

(1) 認知科学の展望

Herbert A. Simon(カーネギーメロン大学, 米国)

プログラム委員会は私に講演を依頼するにあたって、認知科学と人工知能の今後20年間の展望について予測してほしいと要請した。10年後の科学の予測を行うことは、明日の株式市場を予測することより、あるいは明日の天気予報よりさえも、いくぶんやさしいものである。

物理学は、プランクによる黒体の法則の発見から量子力学の基本法則の発見に到達するまでに26年ほど、つまり四半世紀以上かかった。研究から何が生まれるかを正確に予測することを求められているのではなく、研究の方向性、つまり、興味深くまた有益な研究の方向とはどの方向かについて話すように求められている限り、10年後というのは手に負えないほど遠い将来の話ではない。また、予測を行うのであれば、たったの10年と言わず、それよりも少し先まで見通すこともできよう。21世紀をかいま見ること可能だろう。もっとも21世紀はいまやほんの12年先のことにすぎないが。

この講演の中で、私は、「認知科学」と「人工知能(AI)」という言葉をはほとんど区別なしに使うつもりである。どちらの分野も、知能、すなわちコンピュータによる知的行動を生み出すことに関係している。認知科学はそうすることによって人間自身の知能についての理解を深めようとしているのに対し、AIは主として人間の知能を拡張することに関心を抱いている。したがって、AIの場合には、AIプログラムで用いられるプロセスが、知的活動に際して人間が用いるプロセスと必ずしも類似したものである必要はないわけである。

AIではナノセカンドやピコセカンドという速度を使用できるが、そのような速度は人間の脳では無理である。人間の脳は、せいぜいミリセカンド単位の速度でしか働かない。

そういうわけで、私はこれからの認知科学とAIの両方について論じるわけだが、認知科学、つまり人間の思考についての研究から生まれた概念を中心に述べるとともに、そうした概念がAIの将来に対してもつ意味合いについて述べることにする。むろん従来より、これら二つの分野は相互に成果を取り入れ、過去30年間にわたって互いを高め合ってきている。

プログラミング言語

まず「プログラミング言語」の話題を取り上げて、現在までの成果を確認しておこう。認知科学とAIの存在そのものは、複雑で不規則な構造を記憶することを可能にするプログラミング言語の存在に依存している。まず、30年以上前にリスト処理言語が考案され、次にそれから20年ほどしてOPS 5 などのようなプロダクション・システム言語が現れ、さらにもっと最近になって、PROLOGに代表されるような論理型プログラミング言語が登場した。

コネクショニズムや並列ネットワークに対する現在の関心は、さらに別種のプログラミング言語を生み出すこと必定であり、すでに生み出している。その初期の例は、この会議で取り上げられているプログラムの一部にすでに見ることができる。

したがって現在、プログラミング言語としては、リスト処理言語、プロダクション・システム言語、論理型プログラミング言語、および、

コネクショニスト言語ないし神経ネットワーク言語といったものがあるわけである。

ハードウェアの限界

ハードの面について言えば、むしろ、高性能のコンピュータがなければ認知科学もAIもまるで成り立たない。もっとも、高性能のハードの有無が実際に研究の発展速度の大きな決め手となってきたかどうかはさほど明らかではない。ハードの有無は研究のネックとなってきたらだろうか、それとも、必要な記憶容量と演算速度を備えたハードは必要なときにいつも、あるいはたいてい、利用可能だったのだろうか。

この疑問に対しては、どっちつかずの答えをせざるを得ない。視覚ないし聴覚パターン認識のための現在のシステムや、チェス・プログラム、およびその他いくつかのエキスパート・システムは、つい5年前までのシステムでは、満足できる速度で演算ができなかった。この意味では、ハードの演算速度と記憶容量の目覚ましい持続的進歩は、AIと認知科学の発展に絶対的に必要不可欠であった。

しかしその一方、こんな問いかけもできる。すなわち、ハードの開発は、認知科学分野で概念が生み出されることを制限するネックとなってきたのだろうか。この疑問に対する答えは、概ね否定的であると言えよう。機械知能が新しい領域へと発展を遂げてきた速度は、主としてハードではなく、研究者の独創力に依存しているのだ。結局のところ、基礎研究は、リアルタイムで実行しなければならないプログラムをめぐらなければならないのである。われわれは、そうしたプログラムをどう組織化すべきかについての概念を作り上げて、コンピュータがプログラムを必要な速度で実行できるようになるまで待つことができる。

これには例外もある。実線の状況下でチェスを行うプログラムを設計する場合には、マシン

の速度が必要不可欠である。一部の研究者は、かねてより、コンピュータ・チェス研究はチェスの知識をプログラムに組み入れることにもっと重点をおくべきであって、ブルートフォース〔コンピュータの能力を活用した〕探索のスピードアップにあまり重点をおくべきではないと考えてきた。結局のところ、現在世界最強のチェス・プレイヤーは依然として、のろまな人間であってコンピュータではない。人間はゲーム木を100枝以上たどることなどめったにないが、コンピュータは300万枝から500万枝たどっていながら、まだ人間に勝てないのである。もっとも、コンピュータ・チェスの進歩の歴史は実際には私の主張を指示していない。歴史の示すところでは、マシンの速度が早くなるにつれて、チェス・マシンは強くなっているからである。

2、3年前には、AIプログラミングは専用のLISPマシンやPROLOGマシンができれば大幅にスピードアップするだろうと広く考えられていた。そうしたマシンはいまや存在しており、現にスピードアップを達成している。しかし、ただそれだけのことである。専用マシンは、重要でプリミティブな演算をより速く実行することができるが、それでもまだ高性能の汎用マシンといい勝負である。また、専用マシンが今後とも費用効果にすぐれたものであり続けるとはけっして断定できない。いずれにしても、専用マシンは、ハードの数多くのスピードアップ手段の1つにすぎず、それほど大きな躍進（ブレイクスルー）とは言えないのである。

RPOLOGの場合も、コネクショニスト・プログラミング言語の場合も、おおかたの見方は（今回の会議で発表されている論文でもそうした見方が数多く見受けられるが）、実行速度の主要問題は大規模の並列処理ハードさえあれば解決するはずであるとされており、当然ながら、そうしたハードを作り出すことに目下、多大の努力が傾けられている。

私は2つの理由から、この見方に懐疑的である。第1に、並列処理ハードが、多くの言語の中でもとりわけPROLOGを悩ませている「探索の爆発的増大」の解決法であるかどうかには懐疑的である。第2に、真の汎用性能を備えた並列処理ハードを設計することが原理的に可能であることにさえ私は懐疑的である。そういうわけで、これからの話の中では、専門用途もしくは特殊な種類の問題向けの並列処理ハードと、かなり一般的な用途に役立つと言われる並列処理ハードをはっきりと区別するつもりである。こうした点についてはのちほどまた触れることにする。

現時点における私の所見では、ある種の非常に注目すべき専用並列処理ハード（たとえばアレキ・プロセッサなど）はすでに生み出されているものの、その一方、大規模な並列処理を行う（すなわち数多くの並列処理コンポーネントを備えた）汎用ハードに関しては、なるほどと思わせるデモンストレーションにまだお目にかかっていない。並列処理性能はわずかしかなかったながら、現在利用可能な最高速の演算速度を備えている新しいスーパーコンピュータは、主として数値解析に使用されている。そして、コネクショニスト研究を除けば、現在のところ、AIや認知科学ではスーパーコンピュータはさほど用いられていない。

この所見の重要性は、「専用並列処理ハードを用いれば大幅なスピードアップができることは確実だが、目下のところ、汎用並列処理ハードを用いて数桁のスピードアップを実現する方法はわかっていない」という点にある。並列処理システムが認知科学の進歩の鍵であるかどうかはまったく定かではないのである。

今や、私がこの会議に提出された多くの論文のおもな仮定の1つに異議を唱えていることは明らかだが、この点に関してはこの講演の中でさらに触れなければならないだろう。

知的プログラム

しかし差し当っては、コンピュータ・プログラムに話を戻そう。この会場の聴衆に対しては、人間レベルの知的行動に到達している、もしくはそれを凌ぐコンピュータ・プログラムがすでに存在する多くの領域を列挙する必要もないし、人間の精神が思考や問題解決などに際して記号（シンボル）をどのように操作しているかという疑問に対して出されている多くの答えを列挙する必要もないだろう。

ここでは、知能の本質そのものを定義する上で重要と思われる、プログラムに共通のいくつかの特徴を要約するにとどめたい。

まず第1に、われわれはコンピュータ・プログラムによって、人間ではとても不可能な速度を達成する。計算速度がその代表的な例である。とはいえ、速度やブルート・フォースを、ヒューリスティクス、すなわち、人間の巧妙さについての認識から借用した経験則と組み合わせない限り、知能の実現に向けての大きな前進は望めない。

AI研究のごく初期に、人間の計算能力では膨大すぎてとても手に負えない問題空間の中できわめて選択的な探索を行うことを可能にする経験則、すなわちヒューリスティクスのいくつかが発見された。評価関数を大きくすることを目指して次のステップを選択するかなり単純な「山登り法」ですら、消耗的な探索を減少させる上で有効であることが判明している。エキスパート・システムできわめて広く用いられているもっと洗練された技法として、手段-目標解析があるが、これは所定の時点におけるシステムの場所を、目標、すなわちシステムが目指している場所と比較することによって探索を誘導する。

これらやその他の探索ヒューリスティクスは、おおかた、単純な問題解決システムについての研究を通じて発見された。単純とは言っても、

人間にとってはかなり難しい問題である。

その一方、エキスパートの知能は通例、多大の情報内容をもつ領域に応用される。丹念に研究された1ダース以上の領域のいずれにおいても、世界第一級のエキスパートの専門知識は、膨大な知識とともに、手段-目標解析やその他の形式のヒューリスティクス探索を行う能力が基礎になっていることが今や明らかとなっている。

一般に、人間のエキスパート（ヒューマン・エキスパート）は自分の専門領域の（通例「チャンク」と呼ばれる、情報単位をなす）物事を5万以上知っている。こうした人間の知識は、プロダクション・システムのような形式（production-like form）により、インデックス化されたエンサイクロペディアの形で貯蔵されている。人間エキスパートのこの記憶貯蔵形式、つまり、5万からおそらく10万ほどの項目を有するインデックス化されたエンサイクロペディアの存在を証明する立派な証拠をわれわれは今や掴んでいるはずである。

たとえば、われわれは皆、自分の母国語のエキスパートである。誰しも、母国語でならば5万語から10万語（漢字でなく単語）を認知することができる。また、そうした単語の意味に関する知識を記憶からただちに検索することができる。医者も、同じことを病状に関して行い、チェスの達人は同じようにしてチェスの盤面上の特徴を認知する。すでに実現しているから言えるのだが、プロダクション・システム形式のそうしたエンサイクロペディアを作り上げ、手段-目標推論またはその他の何らかの形態の推論を行う若干の性能をそれに付与することによって、われわれは人間の専門知識のレベルで動作しうるエキスパート・システムを作ることができる。

また、「直観的」ないし「判断的」と呼ばれる（直観によって問題を解決するような場合の）人間のエキスパートの反応は、自分の置かれた

状況の中で5万のチャンクもしくは手がかりの1つを見つけて、記憶から集められた情報を基にしてそれに反応することに基づいた単なる認知行動であることも現在ではわかっている。

人間エキスパートの知識がこのような形で構造化されていることがわかったことによって、われわれはコンピュータによる探求を、構造化が不十分な問題や、創造性といった領域にまで押し進めることができるようになってきている。たとえばダグラス・レナートによるEURISKO、カーネギー=メロン大学のわれわれのグループのBACONやKEKADAといったプログラムが作られて、法則やデータを発見することや、古い概念から新しい概念を生み出すこと、何らかの研究目標を達成することを目指した一連の実験を計画することができるようになってきている。

しかし、現時点までの認知科学の成果のほとんどは、目標と作用素(operators)がかなり明確に定義され比較的十分に構造化されたタスクに関係したものである。科学的発見についてのプログラムや、作曲を行うプログラム、クリエイティブなデッサンを行うプログラム（とりわけ、イギリスの画家ハロルド・コーエンのもの）などにみられるような最近の成功例は、構造化が不十分な問題についての研究に取り組む意欲をかきたててくれる。そうしたプログラムによって実行されるタスクには、「手」(moves)と呼ばれるものもつ正当性の代わりに、あいまいに定義された目標や不明確な境界がつきものである。したがって、認知科学の方法によって分析でき、AIによって自動化できるような人間の思考には、以前はともかくとして、現在では明確な限界はないのである。

思考対知覚

認知科学とAIの黎明期には、普通の人々が日常的に行う簡単な事を行うプログラムを書くのが一番やさしく、教授やエンジニアや医師が行うような、人間の高度な精神活動をシミュレー

トするのはきわめて困難だろうとたいていの人
が考えた。しかし実際は、まるでその反対だ
たのである。

人間の目がすること、人間の耳がすること、人
間の手がすることを模倣するようなコンピュ
ータ・プログラムを書くほうが、学者やエンジ
ニアが知的な問題を解決する際に行うことを模倣
するプログラムを書くよりもはるかに難しい。

実際のところ、われわれはそれを予想して当
然だった。それに驚くようではいけなかったの
だ。なにしろ、われわれ人間が他の哺乳類と共
有している感覚系や運動系は、何億年もかか
って進化を遂げてきたものなのである。進化の過
程を通じて、それらはきわめて精巧で高度に調
整された器官となっているのである。したがっ
て、それらをシミュレートするのが困難なのは
当然である。

言語や抽象的な思考を操る人間の脳の部分で
ある新皮質は、実際には、たかだか100万年前
という、ごく最近になって進化した器官である。
したがって、新皮質は感覚系や運動系よりもは
るかに単純なものであると予想して当然である
し、現にそうだったのである。

学習

学習について一言述べておきたい。当初より、
認知科学は学習にとりわけ関心を寄せてきたが、
初期の20～30年間は、ほとんど何の成果も上
がらなかった。われわれが決まってサミュエルの
チェッカー・プログラムを引き合いに出すのは、
それがAIの黎明期におけるほとんど唯一の学
習の成功例だからである。

過去10年間に学習研究は再発進を遂げて多く
の成果が上がっている。最も重要な成果の1つ
は、解の出された例題を検討し、そうした例題
に際してのスキルを保持するよう自分自身を再
プログラミングすることによって問題を解決す
る方法を人間がいかにして学ぶことができるの
かについての理解が得られたことである。

コンピュータ版の例題学習の方式(schemes)
は、現在のいわゆる適応的プロダクション・シ
ステム(adaptive production system)である
が、これは、簡単に言えば、それ自体で新しい
プロダクションを形成し、それをメモリに貯蔵
して拡張プログラムの一部とすることのできる
プロダクション・システムである。10年前のネ
ベス(Neves)の研究以降、高校レベルの代数や
幾何といった科目のためのそうしたシステムを
作れることが納得の行く形でデモンストレー
ションされている。現に、ある試験的プログラ
ムが目下北京の公立学校で実用に供せられてお
り、生徒は標準高校家庭の代数と幾何を、例題
学習技法を用い、教師による授業を受けずに学
んでいる。そしてこの実験はきわめてうまく
行っているのである。

応用

のちほど、これとはかなり趣を異にした学習
アプローチについて話すことにする。しかし研
究の最前線へと話を進める前に、現状について
もう1つ話しておきたいことがある。すなわち、
応用についてである。

現在の認知科学とAIのおもな応用分野につ
いては、いわゆる「エキスパート・システム」
と総称されるものを含めて、すでにくつか触
れた。その他の実際的な応用(現実にはまだ応
用のとば口にさしかかった程度にすぎないが)
の中では、ロボティクスがとりわけ目立った存
在となっている。しかし、大部分の人々が認識
しているように、現在実際に工場で働いている
ロボットの大半はかなり伝統的な制御理論技
法に基づいたものであり、AIがロボティクスに
対して影響力をもつようになったのはつい最近の
ことにすぎない。その影響力は、われわれが高
度な感覚・運動装置の開発面で遂げつつある進
歩に依存しているが、その進歩はこれまでのと
ころ、きわめて遅々としたものにすぎない。

われわれは人間が自然言語を処理する方法に

ついて多くのことを理解しており、また、種々の、いまだ制限があるとはいえ本物の、自然言語能力を利用したシステムをますます数多く応用に供し始めている。

自然言語についての研究の進歩を阻んでいる大きな問題は、言語トランスレータ（すなわち、ある言語から別の言語へ、非言語対象から言語へ、言語から非言語表現へという変換を行なうことのできるシステム）が、翻訳対象の内容についての大量の意味論的知識をもたねばならないことである。過去30年間の数多くの実験が実証しているように、統語論だけでは十分ではないのである。いくら高度の統語論を備えたシステムでもほんのわずかの前進しかもたらさない。より応用範囲の広いシステムへと歩を進めるためには、膨大な量の意味を取り込むことを真剣に考えなければならない。

将来

認知科学の現状についての以上のごく手短なスケッチは、私が最前線の研究成果を基に提示しようとしている将来像の基礎をなすものであり、また、これによって、将来の展望についての話をかなり簡潔なものにすることができるだろう。

ここではまず、私が重要なものとみなしている分野について述べてみたい。次に、ソフトウェアおよびハードウェア支援システムのニーズ、および、そうしたニーズに応えうる可能性について述べてみたい。すでにおわかりのとおり、並列処理についての私の見解はこの会議で提示された一部の見解とはかなり異なっているようである。さらにまた、話を進めるにつれておわかりになるだろうが、論理型プログラミングについての私の見解もまたこの会議で提示されたおおかたの見解とはかなり異なっている。そういうわけで、私を救いようのない反動主義者として糾弾する前に、どうか、私がそうした立場をとる理由に注意深く耳を傾けていただきたい。

そうすれば、私の立場についての知的な討議ができるはずである。

認知科学の進歩にとって重要な領域

まず、いくつかの課題分野、および、われわれの進むべき方向について述べてみたい。ここで再びロボティクス、言語、エキスパート・システム、学習、ならびに表現について触れるが、表現以外のものについてはすでに私の主張の要点を述べてあるので、これらについてはごく手短かに論じるにとどめる。

ロボティクス

ロボティクスに関する今後10年間にわたる近未来のおもなポイントは、ロボティクス・システムのための適切なセンサと適切なエフェクタの開発、および、こうしたセンサからの適切なフィードバック、すなわち、ロボットからプランニング・システムへの適切なフィードバックに重点を置かなければならなくなるという点である。そうすることで、プランニング・システムは、それが置かれた実際の環境に自己の思考を再適応させることができるようになる。プランニング・システムが定期的に現実の環境に再適応できるようになるのである。

これには、大変な努力を要する綿密な研究が極めて大量に必要である。私は、魔法のようなブレイクスルーは予想していない。そういうブレイクスルーが生まれるならむしろ嬉しいが、どの方面からそうしたブレイクスルーが生まれる可能性があるのか、私にはわからない。私の水晶球には、ロボティクスのブレイクスルーは映っていない。

この方面では、コネクショニズムが重要な役割を果たす可能性がある。コネクショニズムは明らかに感覚の領域に属しており、コネクショニスト的な並列処理能力、あるいはその他の種類の並列処理能力を直ちにあるいは近未来に利用できる公算はきわめて高い。心理学からもたらされた証拠が明白に示すところでは、人間の

ほとんどの高度精神機能、つまり、中枢神経系の新皮質で行われる思考は、一度に一つずつという逐次的な形で行われている。すべてが、注意（アテンション）という隘路を順次通過するのである。

もしこのことをまだ疑っている方は、次のような実験を注意深くやってみるとよい。友人の運転する車に乗って東京の街中を走りながら、友人と会話をし、交通が混雑するにつれて会話がどうなるかを確かめてみるのだ。きっと、友人は運転を優先して、会話は二の次になることだろう。人間は、注意を必要とする複数のタスクを同時にこなしたりはしない。人間は逐次型システムなのである。

また、これと同様、心理学の実験データから明らかなように、目と耳、そして目と耳ほどではないにしろ運動系は（私はこれら周辺器官をいわゆる「より高度な知的プロセス」と区別しているわけだが）、実際のところ、並列処理器官である。そしてコネクショニストの研究努力がおもに集中されるべきはこの方面であると私はみている。一部のコネクショニストは、すべての認知問題は、別個の記号レベル(symbolic level)を必要とせずに、かれらのモデルによって扱うことができると考えている。確かにそうかもしれないが、短期的な観点から言えば、有効な感覚器官とある程度は運動器官をシミュレートしたほうがはるかに役に立つ研究ができるのではなからうか。

ロボティクスには感覚系や運動系以外のものも必要である。思考/プランニング・システムをそれらに結合する必要があるのだ。そのための基本的な機器や機構は、問題解決に関する研究から生まれたSTRIPSなどのような古いシステムにおいても整っている。しかし、もっと多くの注意を払われる必要がありながら、まだやっと注意が払われ始めたばかりの問題は、「外界についてのきわめておおまかで不正確なモデ

ルを用いたプランニング・システムが、現実の世界で生き延びて活動しなければならないロボットをどうやって誘導するのか」という問題である。したがって、われわれは、プランニング・モデルの矯正とフィードバックという問題を解決する必要がある。

言語

言語に関しては、意味論というテーマを押し進める必要があるということを手で述べた。ダグラス・レナートとテキサス〔MCC〕の共同研究者たちは、言語理解および翻訳システムへの知識付与およびその誘導における意味論的知識の利用をテストするのに用いることのできるエンサイクロペディア的規模をもった情報ベースを設けることに取り組んでいる。大規模エキスパート・システムや、プロダクション・システム、データベース・アーキテクチャなどについての既知の知識によって誘導されるこの種の企てがもっと多く行われることを私は予想し、また期待もしている。

言語研究のそうした側面を押し進めるために何らかの根本的に新しい概念を考え出す必要があるにしても、それがどういうものかは私にははっきりとはわからない。確実に言えるのは、新しい概念は研究の進展につれて生まれてくるということである。知的な経験的研究は、つねに、新しい概念を生み出す。しかし、いま現在そして近い将来に必要なことは、データベースによって大規模の（つまり、何百万項目という真に大規模の）実験を行うことである。

言語処理に対してこうしたアプローチをとる場合には、高速計算処理で必要とされる以上に巨大で効果的なメモリがおそらく必要だろう。人間の中枢神経系における真の並列能力は記憶能力であって、並列処理能力ではないのである。

エキスパート・システム

エキスパート・システムを重視する必要性に関しては取り立てて言うべきことは何もない。

エキスパート・システムは、私が論じているもっと基本的な諸分野の研究の副産物として、研究に伴って発展して行くだろう。

学習

学習に関して言えば、現在の学習研究には2つないし3つのおもな焦点がある。最も有望と思われる2つについてはすでに触れた。1つは、視覚/聴覚パターン学習に関するコネクショニスト研究である。もう1つは、例題から学習する適応的プロダクション・システムである。これらが、学習プログラムのすべての問題、人間の脳が成績を向上させるために用いるメカニズムの全域をカバーするものでないことは確かである。しかし、これらが最も重要な部類に属するものであることは確かなようだ。われわれはいまや、これらについては十分に理解しているので、こうした研究はかなり急速に進むだろう。

多くの選択肢はあるもののさほどはっきりした証拠はつかめていない非常に興味深い問題は、学習を行うべきか、新しい知識をエキスパート・システムに付与するための望ましい方法としてのプログラミングをいつ行うべきかという問題である。むろん、われわれは人間は、知識すべてを学習によって身に付けているが、それはひょっとすると単にデフォルトによるものかもしれない。箱を開けてその中にプログラムを入れる方法は誰も知らない。それは、いい大学へ行くよりもずっと効率的なことかもしれないが、われわれはその方法を知らないのである。

コンピュータの場合には選択肢がある。コンピュータのプログラミングを試みることもできるし、あるいは、コンピュータに学習をさせようと試みることもできる。コンピュータのための学習プログラムに関心がある場合に練習問題として問うことのできる興味深い問題は、「われわれは実際、もし可能なら、人間に教える代わりに人間をプログラムしようとするだろう

か」というものである。コンピュータによる学習の目的は非常にきびしく選択すべきであろう。プログラミングに際してのもっとよい方法がすでにあるのかもしれない。

この疑問が話のごく一部にすぎないのは確かだが、コンピュータへの学習の応用に関する大規模の研究プロジェクトに取り組む前に問うだけの価値のある疑問である。

表現

さらにまた、重要で難しいトピックスとして、表現の問題がある。情報は、それを処理しようとするなら、抽象的な概念の世界から取り出す必要がある。情報は、何らかの具体的な表現形式を与えることによって、コンピュータや脳によって処理できる形にしなければならない。コンピュータの場合には何らかの電磁気パターン、脳の場合には何らかの神経活動パターンにしなければならない。

現在、コンピュータ処理で使用されている代表的な表現は、リスト構造である。これはスキーマでもスクリプトでもフレームでも、何でも好きに呼んで構わないが、私は「スキーマ」と呼びたい。これらの表現形式はいずれも、命題を述べるのに適している。あるいは、あたかも命題を述べているように見せることができる。しかし、心理学実験の多くのデータが示すところでは、人間は思考活動の大部分において、絵や図解的構造(diagramlike structures)を優先的な表現として用いているのである。われわれは言葉では考えない。アインシュタインはいつもこう主張していた。真剣に考えるときは、言葉ではなく、何らかの、かなり抽象的ではあるにせよ、絵のような構造で考える、と。われわれはこうした非命題的表現の何たるかや、命題を述べる以外の方法で情報を表現する方法、および、こうした表現をコンピュータ・システムで実現して認知研究のためにシミュレートする方法の研究に今まさに取り掛かろうとしている

ところである。

この線に沿った初期の研究で、いまだにそれを真に凌ぐものがないものとして、ノバックのISAACプログラムに触れておこう。確か1977年にIJCAI会議で発表されたこのプログラムは、言葉で述べられた物理の問題を理解し、その問題の方程式を書いてそれを解くというものである。しかしISAACは、言葉を統語論的に直接、方程式に翻訳することによってそれを行うのではない。ISAACは、言葉を、コンピュータに貯えられた図解の構造に翻訳することによってそれを行うのである。それが図解的であるとわかるのは、図解をISAACによってCRT上に描くことができるからである。構造を解釈して、シーンの図解として表示できるのである。次に、そうした図解を用いて方程式が立てられる。ISAACが用いるプロセスは、プリミティブではあるにせよ、抽象的な命題や方程式のみを利用するシステムと比較して、言葉で提示された問題、あるいは現実の世界で遭遇する問題を解決する際にわれわれ人間が用いるプロセスにはるかによく似ている。

うまく表現された問題は半分解決したも同然と言われることがある。これは言い過ぎかもしれない。うまく表現されてもお解決できない問題はたくさんある。フェルマーの大定理がそのいい例である。ジョン・マッカーシーによってAIに導入された不完全なチェッカー盤の問題（対角をなす2つのマス目を取り除いたチェッカー盤を、マス目2つ分の大きさのドミノで覆い尽くすという問題）は、人間にとってはきわめて難しい問題である。コンピュータは、何千通りのうちのほんの数十通りという可能なすべての覆い方を試してみることによって、ごく短時間にこの問題を徹底的に解いてみせる。人間はそんな解き方はしない。人間は、表現方法を変えることによってそれを解くのである。人間はしばらくするとチェッカー盤自体を無視

して、それを黒のマス目の数と白のマス目の数とドミノの数という抽象的な表現に置き換える。こうすると、問題は非常にやさしくなるのである。

したがって、解決できるか否かが適切な表現を見つけられるかどうかにかかっている問題もあるわけである。そしてその表現は、この例ではそうであるにしろ、必ずしも命題的表現ではないのである。

表現の問題については最後にまた触れるとして、差し当ってまず、今まで述べてきたような構造を設けるのに必要なソフトとハード両方の支援システムについて述べておこう。これを、4つの基本的な問題の面から述べてみよう。

逐次システムと並列システム

まず、逐次/並列アーキテクチャ問題についてももう少し述べてみたい。また、それに関連してコネクショニズムについても述べたい。さらに、論理プログラミング、ならびに、今紹介した非言語表現について述べてみたい。

それでは、逐次対並列の問題を、前に述べたよりももっと幅広い観点から眺めてみることにしよう。言うまでもなく、人間の脳はニューロンの膨大なネットワークである。一説によれば、ニューロンは 10^{12} くらいあるという。数は問題ではないが、非常に多数であることは確かである。それだけの数のニューロンが存在しているからには、知能には並列処理が必要であるにちがいないと考えるのはきわめて自然なことである。そうでないなら、きわめて並列的に見えるこの膨大なプロセッサを自然がどうして作り出したりするはずがあらうか。

しかし、問題はそれほど単純ではない。第1に、コンピュータにしても、つねに並列的な装置だったのである。ノイマン型コンピュータは、それが有している膨大な量のメモリを並列として含めるなら、非常に並列的な装置である。メモリはすべて、情報を並列に保持しているので

ある。実際のところ、メモリはコンピュータの静的なコンポーネント、もしくは比較的静的なコンポーネントである。しかしおそらく、人間の脳の並列コンポーネントもまた、だいたいでいて静的である。その大部分に関しては、どんな役割を果たしているのかについての神経学的な証拠はまったく揃っていない。

第2に、前に指摘したように、人間の思考プロセスは注意の隘路を内包しており、これは一度に扱うことのできる概念の数をきびしく制限している。人間の神経系はまた、コンピュータに比べてきわめて緩慢なシステムである。通りをこっちに歩いて来る人物が親友であると認めるといふ単純な認知行為にさえ1秒近くかかるのである。

脳の緩慢さと逐次性は、問題解決や言語理解といった活動を汎用逐次型コンピュータを利用してかなり詳細にシミュレートすることを可能にしている。また、シミュレーションを行った場合には、基本的な感覚的認知能力の行使を必要としないタスクにおいては、現代のコンピュータのほうが人間よりはるかに速やかに作動しうることは疑いない。

その一方、意識的思考が逐次的であることを実証できるとしても、視覚や聴覚が並列的であることを実証できるかどうかは、まだ判明していない。したがって、この逐次対並列論争に関して「どちらか一方」といった態度をとる必要はない。

「従来のノイマン型アーキテクチャを含む各種の逐次型マシンにも、将来のAI分野において存在の余地はあると私はみている。逐次型マシンは、今後ともコンピュータ分野で非常に重要なパートを担い続けるだろうが、われわれが問うべきは、並列処理のもつ特別な任務とは何かである。それがどういうものであると私が考えているかは、すでに述べた。まだ述べていないことは、適切な種類の並列ハードウェアとは

いかなるものであるか。むろん、その答えがわかっているならば、私はどこかで並列型マシンを設計しているはずだが、皆さんの多くは、その正解を見つけ出すために賢明に努力しているはずである。

それを試みたことのある人なら誰も、正確に定義されたある特殊タスクを扱うようにハードが特別に設計されている場合を除き、計算において大規模な並列処理を実現することはきわめて困難であると証言するだろう。アレイ（きわめて均質なアレイ）を扱う場合なら、アレイ・プロセッサによって並列で非常に速やかに且つ効率的な処理ができるだろう。

しかし、ILLIAC IVとその先行モデルおよび後継モデルに遡る汎用並列プロセッサは、先行要件がハードの設計に非常によくマッチしているタスクを除き、プログラミングがきわめて困難であることが判明している。また、現在作られているハードの場合、ハードにあまりよくマッチしていないタスクに用いると、30のプロセッサを用いても3倍～5倍のスピードアップが関の山である。

汎用並列処理を一気に有望（フィージブル）なものにする賢いアイデアを誰かが考案するはずだと予想する根拠はない。その困難さは表面的なものではなく、根本的なものである。並列処理はコンピュータで処理しようとするタスクの先行要件によって制約される。タスク間にはほとんど関連がない場合には、並列処理を大規模に用いることができる。タスク間に関連がない場合には、部屋に50台のコンピュータを置いてそれぞれに別々のタスクを与えることによって、並列処理を達成できるのである。それもまた並列処理である。われわれはそうした問題の解決法はわかっている。

しかし、タスク間に緊密でかっちりとした関連性があり、また先行関係が困難である場合には、並列マシンをその種のタスクにまさにふさ

わしい形に適用させない限り、並列マシンの潜在能力の大部分は生かされないままになってしまうのである。

すでにご存じの方もいるだろうし、今週中にお聞きになる方もいるだろうが、NQで512のプロセッサを用いたフェルトン、とオットーのきわめて並列的なチェス・プログラムについての説明は非常に興味深い。実に巧妙なこのプログラムも、私が述べてきたことの例に漏れない。かれらの論文を丹念に読めば、チェス・タスクの特殊な要件を考慮に入れて512のプロセッサ・マシンから40%の効率(非常に高水準の効率)を引き出すことがいかに大変だったかがわかるだろう。サブタスクのそれぞれの実行にかなり秒数がかかる場合には、それが精一杯である。それぞれのサブタスクの実行に数分かかる場合には、マシンの活用度は大いに高まる。非常に短時間のタスクや非常に迅速なタスクの入れ代わりを扱う場合には、活用度は急激に落ちるのである。それは、非常に高度なソフトを用いた場合ですらも、並列処理につきものの問題である。

他のところでは私は、自然の構造、つまり、自然界に見出されるような複雑な構造が、なぜ主として階層構造(ヒエラルキー)へと(すなわち、原子が分子を形成し、分子が高分子を形成し、高分子が細胞を形成しといった具合に)進化を遂げているのかについての推測を述べたことがある。なぜこうした階層構造があるのだろうか。階層構造が複雑なシステムの最適形態であるように思われるというこの進化の教えは、設計者やコンピュータ・アーキテクトが詳しく調べて模倣することを検討してよいものである。

むしろ、メモリの階層的組織化についての経験はすでにかなり積まれているが、アクティブ・プロセッサの階層構造についてはそれほど経験がない。

私が引き出そうとしている結論は、「われわ

れは今後も並列処理を目指して前進を続けるだろうが、しかしおそらく、汎用並列マシンが「一気に成功を収めることはないだろう」というものである。実際のところ、視覚などのような精神機能面の特定用途向けに設計された並列アーキテクチャは、より急速に進歩して、汎用の大規模の並列処理の試みよりも満足の行くレベルに到達する可能性がある。

しかしその一方、脳が実際にどのように機能しているのか、また、脳のどの部分を実際に並列的なのかといったことについてもっとよくわかるまでは、階層的システムの設計にいままで以上の関心が寄せられてしかるべきである。

並列処理の一形態としてのコネクショニスト・システムが感覚系や運動系のモデリングに際して大きな役割を果たすであろうと考える理由についてはすでに述べた。ここで再度尋ねたいが、そうしたコネクショニスト・システムを単一のレベルで作動させようとする代わりに、どの段階においてより階層的な形式に組み入れる必要があるだろうか。

自然全体にわたって階層構造が観察されるという理由から、私は、精神が複数のレベルに配置されており、その1つにニューロン組織のレベルにあって、こうしたニューロン・システムはさらにまた、その上のレベルの記号的システムのプリミティブな構造と作用素(operators)を具現化(implement)していると考えている。

結局のところ、研究とは既知の探求ではなく未知の探求である。研究プログラムに関する限り、百花斉放というのが好ましい方針である。コネクショニストの研究方向も記号的な研究方向もきわめて有望なものであり、それらそれぞれの応用可能性の範囲の間にきっちりとした境界線を引く緊急の必要は今のところまったくない。とはいえ、とりわけコネクショニストは感覚刺激の処理の問題に優先的に取り組むことを奨励されるべきである。

論理型プログラミング

では次に、論理型プログラミングについて述べてみよう。コンピュータ計算と論理的推論の間のアナロジーは、長く興味深い歴史をもっている。むしろ実際には、論理的推論のほうが先で、コンピュータ計算があとである。まずアリストテレスが人間の推論についての論理をモデル化し、チューリングがそれを計算機でモデル化したわけである。

さて、論理型プログラミング言語の一例、あくまでも一例として、PROLOGという具体的な題材を取り上げてみよう。論理プログラミングの背後にある概念は、一言で言えば「推論は論理的であるべきだ」というものである。誰がこれを否定できようか。しかしそれを今私がここで否定してみせようというのである。これは「プログラミング言語は論理から、論理を有効で正確な推論の形式にしている原理と洞察を取り入れるべきである」という概念である。いかなる推論システムの根底にも原理があるが、これは宣言的形式のこともあれば、手続き的形式のこともある。宣言的なものは公理と呼ばれ、手続き的なものは推論規則と呼ばれる。

形式論理は、公理も推論規則も、ともに内容とは無関係であるべきであるという理想をつねに抱いてきた。すなわち、公理や推論規則は分析的ないし同語反復的であるべきであり、ありうべきすべての世界に関して妥当な結果をもたらすべきであるというのである。そうであれば、論理を思考の特定の領域に適用する場合には、補足的な公理（領域特有の公理）を付与することによって、その領域に関して判明していることが規定される。

しかも、形式論理はつねに、推論の正確さの問題と密接に関連してきた。論理をもったシステムは通例、物事が正しいことを確認できるように作られている。これは第1に、先ほど述べたように、論理的公理を領域特有の公理から切

り離すことによって、そして第2に、推論規則の使用を制限することによって達成される。ホワイトヘッドとラッセルは、推論規則よりもむしろ公理を用いることにより、単に三段論法と置換だけを用い、他の推論規則はなしでやってきたわけである。

こうした原理への固執の代償は実に大きなものである。推論は小刻みにしか進まず、ごく単純な証明にすら膨大な数のステップが必要とされる。このことは、コンピュータによる定理証明をみれば明らかである。この分野の歩みがかくも緩慢なのはなぜか。それは、エネルギーのすべてを公理につき込み、ごく限られた範囲の推論規則、通例は何らかの種類の導出原理しか用いてこなかったからである。

コンピュータによる定理の自動証明の進歩が緩慢で一部の人間にとって期待を裏切るものとなっているのは、他の可能性を犠牲にしてしまで論理の原理に固執していることの代償である。初期の定理証明プログラムの作成者は、等価性(equality)、交換可能性(commutativity)、推移性(transitivity)といった明白な推論手続きを渋々認めたにすぎない。最も初期の定理証明計画は、実際にはこうした推論手続きを公理化し、やろうと企てた本来の仕事をする代わりに等価性や交換可能性の証明にすべての時間を費やしたのである。導出やその派生物といった推論の単一規則は、PROLOGにおけるホーン節の場合のように、複数規則を用いたシステムよりも依然として一般に好まれている。

心理学の実験や日常の場面で人間の推論を吟味してみると、論理学者の方法とはかなり異なる方法で推論が進められていることがわかる。ほんの2、3の推論手続きではなく、多くの推論手続きが用いられており、また、これらはすべて論理的な規則であるわけではなく、一般に、重要な領域特有の知識が取り入れられている。優秀な学生が運動学の問題を解く様子を眺めて

みると、等加速度の法則は公理として用いられているのではなく、たとえば時間と加速度から距離を推論するための計算手続きとして用いられている。こうした場面における人間のプロセスは、宣言的知識をほとんど用いなくてもプロダクション・システムによって容易にモデル化される。すなわち、論理プログラミングを誘導する原理とはほとんど反対である。

人間の推論は、多くの目的に役立つ切っ掛けである。それは、確認よりも発見のためにずっと多く用いられる。そして、発見には往々ヒューリスティックな探索が必要である。しばしば完全性や、妥当性の保証を犠牲にした、大きな飛躍が必要である。そうした保証の欠如はけっしてよいことではない。問題を解決すると同時に、システムの完全性や、各ステップの妥当性の保証が確保できるのであれば、それに越したことはないだろう。

しかし、そうしたことは、完全性や正しさの保証がほとんどつねに計算上実現不可能、到達不可能である世界に生きていることの代償である。最終的に答えが見つかることが保証されるよりも、時々にしる答えが見つかるほうがましである - その「最終的」というのが自分が死んだずっとあとであるくらいなら。間違っただけのステップを踏む危険を最初から避けるよりも、候補を見つけてからチェックするほうがましである。

いま私が述べた原則は、論理の法則ではない。それは人間の経験から得られた経験的通則である。日常生活の大部分の場面においては、人間の推論は、経験則を用いたヒューリスティックな探索であり、またそうでなければならない。有効な推論規則、あるいは必ずしも正しいとは限らない脆弱な推論規則であれ、それを探索に組み入れるなら、許容可能な時間で目標に到達する公算が大きくなる。

むろん、論理型プログラミングをまさにこの

通りの考え方に沿って行うことができない理由は原則的にはない。それはちょうど、PROLOGのような言語がチューリング機械と同等なものに拡張できない理由がないのと同じである。形式的な特性をすべて捨て去り、カット(cut)を自由に利用し、あらゆる種類の補助機能をPROLOGに付け加えることによって、PROLOGやその他どんなプログラミング言語にもあらゆることを行わせることができる。しかし、もし論理プログラミング言語をその設計精神に沿ってプログラムするならば - もし論理プログラミングの原理に従うならば、論理プログラミングはそれ独自の根拠とそれを選択する論拠を失うことになる。

論理プログラミングを正当化する根本的理由とは裏腹に、宣言的ステートメントに代えて効果的な計算手続きを用いることが必要であり、また、縦型(深さ優先)後戻り探索に代えてフレキシブルな最良優先探索を用いる必要があるのである。

私が問題としているのはプログラミング言語ではなく、知能の根底にあってAIのための知的プログラミングの設計を誘導すべき中心的原理についての誤解である。そうした中心的原理の1つとして、「問題解決は結局のところヒューリスティックな探索である」という概念があるのである。

認知科学における最も古い問題の1つは、知識は宣言的に表現されるべきか、それとも手続き的に表現されるべきか、である。逐次/並列の場合と同様、その答えは「両方」である。世界についてのわれわれの知識の多くが宣言的な形式で貯蔵されていると考える理由は十分あるにしろ、それと同じくらい多くが手続き的に貯蔵されているのである。知能のすべてを、またはほとんどすべてをこれらの表現形式のいずれか一方で表現するという提案、さらに付け加えれば、その両方で表現するという提案すら、わ

れわれは疑問視する必要がある。

というのも、これらの種類の知識のバランスをとるべきであるという訴えの中で、私はまだ「宣言的表現」の意味を厳密に述べていないからである。私はそれを「命題的表現」と同一視するつもりはない。前に述べたような図解的・絵画的表現もそこに含めたいのである。なぜなら、リスト構造メモリは命題のみに使用できるだけでなく、図解と計算上等価な表現を作り出すことにも使用できるからである。これに関しては再度ノバックの研究を、あるいは、なぜ図解が1万語以上の価値をもつ場合があるのかについて、ラーキンと私が1986年に“Cognitive Science”に発表した論文を挙げておく。

人間の推論の多くが絵画的・図解的な心的表象および外的表象を用いているというのが真実であるなら（その可能性は大きいと思われるが）、そうした表象を具現化(implement)するためのコンピュータのハードやソフトの研究は大きな価値をもつだろう。現在進められている研究ではこのことが比較的ないがしろにされているように思われる。むしろ、CADに関連してこの種の研究活動がかなり行われてはいる。しかし私の知る限り、AIや認知科学の研究とは密接に結び付けられていない。より密接に結び付けることによって、宣言的ではあるが明白に命題的ではない知識を表現する方法についての非常に興味深く有用な概念がもたらされうだろう。

結論

AIと認知科学の研究が始まった当初から、研究者は、楽観的すぎるとの非難を受けてきた。その不可能性をアブリアリに確信している悲観論者たちは、AIの研究者は熱心すぎると非難している。私はむしろ、楽観的であってよかったと思っている。楽観なしにはいかなる分野も前進しないのである。

過去35年間の認知科学やAIのように大幅か

つ急速に前進している分野においては、楽観論を表明するのをもっともなことだろう。人間の知能と機械知能の両方についてのわれわれの理解はいまや相当のレベルに達しており、しかも急速なペースで広さと深さを増し続けている。コンピュータ・プログラムによって表現できる知能の種類に制限があるとしても、そうした制限は今のところまだ明白にはなっていない。

まさしくブレークスルーと呼べるものが出てこない限りさらに前進することはできないという疑念を先ほど来表明してきたとはいえ、私は、重要な新しい概念や大きな前進をもたらす研究の可能性には疑問を抱いていない。

われわれ人間は、何世紀も前から4つの大きな疑問に魅せられてきた。第1に、物質の水質の問題、すなわち、物質とは何なのか、物質からどのようにして世界が作り出されるのかという、高エネルギー物理学が研究している問題。第2に、現在、天体物理学を通じて探求されている宇宙の起源の問題、すなわちビッグバンや、ビッグバンの前はどうなっていたかという問題。第3に、生命の本質の問題。これは、現在、分子生物学によって大きな前進を遂げている。そして第4に、物質からの精神の出現、すなわち、心身問題である。マービン・ミンスキーが「肉機械」と呼ぶ脳のような物質が、どうやって思考を行うことができるのか。金属とガラスでできたコンピュータのような物質が、どうやって思考を行うことができるのか。

コンピュータが現在のように一般的物理記号システム(general physical symbol system)として認識されるまでは、知能と精神の本質を調べるためのツールはないも同然だった。この部屋にいるわれわれは、このパワフルなツールを研究に役立てることのできる時代に生まれた幸運な世代である。

コンピュータの知能を人間自信の知能と組み合わせることにより、われわれはコンピュータ

と人間の両方の精神に関する、より完全な明確な概念に向かってこれからも急速に前進し続けるであろう。