

解説

知的 CAI のフレームワーク BOOK の構成といくつかの応用例†



竹内 章†

1. はじめに

われわれは昭和50年代初期から、学習者の主体性を助長するCAIの実現を一つの目標にして、CAIシステムの研究を行ってきた。そして、コースウェアの利用者、作成者、管理者の三つの立場からCAIシステムの要件を検討してBOOKと呼ぶシステムを作成し^{1),2)}、情報処理教育の補助教材として学生教育に利用した。当時のBOOKは、コースウェアを本に例えるならば図書館に相当する機能も有しており、一つのコースウェアを利用して順序だてた学習ができるだけでなく、階層化された情報を用いて、学習者がシステムに登録された全コースウェアのなかから必要な情報を検索し、コースウェアの必要部分だけを実行することができるなど、いくつかの特徴的な機能を有していた³⁾。

その後、以前のシステムの特徴を生かしつつ、高度に個別化された双方主導の対話学習を実現するために、システムが個々の学習者の理解状態を推定し、理解状態に適合した応答をする機能と、学習者が自然言語を用いてシステムに疑問点を質問できる機能をもって生まれた知的CAIシステムが、現在のBOOKシステムである。BOOKシステムは、単一のコースウェアを作成するためだけではなく、さまざまな教科の専門知識を記述して知的CAIによる学習環境を実現するためのフレームワークである。

本稿では、BOOKの概念的な基礎である「双対モデル」と呼ぶ対話学習システムのモデル、「MHM」と呼ぶ知識表現モデル、学習者の誤り原因を同定して学習者のモデルを推定する方法、そして「適応指導」と呼ぶ学習者の理解状態に基づく教授方法について述べ

る。最後にBOOKで作成したFortranプログラミングと引算に関する教材の実行例を示す。

2. BOOKシステムの構成と知識表現

2.1 双対モデル

BOOKの概念的な基礎である対話学習システムのモデルを図-1に示す。学習者とシステムは対話の話題を共有しており、システムは「教材知識」によって話題を理解する。教材知識は教科目に関する専門知識である。話題を教材知識で解釈した過程の記録が「話題の理解」で、話題に対するシステムの理解を表現する。「対話の目標」はシステムが対話によって達成したい教育の目標を副目標に分解して、木構造で表現した知識である。「学習者の知識」は教材知識に対応した知識で、学習者が教科目に対してもっている知識をシステムが推定した結果である。「学習者の理解」は学習者の知識で話題を解釈した過程の記録であり、「学習者の目標」は学習者の要求や意図である。学習者の知識、学習者の理解および学習者の目標の三つが学習者のモデルである。「教授知識」は、教材知識、話題の理解、学習者の知識などの知識を参照しながら、次の機能を果たすメタレベルの推論を含んだ教育に関する専門知識である。

- ① 話題の理解を解釈する。
- ② 学習者からの質問に答えるために、話題の理解

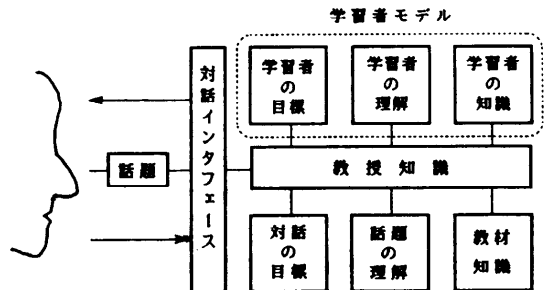


図-1 高度個別双方主導対話のモデル「双対モデル」

† Intelligent CAI System "BOOK" and Examples of its Application by Akira TAKEUCHI (Department of Electronics, Faculty of Engineering, Kyushu University).

† 九州大学工学部電子工学科

の解釈結果を説明する。

③ 学習者の要求とシステムの教育意図が衝突した場合に、両者を調整する。

④ 学習者の入力に誤りがあった場合には、その原因を同定する。

⑤ 学習者の入力から学習者の知識を推定して、学習者のモデルを更新する。

⑥ 学習者モデルの理解状態に応じて、学習者の誤りを指導する。

⑦ 話題のなかから学習者の理解状態に適した質問を生成して提示する。

⑧ 学習者の理解状態に適した教材を選定して、話題として提示する。

図-1 のなかで教材作成者が用意するのは教材知識と、対話インタフェースのなかの教材知識に依存した辞書である。学習者のモデルおよび対話の目標、話題の理解は、対話の進行にともなって教授知識によって更新される。

教材知識、話題の理解、対話の目標と、学習者に関する同じ種類の知識が対をなすことから、この対話学習モデルを「双対モデル」と呼んでいる。

2.2 多重階層モデル

教材知識はエキスパートシステムのドメイン知識に相当するが、知的 CAI の場合には、ユーザから与えられた問題を解決するためだけではなく、システムが適切な教材を選定したり、学習者を治療するためなど、教授知識が解釈してさまざまな目的に用いるので、知識の内容と表現形式が非常に重要になる。BOOK の知識表現は次のことを考慮して設計した。

① 学習者の質問に答えたり、指導するために、教材知識や教材知識を用いた推論のプロセスを説明することがある。そのためには教材知識と自然言語文との相互変換や、教材知識の図形への変換が必要になる。

② 一つの教材には学習者に理解させたい教育目標となる知識が、数多く含まれている。新しい概念を一度にたくさん教えたり、学習の順序が不適切であると、学習者を混乱に陥れるだけでなく、システムが学習者の理解状態を推定する際の探索空間が広がって、効率の低下をきたす。したがって教育目標を分割し、それらの知識の学習順序を表現することが重要である。

③ システムが学習者と対話する場合に、学習者がまだ習っていない知識をむやみに用いることは、教育上有害である。また、BOOK は単独の教材を作成す

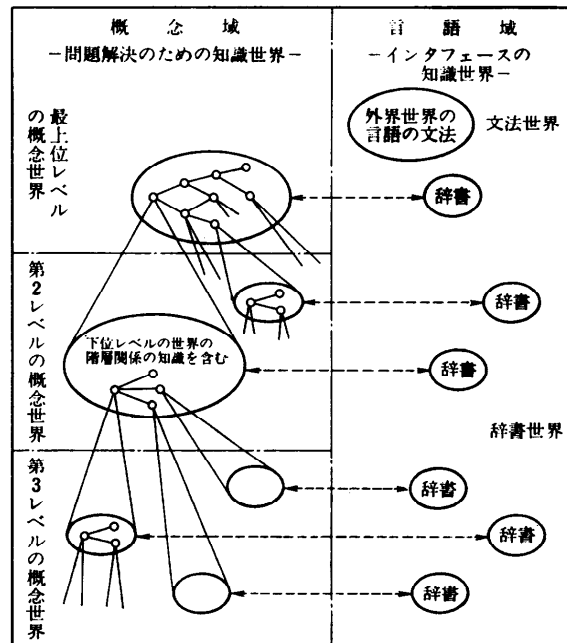


図-2 BOOK の多重階層世界知識表現モデル (MHM)

るためだけではなく、多くの教材を統括管理するためのフレームワークでもあるので、システム中に互いに矛盾する教材知識が存在しうる。したがって学習内容に応じて推論に使用する教材知識を制御する手段が必要である。

以上のような考察から、われわれは、図-2 に示すような多重階層モデル (MHM) と呼ぶ知識表現モデルを提案した⁴⁾。MHM は、教材知識に対応する概念域と、対話インタフェースである言語域とからできている。さらに知識は教授の対象となる概念の最小単位である世界に分割されている。概念域の世界は言語域の辞書世界と一対一に対応しており、述語や定数で表現される概念域中の概念は、対応する辞書世界で自然言語の単語や図形への変換規則と対応付けられる。

概念域の世界はいくつかのレベルに区分されており、一つ上のレベルの世界で知識継承のための関係が定義される。BOOK では第2レベルの世界が一つの教材に対応しており、第3レベルの世界は一つの学習単元に対応している。最上位レベルの世界は全教材を代表しており、図書館に相当する。

MHM は複数の知識継承の関係を定義できるが、BOOK では概念間に存在する通常の上位下位関係と、次節で述べるストラテジグラフと呼ぶ学習順序を表す関係を定義している。知識はそれが属する世界が活性

化されているときだけ推論に使用される。概念域のある世界が活性化されるとその先祖の世界も同時に活性化される。言語域の辞書世界は対応する概念域の世界が活性化されているときだけ活性化され自然言語文の解析や生成に使用されるので、多義語の曖昧性を減少させることができる。

2.3 教材知識とストラテジグラフ

教材知識は問題解決に使用されるだけでなく、2.1で述べた機能を果たすために教授知識によって解釈されるので、知識の適用条件や、その知識が属する世界の教育目標、教育目標間の関係を明示しておく必要がある。このような観点から、概念域の世界は、教授の対象となる知識のほか、教育目標とそれを理解するために必要な前提知識を示す情報をそれぞれ次の形式で含む。

- prob: -condition
=> sub-prob1, ..., sub-prob.. (1)
- objective (World-Name, Educational-Objective, Constraint). (2)
- prerequisite (World-Name, Prerequisites). (3)

(1)は教材知識で、「問題 prob を解くためには、適用条件 condition を満足するときには部分問題 sub-prob1 から sub-prob.. までを解け」を意味する。

(2)は Educational-Objective で指定された知識が含む概念のうちで、Constraint を満足する範囲内の概念が当該世界の教育目標であることを示す。一般に複雑な概念を教える場合には、単純化された簡単な場合からはじめて、次第に一般化された概念を教える。Constraint は特殊化された場合だけを導入するための制約条件である。

(3)の Prerequisites は、当該世界を学習するために要求される前提知識である。

この3種類の知識によって、ある世界の教育目標が、新しく導入される概念であるのか、適用条件の異なる場合であるのか、あるいは別の世界で導入された概念の一般化であるのかを、教授知識が知ることができる。同一の知識を教育目標としてもつ世界から、前提としてもつ世界へ繋いで得られる学習順序を表す関係がストラテジグラフ⁵⁾である。

3. 学習者モデル

3.1 学習者モデルの知識

BOOK の学習者モデルには正しい知識と誤った知

識が含まれる。正しい知識は教材知識と同一の知識で、学習者がその知識を理解していることを示す。誤った知識は、3.2で述べる摂動法によって学習者の誤りの原因を同定した結果得られる学習者の誤った理解を示す。誤った知識には、摂動法でその誤り知識を導く源になった教材知識、教材知識に与えた摂動の種類、誤りを治療するのに用いた指導の方法、そして理解度と呼ぶ0から1の範囲の数値が付加される。また、ある世界で新しい知識が導入されるときには、一般に特殊化のための制約条件がついているので、学習者モデルのなかの知識についても、学習者がどの範囲で正しく理解しているのか、あるいは誤って理解しているのが制約条件で示される。BOOK の学習者モデルは、現在の学習者の理解状態だけでなく、理解状態の履歴を表す。誤り知識の理解度は学習者がその誤りを繰り返す可能性で、1に近いほどその誤りを克服した可能性が高い。

3.2 摂動法

人間の先生は多くの学習者を教えた経験から、教科内容のどの部分をどのように間違いやすいかを知っているので、学習者の間違いの原因を容易に推測する。この知識を集めればバギーカタログができあがるが、完全なバギーカタログを作成することは難しい。しかし、たとえバギー知識で間違いの原因を推定できない初めて出会う誤りであっても、教科内容を十分深く理解しているならば、人間は誤り現象に関する一般的な知識を用いて誤り原因を同定できる場合が多い。BOOK の学習者モデルの推定方法はこのような考え方に基づいている。

各個人の学習者の理解状態を推定するわれわれの方法は、一種の仮説推論である。図-3に学習者モデル推定の概要を示す。Cは活性化された世界の教材知識、Wは誤り仮説の集合、Aは学習者の間違いに対応する概念である。WをCの部分集合Mに摂動を与えて生成するところから、われわれの誤り原因同定方法を摂動法と呼んでいる。摂動法の目標は次のような関

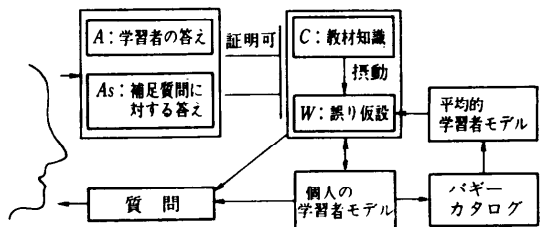


図-3 摂動法による学習者モデルの推定

係を満たす W を発見することである。

$$C - M + W \vdash A$$

ここで、

$$M = \{m \mid m \in C \text{ かつ } m \text{ に摂動を与えて} \\ w \in W \text{ が生成される}\}$$

ただし、 \vdash は証明可能を、 $+$ は和集合を、 $-$ は差集合を表す。

教材知識の部分集合 M を誤って理解したために誤りが生じたと仮定して M から誤り仮説を生成するのであるが、教材知識から M を選択する方法が誤り原因同定の効率に大きく影響する。BOOK では、ストラテジグラフと学習者モデル中の過去の学習履歴から、学習者が誤解している可能性の高い順番に選択する。学習者がストラテジグラフに沿って学習を進める場合には、学習中の世界の教育目標が誤り原因の第一候補である。ついで理解度の悪い知識が候補になる。

また、摂動の与え方は誤り原因同定の能力と効率に影響するが、われわれは学習者が誤りを犯す原因には、教科内容に依存した固有の誤りと、依存しないいくつかの一般的誤り現象があることに注目して、次の8種類の一般的誤り現象に対応する摂動を組み合わせ、誤り仮説を生成している。

- ① 誤った事実を記憶する。
- ② ある問題を部分問題に分解して解くときに、部分問題のいくつかを落としてしまう。
- ③ ある問題を部分問題に分解して解くときに、部分問題に誤った初期値を与えて解く。
- ④ ある問題を解く方法に、適用条件によって何通りの解法がある場合に、適用条件が異なる場合の方法で解こうとする。
- ⑤ ある問題を解く方法に、適用条件によって何通りの解法がある場合に、いくつかの方法を混同して、複数の解法の折衷で解こうとする。
- ⑥ 部分問題を所定の順番で解かなければならないときに、順番を間違える。
- ⑦ 再帰的に問題を解かなければならないときに、再帰の最初あるいは最後だけを例外的に間違える。
- ⑧ 計算時の符号や移項の間違い。

誤り仮説は教材知識に、誤り現象に対応する摂動を与えて生成するので、教材知識は、学習者が理解する教科内容と概念的に同じになっていなければならない。したがって、教材知識の作成者は、教育的に考えて必要であると思われる程度にまで、教科内容の概念を細分化して記述する必要がある。このように細分化

された知識を、知識間の関係を含めて記述するための枠組みが MHM である。

摂動法で学習者の誤り原因を同定することによって、個々の学習者がどの教材知識をどう誤解したかが明らかになる。図-3 のバギーカタログは、システムを利用した全学習者の誤り知識の集積である。平均的学習者モデルは、個人の学習者モデルを統計処理した結果で、教材知識それぞれの誤解しやすさ、その結果陥りやすい誤りを示しており、システムの教授経験の蓄積である。平均的学習者モデルは、個人の学習者モデルにない新たに導入された知識を学習する場合に、学習者の理解状態の第一近似として用いられる。

4. 教授の方法

4.1 適応指導

摂動法は誤り現象に対応した摂動によって誤り仮説を生成するので、学習者が誤りを犯した理由と、どの知識をどのように誤解したかが明らかになる。したがって、誤りを治療する方法を決定するための情報も得られる。学習者の誤りを治療する場合には、学習者の理解状態、間違いの種類、教科内容に応じて適切に回答しなければならないが、われわれは教育的治療を特徴づける要素として次の三つを考慮しており、これに基づいた指導法を適応指導と呼んでいる。

(1) 指導対象のレベル

学習者を治療する場合、直接誤りを指摘するよりも、学習者が自分で誤りに気づくのに必要な情報を与えるほうがよい。比較的理解程度のよい学習者は、抽象的なアドバイスを与えられても自分の誤りに気づきうるし、自分で考えるよい機会を与えることになる。しかし、あまりよく理解していない学習者には、具体的なアドバイスを与えるほうが望ましい。

話題の理解は問題を部分問題に分解しながら解いた過程を記録した木構造である。したがって、根に近いノードほど多くの概念を内包しており、抽象度が高く、葉は個々の事実に対応する。この性質を利用して、誤り原因と根の間のどのレベルで指導するかによって、学習者の理解程度に応じて、誤りを直接指導するか、より間接的に指導するかを選択する。

(2) 一般形か実例か

話題の理解は、対話中の話題を解釈して得られた教材知識のインスタンスである。インスタンスを用いて説明すると具体的に理解しやすいが、一般性を失ってしまう。説明に教材知識を用いるか、話題の理解を用

いるかによって、一般的に説明するか具体的に説明するかを選択する。

(3) 与える情報の内容

指導のために学習者に与える情報は、適切な指導のレベルで、次の6つのなかから選択する。

- ① ヒントを生成して提示する。
- ② 正解を教えて、正解がえられる理由を考えさせる。
- ③ 学習者がすでに正しく理解している知識と間違いを対比する。
- ④ 正しい結果が導かれる過程を説明する。
- ⑤ 間違い知識を用いて反例を生成し、提示する。
- ⑥ 間違った知識の振舞いについて論駁する。

4.2 質問に対する応答

学習者に主体性をもたせるためには、学習中に生じた疑問点を学習者が質問できるようになっていなければならない。学習者の質問は次の3種類に分類することができる。

- ① システムの意図や目的を尋ねる質問。
- ② 問題解決過程に関する質問。
- ③ 知識の成立する理由や適用条件に関する質問。

この3種類の質問にはそれぞれ、システムのもっている知識に対してなぜそうであるのかを尋ねる肯定的な質問と、学習者の考えがシステムの考えと食い違った場合になぜそうでないのかを尋ねる否定的な質問との二つのタイプがある。

これらの質問に対する答えは双対モデルの対をなす知識から得られる⁹⁾。第1の質問は対話の目標によって、第2の質問は話題の理解によって、第3の質問は教材知識によって答えることができる。肯定的な質問に対しては双対モデルのシステム自身の知識を用いて応答することができる。ただし、第3の質問に答えるためには、教材知識が成立する理由を陽に記述した知識が必要である。否定的な質問に対しては、誤り原因を同定した結果得られる双対モデルの学習者側の知識を用いて、初めての確に応答することができる。

5. 教材の実現例

BOOK で作成した教材のなかから対話例を二つ紹介する。図-4 は Fortran の教材の対話例で、下線を引いた部分が学習者の入力である。対話の話題は〈1〉で示した幾何平均を求めるプログラムで、いくつかの間違いを含んでいる。教育目標は、整数割る整数が整数になることである。このプログラムを解釈した結果

```
(READ (5,*) N)
(PI = +0.1000000000E+01)
(DO 10 I = 1, N)
(READ (5,*) X)
(10 PI = X * PI)
(MEAN = PI ** (1 / N))
(WRITE (6,*) MEAN)
(END)
< 1 >

"I'LL EVALUATE THE PROGRAM. PLEASE INPUT DATA."

READ: N=2
READ: X=1.0
READ: X=2.0
(WHAT'S THE VALUE OF MEAN IN THE ASSIGNMENT STATEMENT (MEAN = PI ** (1 / N)) IN LINE 6)
< 2 >

>>(THE VALUE OF MEAN IS 1.414214)
< 3 >

YOU ARE INCORRECT.
(WHAT IS THE RESULTING VALUE OF THE ARITHMETIC EXPRESSION BETWEEN (CONSTANT INTEGER 1) AND (N INTEGER 2) WITH ATTENTION TO THE DATA TYPE)
< 4 >

>>(THE ANSWER IS 0.5)

YOU FORGOT SOME FACT.
(WHAT IS THE RESULTING TYPE OF THE ARITHMETIC EXPRESSION BETWEEN INTEGER AND INTEGER)

>>(I FOUND MY MISTAKE)

エディタでプログラムを修正する。

(READ (5,*) N)
(PI = +0.1000000000E+01)
(DO 10 I = 1, N)
(READ (5,*) X)
(10 PI = X * PI)
(MEAN = PI ** (+0.1000000000E+01 / N))
(WRITE (6,*) MEAN)
(END)
< 5 >

"I'LL EVALUATE THE PROGRAM. PLEASE INPUT DATA."

READ: N=2
READ: X=1.0
READ: X=2.0
(WHAT'S THE VALUE OF MEAN IN THE ASSIGNMENT STATEMENT (MEAN = PI ** (+0.1000000000E+01 / N)) IN LINE 6)

>>1.414214

YOU ARE INCORRECT.
(YOU FORGOT TO APPLY THE FOLLOWING RULE)
(IT IS NECESSARY TO CHECK THE DIFFERENCE OF DATA TYPE BETWEEN RIGHT AND LEFT SIDE IN THE ASSIGNMENT STATEMENT)
(WHEN THE ASSIGNMENT STATEMENT (MEAN = PI ** (+0.1000000000E+01 / N)) IN LINE 6 WAS WORKED OUT)
< 6 >
```

図-4 Fortran の教材を使った対話例

が図-5 である。システムは教育目標が達成されているかを調べるために、教育目標に指定された知識を解釈の過程で使用する6行目の文に関して、〈2〉の質問を生成する。〈3〉の学習者の誤答に対して、振動法に

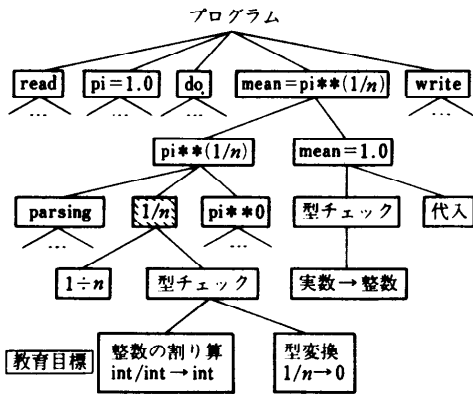


図-5 図-4 のプログラムを解釈した結果

よって整数の割り算と代入時の型変換の二つの誤りを発見する。誤り原因の一つは教育目標の知識であるが、学習者の注意を割り算に向けさせるためにシステムが生成した応答〈4〉は、適応指導の指導レベルの原則にしたがって、誤り原因よりも2段上のレベルの、図-5 でハッチングしたノードに関する質問である。学習者が〈5〉のようにプログラムを修正した後、先の質問に誤解答したことから学習者の理解度があまりよくないと判断したシステムは、〈6〉では直接誤り原因を説明している。

図-6 は引算に関する対話の例である。十の桁を計算するときに引けないので、学習者は大きな数から小さな数を引いている。借りのないときとあるときの引

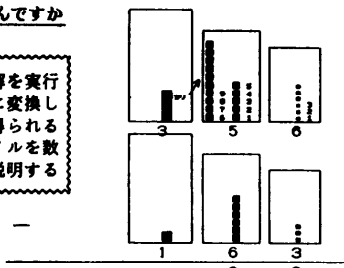
>> 356ひく163の答えは213になります
 違います。次のような考え違いをしています。
 2桁目を計算するときに、35引く16が21であるのは、
 5から6を引けない場合に、
 6引く5を1、
 3引く1を2とするからです。

引けないので、となりから1かりてこないといけません。

>> 356から163をひいた答えはいくつですか
 356引く163は193です。

>> なぜなんですか

話題の理解を実行順に図形に変換して、解が得られる過程をタイルを敷きながら説明する



100の桁を計算します。2から、1を引きます。

図-6 引算の教材を使った対話例

算の知識は、それぞれ次のように定義されている。

sub ([A 1|A], [B 1|B], [Ans 1|Ans]) :-
 can-sub (A 1, B 1) =>

sub 1 (A 1, B 1, Ans 1),
 sub (A, B, Ans).

sub ([A 1|A], [B 1|B], [Ans 1|Ans]) :-
 cant-sub (A 1, B 1) => borrow (A, A 2),
 sub 2 (A 1, B 1, Ans 1),
 sub (A 2, B, Ans).

ここで数は前後を逆にしたりリストで表現しており、たとえば 123 は [3, 2, 1] で表される。この誤りの原因は、借りのある引算の計算をしなければならないときに、借りのないときの方法で強引に計算したことにある。振動法では、3.2 の④と⑤の誤り現象の組合せで生成される次の誤り知識が、誤りの原因であると同定される。

sub ([A 1|A], [B 1|B], [Ans 1|Ans]) :-
 cant-sub (A 1, B 1) =>
 sub 1 (B 1, A 1, Ans 1),
 sub (A, B, Ans).

6. おわりに

知的 CAI システムの事例として、BOOK の概要と、BOOK で作成した二つのコースウェアの実行例について述べた。

高度に個別化された学習環境は、学習者の理解状態や意図をシステムが推察できて初めて可能になる。正しい知識に、誤り現象に対応する振動を与えて学習者の誤答原因を同定する振動法では、多くの誤り仮説が生成されるので、機械的に探索すると効率が悪くなる恐れがある。

$$\begin{array}{r} 356 \\ -163 \\ \hline 193 \end{array}$$

この問題を解決する方法がストラテジグラフによる学習順序に関する知識の導入であり、いま一つの方法がバギーカタログによる経験の蓄積である。BOOK のバギーカタログが通常のバギー知識と異なるのは、あらかじめ先生が作成した初期カタログの上に、振動で生成した誤り仮説のなかから学習者に観察される誤り知識を、システムが自分で蓄積する点である。

教授法として適応指導を紹介したが、ヒントを与えたり、正しい問題解

決過程を説明したり、判例を与えたりする方法などを、どのような場面で適用するべきかについては、現在のところ必ずしも明確にはなっていない。教科内容や学習者の理解状態に応じて適切に選択する方法は現在検討中である⁷⁾。

参 考 文 献

- 1) 大槻, 竹内, 古川: BOOKE による教材の作成・管理・運用, 情報処理学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 216-222 (1980).
- 2) 竹内, 大槻: 英文, 日本語文, 図形, 画像からなるディスプレイ表示用画面編集のためのシステム DSE について, 情報処理学会論文誌, Vol. 23, No. 5, pp. 509-515 (1982).
- 3) Otsuki, S. and Takeuchi, A.: A Unified CAL System for Authoring, Learning and Managing Aids, Proc. of WCCE 81, pp. 249-256 (1981).
- 4) 大槻, 竹内: 自然言語対話のモデルと知的 CAI への応用, 情報処理学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 665-673 (1984).
- 5) Otsuki, S. and Takeuchi, A.: Intelligent CAI System Based on Teaching Strategy and Learner Model, Proc. of WCCE 85, pp. 463-468 (1985).
- 6) Otsuki, S. and Takeuchi, A.: A Highly Individualized CAI System, Proc. of 2nd Int. Conf. on Children in the Information Age, pp. 125-135 (1987).
- 7) 竹内, 近藤, 大槻: 知的 CAI の教授パラダイムに関する研究, 教育工学関連学協会連合・第2回全国大会講演論文集, pp. 307-310 (1988).
(昭和63年7月13日受付)