

伝達知識の理解モデルに依存したITSの指導方略

A Tutorial Strategy based on Epistemic Models of
Communicated Knowledge for Intelligent Tutoring Systems

渡辺 成良 渋谷 良裕
Shigeyoshi WATANABE Yoshihiro SHIBUSAWA

群馬大学工学部
Gunma University

あらまし 知的個別指導システム (ITS) が学習者の知識状態に適合した個別指導を行えるためには、システムは伝達した知識のモデルを学習者がどのように認識してモデル化したかを推論し、その理解モデルに依存した指導方略を適用できなければならない。教授やテキストにより伝達された知識のモデルは、モデルの構成要素についての学習者の知識状態に基づいた解釈とモデルの再構成によって認識されると考えられる。一般に知識のモデルの伝達方法を工夫しなければ学習者の解釈と再構成は多様になり、一貫性に欠ける学習になってしまう。そこでハイパーテキストを用いて知識を学習者に伝達する方法を採用し、伝達知識のモデルの記号、式、図を交えた説明と伝達知識の適用例をハイパーカード上に明確に表現することにした。学習者は自由にハイパーカードを巡ることができ、システムは記録された巡回軌跡を解析して得た理解モデルに基づいて、予め用意された指導方略を選択する。この指導方略は伝達知識の定着のために学習者が行なう問題解決を支援するITSで用いられる。

キーワード 知的個別指導システム ITS 知的CAI 指導方略 理解モデル 伝達知識 電気回路チュータ

[1] はじめに

Chi, Bassok, Lewis, Reimann, Glaser (1989) は学習の形態を
(1) テキストから事実や法則を学ぶ (テキスト学習段階)
(2) 事実や法則の適用例を学ぶ (例題学習段階)
(3) 事実や法則を適用して問題を解く (問題解決段階)
の3段階に分類した。Chiらは例題を通しての学習に注目し、
ニュートン力学を対象に、簡単な資料を勉強した学生にPre-
Testsを行ない、出来の良い学生を選んで3段階を学習させた。
この問題解決段階でPost-Testsを行なった。例題学習段階
での例題中の説明文についてのプロトコル解析によれば、
Post-Testsの出来が良かった学生は自分なりに解釈してかな
り詳細に説明することができていたが、出来が良くなかった
学生は説明文を解釈しようとせずに囁きみにしていたことが

わかった。また説明文が理解できていないとき、前者ははっ
きりそれを認識していたが後者は理解できたと誤認識してい
た。VanLehn, Ball, Kowalski (1990)はExplanation-based
Learningに注目して、プロトコルデータを説明するモデルを
提案した。そこでは説明を構成したルールを推論することが
できるが、現在のところルールが成立した根拠やルールを適
用した理由などの、個別指導では重要な観点を推論できてい
ない。

大槻、竹内(1990)の高度個別化の研究では経験を通しての
理解を重視し、人間が新しい概念や手続きを理解する過程を
(1) 未知の概念や手続きを理解する (導入段階)
(2) 概念や手続きの正しい適用法を理解する (適用段階)
(3) 概念や手続きを定着させて理解を確実にする (定着段階)
の3段階に分類した。これはChiらに類似の分類であるが、

この分類に対して大抵らは、導入・適用段階は対象の理解を、定着段階は知識状態のチャック化を目的にした。この目的に適合するITSを構築するために、導入段階ではテキスト形式の他に、ハイパーカード、マルチメディア、マイクロワールドなどの多様な表現形式で知識を伝達する教授方略を提唱している。

本文はテキスト学習と例題学習による学習段階は伝達知識のモデル化を、問題解決による定着段階は伝達知識のスキルの獲得を目的とした、2段階からなる知的CAI、あるいはITS (Intelligent Tutoring Systems) を考える。学習者にとって伝達知識の学習段階は理解モデル (メンタルモデル) の形成過程であり、テキスト中に明確に表現された伝達知識のモデルが一旦理解モデルへと変換され、例題に示された説明文の学習を通して理解モデルが明確な表現形式で再構成されると仮定する (図1)。このように、学習者の知識状態に基づいた伝達知識の解釈とモデルの再構成は学習者の理解モデルの構築に対応しており、このモデル構築の過程を解析して理解モデルに依存した指導方略が決定できれば、伝達知識の定着段階で適切な個別指導が行えるであろう。

もし伝達知識と例題を従来のように固定した順序で学習者に提示するならば、モデル構築の過程は学習者と無関係になる。しかし、これらをどの学習者にも理解できる表現で、しかも共通の理解モデルとなるような順序で提示する方法は確立されていない。VanLehnらは理解モデルを調べるために、そのモデルが生成する説明を観察した。本文は伝達知識と例題を様々な形式とレベルで表現し、それらの選択と学ぶ順序を学習者が自由に決定できるような学習環境をコンピュータによって提供するITSを提案する。この過程で学習者が構築した理解モデルは選択した形式とレベル、および学習順序を解析して調べることになる。第2章ではITSの伝達知識の定着段階における支援が、学習段階での学習者の理解状態に依存することを示す実行結果を報告する。第3章では実行例から得られた学習者の理解モデルの多様性を示し、学習段階の認知科学的考察を行う。そして第4章ではハイパーテキストによる

学習段階の教授方略を紹介し、ハイパーカード間を自由に巡回した学習者の軌跡を解析して理解モデルを推論する方法と、その推論結果に基づいた指導方略を示す。

[2] 定着段階を支援するITS

定着段階を支援するITSの機能は様々に研究されてきた (Wenger, 1987)。本文では学習者が記述形式の問題を解く問題解決段階を取り上げ、学習者は

- (1) 解答の手順を説明する
- (2) 手順を問題に適用した結果を示す
- (3) 手順の誤りを修正し、行き詰まりの状況を説明することができ、これに対して
 - (a) 解答手順として適切な説明かを診断する
 - (b) 手順を適用して結果を導出し、学習者の結果と比べる
 - (c) 行き詰まりの打開法を提示する

ことができるようなITSを考えた。問題が提示されると学習者は、次のいずれか、あるいはそれらを組合せながら解答すると考えられる。

・問題に示された明確な表現に関係した知識を用いて理解モデルを構築し、このモデルを用いてトップダウンに問題が要求したゴールを導く手順を見付け出す。

・ゴールの理解に関係した知識を用いて、ボトムアップに問題に含まれた知識間の関係を見付け出す。

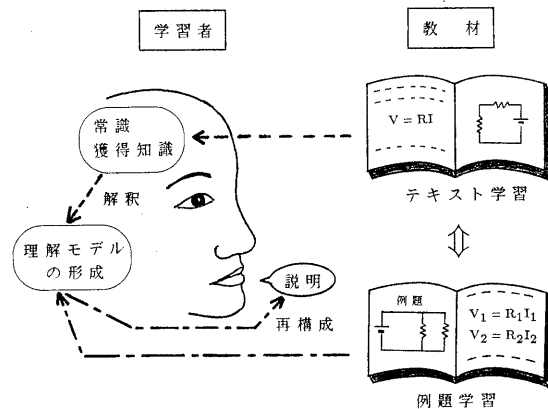


図1 学習段階

本文のITSは理解モデルに関係したトップダウン解法に対する個別指導の機能をもつ(図2)。

2.2 ITSの助言機能

2.1 ITSの診断機能

伝達知識の定着を目指す問題解決段階では、学習者は伝達知識を用いて解答手順を説明すると考えてよい。(この仮定はしかしながら、伝達知識を十分には理解できていない学習者に当てはまらないことが、2.3節で示される。)学習段階を経た学習者では、伝達知識はすでに理解した獲得知識や常識などのプリミティブを用いた理解モデルとして構築されていると考えられる。このため、学習者が解答の手順においてある伝達知識を適用するというとは、

- ・それまでの手順によってプリミティブが適用できる条件が満たされている
- ・その適用がゴールへの手順を一つ進めることになる

ことと解釈でき、前項はプロダクションルールで、後項はスクリプトで表現することができる。従って(a)において適切な説明であるかどうかの診断は、プロダクションルールの条件部とスクリプトへの適合性によって行える(Watanabe, Miyamichi, Katz, 1990)。さらに(b)において、結果の導出はプロダクションルールの実行部で行える。ここでプロダクションルールの条件部を、伝達知識の構成要素であるプリミティブの適合条件で構成しておけば、条件部の失敗がすなわち対応するプロミティブに関して学習者が誤ったと判定できることになる。すなわち、伝達知識の構成要素のどの部分がどうして誤ったのかを診断できるITSが構築できる。また実行部はプリミティブを用いて伝達知識を再構成する結果を作り出すから、再構成の過程は再現できないが、これと学習者の結果とを比較することによって、学習者が正しく再構成できたかは診断できる。

解答過程での学習者の行き詰まりは

- ・理解モデルを構成するプリミティブの理解に問題がある
- ・理解モデルの構成手順の理解に問題がある

ために生じると考えられる。さらに詳しく述べれば、前項は

- (1) プリミティブを誤って理解している
- (2) プリミティブを思い出せない
- (3) プリミティブの適用条件がわからない

ことが行き詰まりの原因となっている。そこでシステムは

- (1) 正しい理解を説明する
- (2) 適切なプリミティブを教える
- (3) 適用条件を教える

ことによって学習者の行き詰まりを打開させる。同様に後項

学習者

システム

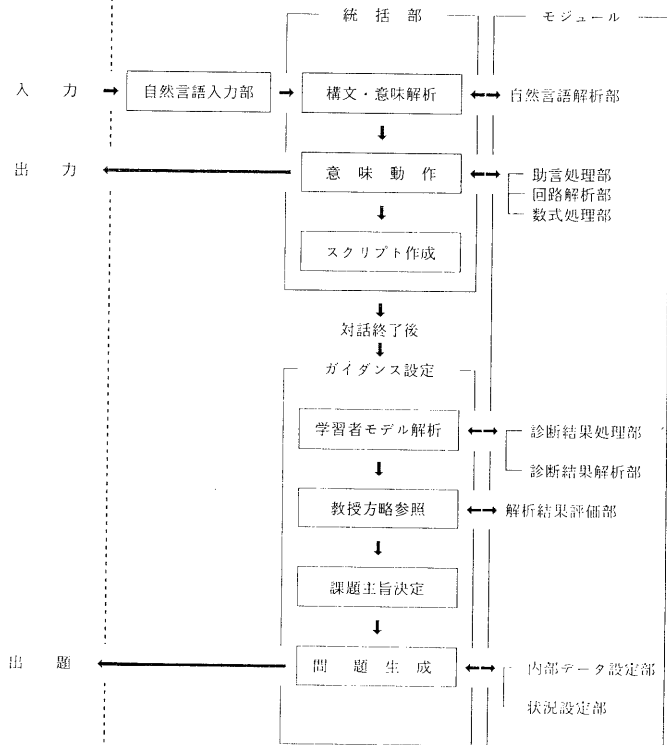


図2 ITSの構成図

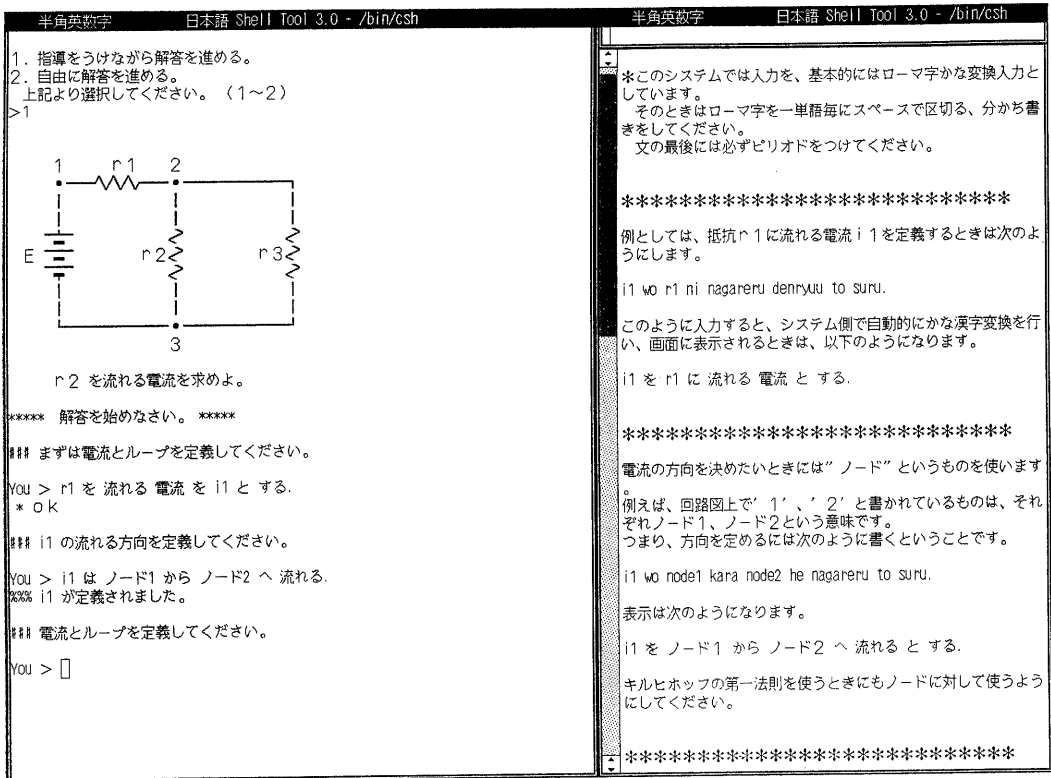


図3 ガイドつき問題解決例

では、

- ・手順を誤って理解している → 正しい手順を教える
- ・手順が思い出せない → 次の手順を教える

ことにより行き詰まりを打開させる。次の手順を教えることができ、しかも (b) によって手順の適用結果も生成できるために、システムはガイドなしでゴールへ到達することができる。したがって、他の ITS のように学習者に次の手順を示し、学習者からは手順の適用結果だけを受け取り、その正誤を判定する機能は簡単に達成できる (図3)。

2.3 ITSの適用例

電気系2年の学生60名を対象にシステム評価を行った。学生はすでにプリミティブである

- ・枝電圧、枝電流、回路素子、オームの法則、節点、閉路
- ・変数定義、基準方向、代数操作、線形独立

や伝達知識である

- ・キルヒホッフの電圧則 (KVL) と電流則 (KCL)
- ・閉路方程式や節点方程式の導出法
- ・閉路電流法や枝電流法による回路解析

についてテキスト学習と例題学習をしている。しかし ITS に組み込まれた理解モデルは知らないで、これを伝達するために15分間の講義を行なった。

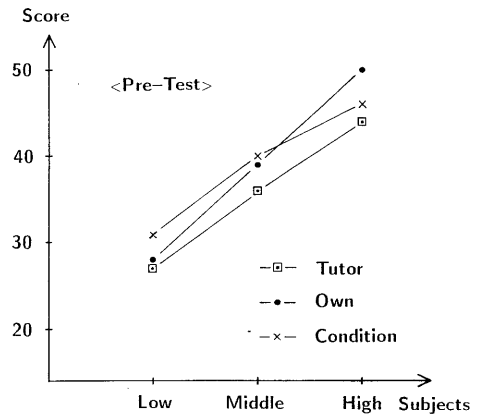
次に1時間のPre-Testを行った。問題は3問あり、1問目と2問目は枝電流と閉路の定義、KVLとKCLの適用を問う部分問題、3問目は枝電流と閉路の定義、KVLとKCLの適用、閉路方程式や節点方程式の導出、ゴールの導出からなる標準問題である。各学生に対して正解の項目ごとに1点ずつを与えて総得点を計算した。講義で教えていない知識を適用した学生を除いた全学生を、総合点の上位、中位、下位の3集団に分けた。上位集団を3等分して3班に分け、中位と下位の集団についても3班ずつに分けた。それぞれの集団から1班ずつを集めて1組を編成し、それぞれをTutor組、Own組、Control組と名付けた。各班ごとの総合点を計算し、

各組ごとに分けて示したのが図4 (a)である。

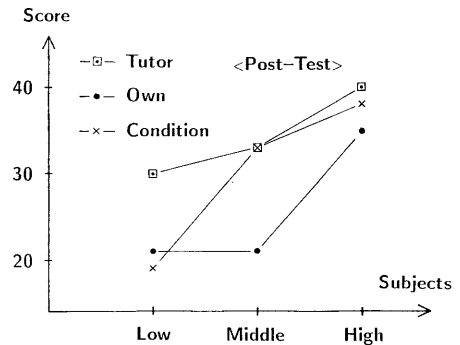
さてTutor組の学生には、先に説明した機能をもつシステムをそれぞれ1時間ずつ使わせて問題解決させた。Own組にはシステムの問題とは異なる問題集を与えて、補助者なしで1時間問題解決させた。Control組には学習や問題解決をしないように注意した。Pre-Testの1週間後にPost-Testを行った。問題は2問あり、試験時間は1時間である。いずれの問題もPre-Testの3問目より難易度が高い標準問題である。Pre-Testと同様の項目ごとに得点を計算したが、項目数が両試験で異なるために総得点を補正した。図4 (b)は各組に属する各班の学生のPost-Testの総合点である。下位集団のTutor組と中位組のOwn組に属した学生の総合点に、明らかな変化が認められる。前者はシステムを使用したことが下位集団に属した学生の問題解決に役立っていることを示している。後者は補助者なしでの問題解決が中位集団には悪影響を及ぼしたのかもしれない。Post-Testの総合点からPre-Testの総合点を引いた結果を各集団の各組ごとに示したのが図5である。システムの使用効果が、下位集団のTutor組に明らかに現われている。

このシステム評価ではテキスト学習と例題学習がシステムと無関係に行われたために、中位と上位集団に属する学生がもつ理解モデルとシステムが構築できる理解モデルとに違いが生じて、かれらにはシステムが有効に機能しなかったのではと考えられる。不十分な理解モデルをもつ下位集団の学生は、システムから理解モデルを獲得し、これをPost-Testの問題解決で適用できたと考えられる。

テキスト学習と例題学習が十分でない学習者の行動を調べるために、6名の化学系学生を対象にプリミティブと伝達知識を講義した。その後で図3の回路問題を解かせたところ、
 ・講義内容を部分的にでも理解できた学生は、伝達知識を用いて問題解決しようとした。
 ・理解に自信がない学生は、伝達知識と別の獲得知識を使って問題を解決しようとした。
 前項の学生は伝達知識の理解できていない部分だけに獲得知識を適用している。このような学生の行動は、回路の専門家が用いる洗練された解析手法ではなく、ゴールへ到達できるならば利用可能な知識を総動員するという、場当たりの解



(a) Pre-test Score



(b) Post-test Score

図4 システムの評価

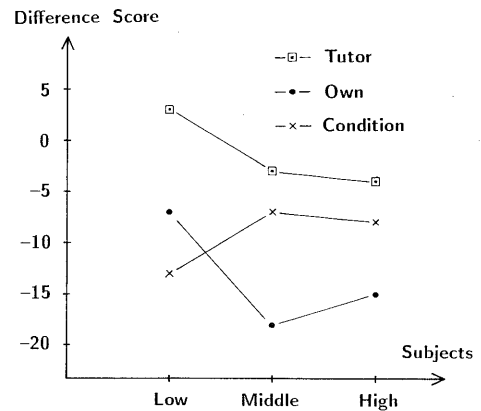


図5 総合点の差

決法である。

以上の結果から、ITSの機能を学習者の問題解決段階で十分に発揮させるためには、学習段階での理解モデルに依存した指導方略がITSで実現できなければならない。

[3] 理解モデル

ITSの理想は、学習者がもつ理解モデルをシステムの支援によって標準的理解モデルとして定着させられることである。しかし学習者の理解モデルが推論できない限り、理想は実現できない。これまでに行った実行結果からは、一方的な講義形式で伝達される知識は、様々な理解モデルとなって学習者に構築されると結論される。

3.1 キルヒホッフの法則

テキストで説明されるキルヒホッフの法則は、

(a) キルヒホッフの電流則: KCL

任意の回路素子から構成された回路の任意の節点に対して、節点に入るすべての枝電流の代数和は零である。

(b) キルヒホッフの電圧則: KVL

任意の回路素子から構成された回路の任意の閉路に対して、閉路を一巡する枝電圧の代数和は零である。

これら2法則は電流あるいは電圧の同種状態量のみを含む状態量群の保存則である。また節点において枝電流を、閉路において枝電圧を線形拘束している。

3.2 異なる理解モデル

このような保存則に基づいた法則の説明とは別に、違った解釈による説明ができる。例えば、

(c) 任意の回路素子から構成された回路の任意の節点に対して、節点に入る枝電流の代数和と節点を出る枝電流の代数和は等しい

(d) 任意の回路素子から構成された回路の任意の閉路に対して、閉路を時計回りに一巡する枝電圧の代数和と反時計回りに一巡する枝電圧の代数和は等しい

は、状態量の方向に注目した解釈で記述されている。このような解釈は、(a)や(b)を読んだ学習者にも当然起こり得ると考えられる。図6はKCLを構成する知識間の関係をグラフに表現したものである。線で結ばれた知識間の関係はルールで表現しなければならない。伝達書式の違いとは本来無関係の伝達知識が、異なった理解モデルに解釈されるのは、伝達知識の構成要素に関する学習者の理解の違いのためである。電流を保存則という理論によって解釈する学習者もいれば、川の流の類推によって解釈する学習者も当然いる。また両方の理解が等価であることをはっきり認識できる学習者もあり、場合によって両方をうまく使い分けできる学習者もいる。あるいは回路素子の機能に注目して、

(e) 任意の回路素子から構成された回路の任意の節点に対して、節点に入る電流源の電流の代数和と節点を出る電流源以外の枝電流の代数和は等しい

(f) 任意の回路素子から構成された回路の任意の閉路に対して、閉路を一巡する電圧源の起電力の代数和と電圧降下の代数和は等しい

という解釈ができる学習者もいる。

これらの説明がテキストに書かれているとき、どれが最も分かり易いかは学習者の知識状態に依存する。(a)では法則を正しく適用できない学習者でも、(e)ならば問題を上手に解けるかもしれない。(b)で理解した学習者に対して、(f)に基づいた指導方略を適用しても、学習者は混乱したり意味がわからないなどの状況に陥る危険がある。このため、学習段階で用いるテキストや例題における記述は、幾つかの理解

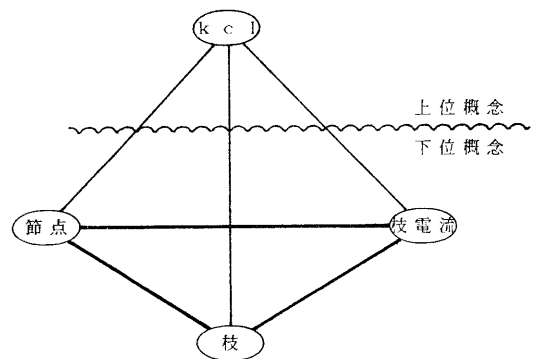


図6 知識の関係グラフ

モデルの解釈を表現しており、それぞれの関係も説明しておく必要がある。

テキストによる説明が良く理解できなくても、例題学習ではわかるということがある。電流や電圧の方向は、テキストの説明文よりも例題を見たり、図に書いたりしたほうが当然理解しやすい。このことから、理解モデルに適合した例題を用意しなければならない。

[4] ハイパーテキスト

学習者の学習段階を分析した結果、一つの伝達知識でも理解モデルに依存した様々な表現形式があることがわかった。どの表現をどのような順序で学習者に伝達すればよく理解させることができるかという教授方略は、今回の分析ではわからなかった。そこで教授方略というシステム主導の学習環境ではなく、学習者主導の学習環境を考えることにした。このとき、

- (1) 学習者にとって扱いやすい操作環境である
- (2) 操作の流れをシステムが記録できる
- (3) 学習段階の目的が満足される

必要がある。これらの条件を満たせるコンピュータ環境としてハイパーテキストに注目した。

ハイパーテキストは非逐次的な構造で情報を管理した状態と定義される。図7は伝達知識であるKCLの説明文とその模式図からなるカード（このようなまとまりをノードと呼ぶ）を示している。図の中央下にある左右向きの矢印は、ノード間の移動を可能にし、左向きを指先印で示されたマウスで押せば直前に見たノードが、右向きを押せば次のノードが出現する。これらのノードは組織リンクで関連づけられている。図中で小さい長方形で囲まれた表現（電流の、ノードに、など）は参照点（reference）と呼ばれる見えないボタンである。マウスを参照点に移動させてボタンを押せば、図8が出現する。2つのカードはこの操作で

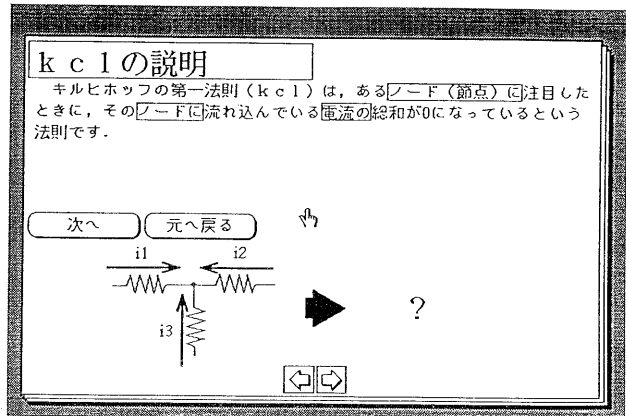


図7 電流則のハイパーカード

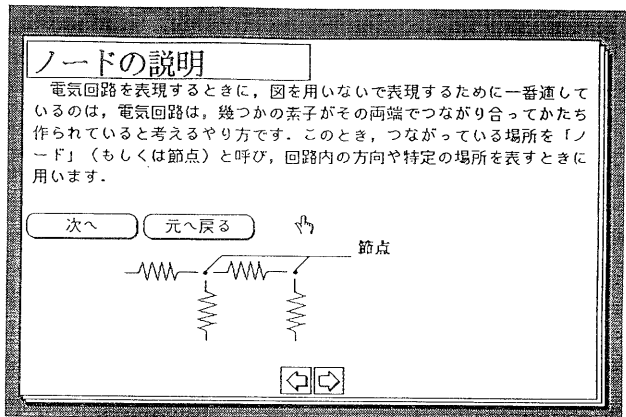


図8 プリミティブの説明

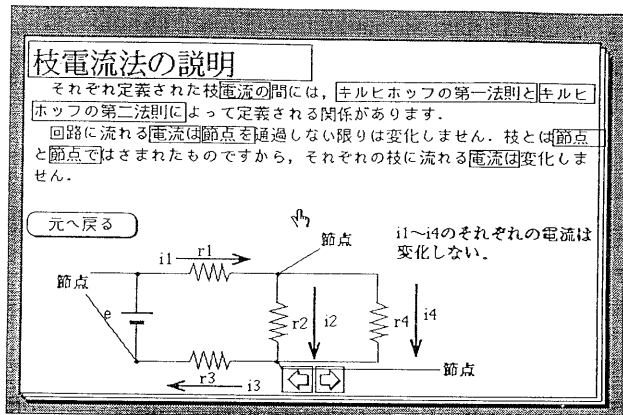


図9 解析手法のノード例

関連づけられた参照リンクで結ばれる。

図7や図9のようなノードは伝達知識の説明であり、例題とともに組織リンクで結ぶとよい。組織リンクは教科書のよようにあらかじめ目次で固定されたページの関係に等しい。この関係は教科書の著者がある教授方略に基づいて決定したように、組織リンクもなんらかの教授方略で決定する必要がある。これに対して、図8のようなプリミティブのノードは参照リンクが望ましい。参照点の決定は教授方略に依存するが、参照リンクは学習者が決定できるため、学習者は組織リンクを無視することができる。これはあたかも教科書の拾い読みや、参考書を引き出しにくることに対応する。

学習者がどのノードをどんな順序で辿っていったかは記録される。この記録は学習者がどのような理解モデルを構築したかを調べるデータになる。現在、様々な理解モデルのノードを作成し、学生に使用させてデータを集めている。

[5] おわりに

伝達知識の学習段階で、学習者の理解モデルが様々に異なることから、ITSによる学習者の問題解決段階での支援が成功しない場合があることが実行例からわかった。これを解決するために、ハイパーテキストによる学習環境を提供することにした。この環境では、学習者はあらかじめ定められた順序でテキスト学習や例題学習が行えるばかりでなく、理解できていない知識に関する詳しい説明を自発的に探索できるから、学習者の知識状態に適合した学習が行える。さらに、探索履歴が記録されるために、システムが理解モデルを推論することが可能になる。このような利点があることを示すために、システム構築とシステム評価を行っている。

最後に、本研究は文部省科学研究費一般研究(c) 課題番号1550276の援助を受けた。また、群馬大学坂田和久君、矢作誠一君、吉田茂生君に感謝する。

参考文献

Chi, M.T.H., Bassok, M., Lewis, M., Reimann, P., and Glaser, R. (1989). Self explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science*, 13, 145-182.

大槻説乎、竹内章 (1990). 知的C A Iにおける高度個別化に関する研究。電子情報通信学会技術研究報告(教育工学)、Et90-4, 21-28.

VanLehn, K., Ball, W., and Kowalski, B. (1990). Explanation-based learning of correctness: Towards a model of the self-explanation effect. *Proceedings of the Twelfth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 717-724.

Watanabe, S., Miyamichi, J., and Katz, I.R. (1991). Teaching circuit analysis: A mixed-initiative intelligent tutoring system and its evaluation. *Advanced Research on Computers in Education*. R. Lewis and S. Otsuki (Editors). Elsevier Science Publishers B.V., 81-87.