

知識工学とプランニング

溝口 文雄

1. はじめに

われわれは日常生活の営みの中で、プラン（計画）をたて、それにもとづいて行動している。たとえば、“旅行する”、“買い物に行く”といったレベルから、“数学の証明問題を解く”というものまで、実に、臨機応変に、われわれはプランを使い分けている。また、物語の理解のために、その物語の登場人物のプランを仮定しながら、その意図を見出すという、いわば、プランのためのプラン、言いかえると、メタプランを立てることができる [Hobbs, 1980]。

このように、われわれの問題解決や、理解のプロセスに介在するプランの役割を明らかにすることは、知識を用いて推論する知識利用システムの設計に重要な意味をもつ。つまり、プランの研究は、人間の行なっている知識利用の方略とは何かを考察し、かつ、それを計算機上を実現し、柔軟な推論システムを作成することである。その意味で、プランの研究は、知識工学の領域において、不可欠の課題である。

ところで、プランの研究は、この他に、物語理解や、人間の認知行動のシミュレーションモデルとして進展している。基本的には、これらの領域でのアプローチは認知科学とよばれている。扱う対象に対して、現実的な問題解決を目的としてい

るのが知識工学で、遺伝子の設計というように、知識も大規模である。それに対して、認知科学では、詳細な人間の理解のプロセスモデルを構築していくことをねらっている。

この解説では、知識利用の方略の視点で人工知能、知識工学および認知科学の過去の研究を整理する。次に、認知科学の立場でわれわれが開発している他者のプラン理解システムを紹介し、知識利用の方略の内容を具体的に示す。最後に、プランの研究が、今後どのような形で展開していくかを考察する。

1. プランシステムの研究

2.1 人工知能からのアプローチ

プランを問題解決の戦略に利用するというアプローチは、Sussman(1975)の HACKER において、初めて試みられた。HACKERは積み木の世界の、組み変えをロボットが行なうという想定の問題解決システムである。基本的な仮定は、積み木 A, B, C を、連続的になんらかの操作を加えて、目標を達成することである。この仮定のもとに、HACKERはプランを作成し、まちがったプランがあれば、そのプランをデバック（修正）するというプロセスで、問題解決を進める。特に、HACKER では、問題解決のプロセスにおいて生ずる目標間の相互作用を調整していくために、CRITICS という手続き的知識を、HACKER に導入した。この手続きによって、プランを構成す

るアクションを再配列して、プランを修正することができた。

INTERPLAN は Tate(1975)により開発された問題解決システムである。このシステムは、HACKERとは異なった問題解決のアプローチをとっている。すなわち、サブ目標間に生じるコンフリクト状態が少なくなるように目標を設定するという形でプランを作成する。

この他、Sacerdoti(1977)による NOAH では、HACKERとちがって線形仮定でなく、可能なプランのステップを並列的なものと考えた問題解決システムである。

これらのシステムは、プランを適用するときの方略としてのメタプランを用いることを前提としたものである。

2.2 知識工学からのアプローチ

知識利用の立場として、知識工学の基礎モデルとなっているのが、HEARSAY-II (Lesser & Erman, 1977) らの音声理解システムである。

モデルの基本構造は、次の3つの要素から組み立てられている。(a)階層的仮説構造(処理の対象となる世界のモデルで、抽象的なものから具体的なレベルまで階層構造) (b)知識源(音声の理解に必要な、音声の特徴、構文的知識、意味的知識および語用論的知識のデータベース) (c)注視(処理の対象と、知識源との照合操作)

このような要素を用いて、新しい仮説を黒板(Blackboard)に書き込み、その仮説に関連する知識源をよび出す。その結果、その仮説が妥当であるかどうかを評価する。いわば、黒板に書かれた新しい仮説を、合議的に処理するシステムとみることができる。

黒板モデルは、Nii & Feigenbaum(1978)によって、HEARSAY のモデルを SU-X, SU-P というシステムに拡張された。SU-Xは、軍事上の敵影をチェックするための信号解釈するシステムである。SU-Pはプロテイン構造を決定するために、X線の結晶データを解釈するシステムであ

表 1 HEARSAY-II と SU-X, SU-P のちがい

システム のサブ構造	システム名	
	HEARSAY-II	SU-X, SU-P
コントロール構造	単一的構造	階層的構造
データ構造 (blackboard)	単一的構造	異なった領域へ 分割された構造

る。

SU-X, SU-Pにおける知識利用の制御方式は、階層をなしている。階層の第1レベルは、知識源に用いて、入力信号をどのように解釈するかを仮説を作成する。第2レベルでは、事象駆動(event-driven)や期待駆動(expectation-driven)をする作用素を用いて、第1レベルで使用される知識源を活性化させるデータ駆動(data-driven)を行なう。第3レベルで、知識源は、次のような決定に用いられた。i)システムがどのようにして解決したか。ii)第2レベルの知識源がどのようにして仮説を作成したか。iii)仮説とデータとを一致させるための焦点を、どのように制御するか。

HEARSAY-II と SU-X, SU-P との主なちがいを整理したのが、表1である。知識利用の方略からみると、SU-X, SU-P のほうがより一般的であり、さらに汎用化したのが Nii らの AGE である。

こうしたアプローチにはほぼ同様の形で、プランの問題のために知識利用システムとして開発されたのが、Stefik(1981)らの MOLGEN である。このシステムは遺伝子工学の専門家が遺伝子のクローニングなどの実験を計画するのを支援することを目的としている。MOLGEN は、次の3つの領域から成り立っている。

イ. 実験室領域

MOLGEN の基礎となる研究対象に関する知識を表わす。

ロ. 設計領域

階層的なプランに対する作用素の働きを明らかにする。この領域の役割は、方略領域で考案され、実行される。

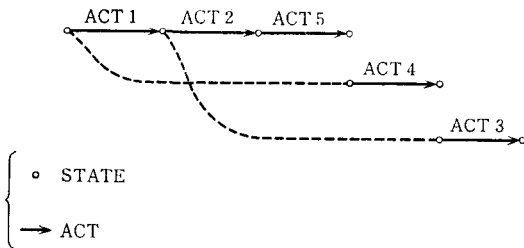


図 1 プランにおける状態とアクションの非連続性

ハ. 方略領域

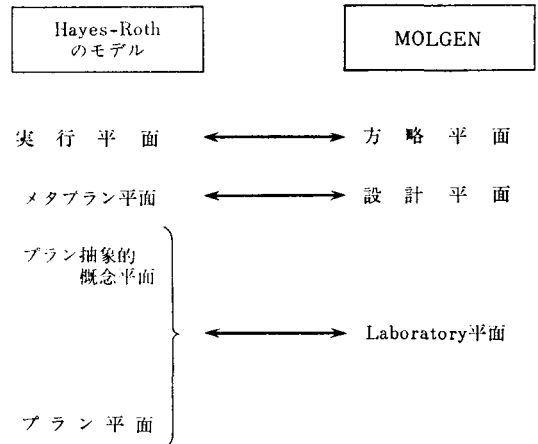
設計領域での設計ステップを考えて、プランする。

ところで MOLGEN の研究とほぼ並列して行なわれた。Hayes-Roths (1979) らのプランの認知モデルは、人間のプランを説明するシステムである。基本的には、“人間は、その時々で機会を計画する”というモデルである。このモデルは図 1 で示したように、プラン空間での、非連続接点で、行動の機会的な結合によって、計画が進むことを意味している。この特徴は、MOLGEN の動きと一致している。両者の特徴を比較したのが図 2 である。これらのシステムの基本的考え方は、対象世界のモデルを抽象化レベルで整理し、その各々のレベルに対応して、知識の方略をプランすることである。

MOLGEN でのこうした考え方は、現在、ゼロックス研究所の VLSI(大規模集積回路)設計におけるプラン構築支援までに発達している。この支援システムを中心となるのが LOOPS(Bobrow & Stetik, 1982) とよばれる知識表現システムである。LOOPS の詳細は不明だが、対象世界をひとつのオブジェクトとして表現するオブジェクト指向型言語の考え方を基礎にしている。

2.3 認知科学からのアプローチ

人間の物語理解を、プランの立場で研究を進めているのが、Wilensky(1981) である。彼の理解システムは、PAM や PANDORA とよばれている。PAM は、物語の登場人物のプランを構築



2つのモデルの対比

図 2 Hayes-Roth と MOLGEN の比較

することによって、物語を解析し、プランを使って物語の内容に関する質問を答えていくシステムである。PAM(Plan Applier Mechanism)は、いくつかの目標をもった物語を理解するために、目標間のコンフリクトを解消することができる。

PANDORA(Plan Analysis with Dynamic Organization, Revision and Application)は、PAM をベースにしたプランシステムである。PAM をさらに拡張して、プラン自身についての知識(メタプランとよぶ)について焦点をあてたものである。

PANDORA は、複雑な状況に対しても、その目標を理解し、それに必要なプランを提案することも可能である。システムは、LISP 系の言語で作成されている。なお、PAM の縮小版を、実際に、東大大型センターにインプリメントした感想では、プランの適用が、直列的で、それほどは、柔軟な物語理解となっていない。こうしたシステムのむずかしさは、並列的にプランを作動させ、そのときでも、目標間の相互作用を処理することができるかという点にある。この点からみると、PANDORA でも、今後の課題が多く、現在でも、システムの拡張が続けられている。

認知科学の枠組から、プランの問題を整理して

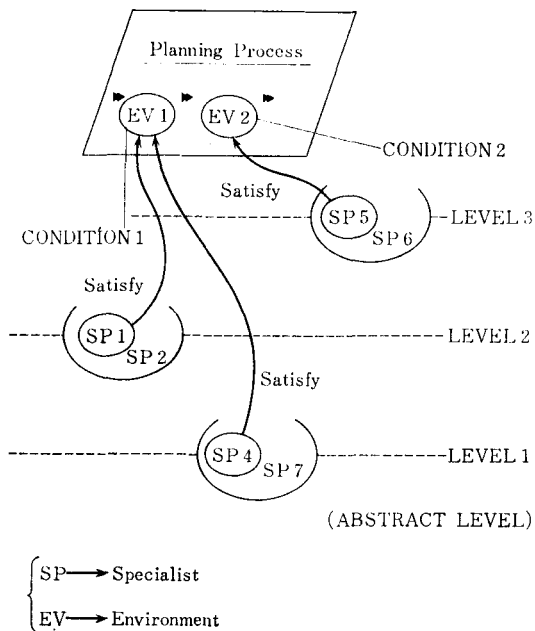


図3 プランプロセスとスペシャリストモデル

みると、Hayes-Roths(1979)の提案した、“スペシャリストの機会主義的プラン”に集約される。つまり、特定のプランを遂行するスペシャリストが、状況に応じて、機会主義的に作動するというモデルである。モデルとしては図3のように示すことができる。すなわちプランプロセスは、スペシャリストを、必要条件によって活性化し、内在する種々のスペシャリストを暗示的に作動していく。しかも、そのスペシャリストには、抽象的なレベル差があって、プランプロセスに近いほど具体的になっている。

以上の、種々の立場からのプランモデルが基本で、それをどのような形で実現したかどうかで、モデルの外部挙動が異なってくる。

3. プラン認知システムの設計

今までの研究のうちで、最も基礎となるアプローチは、やはり、人間のプラン行動であろう。その意味で、人間のプラン構築を考察し、それを、コンピュータプログラムの形で実現することは、知識利用の立場から興味深い。プランの構築のた

めの手続きを整理したのが、次の2点である。
(Schmidt(1976), Schmidt et al(1978))

- 1) 初期の世界の状態を、目標状態へ移すための一連の行動を見つけること。
- 2) 構築されたプランに必要な行動と、その行動に対するパラメータの制約を明らかにすること。

1)に対する方法は、目標Gと、そのGを生じる行動Aを見出すことである。つまり、“～のためには(G), ~する必要がある(A)”という形で、バックワード的に繰り返し、最初の状態を見出すことである。もちろん、その構築のプロセスから得られた状態が最初の世界の状態に一致していれば、プランは達成されたことになる。

2)のプラン行動の制約をどのように明らかにするかはそれほど一定の方法があるわけではない。結局は、発見的方法によって、制約を明らかにしていくことが考えられる。その中では、やはり、期待(expectation-driven)にもとづいた発見的方法が有効である。つまり、予想できる制約については、プランの状況記述の中に、知識として埋め込んでおく方法である。このことを可能にするためには、どのようにしてプランの知識を表現しておくかが重要な問題となる。

3.1 プラン認知と知識表現

人間のプラン行動を解析するためには、種々の知識が必要であるが、このことを具体的に検討するために、われわれが開発した PLAN RECOGNIZER (以下PRと略記)内の知識表現について述べてみる [溝口, 渡辺, 1981]。

PRには、対象世界の常識的知識、プランを実行する行為者の内的状況に関する知識およびプランそのものの概念的知識より成り立っている。そして、これらの3つの知識が独立して、相互に情報を交換して、人間のプラン行動を解析する。これらの3つの知識は、世界モデル(World Model: WM), 個人モデル(Person Model: PM)およびプランモデル(Plan Model: PIM)としてPRの

((DAIDOKORO)
 (TARO ICHISHITEIRU SHOKUDAI)
 (TARO TEMOTONIRU SONZAISHINAIMONO)
 (MILK ICHISHITEIRU REIZOOKO)
 (RETASU ICHISHITEIRU REIZOOKO)
 (A-GLASS JOOTAI KARA)
 (A-GLASS ICHISHITEIRU SHOKKIDANA)
 (PAN ICHISHITEIRU SHOKKIDANA)
 (PAN JOOTAI TABERERU)
 (BEER-NO-BIN NAKANIARU BEER)
 (SENNUKI ICHISHITEIRU SHOKUDAI)
 (BEER-NO-BIN CHIKAIJOOTAI TOJITEIRU)
 (BEER-NO-BIN ICHISITEIRU REIZOOKO)

リスト-1 キッチン世界のWM構造の一部

中で実現され、それぞれ次のような内容である。

1) WM

WMは対象世界におけるヒト、モノ、位置などの概念で、これらの概念間の関係で表現される。すなわち、(X R Y)の形式は、あるXが、Yとの間にRの関係にあることを意味する。従来の意味ネットと同じ形であるが、関係Rは表層文の状態記述と同じである。たとえば、キッチンの世界を対象としたときのWMの一部は、次のようなリストになる。(リスト-1)

2) PM

行為者の内的状態に関する知識を表現するもので、“信じる”、“知る”、“望む”、“好む”といった関係で、ヒトの内的状態を表わす。表現の形式としては、(X R P)を用いるが、Xはヒトを示し、Rは“信じる”などのような関係で、Pは、WMの(X R Y)である。つまり、あるヒトXが、(X R Y)ということを示している。

3) PIM

PIMは、WMやPMでモデル化された行為をプランの流れとして表現したもので、プラン仮説とよぶ。つまり、WMやPMの制約条件を満足していない段階のプランは仮説と考えられる。この仮説の一部を出力したのがリスト-2である。

これらの3つのモデルの相互関係を示したのが、図4である。入力文のセットというのは、行為者の一連の行為を、文の形式でモデルに入力することである。プラン仮説のSettingは、PIMの初期状態のデータである。

PRの動きは、入力文の順序通り進む。すなわち、入力文のセットが終了すると、PRは入力文中の行為に関する情報から、それにマッチした行為の図式をよび出す。行為図式のよび出しが終ると、図式の各スロット部を、入力文中のデータで書き換えて、行為図式を生成する。また、入力文をもとにして、その行為の前提条件、結果およびサブ目標を推論する。このサブ目標の推論結果から、PRは、行為者が次に何を行為するのかを知ることが

L((HYP1)

(<OBJECT1 STATE EDIBLE)
 (<OBJECT2 STATE EDIBLE)
 (<OBJECT3 STATE-NOT EDIBLE)
 (<OBJECT1 COMPONENT-OF <OBJECT4)
 (<OBJECT2 COMPONENT-OF <OBJECT4)
 (<OBJECT4 INSTRUMENT <OBJECT3)
 (<OBJECT4 STATE EDIBLE)

リスト-2 プラン仮説構造

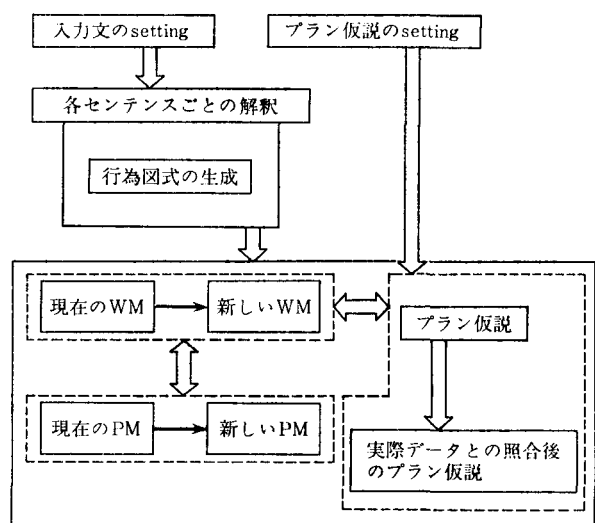


図4 PLAN RECOGNIZER(PR)におけるモデル構造

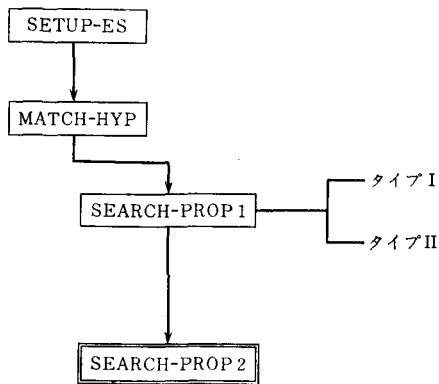


図 5 期待駆動におけるマッチング処理

できる。PR内では、プラン仮説がWMおよびPMに適用され、行為者が次に行なう行為を、次の入力文の中から見い出して、実際のプラン構造の一部とする。このように、入力文の行為図式を、プラン仮説を用いて変更し、入力文がなくなるまで続ける。その結果、PR内には、プラン構造から抽出されたプラン目標が取り出されて、処理が終了する。

3.2 プラン修正システム

入力文に対応して、関係する知識をよび出して、プラン構造を生成プロセスを制御しているのがプラン修正システムである。このシステムはMATCH-HYPという形で作成された手続き関数であるが、次のような2つの修正を行なうことができる。すなわち、行為者が行なうのではないかと、PRが推論した行為を、EP-ACT(expectation-act)とすると、その修正は次のようになる。

i) EP-ACT と入力文中の行為との照合が行なわれる以前の修正について (図5のタイプ-I)

初期の、プラン仮説中にある行為の図式を用いて、EP-ACT を推論する。しかし、EP-ACT の前提条件がWM内で矛盾したときに、WM内で前提条件が真となるような行為が修正ルールから導出され、行為図式が修正される。

ii) EP-ACT と入力文中の行為との照合が行なわれた後の修正について(図5のタイプ-II) EP-ACT と入力文中の行為とのマッチが成功した場合、EP-ACT は実際に、行為者によって行なわれたとPRはみなして、プラン構造を生成する。この2つの行為とのマッチが失敗した場合、行為図式に、入力文中の行為が付加される。

これらの修正のプロセスは、図5のような構造で行なわれる。SETUP-ESが、期待駆動を制御する部分のトップレベル関数で、この関数の制御のもとに、2つの修正を行なうMATCH-HYPがある。実際には、行為図式中の、行為の連鎖を見い出す探索関数SEARCHによって、修正がなされる。

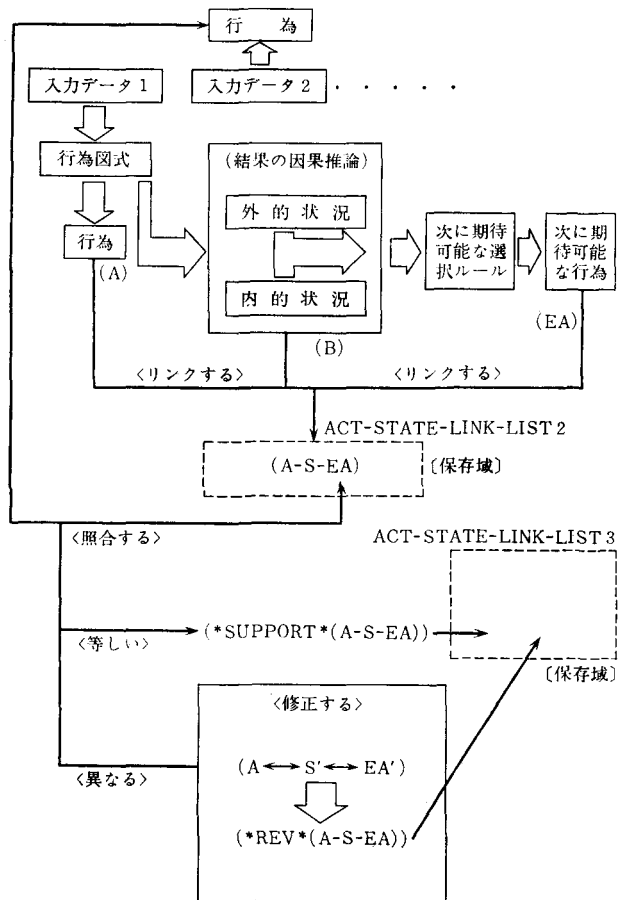


図 6 PRにおけるプラン生成プロセスの流れ

KOREKARA KAISHAKU O HAZIMEMASU...

:KOOISHA WA ---->
TARO

:KOOISHA WA DOKONI --->
(ICHI TOORII)

TSUGINO YOUNA KOOIZUSIKI GA MEMORY NI TAKUWAERARETE IMASU

((KOOI-SCHEME (KOOISHA TARO) (KOOI IKU) (DOKOE A-SHUTEN) (DOKOKARA TOORII)))

PC,OC NO SUIRON WA MEMORY E TSUGINOYOUNI TAKUWAERARETE IRU
(((TARO ICHI TOORII))) ((TARO ICHI A-SHUTEN)) (IKU 1))

リスト-3 “太郎はA酒店に行く”のプラン構造の一部

いずれにせよ、PRは、プラン行動を予測する働きがあるが、その予測が、PR内の知識と非常に異なる場合の、プラン仮説の修正をどのように行なうかが、PRの問題点である。現段階では、常識的推論の枠組で、行為の推論を行なうための修正システムとなっている。

3.3 PRの処理フロー

今まで述べたPRにおけるプラン生成プロセスの全体像を示したのが、図6である。実際のPRは、INTER-LISPで作成された推論システムである。PRの出力結果を示したのが次のリストである(リスト-3)。この例は“太郎はA酒店に行く”という入力文に対して、PRが抽出した、“太郎の行為”におけるプランである。この出力例では、“A酒店”に行くための条件として、“太郎は通りに位置している”というプランを抽出している。もちろん、この出力結果を得るまでの推論プロセスは省略してある。

3.4 プラン認知システムと知識工学との関連

現在のエキスパートシステム内の知識は、基本的にはルール形式で表現されている。そして、“ある状況に対して、～せよ”という表現が用いられている。あるいは、知識表現として、フレームを用いることもある。いずれにせよ、エキスパートの知識は、主として、外部条件を基本にしたルー

ル表現が採用されている。

ところで、現在の知識工学で開発されたシステム、特に、相談システムのうちで、基本的に欠いている点は、相談システムを使う立場側の心理であろう。つまり、相談の具体的内容も必要であるが、“なぜ、相談システムを必要としているのか”というメタプランの視点で、使う側を見れるような相談システムが必要である。そのためには、他者の行為を理解し、その行為そのもののプランと意図を、システムが理解してくれるような機能をもったシステムが必要である。この節で述べたPRの意図は、そうした点にある。しかしながら、現段階では、むしろ、推論システムにおける知識利用の方略の基礎を考えるための、プロトタイプシステムのレベルでしかない。

4. プラン研究の今後の動向

知識利用の立場から考えると、プランの研究はむしろ、今後の課題である。というのは、医療の分野で発展をとげた知識工学が、さらに、分野を変えた形で進んでいるのが現状である。特に最近では、工学の問題、たとえばVLSIの設計や遺伝子設計の問題のように、大規模な知識を扱うのが知識工学の傾向である。その意味では、メタプランの問題、さらに協調的に作動するスペシャリ

ストの制御方式などの、知識利用の方式をプランの研究として検討する必要がある。

次に重要なのが知識表現である。やはり、プランという順序性をもった情報を扱うためには、知識表現の枠組を拡張して、どのように行為の連鎖を保っておくかが必要である。現在の知識表現では、モジュラリティが強調され、その結果、知識相互間の文脈が失われている。

もちろん、こうした課題は、従来の知識工学の枠組を確実に把握したうえでということが前提である。そして、そのうえで知識利用の方略や表現の順序性を検討していくことが、さらにむずかしい分野を知識工学の枠組で扱うときには、重要である。その意味では、第3節で扱ったような認知科学の立場の研究が必要である。最近の Wilensky の著者である “Planning and Understanding” (1983) は、PLAN の問題を考える際のヒントになり、しかも UNIX を教える自然言語のインターフェイスにプランの研究が活かされるに到っている。

なお本稿では、プランの問題を考えるうえで重要と思われる並列性についてはふれていない。しかし、過去においてプログラム言語として検討された Planner や Conivour のモデルを、プランの問題として再検討することも必要であろう。

参 考 文 献

- [1] Abelson, R.P., “Concepts for Representing Mundane Reality in Plans”, In D. Bobrow & Collins(eds.), *Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science*-Academic Press, New York (瀧一博監訳, 人工知能の基礎, 近代科学社)
- [2] Bobrow, D.G., & Stefik, M., “The LOOPS Manual”, KB-VLSI-81-13 (working paper), Xerox PARC, 1982
- [3] Hayes-Roth, B. and Hayes-Roth, F., “A Cognitive Model of Planning”, *Cognitive Sci.* 3 (1979) 275-310
- [4] Hobbs, J.R. and Evans, D.A., “Conversation as Planned Behavior”, *Cognitive Sci.* 4 (1980) 349-377
- [5] Lesser, V.F., & Erman, L.D., “The retrospective view of the HEARSAY-II architecture”, *IJCAI* 5, 375-383, 1977
- [6] Nii, H.P and Aiello, N., “AGE: A Knowledge-based Program for Building Knowledge-based Programs”, *IJCAI* 6, 645-655, 1979
- [7] 溝口文雄, 渡辺久晃, “人間のプランプロセスのシミュレーション”, 昭和55年度科学研究費一般研究 C 佐伯班成果報告集, 1981
- [8] 溝口文雄, 渡辺久晃, “プラン認知システムのシミュレーション”, 第22回情報処理学会全国大会講演論文集, 1981
- [9] 溝口文雄, 渡辺久晃, “プラン認知システムのシミュレーション”, 第23回情報処理学会全国大会講演論文集, 1981, 843-844
- [10] 溝口文雄, 渡辺久晃, “プラン認知システムのシミュレーション”, 第25回情報処理学会全国大会講演論文集, 1982, 987-988
- [11] Sacerdoti, E. D., “A Structure for Plans and Behavior”, Elsevier North-Holland, Amsterdam (1977)
- [12] Schmidt, C. F., “Understanding Human Action: Recognizing The Plans and Motives of Other Persons”, *HIH Report CBM-TR-60* (August 1976) 1-38
- [13] Schmidt, C.F., Sridharan, N. S. and Goodson, J.L., “The Plan Recognition Problem”, *Artificial Intelligence* II (1978), 45-83
- [14] Stefik, M.J., “Planning with Constraints”, *Artificial Intelligence* 16(2) (1981) 111-140
- [15] Stefik, M.J., “Planning and Meta-Planning”, *Artificial Intelligence* 16(2) (1981) 141-170
- [16] Sussman, G.J., “A Computer Model of Skill Acquisition”, American Elsevier, New York (1975)
- [17] Tate, A., “Interacting Goals and their Use”, *Proceedings of IJCAI-4*, 1975
- [18] Wilensky, R., “Meta-Planning: Representing and Using Knowledge About Planning in Problem Solving and Natural Language Understanding”, *Cognitive Sci.* 5(1981)197-233
- [19] Wilensky, R., “Planning and Understanding”, Addison-Wesley, 1983