

認知的考察に基づく知的 CAI のための学生モデルの生成法

——プロセス駆動型モデル推論法——

正 員 平島 宗[†] 正 員 中村 祐一[†]

正 員 上原 邦昭[†] 正 員 豊田 順一[†]

Student Modelling for ICAI in View of Cognitive Science: Process Driven Model Inference Method

Tsukasa HIRASHIMA[†], Yuichi NAKAMURA[†], Kuniaki UEHARA[†] and Jun'ichi TOYODA[†], *Members*

あらまし 本論文では、学生の問題解決過程および誤りに対する認知的観点からの考察に基づいて、学生モデルの記述法であるプロセスモデルと、プロセスモデルで記述された学生モデルを生成するプロセス駆動型モデル推論法を提案する。更に、生成された学生モデルを用いることによって可能となる誤りに対する指導を検討する。プロセスモデルは、学生の知識運用の過程を表現しており、これを用いることにより学生の知識運用上の誤りを表現することができる。知識自体の誤りは、運用の誤りの固定化としてとらえることができる。プロセス駆動型モデル推論法は、問題解決過程のプロセスモデルを摂動することにより、その問題の解決過程で発生する知識運用の誤りをモデル化する。知識運用の誤りの原因は、モデルの生成過程で加えられた摂動により説明できる。本学生モデルを用いることにより、知識運用の誤りに対して、運用の誤りの原因を指摘し、知識を正しく運用するように誘導する指導が可能となる。この指導は、知識自体の誤りに対しては、誤った知識の発生原因に対する指導となっている。

1. ま え が き

学生に対する高度な個別指導を実現するためには、学生の理解状態を把握し、それに合わせて教育行動を選択することが必要である。このような指導を知的 CAI システムにおいて実現するためには、学生の理解状態を記述するモデル、学生の誤答からそのモデルを生成する方法、および生成されたモデルに基づいて柔軟に教育行動を決定する方法を明らかにすることが必要である。これらの学生モデルに関する研究は、知的 CAI の中心的な課題となっている^{(1)~(6)}。

学生の問題解決過程や誤りに対する認知的考察に基づいて学生モデルを研究することは、この課題に対する試みの一つである^{(7)~(9)}。認知的なアプローチをとることにより、学生モデルを生成する際のモデル生成操

作や探索空間の設定に、認知的根拠を付加することができる。

学生の誤りに対する認知的な考察としては、Repair 理論⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と Matz モデル⁽¹²⁾を挙げることができる。しかしながら、これらは誤りの発生を認知的に説明することを目的とした考察であり、学生モデルの生成法や誤りに対する指導への利用といった観点からの検討が欠けていた。

本論文では、初等代数学や算数の計算問題等における学生の問題解決過程および誤りについて認知的な観点から考察し、問題解決過程での知識の運用状況を表現するプロセスモデルを提案する。更に、学生モデルをプロセスモデルの考え方に基づいて生成する方法として、プロセス駆動型モデル推論法を提案する。また、生成された学生モデルを利用することにより可能となる誤りに対する指導を検討する。

プロセスモデルでは、個々の知識の運用状況を概念の系列により特徴づけ、この概念の記述をプロセスと

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨木市
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki-shi, 567 Japan

呼ぶ。不適切なプロセスにより知識運用の誤りを表現することができる。学生の誤答をプロセスを用いてモデル化することにより、学生の誤りを積極的に知識運用の誤りとしてとらえる。知識自体の誤りは、プロセスの誤りが知識に固定化されたものとしてとらえる。

プロセス駆動型モデル推論法は、知識の正しい運用を表すプロセスに摂動を加えることにより、学生の知識の誤った運用をモデル化する。プロセスに対する摂動は、プロセス中の概念を置換することにより行う。概念の置換は、対象領域に存在する概念間の関係を記述した概念構造に沿って行う。知識運用の誤りの原因は、モデルの生成過程で加えられた摂動により説明することができる。摂動の履歴を蓄えることにより、学生の誤りの傾向を知ることができる。この履歴の蓄えを履歴モデルと呼ぶ。履歴モデルは、モデル生成の制御知識として利用することができる。

本学生モデルを用いることにより、知識運用の誤りに対して、運用の誤りの原因を指摘し、知識を正しく運用するように誘導する指導が可能となる。運用の誤りが固定的なものであるときは、運用の誤りに知識自体の誤りが反映されているととらえる。モデルに表現された運用の誤りの原因に対する指導は、誤った知識の発生原因に対する指導となる。

2. プロセスモデル

従来の誤りのモデルには、知識自体の誤りをとらえることにより学生の誤答を説明しようとするものが多い^{(1),(2)}。このようなモデルにおいては、知識を運用する過程に誤りが生じないことが暗黙のうちに仮定されていることになる。これに対して、知識自体の誤りと共に、それを運用する過程においても積極的に誤りをとらえようという試みがなされている^{(10)~(12)}。本論文で提案するプロセスモデルは、このような誤りのとらえ方に基づいている。

以下では、プロダクションシステムを考えることにより、知識の運用の誤りをとらえるために必要な要素について考察する。更に、この考察に基づいたプロセスモデルについて述べる。

2.1 知識運用の誤り

本節では、人間の問題解決メカニズムを簡明にとらえたモデルであるプロダクションシステムを用いて、従来の誤りのモデルがとらえている知識自体の誤りと、プロセスモデルでとらえる知識を運用する過程での誤りを説明する。

プロダクションシステムは、作業記憶とプロダクションルール(以下では単にルールと言う)の集合とインタプリタの三つの構成要素をもち、作業記憶上のデータに対して、ルールを選択、実行することにより問題解決を進める。

従来の誤りのモデルは、学生の誤りを誤ったルールの存在として表現している。このようなモデルにおいては、ルールの運用過程で発生する誤りが考慮されていない。学生のように知識の運用に習熟していないと考えられる対象をモデル化する際に、ルールの運用過程にも注目する必要がある。

プロダクションシステムにおけるルールの運用過程として、データを作業記憶上に生成する過程、ルールの条件部と作業記憶上のデータを照合して、ルールを検索する過程、および選択されたルールの行動部を実行する過程を考えることができる。これらの過程を人間の問題解決過程に対応づけると、ルールは知識に対応し、データを生成する過程は問題解釈の過程に、ルールを検索する過程は知識検索する過程に、ルールを実行する過程は知識を実行する過程にそれぞれ対応する。これら三つの過程により知識の運用過程が表される。以下では、これら三つの過程で発生する誤りについて述べる。

2.1.1 問題解釈の誤り

データ生成過程において誤りが発生すると、問題と対応していない不適切なデータが生成される。不適切なデータに対して知識が検索・実行される。この結果得られる誤答は、生成されたデータに表現された問題に対しては正答とみなすことができる。つまり、学生のこの種の誤答は、与えられた問題と異なる問題を解いたために生じたものと考えることができる。このような誤りを問題解釈の誤りと呼ぶことにする。

2.1.2 知識検索の誤り

知識検索過程で誤りが発生した場合もやはり不適切な知識が選択される。不適切な知識が選択されるのは、条件の照合に誤りが生じたためであると考えることができる。このような誤りを知識検索の誤りと呼ぶことにする。

2.1.3 知識実行の誤り

知識実行過程で誤りが発生した場合は、選択された知識の行動部と異なる操作が実行される。知識の行動部が操作とその操作を加える対象を指定するものであるとすると、知識実行過程での誤りは、行動部に記述された操作と異なった操作が行われたり、操作対象が

異なっていたための誤りと考えることができる。このような誤りを知識実行の誤りと呼ぶことにする。

2.2 誤りのモデル化

本節では、前節において述べた知識運用の誤りを、システム上にモデル化する方法について概念的に述べる。

2.2.1 プロセスモデルによる誤りのモデル化

プロセスモデルでは、知識の運用を知識選択プロセスと知識実行プロセスを用いて表現している。知識選択プロセスは、知識を選択する過程であり、知識選択の際に考慮された条件を表す概念の系列により表現される。知識実行プロセスは、知識が実行される過程であり、操作と操作対象を表す概念の系列により表現される。学生の誤りは、プロセスを表現する概念の系列上にとらえられることになる。前節で述べた「問題解釈の誤り」と「知識検索の誤り」は、知識選択プロセスにおいて、「知識実行の誤り」は知識実行プロセスにおいてとらえられることになる。以下では、これらの各誤りについて、プロセスモデルにおけるとらえ方を概説する。

(問題解釈の誤り) 問題解釈の誤りが発生すると、誤ったデータが生成される。学生の生成した誤ったデータ自体は、一般に観測不可能であるが、誤ったデータに対して選択された知識を発見することにより、誤ったデータを推定することができる。プロセスモデルでは、知識選択の誤りを知識選択プロセスで表現できる。知識選択プロセスの誤りを問題解釈の誤りとしてとらえると、誤った知識選択のプロセスは、学生の生成した誤ったデータに対する正しい知識選択プロセスを表している。誤った知識選択プロセス中の不適切な概念が、学生の生成したデータの誤りを表している。問題解釈の誤りが導く誤答は、プロセスの誤りより推定される誤ったデータに対して、選択した知識を実行することによって導くことができる。

(知識検索の誤り) 知識検索の誤りは知識選択プロセスの誤りとしてとらえることができる。誤った知識選択プロセスは学生が知識を検索する際に考慮した不適切な条件を示す概念の系列を表現している。知識検索の誤りにより導かれる誤答は、知識選択プロセスの誤りにより選択された不適切な知識を正しいデータに対して実行することにより導くことができる。

(知識実行の誤り) 知識実行の誤りは知識実行プロセスでの誤りとしてとらえることができる。知識実行プロセス中の各概念は、問題を表現するデータ中の特定の

要素や、あるいは新たに導入する要素を指定している。誤った知識実行プロセスは、操作や操作の対象として不適切な要素を指定している概念の系列により表現される。誤った知識実行プロセスに基づいて操作と操作対象を決定し、それを実行すると、知識実行の誤りにより導かれる誤答を生成できる。

プロセスにおいてとらえられる誤りは、知識を正しく運用できない学生の状態をモデル化したものである。学生の誤りをこのように考えることによって、特に、正しい知識をもっているにもかかわらず、それを正しく用いることができないために誤りを犯す学生の状態をモデル上に反映した上で、知識の使い方に関する指導により修正することが可能となる。このような指導により修正できない固定的な誤りは、知識自体の誤りであるとする。

ここで述べたプロセス上では、知識自体の誤りに起因する誤答と知識の運用上の誤りに起因する誤答が、同一の形態で表現されるという問題がある。すなわち、プロセスに表現された誤りを知識運用時の一時的なものとしてとらえるべきか、知識自体に定着した固定的なものとしてとらえるべきかを区別する問題は、学生の学習過程に依存する部分が大きく、誤答に含まれる情報のみからでは決定不能である。しかし、知識を繰り返し誤って用いると、その誤った用い方が知識の一部として固定化されるという学習の原理に基づいた立場をとれば、プロセス上にとらえた誤りを知識上に反映させるか否かを学生の学習履歴に基づいて決定する枠組みを考えることができる。本論文では、このような立場に立って、誤答すべてをプロセス上で説明し、状況に応じてそれを「知識自体の誤り」と「運用上の誤り」に弁別する方法をとっている。

2.2.2 プロセスモデルの具体例

問題分割による問題解決を考えると、図1のように問題解決過程を表現できる。知識を問題分割の方法であるとすると、知識実行の過程は、副問題生成の過程である。以下では、知識実行プロセスを副問題生成プロセス (process of subproblem generation) と呼ぶこと

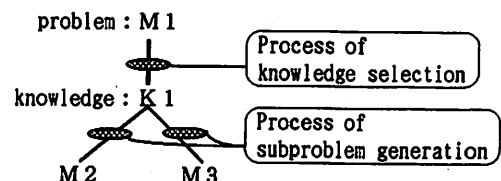


図1 問題解決過程

Fig. 1 Problem solving process.

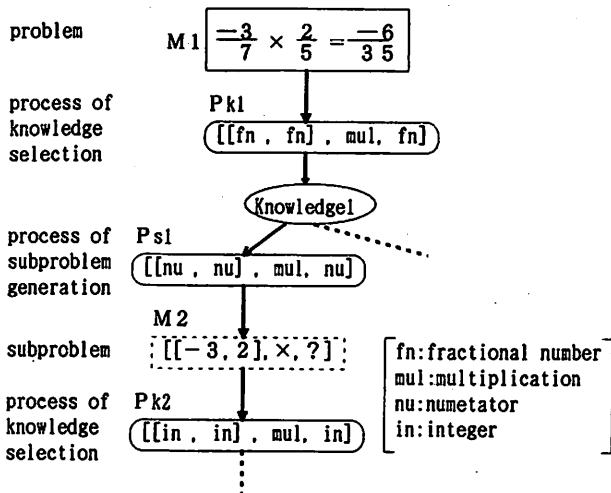


図2 プロセスモデル
Fig. 2 An example of process model.

にする。

図2に知識選択プロセス (process of knowledge selection) と副問題生成プロセスの具体例を示している。知識選択プロセス $Pk1$ は、分数の掛算の問題に対して適切な知識を選択するために考慮された条件を示す概念の系列となっている。 $Pk1$ は分数 (fn) と分数 (fn) を操作対象とした掛算 (mul) により分数 (fn) を求めることを考慮して知識を選択する知識選択プロセスとなっている。副問題生成プロセス $Ps1$ は、問題 $M1$ より副問題を生成するために切り出す要素を指定する概念の系列である。プロセス $Ps1$ により、問題 $M1$ 中より分子 (nu) と分子 (nu) と演算子の積 (mul) を取り出して分子を求める副問題として、問題 $M2$ が生成される。知識選択プロセス $Pk2$ は、問題 $M2$ に対して知識を選択するときに考慮された条件の系列である。

3. プロセス駆動型モデル推論法

3.1 プロセス駆動型モデル推論法の位置付け⁽⁹⁾

本モデル推論法は、モデル駆動型のモデル推論法である。モデル駆動型は、あらかじめ学生モデルの源となるモデル (以下ではソースモデルと呼ぶ) を用意しておき、ソースモデルに何らかの変換を加えることにより学生モデルを生成する方法である。この方法は、表現可能なモデルがソースモデルの近傍に限定されるといって完全性に疑問があるが、探索空間が小さくて済むという利点がある。また、学生モデルを生成するためにソースモデルに加えられた変換が明示的であるので、学生モデルの解釈が比較的容易である。

従来のモデル駆動型モデル推論法は、問題解決に必

要となる知識の集合をソースモデルとして用いてきた。この場合、知識を直接書き換えることにより誤りをモデル化する。これを知識駆動型と呼ぶ。これに対して、本モデル推論法は、ソースモデルをプロセスモデルとしており、プロセスモデル中のプロセスを変換することによる誤りのモデル化を行う。このことにより、学生の知識の運用の誤りをモデル化できるようになった。更に、運用の誤りに基づいて知識を書き換えることにより、誤った知識をモデル化できる。このとき、誤った知識の生成は、運用の誤りの固定化としてとらえる。

3.2 学生モデルの生成

学生モデルの生成の概略を図3に示した。学生モデル生成モジュール (student modeller) は問題と学生の解答を入力とし、学生の解答を再現する学生モデルを出力とする。学生モデル生成モジュールは、プロセスモデル生成部 (ideal process model generator) とプロセスモデル変換部 (process model transformer) により構成される。プロセスモデル生成部は、問題より正しい問題解決過程を表すプロセスモデルを生成する。プロセスモデル変換部は、プロセスモデル中のプロセスに対して摂動を加えてプロセスモデルを変換する。

学生モデルは、正しいプロセスモデルと学生の誤りを再現するプロセスモデル、および、プロセスモデルを変換する際に行われた摂動の履歴により構成される。生成された学生モデルは、対話モジュール (tutoring module) において誤りに対する教育的対話を生成するために用いられる。このモジュールで行われる対話はモデルの検証を兼ねている。モデルが棄却されれば、プロセスモデル変換部においてプロセスモデルの変換をやり直す。プロセスモデル変換部によるモデルの生成で誤りが同定できず、かつ複数の解法が存在する場合には、プロセスモデル生成部において、異なる解法に従ってプロセスモデルを再生成し、それを変換して誤りのモデル化を行う。履歴モデルは、プロセスモデルを変換する際の制御知識として利用する。

以下では、プロセスモデルの生成、プロセスの摂動および履歴モデルについて述べる。更に、誤答事例のモデル化の例を示す。モデルに基づく対話については、4.において述べる。

3.2.1 プロセスモデルの表現法

プロセスモデル生成部は、正しい問題解決過程に対応するプロセスモデルを生成する。本学生モデル生成モジュールでは、知識を Prolog により記述している。知識を Prolog で表現することにより、知識選択は節

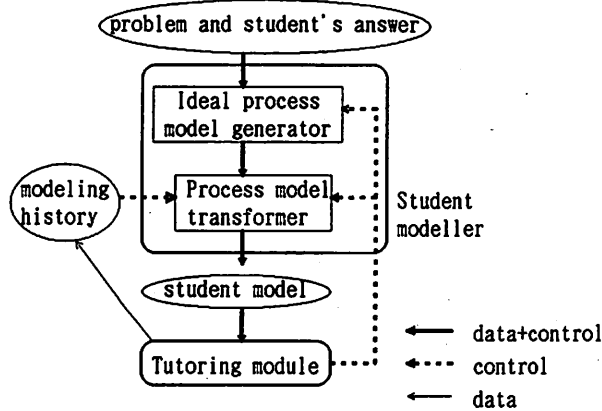


図3 学生モデル生成の概略
Fig. 3 Overview of student modeling.

(clause)の選択に、副問題生成は節の右辺による問題分割に対応づけることができる。知識選択プロセスは、Prologの節が選択される際に考慮された条件を、対応する領域の概念で表した概念の系列により表現する。副問題生成プロセスは、節の右辺が副問題を生成するために問題中より切り出すものとそれに対する操作を、対応する領域の概念で表した概念の系列により表現したものである。

プロセスモデルは、問題解決過程でのすべての知識の運用を表現するもので、Prologによる問題解決の結果生成された計算木より生成する。計算木中の各ノードとなっている節について、知識選択プロセスと副問題生成プロセスを生成する。計算木中の各ノードについて知識選択プロセスと副問題生成プロセスが付加されたものをプロセスモデルと呼ぶ。

3.2.2 知識運用の誤りの生成

図4において問題 $M1$ に対する適切な知識選択プロセスを $Pk1$ とし、それにより選択される知識を $K1$ 、適切な副問題生成プロセスを $Ps1$ 、それにより生成される副問題を $M2$ とする。このように知識が運用されることにより正答が導かれる。

問題解決過程における適切なプロセスを不適切なプロセスに置き換えることにより、知識運用の誤りを表現することができる。知識選択プロセス $Pk1$ を不適切な知識選択プロセス Pka に置き換えると、 Pka において選択可能な知識 Ka が選択される。これにより、問題解釈の誤りと知識検索の誤りの発生によって導かれる誤答を生成することができる。

副問題生成プロセス $Ps1$ を不適切な副問題生成プロセス Psb に置き換えると、それによって副問題 Mb が生成される。これにより、副問題生成の誤りの発生に

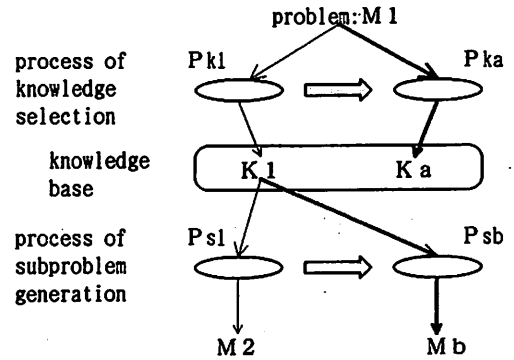


図4 誤りの生成
Fig. 4 Detecting student error by process model.

より導かれる誤答を導くことができる。

本モデル推論法では、正しいプロセスに対して摂動を加えることにより、正しいプロセスと不適切なプロセスの置換えを行う。プロセスの摂動については、次項で詳述する。

3.2.3 概念構造に基づくプロセスの摂動

プロセスの摂動は、プロセス中の概念を概念構造に基づいて置換することにより行う。学生の誤答事例を本モデルによって分析してみると、多くの場合、適切なプロセス P と不適切なプロセス P' は概念構造中で比較的近いところ(概念近傍と呼ぶことにする)に発見することができる。このことから、プロセス P に対する概念構造に基づく摂動によりプロセス P' を発見することができると考えられる。ここでは、概念近傍について述べ、更に概念構造の表現とそれに基づくプロセスの摂動について述べる。

概念間の距離尺度は領域固有の性質に依存することから、概念に対してその近傍を一般的に定義することは困難である。本モデル推論法では、対象領域の概念構造を分析して、個々の概念に対して、概念構造において置換可能な概念をあらかじめ定義しておくことにより、概念に対する近傍を定義している。

次に概念構造について説明する。概念構造は、領域に存在する概念間の関係を表したものであり、領域固有にあらかじめ用意しておかなければならない。概念間の関係は図5に示したように `is_a`, `part_of` で記述する。`is_a` においては概念を上位の概念に置き換えることを概念の抽象化と呼び、下位の概念に変更することを概念の具体化と呼ぶことにする。`part_of` においては概念を「上位概念 X の構成要素」という概念に置き換えることを概念の抽象化と呼び、「上位概念 X の構成要素」という概念を概念 X の下位概念に置き換える

ことを概念の具体化と呼ぶことにする。

次に、概念の置換について説明する。図 6(A)は、共通の上位概念 X をもつ概念 x_i と概念 x_j を示している。このとき、概念 x_i と概念 x_j を置き換えることを概念の置換と呼ぶ。概念の置換は、概念 x_i の上位概念 X を発見するための概念の抽象化と、上位概念 X の下位概念 x_j を発見するための概念の具体化により行う。概念 x_i の上位概念が複数存在している場合には、それぞれの上位概念を介した概念 x_i の置換を行わなければならない。

プロセスの摂動は、概念の置換によって行う。図 6(B)は(A)で示した概念の置換によるプロセスの摂動を表している。プロセス P を表す概念の系列中に概念 x_i が存在しているとす。概念 x_i を概念構造に沿って抽象化すると概念 X に置き換わり、図 6 のようにプロセス P^* ができる。これをプロセスの抽象化と呼ぶ。プロセス P^* を概念 X について具体化すると、概念 x_i の代わりに概念 x_j を含むプロセス P' ができる。これをプロセスの具体化と呼ぶ。このようにして、プロセス P か

らプロセス P' を生成することをプロセスの摂動と呼ぶ。

3.2.4 プロセスモデルの再構成

プロセスモデルの変換は、プロセス P とそれを摂動することにより生成されるプロセス P' を置換することにより行う。このとき、 P と P' を置き換えるだけでなく、プロセスモデル全体を再構成する必要がある。より具体的には、 P' に伴う問題解決を独立して行い、その結果を既知として改めて学生に与えられた問題を解いて、その過程からプロセスモデルを生成する。この問題解決で得られる解が誤答を再現していれば、再構成されたプロセスモデルは学生の問題解決過程のモデルとなる。

本節で述べたモデル化手法は、二つ以上の誤りが複合されている場合を考慮していないが、原理的にはプロセスモデルに対して複数の摂動を加えることによって複合されている誤りもモデル化できる。しかしながら、モデル化のために必要となる探索空間は非常に大きくなるという問題が生じる。これは学生モデル生成に一般的に存在する問題点であり、より単純なレベルでのモデル化を検討することが現実的な対処法であると考えられる。

3.3 履歴モデル

学生モデルの生成に成功した摂動に関する情報は、履歴モデルに蓄え、以後の学生モデルの生成に利用する。履歴モデルは、プロセスの履歴、プロセスの摂動に関する履歴、概念の置換に関する履歴からなる。本節では、それぞれの履歴とモデル生成の制御知識としての利用について述べる。

3.3.1 プロセスの履歴

プロセスの履歴は、学生が誤りを犯したプロセスと、誤りを犯さなかったプロセスの記録である。この履歴を用いることにより、プロセスに優先順位を付けて、誤りが発生しやすいプロセスを優先的に摂動することができる。

3.3.2 プロセスの摂動に関する履歴

プロセス P を摂動することにより、プロセス P を抽象化することにより得られるプロセス P^* とプロセス P^* が具体化することにより得られるプロセス P' が生成される。ここでは、プロセスの抽象化 ($P \rightarrow P^*$) の履歴をプロセスの抽象化履歴、プロセスの具体化 ($P^* \rightarrow P'$) の履歴をプロセスの具体化履歴、それらの結果としての摂動 ($P \rightarrow P'$) の履歴をプロセスの摂動履歴と呼ぶ。

プロセスの摂動に関する履歴は、それぞれ、プロセスを摂動する操作、プロセスを抽象化する操作、プロ

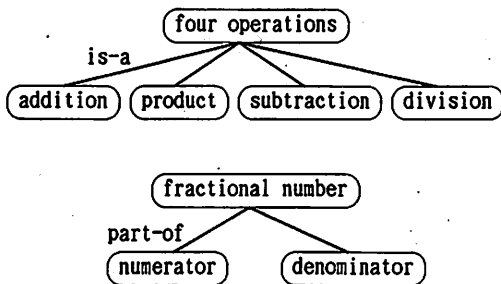


図 5 概念構造

Fig. 5 An example of conceptual structure.

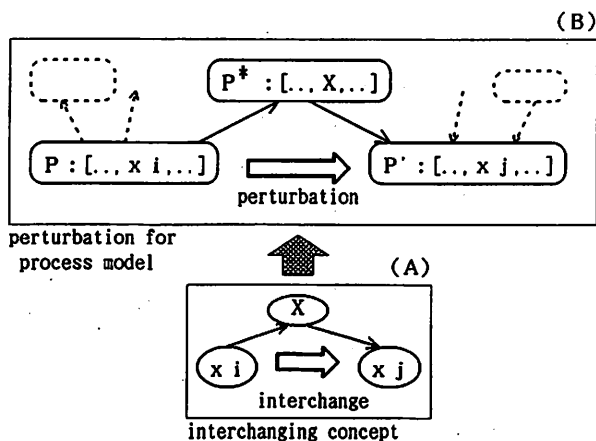


図 6 概念の置換によるプロセスの摂動

Fig. 6 Perturbation using process model by interchanging concept.

セスを具体化する操作として用いることができる。

3.3.3 概念の置換に関する履歴

プロセスの振動は、概念の置換により行われる。プロセス P に対するプロセス P^* は、プロセス P の構成要素である概念 xi を抽象化して概念 X で置換することにより生成できる。プロセス P^* に対するプロセス P' は、概念 X を具体化して概念 xj で置換することにより生成できる。ここで、概念の抽象化 ($xi \rightarrow X$) の履歴を概念の抽象化履歴、概念の具体化 ($X \rightarrow xj$) の履歴を概念の具体化履歴、それらの結果としての置換 ($xi \rightarrow xj$) の履歴を概念の置換履歴と呼ぶことにする。

これらの履歴は、それぞれ、どのような概念の抽象化、具体化、置換が発生しやすいかを示しており、概念に優先順位を付けて置き換えることができる。

3.3.4 履歴モデルの利用

振動対象のプロセスと振動操作の選択における履歴モデルの利用について述べる。

まず、プロセスモデル中から学生が誤りやすいプロセスを取り出す。このときに、プロセスの履歴を用いる。これに基づいて、振動の対象とするプロセスの候補リストを作る。学生の誤りは、このリスト中のプロセスの振動により同定できる可能性が高い。更に、このリスト中でも、与えられた問題に近い位置にあるプロセスを優先的に振動の対象とする。

履歴モデルを利用することにより、(1)プロセスに関する振動履歴を用いた振動、(2)概念に関する置換履歴を用いて概念を置換することによるプロセスの振動、を行うことができる。(1)、(2)の順で振動を行う。これら履歴モデルを利用した振動により誤りを同定できなかった場合には、(3)概念構造に沿った概念の抽象化と具体化によるプロセスの振動を行う。

振動候補リストに対する振動で誤りが同定できない場合には、それ以外のプロセスに対して上位のプロセスより同様な手順で振動を加える。

4. 学生モデルに基づく誤りに対する指導

前章までで述べたように、本学生モデルは、次のような特長をもっている。

- ・知識運用の誤りを、問題解釈の誤り、知識検索の誤り、知識実行の誤りの三つに分類してモデル化している。
- ・モデルの生成過程に基づいて学生の誤りを説明できる。

本章では、具体的な誤答事例^{(13),(14)}を用いて学生モデル

の生成過程と、そのモデルを反映した誤りに対する指導について述べる。

4.1 問題解釈の誤り

[誤答事例1] 問題 $M1: 1/3 + 2/5$, 誤答: $2/15$
(誤りのモデル化) 誤答事例1は、問題解釈の誤りとしてモデル化することができる。モデル化するために必要な知識選択プロセスに対する振動を図7に示した。

問題 $M1$ は、通分を行う知識 $K1$ を用いることにより正しく解決される。問題 $M1$ に対する知識 $K1$ の選択は、知識選択プロセス Pk により表現される。このプロセス Pk に対して振動を加える。プロセス中の概念「和」(addition)は概念構造中の上位の概念として「四則」(four operators)をもつ。概念「和」を抽象化して概念「四則」に置き換えると、抽象化されたプロセス Pk^* が生成される。概念「四則」は下位概念として概念「積」(multiplication)をもつ。この概念構造に沿ってプロセス Pk^* を具体化するとプロセス Pk' が生成される。プロセス Pk' で選択される知識 $K2$ は、分子は分子同士、分母は分母同士演算する知識である。

学生の誤りが問題解釈の誤りであるとき、プロセス Pk' は、データの誤りを反映している。演算が積の問題に対する知識 $K2$ の選択が、プロセス Pk' により表現される。このことから、学生の生成した誤ったデータは、問題 $M2: 1/3 \times 2/5$ を表現する妥当なデータと考えられる。本モデルでは、学生は与えられた問題 $M1$ を問題 $M2$ と解釈したデータを生成し、それに対して妥当な知識 $K2$ を選択したとモデル化する。問題 $M2$ に対して知識 $K2$ を用いることにより、誤答 $2/15$ を生成することができる。

(モデルに基づく指導) 問題解釈の誤りに対しては、本

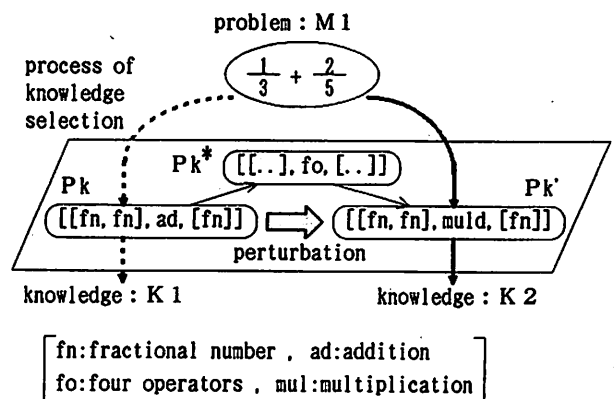


図7 知識選択プロセスにおける誤り
Fig. 7 An example of error at process of knowledge selection.

モデルを用いることにより、与えられている問題と解いた問題が異なることを学生に気づかせる指導が可能となる。誤答事例 1 に対して、次のように指導することができる。

- (1) 問題の演算は、四則のうちの何ですか。
- (2) 問題の演算は、足算です。
- (3) $1/3 \times 2/5$ を解いてみましょう。
- (4) $1/3 + 2/5$ と $1/3 \times 2/5$ を比べてみましょう。前者は、+ で足算です。後者は、× で掛算です。

4.2 知識検索の誤り

[誤答事例 2] 問題 M1: $1/3 + 2/5$, 誤答: $3/8$

(誤りのモデル化) 誤答事例 2 は、知識検索の誤りとしてモデル化することが可能である。知識選択プロセスに対して図 7 に示した摂動を行うことによって、この誤りをモデル化することができる。この摂動は、誤答事例 1 をモデル化するために行った摂動と同じである。

学生の誤りが知識検索の誤りであるとき、知識選択プロセスの誤りは、知識検索過程での誤りを反映している。知識選択プロセス P_k に表現された条件を考慮することにより選択できる知識 K_2 を問題 M1 に対して用いることにより、誤答: $3/8$ を生成することができる。

(モデルに基づく指導) 知識検索の誤りに対しては、検索の誤りの原因を指摘することにより、検索の誤りに気づかせ、正しい検索を行えるように誘導する指導が可能となる。誤答事例 2 に対して、次のように指導することができる。

- (1) 演算の種類に注意して問題を解いてください。
- (2) 演算が和であることに注目して問題を解いてください。
- (3) あなたの解き方は、演算が和の場合には間違いです。演算が積の場合ならば、正しい解き方です。例えば、 $1/3 \times 2/5$ の問題は、あなたの解き方で正解を得ることができます。
- (4) 演算が和の場合は次のようにして解きます...

4.3 副問題生成の誤り

[誤答事例 3] 問題 M1: $5/6 \times 3/8$ 誤答: $5/3 \times 3/4$

(誤りのモデル化) 誤答事例 3 は、副問題生成の誤りとしてモデル化することができる。この誤りをモデル化するために必要な副問題生成プロセスに対する摂動を図 8 に示した。

問題 M1 に対して知識 K_1 を選択すると、妥当な副問題を生成する際の副問題生成プロセスは、 P_s である。このプロセスは、式中の共通因数をもった分母と分子

の組に対して約分を行うプロセスである。このプロセスに対して摂動を加える。プロセス P_s 中の概念「分子」(numerator)は、概念構造中で、上位の概念として「分数」をもつ。このとき、分子と分数のリンクの関係は、part_of であるので、「分子」は、「分数の構成要素」(component of fractional number)に抽象化される。この抽象化によりプロセス P_s^* が生成される。概念「分数」は、part_of でリンクされた下位概念として「分母」(denominator)をもつ。プロセス P_s^* を具体化することにより、プロセス P_s' を得ることができる。

副問題生成プロセス P_s' に従うと 6 と 8 の共通因数 (common factor) を除去 (exclusion) する副問題 M3 が生成される。この結果分母 6 は分母 3 になり分母 8 が分母 4 となった誤答が導かれる。

(モデルに基づく指導) 副問題生成の誤りに対しては、学生が生成した副問題が不適切であることを指摘し、正しい副問題を生成するように指導する。誤答事例 3 に対して、次のように指導することができる。

- (1) 分数のどの要素とどの要素について約分しましたか。
- (2) 分母同士で約分するのは間違いです。
- (3) 分母と分子で約分するのが正しいです。

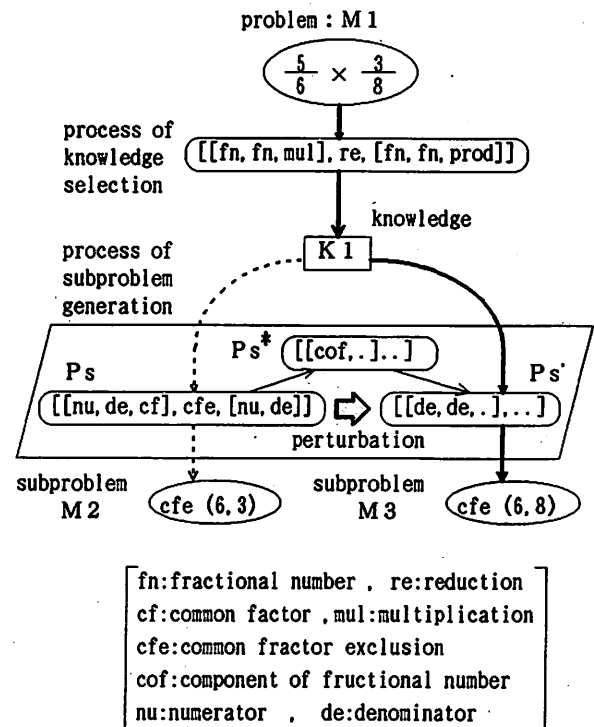


図 8 知識選択プロセスにおける誤り
Fig. 8 An example of error at process of subproblem generation.

4.4 モデルの同定

モデルの同定は、モデルに基づく指導の教育効果(モデルに基づく指導により誤りが修正されたかどうか)により行う。誤りに対する間接的な指導によって誤りが修正された場合には、知識運用の誤りとしてモデルを同定する。誤りを修正するために、直接的な指導が必要であった場合には、モデルは知識自体の誤りを表していると同定する。モデルに基づく指導により誤りが修正されない場合には、モデルを棄却し、モデルの再生成を行う。

モデルを検証するための質問戦略については、現在検討中である。

5. 考 察

本章では、本論文で提案した学生モデルの生成法の特长および本モデルを利用することによって可能となる誤りに対する指導について述べる。更に、本摂動手法の適用可能性について検討する。

(摂動法の改良) プロセスモデルにおいて、知識検索の誤りや問題解釈の誤りとして表現されている誤りを知識自体の誤りとしてとらえると、用いるべき知識と大きく異なる知識により誤りが表現される。このため、知識に対する摂動によりこの誤った知識を生成するには、用いるべき知識だけでなく、全知識に対して摂動を加える必要が生じる。

これらの誤りをプロセスモデルにおいてとらえると、用いるべき知識と誤って用いられた知識は、それらの知識が選択可能な状況を表示している知識選択プロセスにおいて近いと言える。このため、正しい知識選択プロセスに対して摂動を加えることによりこれらの誤りをモデル化することができる。

知識に対する摂動⁽⁵⁾が、知識のずれをモデル化しているのに対して、本モデルは、問題解決過程のずれをモデル化していると言える。

(モデルの解釈) 学生モデルを有効に利用するためには、学生モデルを解釈する必要がある。従来のモデル生成法では、モデルの生成法と生成されたモデルの解釈を分離して扱ってきた。このため、モデルを生成するメカニズムとは別に、モデルを解釈するためのメカニズムが必要であった。

これに対して、本モデル生成法では、認知的考察を反映した摂動操作により学生モデルを生成しており、モデルの生成過程がモデルの解釈を示している。このため、モデルを生成するために加えた摂動操作によっ

て生成されたモデルを説明することができる。また、摂動操作の履歴により、個々の学生あるいは個々の問題についての誤りの傾向をとらえることができる。この履歴をモデル推論の制御知識として利用することが可能である。

(誤りに対する指導) 本モデルでは、学生の誤りを既知の知識を用いて記述しており、学生の誤りを既知の知識と結び付けて説明することができる。このため、学生の用いた知識を否定するのではなく、その知識の適切な運用について指導することができる。更に、モデルより、運用の誤りの原因を知ることができるので、学生の知識運用が誤りである理由を説明することができる。この説明は、知識自体の誤りに対しても、学生の用いた知識が誤りである理由の説明にもなる。

(適用可能性) 本論文で述べた領域の概念構造に基づくプロセスモデルの摂動手法は、問題解決のための知識がオペレータとして整理されており、かつそれらのオペレータが学生の問題解決過程を表すものとして認知的に妥当であるときに有効である。この条件を満たしている領域としては、従来認知的観点からの問題解決過程についての研究が盛んに行われている算数や初等代数学の計算問題が挙げられる。本論文で例として取り上げた分数同士の計算問題については、文献(13)、(14)で挙げられた誤答事例のうち、複合されたものあるいは全く規則性をもたないものであると分析されている少数の事例を除けば、すべての誤答事例を本手法により再現できる。

前述の条件を満たしていない領域に対して本手法を用いるためには、領域の問題解決に対する認知的考察とそれに基づく問題解決過程のモデル化が不可欠となる。

6. む す び

本論文では、学生の誤りを認知的観点より検討し、学生の誤りを知識の運用の誤りとしてとらえることができるプロセスモデルと、プロセスモデルを用いて学生モデルを生成するプロセス駆動型モデル推論法を提案した。更に、本学生モデルを用いることにより可能となる誤りに対する指導について述べた。

現在、学生モデル生成モジュールは、SUN3上のC-Prolog上で実現されている。モデルに基づいて学生と対話するメカニズムは、具体化されていない。今後の課題は、学生との対話メカニズムを実現し、プロセス駆動型モデル推論法を用いた知的CAIシステムを完

成することである。

謝辞 本論文の執筆にあたって有益な御助言を頂いた、宇都宮大学工学部助手池田満氏、ならびに、日ごろ御指導頂く大阪大学産業科学研究所豊田研究室関係者各位に感謝します。

文 献

- (1) Eds. D. Sleeman and J. S. Brown: "Intelligent tutoring systems", Academic Press, London (1982).
- (2) E. Wenger: "Artificial Intelligence and Tutoring Systems", Morgan Kaufmann Publishers (1987).
- (3) 中村祐一, 平島 宗, 上原邦昭, 豊田順一: "導出過程の変換を用いた類推の実現と知的CAIへの応用", 情処学コンピュータと教育研報, CE-1-1 (1988).
- (4) 池田 満, 溝口理一郎, 角所 収: "学生モデル記述言語SMDLと学生モデルの帰納推論アルゴリズムSMIS", 信学論(D-II), J72-D-II, 1, pp. 112-120 (平1-01).
- (5) 竹内 章, 大槻説呼: "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).
- (6) 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方法", 信学論(D), J70-D, 12, pp. 2658-2667 (昭62-12).
- (7) 平島 宗, 中村祐一, 上原邦昭, 豊田順一: "手続きを用いるプロセスに原因を求めた式の計算における学生の誤りのモデル化", 日本教育工学研資, JET87-5, pp. 11-18 (1987).
- (8) 平島 宗, 中村祐一, 上原邦昭, 豊田順一: "意図と方略の概念を用いた学生の誤りのモデルプロセスモデルの提案とその実現", 信学技報, ET88-1 (1988).
- (9) 平島 宗, 中村祐一, 上原邦昭, 豊田順一: "ITSのための学生モデル生成法とそれに基づく指導戦略", 情処シンポジウム論文集, 88-6, pp. 33-42 (1988).
- (10) J. S. Brown and K. VanLehn: "Repair theory: A generative theory of bugs in procedural skills", Cognitive Science, 4, pp. 379-426 (1980).
- (11) K. VanLehn: "Bugs are not Enough: Empirical Studies of Bugs, Impasses and Repairs in procedural Skills", The Journal of Mathematical Behavior, 3, pp. 3-71 (1982).
- (12) M. Matz: "Toward a process model for high school algebra errors", eds. D. Sleeman, et al., Intelligent Tutoring Systems, pp. 25-50, Academic Press, London (1982).
- (13) 石谷 茂, 小川純一郎: "数学誤算誤答の事例研究(代数, 6年, 5年, 4年)", 明治図書(昭35).
- (14) 田村三郎, 船越俊介: "数学迷答集", 講談社(昭58).
(平成元年3月20日受付, 7月21日再受付)



平島 宗

昭61阪大・工・応物卒。昭63同大大学院修士課程了。現在、同大学院博士課程在学中。人工知能、特にITSの研究に従事。情報処理学会、人工知能学会、教育工学会各会員。



中村 祐一

昭60阪大・工・応物卒。昭62同大大学院修士課程了。現在、同大学院博士課程在学中。人工知能、特にITSの研究に従事。情報処理学会、人工知能学会各会員。



上原 邦昭

昭53阪大・基礎工・情報卒。昭58同大大学院博士課程退学。同年大阪大学産業科学研究所勤務。現在、同研究所講師。工博。現在、人工知能、特に自然言語理解、および自動プログラム合成の研究に従事。ACM、計量国語学会、情報処理学会、人工知能学会、日本ソフトウェア学会各会員。



豊田 順一

昭36阪大・工・通信卒。昭41同大大学院博士課程単位取得退学。同年阪大・基礎工・助手。昭44助教授。昭57大阪大学産業科学研究所教授。工博。現在、ITS、自然言語理解、画像処理、および文書画像処理の研究に従事。日本認知科学会、人工知能学会、情報処理学会各会員。