1)。また、ゾウリムシ等の原生動物の繊毛運動に見られる「メタクロナル波」も、特徴的な引き込み現象によるものである。1本の繊毛運動自体は一種の周期的な水かき運動であるが、繊毛の集団では図表3.3-2のような波動状のパターンが見られ、この波状運動パターンはメタクロナル波と呼ばれる。この波は個々の繊毛の運動が流体を介して相互作用する結果、自己組織的に発生するもので、効率の良い水かき運動を行うことができる。



〔心筋細胞が単一のときは各々の振動数は広いばらつきを持っているが、集合して細胞塊を形成すると、1つの統一した振動数のリズムを作る。〕

図表3.3-1 心筋細胞数と振動数の関係 (Goshima, K., 1979)



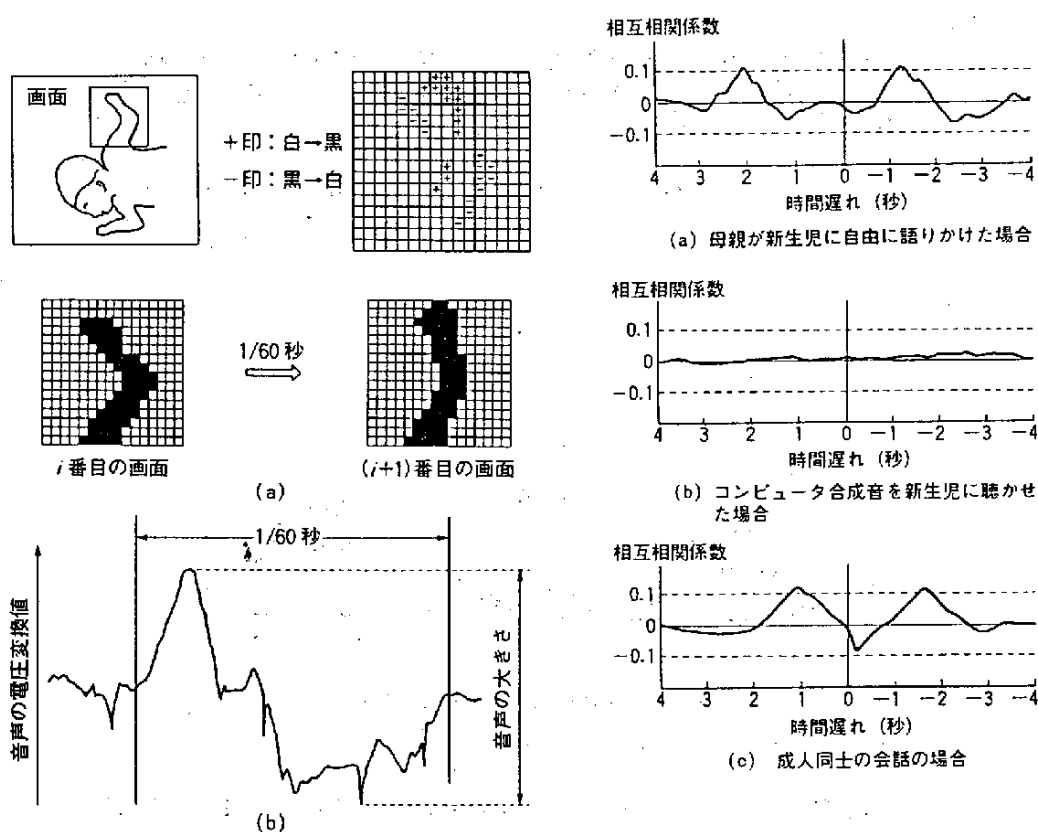
〔各繊毛がくり返す周期運動が少しずつずれており、繊毛の集団〕
 が作る山と谷が波として一方向に伝わる。〕

図表3.3-2 メタクロナル波の例 (Machemer, H., 1974)

このような合目的的な同調現象は個体群においても有効である。例えば、魚が回遊など集団で移動のために泳ぐ場合、各魚がどのように位置しどのようなリズムで泳ぐかは、群れの移動や生存にとって重要な問題になる。その場合、魚が尾びれを左右にふるリズムが同期していると互いに疲れないで効率よく泳げるという知見が得られている。

人間同士のコミュニケーションにもリズムとその引き込み現象が重要な役割を果たしている。二人の人間の動作を記録したフィルムを詳細に観察すると、相互に「気持ちの通じる状態」にある場合には、両者の動作が同期しているということがコンドン (W. S. Condon) の研究により明らかにされた。この現象は誕生直後の新生児にも見ることができる。小林

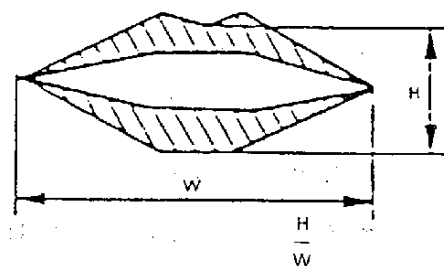
らは母親の声と新生児の手の動きを計測することにより、同期現象の定量的な解析を行っている（図表3.3-3）。母子間の同期現象は顔の表情にも見られ、両者の口の縦横比を画像計測することにより、声と手の動きに見られたものと類似した結果が得られている（図表3.3-4）。これらの現象は「エントレインメント」と呼ばれ、それを担う背後の機構として、脳のニューロンの非線形振動子による引き込み現象がコミュニケーションに伴って起きている可能性がある。つまり、神経リズムのレベルで同期していれば相互に時間を共有する形になり、複雑な行動パターンの同期をもたらしていると考えられることができる[4]。



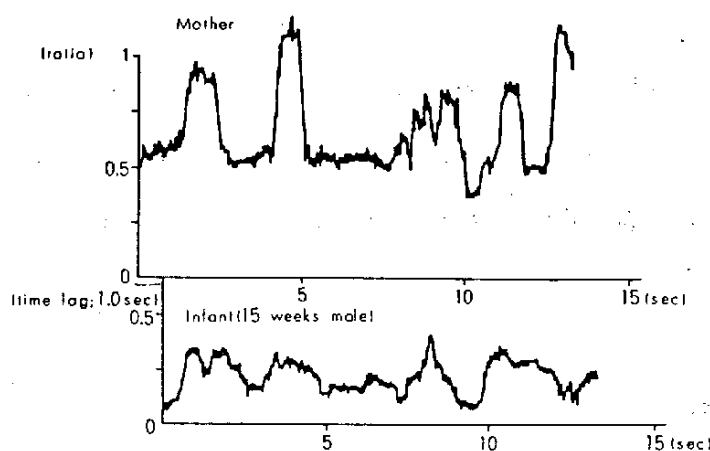
〔動きの大きさと音声の大きさ〕

〔コミュニケーションにおける音声と動作のシンクロニゼーション分析結果（分析対象時間幅約34秒、データ数2048）〕

図表3.3-3 同期現象の定量的な解析

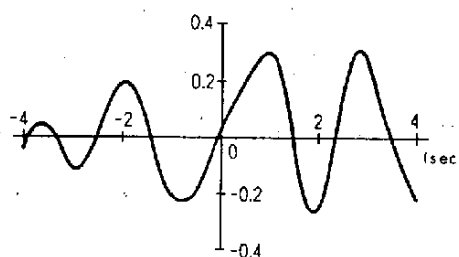


The ratio of the height to the width (H/W) of the mouth as quantitative parameter of facial expression



The time lag of the mouth movement between mother and infant. (15 weeks male)
Mother moves the mouth 1.0 second after infant's mouth movement.

Cross correlation



The cross correlation graph of the infant-mother mouth-mouth interaction. (15 weeks male) Type I

The upper graph indicates the mouth movement of infant, and the middle graph that of mother. When the graphs are shifted each other, the cross correlation graph (lower graph) was obtained. The left side peak (approximately $\tau = -2$ sec.) indicates infant mouth movement following mother's one, while the right peak (approximately $\tau = -1$ sec.) mother's mouth movement following the infant ones.

図表3.3-4 顔の表情に見られる母子間の同期現象

【参考文献】

- [1] 藤永 保他：認識の形成、小学館（1982）
- [2] 玉野井逸朗他：認識と行動、培風館（1985）
- [3] P.N. ジョンソン＝レアード、海保他訳：心のシミュレーション、新曜社（1989）
- [4] 石井威望他編：ヒューマンサイエンス、中山書店（1984）

3. 4 バイオロジカルアプローチ

自律協調系としての生物、とくに無脊椎動物のあり方は、われわれを含めた高等脊椎動物のあり方と多くの共通点を持ちながら、一方で多くの特異な性質を示している。比較的簡単な神経系をもつ無脊椎動物の神経系を主対象にバイオロジカルシステムの特徴を整理する。

3. 4. 1 神経系の構成

無脊椎動物のうち、もっとも発達した神経系を持つのは節足動物、なかでも昆虫、甲殻類である。これらの動物は、前口動物と後口動物に2分される動物全体の中で、前者のグループのもっとも発達した動物として、後口動物の頂点にあるわれわれと対極をなしている。

神経細胞の総数はこれらの動物ではおよそ 10^5 程度と見られる。一方、われわれヒトは $10^{11} \sim 10^{12}$ 程度とされている。またヒトの細胞総数は 10^{13} （60兆）個、細胞種類数としては約200種と考えられている。一方、動物体構成情報の基本としての遺伝情報を伝える遺伝子数は $10^9 \sim 10^{10}$ とされている。神経細胞はそれぞれ、その位置、構造、機能が個々によって定まっているとすると、遺伝子がこれを直接決定するには、数の上からも不可能である。神経系の空間的構成、接続の決定は、直接の遺伝情報に加えて、他の情報、例えば隣接細胞からの位置情報などが必要であることがこのことから示唆される。神経細胞は感覚系の受容細胞を初め、中枢を形成する介在神経細胞、さらに、筋肉系を初めいろいろな効果器を支配して動作させる運動神経などを構成している。昆虫などの無脊椎動物では神経細胞の大部分は体表に近く分布して外界情報を受容する感覚細胞として機能している。介在神経によって構成される中枢の固有の神経細胞数は全体のたかだか数パーセント、 $10^4 \sim 10^5$ と見られる。運動神経も $10^3 \sim 10^4$ にすぎない。一

方、霊長類などでは 10^{10} を超える細胞が脳の新皮質を構成するために、進化上新たに加わっている。この点が、後口、前口動物の2大群の神経系の相違のいちばん顕著なものである。

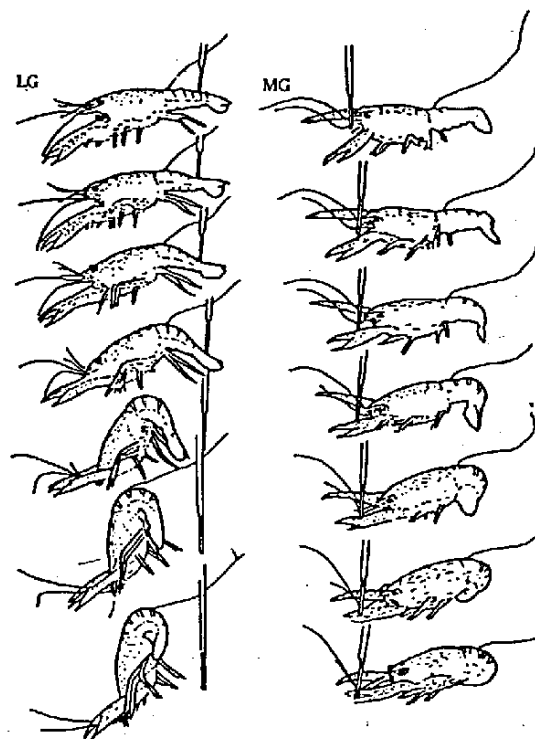
この相違は、この2群の動物の神経機能、ひいては、行動機能などに、明らかに指摘できる形で反映されているだろうか？ 蜂やアリなどの社会性昆虫の行動などから見たとき、中枢細胞数の少なさにかかわらず、その行動はきわめて精緻である。これらの動物の少数ニューロン系には、脊椎動物のニューロン系と異なる動作プリンシプルが存在する可能性がある。

3.4.2 同定可能性

節足動物の神経系は運動神経、中枢介在神経の大部分が”同定可能”であることが特徴である。まず、一つ一つの神経細胞が、構造と機能の両面で個別に記述できるような特徴を持っている。これは、個々の神経細胞が特定の機能を分担していることを意味する。このような性質からみたとき、このような神経は同定可能、Identifiableであるとされ、そのような神経の結線はその運ぶ情報が定まっていることから名札付き結線、Labeled Lineと呼ばれる。このようにこれらの動物の中枢神経は基本的にそこを通過する情報が、あらかじめ予想され得る内容を持つフィックスドワイヤリングによって結ばれているとされている。しかし一方では、そのように見えるのは、これまでの解析方法で容易に研究できるような大型の細胞に限られた現象であり、細胞内電極などで容易にとらえることのできない細く小さな細胞では、情報の質をそれほど簡単には決められない多様な信号の伝達と処理に関係しているという主張もある。

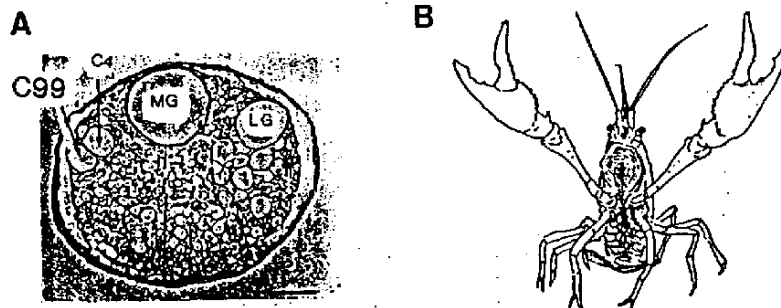
3.4.3 司令神経

ニューロンの同定可能性に関連して、大型の介在神経のあるものはその神経が興奮することが必要かつ十分な条件となって、よく組織化された運動、すなわち行動を起こすことができる。例えばエビ類の中枢には2対の巨大神経(LG, MG)があり、この神経の興奮は、腹部の激しい屈曲による逃避行動を引き起こす。行動の発現を司令しているという意味で“司令繊維”Command fibre (neuron)と呼ばれる神経繊維はこのほかにもかなりの数があることが知られている(司令繊維仮説)。



(それぞれの行動は刺激点(探り棒による機械刺激)から遠去かるように起こる。高速映画からのスケッチ、各駒間は約10msec)

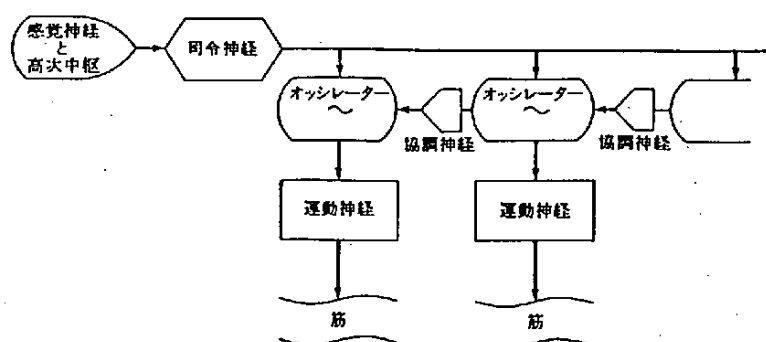
図表3.4-1 外側(LG)および内側巨大神経(MG)の働作によって起こるザリガニの行動(WineとKrasne, 1972より)



(A: 腹部神経縦連合の断面(片側)、B: A図のC99ニューロンの興奮によって引き起こされる防御反応。)

図表3.4-2 久田(1976)

ほ乳類の中枢ではこのように一個の細胞が一つの明白な役割を担って、他の細胞とは区別できるという例はまれである。むしろ、あるグループとして似通った性質を持ち集団として動作すると考えられている。たとえば皮質のコラム構造では $10^2 \sim 10^3$ 個の細胞が機能的性質の似通っているクラスタを形成しているとされている。



複数のオシレーターがそれぞれの効果器官をはたらかせるとき、相互に協調取りの接続、あるいはこのための神経が存在する。フィードバック回路の可能性はもちろんあるが、省略してある。単一の司令細胞によって全部のオシレーターが駆動されるよう示してあるが、別の司令細胞によって個別、またはグループごとに駆動されることもありうる。

図表3.4-3 協調神経を含むパターンジェネレーターまわりの神経経路(久田、1978)

3.4.4 ノンスパイクング・ニューロンの存在

節足動物の中枢神経には、まったくスパイクを発生することなく、信号伝達を行なう特殊なニューロンが発見されている。ノンスパイクング・ニューロンは腹部神経節内にある神経細胞の約4分の1をしめる。このニューロンは静止状態でも、シナプス物質の放出を続け、シナプスの後ろの細胞の活動レベルを調節している。このため、通常のシナプスでは、興奮性シナプスでは興奮増加方向のみに、抑制性シナプスでは抑制方向のみに可変であるのに、静止時の状態を中心に両方向への調節を行なっている。さらにスパイクを発生しないため、ノンスパイクング・ニューロンへのシナプス入力、このニューロンの細胞膜の受動的な電気緊張信号拡散によって出力部に伝えられる。細胞膜の受動性質から、このニューロンは、ローパスフィルタとして動作する。このような性質と、回路内の位置から、この種のニューロンはスパイクによる信号伝達では実現できない長時間にわたる神経情報処理に関与しているとされている。例えば、反射経路の感覚入力のゲイン調節、運動神経の静止時の背景活動の制御と、運動時の活動の大きさ調節などである。したがって、

この種のニューロンは一個のニューロンで複数の回路素子として同時に動作するparallel processing element である。このことが、少数ニューロン系に大きな自由度を付加している可能性も考えられる。

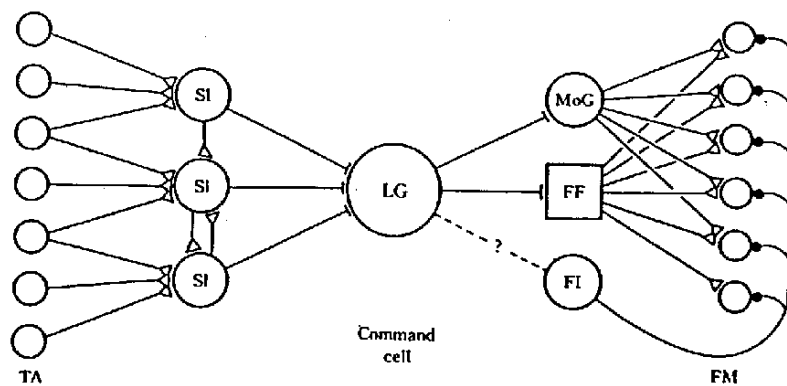
3.4.5 行動間の階層的協調とその神経基礎

動物のいろいろな行動は決してでたらめに起こるのではなく、むしろ大部分は決まった順序を持ち、相互に排他的であったり、逆に時間的に必ず前後の関係が決まっていたり、あるいは同時に起こる確率が高かったりする。すなわち行動間には組織化された自律協調性が存在する。例えば摂食と配偶行動は多くの動物では同時に行なわれることはない。しかし逆に、ある種の昆虫の雌では雄の提供する餌を食べている間だけ交尾を許すものがある。このような行動の間の優劣関係、順位関係は動物の生存にとって重大な意味を持つ。中枢の神経回路でも、これを保証する接続が存在することが期待される。仮説として、1) ひとつひとつの行動を支配する司令神経相互の間で、排他的関係の場合は抑制性の接続が、同時あるいは前後関係の場合は興奮性の接続がある、2) 相互関係を定める別の神経回路 (Gating circuit, Sequence circuit) が存在する、などが主張されている。

3.4.6 学習の神経機構

学習は通常 1) 単純学習 と 2) 連合学習に分けられる。

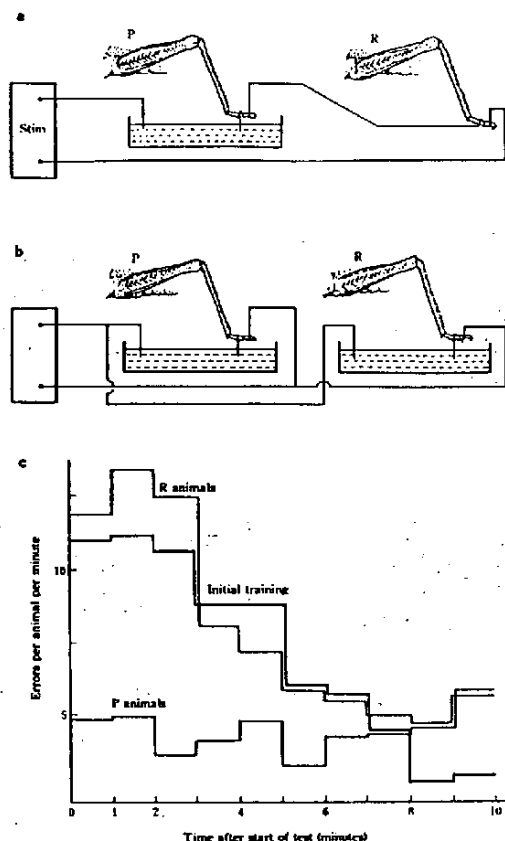
単純学習は、同一の感覚入力の繰り返しに対して動物の行動が変化する場合を言う。さらに、行動、応答が次第に弱まる“慣れ”(Habituation)と、行動が強化される“促通”(Facilitation)とに分けることができる。両者とも、感覚神経から運動神経までの神経経路のシナプスの複数の箇所ではシナプスの伝達効率が繰り返し活動によって修飾されることで説明されるところから、同一シナプス学習(Homosynaptic Learning, あるいはHomosynaptic Facilitation, Depression) と呼ばれる。エビ類の尾部屈曲反応の慣れの成立は、反応自体の回路がもっともよく知られている例の一つである。



TA : 第一次感覚神経 (触覚)、SI : 触覚性介在神経、MoG : 巨大運動神経、FF : 速屈筋運動神経 (群)、FI : 抑制神経、FM : 速屈筋。
 T型の接合部は電気的シナプス。三角のものは化学伝達性シナプス。TA
 - SI間が慣れの大部分を発生させる。

図表3.4-4 LGをめぐる既知の神経回路 (WineとMistick, 1977 から改変)

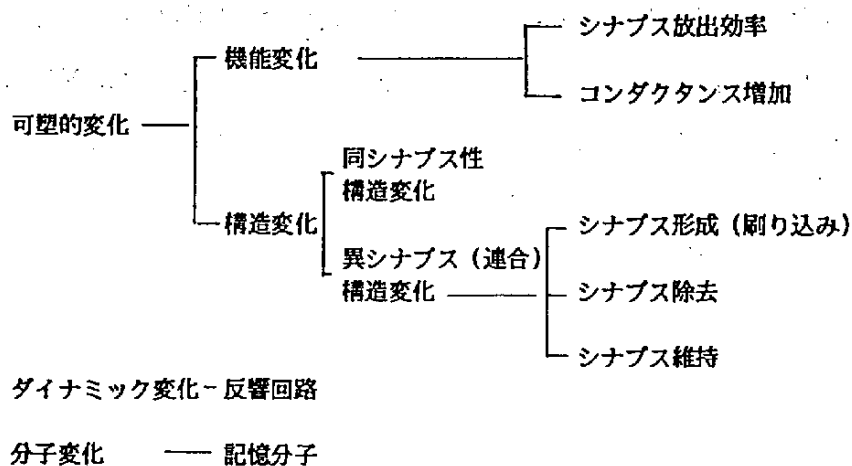
連合学習こそが真の学習であるとされている。連合学習には、さらに古典的学習 (条件学習、パプロフ学習) とオペラント学習の2つが大別される。古典的学習では、通常ある決まった感覚入力 (無条件刺激) によって生ずる行動が、一定の時間枠の中で呈示される本来無関係の (中性の) 感覚入力 (条件刺激) と結びついて発現するようになる。条件が動物自体が発する別の行動であるとき、オペラント学習とよばれる。連合学習成立のためのもっとも基本的な条件は、条件刺激が無条件刺激に先行することと、この先行時間が一定の時間枠内であることである。いずれの場合も、感覚系から運動系までの2つの回路があるニューロンレベルで干渉する必要がある、一方の経路のシナプスの活動が他方の経路のシナプスの動作を修飾することが前提になるため異シナプス学習 (Heterosynaptic Learning) とされている。昆虫では分離された単一の神経節をつけた肢で位置学習が出来ることが示されている。



a: 初期訓練の状況を示す。P肢は位置とショックを連合させることが出来てC図の太線のような誤り（ショックを受ける回数）の減少を示す。b: テストのためP、R両肢とも位置とショックを連合できるようにする。R肢も学習するとともに、P肢は学習効果を保持していたことを示す。

図表3.4-5 肢位置に関する徐頭昆虫後胸神経節の学習 (Homidge, 1962)

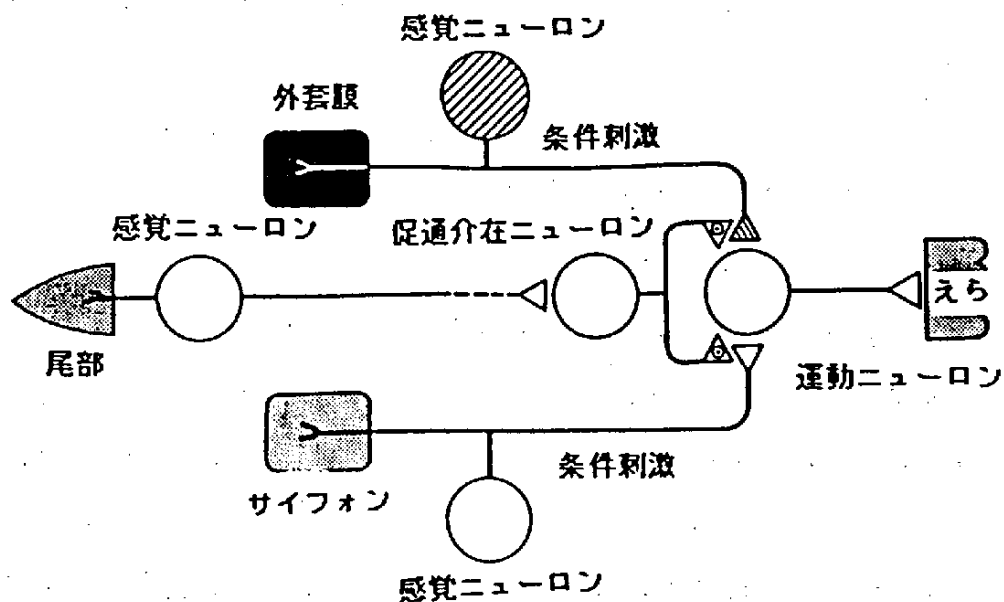
シナプス修飾は機能と構造の両面で起こり得る (図表3.4-6)。



図表3.4-6 学習過程に関する神経系の変化

3.4.7 メモリメカニズムとインプリンティング

学習の成立は記憶の存在が前提になる。一般に記憶はいったん数秒から数分にわたる短期記憶を形成し、強化が行なわれなければ消滅するが、経験の繰り返し、もしくは意識的な強化によって長期記憶に転化される。記憶場所は長短で異なる場合と、同所で起こる場合とがありうる。ヒトを初め、高等動物ではこの記憶中枢が分離されていると考えられる。また無脊椎動物では高い学習能力を示すタコでは、視覚記憶と触覚記憶が中枢の異なった場所に有るという結果が示されている。細胞レベルでどのような形で学習が成立し、記憶されるかが明らかにされているのは、軟体動物アメフラシである。この動物では運動神経に接続する条件刺激感覚経路のシナプスに前シナプス結合をする無条件刺激経路の活動が条件刺激感覚経路のシナプス前細胞内での活動、特にセカンドメッセンジャ回路の働きを修飾することが学習記憶の本体であるとされている。これは通常学習機能のモデルとして示されるHebbのモデルがシナプス後細胞の活動変化も考慮しているのとは異なっている。



無条件刺激は尾部の強い電気刺激で、これにより常にえらの引き込め反射が起こる。この刺激に先立って条件刺激として外套膜に弱い電気刺激をすると、えらの引き込め反射が条件刺激のみで起こるようになる。サイフォンの刺激は対照に用いる。学習は運動ニューロンに入力する条件刺激回路が無条件刺激回路からの入力で前シナプス性に増強されることで起こる。

図表3.4-7 アメフラシ(Aplysia) の条件学習機構 (KandelとSchwartz, 1985から)

これまでのところ、このような軟体動物の学習では、記憶の成立にともなう構造的な変化、シナプス構造の増加などを観察した例はない。化学過程の変化が記憶の基盤であるとき、長期記憶の成立はその細胞の蛋白合成、すなわちセカンドメッセンジャ系の合成そのものが変化すると今のところ考えられている。

半永久的な構造変化をともなう学習の形態として”刷り込み”(Imprinting)現象がある。鳥類の幼鳥は生育の特定の時期に受け取った感覚入力に対して、特定の行動をとるようになり、半永久的に変わることが無い。この刷り込みにはシナプス接続の構造的な変化があることが実験的に示されている。

【参考文献】

- [1] R. Durbin, C. Miall and G. Mitchison: "The Computing Neuron", Addison Wesley (1989)
- [2] 久田光彦: "節足動物司令線維の構築と機能", 現代の神経科学 3, 高次脳機能と中枢プログラミング, pp. 31-57, 産業図書(1976)
- [3] 久田光彦: 無脊椎動物の学習機構, 神経研究の進歩, 22, 940-950 (1978)
- [4] 久田光彦: "運動のパターンジェネレーターとは何か", 脳の統御機能 4, 運動の中枢メカニズム, pp. 13-34, 医歯薬出版 (1979)
- [5] A. Horridge: Learning Leg Position by the Ventral Nerve Cord in Headless Insects, Proc. Roy. Soc. London, B, 157, 33-52 (1962)
- [6] A. Horridge: "Inteneurons", pp. 330-371, Freeman (1968)
- [7] E. R. Kandel: "Cellular Basis of Behavior", pp. 537-642, Freeman (1976)
- [8] G. M. Shepherd: "Neurobiology", pp. 584-610, Oxford (1988)
- [9] J. J. Wine and F. B. Krasne: The Organization of Escape Behaviour in Crayfish, J. Exp. Biol., 56, 1-18 (1972)
- [10] J. J. Wine and D. C. Mistick: Temporal Organization of Crayfish Escape Behavior: Delayed Recruitment of Peripheral Inhibition, J. Neurophysiol., 40, 904-925 (1977)

3.5 分子生物学的アプローチ

本節は分子生物学的アプローチという節であるが、ここでは分子からなるシステムということに限定する。遺伝学、発生学を中心として発達してきた生物学は、1960年代にDNAが発見されたことによって、分子生物学が急速に発展することになる。生物の物質的基盤として分子があり、それは大腸菌から霊長類に至るまで同じ原理に基づいて発現することが明らかにされた。確かに分子生物学は生命を分子レベルから理解する方法としては非常に有力である。しかし、生命が分子の性質にあるのではなくてその関係にあるとしたら、これまでの分子生物学も方法論だけでは生命を分子レベルから明らかにすることはできない。現代の分子生物学は生体内における現象間の関係を単に物質構成と時系列を断片的に明らかにしていくだけで、決して生命の全体像を明らかにしているわけではないのである。それが本来共に密接な関係にあるべき遺伝学と発生学の間に大きな溝が存在する理由でもある。生命体は本来システムであり、ある種の分散システムと見なせる。生命を分解してみるだけでは本来の働きは見えてこないのは自明である。例えばシリコン、金属、プラスチックで出来ているICの機能を各々の物質の性質からだけでは理解することが不可能である。したがってシステムの性質を出そうとすると、必然的にそれから系を再構成するといった手法をとらなくてはならない。

いったん個々の分子に分解した後で機能を発現するためにシステムを再構成するといっても例は多くはない。ある種のオルガネラについて行われているにだけである。F1ATPaseであるとかカルシウムポンプ等は再構成に成功しているが、系が平衡から遠く離れたときに初めて出現する協力現象がそのシステムに現れてはいない。よく知られている現象としてはわが国で盛んに研究されている細胞運動系の再構成がある。清水らによれば、運動の出現は系を構成する分子の動的な協力性によって初めて出現する。このとき運動を司る分子は系の巨視的な秩序パラメタである運動の速度に隷属する。このことはHakenがレーザで発見したスレービング原理にしたがう系であると言えよう。生物系が物理的な現象であるレーザ系と異なるところはエネルギー変換の制御機構にあるといえる。レーザは系を拘束する条件さえ決めてしまえば、効率は決まる。それは出力とパンピングとの間に情報のやり取りがないからである。生物では運動の大きさに無関係に系をパンピングしていると無駄にエネルギーを消費することになり、生きていく都合上はなはだ具合が悪いことになる。生体運動系ではエネルギーの散逸速度とパンピングの速度が丁度バランスするよう

な機構が内在しており、これは構造によって保証されている。アトムがランダムに存在しているレーザ系では出力の終わった原子にのみ特異的にパンピングを行うことは出来ないが、生体運動を担う分子では出力を外界からの要求にバランスしながら、しかもエネルギーを放出し終わった分子だけが再びパンピングされると言う機構を持っていることによる。すなわち一個の分子の処理する情報量が単なる物理系とは異なるのである。このようなメカニズムを内包する機構を人工的に組み込むことが可能になれば、エネルギー変換における効率の問題は大きく上昇するはずである。

前述したが遺伝学と発生学を分子生物学がつなぐことが出来るならば生物学は大きな統一性を持って体系化されることになる。ホメオボックス等の発見によって生物が遺伝子発現のために共通のDNAの構造を持っていることが明らかになり遺伝学が大きく発展する期待が生まれた。しかしながら、依然として個体の各部分がどの様にして何時それを発現するのかは解っていない。要素の基本的な構造が次第に解ってきたわけであるが、大腸菌と人間の基本的な差は何かという問いに答えるには至っていない。つまり個体の各部分は全体と調和をとりながら形態形成を行うのであるが、その全体の設計図が各部分にどの様に埋め込まれているのかが解らないのである。

これらの問題は生命の本質的な問題であるので一気に解決する問題ではないだろう。しかしながら生命体はシステムとしても膨大な数の要素（分子）からなるので、これらのシステムの特徴が断片的にでも解ることになれば、その応用は社会的にみても大きなものになる。したがって注意深くこれらの学問の発達をwatch していく必要がある。

4. 自律協調作用の工学的実現法

4.1 学 習

4.1.1 自律協調システムの学習法

自律協調作用を工学的に実現する上で、学習機能は必須のものである。自律協調システムの学習法としては、経験や例から知識を汎化する学習法が適している。このような学習法として、帰納推論に基づく帰納学習や最近になって台頭してきた分散処理のニューロ学習がある。そこで、これらの学習法をサーベイし、自律協調作用の工学的実現への有用性を探る。

さて、マシン学習には、以下に示す方法があげられる。

- ・ 例題からの学習
- ・ 問題解決とプランニングでの学習
- ・ 観察と発見からの学習
- ・ 教師による学習

これらの学習方法の中で、自律協調システムに適した学習法として例題学習を選択し、論理的な学習方法とコネクションによる学習方法について、それらの特徴と課題について考えてみる。なお、ニューロ学習については4.2節でさらに詳しく述べる。

4.1.2 例題学習のポイント

(1) 表現方法の適切な選択

(a) 論理的な記述

述語論理、プロダクション・ルール、階層的記述法、意味ネットワーク、フレーム、スクリプトなど

(b) コネクションによる記述

ニューラルネットなど

(2) 記述のタイプの決定

(a) 帰納推論による記述

帰納＝探索と考える（ゴール判定基準が必要）

①特性記述：他の全てのクラスからの区別

②識別子記述：他の特性クラスからの区別

③分類学的記述：クラスをサブクラスに分ける

(b) コネクションによる記述

①単一ネットワークによる記述

②モジュール化による記述

③異種ネットワークの複合化による記述

(3) 一般化のルールの変義

(a) 帰納推論による一般化

$S1 \Rightarrow K$ (条件 $S1$ を満たすオブジェクトはクラス K に属する)

↓ 一般化ルール

$S2 \Rightarrow K$ (一般化ルールを適用した時、 $S2$ のオブジェクトが K に属する)

↓

$S1 \Rightarrow S2$ ($S2$ の方が $S1$ より一般的という)

(b) コネクションによる一般化

サンプリングデータからの母集団の推定

“ 逆モデル、順モデルの獲得

(4) 帰納推論の方法の決定

①データ駆動型 (ボトムアップ)

入力データを一つずつ処理して記述を一般化していく。

②モデル駆動型 (トップダウン)

仮説を設定し、基準を満足するまで調整する。

③データ駆動モデル駆動混合型

上記二つの混合型

* トップダウン型の利点と問題点

利点：ノイズに強い。

問題点：全ての入力事象を包含するかどうかを繰り返しチェックする必要がある。

(5) コネクションによる方法の決定

①最急降下法

教師信号との 2 乗誤差の最小値を求める。

②確率的方法

入力パターンの出現確率を求める。

(6) 帰納推論による学習とニューロ学習との比較

ニューロ学習は、一般的方法。

帰納推論学習は、特定問題向き方法。

図表4.1-1 帰納推論による学習とニューロ学習との比較

	長 所	短 所
ニューロ学習	数学的にエレガント 汎用性が高い	非常に効率が低い 結論が見にくい
帰納推論学習	発見的な解の導出 論理性が高い	他の分野への応用が難しい 汎化機能が低い

*両者のトレードオフの解決方法

帰納推論の学習+ニューラルネットの学習

4.1.3 今後の課題

(1) 表現方式

現状では、使用できるオペレータや変数の型に制約があり生成できる技術形式にも制約がある。この制約を緩めそれらに関する一般化規則を導入する必要がある。特に、階層的な形式（任意の名前をより複雑な記述の中から参照できる表現形式）の導入が求められる。

(2) 理解のし易さ

生成された一般化の内容が分かり易く、対応する自然言語に近いことが重要である。それには、人間の情報処理の特徴をよく知る必要がある。

(3) 構成的機能推論の改良

現在の構成的帰納推論は、非常に限定されたものである。新たな規則を発見し、それらによる推論プロセスをどのように制御するかを発見する機能を付け加えることが重要

である。

(4) 問題特定知識の組み込み

一般的な帰納推論で、いつ、どうやって、問題特定の知識を使うか。型付き変数の使用も有用と考えられる。

(5) 識別子や分類学的記述への適用

このようなトップダウン的な記述方法は、特にノイズの多い環境で非常に重要である。

(6) ユーザインタフェース

学習プログラムは、パワフルになるほどその機能が不透明になるので、説明機能を提供すべきである。ニューラルネットの場合は特に重要となる。

(7) 誤差やデータ欠落のある曖昧な情報の処理

曖昧、誤差、矛盾などを含む情報からの学習に関する研究が必要である。これには、ニューラルネットの学習が最適と思われるが、適切な前処理の研究が重要となる。

4.1.4 まとめ

自律協調システムでは、学習が非常に重要な役割を果たす。帰納推論を基本とした学習は、経験や例から学習するため、自律機能実現に最適と考える。サンプリングデータからのモデルの母集団を推論する（一種の汎化）には、論理的な帰納学習と感覚的なニューロ学習を融合した経験に基づく新しい学習方法の確立が必要である。エキスパートシステムに代表される演繹的推論システムでは獲得が困難な知識処理に対して、特にこの学習方式が必須となる。その意味でも、帰納推論とニューロ技術の有機的な融合を基本とした新しい学習方式の確立が自律協調システムにとっての今後の課題となるであろう。

4.2 神経回路網

4.2.1 ニューロコンピュータとは

人間の脳は、100億個以上のニューロンとその数千倍以上のシナプスからなる巨大なネットワークで構成されている。このネットワークは、様々な外界からの刺激を経験することにより、シナプスの伝達効率を変更して学習を行うと言われている。脳の持つ学習機能と並列分散処理は、今までのコンピュータでは実現が難しいとされている実時間での認識、判断、制御の基本となる機能である。この機能をそのまま実現することは難しいが、その

エッセンスを小規模なネットワークにより模倣することは可能であろうという期待から、米国を中心にして、ニューロコンピュータの構成的研究が盛んに行われている。図表4.2-1 は、これまでに開発された代表的なニューロ技術をまとめたものである。

図表4.2-1 人工ニューラルネットの情報処理

	フィードフォワード型		フィードバック型	
	静的デジタル	静的アナログ	動的デジタル	動的アナログ
決定論的	論理関数の形成 (Perceptron)	連続関数の形成 (BP法)	離散型力学系の 形成 (オートマ トン)	連続型力学系の 形成 (Hopfield ネット)
確率論的	—	—	有限マルコフ連鎖 の形成 (Boltzmannマシン, Gibbsマシン)	連続関数の形成 (Gaussマシン)

ニューロコンピュータの基本要素となるニューロンは、重み付の多入力1出力系としてモデル化される。入力の重みによりシナプスの伝達効率を表現しているニューロコンピュータでは、このニューロンモデルを多数結合し人工神経回路網を構成する。このニューロコンピュータのネットワークには、ニューロンモデルを階層的に結合したものと相互結合したものがある。

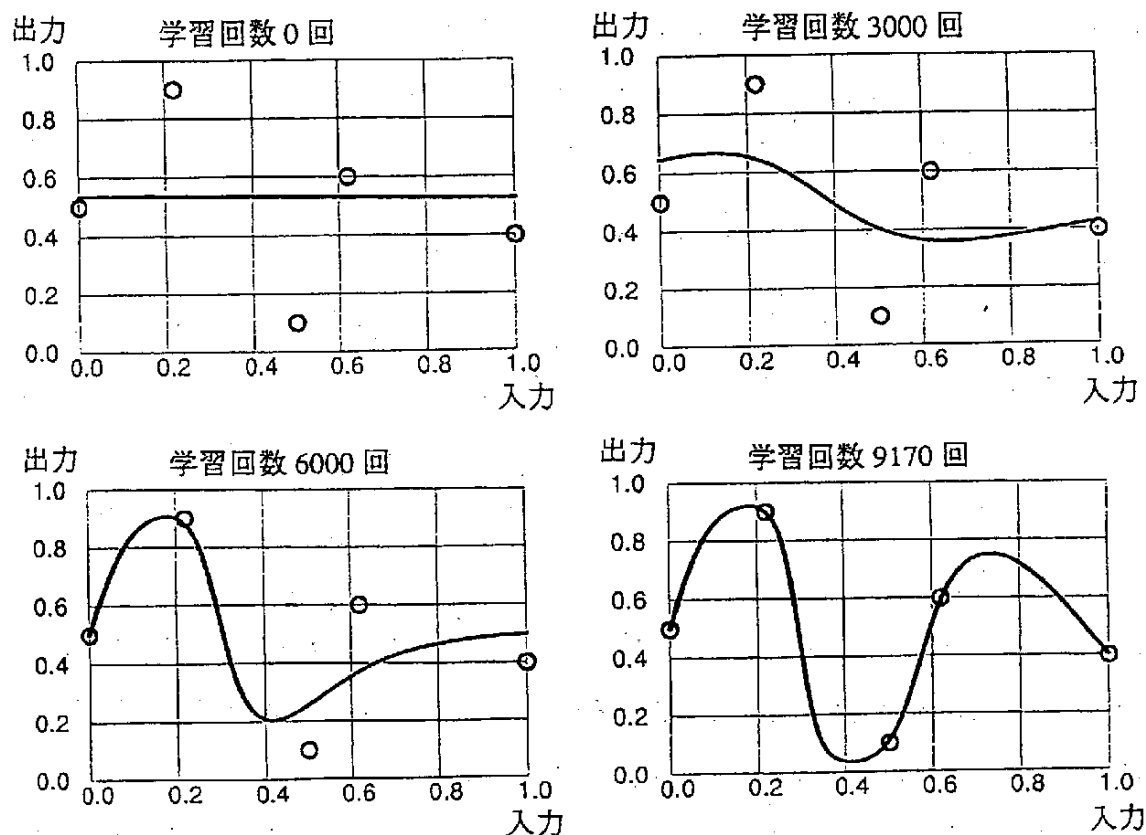
階層ネットワークには、最急降下法を基本としたバックプロパゲーション法[1] と呼ぶ学習アルゴリズムが開発されている。この学習アルゴリズムは、その学習方法が簡単であり使いやすいという利点から、ニューロ応用研究が盛んに行われている。

一方、相互結合ネットワーク[2] は、たくさんの組合せの中から最適解を求める問題（例えば、巡回セールスマン問題）に適用されている。しかし、このネットワークは学習機能を持たず、最適解を求めるための規則を予め評価関数の形でネットワークとして構造化しておく必要がある。複雑な最適化問題への適用が難しく実用化された事例は少ない。したがって、ここでは自律協調システムに必要な学習機能を持つ階層ネットワークの機能について検討する。

4.2.2 階層ネットワークの機能

(1) 汎化機能

階層ネットワークの汎化機能の一つとして、任意関数の近似機能がある。階層ネットワークでは、結合荷重を可変とすることにより中間層ユニットのシグモイド関数を拡大、縮小、反転、移動し、さらに出力層ユニットで中間層ユニットの出力を合成することにより任意の非線形関数を作ることができる。図表4.2-2はこの性質を使って、離散した点を連続的に結合するいわゆる内挿を実施した例である。このように、3層ネットワークは与えられた入力パターンから獲得すべき非線形関数をそのシグモイド関数の非線形性を利用して近似している。また、中間層ユニットは、一種の自在雲形定規の役割を果たしているということもできる。

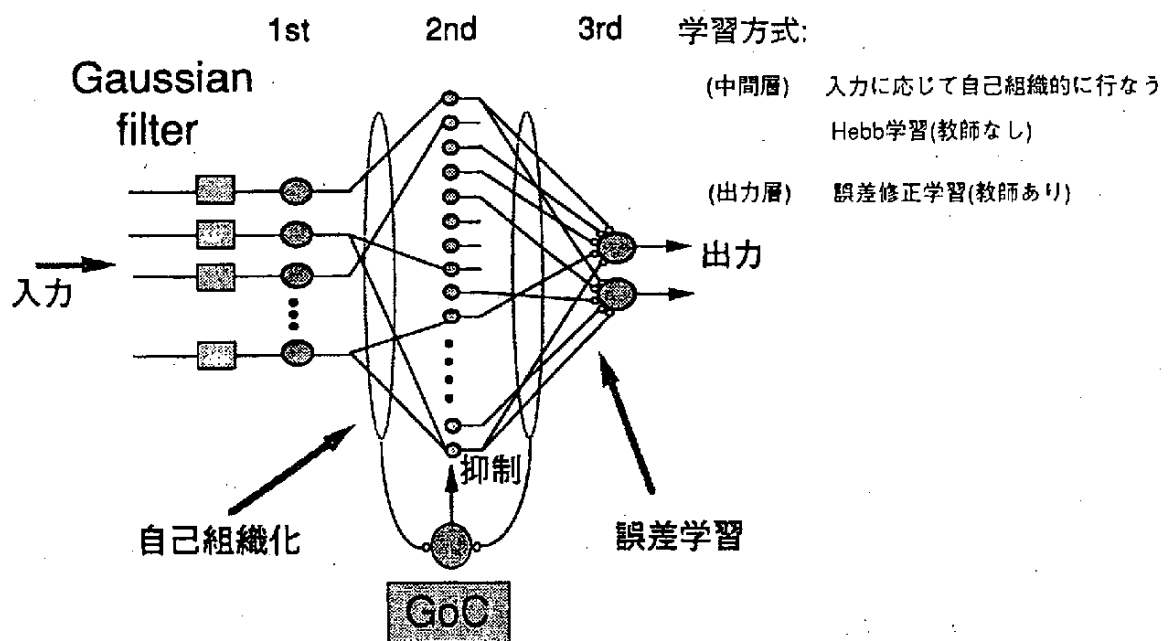


図表4.2-2 非線形関数の学習による獲得

(2) 冗長性を利用した汎化機能の改善

小脳が運動の中核であることはよく知られている。この小脳の生理学モデルは、伊藤 [3] により模式化されている。工学的には、D. Marr [4]、J. S. Albus [5] らにより

パーセプトロンとしてモデル化された。この工学モデルと生理学モデルを対応させると、入力層ユニットは苔状線維起始細胞、中間層ユニットは顆粒細胞、出力層ユニットはプルキンエ細胞となる。さらに、この工学モデルは細木ら[6]により図表4.2-3のように改善された。ここでは、生理学モデルに基づいて中間層ユニットである顆粒細胞の汎化機能を向上させるために、ゴルジ細胞の機能を適用している。ゴルジ細胞は図に示されているように、苔状線維起始細胞と顆粒細胞間の苔状線維の状態、顆粒細胞とプルキンエ細胞間の平行線維の状態をモニタして顆粒細胞の活動を抑制している。これにより、冗長なまでに大量な数の顆粒細胞を効率よく運用することが可能となっている。



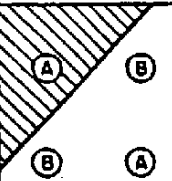
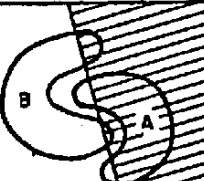
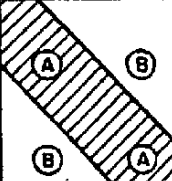
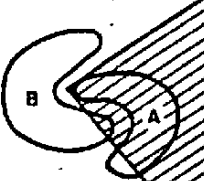
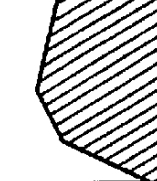
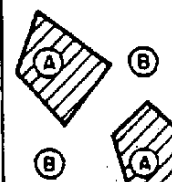
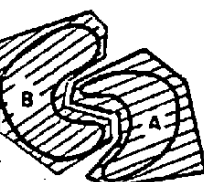
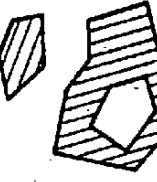
図表4.2-3 3層神経回路モデル

このモデルにより、中間層ユニット数が冗長なネットワークでも、それらを有効に使えるようになる。このモデルを階層ニューラルネットワークに適用することにより、学習精度の向上を促進する。さらに、中間層ユニット数が冗長であることにより、非線形システムのモデル獲得の汎化性や故障に対する効力も向上する。

(3) パターン識別機能

図表4.2-4 [7] は、階層ネットワークの階層数とパターン識別機能をまとめたものである。2層ネットワーク（ここでは、ユニット単体）は、線形の識別機能を持っている。3層ネットワークは、凸領域の識別が可能であり、排他的論理和(XOR)などの非線形識別が可能である。また、4層ネットワークは、飛び地の網かけ識別を比較的少ない中間

層ユニット数で可能とする。ただし、3層ネットワークでも中間層ユニット数を十分大きくとればいかなる識別をもクリアすることが数学的に証明されている。

構造	識別領域	XOR問題	網かけ	領域の形
2層 	半平面			
3層 	凸面			
4層 	任意			

図表4.2-4 階層ネットワークの階層数とそのパターン識別能力[7]

以上より、階層ニューラルネットは、非線形関数の近似機能（汎化機能）、パターン識別機能を持つことが理解できる。非線形関数近似機能は、非線形な運動特性を持つロボットアームの制御に必要な軌道、逆キネマティクス[9]、逆ダイナミクス[10]の学習による獲得を可能とする。また、時間遅れユニットと組み合わせることにより非線形フィルタ[11]をつくることも可能である。。さらに、パターン識別機能を利用すると、音声処理[12]、波形解析[13]、文字認識[14]など雑音や非線形性が問題となる識別への応用が可能となる。これらの機能は、自然環境下で自律協調行動をとるシステムに必須の機能と考える。

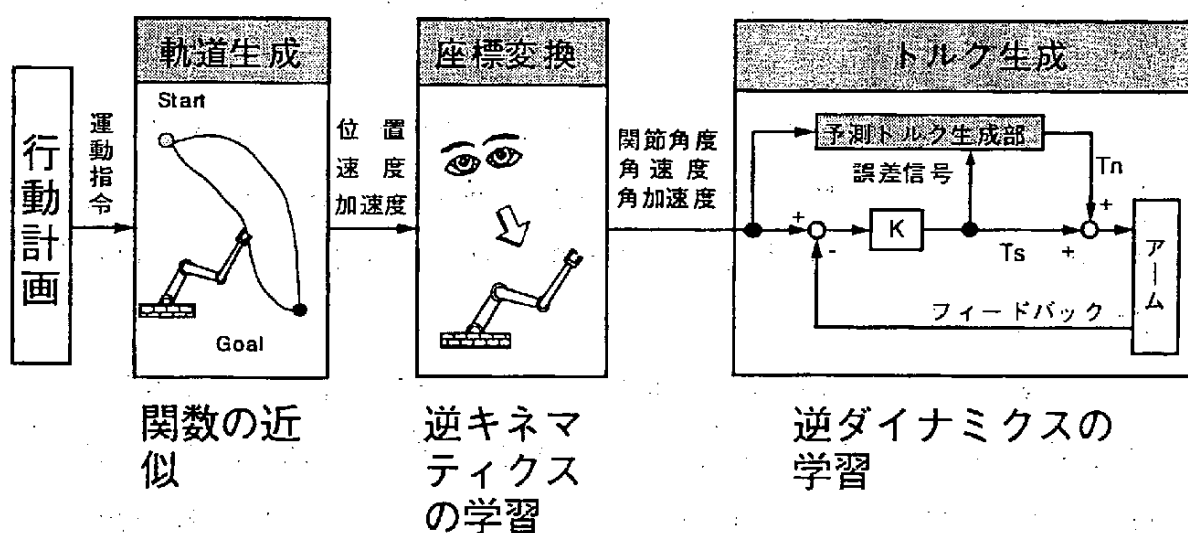
4.2.3 自律協調システムへの応用

(1) 運動制御への応用での有用性

複雑なメカニズムのシステムをスムーズに制御するには、フィードバック制御だけでなく、システムのモデルをコンピュータに組み込み、それに基づき実行するモデルベースシステムが重要となる。モデルベース処理を基本とするロボットアームの制御からこの重要性を検討する。

静力学モデルの獲得に適用した例として、ロボットアームのハンドの現在位置から目標位置への移動に必要な関節回転角を求めるための逆ヤコビ行列をニューラルネットワークで学習した研究[9]がある。シミュレーション結果として、計算から求めた逆ヤコビ行列を適用した場合より高精度の制御ができたと報告されている。

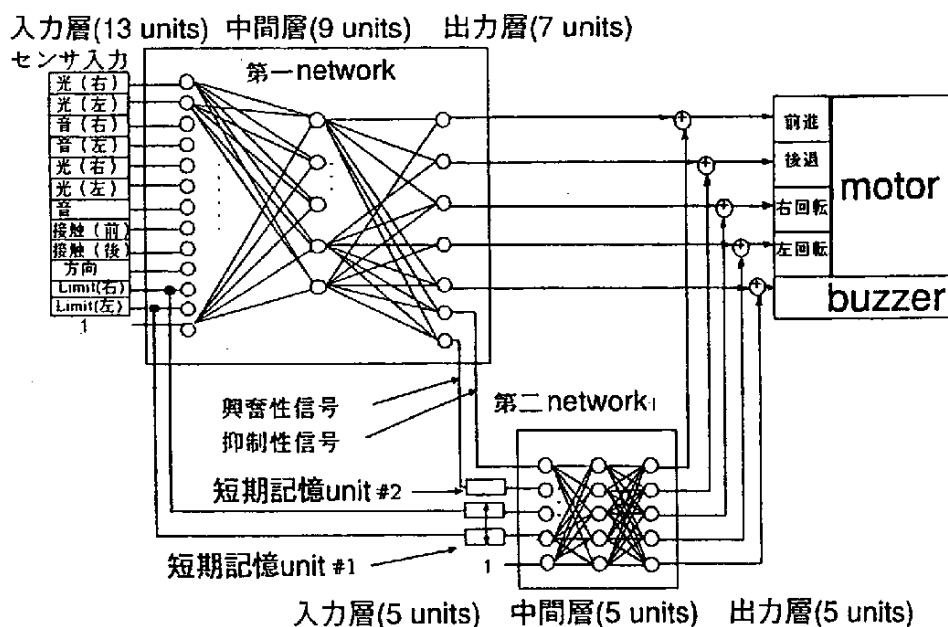
一方、動力学モデルは制御系の動特性改善に用いられる。この動力学逆モデルの獲得に適用した例として、3自由度アームの制御[10]がある。3層ネットワークとバックプロパゲーション法を適用して良好な結果を得ている。また、マニピュレータの軌道をトルク最小となるように生成する階層ネットワークの研究[15]も行われている。これらをまとめると、図表4.2-5 のようになる。



図表4.2-5 運動制御へのニューラルネットの応用

(2) 未知の環境に適応するための行動学習への応用

ロボットの制御には、目の前の事象を処理する機能と過去の経験をもとに処理手順を生成する機能が必要である。しかし、3層ネットワークの処理は一般に目の前の事象を処理する機能のみである。そこで、3層ネットワークに処理手順を生成する機能を与えるため、複数個のネットワークを構造化する方式[16]がある。



図表4.2-6 移動robot の行動制御

これは図表4.2-6 に示すように、2種類の階層ネットワークからなり、短期記憶型ユニットを介して二つの3層ネットワークを結合した構成をとる。第一ネットワークは、ある瞬間のセンサ入力情報と行動パターンとの対応関係、すなわち、静的な入出力関係を学習する。

一方、第二ネットワークはある時間幅でのセンサ入力情報と行動パターンの系列との対応関係、すなわち、動的な入出力関係を学習する。例えば、“頭部の光センサが光を検出するまで、右回転、左回転を繰り返せ”というようなロボットに対する一連の行動パターンの指示の系列が第二ネットワークで処理される。このほかに、シーケンスを学習するネットワークとして、リカレントネットワーク[17]、[18]のモデルが提案されている。

(3) まとめ

ニューラルネットにより自律協調システムの全機能を実現できるかどうかまだ断言できない。しかし、その可能性は高い。最近、神経生理学、行動科学、情報科学などの成果がニューラルネットに応用され実用的な技術となりつつある。これにより、自律協調システムに必要な学習／適応機能、技能獲得機能の技術が確立すれば、情報処理技術が

さらにまた進歩すると期待される。

【参考文献】

- [1] D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, and the PDP Research Group: Parallel Distributed Processing: Explorations in the Micro-structure of Cognition, Vol. 1, MIT Press, pp. 318-362 (1986)
- [2] J. J. Hopfield: Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collection Computational Abilities, Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 79, pp. 2554-2558 (1982)
- [3] M. Ito: The Cerebellum and Neural Control, Raven Press, New York (1944)
- [4] D. Marr: A Theory of Cerebellar Cortex, Journal of Physiology, Vol. 202, pp. 437-470 (1969)
- [5] J. S. Albus: Mathematical Bioscience, Vol. 10, pp. 25-61 (1971)
- [6] K. Asakawa, S. Nagata, N. Watanabe, K. Matsuo, and S. Hosogi: A Cerebellar Neural Network Model for Articulated Robot Arm Control, 8th Sympo. on Future Electron Devices, pp. 169-176 (1989)
- [7] R. P. Lippmann: Neural Network Classifiers for Speech Recognition, The Lincoln Lab. Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 107-124 (1988)
- [8] 木本: ニューラルネットワークによるモデル獲得(債券格付けを例として)、情報処理学会全国大会予稿集〔I〕、pp. 398-399 (1989)
- [9] R. E. Elsley: A learning Architecture for Control Based on Back-propagation Neural Networks, Proc. ICNN'88, Vol. 2, pp. 587-594 (1988)
- [10] 瀬戸山、川人、鈴木: 多層神経回路網内に学習される逆ダイナミクスモデルによるマニピュレータの制御、信学技報、MBE87 (1988)
- [11] B. Widrow and M. E. Hoff: Adaptive switching circuits, IRE WESCON, pp. 96-104 (1960)
- [12] A. Waibel: Consonant Recognition by Modular Construction of Large Phonemic Time-Delay Neural Networks, Advances in Neural Information Processing Systems 1, pp. 215-223 (1989)

- [13] R. P. Gorman and T. J. Sejnowsky: Analysis of Hidden Units in a Layered Network Trained to Classify Sonar Targets, Neural Networks, Vol. 1, pp. 75-90 (1988)
- [14] K. Fukushima: Analysis of the Process of Visual Pattern Recognition by the Neocognitron, Neural Networks, Vol. 2, pp. 413-420 (1989)
- [15] M. Kawato, Y. Uno, M. Isobe, and R. Suzuki: A hierarchical neural network model for voluntary movement with application to robotics, IEEE Control Systems Magazine 8, No. 2, pp. 8-16 (1988)
- [16] 木本, 長田, 関口, 吉沢, 渡部, 浅川: ニューラルネットワークによる移動ロボットの制御, CPSY88-20, 信学技報, Vol. 88, No. 107, pp. 101-108 (1988)
- [17] M. I. Jordan: Supervised learning and systems with excess degrees of freedom, COINS Technical Report 88-27, MIT (1988)
- [18] J. L. Elman: Finding structure in timep CRL Technical report 9901, Center for Research in Language, UCSD (1988)

4. 3 システムの統合化手法

大規模な分散システムにおいて、自律性をもった各構成要素の振舞いを協調させて、システム全体の目標にいかに関達成させるかという統合化に関する考え方や手法がいろいろ提案されている。ここでは、非平衡熱力学における散逸構造の研究を背景とした、協調現象を統一的にとらえようとするシナジェティクスを中心に、生体系の自律・協調作用を背景としたホロニックシステムの考え方、さらに要素間の協調現象としての非線形性についてまとめる。

4. 3. 1 シナジェティクス

シナジェティクス (Synergetics : 語源 synergetic (形容詞)=working together, cooperative) とは、H. Haken (西ドイツ、物理学者) が提唱した協調現象における統合化の概念である[1]、[2]。非平衡熱力学(不可逆過程)における散逸構造の研究(エネルギーや物質の流れのある熱力学的開放系における自己組織的な秩序形成(例、相転移)に関する研究)を背景に、自律的な、動的な秩序形成を統一的に研究する境界的な学問分野

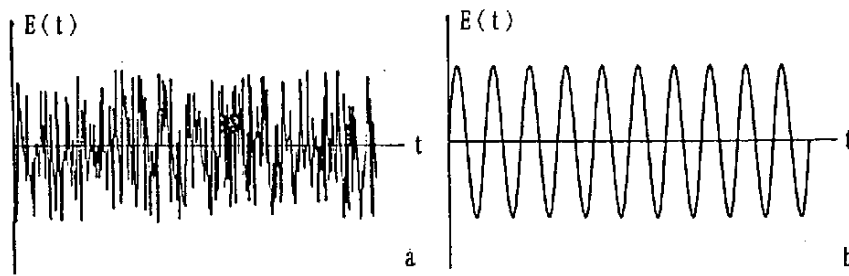
である。このシナジェティクスの特徴は、秩序の変化を支配するパラメタが存在し、システムを構成する各要素は、この支配パラメタの影響を共有することにより相互に協調して秩序状態を実現するということである。

(1) シナジェティクスの特徴

自然界、人間社会に見られる種々の秩序形成のメカニズムには共通したものがある。このようなシステムは、多くの要素から成り、その要素の間には強い相互作用がある。システムの各要素はその間の相互作用によって秩序をつくる。一方、出来上がった秩序 (order) は逆に個々の要素を動かしている。個々の要素から作られる秩序 (支配) は1つの集団的、巨視的変数 (パラメタ) である。これを、秩序パラメタと呼ぶ。それ以外のシステムの構成要素によって作られる自由度を表すパラメタは、この秩序パラメタの関数により表され、自由度は減少する。このことを隷従原理 (Slaving Principle) と呼び、秩序 (order) という司令 (order) に隷従 (slave) するという。Haken のシナジェティクスは隷従原理により協調現象を統一的に解釈しようとするところに特徴がある。

無秩序から秩序が形成されるには、初めにある構造がゆらぎとして現れる。そのゆらぎが消えないで成長する (不安定) とあらたな構造 (秩序) が形成される。こういう考えは、システム要素間の非線形相互作用をもとに、システムを非線形連立微分方程式で表し、秩序変化を非線形現象としてとらえ、解析することにより議論される。

シナジェティクスの例として、レーザ発振 (コヒーレントな発振) について説明する。レーザ物質を作っている原子は、外部からのエネルギー注入 (ポンピング) により励起されて光波を放出する。注入パワーが低ければ (波長が長ければ) 放出される光の位相は相関をもたないが (図表4.3-1 (a))、注入パワーがある臨界値 (電子のエネルギー準位の遷移に対応) まで上げると位相のそろった光を放出する (図表4.3-1 (b))。いいかえると個々の原子が完全に歩調を合わせて行動し、新しい秩序が実現される。つまり自己組織化したことを意味する。この現象の秩序パラメタは、注入するエネルギーの波長 (周波数) と考えられる。



図表4.3-1 レーザ発振[1]

(2) 隷従原理(Slaving Principle)

シナジェティクスにおいてシステムの秩序形成の基本原理解である隷従原理について説明する。隷従原理が成立するためのシステムの構成条件として、つぎの条件が挙げられている[3]。

- ① システムは多くの微視的変数とごく少数の巨視的変数から成り立っており、微視的変数間ならびに巨視的変数との間に複雑な相互作用がある。
- ② 微視的変数は短い時定数あるいは時間スケールをもって平衡状態、あるいは定常状態へ向かう指向をもつ（安定モード）。
- ③ 巨視的変数は長い時定数あるいは時間スケールをもって安定定常状態へ指向するか、時には不安定な定常状態をもつ（不安定モード）。
- ④ 巨視的変数の影響で微視的変数の定常状態指向が阻害されることはない。すなわち、巨視的変数の長い時間スケールのもとでは微視的変数は常に定常的、静的にとらえることができる。

これらの条件を満たすシステムにおいて、長い時間スケールのもとで微視的変数は消去されて巨視的変数の特性のみが抽出され、微視的変数は巨視的変数に制御されてその定常状態を次々と実現する。つまり微視的変数は巨視的変数に支配されることになる（微視的変数の定常状態は、巨視的変数の関数により表される）。このとき、巨視的変数を秩序（支配）パラメタ、微視的変数を隷従パラメタと呼ぶ。

次のような非線形連立微分方程式で記述される系について、隷従原理の意味を考える。

$$dq_1/dt = k_1 q_1 - q_1 \cdot q_2 \quad (i)$$

$$dq_2/dt = -k_2 q_2 + q_1^2 \quad (ii)$$

いま、 k_1 を0に近い正值とする。また、 q_1 、 q_2 の値が小さいと仮定すると、 q_1 の変化は大変緩やかである。 q_2 は(ii)にしたがい、 q_1^2 により駆動されるが q_1 の変化も緩やかである。もし、 $k_2 \gg k_1$ なら $k_2 q_2$ に対して $d q_2 / d t$ を無視できる。そこで、

$$d q_2 / d t \approx 0$$

$$q_2 \approx q_1^2 / k_2$$

このとき、 q_1 が秩序(支配)パラメタ、 q_2 が隷従パラメタになる。

いま、 $\operatorname{Re}\{k_1\}$ が、正から負に変わると安定性が失われる系を考える。0近傍で隷従原理が適用できるので、秩序パラメタが支配的になる。構造変化が起こる点では、系の振舞いは秩序パラメタのみでまゐる。

シナジェティクスの現状は、物理・化学系で広く見られる均一系を中心にした系での自己組織化現象(秩序化現象)をシナジェティクスとして統一的に把握して、その思想や方法を個々の現象の分析・解釈のために活用するのにとどまっていると考えられる。今後は、シナジェティクスの考えを、より積極的に工学的システムの実現問題に適用し、設計を含んだ工学的諸問題のなかで展開する必要がある。その際、協調を非線形現象の1つとしてとらえた非線形ダイナミクスを基本にした新しい工学的世界が展開されるであろう。

4.3.2 ホロニックシステム

自律・協調作用をもつ分散システムの各構成要素は、それ自体、高度の機能をもち、自律的に行動できなければならないと同時に、それがシステムの一構成要素としてシステム全体の目標達成のため互いに協力しなければならないという性格をもつ。このように、構成要素は「自律的」であると同時に「従属的」であるという性格をもつ。この2つの矛盾する性格をもつ存在は、Arthur Koestlerの呼び名にもとづいて、「ホロン(holon)」と呼ばれる(holon = holos(全体)+on(個))。ホロニックシステムとは、このような性格をもつ要素(ホロン)から構成されたシステムである[4]。生体系を考えた場合、個々の要素は、自身の生命を維持するために自律的に活動すると同時に、系全体の生命を維持するために相互協調的に機能する。ホロニックシステムは、不均一系である生体系の自律・協調作用に影響を受けた統合化の概念であるといえる。ホロニックシステムの特徴をまとめると次のようになる。

- ① 構成要素（ホロン）は高度の機能を持ち、自律的に行動できる。
- ② ホロンはシステム全体の目標達成のために協力する。
- ③ システム内部で通信される情報は、基本的には全体にかかわる情報のみである。
- ④ 各ホロンは、全体に関する情報を得ると同時に、その情報により他のホロンの振舞いのある程度予測できなければならない。

ここで、③と④はホロン間の協調のための方法、あるいは原理であり、ホロン相互の情報の通信のあり方と、ホロン間で協調するためには他のホロンの振舞いを予測する機能が必要であることを示している。このように、ホロニックシステムでは、協調のための情報のあり方が重要視されている。情報・通信という視点から、ホロニックシステムの概念の源である生体系をみた場合、そこにおける自律・協調作用のための情報の組織化についてまとめると次のようになる[5]。

- ① 系を構成する個は外部から情報を受けとり、それを個間の協調または競合を通して並列的に働くことにより全体の情報を自己組織する。
- ② 自己組織された情報は各個に伝達され、個間あるいは階層間の相互作用を変化させる。
- ③ 系を構成する個は情報の送受ができ、全体の状態に対応できる知性を有する。
- ④ 自己組織された全体の情報または機能は、外部環境と合致できるように自律的に対応できること。つまり、外部環境と情報のやりとりをし、それが機能や目的にフィードバックされること。

このように、ホロニックシステムでは、協調のための情報・通信のありかたが重要視される。

4.3.3 協調と非線形現象

シナジェティクスでは、主に物理系の秩序形成（自己組織化）のダイナミックスを解釈するために、系を非線形常微分方程式により記述し、その動特性が解析される。このように、無秩序からの秩序の形成、さらに新たな秩序へとシステムが進化していく振舞いは、線形現象として取り扱うことはできない。工学系において、例えば、発電機を並列運転させた場合、各発電機の周波数に多少の差があっても、全体として一つの周波数に同期する現象は、非線形現象の一種である周波数引き込み現象として考えられている。このように、システム要素間の協調原理の一つに非線形相互作用があると考えられる。ここでは、代表

的な非線形系現象について紹介する[6]。

(1) 非線形現象

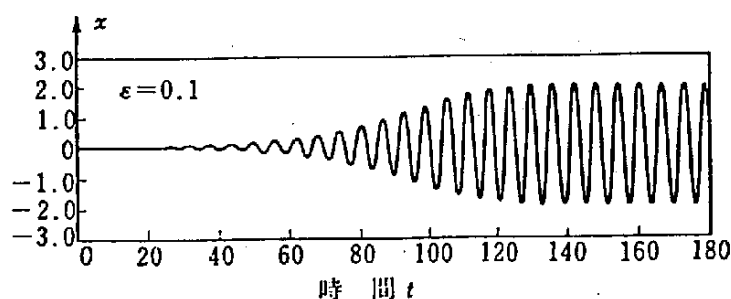
(a) 自励振動

非線形システムでは、入力がない場合でも、その初期値の大きさに無関係に定まる一定振幅、一定周期の周期解が発生する。この振動は、自らの振動によってエネルギーを引出し振動を続けるもので、自励振動またはリミットサイクルと呼ばれる。

例) ファンデルポル (van der Pol) の発振器

$$d^2x/dt^2 - \epsilon(1-x^2)dx/dt + x = 0 \quad (\epsilon > 0)$$

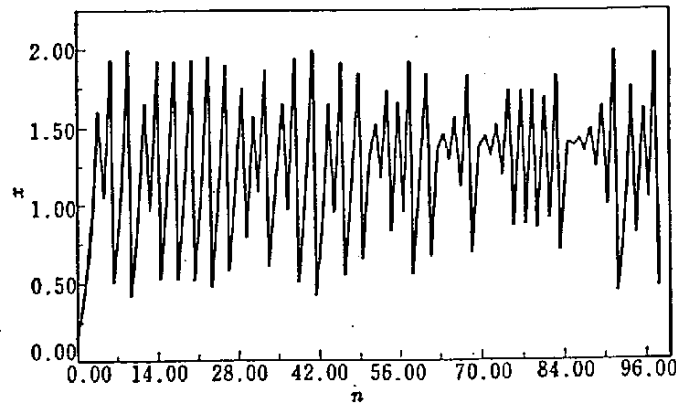
振動の例を図表4.3-2に示す。



図表4.3-2 自励振動 ($\epsilon=0.1$) [6]

(b) カオス (chaos)

確定システムにおいて、零入力、正弦波入力いずれの場合でも、周期振動でも準周期動でもない、不規則な振動が発生することがある。これをカオスという。図表4.3-3に不感帯をもつ離散時間システムに発生するカオス振動の例を示す。カオスは、システムの無秩序状態を表しているとも考えられる。

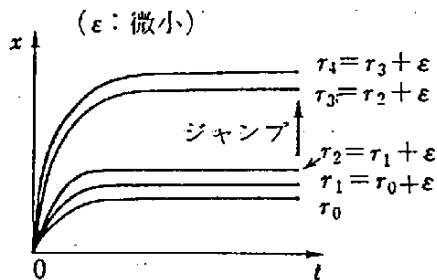


$$\begin{aligned}
 x(n+1) &= -kx(n) - f(x(n)) + r \\
 f(x) &= mx + m \quad (x \leq -1) \\
 &= 0 \quad (|x| < 1) \\
 &= mx - m \quad (x \geq 1) \\
 m &= 3.6, \quad k = -2.0, \quad x(0) = 0.2
 \end{aligned}$$

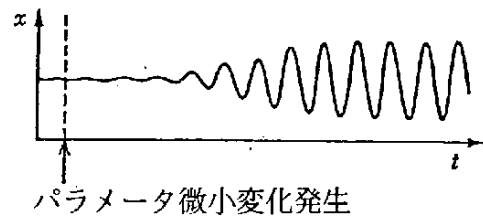
図表4.3-3 カオス振動の例[6]

(c) 分岐現象

非線形システムにおいて、システムパラメタの微小変化によりシステムの振舞いが質的に変化する現象は分岐現象と呼ばれる。分岐には平衡点の分岐、周期振動の分岐などがある。図表4.3-4 に分岐の例を示す。



(a) 平衡点が消滅して新しい平衡点へジャンプ



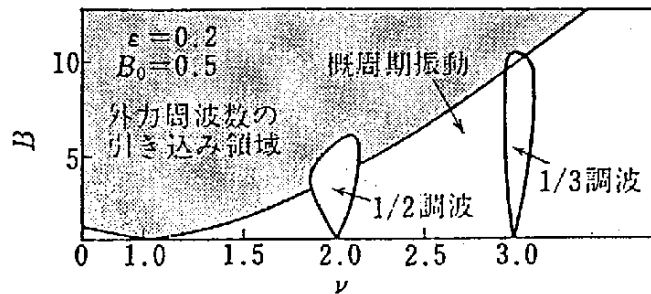
(b) 平衡点→周期振動

図表4.3-4 分岐の例[6]

分岐現象の一種に、協調現象の一つと解釈される周波数引き込み現象がある。自励振動しているシステムに周期外力を加えた場合、自励振動の周波数が外力の周波数に引き込まれる現象をいう。システムのパラメタによっては、外力の周波数の整数倍あるいは整数分の1の周波数に引き込まれる。次式に示すように、ファンデルポルの発信器に $B_0 + B \cos \nu t$ なる入力を加えた場合、

$$\ddot{x} - \varepsilon (1 - x^2) \dot{x} + x = B_0 + B \cos \nu t \quad (\varepsilon > 0)$$

入力周波数による引き込み領域を図表4.3-5 に示す。



図表4.3-5 周波数引き込み現象[6]

(2) 協調と非線形

システムの振舞いが常微分方程式系で記述できる場合は、システムの構成要素間の協調関係の構築は、要素の動特性間の非線形相互作用により実現することが可能である。この場合、系の全体的な振舞いを解析的に議論するには、非線形であるがゆえに限界がある。このため、非線形を積極的に活用した工学的なシステムの実現、あるいは、非線形系を制御する技術は現在のところない。しかしながら、例えば、清水らにより提案されたホロビジョン[7]のように、生物のパターン認識に関するハイパーコラムモデルを非線形振動子群により実現し、引き込み現象を統合化原理として利用し、非線形振動子間の相互作用（協調）によりパターン認識系が実現できることが現在示されている。

4.3.4 工学的統合化手法

情報処理分野における統合化手法として、分散計算機システムにおけるデッドロック解消のようなプロセスの並行処理制御の統合、通信方式、通信プロトコル、データ表現形式の統合がある[8]。また、並列処理においては、並列性の抽出、抽出された並列アクティビティの並列処理要素（PE）への実行割付と同期制御問題、故障した処理要素の検出とシステムの再構成、PEの結合方式などの統合化の手法が研究されている[9]。

システム工学の立場から自律・協調作用の実現をみた場合、大規模システムに対するこれまでの工学的なアプローチは、中央集権的な、上位が下位のすべてを支配する階層構造

をなしていた。現在、このアプローチでは、複雑なシステムを適切に管理することが困難になってきている。そこで、下位のシステム要素にある程度の自律性をもたせ、その中のことは、そこに任せることが必要になってきている。ホロニックシステム概念は、これからの大規模なシステムの工学的な実現の方向を示唆している。一方、シナジェティクスの考えは、均質な物理系から示唆された概念である。そのため、情報や通信の役割が明示的ではないが、システムの構成要素に対する支配パラメタの影響は、系全体の秩序形成のための情報の共有とその相互作用ととらえれば、密な情報通信が秩序形成において重要な役割を担っていると考えることができる。これらの統合化の概念は、まだ、システム構築の原理、具体的な手法、実現手段を与えてくれるものではないが、これらの概念を統合、発展させ、工学的なシステムの実現に活用しなければならない。

【参考文献】

- [1] H. Haken: Synergetics-An Introduction, 2nd ed., Springer-Verlag (1978)
(協同現象の数理、牧島・小森共訳、東海大学出版会 (1980))
- [2] H. Haken: Advanced Synergetics, Springer-Verlag (1983)
(シナジェティクスの基礎、斉藤・小森・長島共訳、東海大学出版会 (1986))
- [3] 深尾毅: 分散システム論—熱力学的システム論、昭晃堂 (1987)
- [4] 石井威望、広瀬通孝: 分散と協調、計測自動制御学会会誌「計測と制御」(特集 分散と協調)、Vol. 26, No. 1, pp. 2-10 (1987)
- [5] 矢野雅文: 生体における自律分散制御と自己組織、計測自動制御学会会誌「計測と制御」(特集 分散と協調)、Vol. 26, No. 1, pp. 19-25 (1987)
- [6] 平井一正、池田雅夫: 非線形制御システムの解析、オーム社 (1986)
- [7] 清水博、山口陽子: ホロンコンピュータの原理とホロビジョン、電子情報通信学会誌、Vol. 70, No. 9, pp. 921-930 (1987)
- [8] 情報処理学会誌—分散処理特集、Vol. 28, No. 4 (1987)
- [9] 情報処理学会誌—並列処理マシン特集、Vol. 28, No. 1 (1987)

4. 4 分散協調情報処理

多数のプロセス（プロセッサ）を1つの問題解決に向けて統一的に動かそうとすることを協調型計算（coordinated computing）と呼ぶ。協調型計算システムでは1つのタスクの処理を多数の処理体によって行う。そこでは多くの同時実行可能な活性体を同時に実行させるようにうまく制御しなければならない。プロセスは互いに独立性を保っていなければならないが、それらがあまり孤立化していてもよくない。プロセスは互いに通信しあい情報を交換しなければならない。結局、協調型計算システムでは通信が重要である。

協調型計算を研究する動機は経済化と高機能化の2つである。協調型計算システムによって大量の計算サイクルが供給されれば、現在計算量が多くて解けないような問題も解けるようになるであろう。この様な問題としては、巨大なシステムのシミュレーション、データベースアクセス、最適化問題、ヒューリスティック探索問題などがある。

ここでは、協調型計算システムの重要な構成要素の間の関係を抽象化してとらえるためのモデルと、分散型システムを構成する際の問題 — 協調型計算におけるヒューリスティクスとよばれるもの — について述べる。

4. 4. 1 モデル

(1) Shared Variables

プロセス間通信はメッセージの形にまとめられ、送り先に発送することで実行される。メッセージ交換の本質はデータを共有することである。Shared Variable モデルは共有変数への書き込み、読み出しを通じての通信に基礎を置いている。このアプローチは次の利点を持つ。

- ・変数を共有するということは、コンピュータのハードウェア構造を直接反映している。
- ・共有変数への書き込み、読み出しの頻度は、分散型アルゴリズムの複雑さの良い測度である。

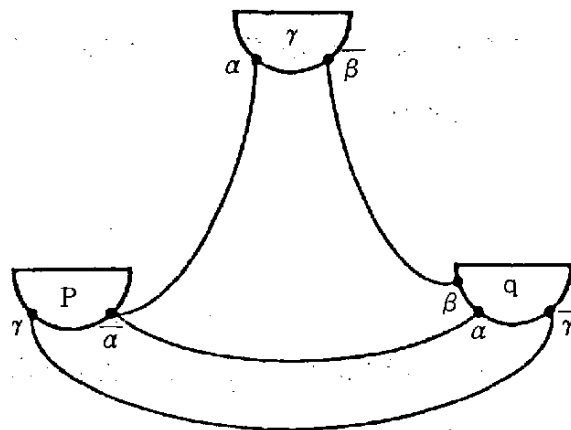
(2) Exchange Functions

Exchange Functionsモデルは静的で予期できるプロセス集合における同時、双方向通信に基礎を置いている。各プロセスのもつ交換関数は特定のチャンネルが割り付けられている。2つの交換関数は、それぞれのチャンネルが一致すれば通信することができる。異なるチャンネルの交換関数による相互呼び出しでは通信しあえない。通信では準備した引

数が同時に交換される。

(3) Concurrent Processes

このモデルでは、ラベル付けされたチャネルにより、同期しかつ双方向に通信するプロセスを陽に記述する。プロセスの数とそれらの間の通信のための結合は動的に変更することができる。このモデルの基本的な処理対象はプロセスである。形式的にはプロセスはポートの集合である。各ポートは名前、値、継続点からなる3つの組である。図表4.4-1はプロセス r を示している。このプロセスには2つのポート α 、 $\bar{\beta}$ がある。ポート α は値 u_1 と継続点 f_1 を持つ。同様に $\bar{\beta}$ の値は u_2 で継続点は f_2 である。2つのプロセスが通信（合成）するとき、それらは同時に情報を交換し、それら自身新たなプロセスへ再構成される。



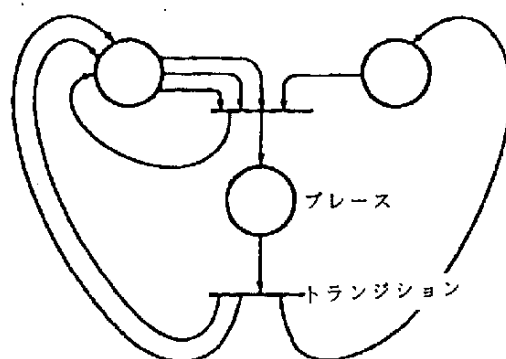
図表4.4-1 プロセス・ネット

プロセスがポート α を通して通信するならば r は値 u_1 を通信線上に送り出す。 r は同時にその通信線上から1つの値を受け取る。その値を v_1 としよう。値 v_1 は継続点 f_1 への引数になる。この結果が新たなプロセスを表している。変数とプログラムカウンタが従来プログラムの状態をとらえているのと同じように、継続点がプロセスの状態をとらえている。

(4) ペトリネット

ペトリネットはグラフノードにトークンを用いてマークを付けることにより、システムの状態をモデル化する。図表4.4-2のグラフがペトリネットである。このグラフには

2種類のノードがある。1つは円で表現されたプレースであり、もう1つは線分で表現されたトランジションである。有向エッジはプレースとトランジションを結合する。



図表4.4-2 ペトリ・ネット

システムのモデル化では、通常、可能な各イベントをトランジションノードとし、関連する各コンディションをプレースノードとする。もしPがイベントTのプレコンディションならば、Pに対応するプレースノードはTに対応するトランジションノードの入力プレースノードとなる。もしQがイベントTのポストコンディションならば、QのプレースノードはTのトランジションノードの出力プレースノードとなる。

(5) Communicating Sequential Processes(CSP)

CSPプログラムは、陽に記述されたプロセスの静的な集合である。プロセスの対は、入力文と出力文の中で互いに他を指名することによって通信する。通信は1方向の情報の流れである。通信プリミティブを実行するプロセスは、そのプリミティブを用いて通信しようとする相手プロセスが対応するプリミティブを実行するまで、ブロックされる。

(6) Actors

Actorシステムにおいては、すべてのものはアクタである。アクタは、互いにメッセージを送ることによって通信する。他のアクタが実行するためのタスクを持つアクタは、そのタスクを記述するメッセージを作成し、そのメッセージを他のアクタ、すなわちそのメッセージの目標に送る。そのメッセージが受け取られると、処理が開始される。アクタのふるまいは、アクタがどのメッセージを受け取り、それらのメッセージに対してどのように応答するかということを記述している。

アクタの重要なクラスに継続点がある。継続点は、メッセージの一部として送られ、計算部分を拡張するために使われるアクタである。継続点を送られたアクタは処理結果を継続点に送る。メッセージを継続点に送るということはそのアドレスに飛ぶということ — 計算型GOTOの変形 — に似ている。似ていない点は、可能な継続点の範囲を実行以前に規定する必要がない点である。

4.4.2 分散型システム

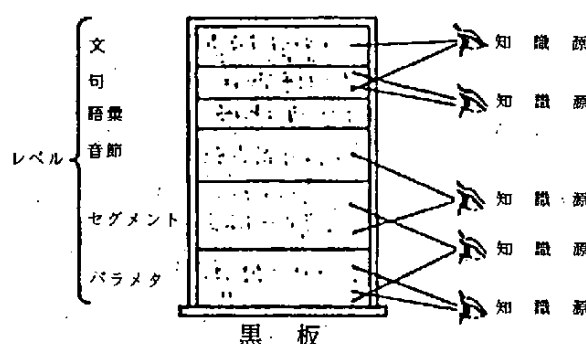
分散型応用システムの構成例、または、構成法の提案例について述べる。

(1) 分散型データベース

データベースシステムとは、情報と、その情報を操作するプログラムを一緒にしたものである。プログラムは、データベースのユーザに情報への構造化されたインタフェースを与える。分散データベースでは、情報が多くの場所に分散されており、しばしば大きな距離の隔たりがある。コヒーレントな分散型データベースを求めた結果として、分散型システムを構成するための多くの優れたアルゴリズムが開発されている。分散型データベースはプログラムを計算と通信のコストを最小化する最適な場所で走行させ、並行関係にあるトランザクションの正当性を保証する。

(2) 分散型問題解決—Hearsay

Hearsay-2 システムは音声理解システムである。このシステムは、いくつかの異なる知識源（音響学、・・・）による部分理解を統合して、会話文の統一的理解を得る。知識源は黑板と呼ばれる全域的データベースから読んだり、それに書いたりすることによって通信する。各レベルは問題空間の異なる表現を保持している（図表4.4-3）。音声理解のための典型的黑板モデルは、音セグメント、音節、語、句である。



図表4.4-3 知識源と黑板のレベル

(3) Contract Net

Contract NetはContract Netプロトコルの規則にしたがって通信する自律的な処理ノードの集合である。問題全体の個々のサブタスクは契約と呼ばれる。あるサブタスクを実行する必要があるノードは、ネットワークの他のノードへそのタスクの存在を宣伝する。そのタスクを解くための資源と知識を持っているノードは、それに対し入札し、その入札を宣伝したノード（そのタスクのマネージャ）へ返す。返された入札の情報に基づき、マネージャは入札者の1人に契約を通知する。契約者はそれから契約タスクをさらにサブタスクに分割でき、それらサブタスクの契約を行う。

(4) 科学世界メタフォ

問題解決処理に関する人間の最終到達点は、科学活動それ自身である。これは理想化された科学世界の問題解決構造と対比させながら、機械による問題解決を取り扱う考えである。高並列の科学世界アルゴリズムを記述するための言語Ether が開発されている。Ether はActorsのメッセージ伝達に基づきPlanner などのデーモンの考えを拡張している。これらの言語は大域的データベースを中心として動作する。Ether は新種のデーモンであるスプライトを提案している。スプライトはデーモンと同様に、パターンが一致するデータベースエントリを認識できる。異なる点は、スプライトが可換であることで、あるデータアイテムの以前に生成されたか以後に生成されたかには関係なく一致を取ることができる。これは科学者と科学図書館との相互作用に似ている。ある話題に興味を持っている科学者は、ある論文が、興味を持つ以前に書かれたものか以後に書かれたものかに関係なしに、その話題についての論文を見つける。同様に、データベース内のある特定の事実に興味を持っているスプライトは、いつ生成されたかに関係なく、その事実を見出すことができる。

【参考文献】

- [1] R. E. Filman and D. P. Friedman (雨宮ほか訳) : 協調型計算システム、マグローヒルブック
- [2] J. B. Cox (前川監修) : オブジェクト指向のプログラミング、アジソン ウエスレイ・トッパン

4. 5 運動制御とセンサフュージョン

運動制御や感覚と運動の統合の問題は、階層的、分散的、さらに並列分散処理といった情報処理を考える上で、大変興味ある課題となっている。1個1個の筋細胞群の協調的動作から、指や手、腕、足の多数の筋による巧みな動作へ、そして人間個体としての相対的な動作や行動にいたるが、ここには個々の要素が組織化され統合された原理的な過程と、その具現としての脳がある。この辺を考えるのに、既存のマシンやコンピュータにできないか難しく、人間でしかなし得ないことを見ていきながら、運動制御とセンサフュージョンの研究動向を探る。

4. 5. 1 センサフュージョン

我々は、群衆のなかでも、目指す顔を瞬時にみつけることができる。歳をとったり、表情が変わる人間の顔の識別をマシンで行わせることは難しい。精度や速度を加えると、これまでのマシンでは、とてもできない。最近、特定の顔にのみ反応するニューロンが存在するのではないかとされている（顔認識細胞）。同様に、手書き文字の認識や、目指す文字をとらえることも同様であると思われる。大きさや形が変わっても認識できるのは、ある文字認識細胞が出来上がった結果と見られる。これは、人間の知覚表象の脳情報処理にかかわる。本節では、これをセンサフュージョン、さらにより広く脳での融合的情報処理としてとらえてみたい。

(1) センサフュージョン

脳における融合（fusion）とは、たとえば両眼融合（binocular fusion）による立体視像の知覚のような、何らかの現象や対象に対して受容する複数の感覚受容器の出力から、一つのまとまった知覚現象を得る過程ととらえられている。石川[1]は、センサフュージョンは、このような脳情報処理における「fusion」の工学的実現としてとらえるべきことを提案し、表1の枠組みを示した。すなわち、センサフュージョンの概念的及び機能的枠組みは

センサ複合（sensor complex）	—	多数の感覚からの複合的な知覚表象
センサ統合（sensor integration）	—	“ 統合的 “
センサ融合（sensor fusion）	—	“ 融合的 “
センサ連合（sensor association）	—	“ 連合的 “

としてとらえられる。

図表4.5-1 センサフュージョンの分類とその意味（石川[1]）

分 類	意 味	各センサ情報(A, B)と処理の関係	処 理 の 目 的
複 合	複数個が合わさること	$A, B \rightarrow A+B$: 相互の関係は言及しない、または独立・相補的、加法的処理。	単一機能性や局所性の回避、測定レンジの拡大など。
統 合	支配が形成されること	$A, B \rightarrow f(A, B)$: 処理演算 f に対する関係として規定される、乗法的処理。	精度や信頼性の向上、処理時間の短縮、故障診断など。
融 合	緊密に一体となること	$A, B \rightarrow C$: 相互の関係からまとまった知覚対象を得る、協調・統合的処理。	両眼融合（立体視）、視触覚融合（物体認識、空間認知）など。
連 合	関連が形成されること	$A, B \rightarrow (A \rightarrow B, B \rightarrow A)$: 相互の関係が抽出される、連想的処理。	予測、学習・記憶、モデル形成、異常の検出など。

さらに、運動知覚、そして認識のような脳の情報処理になった能動的センサフュージョンが重要としている。例えば、人間が運転でハンドルやレバーを操作する際には、目による視覚像と皮膚からの触感、腕による重量感などのすべてが同一の対象を指向し、能動的に動かすことによって統合される。

(2) 認識、記憶について

センサフュージョンは、広義には人間の認識機構一般の工学的実現を目指しているものといえる。したがって、融合という観点から、より高次の情報処理との関連は重要である。その一つである人間の記憶には、(1)の運転の習得など同じ経験を繰り返すことによって形成される「手順の記憶」と、世の中の出来事や事実に関する「事実の記憶」がある。事実の記憶は、さらに以下の2つに分けられている。

意味記憶 (semantic memory)

—概念的な意味とその間の関係が記憶に保持されること。

エピソード記憶 (episodic memory)

—時間的、空間的、あるいは自分の体の動きや情動的なイメージが記憶に保持されること。

安西[2] は、この違いを図表4.5-2 のようにまとめた。この分け方で興味を引くのは、エピソード記憶の引出し方が感覚入力になっていることである。センサフュージョンは、このレベルにまで深い関連性を持つものといえる。

図表4.5-2 エピソード記憶と意味記憶の違い（安西[2]）

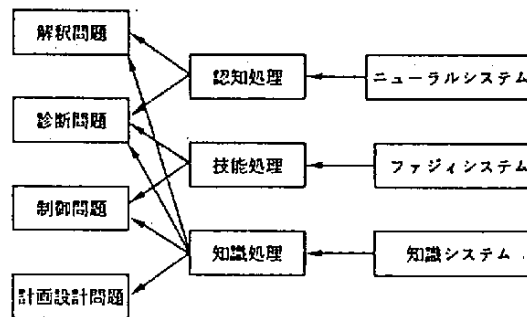
特 徴	エピソード記憶	意味記憶
情報		
入力源	感覚	理解
単位	事象、エピソード	事実、観念、概念
体制化	時間的	概念的
リファレンス	自己	世界
真実性	個人的信念	社会的約束
操作		
記憶内容	経験的	シンボリック
時間の符号化	あり；直接的	なし；間接的
情動	より重要	さほど重要でない
推論の能力	小	大
文脈依存性	大	小
もろさ	大	小
アクセス	細かい調節が必要	自動的
検索の方法	時間や場所検索	対象で検索
検索の結果	記憶構造が変化する	記憶構造が変化しない
検索のメカニズム	協調的	開放的（opening）
再生の内容	思い出した過去	意識化された知識
検索内容の報告のしかた	“思い出す”	“知っている”
発達順序	遅	早
小児健忘症	障害を受ける	障害を受けない
応用		
教育	無関係	関係あり
一般的利用	それほど応用できない	応用しやすい
人工知能	疑問	非常によい
人間の知能	無関係	関係あり
経験的証拠	忘却	言語分析
実験室課題	特定のエピソード	一般的知識
法的証言	認められる：目撃者	認められない：専門家
記憶喪失	関係あり	関係なし

(3) 融合的情報処理へのアプローチ

ニューラルネットワーク、ファジー、AIの手法による様々な取り組みが活発化している。車の運転などの技能的な人間の行為のモデルとして、さらには自律移動ロボットなど実際問題として扱われているが、まだ確立されたものとはなっていない。知的情報処理の枠組みの中で考えた小林[3]のものをあげる（図表4.5-3）。現在では、知的問題解決には、これらの有機的接続及び相互発展が重要としている。

図表4.5-3 知識システム、ファジーシステム、ニューラルシステムの違い
及び各種接近法の比較（小林[3]）

	知識システム	ファジィシステム	ニューラルシステム
機能要素	知識処理	技能処理	認知処理
推論方式	フレーム、ルール	ファジィルール	ニューロン素子
高速化技術	演繹的推論	ファジィ推論	活性化伝播
知識獲得源	RETE アルゴリズム	ファジィ推論チップ	ニューラルコンピュータ
知識獲得方式	専門家、ドキュメント	専門家、事例	事例
技能習熟方式	インタビュー、プロトコル解析	インタビュー、事例解析	学習アルゴリズム
学習基盤技術	事例による洗練化	メンバシップ関数チューニング	局所的最適化
長所	SBL, EBL	最適化手法	学習アルゴリズム
短所	推論結果の説明能力	近傍知識による補間	ノイズに対する頑健性
	知識獲得がネック	あいまいさの爆発	学習速度の遅さ



D. Marr[4]は知覚情報処理の究極的な理解のための3つの水準（計算理論、表現とアルゴリズム、ハードウェアによる実現）をあげ、これからの脳の計算論的アプローチを提起した。センサフュージョンや認識・記憶のモデルを考えていく際にも、有効な指針となっている。神経生理、心理、認知などの科学との連携で、工学が果していく役割といえる。

4.5.2 運動制御

人間は、習熟によって合目的な動作能力を獲得する。自動車の運転などで、覚えたてのころはぎこちないが、習熟するとスムーズになる。鉛筆を持つ、それを操って字を書くなども同様である。この秘密は、人間の持つ非常に多数の感覚の動員の仕方と、それによる非常に多数の筋肉の動かし方にあるといえるが、この組み立て方は脳内での情報処理そのものである。これは、運動系においても認識系と同様な自己組織化そして学習が脳内の運動領域で生じることと考えられている。ところが、これは、必ずしも感覚経路と1対1ではなく、融通性がある。われわれは、一旦基本的なところを習熟すると、さらに高いレベルで感覚を動員して磨きがかかり、上手となる。三角形を描けると、大きくしたり小さなものも描ける。字を右手で覚えると、左手でもできる。また、運動や動作はエネルギーを消費

する過程であるから、生体のダイナミックスとかかわる。これは、自然界の力学そのものを、情報処理のなかで解いていることに相当する。恐らく中枢プログラミングというのは、固定された物でなく汎化性を持ったものである。ここでは、この観点を踏まえて、多数の筋肉を協調統合的に処理する自己組織的なメカニズムの工学的表現を考えてみたい。

(1) 運動のマッピング

脳の運動野には、機能の局在が見られる。個々の運動レベルでも、マッピングがいたるところに存在する。この辺の明確なものが、藤田[5]によって考察された。藤田はサッケード（眼球のきわめて正確なジャンプ）を支配するニューロンを追って、脳幹の上丘を調べ、この結果、網膜からマッピングされて眼球の運動指令が作られる様子は図表4.5-4のように考えた。これによれば、急速に動く時や座標変換の演算は、ニューロンの動員としてネットワークに埋め込まれていると見られる。

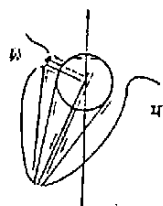


図2 眼球と眼筋（右眼）

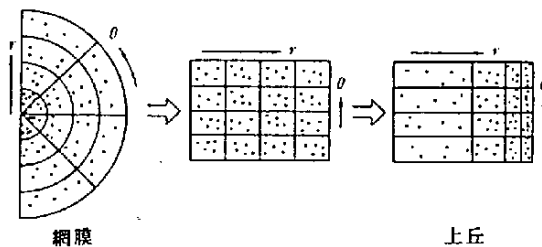


図3 視神経線維の分布速度 r : 振幅 θ : 方位角

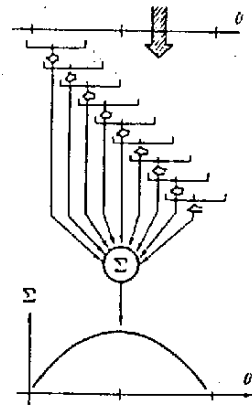
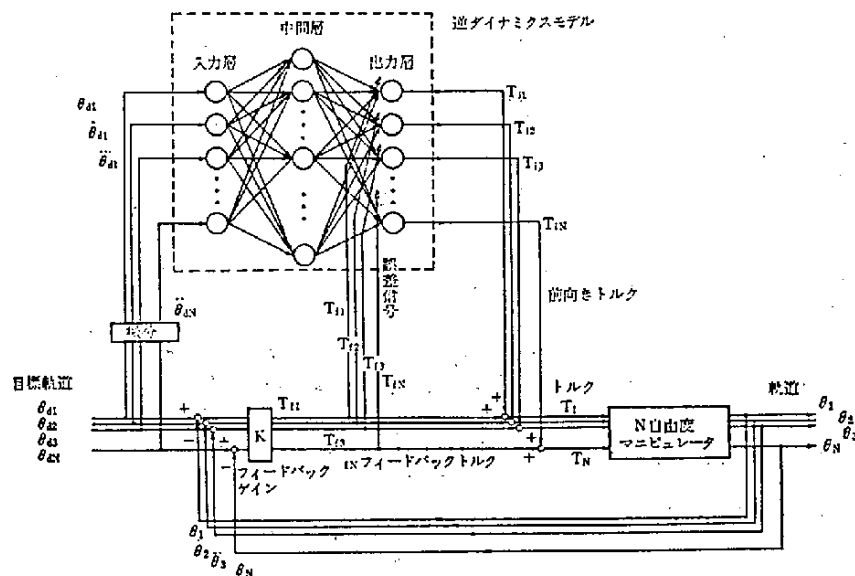


図4 方位角 θ の集団コード

図表4.5-4 サッケードの神経回路（藤田[5], 図2～4）

(2) PDPモデルから

Rumelhart ら[6] は、「PDPモデル」のなかで運動制御問題の例を2つ示している。これらは、意味ある動作のなかでの多重制約下での最適化・合理化を説明できるとしている。



図表4.5-6 運動学習の階層制御モデル (川人ら[7])

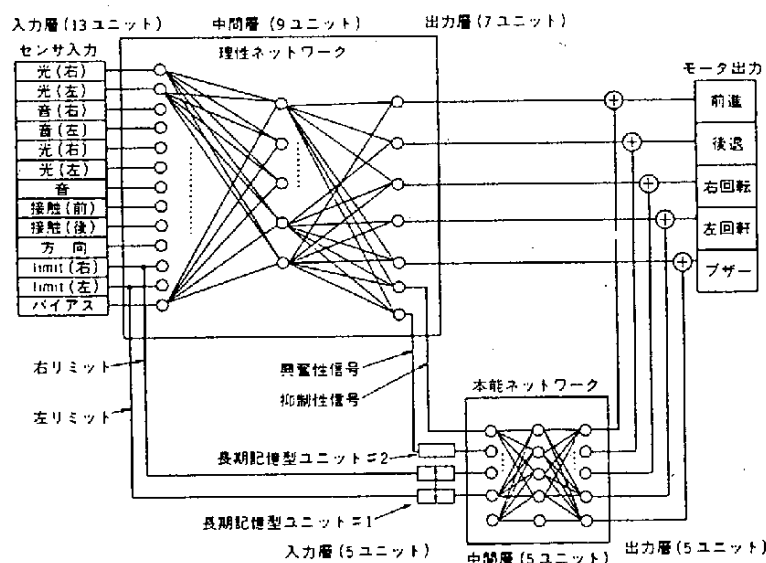
さらに、川人、宇野らは随意運動制御の枠組みを提起している。非常に熟練した運動では、軌道決定の問題が、数学的には制御対象の非線形ダイナミックスの拘束条件下で、ある評価関数を最小化することであるとし、この評価関数としてトルク変化最小モデルを提案している。これによれば、あたかも人が動作を教えて行くように一つ一つの運動を学習していき、次には最小化すべきエネルギー自体をトルク変化最小規範によって学習して、滑らかで汎用性ある動作の実現にいたる。

・把持のエネルギー関数を減少させるモデル

ホップフィールド回路は、ネットワーク処理の規範にエネルギー関数の極小化を持ち込んだものであるが、和田[8]の把持問題に対する解法もこれに近い。定義した把持のエネルギー E を最小にするようにネットワークが作られ、この下で、個々の関節の PE を自律化して協調させることができる。

(4) 行動、ニューロエソロジから

浅川[9]の理性・本能ネットワークがある(図表4.5-7)。単なるマッピングだけでなく、行動探索がとれるようなネットワークを構成したことが特徴である。群知能を持ったロボットへの展開が考えられている。さらに、行動及び群という点では、ニューロエソロジでの知見が大変参考になる。ただ、動物は生きるために行動する。従って、ロボット応用という点では、ロボットが勝手に人間の意に反して行動してもらっては困るのであるから、何を設計するのかははっきりさせておく必要がある。



図表4.5-7 理性・本能ネットワーク（浅川[9]）

梅谷[10]はこの辺をさして、ニューロエソロジ的なロボットを目指すなら、

- ① ロボットに特定の行動を触発せしめるような対象物を検出し認知する人工神経はどのようなものであるか？
- ② ロボットの行動を組み立てている運動を時間・空間的にコントロールする人工神経機構はどのようなものであるか？
- ③ ロボットにとって適切な行動を選択し動機づけるための中枢的な人工神経機構はどのようなものであるか？

に答え論ずることが必要である、と言っている。まさしく、センサフュージョンから運動制御、そして行動への課題をいえていると思う。

【参考文献】

- [1] 石川正俊：“センサフュージョンシステム”，日本ロボット学会誌，6, 3, p79(1988)
- [2] 安西祐一郎：“認知科学と人工知能”，共立出版（1987）
- [3] 小林重信：“認識システム技術の現状と将来”，計測と制御，27, 10, p 859（1988）
- [4] D. Marr：“VISION”，W. H. Freeman and Company（1982）（乾、安藤訳：ビジョン，産業図書（1987））
- [5] 藤田昌彦：“小脳モデルとニューロコンピュータ”，bit，20, 2, p 127（1988）
- [6] D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, and PDP Research Group：“PARALLEL DISTRIBUTED PROCESSING”，MIT Press（1986）（甘利監訳：PDP モデル，産業図書（1989））

[7] 川人、宇野、鈴木：“随意運動制御における適応と学習”，日本ロボット学会誌，

6, 3, p 50 (1988)

[8] 和田充雄：“ロボットハンドの握み制御”，日本ロボット学会誌，7, 5, p117 (1989)

[9] 浅川和雄：“ニューロコンピュータによるロボットの学習制御”，

コンピュータロール，29, p 108 (1988)

[10] 梅谷陽二：“ニューロエソロジーとロボット”，日本ロボット学会誌，6, 3, p42(1988)

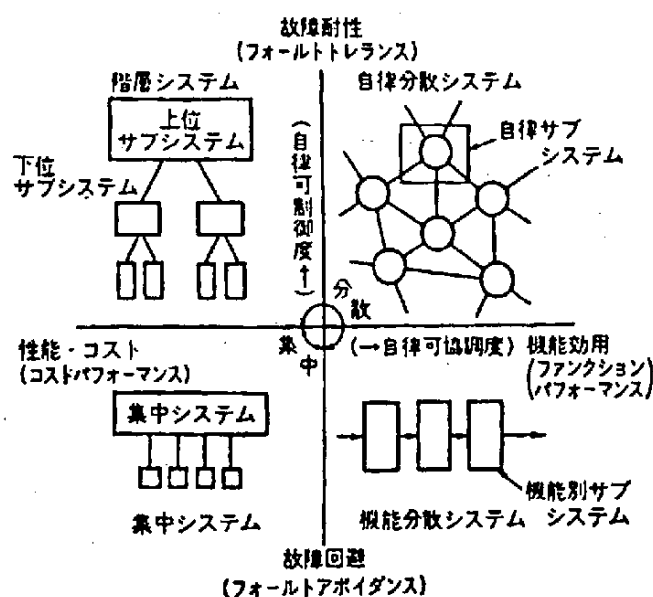
4. 6 自律分散型コンピュータ

4. 6. 1 自律分散システムの基本概念

分散型コンピュータの論理的なモデルの原点の一つとして、セル構造オートマトンをあげることができる。セル構造オートマトンとは、多数の同一の構造を持った有限オートマトンを規則正しく結合した系である。von Neumann は、物が自分で、自分と同じ構造の物を作る、すなわち、自己増殖のモデルを求めて、セル構造オートマトンを検討の場とした。彼の検討の場は、2次元5近傍の無限セル構造空間で、各セルは29状態からなる。このセル構造オートマトンの上で、情報を与えれば特定のセル領域にその情報に従った機械（特定の反応をするオートマトン）を作る万能機械を見出した。これにより、万能機械自体を作る情報を万能機械に与えれば、自己増殖する機械が生まれたことになる。

von Neumann がセル構造オートマトンを研究していた時代には、彼のアルゴリズムをハードウェアで実行してみることは思いもよらなかったであろう。しかし、ハードウェア技術はその後の40年で著しい成長を遂げ、ハードウェア資源の潤沢化時代への突入を背景に、計算機システムの無停止、段階的拡張、稼働中の保守などの要請に応える計算機の構成管理技術として、自律分散システムが提案・実用化されている。ここでは、「生体では、新陳代謝や成長により、構造は常に変化し、かつ部分的な故障を含んだまま機能しつづけている」「生体を構成する細胞はすべて均質で、各細胞は生存に必要なすべての情報を持っている」といった生物学的知見を範として、「計算機システムは異常なサブシステムを含みうる」「システムは、それぞれの目的と機能を持つ自律的なサブシステムの統合されたものである」といった考えで具体的なシステム構成技術が展開されている。ここに、自律性とは、いかなるサブシステムが異常となっても、残りのサブシステムはそれぞれが生存しつづけるために制御でき（自律可制御）、かつ、互いに協調できる（自律可観測）と定

義している。自律分散システムを、従来の階層システム、機能分散システムなどの構成輪との比較の下に位置付けてみると図表4.6-1 のようになる[1]。



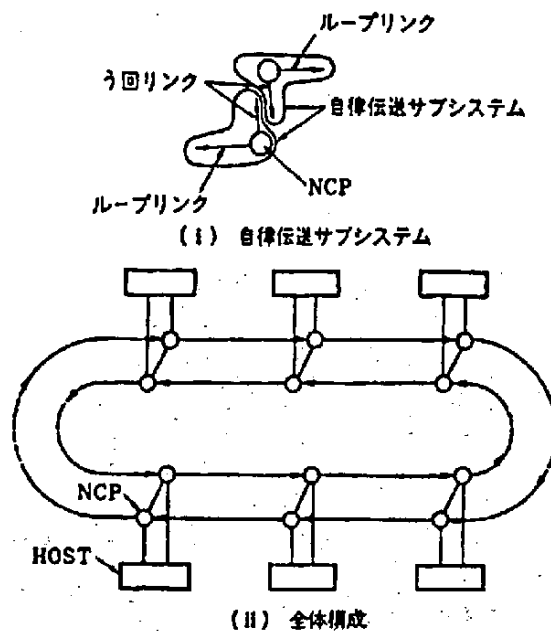
図表4.6-1 自律分散システムの位置付け

4.6.2 自律分散システムの実現例[2][3]

自律分散システム概念に基づいて開発された計算機システムの例として、ローカルエリアネットワーク (LAN)、複合マイクロコンピュータ、ソフトウェア管理などがある。

(1) 自律分散ループ伝送システム

LANの中でも多用されるループ状伝送システムで実用している。ここでは、伝送制御装置 (NCP) と、これから出る2本の一方方向伝送路、二つの伝送入力ポートをサブシステムと定め、これを図表4.6-2 のようにつなぎ合わせることで全体システムを構成する。

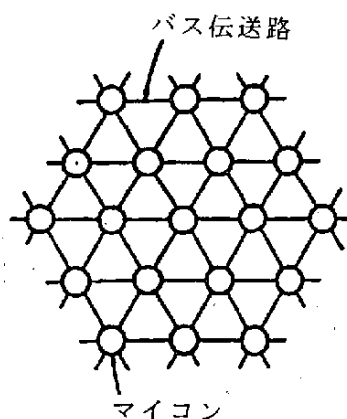


図表4.6-2 自律分散ループ伝送システム

このようなシステムに、二つの機能、すなわち、内容コード通信方式、自律迂回／回復処理機能を与えて、自律性を達成している。内容コード通信方式とは、データとその内容に対応したコード（内容コードと呼ぶ）と共に、伝送路にブロードキャストし、各NCPは、伝送路上に流れるデータの内、それぞれに必要な内容コードを持ったデータのみを選択して取り込むというものである。この方式により、NCPの送受信管理がネットワーク全体の構造変化に影響を受けることがないので、オンラインの保守・拡張性が確保されることになる。

自律迂回／回復処理機能とは、各NCPに持たせた異常検出、回復処理機能によって、全体のシステム稼働を確保しようとするものである。具体的には、各NCPは独自に隣接NCPへの送信可能性をチェック（小ループチェック）し、必要に応じて迂回路を構成する。迂回路の構成後は、異常の回復を検知するために、小ループチェックを繰り返し、回復が分かれば迂回路を解除する。このように、各NCPは、独自の判断で異常の検知／回復処理を行う。他のNCPからは何ら指示を受けることはないし、いかなるNCPもシステム全体の状況を知る必要がないという形でシステム信頼性を確保している。

(2) 自律分散複合マイクロコンピュータ



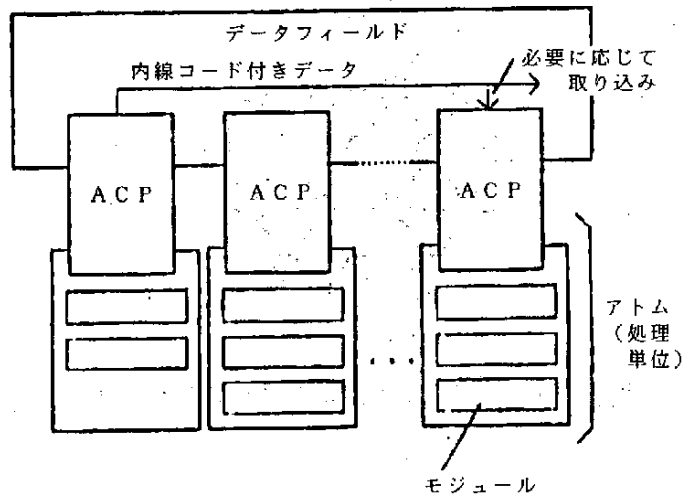
図表4.6-3 自律分散複合マイコンシステム

多数のマイコンを接続して、処理性能をあげるだけでなく、信頼性が高く、拡張・保守の容易さの確保を狙いとして開発されている。ここでは、マイコンをバスにより図表4.6-3に示すように結合している。バスを使用しているため、バス上の一部の伝送異常が、バス全体に波及する怖れがある。このため、各伝送サブシステムは、自律分散ループ伝送システムと同じような方式で、異常を検出し、異常時にはバス切断装置により異常部署を切り離す。各マイコン間の通信は、内容コード通信方式をとっている。これらにより、システムのフォールトトレランス性を高め、オンライン中の保守・拡張を可能としている。

(3) 自律分散ソフトウェア管理

従来のソフトウェアシステムでは、モジュール全体をOS (Operating System) が集中的に管理していた。複数の計算機にモジュールが分散しているときには、これら計算機間に共有メモリを設置し、これを介して各モジュールが連携する。共有メモリを介さず、計算機間での連携も考えられるが、いずれの場合にも、計算機間で親子関係をつけておく必要がある。これに対して、自律分散ソフト管理方式では、各モジュールの自律性を達成するために、図表4.6-4のような構造と機能を持たせている。モジュール間には、データが流れる場(データフィールド:DF)を設定する。モジュール間の具体的なデータの通信は、図に示すようにACP (Autonomous Control Processor) と呼ぶサブシステムが実行する。モジュール内で発生したデータは、その内容に対応したコード(内容コード)を付けてACPがDFに流す。各ACPは、DF内を流れてきたデータから管轄下のモジュールに必要な内容のデータを選択、収集する。モジュールは必要な

すべてのデータが揃えば、処理を実行する。



図表4.6-4 自律分散ソフト管理システム

この方式により、いかなるモジュールも他のモジュールを起動することなく、自律的に処理を実行する。また、各モジュールは、ACP、DFを介した自律的なデータのブロードキャストと選択収集の手段により、互いに連携する。これらの自律性の達成により、モジュールの追加・削除を他のモジュールに影響を与えることなく実行できる（ハードウェアの追加・削除も同様である）。また、信頼性の確保のための多重化も、処理の重要度に応じてきめ細かく行える。

【参考文献】

- [1] 森ほか：自律分散概念の提案、電気学会論文誌、104-C, 12, 303-310, (1984)
- [2] Ihara, H. & Mori, K.: Autonomous Decentralized Computer Control Systems, IEEE Computer, 17, 8, 57-66, (1984)
- [3] Mori, K. et al.: On-line Maintenance in Autonomous Decentralized Loop Network, Proc. COMPCON '84 Fall, 323-331 (1984)

5. 研究開発課題

5.1 感覚行動システムにおける群情報処理技術

実世界のなかで活動する感覚行動システムは数多くの構成要素を扱う一方で、実時間処理能力を持たなければならない。その計算量は1台の計算機の容量をはるかに超え、情報処理の形態は超並列、超分散になる。

また感覚行動システムは開いた世界を相手にする。情報処理は固定的な構造ではなく、相手に応じて伸縮自在な柔らかい構造を持つ必要がある。以上のような情報処理を群情報処理と呼ぶ。

群情報処理の基盤技術は、仕事を請け負うモジュールがたくさん集まって全体の処理を行うマルチエージェント処理である。感覚行動機能のために、エージェント群をいかに組織化するかがポイントである。

[研究開発項目]

(1) 分散協調探索・センシング

探索は宝探しに例えられる。世界全体での探索を、領域に分けて多くのエージェントが手分けして探索することにより高効率化する。

多くのセンサからの情報をエージェントで分散統合処理する。

(2) 行動の協調制御

典型応用例がおみこしロボットである。たくさんのエージェントが集まり、共通の連結性の高い1つの仕事を行う。

(3) 行動の階層制御

作業員、現場監督、指揮者のような階層ごとの役割を持ったエージェントを配することにより行動の管理と制御を行う。

(4) 拘束表現

多くの拘束を同時に満足させる問題を、1つの拘束を受け持つエージェントを並列に働かせることにより解く。

(5) 多層のエージェント管理

エージェントの誤りや行き詰まりを監視・管理するためにエージェントを多層的に構成する。

(6) エージェントによる知識表現

5. 2 自律協調型知能情報処理システム

生物の高度な情報処理の原理模倣または機能の工学的実現に基づき、自律的な知能情報処理モジュールが多数、分散協調的に働くことにより総体として、高い知能性を持つ情報処理システムである。

結果として、生物のように自己を発展できるような、融通無碍な情報処理のできるシステムを構成する。

[研究開発項目]

(1) 生物的情報処理

自己発展型情報処理や非線形情報処理の実現手法。

アナログ的コンセンサス形成手法、非線形振動子による情報処理。

大脳記憶過程のモデル化。

生体情報の表現・伝送原理。

(2) ニューラルネットワーク

学習・自己組織化技術、多段ニューラルネットワーク技術、

ニューロによるパターン処理、自然言語処理。

(3) 協調型計算(coordinated computing)

超分散処理のための協調型計算モデル(actors、その他)。

(4) 統合型計算

アナログ・デジタル統合処理、位相情報・論理情報統合、

複合型ニューラルネットワーク。

(5) 計算機アーキテクチャ

超並列超分散システム、シュールパラレリズムシステムの構築。

(6) 管理ソフトウェア

超分散システムのためのオペレーティングシステム、ノンストップ稼働のためのバックアップ技術。

(7) 分散型問題解決

(8) 知識ベース構成

(9) 群知能システム管理

(10) 構造学習

5.3 自律的複合知能ロボット

人間の知覚運動系のように、広い範囲の環境条件の変化などに適応できる高度の学習機能を持つロボットである。自律性を持つ種々のサブシステムを協調的に統合して、高機能ロボットを構成する問題、および、多数のロボットが協調してそのシステム構成を変えつつ、高度の問題解決行動を行う、複合ロボットシステムを含む。

このロボットは家庭や野外のような、ロボットのために特別に整備されていない、アンストラクチャードな環境で活動することを指向している。したがってその適用可能分野は広大である。

[研究開発項目]

(1) 感覚機構

分散協調センシング（センサフュージョン）、能動的環境理解。

(2) 柔らかな行動機能

高度スキル、行動計画機能、状況理解。

群れの協調行動。

PDPモデル、ニューラルネットワークモデルによる運動制御。

理性・本能ネットワーク、ニューロエソロジーによる行動形成。

(3) 統合システム

知識の統合と学習、階層的及び非階層的統合化、

ロボастシステムアーキテクチャ。

5.4 多次元感覚情報処理技術

人間の知的活動や情緒的活動を能動的にサポートするための技術であり、種々の感覚情報を統合処理して、データベース内に多次元感覚情報の世界を構築すること、および、各種メディアを統合した人工現実感により、データベース内に設計され、計画された情報世界を人間の多次元感覚により体験することを可能にする技術である。

これによって、21世紀には世界規模にわたって整備されてくる情報の流通基盤の上で、情報アクセス、統合利用に関する基礎技術が確立される。

[研究開発項目]

(1) アクティブデータベース

能動的に情報を収集・加工し知識やデータの再構成とシミュレーションを行う。

自己組織化機能を持つマルチメディアデータベースも含まれる。

(2) データロボット

情報の収集を行うロボットであり、知能ロボットの機能と人間と共同作業をする場合の違和感の無さを備える。

(3) 超人工現実ヒューマンインタフェース

計算機の作り出した仮想世界を、人間の各感覚モダリティに整合した情報表示を行うことにより、疑似体験させる技術。

メディアスーツなどによる多次元感覚情報の提示や感覚統合による人工現実感。

5.5 情報パーソナル化のためのニューロエンジニアリング

情報動作機器のパーソナル化のために、人間が育てていくことができるようなパーソナルマシンの情報処理システムの構成要素及びシステム統合。

これにより、自然現象、災害、経済パニックなどの予測、最適ではなくてもそこそこに満足できる解の生成、行動をとめない、自己組織や自己修復する機能、使う人間の個性を反映することができる教育機能を実現するための基礎技術が確立される。

[研究開発項目]

(1) 知覚・認知・行動技術

人間の持つ融合的知覚・認知、エピソード記憶的フローのモデル化。

(2) パーソナル情報処理技術

人間にならったニューロデバイス、センシングデバイス、アクチュエータデバイスなどを融合・統合し、自ら考え行動し、人間が育てられる情報処理技術。

(3) ヒューマンインタフェース

言語処理、対話翻訳などパーソナル応用化の構成技術。新たな情報チャネルを含んだ人間とのインタフェース。

6. む す び

自律協調機能を有するシステムの構成法には大まかに3つのタイプが考えられる。第1は、異種のいろいろな自律的サブシステムが協調的に作用させることにより1つの自律システムを構成するものである。種々の感覚や動作が統合された自律知能ロボットがその例である。第2は、同種の自律システムが互いに協調的に働くものであり、自律知能ロボット同士の協調的作業がその例である。第3は、均質な自律システムが多数集まって協調的に作用しあうものである。全体の中で個々の自律システムは自分の役割を最適に自己調整する機能を具備する必要がある。これは、いわゆる、群知能の実現例であり、個々の個体システムには生物のような高度の自律性が要求される。

自律協調は、他のWGで行うことが予定されている調査項目と深い関連を持っており、自律性を持つ各機能を協調的に作用させたシステムとして総合する具体的な場を提供する役割が割り当てられているようにも思われる。例えば、自律協調システムを実現するハードウェアとしては超並列超分散アーキテクチャを用い、その上にニューロ計算の様な原理に基づく、学習可能な、柔軟かく、ロバストなシステムをインプリメントし、3次元情報処理機能、認識理解機能、行動機能等をそれぞれ自律システムとして構成する、そしてそれらが互いに協調的に作用させあうことにより、生物的な高度の機能を実現する。そのときの具体的な場としては、例えば、第5章で挙げた課題を取り上げることも出来よう。また、そのようなシステムを構成するアプローチとしては、上述の3つのタイプがありうるだろう。新情報処理に於ける自律協調の位置づけは概略この様なものと考えられるが、群知能のコンセプト、システム統合原理、計算理論、実現技術、等なお不透明な部分も多く、今後とも調査を重ねるとともに、新しいパラダイムを作り上げて提示して行く必要がある。

—— 禁無断転載 ——

平成 2 年 3 月 発行

発行所 財団法人 日本情報処理開発協会

東京都港区芝公園 3 丁目 5 番 8 号

機 械 振 興 会 館 内

TEL (432) 5405 (代表)

印刷所 三協印刷株式会社

東京都渋谷区渋谷 3 丁目 11 番 11 号

TEL (407) 7316

01-R015

