

## ITSにおける仮説推論を利用した misconception の 抽象化について (6)

松田 昇  
金沢工業大学

岡本 敏雄  
東京学芸大学

ITSにおいて、学習者の信念体系を正しく認識し、それに基づく教授を展開する機能は極めて重要である。人間の教師は、学習者の解法過程を観察することにより、誤り原因に対する仮説をたて、その仮説を検証するためにいくつかの確認、特定の知識に対する理解状態を調べるための課題を生成し、学習者に与えることができる。このような行為により、学習者の理解状態に基づく適切な教授が展開されている。本研究は、問題解決過程において観測される解法知識の適用状態に基づいた、対象学習世界の公理系に対する深い理解状態の診断技法の探求が目的とされる。本稿では、そのために仮説推論の枠組みを適用した学習者モデルの診断技法について述べる。

## Abstracting a Misconception by Hypothesis Based Reasoning for ITS

Noboru Matsuda  
Kanazawa Institute of Technology

Toshio Okamoto  
Tokyo Gakugei University

This paper describes a framework to infer the student's misconception from an observed bugs in the process of solving problem. Many existing ITSs (Intelligent Tutoring Systems) monitor the process of solving problem, infer the applied knowledge, and diagnose student's bugs at the surface level. However, it is reasonable to suppose that students justify their problem solving steps by axioms of the domain, underling their beliefs. Then, this study concentrates on the schema that relates the observed bugs to the deeper structure of the student's understanding on the domain. We apply hypothesis-based reasoning to diagnose the student model to realize this goal.

## 1 はじめに

一般に、問題解決型の学習世界において、学習者の有する“誤り”や“誤概念”および領域に対する理解状態は、問題解決過程における解法知識の適用状態に反映される。これまでの問題解決を対象としたITSの多くは、解法知識に対する理解状態の同定や解法戦略(計画)の認識といった表層的なレベルでの学習者モデル構築に主たる関心がおかれていた[7, 5]。しかし、学習者の問題解決過程は、領域に対する学習者の信念体系に基づいていると考えることは妥当である。そこでシステムには、観察された解法知識の適用状態に基づいて、学習者の信念体系を推論する機能(本稿では深層的なレベルでの診断と呼ぶ)が望まれる。

ITSにおいて、学習者の信念体系を正しく認識し、それに基づく教授を展開する機能は極めて重要である。人間の教師は、学習者の解法過程を観察することにより、誤り原因に対する仮説をたてることができる。必要であれば、その仮説を検証するためにいくつかの確認を行ったり、特定の知識に対する理解状態を調べるための課題を生成し、学習者に与える。このような行為により、自然な教育的対話が形成される。すなわち、学習者の理解状態に基づく適切な教授が展開されている。そこで、ITSにおいては、単に学習者の解法知識の適用状態に基づいた教授を行うのではなく、その根底にある学習者の信念体系を認識した教授戦略を決定する機構が必要とされる。

上述した事柄を実現するために、本研究では、問題解決の学習世界における深層的な学習者モデルの構築が目的とされる[2]。システムは、観察される解法知識の適用状態に基づいて、領域の公理系に対する学習者の理解状態を診断する。その際、診断的な仮説推論の手法を適用し、深層的な理解状態の認識は、表層的な学習者モデルを説明する診断仮説の選定機構を用いて実現される。さらに、診断仮説の生成・選定において非単調な処理機能を導入することにより、教師の学習者理解に対する知的な振舞いを実現する。

本稿では、上述した目的を実現するために、具

体的な学習世界として、集合論における論理式の簡略化問題を想定し、学習者モデルの具体的な構成手法について述べる。集合式の簡略化では、単に式変形の規則を暗記するのではなく、集合の要素や交わり、結びなどの概念を正しく理解する必要がある。さらに、venn図を利用することにより、視覚的に思考することが可能となる。

以下本稿では、2章で問題解決の学習世界における学習者モデルの構成について述べる。次に3章で集合論の学習世界における表層的な学習者モデルの構築手法について説明する。4章では、診断的な仮説推論を利用した深層的な理解状態の認識手法について述べ、5章では、診断仮説を動的に生成する手法について説明する。最後に、6章において、現在検討されている仮説の絞り込み手法について説明する。

## 2 問題解決の学習世界における学習者モデルの構成

一般に、問題解決の学習世界では、学習者は、与えられた課題に対して一連の解法手続きを適用し、解を導く。このような領域は、数学の世界に多くみられ、これまで代数や幾何などを対象とした多くのITSが研究開発されている。これらのシステムの多くは、解法知識の獲得とその適用方法の理解(知識の適用に関する知識を獲得するといった意味で、メタ知識の獲得と呼ばれることもある)に学習の目標がおかれやすい傾向にある。すなわち、システムは学習者の解法過程を観察し、システム内部の(“正しい”および“誤った”)解法知識を適用して学習者の解を再現することにより、解法計画および解法知識の適用状態を表現した学習者モデルを構築する(本稿では、これを表層的な学習者モデルと呼ぶ)。

上述したシステムでは、対象世界の特徴を利用した解法過程モニタを構築することは比較的容易である。その場合、一般に対象領域の専門知識および問題解決器により、解法過程モニタが構成される。本稿では、対象世界の問題解決器を解法エキスパートと呼んでいる。

しかしながら、学習者が適用した個々の解法知識は、それが機械的に暗記されている場合を除い

て、領域に対する学習者の信念に裏付けられていると考えられる。したがって、学習者の深層的な理解状態に基づいた教授を展開するためには、解法知識の適用状態を表現した学習者モデルを構築するだけでなく、システム自体が学習者の信念体系を認識した上で教授を展開することが望まれる。そこで、本研究では、解法知識の適用状態を表現した表層的な学習者モデルから、領域の概念構造に対する学習者の深層的な理解状態を推論する機構を実現する。

ここで、対象学習世界の概念構造を領域概念モデルと呼び、領域概念モデルに対する学習者の認識状態を学習者の概念モデルと呼ぶ。すると、上述した教授展開は、手続き的な問題解決知識に対する習得状態を表現した表層的な学習者モデルから、学習者の概念モデルを推論し、領域概念モデルを用いて学習者の有する誤概念を説明する機構および領域概念モデルに基づいた教授を行う処理系によって実現される。その図式を図1に示す。従来の学習者モデルは、学習者の問題解決過程において適用された解法知識を同定することに主たる関心がおかれていた。ここではさらに、観測された問題解決行為から、領域概念モデルに対する学習者の概念モデルの状態を認識しようとするものである。

以下本章では、領域概念モデルおよび学習者の概念モデルの構造について各々説明する。

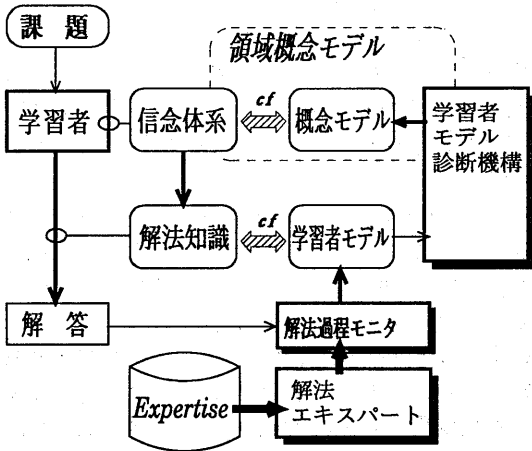


図1 領域概念モデルに基づく学習者モデルの解釈

Hypotheses

```

kb( eq_set_def,
    (eq_set( X, Y ) :- venn( X, R ),
                        venn( Y, R ) ) ).
kb( venn_u,
    (venn( u( A, B ), Ru ) :-
      venn( A, Ra ),
      venn( B, Rb ),
      union( Ra, Rb, Ru ) ) ).
kb( venn_i,
    (venn( i( A, B ), Ri ) :-
      venn( A, Ra ),
      venn( B, Rb ),
      intersection( Ra, Rb, Ri ) ) ).
kb( venn_c,
    (venn( c( A ), Rc ) :-
      venn( A, Ra ),
      venn( universal, Ru ),
      subst( Ru, Ra, Rc ) ) ).
  
```

Facts

```

intersection( [F|X], Y, [F|Z] ) :-
  member( F, Y ), !,
  intersection( X, Y, Z ).
intersection( [F|X], Y, Z ) :-
  intersection( X, Y, Z ).
intersection( [], -, [] ).
subst( [F|X], Y, Z ) :- member( F, Y ), !,
  subst( X, Y, Z ).
subst( [F|X], Y, [F|Z] ) :- subst( X, Y, Z ).
subst( [], -, [] ).
  
```

図2 領域概念モデルの例

2.1 領域概念モデル

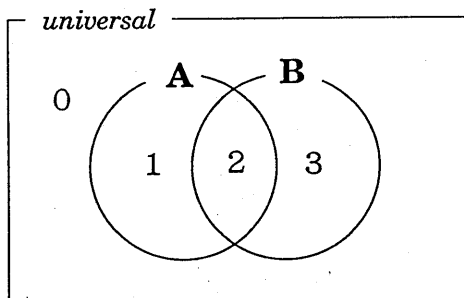
領域概念モデルは、対象学習世界における公理系の構造を表現する。解法エキスパートの解法知識が手続き的な知識であるのに対して、領域概念モデルは宣言的な知識である。

本研究では集合論の学習世界を想定しているのので、例えば“交わり”、“空集合”、“補集合”といった概念を特定の記述方法により表現する必要がある。図2に、集合論における領域概念モデルの例を示す。ここでは、venn図を用いた公理化を行っている。例えば、集合Aと集合Bが等しい(eq\_set(A,B))といった知識は、

```
eq_set(A,B) :- venn(A,R), venn(B,R).
```

と表される。venn(X,Rx)は、集合Xのvenn図における領域がRxであることを表し、具体的には、図3に示す値を返す。

領域概念モデルは、(1) 学習者モデルの診断の他に、(2) 解法エキスパートの問題解決過程を説明するために利用される。



$\text{venn}(A, X) \rightarrow X=[1,2]$   
 $\text{venn}(B, X) \rightarrow X=[2,3]$   
 $\text{venn}(\text{universal}, X) \rightarrow X=[0,1,2,3]$

図3 venn 述語

システムは、領域概念モデルを利用して、表層的な学習者モデルを説明するための診断仮説を動的に生成することができる。そのために、図2において知識が *Hypotheses* と *Facts* に区別されている。基本的には、*Hypotheses* である知識を書き換えることにより、新たな仮説が生成される。領域概念モデルを利用した仮説生成については、5章で詳述する。

解法エキスパートの解法規則を利用すれば、課題を効率的に解決することができる。したがって、正解を導くことのみが目的とされる場合には、解法エキスパートを利用することが望ましい。しかし、解法エキスパートの解法規則は、いわばコンパイルされた知識であり、学習者の“なぜ”そうなるのかといった質問に答えることが困難である。一方、領域概念モデルは、領域の公理系を表現したモデルであるので、原理に基づいて説明をすることが可能である。

図4に、領域概念モデルを用いた解法規則の説明を示す。図では、解法エキスパート規則の一つである “ $A^c \cup A = \Omega$ ” に対する公理的な説明を示している。説明は木構造により表現される。システムは、例えば、木を上から下へ提示することにより、段階的な説明を行うことができる。すなわち、“2つの集合  $A^c \cup A$  と  $\Omega$  が等しいとは、venn 図におけるそれらの領域が等しいことである。集合  $A^c \cup A$  の venn 図における領域とは、2つの集合  $A^c$  と  $A$  の結び (union) である。…” といった説明を繰り返す

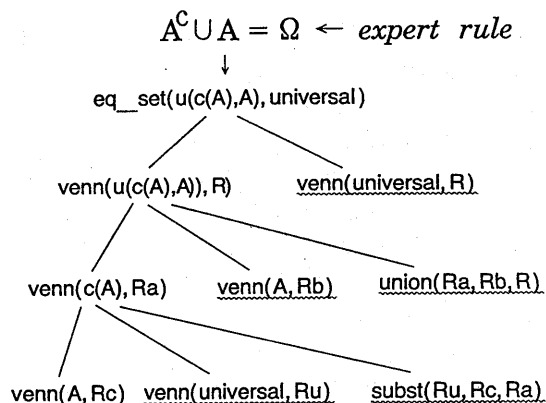


図4 領域概念モデルによる説明

ことが可能である。この場合、各 leaf は領域の公理 (定義) に該当するので、それ以上細かく説明することはしない。

## 2.2 学習者の概念モデル

学習者の深層的理解状態は、領域概念モデルを用いて表現される。すなわち、本来は  $S_0$  といった構造の領域概念モデルをもつ学習世界において、学習者の信念体系が  $S_D$  なる構造であるならば、 $S_0$  と  $S_D$  における構造の違いとして学習者の理解状態がモデル化される。以下、 $S_D$  を学習者の概念モデルと呼ぶ。

ここで提案する領域概念モデルおよび学習者の概念モデルは、MOD 学習者モデル [1] の一般化である。MOD 学習者モデルでは、専門家のもつ知識構造に学習者の習得知識構造をオーバーレイさせ、状態の差異を見つけ出すことによって学習者の理解状態をモデル化する。ここでは、専門家のもつ知識集合が領域概念モデルに対応し、学習者の習得知識構造が学習者の概念モデルに対応している。その図式を図5に示す。図において学習者は、概念  $C_0$  に対する理解が十分ではないために、領域概念モデルには存在しない構造 “ $C_{S_1} \rightarrow C_D \rightarrow C_{S_2}$ ” を有する。こういった構造をここでは誤概念と呼んでいる。誤概念は、本来領域概念モデルには存在しないので、

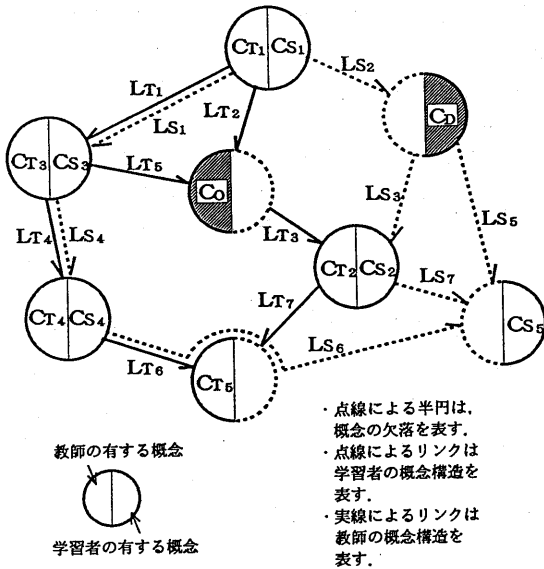


図5 MOD 学習者モデル

その構造を明示的に表現することは困難である。したがって、ここでは、誤概念を何らかの方法により表現するのではなく、それがどのような概念であるかを説明する機能を構築するものである。

上述した事柄を実現するために、具体的には、領域概念モデルにおいて表層的な学習者モデルと矛盾する知識(核概念と呼ぶ)を同定し、仮説推論の手法を適用して、学習者モデルを説明する仮説(解仮説と呼ばれる)を求める。システムの有する仮説集合の中に、解仮説が存在しない場合には、核概念を利用して、帰納的に仮説を生成する。その際、図2に示した *Hypotheses* が利用される。このように、学習者の表層的な誤りに対する根元的原因の説明を、領域概念モデルのプリミティブを用いて表現する。したがって、誤りに対する適切な治療を動的に決定することが可能になると思われるが、本稿では、教授戦略に関しては言及しない。

学習者モデル診断のための仮説推論の適用に関しては4章で、診断仮説の生成に関しては5章で、それぞれ述べる。

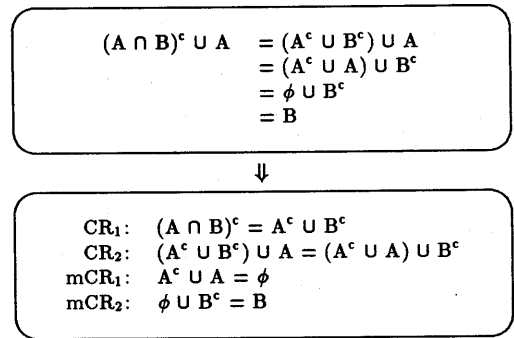


図6 変換規則の同定

### 3 解法知識の同定と表層的学習者モデル

システムは、学習者の入力した集合式の変換過程を1ステップごとに分割し、各ステップにおいて適用された解法知識を推論する。その図式を図6に示す。学習者が図の上半分に示した解答を行った場合、システムは学習者の解答の各ステップにおける変換された集合式を比較し、図の下半分に示した解法知識を同定する。同定された解法知識の表現において、CR<sub>i</sub>は正しい変換規則を表し、mCR<sub>i</sub>は誤った規則を表す。

ここで想定する表層的な学習者モデルは、問題解決に必要な手続き的な知識に関する学習者の表層的な理解状態を表現する。具体的には、図6の下半分に示された表現形式による解法知識のデータベースとして、学習者モデルが構築される。次に、表層的学習者モデルを構築する具体的な手法について説明する。

システムはまず、学習者から観測された解法知識の正誤を判断する必要がある。正しい解法知識は、解法エキスパートの解法知識(エキスパート知識)から導出することが可能である。したがって、正しい解法知識を判定することは比較的容易である。他方、エキスパート知識からの導出と矛盾する規則<sup>1</sup>に対しては、一般にそれが誤りであることをシ

<sup>1</sup>例えば図6のmCR<sub>1</sub>では、エキスパート知識を利用すると  $A^c \cup A = \Omega$  となり、mCR<sub>1</sub>とは矛盾した結果になる。

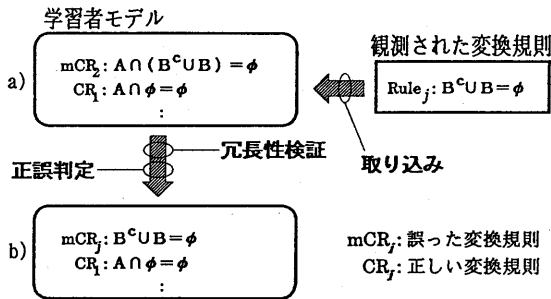


図7 学習者モデルの構築

システム内部で証明することはできない。しかし、ここで想定するエキスパート知識は、いわゆるヒューリスティックな知識を表現したものではなく、対象学習世界における公理に基づく定理の集まりである。したがって、エキスパート知識からの導出と矛盾する規則に対しては、誤りであると判断している。

さて、上述したようにシステムは、解法過程において観測される解法知識を蓄積することにより、学習者モデルを構築する。その際、冗長な要素を排除する機能を有する。すなわち、新たに同定された規則を学習者モデルに取り入れたために、既に学習者モデルに存在していたある規則が、他の規則集合から導出可能となった場合(あるいは、その逆の場合)には、それを冗長な要素として排除する。図7にその図式を示す。本システムにおける表層的学習者モデルは、式変形の過程において、学習者の適用した式変換の規則に対して、正しい規則と誤った規則を同時に蓄積していくといった、知識獲得的な機能を有するデータベースであるといえる。

#### 4 仮説推論を利用した誤概念の診断機構

一般に、学習者が有する誤概念は、領域概念モデルおよびエキスパート知識からは説明できない場合がある。そこで、学習者の概念モデルを説明するために、診断的な仮説推論を適用する。仮説推論は、既知の事実集合(F)から新たに観測された状況(O)を説明できない場合に、前もって与えられた仮

説の集合(H)から観測事実Oを説明する仮説(解仮説:h)を求める推論方式である[3, 6]。

仮説推論を診断システムとして応用する場合には、診断的な仮説集合として、対象世界における機能上の観測事象(症状)とその原因の記述を与える。そして、システムは、観測事実としての症状に対する説明(症状を誘発した原因)を仮説集合から求める[4]。

ITSにおける学習者のmisconceptionを診断するための仮説推論は、学習者モデルが表現する知識状態Oに対して、エキスパート知識Fだけでは説明できない構造S(表層的学習者モデル)を説明する問題に対応する。すなわち、学習者の誤概念を説明しうる診断的な仮説集合(H)を与え、学習者の知識構造Sを部分的に説明する解仮説(h)を選択する機構である。その図式を図8に示す。

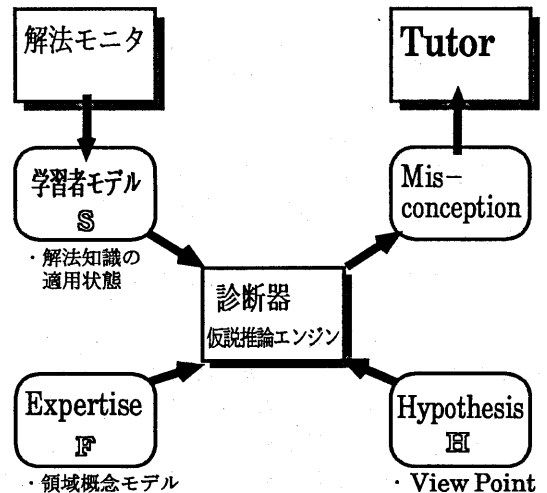


図8 学習者モデル診断のための仮説推論

これまでに述べてきた事柄をまとめると、本研究における仮説推論を利用した学習者モデル診断の枠組みは次のようになる。システムは、解法過程モニタを利用して、学習者が適用した解法知識を推論し、表層的な学習者モデルS(観測事象Oの集合)を構築する。学習者モデルSが誤りを含んでいる場合、一般に解法エキスパートの解法知識Fでは、Sを説明することが出来ない。そこで、予め与えられた診断のための仮説集合Hの中で学習者モデル

を説明しうる仮説(解仮説:h)を求める。既存の仮説集合の中に解仮説が見いだされない場合、領域概念モデルを利用して、次に述べる方法により新たな仮説を生成する。

## 5 領域概念モデルを利用した仮説生成

前述したように、システムには、診断のための仮説集合(H)が予め与えられているが、実際には、Hに解仮説が存在しない場合が起こりうる。そこで、システムには、動的に仮説を生成する機能が望まれる。本章では、領域概念モデルを利用し、エキスパートに事実(定理)として認められている知識から帰納的に誤り診断のための仮説を生成する機構について説明する。

図9は、学習者が $A^c \cup A = \phi$ といった変換規則を適用した状態を示している。システムは、領域概念モデルを利用して、学習者の適用した変換規則の説明を試みる。学習者の適用した変換規則が誤っている場合には、一般に、領域概念モデルによる説明は失敗する。そこで、説明の過程における矛盾を解消するために、領域概念モデルにおけるHypotheses型の知識を書き換えて新たな仮説を生成する。

図9では、 $eq\_set(.,.)$ のbodyに対する単一化が矛盾している。すなわち、 $venn(u(c(A),A),R)$ と $venn(empty,R)$ のRに対する単一化に失敗する。そこでシステムは、矛盾を解消するために、 $venn(empty,universal)$ および $venn(u(c(A),A),[])$ といった仮説を生成する(図9a)。後者はさらに、 $venn(u(X,Y),.)$ の知識と矛盾する。システムは、この矛盾を解消するために、正しい知識における $union(.,.,.)$ を $intersection(.,.,.)$ に置き換えた知識を仮説として生成する(図9b)。

## 6 診断仮説の絞り込み

5章で説明したように、システムは学習者の応答に対して、可能な限り診断仮説を選択・生成する。選択・生成された各々の診断仮説には、適切さに関する情報はないので、どれも等しく仮説の候補として考えられる。そこで、実際に教授を行うために、

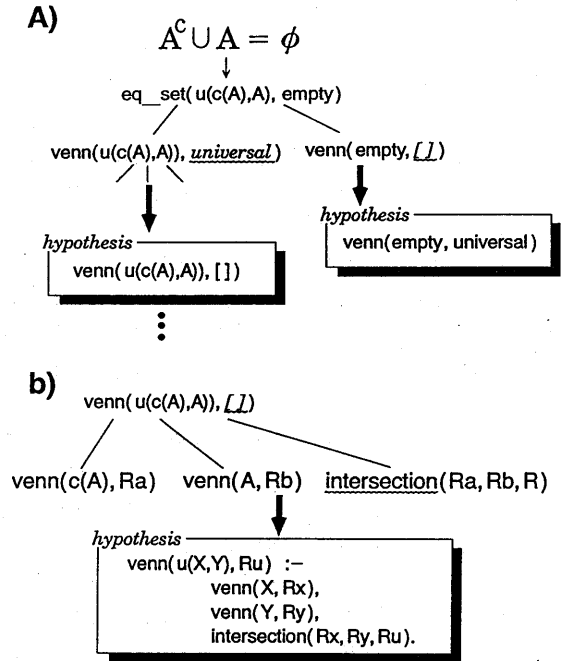


図9 領域概念モデルを利用した仮説生成

複数の仮説の候補を絞り込み、直接学習者の誤りを誘発した解仮説を求める必要がある。

最も簡単な仮説の絞り込みは、仮説の候補全てに対して、学習者に問いただすことにより実現される。しかしながら、この方法では、学習者の負担が大きくなり、教育的に望ましい形態ではない。そこで、システムが内部的に仮説の絞り込みを行う必要があるが、筆者らは仮説の絞り込みにおいて、人間教師の誤り原因に対する仮説の非単調な処理機構に着目している。すなわち、ある時点において想定された仮説は、必ずしも正しいとは限らないので、それ以後の教授の展開において棄却される可能性がある。教師は、“この学生はこの概念が分かっていないかもしれない”といった程度の仮説に基づいて教授を展開する。ITSにおいては、このように動的な仮説の生成・棄却機構の実現が望まれる。そのため筆者らは、仮説のしぼり込みにおいて、観察事象と仮説の因果関係に基づく真理値保全機構(Truth Maintenance System)を適用し、仮説の非単調な生成・棄却機構を実現する試みを現在検討している。

その構造を図10に示す。

## 7 おわりに

解法知識の適用状態を表現した表層的な学習者モデルから、対象領域の公理系に対する深層的な理解状態を診断する手法について述べた。

表層的な学習者モデルは、問題解決過程における解法知識の適用状態を表現している。これは、解法エキスパートおよび解法知識を利用した解法過程モニタにより構築される。学習者の深層的な理解状態を診断するために、領域概念モデルと呼ばれる対象領域の公理系を表現したモデルを記述した。領域概念モデルを利用することにより、解法エキスパートの問題解決過程に対する公理的な説明を行うことが可能である。さらに、学習者の誤り原因に対する診断仮説を動的に生成することが可能である。

学習者の深層的な誤り原因を説明するために、仮説推論の枠組みを適用した。ここでは、診断のための仮説は、上述した領域概念モデルに基づく記述が行われている。すなわち、学習者の概念モデルは、領域概念モデルに対するゆがんだ構造としてモデル化される。

現在、本稿で述べた学習者モデルを組み入れたシステムとして、集合論におけるITSのインプリメントを進めている。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(奨励研究(A):02780251)による。

## 参考文献

- [1] 岡本敏雄. “知的CAIのための教授世界知識の表現とその推論の方法”. 信学論D, Vol. J70-D, pp. 2658-2667, 1987.
- [2] 松田, 岡本. “ITSにおける仮説推論を利用したmisconceptionの抽象化について”. 信学技報, Vol. AI90-7, pp. 43-50, 1990.
- [3] 國藤進. “仮説推論”. 人工知能学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 22-29, 1987.
- [4] D. Poole, R. Goebel, and R. Aleliunas. “Theorist: A Logical Reasoning System for Defaults

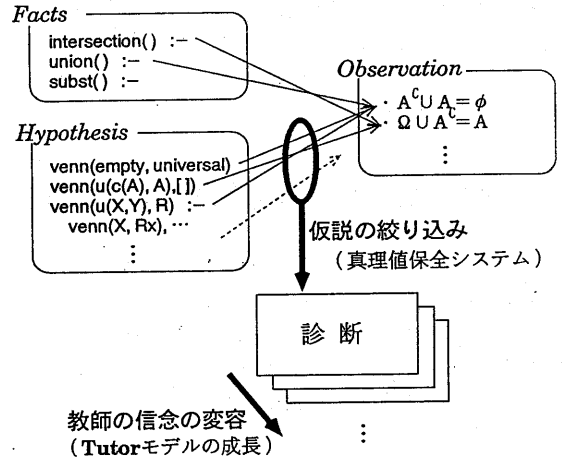


図10 仮説の絞り込み

and Diagnosis”. In N. Cercone and G. McCalla (eds), *The Knowledge Frontier: Essays and the Representation of Knowledge*, pp. 331-352, Springer-Verlag, 1987.

- [5] M. Polson and J. Richardson. *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1988.
- [6] D. Poole. “A Logical Framework for Default Reasoning”. *Artificial Intelligence*, Vol.36, pp.27-47, 1988.
- [7] E. Wenger. *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1987.