

手続き的教材教育のための I T S における学生モデル構築と教育戦略

鈴木 信夫 池田 満 溝口 理一郎 角所 収

大阪大学産業科学研究所

本稿では、手続き的教材の教育を行う I T S (Intelligent Tutoring System) における学生モデル構築方法と教育戦略について報告する。我々は、Shapiro の M I S (Model Inference System) をベースとして手続き的教材教育のための学生モデル推論システムを開発した。本システムは、教科・教材に依存しない枠組みで設計されており、教材固有の知識を用いた他のモデル化手法に比べて推論の効率の面で問題があった。本報告では、教材固有の知識を汎用な部分とは独立に導入して、モデル推論の効率化を行う手法について報告する。

柔軟な教育を行うためには、学生の誤りや学生の能力及び過去の行った教育結果等、様々な情報に基づいて決められた対話を行う必要がある。本報告では、これらを踏まえ汎用性の観点から整理された教育戦略部の枠組みについて報告する。

Student Modeling and Tutoring Strategy
for an Intelligent Tutoring System of Procedural Material

Nobuo SUZUKI Mitsuru IKEDA Riichiro MIZOGUCHI Osamu KAKUSHO

ISIR, Osaka Univ.

8-1, Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka 567, Japan

This report describes two issues about construction of an ITS (Intelligent Tutoring System) for procedural material. One is about improvement in efficiency of the student model inference method which is based on Shapiro's MIS (Model Inference System). The efficiency is attained by incorporating domain specific knowledge into the model inference method without losing generality.

The other concerns domain independent tutoring strategies for procedural material. Every instruction provided by the strategies is characterized by two elements that is, dialogue type and example type. Ten types of dialogue and six types examples have been prepared so far. The tutoring module decides the two elements to give an adaptive instruction for individual student on the basis of student's bugs, his/her ability and discourse history.

1. はじめに

I T S (Intelligent Tutoring System)の研究は、人間の教師がもつ様々な技能を計算機上を実現することを目標としている。我々は、教科・教材に依存しない I T S の汎用フレームワークについての研究をすすめ、手続き的教材の教育を行う汎用フレームワークを提案した。^[1] このフレームワークは、既に我々が提案した宣言的教材の教育を行う汎用フレームワーク^[2]の設計思想及び構築方法を基にしており、学生モデル構築に帰納推論を採用しているのが特徴である。この帰納推論という形式的な枠組みはモデル構築の完全性が保証されるが、学生に多量の質問を行ったり、探索空間が膨大になるためモデル同定に多量の資源を使用するという実用上の問題点がある。本稿では、これらの問題に対処するためのメカニズムを提案する。

Burton が I T S における教育方針として“発見的学習法”を提案して以来^[3]、様々な教育戦略が提案されている。^[4]^[5]^[6]^[7] これらの研究成果は、学生の理解状態を把握し、学生の誤りに応じて適切な教育戦略を与えるという I T S の一つの目標に貢献するものである。しかし、ほとんどの教育戦略が教材知識の内容に強く依存しており、教材が異なると新たな教育戦略を開発しなければならないという問題点が存在する。そこで、本稿では、汎用性の観点から整理された対話戦略及びそれらを起動するメカニズムについて提案する。

2. 汎用フレームワーク

ここでは、我々が提案する汎用フレームワークの設計思想^[8]について簡単に述べる。汎用フレームワークを設計する際には、その領域で本質的なタスク(以下では、汎化タスクという)を見極め、それを処理するのに必要十分なモジュール(以下では、Building Block という)をフレームワークの構成要素として設計しなければならない。I T S の場合、各汎化タスクは人間の教師が持つ1つ1つの技能に相当する。大まかに整理すると、I T S における汎化タスクは以下の様になる。

- (1) 学生の理解状態のモデル化
- (2) 学生の誤りの分析
- (3) 学生に提示する教材(問題)の選択
- (4) 指導方略

我々は、Building Block の設計規範として、次の3点を重視している。

- (1) 対象とする問題空間を形式的に定義する
- (2) その問題空間における完全な問題解決器を設計する。
- (3) その問題空間において問題解決の効率化に貢献する付加的知識の導入を許す。

この観点から Building Block は、図1に示した3つの部分より構成される。規範(1)、(2)により各 Building Block は、問題解決の完全性が保証されている。しかし、この様に設計された問題解決器は汎用ではあるが、問題解決の効率が悪いことが一般に知られている。そこで、問題解決の効率化に貢献する付加的知識(この様な知識は、一般に領域依存の知識となる)を、問題解決器とは別に導入する枠組みを持つことにより、問題解決の完全性を損なわずに効率よく問題解決を行うことができる。

先に提案した^[1]学生モデル構築の Building Block においては、規範(1)、(2)に従って Shapiro の M I S^[9]をベースとした、学生モデルの帰納推論システムが、汎用問題解決器として設計されている。今回は、この問題解決器の効率を上げるために導入する付加的知識について報告する。また今回、新たに提案する教育戦略の Building Block もこの思想に沿って設計されており、付加的知識の導入による問題解決の効率向上とシステム全体の汎用性を両立した枠組みとなっている。

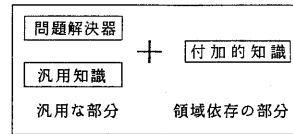


図1 Building Block の構成

3. 手続き的知識

3.1 手続き的知識の特徴

手続き的知識の特徴に、問題解決を行うための解法の多様性がある。例えば、一次方程式の問題に対しては、左辺に文字を含む項、右辺に定数項を集めるという思考に沿って計算するのが一般的な問題解決法であるが、逆に左辺に定数項、右辺に文字を含む項を集めて計算を行っても問題解決のゴールに到達することができる。この様に手続き的知識を用いた問題解決においては、解法が複数個あるのが一般的である。また同じ解法に基づいていても、問題解決に貢献する手続き的知識が複数個あるため、我々は手続き的知識をどのような順序で適用すればよいかという問題に直面する。これは、ある状態において適用できる知識が一般に複数通りあり、その適用順序に重要な意味があるからである。これらの特徴が手続き的知識の解法の多様性を産みだしており、知識の適用順序が重要でない宣言的知識との大きな違いである。

また手続き知識には、解法戦略を表した知識が有ると考えられる。人間は様々な戦略を用いて問題解決を行う。ある戦略に沿って問題解決を行う場合、人間はその戦略が持つ目標状態に達成するまで、戦略遂行に貢献する知識を適用する。即ち、解法戦略とは、その戦略内で適用する手続き的知識を規定し、問題解決を一定の思考過程にそって行うことを表した知識である。

そこで手続き的知識が持つ特徴を要約すると、以下に示す3つになる。

- ①ある状態において適用することができる知識が一般に複数個ある。
- ②競合する知識の中より適用する知識を決定するための別の知識が存在する。
- ③知識の適用順序に意味がある。
- ④解法戦略を表した知識が存在する。

3.2 手続き的知識の記述方法

先に述べた様に、手続き的知識を記述するためには、

- (1) 手続きの実際の操作を表した知識、
- (2) 現在の状況で、その知識の適用可能性を判定する知識
- (3) 適用できる知識が競合した場合に、現在の状況を基にその競合を解消するための知識

の3つの部分が必要である。そこで、本研究では(1)を手続き、(2)を基本適用条件、(3)を戦術的適用条件といい、この3つより構成される知識の事を手続き的知識と呼ぶことにする。手続き的知識をこの様に3つの部分に明確に分けた理由は、I T S システムの目的が学生の知識を教師の知識に近付けることにあり、手続き的知識を教育する場合、この3つの構成要素を全て効率よく伝達しなければならないからである。各構成要素を分離し、誤りのある構成要素だけに注目した教育を行う方が、全ての構成要素を絶えず注目しなければならない教育よりも、学生は理解し易いと考えられる。図2は、一次方程式における右辺移項の手続き的知識を記述したものである。手続き的知識には、その手続き的知識の目標状態を記述したゴールという知識が存在する。手続き的知識のヘッド部は、その第1引数に知識適用前の状態、第2引数に知識適用後の状態を表した変数を必ず持っている。またボディ部は、基本適用条件(B-cond)、戦術的適用条件(S-cond)、手続

右辺移項Goal(X):-true
 右辺移項(X, Y, S, P):-[右辺移項B-cond1(X, P)], {右辺移項S-cond1(X, P)},
 {項を取り除く(X, Z, S, T),
 符号変換する(Z, P, S, T, S1, T1),
 項を付け加える(P, Y, S1, T1)}
 右辺移項B-cond1(X, P):-0でない(P)
 右辺移項S-cond1(X, P):-定数項である(P)

図2 手続き的知識の例

きの3つの部分より構成されている。

手続き的知識を解釈する場合、現在の状態で基本適用条件が満たされる知識の中より、戦術的適用条件が満たされる知識が実行される。戦術的適用条件が満たされる知識が無かった場合は、基本適用条件のみ満たされる知識が実行される。基本適用条件を満たす知識が無い場合は実行は失敗する。

4. 学生モデル推論

4.1 MISによるモデル推論

我々は、ShapiroのMIS (Model Inference System)をベースとした学生モデル構築方法を採用している。MISは、推論の根拠となる事実と真理値のペア(これをオラクルという)を入力とし、全てのオラクルを説明するPrologプログラムを自動合成するシステムである。そこで、学生の応答をオラクルとしてMISに入力することによりPrologプログラムで表された学生モデルを得ることができる。手続き的知識の場合、学生の応答は問題における解答導出過程であり、ある解答導出過程と次の解答導出過程より、その導出過程で学生が用いた一般の手続き的知識をモデル推論することができる。また、学生がある解法戦略に従って問題解決を行っている場合、連続したいくつかの解答導出過程を抽象化し、戦略概念に対するオラクルとすることにより、そこで使われた戦略的な手続き的知識を推論することができる。図3に学生モデル推論の大まかな流れを示している。しかし、MISをそのまま用いてモデル推論することは、以下のような問題点がある。

(1) 学生への多量の質問

MISは、その推論課程で不足しているオラクルがあると、そのオラクルの真理値を要求する。学生モデル推論の場合、この動作は学生への質問に対応し、不足しているオラクルが多いと学生へ多量の質問を行うことになり、教育的観点からいって望ましくない。

(2) 負のオラクル獲得

MISが健全に動作するためには、真理値がtrueである正のオラクルと真理値がfalseである負のオラクルが必要である。学生の解答導出過程は、学生が正しいと考えて用いた手続きの適用結果を表しており、これらはすべてMISにおける正のオラクルになり、解答導出結果だけでは負のオラクルを獲得することができない。学生が適用しなかった手続き全てに負のオラクルを生成することは原理的には可能であるが、生成されるオラクルが膨大になり、また信頼性の面でも妥当とは言えない。

(3) モデル推論の効率

MISが学生のオラクルを説明する知識を生成する場合、MISはその知識を持つセマンティックを用いず、精密化という論理学的観点から機械的に知識の生成を行う。これにより問題解決の完全性は保証されるが、知識のセマンティックを用いてモデルを構築する他のモデル化手法に比べて推論の効率が悪くなる。

次にこれらの問題点を克服する方法について述べる。

4.2 オラクルのジェネレート

先に述べた問題点(1)、(2)は共にオラクルの問題であり、システムが自動的に正及び負のオラクルを生成することによ

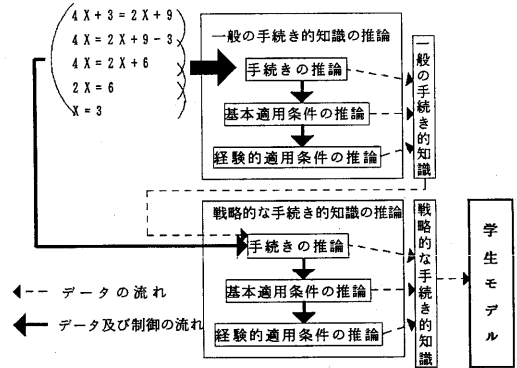


図3 モデル推論の概略

り克服される。戦略的な手続き的知識の手続き部のモデル推論に関しては、学生の連続した解答導出過程より正及び負のオラクルを自動生成する枠組みであるオラクルジェネレータについて、文献⁽¹⁾に報告している。ここでは、基本適用条件及び戦術的適用条件のオラクルの自動生成について説明する。基本適用条件及び戦術的適用条件は、その手続き的知識が適用できるかどうか及び適用すべきかどうかを表した知識であり、学生にその真偽を質問することは教育的観点からみて望ましいことではない。しかし、学生が知識を適用しなかった理由が、

- (1) その知識は適用できないと学生が考えているために適用しなかった(基本適用条件が false)
- (2) その知識は、適用することはできるがこの状況では適用すべきではないと学生が考えているために適用しなかった(戦術的適用条件が false)

このどちらであるかを学生の解答導出だけでシステムが自動的に判断することは不可能である。そこで本システムでは、学生モデルの手続き部の実行結果と教材知識の実行結果を根拠にして、基本適用条件及び戦術的適用条件のオラクルを自動生成する枠組みを採用している。表1にこれらの根拠に従

表1 生成されるオラクル

学生の手続き的実行	学生が使用	教材の手続き的実行	教材の基本適用条件	生成されるオラクル	
				基本適用条件	戦術的適用条件
t	○	*	*	→	y
t	×	t	t	→	y
t	×	t	f	→	n
t	×	f	*	→	y
f	×	*	*	→	n

t: 手続きが、成功する。
 f: 手続きが、fail する。
 *: Don't care
 y: true のオラクルを生成する
 n: false のオラクルを生成する
 φ: オラクルを生成しない

って生成されるオラクルを整理している。学生が手続き的知識を使用した場合、学生はその知識が適用可能であり、適用すべきであると考えているので教材知識の実行結果には関係なく、基本適用条件及び戦術的適用条件に true のオラクルを自動生成する。また、学生モデルの手続き部及び教材知識の手続き部が共に成功する場合は、教材知識の基本適用条件及び戦術的適用条件の実行結果を学生モデルのオラクルとする。両者の実行結果が共に成功する場合、学生の考えは、教材知識と非常に似通った関係にあると考えられるので、ここで生成されるオラクルも妥当であるといえる。

学生モデルの手続き部と教材知識の手続き部の実行結果が異なってしまう場合は、学生の考えは教材知識とは全く異なっていると考えられ、基本適用条件及び戦術的適用条件のセマンティックに合うようにオラクルを生成する。

4.3 Critic による推論の効率化

MIS において知識を生成するという事は、新しい Prolog の節を生成するという事に対応する。これは、精密化オペレータと呼ばれる節のボディに述語を付加したり、変数間の単一化等を行うオペレータを複数回適用することにより新たな節を得ることができる。図4に右辺移項の手続き的知識が生成されるまでの精密化オペレータの適用結果をグラフで表したものを(以下では精密化グラフという)を示している。ノードは生成された Prolog の節を表し、アークは精密化オペレータの1回の適用を表している。MIS は、この精密化グラフ上で幅優先探索を行い、オラクルを説明できるもっとも root ノードに近い節を生成する。先に述べたように MIS は、各ノードが表す知識のセマンティックを用いず、機械的に幅優先探索を行うので、学生の用いた知識が精密化グラフ上の root ノードよりかなり深い部分にある場合は、探索にかなり時間がかかる。

手続き的知識の各述語には、その知識適用前の問題解決の状態を表した入力変数と知識適用後の状態を表した出力変数が必ず存在する。複数の述語の and 構造でボディ部が定義されている手続き的知識において、各述語に存在するこれらの変数の間には、一つ前の述語の出力変数が次の述語の入力変数になるという関係が必ず成り立っている。これは、知識適用の対象が、直前に適用した手続き的知識の適用結果であるという妥当な問題解決状態の流れを表現したものである。そこで本システムでは、Shapiro が MIS で提案している入力変数及び出力変数の他に問題解決の状態を表した変数に関する新たな属性を定義し、この変数に関してはここで述べた変数関係を満足する単一化のみを行っている。これにより知識生成の効率をある程度上げることができる。

さらに本システムでは、領域依存の知識(以下では、Critic 知識という)を用いてノードに示されている知識に批評を加え、精密化グラフ上での探索順序を変更する枠組みを付け加えている。この枠組みは、先に述べた Building Block の設計思想における付加的知識に相当し、汎用問題解決器であ

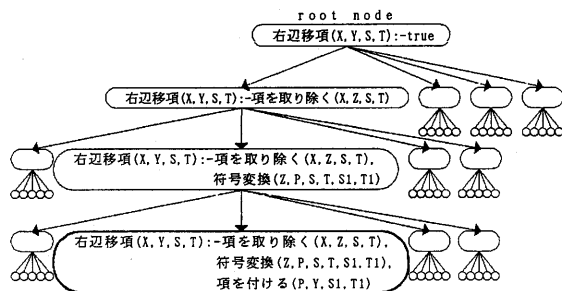


図4 精密化グラフ

る MIS の問題解決の効率化を向上させるものである。現在、一次方程式をドメインとしたシステムにおいて以下に示す3つの Critic 知識が記述されている。

- ①項を構成する符号と絶対値のペアに関する批評知識
- ②知識適用による状態の変化分に関する批評知識
- ③知識の操作対象の起源に関する批評知識

これらの知識について簡単に説明する。

まず①の批評知識に知識について説明する。方程式等で見られる項は符号と絶対値のペアで構成されており、このペアは固定的なものである。よって、ある項の絶対値と別の項の符号をペアとして新たな項を構成し、その項を操作対象とする知識を MIS が生成した場合、その知識は①の批評知識によって不適当と批評される。

図5は②の批評知識を満足する事例であり、MIS が説明しなければならぬ学生の解答導出過程と MIS が精密化オペレータによって作りだした知識(批評される知識)を示している。批評される知識のボディ部にある右辺移項という操作は、適用すると一次方程式の右辺及び左辺に何等かの変化をもたらす知識と考えられる。しかし、説明すべき学生の解答導出を見ても左辺は、知識適用の前後で $2*x+3$ と変化がない。即ち、この解答導出を説明する知識として右辺移項を含むこの批評される知識は、不適当であるという批評がつけられる。

説明すべき学生の解答導出：

$$2*x+3=1*x+9+5 \rightarrow 2*x+3=15$$

批評される知識：

一次方程式(X, Y):-定数項を見つける(X, Z, T),
右辺移項(Z, Y, T).

図5 批評される知識

最後に③の批評知識について説明する。操作対象が複数ある一次方程式の手続き的知識を実行する場合、全て別々の起源より生成された操作対象を用いているのが一般的である。例えば、定数加算という手続き的知識は、足す数と足される数の2つの操作対象を持つ。また、符号変換という手続き的知識は、入力した項を起源として、その項の符号部分を反転した項を生成する。図6の様に+3を足す数とし、+3を符号変換することによって得られる-3を足される数として定数加算を人間は一般に行わない。これは、定数加算の操作対象である+3と-3が、同じ起源より生成された項であるからである。MIS がこのような動作を行う知識を生成した場合は、③の批評知識によって不適当と批評される。

これらの Critic 知識で不適当と批評された知識を MIS が生成した場合、そのノードを根とする部分グラフの探索を一時的に保留し、他のノードの探索を優先することにしていく。このようにすることにより従来の MIS と比べて学生の解答を説明する節を効率的に生成することができる。現在、一

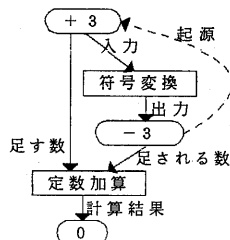


図6 操作対象の発起源

次方程式をドメインとし、これらの Critic 知識を導入した学生モデル構築の Building Block が計算機上にインプリメントされている。

我々はさらに、学生の誤りを正解知識より導出する領域依存の棋動オペレータについて考察し、精密化グラフ上でその学生の誤りと正解知識の共通の親となるノードを始点として M I S が探索を始める枠組みについて現在研究中である。この枠組みも Critic 知識と同様、M I S の外枠として付け加えることができる。

5. 教育戦略

学生の誤りを効率的に修正するためには、誤りの種類や学生の能力に応じた対話を学生に与える必要がある。‘発見的学習’は最終的な解答に至る思考過程を教授者が提示するのではなく、学生が自発的に誤りを発見し、正しい知識を習得するのに貢献する対話を行う教育戦略である。この発見的学習を行うシステムを構築するためには学習者の知的水準に合わせて、できる限り抽象度の高い対話を行う枠組みが必要である。これらを忠実に実行すると、対象となる教科・教材に強く依存した枠組みとなり、システムの汎用性が損なわれてしまう。そこで本節では汎用性を維持しつつ、最大限の教育が行える教育戦略の枠組みについて報告する。3節で述べた手続き的知識の記述形式を用いて学生モデルを構築すると、学生の誤りは大きく分けて(1)基本適用条件の誤り、(2)戦術的適用条件の誤り、(3)手続き部の誤りの3つに分類される。基本適用条件及び戦術的適用条件の2つの知識はそれぞれ自身が宣言的に記述されているため、(1)、(2)の誤りについては、我々が宣言的知識の教育戦略として提案した戦略 I B^[2]を採用することができる。以下では、(3)のあやまりの教育方法について述べる。

5.1 教育戦略ジュールの枠組み

図7に我々が提案する教育戦略モジュールのメカニズムを示している。本システムにおける対話は、起動する対話戦略の種類とそこで用いられる例題の種類2つの要素で決定される(この2つで決定されるものを以下では対話行動という)。動作を簡単に説明すると、教育履歴、教材知識及び学生モデルの情報を基に、起動する対話戦略の種類が決定される。次に対話で用いる例題の種類が決定される。例題の種類は先に決定された起動される対話戦略、教育履歴、教材知識及び学生モデルの情報を基に決定される。これらの決定はそれぞれ専用のプロダクションシステムで行われる。最後に、決定さ

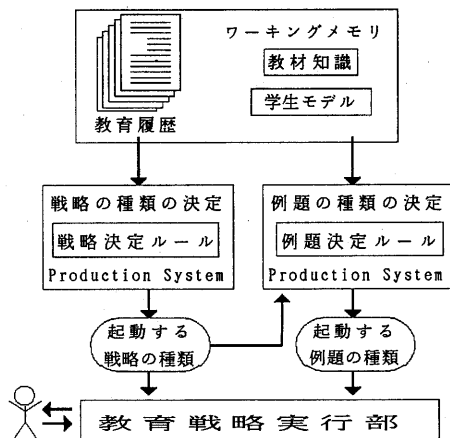


図7 教育戦略のメカニズム

れた対話行動を基にして教育戦略実行部が学生と対話を行う。この枠組みは、我々が宣言的知識の教育を行うために開発したスケジューリングメカニズム^[10]をベースとして開発されている。次に、本システムが用意している対話戦略について述べる。

5.2 対話戦略と例題の種類

現在本システムには、以下に示す10個の対話戦略が用意されており、これらは抽象度の高い順に整理されている。図8は、一次方程式の解法をドメインとした場合の対話例であり、全て右辺移項に関して符号変換を忘れていた学生の誤りに対する対話例である。

①操作概念の抽象化戦略

学生に与える質問の対象を、学生の誤りのあるクローズのヘッド、またはその上位に位置するクローズにすることにより質問を抽象化する対話戦略である。この戦略を用いることによって、もっとも高い抽象レベルのヒントを与えることができる。この戦略を起動する時、図8の(1)~(3)の様にどのレベルまで質問を抽象化するかを決定して学生に与える。

②ゴール評価知識による対話戦略

教材知識に記述されている手続き的知識のゴールの評価知識を用いる対話戦略である。ゴールの評価知識はその手続き的知識の目標状態を表した知識であるので、この戦略を用いることによって学生の解答が目標状態を満足していないことを伝えることができる。この戦略を起動する時、図8の(1)~(3)の様に質問の抽象レベルを決定して学生に与える。

③例題戦略

単に例題を出して学生に質問する対話戦略である。この戦略を用いることにより、学生とシステムの間で行われる話題の焦点を1つに合わすことができる。

④正解と誤りの対比による対話戦略

問題における学生の誤った解答と正解を対比させる対話戦略である。正解と学生の答えを対比することにより、誤りを発見するためのヒントを学生に与えることができる。

⑤誤りの種類を示唆する対話戦略

学生の誤りの種類を示唆する対話戦略である。この戦略を用いることによって、誤りを発見するためのヒントを学生に与えることができる。

⑥操作の説明による対話戦略

学生の誤りのある手続き的知識のクローズのボディ部の一部を任意に選んで質問の対象とし、学生と対話を行う戦略である。この戦略を用いることによって学生が誤っている部分に、ある程度焦点をあてた対話を行うことができる。この戦略を起動する場合、クローズのどの部分を選ぶかを決定しなければならない。

⑦解答導出のトレースによる対話戦略

学生または、教材が用いた解答導出課程を1ステップづつ説明する対話戦略。この戦略を用いることによって学生が行った操作の中で正しい部分及び誤った部分を示唆できる。

⑧解答導出の逆トレースによる対話戦略

学生または、教材が用いた解答導出課程を操作順序とは逆に、1ステップづつ説明する対話戦略。この戦略を用いることによって、ゴール思考に基づいた知識適用方法を学生に伝えることができる。

⑨直接指摘による対話戦略

学生の誤りを直接指摘する対話戦略。①~⑧までの戦略が失敗に終わったとき等は、この戦略を用いることにより学生の誤りを直接伝えることができる。

- ①操作概念の抽象化による対話戦略
- (1) $2x+3=6$ における一次方程式の途中結果は $2x=6+3$ になるのですか？
 - (2) $2x+3=6$ を右辺移項した結果は $2x=6+3$ になるのですか？
 - (3) $2x+3=6$ の $+3$ を符号変換を考慮にいれて右辺移項した結果は、 $2x=6+3$ になるのですか？
- ②ゴール評価知識による対話戦略
- (1) $2x-3=1*x$ の解答が $x=-3$ になっていますが、前の式の x に -3 を代入すると左辺が $2*(-3)-3$ で -9 になるのに対して右辺は $1*(-3)$ で -3 になり、右辺と左辺が同じ値になりません。
 - (2) $2x-3=1*x$ の解答が $x=-3$ になっていますが、前の式の x に -3 を代入すると右辺は、幾らになりますか？左辺は、幾らになりますか？
 - (3) $2x-3=1*x$ の解答が $x=-3$ になっていますが、前の式の x に -3 を代入すると右辺と左辺が同じ値になりますか？。
- ③例題戦略
- $1*x+3=3$ の $+3$ を右辺移項すると $1*x=3-3$ になりますか？
- ④正解と誤りの対比による対話戦略
- $2*x+3=6$ の $+3$ を右辺移項するとどうなりますか？ $2*x=6+3$ 。しかし、正解では、 $2*x=6-3$ になります。
- ⑤誤りの種類を示唆する対話戦略
- 貴方は、右辺移項するのに必要な操作を一つ忘れているのです。それが何か解りますか？
- ⑥操作の説明による対話戦略
- (1) $2*x+3=6$ の $+3$ を右辺移項する際、 $+3$ を左辺に付け加えるのすか？
 - (2) $+3$ を符号変換すると何になりますか？
- ⑦解答導出のトレースによる対話戦略
- それでは、 $2*x+3=1$ の移項をゆっくり解いてみましょう
- (1) まず左辺より $+3$ の項を取り除きます。右辺移項するのですから、移項する項は、右辺より無くなりますね。貴方もそうしているでしょう。
 - (2) 次に $+3$ の符号を変換して -3 とします。あなたは、 $+3$ の符号変換を行っていますか？右辺移項するのですから、移項される項の符号は変換されなければなりません。
 - (3) 最後に -3 を右辺に付け加えます。右辺移項するのですから、移項する項が右辺に新たに付け加わりますね。解りますか？これで右辺移項は、完了です。
- ⑧解答導出の逆トレースによる対話戦略
- それでは、なぜ $2*x+3=6$ の $+3$ を右辺移項すると、 $2*x=6-3$ になるか、操作の順を逆にして、考えていきましょう
- (1) $2*x=6-3$ は、 $2*x=6$ に -3 を右辺に付け加えることによって得ることができました。右辺移項するのですから、移項する項が、右辺に新たに付け加わります。
 - (2) -3 は、 $+3$ の符号を変換をすることによって、得ることができました。右辺移項するのですから、移項される項の符号は変換されなければなりません。
 - (3) $2*x=6$ は、 $2*x+3=6$ の $+3$ の項を取り除くことによって得ることができました。右辺移項するのですから、移項する項は、右辺より無くなりますね
- ⑨直接指摘による対話戦略
- 貴方は、右辺移項する際に移項する項の符号変換を忘れてます。
- ⑩原理レベルによる対話戦略
- なぜ移項するとき、移項する項の符号を変換しなければならないかを説明します。等式には、両辺に同じ数を引算しても等式自体は成立するという定義があります…

図8 対話戦略の例

- ⑩原理レベルによる対話戦略
- 学生が正しく理解している知識や公理・定理などを用いて説明する対話戦略。この戦略を用いることによって学生に正しい知識を納得させることができる。
- 次に本システムに用意されている6つの種類の例題について説明する。
- ①抽象化した例題
- 例題が代入される変数の部分を抽象化することによって得られる例題。例えば、 $+3$ は、「項」又は「正の項」になり、 $2*x+3=4*x+2$ は「式」又は「一次方程式」になる。
- ②以前に用いた例題
- 教育の連続性を考えると、以前に用いた例題を使うことが望ましい場合がある。教育履歴を参照することにより使用することができる。
- ③極端な値を持った例題
- 学生に誤りを自発的に想起させる場合、与える例題はその誤りの特徴を際立たせる極端な値を持つ例題であることが望まれる。この極端な値は、ドメイン知識を用いて生成される。例えば、四則演算のドメインでは被演算子または、計算結果が、単位元、逆元、0になるものが極端な値を持つと決めることができる。極端な値を持つ例題の実例として、右辺移項の符号変換を忘れていた学生の誤りにおける $7=7$ 等の例題が上げられる
- ④正誤反例
- ある問題に対する学生の導出結果と教材知識の導出結果が同じになる別の例題がある場合、この例題を正誤反例という。例えば、 $2*x-3=4$ の -3 を右辺移項すると $2*x=4-3$ になる(符号変換を忘れていた)学生の誤りに対して教材知識の右辺移項における導出結果が学生の導出結果 $2*x=4-3$ と同じになる例題 $2*x+3=4$ が正誤反例となる。この正誤反例も極端な値を持つ例題と同様に学生が自発的に誤りを想起するのに貢献すると考えられる。
- ⑤誤り検出の基になった例題
- 一番最初に行う教育の場合等、学生に誤りが有ることを認識させるのに適した例題である。
- ⑥一般の例題
- 何の制約も持たない例題である。
- 各対話戦略には、使用できる誤りの種類(表2)、教育的観点から順序付を行った使用可能な例題の種類(表3)及び様々な情報(表4)が記述されている。
- 5.4 教育履歴と決定ルール
- 柔軟な教育を行うためには、過去に行った教育やその教育結果を考慮にいれて、これから行う教育の種類を決定する仕組みが必要不可欠である。本システムで採用している教育履歴は、その意味で教育決定のための基本データと見なすことができる。1つの教育履歴は以下に示す9つの情報を記録している。
- ①Time Point
- 教育開始時点より、シーケンシャルにつけられた番号

表2 起動できる説明戦略

抽象度 →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
説明戦略の種類	操作抽象	ゴール評価	例題	正誤対比	誤り示唆	操作の説明	トレース	逆トレース	直接指導	原理レベル
学生の誤りの種類										
述語の欠落	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
述語の挿入	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
節の欠落	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○
節の挿入	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×
手続きの fail	×	×	○	○	○	×	×	×	○	×

表3 起動できる例題の種類

抽象度 →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
説明戦略の種類	操作抽象	ゴール評価	例題	正誤対比	誤り示唆	操作の説明	トレース	逆トレース	直接指導	原理レベル
例題の種類										
抽象化例題	3	×	2	3		1	×	×		
以前に用いた例題	2	2	4	4		4	2	2		
極端な例題	4	×	1	2		2	3	3		
反例	5	×	3	1		3	4	4		
誤り検出の例題	1	1	5	5		5	1	1		
一般の例題	6	3	6	6		6	5	5		

- ②学生の誤り
学生の誤っているクローズと修正対象となっている教材知識のクローズの組。
- ③学生が誤った例題
誤り検出の時に用いられた例題。
- ④誤りの種類
一般の手続き的知識の手続き部における述語の付加、戦略的な手続き的知識の基本適用条件における節の欠落などの具体的な誤りの種類。
- ⑤使用した戦略
使用した対話戦略名。
- ⑥用いた例題の種類及び例題
例題を用いる戦略の場合、その戦略で起動した例題の種類と実際に用いた例題を総て記述する。
- ⑦教育結果
教育結果を記述する。現在の所、教育成功、教育失敗、及び例題生成ができなかった等の理由による対話戦略の実行不可能のどれかが記述されている。
- ⑧Thinking Time
学生に、対話を与えてから学生が応答するまでの時間。与えた戦略の受け入れ度や困難さを表す要因の一つと考えられる。
- ⑨CPU Time
戦略起動命令から、実際に学生に対話を与えるまでの時間。学生が対話を待っている時間となる。

起動する戦略及び例題の種類を決定は、これらの情報を基にそれぞれ専用のプロダクションシステムで行われる。図9は、対話戦略決定ルールの一部を示したものである。各ルールは、if-then形式で記述されており実行部は、すべてRecommend(戦略の起動を推奨する)または、Oppose(戦略の起動に反対する)のどちらかになっている。例えば図9の(3)のル

ールは、前回失敗した対話戦略よりも抽象度の低い戦略を起動することを推奨するルールである。次に対話戦略を決定する方法について述べる。戦略決定システムは、まず条件部を満たすルールを全て発火することによって、様々な情報源から得られる情報をRecommend及びOpposeという規格化された表現にする。そしてRecommendのみで表されている戦

表4 説明戦略に記述されている様々な情報

抽象度 →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
説明戦略の種類	操作抽象	ゴール評価	例題	正誤対比	誤り示唆	操作の説明	トレース	逆トレース	直接指導	原理レベル
例題を使うか	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×
連続して行えるか	○	○	○	○	×	×	○	○	×	×
使用するCPU Time	少	少	多	多	少	少	少	少	少	少

略を採用する(条件1)。条件1を満たすものが複数個ある場合は、Recommendの数の多い戦略を採用する(条件2)。条件2を用いても1つに定まらない場合は、その中で抽象度の一番高い戦略を採用する(条件3)。

- (1) if (誤りAに対して戦略Bは、実行可能である) then Recommend(B)
- (2) if (誤りAに対して戦略Bは、実行不可能である) then Oppose(B)
- (3) if ((前回、戦略Aを用いた教育に失敗している) and (抽象度(A) > 抽象度(B))) then Recommend(B)
- (4) if ((前回、戦略Aを用いた教育に失敗している) and (抽象度(A) < 抽象度(B))) then Oppose(B)
- (5) if ((前回、前々回とCPU timeの多い戦略を起動している) and (戦略Aの起動に必要なCPU timeは小さい)) then Recommend(A)
- (6) if (一番最初の教育である) then Recommend(例題よる説明)

図9 説明戦略決定ルール

図10は、例題の種類決定ルールの一例である。各ルールは、対話戦略決定ルールとまったく同じ書式で記述されている。例えば、図10の(3)のルールは前回の対話と同じ例題の種類を用いて教育を行う事を推奨したルールであり、教育の連続性の観点から作成されたものである。条件3が‘各対話戦略に記述されている例題の優先順位が一番高いものを採用する’と変更になるだけで、例題の種類決定の方法も対話戦略決定の方法と同じである。

- (1) if (戦略Aに対して例題Bは、実行可能である) then Recommend(B)
- (2) if (戦略Aに対して例題Bは、実行不可能である) then Oppose(B)
- (3) if ((前回、例題Xを用いて戦略Aの教育を行った) and (今回、戦略Bの起動が決定している) and (例題Xを用いて戦略Bの実行が可能である)) then Recommend(X)
- (4) if (一番最初の教育である) then Recommend(誤り検出の例題)

図10 例題の種類決定ルール

5.5 教育戦略の Building Block

我々が提案している Building Block の設計規範に、この教育戦略部の枠組みを照らし合わせてみると問題解決器は、図7に示した2つのプロダクションシステムと教育戦略実行部となる。この問題解決器は全て汎用の枠組みを用いて構成されている。また対話戦略及び例題の種類を決定する部分において、先に示した条件3が必ず解を一意に決定するので、この問題解決器は問題解決の完全性を保証している。図11

- ① (戦略: 操作概念の抽象化, 例題の種類: 誤りの検出の基になった例題)
 $2 * x + 3 = 6$ の一次方程式の途中結果は $2 * x = 6 + 3$ になるのですか? yes
- ② (戦略: 例題による説明, 例題の種類: 極端な例題)
 それでは, $7 = 7$ の $+7$ を右辺移項すると $0 = 7 + 7$ なるのですか? yes.
- ③ (戦略: 正解と誤りの対比, 例題の種類: 以前に用いた例題)
 $2 * x + 3 = 6$ の $+3$ を右辺移項すると貴方は $2 * x = 6 + 3$ になります
 しかし, $2 * x + 3 = 6$ の $+3$ を右辺移項すると私は, $2 * x = 6 - 3$ になります。
 なぜこのような違いが起こるのか解りますか? no.
- ④ (戦略: 誤りの種類の示唆)
 貴方は, 右辺移項するのに必要な操作を1つ忘れているのです。
 それは何であるか解りますか? no.
- ⑤ (戦略: 操作の説明, 例題の種類: 抽象化例題)
 一次方程式の正の項を右辺移項する際,
 左辺に正の項が付け加わるのですか? yes.
- ⑥ (戦略: 操作の説明, 例題の種類: 以前に用いた例題)
 $+3$ を符号変換すると何になりますか? -3.
- ⑦ (戦略: 解答導出のトレース, 例題の種類: 以前に用いた例題)
 それでは, $2 * x + 3 = 6$ の右辺移項の私の解き方をお見せしましょう。
 (1)まず左辺より $+3$ の項を取り除きます。右辺移項するのですから、
 移項する項は, 右辺より無くなりますね。貴方もそうしている
 でしょう。
 (2)次に $+3$ の符号を変換して -3 とします。あなたは, $+3$ の符号
 変換を行っていますか?, 右辺移項するのですから, 移項される項
 の符号は変換されなければなりません。
 (3)最後に -3 を右辺に付け加えます。右辺移項するのですから,
 移項する項が, 右辺に新たに付け加わりますね。解りますか?
 これで右辺移項は, 完了です。
- ⑧ (戦略: 直接指摘)
 即ち貴方は, 右辺移項する際に移項する項の符号変換を忘れています。
 解りましたか? yes.
- ⑨ (スキルモード)
 それでは, この誤りを踏まえて次の問題を解いて下さい
 $2 * x + 9 = 3$ を右辺移項したらどうなりますか? $2 * x = 3 - 9$ 。
 正解です

図11 想定対話例

に, この Building Block によって行われる対話例を想定して示している。この対話例は一次方程式をドメインとしており, 右辺移項をする際, 符号変換を忘れていた学生の誤りを想定している。さらにドメイン固有の知識を付加的知識として戦略決定ルール及び例題の種類決定ルールに記述することにより, より人間の教師に近い教育を行うことができる。

6. おわりに

本稿では, M I S を用いた手続き的知識のモデル推論方法について概説し, その推論効率を上げる方法について述べた。この学生モデル推論システムは, 横河ヒューレットパカード社の H P 9 0 0 0 モデル 3 5 0 上で SICSTUS Prolog を用いてインプリメントされている。

また, 手続き的知識における教育方法について考察し, 実際に教育的対話を行う枠組みを提案した。提案した枠組みは, 全て汎用な部分で構成されており, 対話戦略と例題の種類との2つの要素で教育的対話が決定されることが特徴となっている。この枠組みを用いることによって汎用な部分だけでもある程度妥当な教育的対話ができると考えられる。今後の課題としては, この汎用問題解決器に付加的に記述する教材固有の知識の設計及びこのシステムの計算機上へのインプリメントが上げられる。

[参考文献]

- [1]鈴木他: “汎用フレームワークを用いた手続き的教材の知的 C A I システム”, 信学技報 ET88-1, pp. 49-56 (1988. 4)
 [2]池田他: “知的 C A I のためのフレームワークの検討”, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol. 87, No. 1, pp. 49-58 (

1987. 6)

- [3]Burton, R.R. et al.: An investigation of computer coaching for information learning activities: International Journal of Man-Machine studies, 11, pp. 5-24 (1979).
 [4]竹内・大槻: “摂動法による学習者モデル形成と教授知識について”, 情処学論, 28, 1, pp. 54-63 (1987. 1)
 [5]岡本: “知的 C A I のための教授世界知識の表現とその推論方法”, 信学論(D), J70-D, 12, pp. 2658-2667 (1987. 12)
 [6]中村他: “導出過程の変換を用いた類推の実現と知的 C A I への応用”, 情報処理学会研究報告, 88-CE-1-1 (1988. 7)
 [7]平島他: “I T S のための学生モデル生成法とそれに基づく指導戦略”, 情報処理学会「教育における知的方法」シンポジウム論文集, pp. 33-42 (1988. 11)
 [8]B. Chandrasekaran: “Generic Tasks in Knowledge based Reasoning: High-Level Building Blocks for Expert System Design”, IEEE EXPERT, FALL 1986, pp. 23-30
 [9]Shapiro, E. Y.: “Algorithmic Program Debugging”, MIT Press (1982)
 [10]奥畑他: “知的 C A I のためのスケジューリングメカニズム”, 電気関係学会関西支部連合大会論文集, G8-35 (1988. 11)