コンピュータと教育　10－6
(1990. 4.25)

非単調推論による深い学習者の理解のモデル化について

On modeling for learner's deep understanding by non-monotonic reasoning

岡本　敏雄　　森広　浩一郎
Toshio OKAMOTO　　Koichiro MORIHIRO
東京学芸大学
Tokyo Gakugei University

一般に，学習者が持つ学習世界に対する公理系はその学習者独自のものであり，エキスパート知識の構成する公理系とは異なっていると考えられる．本研究では学習者モデルを，この学習者が持つ独自の公理系を反映させた形で構成することを試みる．これにより，深く学習者の理解をモデル化する．

本システムでは，この公理系を反映した学習者モデルの管理を行う際に非単調推論，特にデフォルト推論の技法を，また一貫性を管理する際にＴＭＳを用いている．

キーワード：知的ＣＡＩ　ＩＴＳ　学習者モデル　非単調推論　デフォルト推論　ＴＭＳ

１．はじめに

一般にＩＴＳは，対象領域のエキスパートとしての知識ベース，学習者の理解状態を表現する学習者モデル，個別指導の方法を決定する指導戦略決定モジュール，及びインタフェイスから構成されている．これらの各モジュールが持つ，あるいは生成する情報がシステムの内部で相互に利用されることにより，全体としてＩＴＳの機能が遂行される．本研究では，特に上記の学習者モデルの生成について考察する．

学習者モデルの生成については，すでにさまざまな視点からの議論[1]がなされてきている．池田[4]らは，仮説推論の枠組みを用いて，一貫性が失われたデータからのモデル推論アルゴリズムを開発している．

本研究では学習者モデルをエキスパート知識との知識の過不足という視点から比較して構成するのではなく，学習者が持つ学習世界に対する公理系を反映した形で構成することを試みる．ここで学習者が持つ公理系とは，学習者の誤りも含んだ理解状態を信念と捉えたものである．この公理系を学習者モデルに反映することで，いわゆるバグの同定，再現を目的とした学習者モデルよりも，深く学習者の理解をモデル化することが可能になると思われる．

この公理系を学習者モデルに反映させるためには，否定の知識，矛盾する知識などの利用，管理が必要となる．このため本システムでは，学習者モデルの生成の際に非単調推論エンジンとＴＭＳを用いる．特に，学習者の理解は完全な形での知識とはなっていないことを考慮し，非単調推論としてはデフォルト推論を用いることとした．

また，このようなモデルを構成することで，システムはより適切な指導戦略を決定できると思われる．

２．研究の目的

本研究の目的は，上記の考え方に基づき，学習者モデルを学習者の持つ公理系を反映した形

で構成し，より深く学習者の理解をモデル化することである．そして，これを実現する具体的なシステムを構築することである．

3．システムの構成と動作

本システム全体の構成と，その基本的な動作について以下に示す．今回のシステムが教授する学習世界としては，宣言的，因果的な構造を持つ世界を設定している．すなわち，光合成の教授学習過程や，数列の極限の同定問題などである．ここでは，光合成の教授学習過程について以下に述べる．

3．1　システム構成

上記の目的を達成するため，本システムの基本的な構成は，図1に示される各モジュールからなる．それぞれのモジュールは学習の流れの中で，必要に応じ呼び出され機能する．

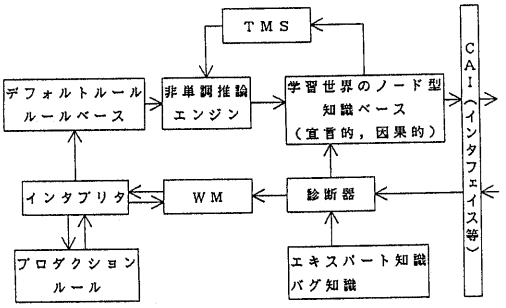

図1　システムの基本構成

知識ベースとして，あらかじめ学習世界を構成する概念をＴＭＳによって管理可能な形式で表現する．この知識ベースは，学習世界を構成する正しい概念を表現するものである．この知識ベースの知識を書き換え，または，新たに知識を加えることで学習者モデルを生成する．

診断器は，システムが持つエキスパート知識，バグ知識を利用して，回答の正誤と，学習者がどのような知識を用いて回答を導いたと考えられるかを診断する．すなわちこの診断器は，表面的な学習者の理解状態を診断することになる．

ルール作成器は，表面的な理解状態の診断結果から，学習者が持つであろう学習世界における概念間の依存関係のルールを推論し，作成する．このルールはデフォルトルールの形を認めるものとする．

ＴＭＳは，学習世界を表現した知識ベースを学習者の持つ概念間の依存関係のルールによって書換える際に，知識ベースの一貫性を管理する．これにより知識ベースは学習者の持つ公理系を反映した形で構成されることになり，より深く学習者の理解をモデル化することになる．本システムでは，この知識ベースを学習者モデルとする．

3．2　基本的な動作

本システムの基本的な動作の流れを，図2に示す．

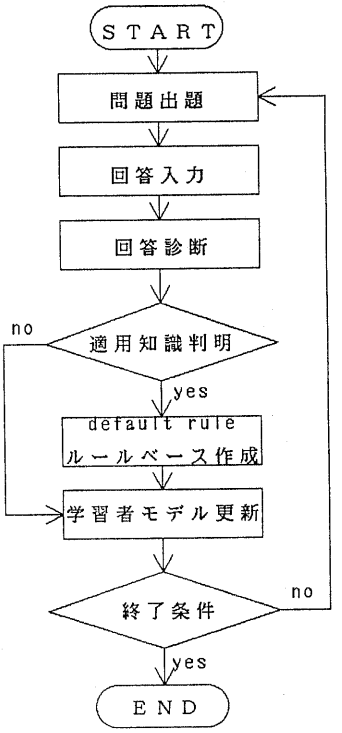

図2　システムの基本動作

学習開始の段階においては，理想的な知識ベースをそのまま教え，問題を出題する．学習者はこの問題に対する回答を入力し，システムはこの回答を診断器にかける．

診断器は，システムが持つエキスパート知識，バグ知識を用いて学習者の表面的な理解状態を診断する．すなわち，回答の正誤，学習者が用いたであろう知識の同定を行う．この診断により現在出題された問題の構造に対し，以下の情報が得られる．

（１）学習者が導いた回答
（２）学習者の回答の正誤
（３）回答を得る知識がシステムに存在するか
（４）存在するならばその知識

これらの情報は，一時的にワーキングメモリに蓄えられる．

推論開始の条件が満たされたならば，ルール作成器はワーキングメモリに蓄えられた情報をもとに，ルール作成知識を用いてルールの作成を行う．

ここで生成されるルールは，学習者の持つ概念間の依存関係を記述するものである．これが学習者の持つ概念間の信念，すなわち公理系である．これを非単調推論のためのルールベースとして，学習世界を表現する知識ベースへ適用する．この結果，書き換えられた知識ベースが学習者の公理系を反映した学習者モデルとなる．

以降の学習は，この学習者モデルに基づき推論された教授戦略にもとづいて展開される．

４．各モジュールについて

以下において，本システムを構成する各モジュールについて説明する．主として，学習者モデルの生成法について述べる．

４．１　解法エキスパート

解法エキスパートは，問題解決器とエキスパート知識からなる．解法エキスパートは，エキスパート知識を利用して学習世界の問題を解く．これがシステムの生成する解答となる．

エキスパート知識は，学習世界を表現する知識ベースのノード間の因果関係の設定にも用いられている．あらかじめ用意された知識ベースに対し，エキスパート知識をルールベースとして推論エンジンを起動する．これにより知識ベース内のノードから他のノードが導けた場合に，導かれたノードの理由付けを知識ベース内に付加することができる．

４．２　学習者モデルの生成法

学習者モデルは，次の各モジュールにより生成される．

４．２．１　知識ベース

本研究では，一般的には対象となる学習世界として，宣言的，因果的な世界を設定している．ここでは具体的な世界として，植物の光合成についての世界を扱う．

学習者モデル生成のためのテンプレートは，この学習世界を構成する概念を意味ネットワークで表現し，これをＴＭＳで管理できるノードの形式によって記述した知識ベースである．知識ベースは以下の図３に示す４引数のファクト形式で記述されている．

```
node(Id,Fact,Reason,Io).
    Id      ：自然数
    Fact    ：リテラル
    Reason  ：リスト，または項
    Io      ：in，または out
```

図３　知識ベースの書式

第１引数は，知識ベースにおける当該ノードのＩＤ番号である．第２引数は，具体的な知識である．知識の表現としては，肯定，否定の記述を認めた意味ネットワークの形式である．第３引数は，Fact を導いた理由付けである．知識ベース内の他のノードのＩＤ番号のリストによって構成される．第４引数は，Fact に対する現在のシステムの信念の値である．値域は，{ｉｎ，ｏｕｔ}である．

この知識のｉｎ，ｏｕｔ状態によって第３引数で示される学習世界に関連する概念が，学習

者に存在するか否かが表現される．また，理由付けによって，学習者における概念間の依存関係が表現される．

具体的な例として現在設定されている知識ベースの一部を図４に示す．

```
node(8,is_a(桜,植物),[仮定,[],[]],in)
node(9,have(植物,葉緑素),[仮定,[],[]],in)
node(10,do(植物,光合成),[仮定,[24],[27]],in)
node(14,need(光合成,葉緑素),[仮定,[],[]],in)
node(20,is_a(きのこ,植物),[仮定,[],[]],in)
node(21,not(have(きのこ,葉緑素)),[仮定,[],[]],in)
node(26,want_do(きのこ,光合成),[根拠,[23,15]],in)
node(29,do(桜,光合成),[仮定,[25],[28]],in)
node(30,not(can(きのこ,光合成)),[根拠,[26,14,57]],in)
node(31,do(きのこ,光合成),[仮定,[26],[30]],out)
node(57,not(use(きのこ,葉緑素)),[根拠,[40,21]],in)
node(63,not(do(きのこ,光合成)),[根拠,[30]],in)
```

図４　知識ベースの具体例（一部分）

４．２．２　診断器

診断器は，エキスパート知識，バグ知識を利用して学習者の回答を診断する．この段階でなされる診断は，学習者の表面的な理解状態に関する診断である．

学習者の回答とシステムの生成した解答のマッチングがとれた場合，学習者の回答は正解とみなされる．さらに，この回答の際に用いられたエキスパート知識を学習者が持つ可能性があることをワーキングメモリへ記録する．

学習者の回答とシステムの解答のマッチングがとれない場合，学習者の回答は誤答とみなされる．この時，診断器はエキスパート知識とバグ知識とを組み合わせて用いることで，学習者の回答が生成可能であるか否かを推論する．すなわち，問題解決器の推論エンジンが用いる知識をエキスパート知識に限定せず，バグ知識も用いて推論を行う．この時，学習者の回答が推論結果として得られたならば，推論過程に用いられた知識を学習者が持つ可能性があるとみなし，ワーキングメモリへ記録する．この診断は，最終的なものではなく，学習者モデル生成に用いるデフォルトルールの作成のために行われる診断である．したがって診断の目的は，いかなる知識から回答が導かれたかの知識の依存関係を得ることである．

診断器が回答は誤答であると診断しながら，エキスパート知識とバグ知識との組み合わせでは学習者の回答が生成不可能な場合，その事実と，回答がワーキングメモリへ記録される．

４．２．３　デフォルトルールの生成

診断器により，ワーキングメモリへ蓄えられた情報をもとに，学習者の概念間の依存関係を記述するルールを作成する．作成されるルールの形式は以下の図５で示すデフォルトルールである．

$$\frac{\alpha_1(x),\cdots,\alpha_m(x):\ M\beta_1(x),\cdots,M\beta_n(x)}{\omega(x)}$$

図５　デフォルトルールの形式

ワーキングメモリ内には，学習者が導いた結論すなわち回答と，用いた知識が蓄えられている．エキスパート知識，バグ知識と知識ベース内のノードとの関連知識を用いて，学習者に用いられた知識に関連する知識ベース内のノードのリストを生成する．これをデフォルトルールの前提部 $\alpha_1(x),\cdots,\alpha_m(x)$ とする．結論部の $\omega(x)$ には，学習者の回答をそのまま利用する．

上記の手順で得られたデフォルトルールの条件部，学習者の回答，回答の正誤をもとにデフォルト部をプロダクションシステムの手法で生成する．この時用いられるプロダクションルールは，以下の形式で表現される．

```
rule([Diag|Cond],Hyp).
    Diag    :wrong, correct
    Cond    :中間仮設，α(x)
    Hyp     :中間仮説，β(x)
```

図６　プロダクションルールの形式

ここで，Diag は回答の正誤値，Cond は知識ベースのノードまたは，中間仮説からなるリストである．また Hyp は，中間仮説または，デフォルト部となるべき知識ベース中のノードである．特別な場合には，Hyp に中間仮説として生成不可能が与えられることもある．

これらのプロダクションルールを，学習者から得られたm個の回答に対しそれぞれ適用することで，n個（m≧n≧0）のデフォルトルールのデフォルト部 $M\beta_1(x),\cdots,M\beta_n(x)$ を生成する．これによって完成されたn個のデフォルトルールからなるルールベースを，学習者モデル生成のため知識ベース書換に用いる．

学習者の回答を生成する知識がシステムの内部に存在しない場合には，学習者の知識と知識ベース内のノードとの依存関係が，システムには求められない．この場合には，条件部なしのルール，すなわち事実として，学習者の回答だけをそのまま知識ベースに組み込む．

4．2．4　非単調推論エンジン

非単調推論エンジンは，ルール作成器により作成されたデフォルトルールからなるルールベースを，学習世界を構成する知識ベースへ適用する．推論の方式としては，作成されたルールの形状からデフォルト推論である．

すなわち，ルールの条件部の条件がリテラル f(x) の場合は，node(Id,f(x),Reason,in). が知識ベース内に存在するならば条件は満たされたことになる．また，条件が m(f(x)) である場合には，同様に node(Id,f(x),Reason,in). または，node(Id,not(f(x)),Reason,out). が存在するならば条件は満たされたことになる．これにより，条件部を構成するすべての条件が満たされた場合，知識ベースに結論部の知識を表わすノードをつけ加える．

この際に，条件の成立を確認した各ノードのＩＤ番号のリストを理由付けとして，第３引数に記録する．第３引数の書式としては次の図７に示す４種類が存在する．

```
前提
[根拠,In_node]
[仮定,In_node,Out_node]
[CP,List]
```

図７　知識ベース第３引数の書式

In_node は，ノードがｉｎ状態であることによって条件の成立が確認されたノードのＩＤ番号のリストである．同様に，Out_node はｏｕｔ状態で条件が確認されたノードのＩＤ番号のリストである．すなわち，理由付けが，根拠で与えられたノードは，演繹的な推論によって導かれたノードである．

また，理由付けが仮定で与えられたノードは何らかのデフォルトを元にして，仮定的に導かれたノードであることを示す．したがって，矛盾の解消を理由付けとして，システムによりｉｎ，ｏｕｔ値が変更される可能性のあるノードである．

前提は，学習者の主張を条件部なしで知識ベース内に取り込んだ直後にのみ与えられる．この時点においては，理由付けの変更を行わないノードである．矛盾解消の後に理由付けを変更し，現在のルールベースにもとづく理由付けを行う．

最後の型は，矛盾点が発生した際に矛盾解消のためＴＭＳによってつけられる．特殊な理由付けである．

4．2．5　ＴＭＳ

ＴＭＳは，学習世界を表現した知識ベースを用いて生成した学習者モデルに信念の変更が生じた，または矛盾点が発生した場合に起動される．

ＴＭＳは知識ベース内のノードの第３引数を参照して assumption based backtrack を行い，学習者モデルの一貫性を管理する．すなわち，あるノードがｉｎ状態からｏｕｔ状態へ変更された場合，このノードのＩＤ番号を第３引数の第２成分リスト内に持つノードをｏｕｔ状態へ変更する．また，あるノードがｏｕｔ状態からｉｎ状態へ変更された場合，このノードのＩＤ番号を第３引数の第３成分リスト内に持つノードをｏｕｔ状態へ変更する．

矛盾点の発生自体については，排中律の不成立により，推論エンジンから通知される．解消しきれない矛盾点が残った場合，学習者が矛盾した概念を持つとして，ＴＭＳは処理を停止する．

4．3　学習者モデルの解釈

学習者の回答によって変更された知識ベースと理想状態の知識ベースの差異としては，以下

に示す図８の状態が考えられる．理想状態とは，初期状態の知識ベースにエキスパート知識のみを適用して書き換えたものである．

知識を表現するノードが

（１）理想状態，学習者モデルでともにｉｎ
（２）理想状態でｉｎ，学習者モデルでｏｕｔ
（３）理想状態でｏｕｔ，学習者モデルでｉｎ
（４）理想状態，学習者モデルでともにｏｕｔ
（５）理想状態になく，学習者モデルでｉｎ
（６）理想状態になく，学習者モデルでｏｕｔ

図８　知識ベースのノード状態

以上の６種類の状態である．なお，一度知識ベース内に存在したノードは，ｉｎ，ｏｕｔの値が変更されることはあるが，システムの中から完全に消えてしまうことはない．

（１），（４）の場合においては，理想的な状態である．学習者は正しい概念を持つ，正しい概念に対立する概念は持たないとみなされる．
（２）の場合においては，学習者は本来持つべき正しい概念を欠落しているとみなす．
（３）の場合においては，学習者が正しい概念と対立する概念を持つとみなされる．
（５），（６）の場合には，システムには存在しなかった学習者の独自の知識とみなされる．

特に（５）は学習者が持つ概念とみなされるが，正しい概念のｉｎ，ｏｕｔ状態に影響を与えない場合には，特に問題にしていない．

５．今後の課題

現在，診断器の段階では適用知識集合の競合は考慮されていない．またバグルールを増やした場合の適切な絞り込みが必要である．

デフォルトルールの作成において，ルールのデフォルト部の決定は，プロダクションシステムのルールベースに依存する．したがってルールベースを適切なものにせねばならない．また，現在考慮している条件以外に考慮すべき条件についての考察が必要である．

また生成されたルールベースが，自己矛盾を含むことがないよう生成されねばならない．この為には，ルール自身も知識ベース内のノードとして管理できないかなどの考察が必要である．

６．引用参考文献

［１］Vanlehn,K., Student modeling, Polson, M.C., Richardson,J.J.: Foundations of Intelligent Tutoring Systems, pp.55-78, Lawrence erlbaum associates publishers, (1988)

［２］McDermott,D., Doyle,J.: Non-Monotonic Logic I, Artificial Inteligence, Vol.13, pp41-72, (1980)

［３］Poole,D., Goebel,R., Aleliunas,R.: Theorist:A Logical Reasoning System for Defaults and Diagosis, in N.Cercone and G.Mcalla (Edt.), The Knowlege Frontier: Essays and the Representation of Knowlege, pp.331-352, Springer, (1987)

［４］池田満：”知的ＣＡＩのための汎用フレームワークに関する研究”，大阪大学工学研究科博士論文，pp.19-65，(1989)

［５］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”，電子情報通信学会論文誌Ｄ，Vol.J70-D, pp.2658-2667，(1987)

［６］岡本，松田：”知識獲得指向の高次推論型学習者モデルの構成について”，「教育におけるコンピュータ利用の新しい方法」シンポジウム論文集，pp.189-197，情報処理学会，(1989)

［７］辻井潤一：”知識の表現と利用”，昭晃堂，(1987)

［８］中川幹夫 訳：”ＴＭＳを用いた問題解決”，佐伯胖 編：認知科学の基定，産業図書，(1986)

［９］高野真：”Prologで学ぶＡＩ手法”，啓学出版，(1988)