

知的成長システムに関する統合的機能 — 問題解決、学習、発見 —

志村正道

東京工業大学 情報理工学研究科

人間は学習行為によって知的に成長していくが、この成長過程ではその初期段階での基本的な知的機能が極めて重要であると考えられている。一方、人工知能に対する批判として、知的な部分は人間の知能に依存するところが大きく、人工知能システムは真に知的な機能を有していないとの指摘がある。さらに、高度ないわば大人の知的活動に相当するシステム構築はなされているが、低度のいわば幼児の知的活動に対してはその実現が困難であるとも言われている。

このような観点に立って、本稿においては、問題解決、学習、発見という一連の知的機能に焦点を当て、これらを統合的に考察するとともにそのシステム構築における基礎的な機能の解明を図り、思考機械への道を探ることとする。

GENERAL MECHANISMS FOR INTELLIGENT GROWING SYSTEMS --- PROBLEM SOLVING, LEARNING, DISCOVERY ---

Masamichi Shimura

Graduate School of Information Science and Engineering

Tokyo Institute of Technology

Ohokayama, Meguro, Tokyo

A human can grow intellectually through his leaning activities. It can be considered that basic intelligent mechanisms in the early stage in his growing are extremely important for his further intellectual growth. There are some criticism against artificial intelligence. That is, most intelligent systems are not truely intelligent:such systems have no intelligent mechanisms but only utilize human intelligence. It is also said that advanced intelligent systems with adult intelligence such as machine translation sysystems and expert systems have been constructed, while basic intelligent systems with infant intelligence have not yet been developed.

In this manuscript, therefore, our discussion is focused on intelligence in problem solving, learning and discovery, and general systems are considered to study intelligent mechanisms in human beings and to realize "Thinking Machines".

1. まえがき

人工知能の研究は大きく次の二つに分けられる。
A. 人間の知能を有効に利用して、その知的活動を支援すること。

B. 人間の基本的な知能を解明し、コンピュータ上に真の知的機能を実現すること。

上記のAは応用、実用を指向したメソドロジーであり、如何にして人間の知的活動を実現していくかということを目的としている。具現的なものとしてはエキスパートシステムや機械翻訳などの実用システムを始めとし、従来の人工知能の研究は主に上述のAに相当するものであった。しかしながら、一方このようなアプローチの方法に対しては、コンピュータは真の知能を持たず、知的な部分は全て人間の持つ知能に依存しているとの批判がある。すなわち、Bの知能の本質を対象とし、真の知的機能をコンピュータ上で実現する事が、人工知能の究極的な目的であり、望ましい形態であり、またこのことによって知的機能の解明が可能となるはずである。しかるに、人間の知的機能すなわち脳の機能が明らかになっていないこともあり、極めて困難な問題として残されている。高級な知的システムは実現されても、低級ないわば幼児の知的活動を行うシステムの実現が困難といわれる所以である。人工知能といわれる分野はその研究目的として上述の二つの課題を対象としてきた。本稿では、この分野における問題解決、学習及び発見を対象として、人間の知能とその知能をコンピュータで実現する方法とについて述べることにする。

問題解決は人工知能研究の初期の段階から、多くの研究がなされ、NewellらによるGPSを始めとして種々なシステムが作成されてきた。これらの研究成果として、発見的木探索、定理証明法、最急降下法、手段-目的解析法、制約充足法、計画生成検証法、分割解決法等のいわゆる弱手法

(weak method)が開発された。近年、これらの弱手法のみでは問題解決システムとしての限界が指摘され、知識を利用した大きなシステムとして

SOAR[4]およびPRODIGYが開発されている。複雑で多様な問題を解決するためには単なる弱手法のみではなく、人間と同様に問題解決のための知識を活用することの重要性はいうまでもない。しかし、新しい知識の学習がなければ、自律的な知的システムとはいえない。このような観点から、第2節では、如何にして低レベルの知能を実現するかという目的で開発しているシステムを紹介する。次の第3節では、自然言語で与えられた算数の問題を解くシステムについて、第4節では、新しい知識を発見するシステムについて述べることにする。

2. 問題の表現と知的システム

本節では、弱手法の中でも知的な要素の大きい発見探索法について考察する。発見的探索は多くの問題に適用可能な一般的手法であり、その研究成果も多くある。すなわち与えられた問題を解いていく過程は木構造で表現され、この木の探索においてバックトラッキングがその解法の効率に対して大きな悪影響を及ぼすことから、如何にして探索空間を小さくするかが重要とされている。充足制約などはその積極的な対処法であるが、基本的でまた一般的な方法としては発見関数と呼ばれるいわゆる評価値に従って探索を行う発見探索が有効とされてきた。しかしながら、この発見関数は人間が与え、コンピュータは人間の与えたアルゴリズムに従って探索していくに過ぎない。もし、この発見的関数を自動的に見出すことができるならば、そのシステムは真の意味でより知的であるといえよう。実際、子供に8-パズルやルービックキューブをさせることを考えると、子供は試行錯誤の結果ある種の知識を得て、より効率的に解けるようになる。

図1はよく知られた8-パズルであり、初期の盤面からタイル移動により目標である盤面に至る手順を見出す問題である。この8-パズルは発見的探索法でしばしば用いられているが、よく知られているように、いくつかの発見的関数が提案され

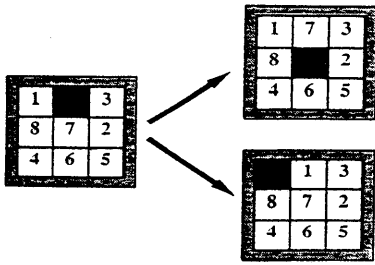


図1 8-パズル

ているとともにその学習についても研究成果がある。しかしながら、上に述べたように発見的木探索法において知能と考えられるものは発見的関数であり、人間が与えている。この発見的関数をコンピュータシステムが自動的に見出すことができるならば知的な振る舞いをしているといっていであろう。例えば、子供が8-パズルをする場面を考えてみると、必要となるのは8-パズルのルールであり、距離や手数などの数の概念などの一般的知識である。すなわち、ある問題を解く場合にコンピュータに与えるものは、

- (i) 対象とする問題のルールや条件、
- (ii) 一般的知識

である。ここに一般的知識とは直接その問題を解くための知識ではない。

このようなルールや知識に従って問題を解く課程に入るが、この時の手法はおそらく試行錯誤であり、その課程において解を得る効率的な問題固有の手順を見出していくものと考えられる。

以上の考察に基づいて、8-パズルを例に取りシステム構成を考える。

8-パズルのルール

(a) 盤面に関する定義

1. タイルの位置は x, y 座標で表すことにする。
2. 位置 (x, y) の隣の位置を (x', y') とするとき $1 \leq x, x', y, y' \leq 3$ であり、その上下左右隣の位置は次のようになる。

$$\text{上: } x' = x, y' = y - 1 \quad \text{下: } x' = x, y' = y + 1$$

$$\text{左: } x' = x - 1, y' = y \quad \text{右: } x' = x + 1, y' = y$$

3. ブランクの隣のタイル $T(x_1, y_1)$ はブランク $B(x_B, y_B)$ と変換できる。この時 B の位置と T の位置は入れ替わる。すなわち、 $T(x_B, y_B), B(x_T, y_T)$ となる。

(b) 一般的知識

位置 (x_1, y_1) と位置 (x_2, y_2) との距離 d_{12} を次のように定義する。

$$d_{12} = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

(c) タイル移動のルール

1. 移動対象のタイル $T_i(x_i, y_i)$ の隣で且つタイル T_i の正しい位置 (x^*_i, y^*_i) に、より近い位置にブランク B を移動する。
2. ブランク B の移動可能な位置が複数ある場合にはブランク B の移動場所にあるタイル $T_j(x_j, y_j)$ がタイル T_i の正しい場所 (x^*_i, y^*_i) がより遠くならないような位置にブランクを移動する。
3. ブランク B が移動対象タイル T に近づくならばその方向にブランクを移動する。

以上のようなルールに従って、8-パズルを解かせる実験の結果、ゴールを見出すことに成功している。しかし、これだけでは評価関数を用いていないために当然効率がよいとはいえない。本研究の主目的は有用な知識や評価関数を見出すことであり、この研究の成否はその結果に依存するものである。

3. 問題解決システム

問題の内部表現とアルゴリズムを与えることは、既に人間のもつ知能をコンピュータに与えてやることに相当しており、真の知的システムとはいえない。ここでは自然言語で与えられた算数の問題を解くシステムを通して基本的な知的機能を考察する。

算数の文章題を解くシステムとして、LAPS (Learning Arithmetic Problem Solver) [2][3]があるが、これを基にしたLAPS IIについて述べる。図2にLAPS (実線部) およびLAPS IIの構成を示す。LAPSは与えられた文章題を

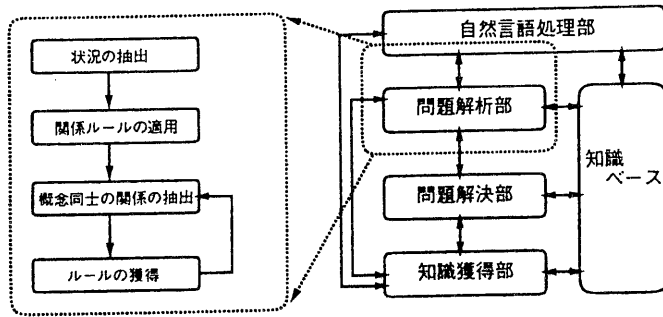


図2 LAPS(実線部)とLAPSⅡの構成図

自然言語処理部によって理解し、問題解析部で解析し、方程式を抽出して問題解決部でその方程式を解くことによって、与えられた問題の解答を見出す。これらの各段階では、知識獲得部によって得られた知識ベース中の知識が活用されている。

LAPSでは、問題の内部表現として事実グラフと呼ばれる意味ネットワークを用いている。この事実グラフは (a) 事物に対応する概念定義節点、(b) 問題文中の名詞に対応する対象節点、(c) 関係を表す述語定義節点および (d) 問題文中の関係に対応する関係節点の4種類の節点からなる。また、節点間を結ぶリンクには、(a') 属性リンク、(b') 役割リンク、(c') その他のリンクがある。

次に、問題解決のためのルールとしてLAPSは、(1) 方程式抽出用ルール、(2) ルール選択用ルール、(3) 問題解決用補助ルールおよび意味処理用ルールをもって、これらのルールによって事実グラフから方程式を導き解を見出す。

ところで、算数の文章題から方程式を導く場合に次のような二つの場合がある。

1. 問題文で陽に示される関係から方程式が得られる場合
2. 問題文で陽に示されていない関係から方程式が得られる場合

LAPSでは、上記の1. の場合は直接得られた事実グラフに方程式抽出用ルールを適用することによって方程式が得られる。一方、2. の場合には個々の特殊例に対する方程式抽出用ルールを準備し

ておき、そのルールを適用することで解を見出している。このため、汎用性に欠けるとともに問題文が複雑になると機能しなくなるような場合が生ずる。

このような欠点をなくすために、LAPSを改善し、状況という概念を導入して問題文から直接関係を得るような構成をもつLAPSⅡについて述べる。ここで状況とは、

- 状況1：問題文中に現れる一つの独立した概念を表す対象節点
- 状況2：問題文中に現れたある概念に対応する対象節点とその属性リンクによって結ばれた節点集合
- 状況3：複数の状況によって構成される節点集合

である。例えば、「3%の食塩水100gに食塩10gを加える。何%の食塩水ができるか」という問題においては、次のようになる。

- 状況1：「食塩10g」
- 状況2：「3%の食塩水100g」、
「できた食塩水」
- 状況間の関係：「加える」

上述のような状況を用いると、問題文は複数個の状況と状況間の関係によって記述できる。また、同様にして対象節点間の関係についても、同一の状況の中での関係と異なる状況間の対象節点間の関係とが考えられる。

異なる状況間において関係節点で結ばれている

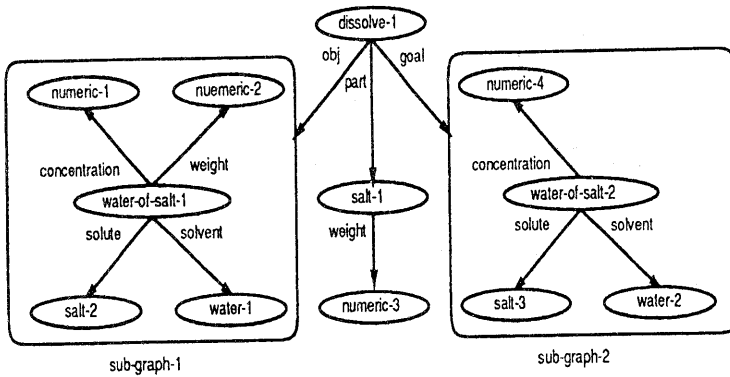


図3 状況に分別された事実グラフの例

場合には、ある状況に対する何らかの作用によって、他方の状況が生じたと考えられ、この場合、同じ概念の対象節点が存在するはずである。しかし関係節点で結ばれていない場合には共通する属性値を持つ対象節点が存在する。さもないと問題として不完全であるはずである。このような関係を記述するルールを関係ルールと呼び、必要な関係節点を生成するために適用される。問題文から直接得られる事実グラフを基に、状況を表す節点と状況間の関係を表す関係節点からなる事実グラフが新たに生成する。このグラフ中で状況を表す節点としてsub-graph節点を定義する。その結果、LAPSでは解けなかった問題をLAPS IIでは解くことが可能になっている。図3に、前述の問題において状況に分別された事実グラフの例を示しておく。

図3に示した問題のように一見無関係のような文章から何らかの関係を見出し、方程式を抽出していくことは人間にとっては容易なことであってもコンピュータにとってはかなり多くの準備が必要となる。すなわち単なる自然言語処理では問題の意味を理解することが容易でなく、問題を理解するという、言い換えれば方程式化する段階での意味的処理が必要となってくる。とくに算数の問題においては公式を記憶するのみではなく、公式の適用方法に関するメタ知識及びそのメタ知識の学習が重要となるものと考えられる。

4. 発見システム

文明の歴史において、人間は自然科学の分野を中心に多くの発見によって新しい知識を見出し、生成してきた。このような発見の機能を持ついわゆる発見システムについては既に多くの研究があり、LangleyらによるBACONやGLAUBERなどを初めとし、近年KukarniによるKEKADAなどの多くのシステムが構築されてきた。また発見は新しい知識を獲得するという意味で、発見による学習という機械学習の一形態としても研究されている。

物理、化学における発見は、一般に多くのデータから一定の法則を導き出すものであり、従ってそのデータを得るための実験そのものが重要となってくる。しかしながら、このような発見システムにおいて、データを与えるという行為は、その結果である発見が有用なものであるとしても人為的なものであり、真に知的行為とは言い難い。

ここでは三角関数を対象とし、殆んど知識のない初期状態から公式や定理を発見するような発見システムであるDST (Discovery System for Trigonometric Function)を紹介する。DSTは図4に示すように平面図形処理システムと数式処理システムから構成されており、三角関数における定義と三角形に補助線を引くというヒューリスティクスのみしか与えられていない。

平面図形処理システムでは、補助線を引くことにより生成される相似三角形の種々の関係を導き、

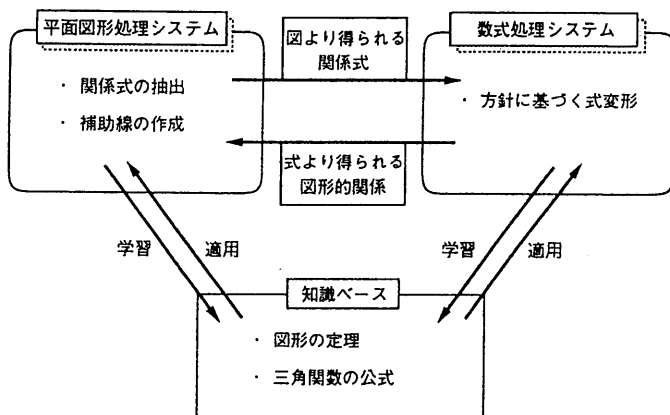


図4 発見システムの構成図

それらの関係から数式処理システムによって有用と思われる関係式すなわち公式あるいは定理を見出す。

このDSTは三平方の定理などの三角関数に関するいくつかの定理や公式を再発見することに成功している。しかしながら、DSTではその発見過程においていわゆるヒューリスティクスを用いていないため効率がよいとは言えず、さらに効率を考えたシステム[6]が提案されている。

いずれにしても、BACONなどの多くの発見システムに見られるように、十分なデータを人為的に与えるか、あるいはAMのように多くの初期知識を与えることが発見システムには必要とされてきた。ところがここで述べたDSTは補助線を引くと言うことが自律的に実験を行いデータを集めるという行為に相当し、この意味で従来型の発見システムとは一線を画しているといつてよい。

5. あとがき

本稿では極めて少ない初期知識しかもたないで、人間と同様な知的行為を実現するシステムや方法について述べてきた。初期知識やヒューリスクスを含めた戦略的知識を持たないシステムは幼児の状態と同じであり、解決すべき残された問題は多々あるものの、コンピュータシステムに真の知的

機能を実現させる基本的なメソドロジーを提供するものと考えられる。

参考文献

- [1] Armand E. Prieditis; "Discovering admissible heuristics of abstracting and Optimizing," Proc. of AAAI, pp. 720-725(1991)
- [2] S. Sakurai and M. Shimura, "Learning Arithmetic Problem Solver," Proc. of AAAI, pp. 1036-1040(1986)
- [3] 桜井成一郎、志村正道、"算術問題解決システムにおける学習"、人工知能学会誌、vol. 2, No. 1, pp. 100-106(1987)
- [4] S. Rosenbloom, E. Laird, A. Newell, eds, "The Soar Papers," MIT Press(1993)
- [5] T. Murata, M. Mizutani and M. Shimura, "A discovery system for trigonometric functions," Proc. of AAAI, pp. 645-650 (1994)
- [6] 村田剛志、志村正道、"平面幾何定理に発見システム," 情報処理学会第100回人工知能研究会資料 (1995)