

解説



知的 CAI のパラダイムと実現環境†

大槻 説 乎†† 山本 米雄†††

1. はじめに

伝統的 CAI と知的 CAI について、その差異を明確にしつつ、概略を述べる。知的 CAI とは対象とする学習に対してなんらかの問題解決能力をもつものを指し、そうでないものを伝統的 CAI と定義する。一般に CAI は情報技術者にとって、取り組みやすい対象と思われるが、決してそうではない。現実の教育制度、コスト面を始め、人工知能の技術、認知心理学、教授方略、学習者モデルなど、どれを取り上げてみても、CAI にとって大きな課題である。

伝統的 CAI は 1960 年代から始まり、今日に至ってその問題点が浮き彫りにされ知的 CAI へと展開していく。伝統的 CAI の出現、実現環境を踏まえ、今日のパーソナルコンピュータによる CAI、そのパラダイムそしてレッスン例について述べる。また今後の可能性、展開方向をも探る。

知的 CAI については、その出現と経過、目標、基本的構成などを述べる。教材知識、学習者モデル、教授知識、双方主導対話について、その問題点を明確にし今後の方向を探る。知的 CAI の各論についての詳しい議論は、本小特集の以降の解説を参照されたい。

2. 伝統的 CAI の出現と実現環境

人類は、1946 年に ENIAC を初めてのプログラム内蔵方式のコンピュータとして世に出現させた。それ以来“人間の代わり、または人間そのもの”をコンピュータによって実現しようと試みるようになった。その一つとして、きわめて人間的営みである教育においてコンピュータを利用し、教師の代役をさせようと試みた。1960 年代当時トランジスタで作られたコンピ

ュータはようやく大学や民間の企業に普及し始めたころであり、まだ非常に高価であった。コンピュータは大型化を目指し、時間を割り当てることにより、ユーザはコンピュータを共同で利用した。そしてユーザにとっては高価なコンピュータを擬似的にはあるが、独占する形態である TSS が普及し始めたのである。

2.1 初期の代表的 CAI システム

(1) イリノイ大学 PLATO システム

大規模 CAI の代表とみなされる米国イリノイ大学の PLATO (Programmed Logic for Automatic Teaching Operation) は、アーバナ・シャンペイン校で 1960 年 PLATO-I として 1 台の端末による CAI の研究によりスタートした。そして、PLATO のための研究所 CERL (Computer-based Education Research Laboratory, Director: Dr. D. Bitzer) が誕生し、ハードウェア、ソフトウェアおよびコースウェアの研究・実践がなされている。PLATO は 1970 年代後半 PLATO-IV システムとなり全盛時代を迎えた。中央処理部として CDC Cyber 73-24 と CDC 6500 の 2 台のコンピュータを有するデュアルプロセッサの方式をとった。また、後者は通信手段にも利用した。図-1 は通信機器構成図である¹⁾。全端末をサイトに分割し、出力、入力で伝送容量を変え、レスポンスタイムを短くするように工夫している。これは学習者の入力であるキー操作とコンピュータからの出力である文章・図形出力との情報量の違いを考慮したものである。図-2 は PLATO における CAI の枠組みであるが、教師と著者 (author) とを概念的に分けたところに特徴があり、著者の使う CAI 言語として Tutor を開発した²⁾。当時としては画期的で、Tutor 言語はきめ細かい教材記述が可能であり、CAI 言語のあり方を示した。しかし一方、コンピュータに素人の人々にとっては手続き型言語の使いにくさもあり、オーサリングシステムという教師向き言語への道をも暗示した。PLATO は、また伝統的 CAI レッソンの枠組みを確立したといえる。図-3 は典型的な教授方略の例で

† Paradigm and Environment of Intelligent CAI by Setsuko OTSUKI (Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology) and Yoneo YAMAMOTO (Faculty of Engineering, Tokushima University).

†† 九州工業大学
††† 徳島大学

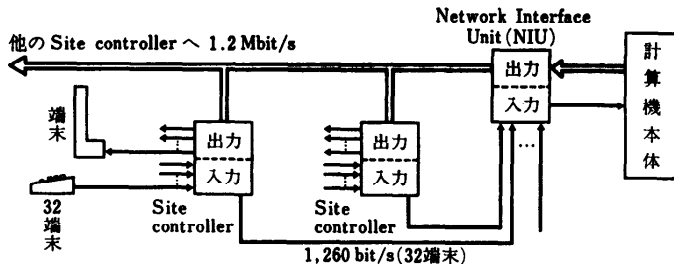


図-1 PLATO システムにおける通信機器構成

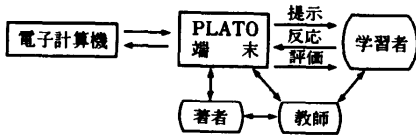


図-2 PLATO における CAI の仕組み

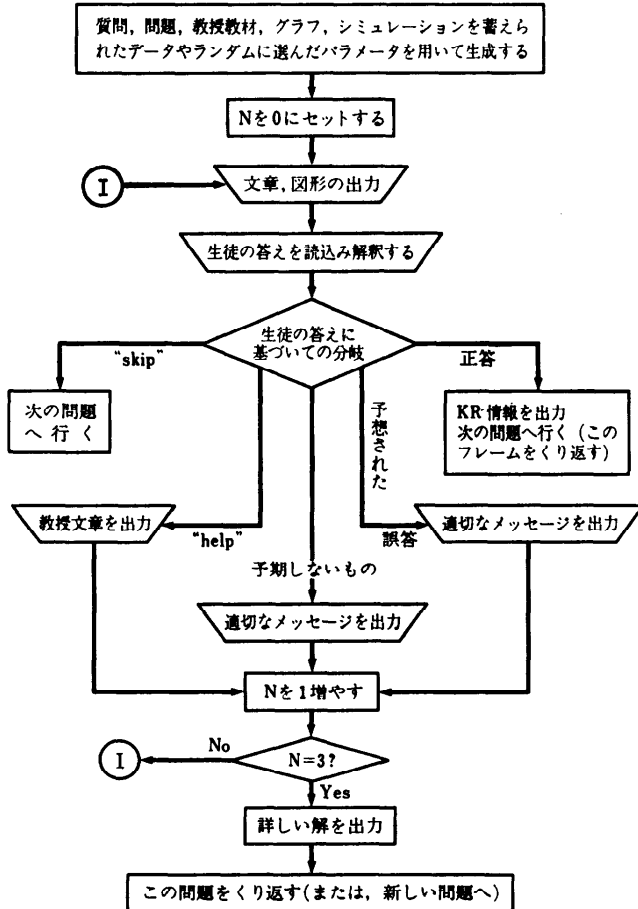


図-3 伝統的 CAI における典型的な教授方略

ある³⁾。説明文などを与え生徒の答えに基づいて分岐するが、それらはあらかじめ教師(著者)が予想し、前もってすべての可能性を列挙する必要がある。そして3回誤答するとコンピュータは正答を出し、詳細な説明をするという流れである。

コンピュータ、特に CAI がめずらしい時代は伝統的 CAI もある程度教育に役立ったが、教育現場で使い込んでくると欠点が目立ち始めた。

- ・高価な自動頁めくり機
 - ・学習者は受身になる
- などが指摘されている⁴⁾。

この一つの解決法として知的 CAI があるが、これについては 4. 以降で述べる。

(2) 我が国における CAI の例

我が国においては 1977 年より筑波大学と共同研究・開発を行った竹園東小学校がある。ここではパソコンを用い、次に述べる“独立環境”が主になる。また大学においては 1978 年より始めた金沢工業大学の CAI システムがある。これは中央にメインフレームをもつ集中型 CAI システムの形態をとっている。企業内では社内教育として、1973 年より NTT の中央学園で CAI が使用されている。現場での CAI の動きについては文献^{5), 6)}を参照されたい。

2.2 パーソナルコンピュータの出現

(1) 独立環境

1980 年代に入りマイコン・パソコンの普及が CAI に影響を及ぼした。それまで、財政的に豊かであるか、莫大な資金補助のあるところでしか CAI が行われなかったが、低価格のコンピュータの出現により、公教育、民間教育(塾・予備校)またそれほど大きくない企業においても CAI の使用の可能性がでてきた。また、CAI を使う側の教師、生徒にとっても従来高価すぎて、どちらかという威圧感

のあったコンピュータに対し、気軽に使えるようになり、学習者が積極的にコンピュータに働きかけていく形態など CAI 本来の姿がでてきた。教師が個人的にコンピュータを買い、草の根的な CAI の使用も始まった。さらに時代の流れにより、高度情報化社会がコンピュータを用いた教育、情報処理教育など新しい教育システムを要求しだした。しかしコンピュータの特徴を生かした教材、コースウェアの不足という問題に直面しだした。これはオーサリングシステムの要求へとつながっていく。

(2) LAN 環境

授業の形態によっては生徒の画面をモニタしたり、先生の画面を生徒全体に見せる必要もある。また一人の生徒をモニタして授業を進めていく場合もある。

必要なソフトを一斉にオンラインで配布をもできる LAN 環境は今後の CAI の一形態であろう。しかし、現実には良いレッスン(教材)がなく、現場教師は機械の操作に振り回され、使いきっていないのが実状である。

3. 伝統的 CAI のパラダイム

CAI は、当初コンピュータの限界に挑戦する可能性の研究からスタートした。しかし教育におけるコンピュータ利用が真剣に考えられ、実用化への道へと走った。そこで伝統的 CAI の開発・実践となるのだが、不満足な点が多く、まだ実用・普及へと至っていないのが現状である。

歴史的に見て、1960年代から1970年代にかけ、システム指向すなわち CAI のハードやアーキテクチャに重点が置かれた。1980年代になり、ソフト(レッスン)に重点が置かれ、以下に述べるような分類がなされた。1980年代後半より、学習者をより意識して、学習環境、環境型 CAI と発展していく。これについては次章で述べる。

3.1 フレーム型

フレーム型とは学習者の応答により、次の選択されるべきフレーム(画面)へと制御が移る。現在のフレームは過去の直前のフレームからしか影響を受けないのが特徴である。

(1) チュートリアル型

説明文があり、次に問題がでてくる。図-1に示したように3回誤答すると、詳しい説明がある。典型的な伝統的 CAI の形態である。

(2) ドリル & プラクティス型

ドリル問題をコンピュータを用いて行う。解答照合などは、数値またはアルファベットで簡単なパターンマッチングで行え、技術的にはレッスン作成も簡単で、評価のための学習効果の測定もしやすい。しかし、学習者は機械的操作を繰り返し行わねばならず、多用すると弊害を生じる。

3.2 シミュレーション型

模擬実験をコンピュータで行う。分子模型などモデルの可視化、さらに進んでアニメーションの使用など、画面を通じて学習者に具体的にイメージを把握してもらう。また学習者はパラメータを入力し、システムの動作を見、試行錯誤的に試すことができる。これにより学習者に自ら考える機会を与える。他の教材にくらべ、CAI のもつ大きな特徴は対話性(双方向性)である。その対話性を簡単に生かせ、しかもコンピュータのもつ計算能力をも生かせるのがこのシミュレーション型である。コンピュータの低価格化、性能向上で確実に普及する形態である。

3.3 アドリブ型

教科書の文章をコンピュータに入れるという発想でなく、新しい教材を考える。しかもそれは学習者が積極的に働きかけて学習する。つまり学習者の経験的・発見的・行動的・直観的な行為を重視し、自らが学習過程を創造していくための環境を提供することに意味をもたせている⁶⁾。以上がアドリブ型の一形態であるが、その代表的なものとして LOGO (とその処理系)がある。LOGO は MIT の Papert, S. によって開発された。タートル(turtle)と呼ばれる実際にハードで作ったロボットに学習者は働きかけ、その軌跡によって線図形を描かせる。CAI としては、CRT 上の“△”でタートルを代役させ、そのタートルにコマンドを与え、△がもつペンを用いて、図形を描かせる。最近では、平面的に色付けもでき、またワープロ機能をもった LOGO もある。さらには LOGO の言語を通じ、幾何図形だけでなく種々のシミュレーションの応用も考えられている⁷⁾。

3.4 オーサリングシステム

CAI が普及しないのは大量の一連の教材、すなわちコースウェアがないからである、という考えがある。一般によいレッスンを作成するには、コンピュータの知識、特にプログラミングの技術が必要とする。しかし、プログラミング技術者は教育現場の経験も教材に対する知識も乏しい。そこでコースウェアを効率よく、しかもコンピュータに素人である現場教師が作

成するには教材作成システムが必要となった。これをオーサリングシステムと呼んでいる。しかし、コンピュータ技術が教育に対して成熟していない現時点では、オーサリングシステムは教え込み型の粗悪なレッスンを乱造するものだという考え方も一方にある。動画などを含めたシミュレーションタイプのソフト作りのための作成支援ツールとして姿を変えたオーサリングツールもある。

4. 伝統的 CAI の展望

伝統的 CAI に対する将来の発展を考察する。

4.1 新しい枠組み

(1) 学習環境、学習目標を重視する。

コンピュータは人間教師の代わりにはならない。学習目標を明確にし、的を絞って利用する。

(2) どのような目的で CAI を利用するかを明確にする。

①モチベーションをあげる。

- ・やる気や興味を起こさせる
- ・持続力をもたす

②内容を深く理解させる。

- ・考えるチャンスを与える
- ・知らなかったことを気づかせる

③知識・技能の定着を図る。

- ・知識を多様な形で与え定着を図る
- ・同じことを繰り返し、身につけさせる

以上①～③をすべて同時に満たそうとすると、伝統的 CAI では無理がある。それぞれの目的に応じ、使い分ける必要がある。

また CAI を論じる場合、従来の一斉授業と異なる枠組みが模索されている。すなわち、遊び、楽しみなどを目的としたゲームなども、一部分であるが利用すべきである。最後に、ゲームなどを含め、図-4に CAI

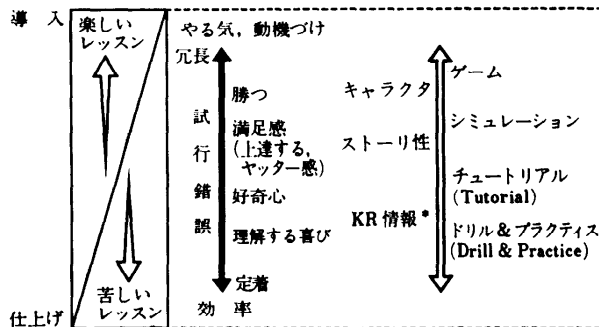


図-4 CAI レッソンの効用

レッスンの効用をまとめた⁹⁾。

4.2 伝統的 CAI の新しい流れ

(1) センター方式

伝統的 CAI の最近の傾向を述べる。(1), (2)については、すでに一部実用化されているが、(3), (4)については今後の課題である。

① file serverとして機能し、個々の端末の制御などのすべてをセンタのコンピュータで集中処理しない。

② センタディスクは端末の学習者の大きな学習結果など、主なものだけを保持し、個々のレスポンスなどの詳細な結果には関与しない。

③ 必要なときに公衆回線を用いて結び、情報のやりとりを行う。いわゆるルーズなネットワークの形態も重要になる。

(2) スタンドアロン方式

① CD-ROM, CD-I, 音楽機能, 音声入出力, 手書き入力などマルチメディア化していく。

② 極端に小型化し、ゲーム化していく。ゲームをして遊ぶような感覚で英単語など覚えたりする。

(3) LAN 方式

教室内だけでなくキャンパス規模で使われる。その際教師と生徒だけでなく、生徒間同士でもモニタリングを通じ教え合う。電子メールも自由に交換でき、課題の提出なども LAN を通じて行う。

(4) 環境型

CAI を教材、さらに広く解釈して教育環境の一つとして捉える。これはパソコン通信ネットなどを含めたニューメディアとして、教育的に位置づける。前述のマルチメディア化、データベース、電子道具箱など十分な教育環境を与え、自ら学ぶ発見学習へと発展していく。そのためには適切な誘導が必要であるが、現在のところ効果的な手法はまだ見つかっていない。

4.3 伝統的 CAI のレッスンの最近の傾向

それでは次に、近い将来普及されるだろうと予想されるレッスンを列挙してみる。

(1) シミュレーション型

① 狭義のシミュレーション

② アニメーション

③ ストーリー性のあるソフト

④ 電子教育玩具

(2) 実験ツール型、電子道具箱

(3) データベース型

(4) パソコン通信型

(5) 知的 CAI 型、人工知能技法を用い



(a) 指示薬による pH 滴定: 途中で一部変色, 搅拌でき, きめ細かく操作できる.



(b) 指示薬による pH 滴定: 指示薬と滴定曲線の関係を描かせとめる.

図-5 pH 滴定

た教育用ツール

これらはいずれも理論的根拠はないが、「教え込み型」というよりも、開放型のレッスンであり、道具として使用する傾向にある。

4.4 伝統的 CAI のレッスン例

(1) pH 滴定 (図-5)

シミュレーション型のレッスンとして、化学実験の例をあげる。これは pH 滴定実験の画面であるが、滴定の途中で搅拌のキーを押すと、一部変色している部分が消えるか、変色が全体にいきわたる。きめ細かく操作できるのが特徴である。

(2) しりとり (図-6)

コンピュータと学習者が英単語のしりとりを行う。コンピュータが負ける (知らない単語がある) と、そのたびコンピュータが学習者に教えて (登録して) もらい賢くなる。学習過程を通じ個人用のデータベースが形成される。



図-6 しりとり

コンピュータと英単語のしりとりを行う。コンピュータの知らない単語はしりとりを通じて登録できるのがミソ、学習者に応じて辞書が形成される。

(3) 教育用玩具 (図-7)

コンピュータと遊びながら学習する⁹⁾。

5. 知的 CAI の出現と実現環境

すでに述べたように伝統的 CAI はパソコンの普及とともに急速に発展し、実用化した。一方、伝統的 CAI の欠点に関する議論も盛んになり、これを越える方法を研究する動きが 1970 年ごろから始まった。

5.1 伝統的 CAI から知的 CAI へ

次の 4 つは伝統的 CAI の主要な問題点である。

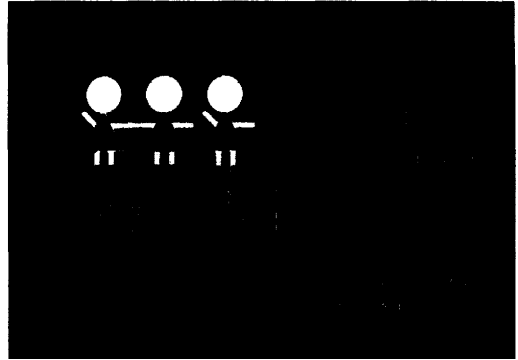
- ① 学習者が疑問点を質問できないこと。
- ② 入力の方法が穴埋め式や選択式のような特殊な表現や、数値、単語またはプログラミング言語のような制約の大きい式や文章などに制限されていること。
- ③ 出題する問題に対するヒントとすべての正答や誤答を事前に用意しなければならないこと。
- ④ 学習者が間違った場合、どのような原因で誤りを犯したかをシステムが推定できないので、誤りに対して適切な個別指導を行うのが困難であること。

上の問題点は伝統的 CAI が問題解決能力をもたないという事実由来している。もしシステムが問題を解くことができれば、その過程を解釈するメタ知識を用意して、質問に答えたり、学習者の答の正誤を判定したりすることができる。さらに、学習者の答が間違っている場合には、その原因を同定して学習者モデルを構成することができる。また適当な範囲の自然言語や図形を処理して入力形式の制限を緩和することもできる。

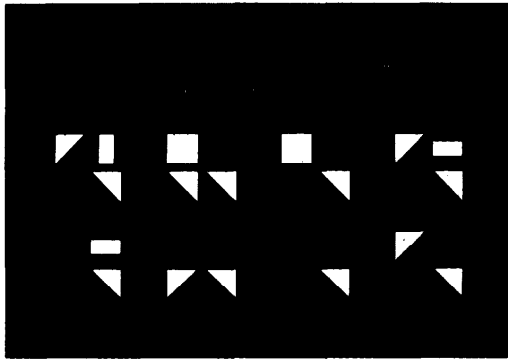
知的 CAI の研究は、このような動機で 1970 年ころから始まった。最初は Intelligent CAI と呼ばれて



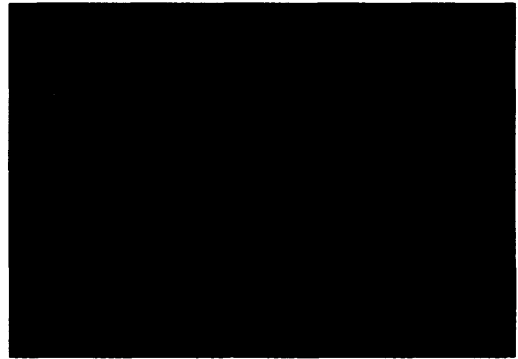
(a) モンタージュ：簡単なキー操作で絵合わせをする。幼児向きで、コンピュータに慣れさせる。



(c) あのかはどこだ：ヒントにより友達を探す。論理的思考を養う。



(b) イメージかくれんぼ：一つのパターンを約1秒間見せ、次にこの6つのなかから同じものを探す。パターンの認識力を養う。



(d) 神経衰弱ベターハーフ：漢字とひらがなのカードを合わせ、コンピュータと神経衰弱を行う。

図-7 教育用玩具

いたが、1970年代の終わりころから、CAIとの違いを強調して Intelligent Tutoring System または、頭文字を取って ITS と呼ばれる場合が多くなった。

5.2 知的 CAI の目標

上に述べたように、伝統的 CAI の問題点を解決するための最も基礎的な機能である問題解決機能を、システムにもたせることが、知的 CAI の第一の目標であった。この範囲では、知的 CAI の目標はエキスパートシステムなどの知識システムと共通である。

第二の目標はこの問題解決機能の上に前記の4つの機能、すなわち入力制限を緩和する機能、解答の正誤を判定する機能、誤答の原因を同定する機能、質問に応答する機能を実現することである。

第三の目標は、CAI 本来の目的である教育そのものに関係する最も重要な機能、すなわち高度個別教育と双方主導対話を実現することである。この第三の目標は伝統的 CAI では実現が不可能と考えられていた

ために問題として取り上げられたことはなかった。

伝統的 CAI の特徴は「個別教育」であるといわれている。このときの個別教育という言葉は、日本の学校で実践されている集団教育に対比して用いられているので、学習者一人一人の特性、理解度、要求などを理解した上で、個人に適した指導をするという意味で用いられているわけではない。知的 CAI で目標にしている「高度個別教育」は、たとえば、複数の学習者から同じ質問を受けたり、彼らの答えのなかに、同じ誤り原因を検出した場合でも、学習者ごとに一番適応していると判断した指導方略を用いるので、学習者が違えば違った応答をするという意味で用いられている。

「教育」という言葉の本来の意味は、学習者のもっている能力を引き出して伸ばすことであり、知識を機械的に教え込むことではない。このためには学習者自身が主体的に学習を進める必要がある。これを実現す

するためには、学習者が自分の理解と要求に従って、主体的に学習を進める学習者主導の学習と、システムが学習者の理解度や個性を推定し、その結果に応じて計画したシステム主導の指導方略とを、矛盾なく整合させなければならない。このような教育方法に基づく対話型学習を双方主導対話による学習と呼んでいる。

5.3 知的 CAI の実現環境

知的 CAI は高機能ワークステーションや AI 専用機の上に試作されるものが多い。理由は現在研究途上にあること、大量の知識記述が必要であること、デバッグの容易な AI 言語が役立つことなどによる。筆者がパソコン上に作成した経験では、パソコンでもかなり複雑な機能まで実現できるが、記憶容量の制約のために多種類の機能よりは、教材に特徴的な少数の機能を優先的に実現した個性のあるシステムが面白い。

6. 知的 CAI のパラダイム

この章ではすでに発表されている知的 CAI の要素技術をまとめて体系づけることによって、知的 CAI の構成法と機能について述べる。

6.1 知的 CAI の基本構成

知的 CAI は、伝統的 CAI のように事前に与えられたシナリオのとおりに動作するわけではない。共通のテーマに対して学習者の側から質問してもよいし、システムの側から説明を与えたり、問題を出してもよい。

このためには、ある教育テーマについて、内容に関する知識（教材知識）のほかに、後で述べる教育順序に関する知識が必要になる。そのほか、質問に回答するために推論を行い、その結果を説明するための教授知識や対話のための自然言語インタフェースなど、多種類の知識を用意する必要がある。図-8 に知的 CAI

システムの基本的な構成要素とその間の関係を示す。

教材知識は対象教科に關係する知識を表現したもので、主に問題解決に使われる。知識の表現方法は他の知識システムと同じである。ただし後で述べるように、誤り原因の同定や、指導方略の計画のために、学習者モデルの内容や問題解決の過程を解釈する必要があるので、知識とそれを用いた問題解決過程がメタ知識によって解釈可能でなければならないという制約がある。

学習者モデルは、システムが推定した学習者の理解状態を表現する部分で、主として高度に個別化された指導方略を計画するための情報源として使用される。学習者が初めてシステムを使うときに、学習者一人に一つずつ、空の学習者モデルが生成され、学習の進行にともなって学習者個人に関する情報が蓄積される。

教授知識は教材知識と学習者モデルを用いて、システム作成者の教育方針や指導方略を実現する。

対話インタフェースは教授知識によって生成された内部表現による出力内容、すなわち学習者へのメッセージ、学習者に提示する問題、学習者への質問、学習者の質問に対する応答などを、自然言語、図形、プログラム言語、数式などの外部表現に変換したり、逆に学習者からの質問、システムの設問に対する学習者の解答、学習者からシステムへのメッセージなどを内部表現に変換する部分である。このかぎりでは他の知識システムと同じであるが、コンピュータの経験をもたない学習者を対象に、自由な質問を許すことを考慮した、わかりやすいインタフェースが必要である。また、学習者に理解させるために画面に提示した図表による外部表現と教材知識としての内部表現との間の意味的な整合を取る働きもインタフェースの役割である。

6.2 構成要素の働き

(1) 教材知識

教材知識の表現形式は、手続きネット、プロダクション・ルール、オブジェクト型、述語論理など他の知識システムと同様、いろいろな表現が発表されている。どれを用いるにしても、教材知識表現を決定する際の条件とその理由は次のようにまとめることができる。

① 領域の明確化

教材知識は、対象とする教科において取り扱う内容を過不足なくカバーしていなくてはならない。教材知識のなかに教育の対象になっていないよけいな知識が

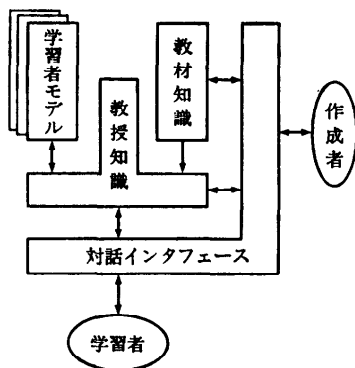


図-8 知的 CAI の基本的構成

含まれていると、それをを用いて問題解決を行う恐れがあり、解決過程を説明するときに学習者を混乱させたり、誤り原因同定の際に間違っただけの原因を導く恐れがある。特に、まだ学習していない範囲の知識が混在している知識ベースを用いて問題解決を行うことがないように、知識表現を工夫することが必要である。

② 自然言語との整合性

知的 CAI の目標の一つである学習者からの質問を許すためには、適当な範囲の自由度をもつ自然言語を理解して、質問の意味を理解し、教材知識によって解決した結果を、自然言語で応答する必要がある。したがって、教材知識は自然言語との相互変換が容易であるような表現を用いることが望ましい。

③ メタ推論の対象となること

教材知識を問題解決や情報検索のために用いるという点では、問合せシステムやエキスパートシステムと同じであるが、誤り原因同定を行ったり、学習者モデルを構築したりするために、教材知識が教授知識の処理の対象になること、および学習者の質問に対して、問題解決の過程や誤り原因などを説明するために、教材知識だけではなく教材知識の推論過程も処理の対象にすることが必要になる。

④ 知識のグループ分けと順序づけおよび適用条件・目標知識・前提知識の明示

どの内容をどの順序で教えるかということは教育効果に重大な影響を与える。たとえば、引算は足し算を理解した後で教えないといけないし、借りのない引算は借りのある引算よりも先に教えないといけない。また、借りのない引算では1桁の引算を最初に理解させる必要がある。このように、教育順序に従って教材知識はいくつかのグループに分割でき、各グループはその適用条件が明示されていなければならない。先に教えるグループの知識は後で教えるグループの知識に継承されるが、その逆は禁止される。分割は詳細に注意深く行い、一つのグループで新しく学習する概念をできるだけ少量にする教育的配慮が必要である。

教材知識をグループに分割して順序を付け、グループの適用条件や目標知識および必要な前提知識を明確に記述することによって次の効果が得られる。

① 学習進度と知識量を整合する

教材知識の一つにまとめた場合は、学習者がまだ学習していない知識を、問題解決に使用することを避けるのが難しくなる。一度に教える知識だけまとめて、グループに分割した上で、グループ間の順序付けをし

ておけば、この関係を用いて問題解決に用いる知識を、学習の進行に応じた学習済みの知識だけに制限できる。

② 学習者の混乱を防ぐ

学習者に多くの未学習知識を一度に教えることは、混乱を引き起こし教育効果を減少する。グループ分割は、一度に教える新しい知識を少なくし、段階的に教育できるので、学習者の理解を容易にする効果をもつ。

③ 探索空間を縮小する

推論過程に必要な探索は、知識量によってその効率に大きな影響を受ける。たとえば、問題解決の際には、グループ分割によって、未学習知識を探索空間から除外できる。また、仮説推論によって誤り原因を同定する際に、誤り候補となる仮説として、初めて習った知識や、その学習者が以前にたびたび間違っただけの知識を、教材知識や学習者モデルから探索する必要がある。グループごとに学習者の理解度を学習者モデルに記述しておけば、探索順序を効率的に制御する情報が得られ、同定に要する時間を短縮できる。

④ 学習内容と進度の個別化を容易にする

新しい概念を教える場合は、単純な特殊例から始め、しだいに制約を緩めて、一般的で複雑な場合まで拡張する方法をとる場合が多い。グループを細かく分割しておくこと、グループの制約条件と学習者モデルの理解度を比較することによって、たとえば、特殊な例題をスキップして、一般的な規則を教えることで、理解の良い学習者に対応できる。逆に理解の遅い学習者には、具体的に簡単な例題を一般論の導入として用いる方法が有効である。このようにグループ分割は、学習者の理解状態に応じた個別化を高度にすることができる。

⑤ 記述・更新を容易にする

知識を小さい単位に纏めることは、知識記述、デバッグ、知識の追加、修正などを容易にする。

⑥ 規則の成立理由を説明する

グループの目標知識と前提知識の関係を記述しておくことによって、教育システムとして避けられない「規則の成立理由」の説明に役立てることができる。

(2) 学習者モデル

知的 CAI の学習者モデルは生成型 CAI のパラメータ型モデルから発展した。生成型 CAI とは伝統的 CAI の後期に発生して、知的 CAI への橋渡しの役割を果たしたもので、乱数で選定したデータを、あ

らかじめ用意しておいた問題プロトタイプの該当部分に埋め込んで問題を生成する型の CAI である。問題プロトタイプには難易度のレベルがついており、学習者の解答の正誤に応じて、そのレベルを学習者モデルに記入することで、学習の達成度を表現するものが多い。

知的 CAI の初期の学習者モデルは、この生成型 CAI の学習者モデルの影響を受けた形で始まった。すなわち、学習者の応答から正しく理解したと推定した知識にマークをつけて、学習者が理解した知識と、まだ理解していない知識を区別し、学習者の理解状態を表現した。この形式の学習者モデルはオーバーレイモデルと呼ばれている。オーバーレイモデルは学習者がマスタした知識を示すことはできるが、どこをどう間違ったかを示すことができないという欠点があった。

これに対して、学習者の誤り原因を同定して構築した学習者モデルは多くの種類が発表されているが、正しい知識から外れた知識を含んでいるという意味で、一括してパータベションモデルと呼ばれている。パータベションモデルを構築するときに、間違った知識について、正しい知識のどの部分を、どのように間違ったかという情報とともに、間違った知識を記録すれば、学習者の間違いを再現したり、予想したりすることができるので、この形の学習者モデルを実行型モデル (process model) と呼んでいる。

(3) 教授知識

教授知識は学習者モデルや教材知識を処理の対象にするという意味でメタ知識の仲間であり、次の機能を実現するための推論機構を中心に研究されている。

① 個別化情報の生成と更新

学習者の応答から下記の学習状況を推定し、学習者モデルを構築する。

- 1 学習者の誤答原因の同定
- 2 学習者の理解度の推定
- 3 学習者の特徴の把握
- 4 学習結果の評価

② 高度に個別化された指導方略の選定

学習者モデルの情報を用いて下記の機能を実現する。

- 1 学習者の質問に応答する
 - 2 学習者の誤り原因を治療する。
 - 3 学習者に適応した問題や質問を生成・選定する
 - 4 学習者の理解度に適した学習の進行を計画する
- ③ 学習者の意図や要求の認識と対応

高度に個別化された双方主導対話を実現するためには、システムが自分の目的を認識して、正しい教授方略を計画するだけでなく、学習者の意図や要求を認識して自分の計画のなかに組み入れることが必要である。

6.3 指導方略と双方主導対話

(1) 直接指導と間接指導

知的 CAI で実現されている指導方略は直接指導 (tutoring) と間接指導 (coaching) に大別できる。

直接指導とは、新しく学習する内容を画面に提示して説明したり、問題の解法を解説したり、どこをどう間違えているかを指摘することによって教え込む方法を総称したものである。伝統的 CAI の教え込み型と同じような説明や、解答誤りの指摘のほかに、学習者の応答の矛盾点を反論したり、定性的推論¹⁰⁾を用いて原則的な説明を与える方法などが含まれる。

間接指導とは、学習者自身に考えさせて自分で解決方法を発見させる、いわゆる発見学習 (learning by doing) の立場に立って、できるだけシステムの介入を少なくして学習を進める方法である。間接指導法は R.R. Burton と J.S. Brown が提唱した誘導発見学習 (guided discovery) と呼ばれる指導方略によって広く知られるようになった¹¹⁾。誘導発見学習とは、学習者が間違えて問題を解いたり、解き方が分からないで行き詰まったとき、自分の間違いに気付いて、正しい解き方を発見するために必要な最小限の情報を与えて、学習者自身に誤りの発見や訂正を行わせようという考え方である。このためには、システムは必要以上に学習に介入してはいけないし、あまり性急に情報を提供してもいけない。このような行為は、学習者が自発的に新しい事実を発見する可能性を抑圧してしまうからである。

学習者の理解度にふさわしいヒントを与えたり、解答や解法の一部を示す方法はよく知られた間接指導である。このほか、誤り原因同定の結果を用いて反例を生成・提示したり、すでに学習者が理解している類似の概念から類推を誘導して、行き詰まっている問題との対応関係に気付かせる方法も間接指導の例である。

大槻と竹内が提案した適応指導¹²⁾は、高度に個別化された指導方略を計画する。適応指導は、Prolog を用いた問題解決の過程を表現する木構造が、根に近いほど広い概念を包含した抽象概念であり、葉に近いほど具体的な事実を現す概念であることを用いて、学習

者モデルで得られた学習者の理解度と誤り原因に応じて、学習者に与える情報の抽象度と汎用性を決定する。

(2) 学習者モデルと指導方略の関係

知的 CAI の実行型モデルは、単に学習者が何をどのように理解しているかを示すのではなく、刻々変化する学習者の理解内容を推定し、知識として表現することによって、学習者がもっていると推定される概念を実行可能な形で記述したものである。したがって学習者モデルは、教材知識と同様に問題を解決できる。教材知識を用いて問題解決を行えば、正しい解答とその解決過程が得られるが、学習者モデルを用いた場合は、学習者が問題を解くのと同じ方法を使って、学習者と同じ結果を得るはずである。学習者モデルにはいろいろな形態のものがあるが、ここでは現在推定可能なすべての情報、すなわち問題解決に使われた間違った知識と間違いの原因、使われるはずの正しい知識、どの場面で間違えたか、その誤りに対して採用した指導方略と結果などの情報が含まれていると仮定する。

学習者モデルは学習者ごとに生成されるので、上記の情報は学習者個人の特性に依存した特徴を備えており、学習経験が深くなると、学習者個人の誤り傾向や、その学習者にどの指導方略が有効であったかに関する統計資料を提供できる。特に誤り原因の種類と指導方略との相互関係が、個人の特性に依存して得られる点が重要である。教授知識はこの特徴を用いて、ある誤り原因に対してその学習者を治療するのに最も効果のあった指導方略を求めることができるので、複数の学習者が同じ誤りを犯した場合でも学習者ごとに個別の指導方略を計画することができる。また、学習者全体の共通の誤り原因と有効な指導方略モデルとを統計的に求めて、平均的学習者モデルを作れば、経験のない学習者にも同じ方法で指導することができる。

(3) 双方主導対話

伝統的 CAI では事前にすべての筋書きを設定するので、学習進行や内容の説明・提示などの主導権は完全にシステム側にある。一方、知識情報処理の応用として登場した問合せシステムでは、学習の主導権は一方向的に学習者にある。知的 CAI の双方主導対話では質問と指導の両方を行うので、学習者の主体的要求とシステム側の指導計画が矛盾しないような手段が必要になる。このためには次の機能が必要である。

① システム主導のために必要な機能

- i 教材知識の教育順序と教材知識相互の関連につ

いての知識をもつことによって、どれだけの知識を理解していれば何ができるかを判定する機能をもつこと。

- ii 学習者の誤り原因を同定したり、学習者の理解レベルや特徴を推定することによって、教材知識に関する学習者の理解状態を知る機能をもつこと。

- iii 学習者の理解状態と教材知識の教育順序から、その時点で最適な学習対象を選定する機能をもつこと。

- iv 学習者の特徴と理解状態に応じて最も適当な指導方法モデルを選定する機能をもつこと。

② 学習者主導のために必要な機能

- i 教材知識と整合した自然言語インタフェース。
- ii 学習者に提示する図形と、教材知識と自然言語とを相互に関係付ける知識。

- iii 規則の成立理由、問題解決過程、出題理由を説明するための知識。

- ③ 矛盾のない双方主導対話を成立させるためには、システムの指導計画と学習者の質問や要求が矛盾する場合に、矛盾を発見する機能が必要である。

- i システムが計画した質問の解答と、学習者の質問が共通部分をもつかどうかを判定する機能。

- ii 学習者が要求した進路の変更と、システムの指導計画に矛盾がないかどうかを確かめる機能。

7. 知的 CAI の現状と展望

前章に述べた体系のすべてを実現するようなシステムはまだできていない。現在は一つ一つの機能について活発な研究が続けられている状況である。なかでも第一と第二の目標に関する機能を実現するための基礎的技術は数多く提案されており、これを応用したシステムも、自然言語による対話を中心にしたもの、問題解決を中心にしたもの、誤り原因同定を中心にしたものなど、さまざまな形態で試作されている。この機能に関するかぎり、現在は実用化のための研究が必要な段階にあるといえるであろう。

第三の目標については、今後発展させる課題が多い。主なものは教授方略の選定の問題、予測と計画の問題、評価の問題、システムの学習による知識獲得の問題、双方主導対話の計画と管理の問題などである。

8. おわりに

伝統的 CAI と知的 CAI を対置してその違いが明確になるように歴史、実現環境、パラダイム、展望に

ついて概観した。

伝統的 CAI はすでに普及段階にあり、学校教育、企業教育、社会教育で効果を発揮し始めている。知的 CAI も、故障診断教育システムなど、一部実用化のきざしが見え始めている。このような教育システムが十分にその役割を果たすためには、パラダイムがどのようなものであろうと、作成者と使用者に次のような注意が必要であると考えらる。

教えるということは、本来限りなく人間的な行為であって、機械で代替する場合は、十分に慎重でなければならぬ。内容を方法や知識の移転に限ったとしても、CAI でカバーできる対象は、客観的に正しいことが認められた範囲にとどめるべきではなかろうか？このことを忘れて、主観的な価値判断のはいる余地のあるテーマを無批判に CAI 化することが、学習者に対して取り返しのつかない影響を及ぼすであろうことは、伝統的であると、知的であるとかかわらず、CAI のもつ機能から明らかであるように思われる。

参 考 文 献

- 1) Stone, M.: Application of Data Compression Techniques to PLATO IV Communication System, Computer-based Education Research Lab., University of Illinois (1977).
- 2) Sherwood, B.: The Tutor Language, Computer-based Education Research Lab., University of Illinois (1977).

- 3) Smith, S. et al.: Computer Assisted Instruction in Chemistry, J. Chem. Educ., Vol. 56, p. 219 (1979).
- 4) Oettinger, A. G.: Run. Computer Run: The Methodology of Educational Information, Harvard University Press, Cambridge, MA., p. 180 (1969).
- 5) 雨宮正彦: 教育はコンピュータを必要とするか, エム・アイ・エー, p. 229 (1985).
- 6) 岡本敏雄他: CAI の視界(上)金沢工大 CAI の事例をもとにして, (下) 今後の CAI の課題, bit, Vol. 12, No. 13, pp. 44-53; No. 14, pp. 60-66 (1980).
- 7) Papert, S. (奥村貴世子訳): マインドストーム, 未来社, p. 266 (1982).
- 8) 山本米雄: スタンドアロン方式による CAI, 電子情報通信学会誌, Vol. 71, No. 4, pp. 379-384 (1988).
- 9) 山本米雄監修: ソフトエデュケーション, くもん出版, p. 202 (1986).
- 10) 西田豊明: 定性的推論—常識的思考法のモデル—, 人工知能学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 30-43 (1987).
- 11) Burton, R. R. and Brown, J. S.: An Investigation of Computer Coaching for Informal Learning Activities, Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 11, No. 11, pp. 5-24 (1979).
- 12) 大槻説乎, 竹内 章: ヒューマンフレドリな CAI, 情報処理学会夏のシムポジウム予稿集 (1986).

(昭和 63 年 7 月 11 日受付)