

## 解説

## 人工知能研究の展望\*

田 中 幸 吉\*\*

## 1. 人工知能研究の歴史とその経緯

「人工知能とは何ぞや」という問に対し、一義的かつ適確な答を出すことは極めて難しい。強いて言えば「人間の知的活動を機械(計算機)で代行すること」といったような漠然としたものになる。

人工知能の誕生は Turing, A. M. の Intelligent Machinery<sup>1)</sup>に求めることができるであろうが、1950年代の半ばまでは、人工知能の研究はいわば思索の域をでなかったといえる。計算機が進歩して複雑な仕事を十分に能力を持つに至った1950年代後半から、前述の意味での人工知能の研究が開始されたものとみなされよう。MITでリスト処理用の計算機言語LISPが1960年 McCarthy, J.<sup>2)</sup>によって作られた。LISPによって数値だけでなく記号をも取扱うことが容易になった。MITの人工知能研究のリーダー Minsky, M. の論文<sup>3)</sup>“Steps toward Artificial Intelligence”(1961)はこの時代の人工知能研究に力強い推進力を与えた。

1964年頃から言語を理解する研究が始まり、高校生の数学の問題を理解して解くプログラム“STUDENT”<sup>4)</sup>が作られた。またその頃から物体認識<sup>5)</sup>、知能ロボット<sup>6)</sup>の研究も開始された。

最近人間のもっている日常的な知識、常識、対象世界ごとの専門的知識などを、いかなる形式によって計算機の中に表現し、かつ又いかに旨く使うかを中心とした知識表現の研究<sup>7)</sup>が盛んになった。

このような発展の歴史を辿ると随分沢山の理論的または実験的な研究、提案がなされているが、実用の域に達した、あるいは達しつつある応用的研究成果として DENDRAL<sup>8)</sup>、MYCIN<sup>9)</sup>、MACSYMA<sup>10)</sup>などのシステムが有名である。

以上が人工知能研究の極めて粗い発展の経緯であ

る。次に人工知能の研究課題を分類し、それぞれにつき簡単な注釈をつける。

## 1.1 問題解決

人工知能研究の主テーマの1つは、行動とその結果に関する常識的な計画立案法の探究である。それがプログラムとして計算機上で動作すれば、自動問題解決法(Automatic Problem Solver)とよばれる。要するに問題解決の研究テーマは、ある問題領域(Problem Domain; World)における初期状態から最終目標(Goal)に遷移する行動(Action; Operator)の系列を見出すことである。

木探索アルゴリズムが古くから研究されているが、現実の問題では木構造モデルが木探索に対し必要なすべての情報を獲得できるとは限らない。Hart, P. E. 等の提案した A\*<sup>11)</sup>(1968)は外から与えられたある種の意味情報を利用して探索効率を上げる一方法を与えた。

一階述語論理を用いた定理証明は、Robinson, J. A. (1965)の導出原理による推論法<sup>12)</sup>(Resolution Inference Principle)以来大変進歩したが、定理証明法(Theorem Proving)を問題解決に使用しても探索空間の組み合わせ数学的拡大は逃れえない。莫大な量の一般的知識から適切な事実を公理として選択する有効な手段を見出すことが課題である。

GPS (General Problem Solver)<sup>13)</sup>は発見的探索法(Heuristic Search)と Rote Learning Scheme (前に計算された結果の想起)の研究のきっかけを作った。GPSは A\* 型の探索と違って手段-目標解析法(Means-Ends Analysis)を用いている。手段-目標解析法における問題点は、どの部分解が目標到達により近いかを見出すのに有効な一般的手法が明確でないことである。つまり当面の問題領域に関するある程度の知識、例えば差異の重要性の順位(Ordering of the Importance or Difficulty of the Difference Types)とか、それぞれの差異の形式に適する行動の一覧表(List of

\* An Overview of Works on Artificial Intelligence by Kokichi TANAKA(Faculty of Engineering Science, Osaka University).

\*\* 大阪大学基礎工学部情報工学科

Relevant Operators) のような知識の獲得を必要とすることである。したがって GPS は真に興味ある問題解決には役立ってはいず、単に概念的な研究にとどまっているとさえよう。

Fikes, R. E., Nilsson, J. J. (1971) によって提案された STRIPS<sup>14)</sup> は、手段-目標解析に述語論理を用いた定理証明法の利点を併用したものである。その後 STRIPS システムは 2, 3 の改良が加えられ、モニター能力を付加して行動計画の構造 (Structure of Plan) を理解し、行動結果の予測が可能になった (Fikes, R. E., 1972)。

これらの問題を考える場合、知識表現 (Knowledge Representation) の問題が提起される。すなわち対象世界について知っている事実 (初期知識) から目標への道を推論 (Deduction) するのに便利な表現法 (Epistemologically Adequate Representation) と、行動を起すのに便利な表現法 (Heuristically Adequate Representation) がある。述語論理的表現だけでは発見的探索に適當ではない。つまり状態ベクトル形式の表現だけでは表わしきれない。そのため新しいプログラム言語として QA 4 (Rulifson, J. F., 1970)<sup>15)</sup>、PLANNER (Hewitt, C., 1972)<sup>16)</sup>、CONNIVER (McDermott, D. V., 1972)<sup>17)</sup>、SAIL (Feldman, J. A., 1972)<sup>18)</sup>、LISP-70<sup>19)</sup>、SIMULA (Ichibiah, J. D., 1972)<sup>20)</sup>、LINGOL (Pratt, V. R., 1973)<sup>21)</sup>、PLATON (Nagao, M., 1975)<sup>22)</sup>、PLASMA (Hewitt, C., 1975)<sup>23)</sup>、AMORD (de Kleer, J., 1977)<sup>24)</sup> 等の人工知能用語が開発された。これらの言語の特徴は、(i) Automatic Backtracking, (ii) Pseudoparallel Process, (iii) Pattern-directed Invocation, (iv) Procedural Specification 等の能力に優れていることである。

ゲームの理論から発展してきた発見的探索アルゴリズムは木探索アルゴリズム、定理証明法と結合して、ゲームのみではなく、ロボティクスにおいても有用なことがわかってきた。このようにしてゲーム・プレイングやロボティクスで用いる戦略の自動作成は、いわゆるプログラムの自動作成に身近に感ずるようになってきた。

## 1.2 認 知

認知 (Cognition) は認識 (Recognition) によって知

識を獲得する知的プロセスを意味し、認識の受動的性格に対し、認知は能動的性格をもっている\*。

現在行われているパターン認識は、ある制限下において機械によって文字、図形、画像、物体等を見わけようという試みであるが、これはいわば単に「見えている」状態であって受動的、客観的なものであるが、「見る」という事は能動的、主観的であり、理解を伴わなければならない。したがって対象に関する知識が必要となる。最近 Image Understanding とか Speech Understanding という言葉が用いられているが、実は初期の物体認識における Huffman's Labelling Scheme<sup>25)</sup> なども、いわばある一種の知識の利用法である。

知識構造の記述には、述語論理は一般性に優れるが fact-oriented なため修正とか照合操作は苦手であるし、状態ベクトル表現は複雑な相互関係を取扱うのに不向きである。その中間的なものとして Relational Structure, Semantic Network のようなラベル付き有向グラフが有用である。画像理解のために用いられる AND/OR グラフなども machine Vision に関連した概念構造化の一形式である。

Minsky, M. は人間の Cognitive Process においてフレームとよぶデータ構造が重要な役割を果たしていることを指摘した<sup>26)</sup>。人が何かを認識したり、行動しようとするとき、直接の対象だけでなく、それに関連した色々な構造化された情報を想起しなければその物の状況を理解することはできない。このような構造化情報をフレーム (Frame) とよぶ。この考え方は言語処理だけでなく、知識表現のための 1 つの枠組みとして提案された。Bobrow, D. G. と Winograd, T. はこの理論を拡張した理論に基づく知識表現のためのプログラミング言語 KRL<sup>27)</sup> を開発した。

Newell, A., Simon, H. A. は人間の Cognitive Process のコンピュータ・シミュレーションによる研究を行った結果、人間のメモリ機能と認識プロセスを同時に記述するモデルとして Production System<sup>28)</sup> を提唱した。プロダクション・システムは心理学の刺激→反応理論の 1 つの拡張と考えられるプロダクションと呼ばれる Premise→Action の形式で書かれたルールの集合と、その上に定義された制御構造からなっている。これは宣言的知識を重視した問題解決手法とみなしうるものである。DENDRAL と MYCIN にはこのプロダクション・ルールによる表現が取り入れられている。

\* Webster's Third New International Dictionary によれば  
Cognition: An intellectual process by which knowledge is gained about perceptions or ideas.  
Recognition; To make out as or perceive to be something previously known.

Hewitt, C. の提案した Actor<sup>29)</sup> は互いに情報交換しながら同時並列に走るプロセスやエージェント (Agent: 非常に単純な行動単位) の行動モデルを記述するデータ構造の一種である。アクターの理論に基づくプログラム言語 PLASMA<sup>30)</sup> は、同時並列に走る多数のプロセスをインテリジェントなエージェントの階層構造とみたとき、並列処理を最も基本的な手段の1つとする分担、協力作業による問題解決手法を与えるものとみなしうる。小川、田中<sup>31)</sup> は Hewitt, C. のアクターのもつ機能の部分集合をもったプログラム・モジュール  $\mu$ -actor を LISP 上に表現し、算術文を処理するシステム、平面幾何学を処理するシステム、定理証明システムを作成した。これらのシステムにおいて  $\mu$ -actor は知識を表現し、またそれに基づいて処理を行う道具として使用され、知識の柔軟な利用を可能にした。日本語文の各単語 (又は論理式中の各述語) には  $\mu$ -actor が対応しており、それらの単語に関する統語的、意味的処理を行う。また定理証明システムでは  $\mu$ -actor 間のメッセージ転送をスケジューラによって制御し、擬似並列処理を行っている。

### 1.3 言語の解析・理解

言語は人間の知的活動と切り離せないものである。見掛上簡単な文章の理解に際しても、人間は極めて多様な豊富な情報を用いている。人間は言語構造についての広範な知識と意味伝達の方法を必要とするばかりではなく、その文章の現われる環境と事象自体についての文脈上の知識をも利用する。

われわれが言語を理解するプログラムを作る場合、極めて多量の知識を旨く処理する問題、複雑な認知機構の表現・記述方法、恐ろしく広範な可能性の中で適当なものを見出す方法等、人工知能の key problem に直面する。すなわち単語や句の意味は文脈 (その文章の係わる環境、知識) に基本的に依存し、意味は構文の決定に重要である。このような意味と構文の相互作用を可能にするプロセスを考えるためには、対象世界を限定して encyclopedia problem を単純化しなければならない。

MIT の Winograd, T. (1972) の行った積み木の世界の対話シミュレーション・プログラム<sup>32)</sup> は Syntactic Specialist, Clause Specialist, Semantic Specialist 等の Specialist Program の集合体である。各 Specialist は理解プロセスの特定の状況に依存しているから、その知識の表現・記述構造はそれぞれ異なる。例えば上記の例では、Syntax は木構造で表わされており、各

節点は Syntactic Feature とよばれる Descriptor と、各部分が構造内でどのように使用されるかを記述する関数をもっている。

この例からわかるように言語解析・理解システムには知識の表現・記述構造と推論・理解機構の研究が大きな課題としてクローズ・アップしてきた。

Woods, W. A. はプッシュ・ダウン・オートマトンを重複的、回帰的に用いることのできる言語解析システム ATN (Augmented Transaction Network) を提案した<sup>33)</sup>。知識は Semantic Network によって表現されており、推論は Production System を用いている。ATN は変形文法 (Transformational Grammar) の一変形にすぎないとの批判もあるが、ATN をさらに発展させ、構造解析の制御をより柔軟に強力にすると共に、日本語のように語順が自由にかえられるような言語に対しても旨く適用できるプログラミング言語として長尾は PLATON<sup>34)</sup> を作った。また電子総研の開発した拡張 LINGOL<sup>35)</sup> も ATN 文法とほぼ同じ能力をもつパーサーを道具として、日本語の解析を行っている。

Schank, R. C. は言語の意味を Conceptual Parser を用いて概念のネット・ワークをもって表現し、記憶構造に関連づけて Inference Program でもって推論が容易に行えるようにした。また逆に概念のネットワークから、それを表わす自然言語の文章を Sentence Generator で作り出すこともできる。このような概念構造はもとの言語と独立であるから、翻訳とか長文の要約などに応用することができる。この Conceptual Dependency Theory<sup>36)</sup> を基盤として、新聞記事を理解する試みがエール大学で行われている。Schank の理論とそのプログラムは、人間の言語処理における Semantics の重要性と、その処理の可能性をオペレーショナルな形で示した点で評価される。

Winograd, T. の開発した SHRDLU<sup>37)</sup> は単独でなく連帯的な意味を形成する object-oriented な Semantic Network を用い、サブプログラムはすべて手続的な形式で書いてあるため、各サブシステムのもつ知識間の関係が明確になり、また宣言的な形式では得られない複雑な関係を記述することができる。

## 2. 人工知能研究成果の二、三

DENDRAL<sup>38)</sup> はスタンフォード大学の Feigenbaum, E. A., Buchanan, B. G., Lederberg, J. によって作られた質量分析データ (質量分析器と核磁気共鳴分析器

のデータ)から分子構造を発見的に求めるプログラムである。まず与えられた化学式に対応する可能な分子構造の中から、質量分析データと化学構造の安定性に関する事前知識から求められた禁止的構造を除去する。残った構造から質量分析データを予測(Systematic Conjecture of Hypotheses)し、それと実験データとを比較し、最もよく整合する構造を正しい構造と推論する(Heuristic Search, Rote Learning, and Deductive & Inductive Reasoning)。その能力はある種の有機物の同定において post-doctoral chemist より優る場合がある。DENDRAL はスタンフォード大学の化学者、他大学の仲間達により盛んに使用されている。

MYCIN<sup>40)</sup> はスタンフォード大学の Shortliffe, E., Buchanan, B. G., Davis, R. によって作られた血液伝染病と脳膜炎の診断と投薬治療のシステムであり、米国で実用の域に達したシステムとして医者の間で高く評価されている。このシステムは Production System の考え方による問題解決プログラムである。すなわち、医学知識から、いくつかの規則を抽出し、それを基にして病名を推定し、投薬プランを作る。その規則は、

IF <Conjunctive Clause> THEN <Implication>  
の形式で、例えば次のようである。

IF the infection type is primary-bacteremia, the  
suspected entry point is the gastrointestinal  
tract, and the site of the culture is one of  
the sterile sites,

THEN there is evidence that the organism is  
bacteroides.

推論過程には基本的なプロダクション・ルールに Plausible Reasoning が併用されており、AND/OR ツリーのノード (Conclusion Node) に Certainty Factor, ブランチ (Premise Branch) 上に Attenuation Factor が付記されている。MYCIN の推論機構を用いて肺機能診断システム PUFF<sup>40)</sup> が開発されつつある。PUFF の診断結果は専門家のその 90% であると報告されている。

MACSYMA<sup>41)</sup> は MIT の Moses, J. 等によって作成された数式の (数値的ではなく記号的に) 処理を行う大規模プログラムである。例えば  $\int dx/(a+bx)$  が与えられると、このプログラムにより  $\log(a+bx)/b$  が結果として示される。MACSYMA の外にも Slagle's SAINT (Symbolic Automatic INTEGRator)<sup>42)</sup>, SIN (Symbolic INTEGRator)<sup>43)</sup>, MATHLAB<sup>44)</sup> 等の記号積分法のプログラムがある。

初期の機械翻訳の研究の失敗は discourse の domain を理解する必要がないと仮定したことにあるが、Bobrow's STUDENT (1964)<sup>4)</sup> は semantic approach の最初の成功例である。例えば、

Tom has twice as many fish as Mary has guppies.  
If Mary has 3 guppies, what is the number of  
fish Tom has?

のような英文で記述された算数の問題を解くプログラムである。このプログラムは複雑な英文を数個の核文章に分解し、核文章を LISP で表現した式に変換して解くものであり、fish とか guppy という単語の意味を理解する必要はない。その後、米国では機械翻訳の研究は打切られていたが、仏、独等では着実に研究されてきた。数年前からモンリオール大学では英語から仏語への機械翻訳が研究されているが、最近 ME-TEO<sup>45)</sup> という天気予報の英語から仏語への翻訳システムを発表した。また米国バージニア州にある Xonics 社で開発された XONICS MT System<sup>46)</sup> は、露語、チェコ語、セルビア語から英語への翻訳システムである。

ELIZA<sup>47)</sup> は MIT の Weizenbaum, J. の作った精神分析用の自然言語質問応答システムとして有名である。まず入力文中の最重要キーワードの同定、キーワードに関する最小文脈の同定、キーワードに依存する適当な変換則の選択 (SLIP 関数) により入力文が分析され、応答は選択された変換則に基づく再構成によって生成される。キーワードとそれに関する変換則は SCRIPT を構成する。ELIZA は SCRIPT をデータとみなし (プログラム自身ではないので)、認識パターンとか応答文に制限されず、従って英語に限らず独語でも仏語でも、その SCRIPT は存在するという特徴をもっている。

その他、知能ロボットとして、MIT の Hand-Eye-System, スタンフォード大学のブロック積上げロボット<sup>48)</sup>, SRI の Robot Vehicle<sup>49)</sup>, NASA-JPL の Mars Robot<sup>50)</sup>, 特に電子技術総合研究所、日立中央研究所等におけるわが国の知能ロボット研究<sup>51)</sup>は特筆すべき成果である。

### 3. 今後の動向と技術的課題

人工知能の研究が過去 15~20 年の間に積み上げてきた成果は、以上述べたように極めて大きいものがある。さらにその直接的成果もさることながら、技術波及効果にも期待するところが大きい。それにもかか

ならず人工知能研究にとって最も深刻な問題は、人工知能研究に要請される期待像と現実の成果とのギャップである。

人工知能研究は、人間の思考、問題解決、学習、言語などの知的能力をいかにして機械上を実現するかを研究する学問であり、計算機が出現した後に誕生した若い学問である。そのため、その知的能力を実現するためにどのような研究のアプローチをすれば人間の知能の本質に迫ることができるかという事が未だよく判ってはいないのである。これに関して以下に述べるような研究が基本的に重要な研究課題となる。

#### (i) Cognitive Science 研究の必要性

人工知能を実現するための研究を進める上で、単に結果的にみて性能のよいプログラムを作ればよいというのではなく、逆に人間の知能がいかにして発達するかという過程<sup>52)</sup>を研究して始めて良い性能のプログラムを作成することができる。つまり機械が自から学習・推論・問題解決してゆく、従来よりも遙かに高度な構造的レベルの学習・推論・問題解決のメカニズムの一般原理を考察する必要がある。

#### (ii) 知識工学研究の必要性

上記の人間の思考のメカニズム自身を研究するためには、いろいろな知識がどのように使われるかを研究する必要がある。しかる後に人間のもつ知識を旨く組織化して計算機上を実現する方法の研究が重要な課題となる。この分野の研究に対しスタンフォード大学の Feigenbaum, E. A. は知識工学<sup>53)</sup> (Knowledge Engineering) という名称を与えた。

#### (iii) 知的コミュニケーション研究の必要性

コミュニケーションは送受信者双方が共通の知識をもって始めて成立する。言語の構造的知識、社会常識などを記憶し、それから特殊な場合をすぐ思いついたり、似かよった場合を推察できるような旨い構造(これが Frame 理論の理想)になっていて、冗長でないコミュニケーションがスムーズに出来ること、質問応答システムにおいて重要な研究課題となる。

#### (iv) 以上の研究成果の集大成として Integrated Cognitive System<sup>54)</sup> をインプリメントする総合技術の研究開発の必要性

また従来の研究の延長線上にある研究開発されるべき課題として以下のようなものがある。

(i) 高階述語論理の研究開発、延いてはプログラムの性質の記述、証明に関する研究。

(ii) 新しいリスト処理機能の開発。

(iii) プログラム検証、プログラムの自動作成・自動修正のためのプログラム理論の研究。

(iv) 知識表現のための形式言語(ある種の型の高階述語論理式)の開発。

(v) 人工知能プログラミング言語のより系統的な設計と文書化を容易にするような技法 (Spaghetti Stack Concept)<sup>55)</sup>の開発、これは正にプログラミング言語の一般的理論にも本質的なものとなる。

さらにまた LSI の最近の長足の進歩と相俟って LISP マシンのような高水準のマシンの研究開発が盛んになってきた。これは人工知能の研究とコンピュータ・アーキテクチャ開発との相互刺激となる。

(i) LISP マシンの研究開発<sup>56)</sup>

(ii) Actor 理論のアーキテクチャ(解析的)研究への応用

かくして人工知能研究の直接的成果や、その過程に生まれる多くの技法は、計算機と電気通信網との結合、端末入出力装置の開発と相俟って、新しい情報伝達・高次情報処理を可能にするのみならず、計算機自身の future system への有力な手段でもあり、わが国電子計算機産業、情報処理産業はもちろんのこと、さらに一般科学・技術ならびに社会生活への情報革新をもたらす原動力となるであろう。

## 参考文献

- 1) Turing, A. M.: Intelligent Machinery in "Machine Intelligence (eds. Meltzer, B., Michie, D.)," Vol. 5, pp. 3~23 (1969).  
この本に Turing [1912~1954] の上記の未発表論文が収録してある。
- 2) McCarthy, J.: Recursive Functions of Expressions and Their Computation by Machine, Comm. ACM, Vol. 3, pp. 184~195 (1960).
- 3) Minsky, M.: Steps toward Artificial Intelligence, Proc. IRE, Vol. 49, pp. 8~30 (1961).
- 4) Bobrow, D. G.: Natural Language Input for A Computer Problem-Solving System in "Semantic Information Processing (ed. Minsky, M.)," MIT Press, (1968).
- 5) Roberts, L. G.: Machine Perception of Three-Dimensional Solids, Tech. Rept., No. 315, Lincoln Lab. MIT, (1963).
- 6) McCarthy, J., et al.: A Computer with Hands, Eyes and Ears, Proc. AFIPS, Vol. 33, Pt. I, pp. 329~338 (1968).

- 7) Invited Panel on Knowledge Representation (Chaired by Bobrow, D.G.), Proc. IJCAI-77, pp. 983~992 (1972).
- 8) Buchanan, B., Sutherland, G. and Feigenbaum, E. A.: Heuristic DENDRAL: A Program for Generating Explanatory Hypothesis in Organic Chemistry, in "Machine Intelligence", Vol. 4 (1969).
- 9) Davis, R., Buchanan, B.G. and Shortliffe, E.: Production Rules on a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program, Artificial Intelligence, Vol. 8, pp. 15~45 (1977).
- 10) Moses, J.: Symbolic Integration: The Stormy Decade, Comm. ACM, Vol. 14, pp. 548~560 (1971).
- 11) Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE. Trans. on Sys. Sci. Cybernetics, Vol. SSC-4. No. 2 (1968).
- 12) Robinson, J. A.: A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle, Jour. ACM, Vol. 12, pp. 23~41 (1965).
- 13) Ernst, G. W., Newell, A.: GPS: A Case Study in Generality and Problem Solving, Academic Press, (1969).
- 14) Fikes, R. E., Nilsson, N. J.: STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving, Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 189~208 (1971).
- 15) Rulifson, J. F., Derksen, J. A. and Waldinger, R. J.: QA4: A Procedural Calculus for Intuitive Reasoning, SRI Tech. Note No. 73, (Nov. 1972).
- 16) Hewitt, C.: PLANNER: A Language for Proving Theorems in Robots, Proc. IJCAI-69, pp. 295~301 (1969).
- 17) McDermott, D. V. and Sussman, G. J.: The CONNIVER Reference Manual, MIT AI Lab, AI-Memo No. 259, (May 1972).
- 18) Feldman, J. A., Low, J. R., Swinehart, D. D., and Taylor, R. H.: Recent Developments in SAIL—An ALGOL-Baised Language for Artificial Intelligence, Proc. AFIPS, pp. 1193~1202 (1972).
- 19) Tesler, L. G.: The LISP-70: Pattern Matching System, Proc. IJCAI-73, pp. 671~676 (Aug. 1973).
- 20) Ichibiah, J. D., Morse, S. P.: General Concepts of the SIMULA 67 Programming Language, Annual Review in Automatic Programming, Vol. 7, pp. 65~93 (1972).
- 21) Pratt, U. R.: A Linguistic Oriented Programming Language, Proc. IJCAI-73, pp. 372~381 (Aug. 1973).
- 22) Nagao, M. and Tsujii, J.: PLATON—A New Programming Language for Natural Language Analysis, Proc. 2nd USA-JAPAN Comp. Conf., (Aug. 1975).
- 23) Hewitt, C. and Smith, B.: Towards a Programming Apprentice, IEEE. Trans. Software Engrg., pp. 26~45 (March 1975).
- 24) de Kleer, J., Doyle, J., Steele, G. L., and Sussma, G. J.: AMORD: Explicit Control of Reasoning, Proc. Symp. Artificial Intelligence and Programming Languages, pp. 116~125 (1977).
- 25) Huffman, D. A.: Impossible Objects as Nonsense Sentences in "Machine Intelligence", Vol. 6, pp. 295~323 (1971).
- 26) Minsky, M.: A Framework for Representing Knowledge in "The Psychology of Computer Vision (ed. Winston, P. H.)", McGraw-Hill, (1975).
- 27) Bobrow, D.G. and Winograd, T.: An Overview of KRL: A Knowledge Representation Language, Studies on Cognitive Sci., Vol. 1, No. 1 (1977).
- 28) Newell, A.: Production Systems: Models of Control Structures in "Visual Information Processing (ed. Chase, W.C.)", pp. 463~526, Academic Press (1973).
- 29) Hewitt, C., Bishop, P. and Steiger, R.: A Universal Modular Actor Formalism for Artificial Intelligence, Proc. IJCAI-73, pp. 235~245 (Aug. 1973).
- 30) *ibid.* 23).
- 31) Ogawa, H. and Tanaka, K.: A Structure for the Representation of Knowledge—A Proposal for a Micro-Actor, Proc. IJCAI-77, pp. 248~249 (1977).  
小川, 木島, 田中:  $\mu$ -actor の実現と知識表現の構造, 情報処理, Vol. 19, No. 9 (1978).  
小川, 田中: 変数を共有する問題の擬似並列処理, 情報処理, Vol. 19, No. 9 (1978).
- 32) Winograd, T.: Procedures as Representation for Data in a Computer Program for Understanding Natural Language, Doctoral Dissertation MIT, (Jan. 1971).
- 33) Woods, W. A.: Transition Network Grammars for Natural Language Analysis, Comm. ACM, Vol. 13, pp. 591~606 (1970).  
Kaplan, R.: Augmented Transition Networks as Psychological Models of Sentence Comprehension, Artificial Intelligence, Vol. 3, pp. 77~100 (1972).
- 34) 長尾, 辻井: 自然言語処理のためのプログラミング言語 PLATON, 情報処理, Vol. 15, pp. 654~661 (1974).
- 35) 田中(穂), 佐藤, 元吉: 自然言語処理のためのプログラミングシステム—拡張 LINGOL につ

- いて——, 信学論(D), Vol. J60-D, pp. 1061~1068 (1977).
- 36) Schank, R. C.: Conceptual Information Processing, North-Holland (1975).
- 37) Winograd, T.: Understanding Natural Language, Academic Press (1972).
- 38) Feigenbaum, E. A., Buchanan, B. G., and Lederberg, J.: On Generality and Problem Solving: A Case Study Using the DENDRAL Program in "Machine Intelligence", Vol. 6, pp. 165~190 (1971).
- 39) Shortliffe, E. H.: Computer-Based Medical Consultations: MYCIN, American Elsevier, (1976).
- 40) Feigenbaum, E. A.: The Art of Artificial Intelligence: Themes and Case Studies of Knowledge Engineering, Invited Paper-I, Proc. IJCAI-77, pp. 1014~1029 (Aug. 1977).
- 41) *ibid.* 10).
- 42) Slagle, J. A.: Heuristic Program That Solves Symbolic Integration Problems in Freshman Calculus, Doctoral Dissertation MIT, (May 1961).
- 43) Moses, J.: Symbolic Integration, MAC-TR-47, Proj. MAC, MIT, (Dec. 1967).
- 44) Manove, M., Bloom, S., and Engelman, C.: Rational Functions in MATHLAB, Proc. IFIP Conf. on Symbolic Manipulation Languages, Pisa, (1968).
- 45) Chandiox, J.: METEO: An Operational System for the Translation of Public Weather Forecasts, FBIS Seminar on Machine Translation (eds. Hayes, D. G., Mathias, J.), American Journal of Computational Linguistics, microfiche 46, pp. 27~36 (1976).
- 46) Chaloupka, B., et al.: *ibid.* (45), pp. 37~39.
- 47) Weizenbaum, J.: ELIZA—A Computer Program for the Study of Natural Language Communication between Man and Machine. Comm. ACM, Vol. 9, No. 1 (Jan. 1965).
- 48) Feldman, J. A., Feldman, G. M., Falk, G., Grape, G., Pearlman, J., Sobel, I. and Tenebaum, J. M.: The Stanford Hand-Eye Project, Proc. IJCAI-69, pp. 521~526 (May 1969).
- Dobrotin, B. M. and Scheinman, V. D.: Design of A Computer Controlled Manipulator for Robot Research, Proc. IJCAI-73, pp. 291~297 (Aug. 1973).
- 49) Nilsson, N. J.: A Mobile Automation: An Application of Artificial Intelligence Techniques, Proc. IJCAI-69, pp. 509~520 (May 1969).
- 50) Lewis, R. A. and Bejczy, A. K.: Planning Considerations for a Roving Robot with Arm, Proc. IJCAI-73, pp. 308~316 (Aug. 1973).
- 51) 辻 三郎: ロボット研究の流れ(図8), bit (ロボット臨時増刊号), 共立出版, 1976年7月.  
谷内田, 諏訪, 井上: 視覚による物体の識別とそのハンドリング, 電子技術総合研究所集報, Vol. 35, No. 3, pp. 122~132, 1971年3月.  
Ejiri, M., Uno, T., Yoda, H., Goto, T., and Takeyasu, K.: A Prototype Intelligent Robot that Assembles Objects from Plan Drawings, IEEE Tran. on Comp., Vol. C-21, pp. 161~170 (Feb. 1972).
- 52) Minsky, M.: Plain Talk about Neurodevelopmental Epistemology, Proc. IJCAI-77, pp. 1083~1092 (Aug. 1977).
- 53) *ibid.* 40).
- 54) Michie, D.: Future for Integrated Cognitive Systems, Nature, Vol. 228, No. 21, pp. 717~722 (1970).
- 55) Bobrow, D. G. and Raphael, B.: New Programming Languages for Artificial Intelligence Research, Comput. Survey, Vol. 6, pp. 153~174 (Sept. 1975).
- 56) Greenblatt, R., Knight, T., et al.: The LISP-Machine, Progress Rept., AI MEMO No. 444 (Aug. 1977).
- 57) Hewitt, C. and Baker, H.: Laws for Communicating Parallel Processes, Proc. IFIP-77, pp. 987~992, Toronto, (Aug. 1977).
- Yonezawa, A. and Hewitt, C.: Modelling Distributed Systems, Proc. IJCAI-77, pp. 370~376 (Aug. 1977).
- (註) IJCAI: International Joint Conference on Artificial Intelligence.  
FBIS: US Government Foreign Broadcast Information Services.

(昭和53年6月15日受付)