Research Memorandum No.584 December 1995

基礎的問題からみた情報統合

6.1 版

伊庭幸人

統計数理研究所
〒 106 東京都 港区 南麻布 4-6-7
Email: iba@ism.ac.jp

情報統合という主題のもとに、広義の人工知能の困難および展望について論じた。
人工知能学会誌 “情報統合” 特集 (1996 年３月号) のための草稿である。

1 章では、人工知能の基礎的問題について、著者なりのまとめを述べた。 2 章では、 1 章の思想のもとで、 “パターン” と “シンボル” について論じた。 3 章では 1、 2 章での準備に基づいて、情報統合の諸問題、とくに “パターンとシンボルの統合”、 “パターンを利用したモジュール統合” に関して考察した。

主として枠組と技術的側面を論じた Research Memo.No.583 “統合技術のための統計数理的方法” に対して、本解説はより広い背景を扱っており、相補的な内容といえる。

KEYWORDS
Frame Problem, Model, Symbol, Pattern, Integration

はじめに

著者は、統計学の立場から、あるいは科学論的な立場から、人工知能の基礎的問題に関心を持ってきたが、“情報統合” に関しては特に専門家ではない。今回、“第 1 回情報統合ワークショップ” の関連記事を分担執筆するに際しては、知的情報処理一般の中に “情報統合” を位置づける記事を担当することとなった。“情報統合” は見方によって浅くもなり深くもなるテーマであるように思う。この記事が、“情報統合” をより根本からとらえる契機となれば幸いである。 1 章では、人工知能の基礎的問題について、情報統合を意識しながら、著者なりのまとめを述べた。 2 章では、 1 章の思想のもとで、“パターン” と “シンボル” について論じた。ここの議論は、やや過度に単純化されているが、問題の見通しをつけるには有効だと思う。 3 章では 1、 2 章での準備に基づいて、情報統合の諸問題、とくに “パターンとシンボルの統合”、“パターンを利用したモジュール統合” に関して考察した。

本稿では実際の生物についての考察を重視した。著者も、実際の生物と似ているかどうかは工学的にあまり重要でないと考えた時期があったが、最近は考えが変わってきており、それが内容にも反映している。

1　人工知能の基礎的問題

果物を取りにいく。食べたら、毒でひどい目にあった。次の週も果物を取りにいく。先週のとは斑点の色が違う。“まったく同じ” ではないから食べた。また、中毒した。次の週も果物を取りにいく。今度は傷がついている。“まったく同じ” ではないから食べた。とうとう毒で死んでしまった。

われわれが生きていくうちに出会うものや状況で “まったく同じ” ものは 2 つとない。したがって、学習するということは、得られた情報の一部を意図的に捨てる[1]ことを学ぶことにほかならない。しかし、どのようにしてこれは可能なのであろうか。有限個の入出力の組に基づいて $y = f(x_1, x_2....x_n)$ のような関数を決めることは付加的な条件なしには不可能である。“f は超平面である” とか “f はデータに矛盾しない範囲でなるべく滑らかである” とか “f はある決まった要素の組合せでもっとも短く記述できるものである” とかいった前提条件があってはじめて最適の f を決めることができる。この前提条件を以下では “モデル” と呼ぶ[2]。“モデル” なしには学習ということは成立しないというのが、いわゆる “汎化” の問題である。

情報統合において、複数のセンサーからの情報を統合すればより正確な判断が可能である、という考えがある。これは間違いではないけれど、それほど簡単なことではない。“各センサーが見ているものが同じものであるか否か” はどうしてわかるのだろう。たとえば、両眼で立体視をする際に両眼の網膜像のどことどこが対応するのか、というのは決して自明な問題ではなく、連続性や滑らかさのような外界に関する “モデル” を必要とする ([マー 87])。さらにいえば、各センサーが見ている “もの” という “もの” の意味さえ一般には自明ではない。

これらの例の意味するところは、簡単にいえば「なまの外界そのものは混沌としたものであり、なんらかの “モデル” を通してみて、はじめてそこに秩序が見い出され、生きのびるために有意義な行動 (あるいは、工学的に要請された行動) が可能になる」ということである。“生物” あるいは “生活者” としてのわれわれは環境のなかに自然に統合されているので、通常の状態では “モデル” を意識しないが、いったん工学者としての立場をとって “計算機になにかの目的を果たさせよう” としたなら、上の意味での “モデル” は “われわれが知りたいが知らないもの” としてたちあらわれてくることになる。人工知能においてわれわれが問題にするのは、対象そのものというより、この意味での “モデル” である。たとえば、ある対象が “パターン” であるか “シンボル” であるかはモデル化の方針によって決まることで、対象の性質のみで決まるわけではない。

ここで “モデル” (たとえば [赤池 81]) の代わりに “先行的理解” ([Tsuda 84][津田 90])、“計算理論” ([マー 87])、“不変項” (ギブソン) といっても本質的な内容は同じだと思う[3]。また、上で述べた “汎化” や “情報

[1] この表現は山崎眞見氏による。

[2] 本論文では、モデルとアルゴリズムを分けて考えるべきかといった問題には深入りせずに、“モデル” という言葉を大まかに使うことにする。

[3] 勿論、ニュアンスや概念の属するカテゴリーは微妙に違う。

源の同定” に関する問題も、多彩な分野に共通する問題のひとつの表現と考えられる。[松原 89] は (狭義の) フレーム問題といわゆる “注意” の問題などを合わせたものを “一般フレーム問題” として論じている。この枠組でいえば、上の例も “一般フレーム問題” に含まれるだろう。“汎化” の問題は統計学における “情報量規準”[坂元 83] や情報理論における “最小記述長原理 (MDL 原理)”[Rissanen 89] の動機づけと深く関わっている。さらに、乱数を定義することの困難[4]やウィトゲンシュタインの “規則” や “私的言語” についての議論 [ウィトゲンシュタイン 76] も見方によっては同じ思想圏で解釈できる。

最近の潮流を考えれば、“モデル” の概念についてのいくつかの注釈が必要である。まず、“モデル” は脳 (計算機) の中にだけ存在するとは限らない。たとえば、特定の角度範囲からの入射光にのみ反応する生物 (ロボット) を考えてみる。このようなセンサからの出力を処理するには大したモデルは必要ないかもしれない。しかし、なぜそのセンサを選んだか、どうしてその角度範囲を見ているか、ということの中にもモデルが含まれていることを見逃してはならない。実際、この意味でのモデル化が環境に対して不適切なら、場当たり的な補助センサや場合わけの処理が必要となり、一般フレーム問題の意味での破局が生じるだろう。生物の持つ “柔軟さ” はポイントを押えた上での “大雑把さ” であり、“いい加減さ” とは似て非なるものだと思われる。

“モデル” をわれわれが完全に知っている必要はない。最初にあげた学習の例では関数 f に対する “滑らかさ” などの “高次の知識” と事例から f の具体的な形が獲得される。一般にモデルを階層的にすることで、高次の規則を与えて、低いレベルの規則を経験から学習することが可能になる[5] ([Akaike 80]、[赤池 89]、[伊庭 95])。一般に、表現力が大きく弱い制約しか与えないモデルから出発するほど、学習のために必要な計算量は多くなるし、学習に必要な事例の数も多くなるであろう。それを厭わないのが、“自己組織化”、“学習”、“発生” といったアプローチの精神であるが、(少なくとも気持の上では) 極限までこの方向を押しすすめたのが、いわゆる進化的アプローチである。進化論によれば、実際の生物はそれがどんなに巧妙に作られていつように見えても、突然変異と淘汰の組合せによって作られたことになる。であれば、われわれも同じような方法で欲しいものを手に入れられるに違いない、というのが、遺伝的アルゴリズムをはじめとする進化的アプローチの背後にある考え方である。

進化的アプローチに対する批判としては、まず実際の進化にはもの凄く時間がかかっており、並列度も高いので、これを本気で真似るのは無理だという議論がある。これは誰でも思いつく難点であるが、ほかにもより定性的な問題があるように思われる。しばしば指摘されるように[6]、実際の進化は、固定した “環境” への適応ではない。免疫系は病原体と、アリマキは共生微生物と、相互に相手を環境として “共進化” してきたのである。これに対して、進化的アプローチにおける “進化” は “工学的要求” を “環境” として組み入れて、要求に合わないものを淘汰することでその要求を実現させることである。明らかに両者の間にはギャップがある。共進化をシステムに組み入れて、その程度をうまく調節することで、工学的要求を最適な効率で達成させるようにできるという楽観的な見方 [Hillis 92] もあるが、必ずしもうまくいくとは限らない。

また、“淘汰” の過程をどうするかも問題である[7]。ある種の “淘汰についてのフレーム問題” が存在する可能性もある。たとえば、“アシモフの「ロボット 3 原則」を守るようにロボットを進化させられるか” という問題を考える。この場合、具体的な事例について「ロボット 3 原則」が守られているかどうかは、適当な手続きを定めて個々に判定しなければならない。この手続きが不備であれば、結局進化してくるのは “ロボット 3 原則の網目をすりぬけて悪事を働く不良ロボット群” ということになりかねない。

以上では、“自然のやっているとおりやるのだからうまくいかない筈がない” という考えを批判したのであって、進化的アプローチが不可能であることを論証したわけではないことに注意されたい。進化的アプローチが極めて興味深い方向であることは間違いない。その具体的な可能性についてはあとの章で述べる。

---

[4] 疑似乱数に不安があるために、あらゆる検定を行ない続けて、とうとうシミュレーションが間に合わなくなるというのはいかにもありそうな話である。これが、デネットの爆弾処理ロボットの話と良く似ていることに注意。

[5] “解釈学的循環” [Tsuda 84][津田 90] もこれに似ているがニュアンスは幾分異なる。

[6] たとえば、[上田 95], pp.225-226 の討論。

[7] 進化的アプローチにおいて淘汰の過程に問題があることは中島秀之氏の示唆による ([上田 95], p.222 参照)。

2　パターンとシンボル

2.1　パターン的なモデル化

前章での “モデル” についての議論はかなり抽象的であった。考えをもっと具体化するためには工学、諸科学における情報処理で実際に使われて効果をあげている “モデル” にどのようなものがあるかという分析が必要である。ある程度普遍的なものに限れば、有効なモデルの種類は実はそれほど多くない。特に重要なのは、次の 3 種類である。

1. **global** な幾何学モデル : 高次元のユークリッド空間内の超平面に事例を配置するタイプのモデル。(バリエーションとしてユークリッド距離以外を使ったモデルがある。)

2. **local** な幾何学モデル : ユークリッド空間内の曲線・曲面に事例を配置し、曲線・曲面の “連続性” または “滑らかさ” を仮定するタイプのモデル。(バリエーションとして “連続性や滑らかさへの稀な違反” を許すモデルがある。)

3. 古典物理学の法則や空間・時間の性質に基づくモデル。(たとえば、初等幾何学の定理から導かれるモデル。)

因子分析や数量化、多次元尺度法などはすべて 1 のタイプのモデル化に依存している。また、線形の重回帰モデル、自己回帰モデルなども 1 の範疇にはいる。 1 に基づく手法は “線形代数” の主要な応用分野であるとともに、統計学の応用において長年にわたって主役を勤めてきた。

統計学にとって最近 15 年間の大きな収穫は、 2 のタイプのモデルの運用法が発達したということである ([赤池 89]、[Wahba 90])。滑らかさへの稀な違反を許すことで境界を検出するモデル ([Geman 84]、[Kitagawa 87]) や各成分の滑らかさを仮定することでデータを成分に分解する手法 ([Akaike 80,85]) も開発された。特にそう断っていなくても、多くのパターン認識の問題で、前処理や手続きに埋め込まれた形で 2 のタイプの制約が利用されていることも重要である。

また、認知科学においても、このタイプのモデルの有用性が示されている。[マー 87] において “計算理論” の例としてあげられているものの多くでは、初等幾何に基づく条件 3 と並んで、連続性や滑らかさの条件 2 が重要な役割を演じている。この側面は [Poggio 85] によるベイズ統計を用いた定式化でいっそう強調された。宇野・川人・鈴木らによる身体運動の計算理論においても類似の条件が用いられている [Uno 89]。

本来、マーの “計算理論” という概念は幾何学的なものを内容とすることを前提としないことに注意したい。にも関わらず、 “計算理論” という名のもとに研究されている内容のほとんどが、初期視覚や身体運動に関するものであり、 2,3 の意味での幾何学的なモデルで表現されていることは重要である。脳研究において、 “ハードウエア”、 “アルゴリズム” のレベルを飛び越して “計算理論” レベルへ “落下傘降下” することを可能にするのは、幾何学的な “物理世界” への信頼のように思われる。

ここで、幾何学的な概念に基づくモデル、特に 1,2,3 のタイプのモデルによって解釈され、構造が記述される (された) もののことを “パターン” と呼ぶことにすれば、われわれがうまく使いこなすことのできるモデルは主として “パターン的” なものだということになる[8]。われわれの認識において、この意味でパターン的なものが優越する理由は、ある程度は、人間 (あるいは生物一般) の知性の性質にもとめられるのかもしれない。別の面白い見方はそれがわれわれの時代の “知のあり方” であるというものである。すなわち、近代 (科学) そのものが、幾何学的な概念の上に構築されていると考えるわけである。たとえば、フッサールは近代科学の成立過程を世界の幾何学化・数学化の過程としてとらえ、幾何学化された世界に “生活世界” を対立させた [フッサール 80]。また、フーコーは、近代的な臨床医学の成立を物理空間に局在する実体として病気をとらえるようになった時点におき、それ以前の事例ベース的、分割表解析的な医学と対照させている [フーコー 69] [9]。

[8] 分野によっては 1 はパターンとはいわないことに注意。たとえば、パターン認識の分野では、 1 を “ベクトル”、 2 を “パターン” ということがあるらしい。

[9] 厳密にいえば、これら「諸大家」のいう “幾何学的” の意味は本稿でいうものとはかなりずれている。たとえば、[フーコー 69] でいう “臨床医学的なものの見方” は、 2 や 3 の範囲を越えて、聴覚的なものや自然言語における “視覚的” 表現までを含む。

“パターン” という言葉は、ここで使ったのとはかなり違った意味にも使われる。たとえば、 “論理的な思考以前にある無定型のもの”、とか “瞬間的にパッと認知できる特徴” などを “パターン” ということもある。こういった意味での “パターン” が、 (初期) 視覚的なもの、あるいは、 1,2,3 に基づくモデルと関係するかどうかは自明でない問題である。この問題は、後出の “パターン的でもシンボル的でもないモデル” に関する議論にも関連がある。

また、モデルによる解釈のプロセスを経たものを一般に “シンボル” と呼び、それ以前のものを “パターン” と呼ぶ立場もある。この定義では、 1,2,3 に基づくモデルによって解釈された結果もまた “シンボル” である。幾何学的なモデルは “自然” なものであるからモデルとはいえない、という偏見に異を唱えるのが本節の趣旨のひとつであった。

2.2 シンボル的なモデル化

人工知能という分野が成立した背景として、前の節で述べたような意味での “パターン” 的なものへのアンチテーゼがあったと考えるのは深読みにすぎるであろうか。 “物理世界” に対する “生活世界” 的なものの探求という点では、人文科学・社会科学の多くがその線上にあるともいえるが、その中でなんらかの機械、とくに計算機上でのシステム構築を通してこのテーマに関わろうとしたのが人工知能であると考えたらどうであろう。そう考えると、人工知能が反パターン、反幾何学、反物理学の要素を内包していたとしても驚くにあたらない。

その志に理ありとして、人工知能が当初期待されたほどの成果をあげていないように見えるのは何故であろうか。基本的には、反パターンの武器として記号論理的なものの力に依存し過ぎたのに無理があったと考えられる。記号論理自体はあまりにもなんでも表現できるために、それだけではモデル[10]、としては弱すぎるのである。 1 章で述べた意味での “モデル” は外界の解釈のために必要かつ十分な制約でなければならない。前節の 1,2,3 のような “パターン” 的なモデルはそういう能力を持っているのに対し、単なる述語論理やそれに手を入れたものはそこまでの具体的内容を持ち得ない。このために、 (一般) フレーム問題のような事態が発生することになったわけである。マーが “機構” ばかりに研究を集中せずに “計算理論” にももっと関心を払えと主張したのも、その点をついたものと思われる。多層パーセプトロンなどのいわゆる “ニューラルネットワーク” はある意味で命題論理を “柔らかく” しようとしたものとも考えられるが、 “汎化” の問題の存在は、これらがやはりモデルとしては弱すぎることを示している。統計モデルの形にしただけでは必ずしも問題は解決しないのである。

この問題を解決するための正統的な考え方は、記号論理[11]はあくまでもモデル作りの基盤であって、より具体的な “シンボルについてのモデル” をその上に構築するのが人工知能の本来の目的であると考えることである[12]。しかし、この “シンボルについての普遍性のあるモデルは何か” という点こそ、人工知能の研究が大きな困難に陥った点であった。歴史的に、記号論理を採用した動機としては、記号論理が自然言語の構造の良い近似になっているという考えがあった。だとすれば、ふたたび自然言語の研究に帰って、そこからモデルの内容を汲み上げるというのは自然な考えである。しかし、自然言語はおそらくとても難しい。問題は、自然言語を統語論の周辺だけでなく、意味論・語用論の範囲でとらえると、社会学、人類学などあらゆる周辺科学の要素が含まれることになり、妥当な研究領域を設定するのが難しいという点にある。シャンクたちによるスクリプト、 CD 理論のような試みはこの方向から新しいモデルを作りだすための第一歩とみなせるかもしれない ([中川 92]) が、道は遠いと考えるべきであろう。かって、レヴィ = ストロースは、情報技術の発達に伴って不連続的な複雑さを理解するための “野生の思考” の権利が回復すると説いたが、その約束はいまだ果たされていないのである。

一方、 1 のような仮想的な空間を考えるモデルはむしろ 18 世紀の医学に関係づけられている。

[10] 文脈から明らかなように、論理学でいう “モデル” ではなく 1 章で説明した意味の “モデル” である。

[11] あるいは、それをより柔軟にしたベイズ統計的な枠組・制約充足的な枠組

[12] ここで、弱いモデルのままで事態を打開しようとすれば、 1章で議論したように、階層的な構造を利用した知識獲得にむかうことになる。進化的アプローチやニューラルネットワークに高次の規則を導入することで積極的に汎化を行なわせる方法 ([石川 91]) はこの例である。この方向については次章でもう少し論じる。

3　情報統合

3.1　パターンとシンボルの統合

パターンとシンボルの統合について一般にいわれている説を模式的に示すと、

> パターンの世界とシンボルの世界はどちらも同じ程度に理解できている。その間のギャップを埋めることで、シンボルが “グラウンド” され、人工知能を実現するにあたっての隘路が突破できる。また、グラウンドされたシンボルを介して、聴覚と視覚のような異種の情報のあいだの統合が実現できる。解決すべき典型的な問題のひとつの例は、画像の各部分にその部分の名称のラベルを張りつけることである。

となる。この説を “隘路説” と呼ぶことにしよう。自然言語にせよ、 DNA の塩基配列[13]にせよ、それ自身の中で閉じたモデルを考えただけでは良く理解できないのは当然である。その意味では、隘路説の主張する “統合” は有意義と思われる。しかし、見方によっては、隘路説はいまひとつ頭の固い方針のようにも感じられてくる。

シンボルの側から隘路説の問題点を見てみよう。最大の問題は、先の議論で見るかぎり、シンボルの世界がパターンの世界と同じ程度に理解できているとは思えないということにある。統合を双方向的に行なおうとすれば、シンボルのあいだの関係を規定するモデルをあらかじめ与える必要がある筈であるが、これを書き下すための基礎をどこに求めたら良いのであろうか。具体的にいえば、ラベルの間の意味論的な制約などはすべて手で入れるのだろうか。もし、個々の場合に期待される振舞いを枚挙的に規則として与えようとするならば、 (一般) フレーム問題のような事態に陥る可能性がある。

これらの問題に対するひとつの解決策は、学習や進化、モデルに関する用語でいえば階層的なモデル化を導入することである。もっとも簡単なレベルでは、シンボル間の規則として十分任意の形のものを与えておいて、外部環境及びパターンとの統合処理を行ないつつ、適当な規準 (高次の規則) を用いて規則そのものを削除、追加する方法が考えられる[14]。 “柔らかい” 枠組でこれを行なうためには、ニューラルネットや重回帰モデルの係数に非線形な “weight decay” を導入する方法 ([石黒 85][石川 91][Williams 95]) がある。また、シンボルそのものを競合学習などによって獲得させる方法 (たとえば [大森 95]) や形式文法モデルを進化させる方法 ([中川 95] はややそれに近い) も興味深い。後者では、シンボルの持つ “組合せ可能性” の側面をモデルに取り入れることが可能かもしれない。この他、社会的コミュニケーションを通じてのシンボルの生成という考え (たとえば [Hashimoto 96]) も重要である。

別な視点としては、ブルックスに代表されるようなロボット製作へのアプローチがある [Brooks 91]。この立場では、統合体としてのロボットを環境への適応を考慮しつつ製作するという手法をとる。たしかに、このような方法をとれば、実世界での試行錯誤をたえず行えるので、シンボルに関するモデル作りは容易になるだろう。しかし、めざす機能がより複雑なものになった場合、この方法論だけでどこまで対処できるかは不明である。たとえば、同じ昆虫ロボットでも、単なる歩行でなく寄生蜂のような行動を要求した場合はどうだろうか。ブルックス自身も次のステップでは進化的アプローチに関心を寄せているようにみえる。

ブルックスに共感する研究者は、 “物理空間のコピーを中枢にもつ” ようなモデル化を嫌う傾向にある。これは、物理空間に基礎をおきつつも、具体的な環境や機能に即したモデル作りをすることで、単純なパターン・シンボルの 2 元論からの離脱をはかろうとしているとも考えられる。前章で述べたことから考えると、パターン・シンボルの 2 元論は、われわれの文化的な思い込みかもしれない。そうでないとしても、われわれの内面、われわれの外界の解釈がそれだけで尽くされるとは思えない[15]。むしろ、初期視覚的なものと自然言語的なものの間にはさまざまな異なったタイプの “思考” があり、それに応じたさまざまなタ

[13] DNA の塩基配列は、自然言語 (とくに文字で書かれたテキスト) とならんで、 “シンボル” のひとつの範例となっている。シンボルとしての DNA がタンパク質の高次構造やさまざまな器官の形態を通して生物の機能とどのように対応しているかという “シンボルとパターンの統合” の問題は、現代生物学の最大の課題といえる。

[14] 規則に含まれる自由パラメータの学習も考える。

[15] 大脳皮質の物理的構造からして、そこでなされる認識はすべて幾何学的 (パターン的) に組織されている、と主張するならば別である。

イプのモデルがあると考えるのが自然であろう。われわれは、それらをいまだ知らないだけなのではないだろうか。こうした “パターン的でもシンボル的でもないモデル” の理解は “隘路説” 的な統合の生硬さから逃れるための鍵のように思われる。

高次視覚の研究は “パターン的でもシンボル的でもないモデル” の例を見い出すためのひとつの突破口かもしれない[16]。IT 野においてものの形状がどのようにコード (モデル化) されているかについては興味深い実験が多くあるが、完全な理解はまだ得られていない [田中 91,93]。また、より低次の視覚野の理解もまだ十分とはいえない。これらの研究が進めば、われわれのパターン観、シンボル観を柔らかくするために有益な情報が得られる可能性がある。

もうひとつの興味ある領域としては、 “化学感覚”、具体的には味覚・嗅覚 ([高木 89][エクセル 95]) に関する問題がある。化学感覚は視覚・聴覚に比して研究が進んでいないし、人工知能の立場からはほとんど顧みられていないようである。仮想現実感ということが話題になるが、そこでも 5 感のうち味覚・嗅覚はあまり真面目に扱われていない。化学感覚の重要性は “甘い思い出” “その男がクサイ” のような表現に見られるように “感情” に深く結び付いている点、また、脳の中で進化的に古い部分に多くの処理を負っている点にある。現在ロボットの研究で問題にされているのは “(古典) 物理的な身体” であるが、今後は “切れば血の出る” いわば “化学的身体” も問題にされるようになるだろう。 “化学感覚” は “化学的身体” の理解のためのひとつの切口と考えられる。別の切口としてはいわゆる “ウェットウェア” “人工細胞” のようなものがある。

“パターン的でもシンボル的でもないモデル” の表現手段としてどのようなものが適切かということから考えていくのもひとつの方法である。ひとつの例としては、固定点をもたない非線形力学系がある。谷はナビゲーションを行なうロボットの内部モデルとして力学系の作るストレンジ・アトラクタを利用している [Tani 96]。また、多賀の 2 足歩行モデル [Taga 94] はリミットサイクルを持つ力学系の能力を利用したものとして注目される。このようなモデルの学習や進化を考える上では、モデルのパラメータとモデルの機能の関係の不連続性から生じる不安定性の克服と積極的利用が鍵を握っている。

3.2 パターンを利用したモジュール統合

情報統合のひとつの形式として、 “パターンによる統合” とでも呼ぶべきものがある。 “スケッチ” による視覚情報の統合 [マー 87]、 “物理空間法” による異種情報の統合 [伊藤 92]、視覚の “双方向性計算理論” ([川人 91],[川人 95]) などがこの例である。見方によっては、前節で述べた “隘路説” によるパターンとシンボルの統合もこのひとつの例といえるが、違う点もある。最も異なる点は、 “隘路説” では “シンボル” が異質な情報や複数のモジュールの統合の介在物としてとらえられているのに対し、ここでいう “パターンによる統合” ではむしろ “パターン” の方が統合の介在物になっているところである[17]。情報源の同定の問題 (1章) が扱い易いのは “パターンによる統合” に基づくモデル化の利点である。

細かくみていくと、上にあげた 3 つの例にはかなりの違いがある。 “物理空間法” では 3 次元の物理空間の対応物を内部表現として、その上で異種情報を統合することを提案している。このような表現が実際の生物の脳内にあるとは考えにくいが、自然科学データの処理法としては有用かもしれない。マーでは “$2\frac{1}{2}$ スケッチ” が統合に重要な役割を果たす[18]。$2\frac{1}{2}$ スケッチに直接対応する脳内の領域は今のところ見つかっていないようである。川人らの説では、低次の視覚野 (たとえば V1,V2) での統合を考えている。 “双方向性” の名の示すとおり、各モジュールは逆方向の結合を通じて低次の視覚野に出力することができるので、低次の視覚野を掲示板のように使って統合がなされることになる。 [川人 91] では (視野対応があるという意味で) “パターン的” なモジュール同士の統合に重点があり、双方向性を利用した高速計算法が提案されている。 [川人 95] はより高次のモジュールの統合をこの枠組で論じているが、いわゆるバインディングの問題が双方向性だけで理解できるかどうかはいまひとつはっきりしない。

双方向性理論に関連して興味深いのは、外部入力のない状態でのモジュールの自発的活動とそれにとも

[16] 人間の高次視覚について “画像にラベルを張りつける” という見方が正しいかどうかはわからないし、仮に正しいとしても、ラベルの内容が自然言語的な意味での “名称” である必然性はないであろう。

[17] “隘路説” と “パターンによる統合” を相補的なものとしてとらえることも可能である。

[18] 正確には、ひとつのスケッチにすべてを書き込むのではなく、複数のスケッチの間の対応の形で統合が行なわれるという説である。見方によっては川人らの説とも似てくるかもしれない。マー自身による説明は [マー 87], pp.391-394 を参照。

なう逆方向への出力である。クリックは外部入力のない状態での活動が脳の情報処理にとって重要な役割を果たしているとし、それを “夢” と解釈した ([Crick 83])。川人たちもこの考え[19]を取り入れているが、外部入力のない状態での活動は目がさめている状態で時分割的に行なわれるとしている。実際の夢は、視覚的なものだけではなく、聴覚的なもの (特に人の声) やその他の感覚の要素を含む。これを双方向性理論で考えようとするなら、各種の感覚野をめぐり、言語野をも含む巨大なループの活動を考えることになる。脳内には大小いろいろなループをめぐる自発的活動が存在して、いわゆる夢はその一番大きいものに対応するのかもしれない。このように考えると、 “パターンによる統合” というよりは、 “ループをめぐる活動による統合” という側面が強く感じられる。この方向では、脳のダイナミックな活動を重視する立場 ([Tsuda 84] [津田 90] [Kaneko 94] [Tsukada 95]) との接近が興味深い。また、 [橋田 94] の機構論と関係づけることもできるだろう。

3.1節で触れたように、 “パターンによる統合” に関しては、批判的な意見も多く聞かれる。まず、 “パターンによる統合” は多数の変数をもつモデルをもたらすが、このようなモデルは計算時間の点で実時間的な行動に不向きであるという批判がある。しかし、上の 3 つの提案を考えても相互に大きな違いがあり、これらをひとまとめにして速さを論じるのは必ずしも適切ではないだろう。別の批判としては、 “パターンによる統合” は情報源の同定の問題にこだわりすぎた考えではないか、というものがある。たしかに、生息環境や生き方によっては、さほど精密な情報源の同定を考えなくても良い (あるいは情報源の実体について人間とは別の観念を持つ) 生物もいると思われるし、それに対応したロボットもあってよいだろう。進化のプロセスで中枢神経が発達するにしたがって内部にいろいろなシミュレーターが生じてきた、というストーリーを考えることもできる。この見方では “パターンによる統合” の成立は視覚的シミュレーターの成立に対応することになる。

むすび

本稿では、まず世界を解釈するための枠組として必要な “モデル” が何であるかを論じることが人工知能の基本的問題であることを確認した。次に、モデル化の 2 大方針として、 “パターン” 的モデル化と “シンボル” 的モデル化があるという図式の由来について考察した。

これらに基づいて、まず、 “パターンとシンボルの統合” について論じた。 “パターンとシンボルの統合” が単なる “調停案” になってしまわないための方針として、 (1) シンボルやその間の関係を既定のものとしないで学習や進化によって獲得することをめざす (2) パターン / シンボルの 2 元論を乗り越えて、どちらでもないようなモデル化について探求する、のふたつを示唆した。さらに、モジュール統合におけるパターンの役割についても論じ、その功罪について考えた。

今、われわれは新しいモデル観・表象観を目指す長い旅の出発点にあり、その一環として “統合” を考えていくべきであろうというのが、本稿のひとつの結論である。

謝辞

いつも討論に応じてくださり、いろいろ教えて頂いた田辺國士氏をはじめとする統計数理研究所の皆さん、岡隆一氏、麻生英樹氏、中島秀之氏をはじめとする RWCP の皆さん、橋本敬氏、池上高志氏をはじめ東大教養学部の皆さんに感謝します。橋本敬氏には本稿を準備する段階で “聞き手” の役割をお願いしました。麻生英樹氏との対談は大変有益でした。また、統計数理研究所における研究会 “動的システムの構築と記述に向けて” (1994.12) における議論も大変刺激になりました。ロボットについていろいろ説明して下さった谷淳氏、また、山川均氏、白井良明氏をはじめとして RWCP の情報統合ワークショップ (1995.4/1995.11) 及びその準備のためのメイルリストにおいて議論をしていただいた方に感謝します。津田一郎氏との長年にわたる議論、川人光男氏の集中講義とその際の討論は本稿に大変役立っています。松原仁氏には文献 [松原 89] [橋田 94] を送って頂きました。

[19] 詳しくみると、クリックやホップフィールド [Hopfield 83] の “反学習” から川人にいたる過程で内容は大きく変わっている。もともとの反学習では誤った記憶を消去するのが主目的であったが、ボルツマンマシンの学習方程式 ([Hinton 86]) では内部モデルの統計的推定が目的となっており、 [川人 91] が取り入れているのはこちらである。詳しくは [伊庭 95] を参照されたい。

文献

[Akaike 80] Akaike,H.: Likelihood and Bayes procedure, in Bayesian Statistics, Eds. Bernardo,J.M, DeGroot,M.H., Lindley,D.V., and Smith,A.F.M., University press, Valencia, (1980).

[赤池 81] 赤池 弘次: モデルによってデータを測る, 数理科学 No.213, March, pp.7-10, (1981).

[Akaike 85] Akaike,H., Ozaki,T, Ishiguro,H., Ogata,Y., Kitagawa,G., Tamura, Y-H., Arahata,E., Katsura,K.: TIMSAC-84 Part I, II, Computer Science Monographs No.22,23, Institute of Statistical Mathematics, (1985).

[赤池 89] 赤池 弘次: 事前分布の選択とその応用, ベイズ統計学とその応用, pp.81-98, (編) 鈴木 雪夫 国友 直人, 東大出版会, (1989).

[Brooks 91] Brooks,R.A. : New approaches to robotics, Science, Vol.253, pp.1227-1232, (1991).

[Crick 83] Crick,F. and Mitchison,G.: The function of dream sleep, Nature, Vol.304, pp.111-114, (1983).

[エクセル 95] Axel, R.: 匂いの分子生物学, 枝松 秀雄訳, 日経サイエンス 1995 年 12 月号, pp.84-91, (1995), 原著 (1995).

[Geman 84] Geman,S. and Geman,D.: Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol.6, pp.721-741, (1984).

[橋田 94] 橋田 浩一、松原 仁: 知能の設計原理に関する試論 – 部分性・制約・フレーム問題 –, 認知科学の発展, 第 7 巻, pp.159-201, 講談社, (1994).

[Hashimoto 96] Hashimoto,T. and Ikegami,T.: Emergence of net-grammar in communicating agents, to be published in BioSystems (1996).

[Hillis 92] Hillis, W.D.: Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure, in Artificaial life II , Langton,C.G., Tayler,C., Farmer,J.D., Rasmussen,S., (1992).

[Hinton 86] Hinton,G.E. and Sejnowski,T.J.: Learning and relearning in Boltzmann machines, in Parallel Distributed Processing Vol.1, Eds. E. Rumelhart and J.L. McClelland, MIT Press, Cambridge, Mass, (1986).

[Hopfield 83] Hopfield,J.J., Feinstein,D.I. and Palmer,R.G.: 'Unlearning' has a stabilizing effect in collective memories, Nature, Vol.304, pp.158-159, (1983).

[フッサール 80] Husserl,E.: ヨーロッパの学問の危機と先験的現象学, 世界の名著 62, 細谷 恒夫 訳, 中央公論社, (1980).

[フーコー 69] Foucault,M.: 臨床医学の誕生, 神谷 美恵子 訳, みすず書房, (1969) , 原著 (1963).

[伊庭 95] 伊庭 幸人: 学習と階層 – ベイズ統計の立場から – , RWC 情報統合ワークショップ 95'(95/4/26-28) 予稿集 (「物性研究」 1996 年 2 月号 (Vol.65 No.5) に掲載予定).

[伊藤 92] 伊藤 伸泰、藤井 実: 「知能ロボットにおけるセンサー融合による状況認識」第 7 回「原子力におけるソフトウエア開発」研究会報告書, 1992 年 3 月, JAERI-M 92-054 (日本原子力研究所), pp.75-85, (1992).

[石黒 85] 石黒 真木夫: ベイズ型重回帰モデル, 統計数理 33 No.1, 特集 – エントロピー最大化原理の展開と統計モデル – , pp.8-11, (1985).

[石川 91] 石川 真澄 : ネットワーク学習アルゴリズムの最近の話題, 計測と制御, Vol.30, No.4, pp.285-290, (1991).

[Kaneko 94] Kaneko, K.: Relevance of dynamic clustering to biological networks, Physica D, Vol.75, pp.55-73 (1994).

[川人 91] 川人 光男、乾 敏郎: 視覚皮質の計算理論 – 再構成からパターン認識、記憶まで –, 科学, 61, pp.214-222, (1991), (再録: 宮下保志, 下條信輔 編: 脳から心へ – 高次機能の解明に挑む –, 岩波書店, (1995)).

[川人 95] 川人 光男: 脳はどのように結び付け問題を解いているか, 電気学会情報処理研究会資料 IP-95-22, pp.81-90 (1995).

[Kitagawa 87] Kitagawa,G.: Non-Gaussian state space modeling of nonstationary time series (with discussion), Journal of the American Statistical Association Vol.82, pp.1032-1063, (1987).

[マー 87] Marr,D.: ビジョン – 視覚の計算理論と脳内表現 –, 乾 敏郎, 安藤 広志 訳, 産業図書, (1987), 原著 (1982).

[松原 89] 松原 仁、橋田 浩一 : 情報の部分性とフレーム問題の解決不可能性, 人工知能学会誌, Vol.4, NO.6, Nov. , pp.695-703, (1989).

[中川 92] 中川 敏: 異文化の語り方 – あるいは猫好きのための人類学入門 –, 世界思想社, (1992).

[中川 95] 中川 聖一, 升方 幹雄: 視聴覚情報の統合化に基づく概念と文法の獲得システム, 人工知能学会誌, Vol.10, No.4, Oct. , pp.619-627.

[大森 95] 大森 隆司: 記号とパターンの注意による統合過程のモデルと情報処理アーキテクチャ, RWC 情報統合ワークショップ 95'(95/4/26-28) 予稿集, (1995).

[Poggio 85] Poggio,T., Torre,V. and Koch,C.: Computational vision and regularization theory, Nature, Vol.317, pp.314-319, (1985).

[Rissanen 89] Rissanen,J.: Stochastic Complexity in Statistical Inquiry, World Scientific, Singapore, (1989).

[坂元 83] 坂元 慶行、石黒 真木夫、北川 源四郎: 情報量統計学, 共立出版 (1983).

[Taga 94] Taga,G.: Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuro-musculo-skeletal system and the environment, Physica D, Vol.75, pp.190-208, (1994).

[高木 89] 高木 貞敬, 渋谷 達明 編: 匂いの科学, 朝倉書店, (1989).

[田中 91] 田中 啓治: 物体像の脳内表現, 科学, 61, pp.231-238, (1991), (再録: 宮下保志, 下條信輔 編: 脳から心へ – 高次機能の解明に挑む –, 岩波書店, (1995)).

[田中 93] 田中 啓治: 側頭葉のコラム構造 – 図形アルファベット? それとも差分増幅器のセット? –, 科学, 63, pp.510-516, (1993), (再録: 宮下保志, 下條信輔: 脳から心へ – 高次機能の解明に挑む –, 岩波書店, (1995)).

[Tani 96] Tani,J. : Model-based learning for mobile robot navigation from the dynamical systems perspective, IEEE Trans. System, Man and Cybernetics Part B, Special issue on robot learning, Vol.26, No.3, in press, (1996).

[Tsuda 84] Tsuda,I.: A hermeneutic process of the brain, Progress of Theretical Physics Supplment, No.79, pp.241-259, (1984).

[津田 90] 津田 一郎 : カオス的脳観, サイエンス社, (1990).

[Tsukada 95] Tsukada, M.: Theoretical model of the hippocampal-cortical memory system motivated by physiological functions, RWC 情報統合ワークショップ 95'(95/4/26-28) 予稿集, (1995).

[上田 95] 上田 完次, 下原 勝憲, 伊庭 斉志: 人工生命の方法 – そのパラダイムと研究最前線 –, 工業調査会, (1995).

[Uno 89] Uno,Y., Kawato,M. and Suzuki,R.: Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torque-change model, Biological Cybernetics, Vol.61, pp.89-101, (1989).

[Wahba 90] Wahba,G.: Spline Models for Observational Data, SIAM, Philadelphia Pennsylvania, (1990).

[Williams 95] Williams,P.M.: Bayesian regularization and pruning using a Laplace prior, Neural Computation, Vol.7, No.1 pp117-143, (1995).

[ウィトゲンシュタイン 76] Wittgenstein,L.: 哲学探求, ウィトゲンシュタイン全集 8 巻, 藤本隆志訳, 大修館, (1976).

REGISTRATION
of
Research Memorandum

(month) (day) (year)

Research Memorandum _____ Received on _____, _____, _____ by

Section of Research Information, the Institute of Statistical Mathematics

(*Do not write above this line*)

(*Fill in the blanks below and return to Section of Research Information*)

Title

基礎的問題からみた情報統合

Author(s) and Affiliation(s)

YUKITO IBA

Institute of Statistical Mathematics 106 Minami Azabu Tokyo
Email: iba@ism.ac.jp

Key Words

Frame Problem, Model, Symbol, Pattern, Integration

Abstract

情報統合という主題のもとに、広義の人工知能の困難および展望について論じた。1章では、人工知能の基礎的問題について、著者なりのまとめを述べた。2章では、1章の思想のもとで、“パターン”と“シンボル”について論じた。3章では1、2章での準備に基づいて、情報統合の諸問題、とくに“パターンとシンボルの統合”、“パターンを利用したモジュール統合”に関して考察した。主として枠組と技術的側面を論じたResearch Memo.No.583“統合技術のための統計数理的方法”に対して、本解説はより広い背景を扱っており、相補的な内容といえる。