

教育支援のための教材学習履歴分析システム

松本寿一^{†1} 中易秀敏^{†2}
森田英嗣^{†3} 亀島鉦二^{†4}

本論文では、情報機器を用いた学校教育の学習環境において、教師が学習者の学習課題に関する認識や理解の度合いを把握するための支援システムを提案する。このシステムは、情報機器が用意された学習環境内での学習者の行動を、学習環境として構築される教材ソフトウェアの利用履歴として、時間軸に沿い、ある行動を完了するために要した時間やそのために要した操作の履歴を記録し、これらをクラスター分析により学習者の行動パターンを分類して、教師が学習者の理解状況を把握する資料を提供するものである。システムは、1) 学習者が情報機器を扱った際の操作履歴を記録する機能、2) 記録されたデータから学習時の状況を再現する機能、3) 作業内容ごとに時間軸に沿ってデータを切り分け数値化する機能、4) 統計手法を用いてデータを分析する機能、によって構成されている。提案システムに沿った試作教材ソフトウェアならびに分析システムを用いた研究授業の結果を考察して、システムの利用効果について論じている。

An Evaluation System of Historical Data Based on Learning Environment Supported by Educational Software

TOSHIKAZU MATSUMOTO,^{†1} HIDETOSHI NAKAYASU,^{†2} EIJI MORITA^{†3}
and KOHJI KAMEJIMA^{†4}

This paper proposes a method of a system design for educational software which is used in an usual teaching style in Japan. An information device can obtain a synchronized data of historical learning data from an educational software. This objective data is a movement and a time of operation. This system shows an evaluation material for a learning process and cognitive process from an obtained data. It includes 4 functions, such as 1) to record a historical data of operation in educational software, 2) to replay an operation scene when an user learns with educational software, 3) to add an index to an obtained data and change to a graphical data, 4) to classify a data with a statistical method. As a result of experiment of arithmetic lesson in an elementary school, this system could enable teachers to estimate the cognitive process during lessons.

1. 緒 論

学校教育の場では、学習者の発育や社会の現状にあわせて、様々な観点から授業のあり方に関する研究が行われている¹⁾。特に最近では、情報機器を用いた教育支援の研究により、学習者の思考の度合いにあわせ

た授業が、自然な形で学ぶ環境を作ることが分かってきた²⁾。これを契機に、コンピュータを使った教育支援環境の研究がさかんである^{3)~8)}。

CAIならびに ITS の分野の研究では、情報機器自体が学習者と同じように問題解決を行い、人間の教師を必要としない個別指導の研究が進められてきた^{9),10)}。これらの研究のほとんどは、情報機器により学習者の思考過程を把握することができれば学習者にあわせた指導が可能になるとの観点に立ち、学習者の思考過程のモデル化と、それに対応した指導法に研究の主力が置かれている。たとえば SCHOLAR¹¹⁾では、予想される学習者の思考過程を知識のネットワークとして内包し、学習者に反応する環境が構築されている。SOPHIE¹²⁾では、学習者からの入力を自然言語で理解し、学習者の解答や質問の評価を行っている。また

†1 甲南大学自然科学研究科情報・システム科学専攻
Graduate School of Information Systems Science, Faculty on Science, Konan University

†2 甲南大学ハイテク・リサーチ・センター
High Technology Research Center, Konan University

†3 大阪教育大学教育実践研究指導センター
Research and Guidance Center for Teaching Practice, Osaka Kyoiku University

†4 大阪工業大学工学部経営工学科
Department of Industrial Management, Osaka Institute of Technology

BUGGY¹³⁾では、情報機器が学習者に出題する問題への解答から、学習者の学習対象に関する知識構造を明確にし、学習の中で修正する環境を構築している。知性の研究が進むにつれて高度な対話を行えるようになり、学習者の思考内容を理解して自分のものにするシステムも構築されている¹⁴⁾。しかし、これらの試みは研究段階では成果をあげているものの、現在の学校教育に採用されるにまでは至っていない。

ところで、学習者の思考過程を把握する以外にも、情報機器を利用することによる学習支援は可能である。LOGOプロジェクト¹⁵⁾では、学習者の概念を探索させるための環境を構築している。著者らの1人は多桁減算を対象にして、学習者と情報機器の立場を工夫することにより、学習者が他者の犯す誤りから学ぶことを目指す環境を構築した¹⁶⁾。この考え方は、上記文献11)~14)に示されたような学習者の思考過程を内包した環境ではなくても、情報機器の能力を用いて学習支援が可能になることを示したものである。情報機器によって構築された学習環境は従来にない環境であるけれども、このような環境においても、評価の方法は学習後のアンケートやプロトコル分析など従来まで用いられてきた方法が主流である。しかしながら、情報機器を用いた学習環境では、学習中の行動記録を蓄積することは容易であり、この利点を活かしているとは言いがたい状況であった。したがって、こうした情報機器に蓄積される学習中の行動履歴を物理計測データとして解析すれば、教師が主観的に評価してきた学習者の理解度に客観情報を提供することができる¹⁷⁾。ただこの場合、どこまで主観的评价に客観性を加え、普遍性のある教育支援ができるかが課題である。

本論文では、実際の学校教育の場において学習効果の評価に寄与するため、学習中の利用履歴データを生かした教育支援システムを提案する。提案するシステムの最大の特徴は、教材ソフトウェアに依存せずに学習履歴の記録と再生が可能であり、学習中の物理計測データ処理により、反応時間や行動時間の分析を統計的手法により取り扱い、評価者に客観的な分析結果を示すことができる点にある。本システムは、教師がいる教室での情報機器の利用を前提にしている。これは、学習を支援する環境の評価には、学習者の指導に責任を持つ教師が必要であると考えためである。教師は、学習者の些細な行動を観察し、評価に活かすことができる。上記の概念に立脚し本システムは、客観的で量的なデータの収集や解析を情報機器に分担させ、主観的に些細な学習者の行動に気づくことができる教師による評価を支援する環境を提供するものである。

提案するシステムは、情報機器が用意された学習環境内での学習者の行動を、客観的にすべて記録することが可能であることに着目して開発されたものである。記録されるデータは、学習環境として構築される教材ソフトウェアの利用履歴として、時間軸に沿い、ある行動を完了するために要した時間やそのために要した操作の履歴、それ以前の行動やそれ以後に行った操作の履歴などである。学習者の学習中の履歴データに対し、統計的手法を用いてこれらを分析し提示することで、教師に学習者の行動からその背後にある学習内容への認識や理解の状況を把握するのに役立てようとした。このため、教材学習履歴分析システムの設計にあたって、必要な機能を分離展開して示す。また、それを用いた適応例による提案システムの評価結果も報告する。

2. 教材学習履歴分析システムの設計

2.1 履歴分析のための設計方法

利用された教材ソフトウェアから得られるデータを分析するシステムには、教師が学習効果を評価する機能が必要であると考えられる。このような情報を提示するシステムには、以下の2点の機能が必要である。

(1) 学習履歴の物理的データを得る機能

(2) 狙った学習効果が得られているかを判断できる情報を提供する機能

(1)の機能としては、キーボードや、マウスの動作履歴を記録する機能などがこれに相当する。これらの物理的データの履歴は教材ソフトウェアを使って学習した学習履歴のデータとなり、分析の対象になる。

(2)の機能は、得られたデータを分析することにより、学習がどのような過程で行われ、学習の成果がどの程度あがったのかを判断するための機能である。判断の材料は、以下に示す3つの機能から行うことができる。

(a) 学習過程の再現をする。

(b) 1つの操作ごとの内容を表示する。

(c) 学習者ごとの学習履歴を反映する行動データを分析して、その結果、再現される学習パターンや理解度を見分ける情報を提供する。

(a)の機能は、記録された操作履歴をもとにして、実際に行われた学習過程を実時間で再現してみるためである。行われたことをビデオのように再現することができれば、教材を利用した学習過程の把握や確認、行動の意味を考慮する際や、事後アンケートなどで学習者にそのときの場面を見せて思考過程を明らかにするなど利用できる。(b)の機能は、1つまたは複数の

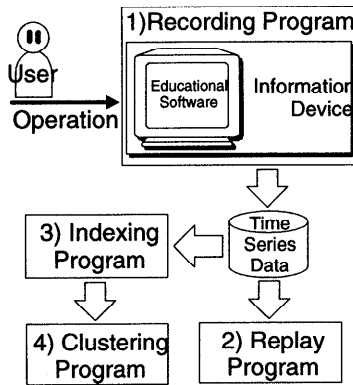


図1 学習履歴分析システムの構成
Fig. 1 A learning data analysis system.

行動がどのような意味合いを持つのかを推測するためである。行動を区切って観察することで、それに要する時間や前後関係を考慮した学習者の行動の意味を推測することができる。(c)の機能は、学習者の行動から、教材ソフトウェアを使用したときのいくつかの代表的な学習パターンを作るために必要である。学習者の学習課題に対する理解の手順や速度などは、個人差によって無数のパターンが得られると考えられる。これらに対し、代表的パターンを自動分類することができれば、学習者の理解手順を考慮した教材ソフトウェアへの改善点を指摘することができる。

図1は、学習履歴分析システムの位置付けとその構成要素を示している。このシステムは、1つの教材ソフトウェアに対して、4つのプログラムによって記録から分析を行い、結果を提示する流れを構成している。この図に示すように、システムを構成する4つのプログラムを以下のように定義する。データを得る機能を1)記録プログラム(Recording Program)、学習過程を再生する機能を2)再生プログラム(Replay Program)、1操作ごとの詳細を表示する機能を3)インデキシングプログラム(Indexing Program)、行動パターンを見分ける機能を4)行動分析プログラム(Clustering Program)と呼ぶ。学習者が情報機器上で動く教材ソフトウェアを利用して学習を行ったときの操作は、記録プログラムがすべて時系列の学習履歴データとして記録する。

このシステムの中でプログラムの重要な部分は、学習履歴データを生成する記録プログラムである。このプログラムは、教材ソフトウェアとは独立して動作するように工夫されている。これは、記録プログラムを組み込むことによる、教材ソフトウェア内にバグが入り込む可能性をなくすためと、教材ソフトウェア自

身に依存せずに、同一形式での学習履歴の記録データを得ようとするためである。

以下の節では、各機能の詳細を説明する。

2.2 履歴を記録する機能

学習履歴の取得は、学習者が教材ソフトウェアに対して行った行動のすべてを記録する必要がある、同時に、時間軸に沿って記録されなくてはならない。これは、学習後に学習者の行動を再現するためであり、その行動についての意味を引き出すためである。

履歴の記録は、教材ソフトウェアに対して行われた操作のすべてをデータ化し、時間軸に沿った学習履歴データとして保存されることが望ましい。このため、学習履歴データは、一定時間ごとに情報機器の外部記憶装置に対してテキストファイルとして記録される。たとえばマウスの動きを再現するのならば、その動きがすべて記録される。データの精度を考慮すると、同時に使用している教材ソフトウェアの動作に影響を及ぼさない程度の時間間隔が必要になる。処理能力の高い情報機器では、使用するOSが行える最小の時間間隔を用いることにより精度の高いデータを得ることができる。しかし処理能力が低い場合は、データの再生のことを考慮し、可能な限り、一般に映像として認識される1/30秒間隔で行われることが望ましい。また、データの記録には、汎用性を考慮してCSV形式¹⁸⁾を採用する。

一般的な情報機器であるパーソナルコンピュータ(以下、PCと称する)では、教材ソフトウェアへの物理的な入力になるマウスの移動や、マウスのボタンを押す動作を意味するクリック、キーボードのキーを押すことなどは、そのすべてがOSに対するイベントと称する情報の受け渡しになる。OSがイベントを受け取ると、その内容によって対象となるソフトウェアにイベントの内容を通知する。その結果、ソフトウェアは通知された内容に応じて、あらかじめプログラムされた処理を行う。記録プログラムは、図2に示すようにイベントが発生した段階で情報を取り込むことで、記録するデータの取得を行う。プログラムは、ある時間でのマウスの位置座標を得るための常時発生するイベントを処理する部分と、キーボードやマウスのクリックによる随時発生するイベントを処理する部分に分かれている。常時発生するイベントは、得られたデータを時間軸に沿って再生することが容易であり、また時間軸に逆に沿って再生することも容易にできるものである。随時発生するイベントは、そのイベントが起こったことを正確に記録することが重要である。学習者の行動によって左右されるこのイベントは、常

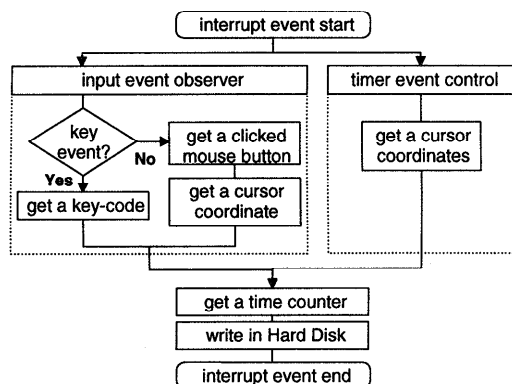


図2 記録プログラムの基幹部分の流れ
Fig. 2 Flow chart of recording program.

時発生するイベントと同時に発生する保証がないために、これらを分けて管理できるように考慮しなければならない。

2.3 履歴を再生する機能

学習履歴の再生は、学習時の様子を後から観察するために必要である。再生プログラムでは、あらかじめビデオテープに記録された学習の様子を、ビデオデッキで再生するような機能を持たせるように工夫した。データが一定間隔ごとに記録されたものであるために、同じ時間間隔でデータの再生を行うことができれば、学習時の様子を再現することができる。しかし、ビデオテープの再生は連続した静止画を描画することで行われるが、記録プログラムからのデータの再生は命令群の解釈によって行われる。本提案システムでは、図3の流れを持つようにした。この図は、再生機能がデータベースから記録された命令群を取得し、それを解釈し、その結果を一定間隔で対象ソフトウェアに与えることで実現されることを示している。この方式の特徴は、イベントの解釈方法と、その結果を送る対象ソフトウェアの違いにある。

このようなデータの再生には、2通りの方法がある。

- (1) OSに依存したイベントを利用した再生
- (2) 命令群を解釈する専用プログラムによる再生

(1)の方式では、イベントの解釈を、OSから教材ソフトウェアへの操作内容として行う。そのため、教材ソフトウェアへの変更は必要なく、ソフトウェアの開発負担は最小で済むという利点がある。しかし、記録されたデータの再生を一時停止や巻き戻しといったビデオのように行う場合には、(2)の方式を用いることになる。それは、(1)の方式ではOSからの操作によって再生しているために、教材ソフトウェア自体に、一時停止や巻き戻しといった命令を解釈できる機能を用

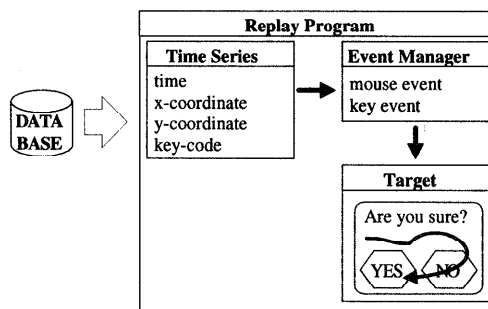


図3 再生プログラムの流れ
Fig. 3 Flow of replay program.

意しなくてはならないからである。一方、(2)の方式では、イベントの解釈を専用のプログラムによって行うために、解釈後の再生の振舞いを自由に設定できる利点がある。これによって、プログラムを新規に書き起こす必要があるが、自由度の高い再生機能を付加した再生プログラムを作ることができる。また、再生の目的にあわせたプログラムにすることも可能である。学習者が見たままの画面の動きを再現するためには、すべてのイベントを正しく解釈して管理しなくてはならず、教材ソフトウェアを作成したとき以上の時間と能力が必要になる。この点を考慮して、本論文では学習中の思考過程分析に特に必要とされるイベントに注目し、これらの再生に必要なデータが記録されるようにした。この方法は、教材ソフトウェアと独立して自由に作成でき、少ない負荷で再生プログラムを作成できる利点を持つ。

本論文では、以上の理由により(2)の再生方法を採用することにした。

2.4 学習中の行動の数値データ化

学習は連続した時間の中で行われるが、その中では、学習者が思考に費やす時間とそうでない時間などが含まれている。思考に費やしている部分を把握することは、教材ソフトウェアを使用することで起きた学習を明確に示すものであり、その時間の長さや状況によって、教材ソフトウェアの評価を行う材料にもなる。そのためには、学習者がどのような行動意識を持って学習課題に取り組んでいたのかを行動ごとに知る必要がある。

2.1節で論じた3)インデキシングプログラムは、得られたデータから、学習者の1行動ごとの意味を把握するための情報を提示する。データは時間軸に沿って記録されているために、 t 時に起きた行動 $event(t)$ を起こすまでに必要とした時間を、1つ前の行動 $event(t-1)$ から知ることができる。図4は、得られた時間軸に沿ったデータから、学習者の行動内容を詳細に区分け

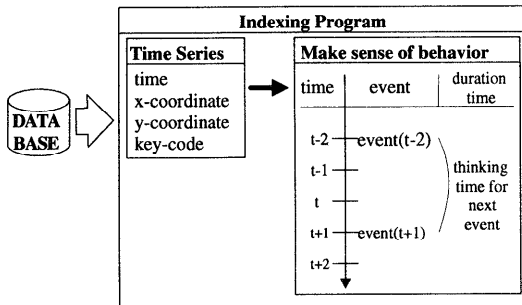


図4 インデキシングプログラムの流れ
Fig. 4 Flow of indexing program.

したグラフを作成する流れを示している。

2.5 履歴からの行動分析

学習者の思考内容を客観的に把握するために、学習履歴を分析し、得られた個人ごとの行動過程を群に分けて考える。似通った行動過程を群に分けることができれば、使用する教材ソフトウェアの特定の場面において、学習者の多種多様な思考過程が数種類にまとめられる¹⁷⁾。

このとき、学習中の思考過程を反映するものと考えられる行動履歴として、PCへのキーボードからの入力履歴、マウスによる入力履歴、入力に関する経過時間履歴など、2.1節で説明した物理的データがこれに相当するものと考えた。

本論文では、上記の物理的データのうち、学習中の教材ソフトウェアにおける各場面での経過時間履歴を考える。記録プログラムによって得られたデータは、時間軸に沿った1次元のデータである。この内容は、 t 時にある行動 $key(t)$ が行われたことを連続して示しているだけであり、インデキシングプログラムでは1次元のデータをその行動内容ごとに区切り、図5のように表した。

このようなデータの見方ができることに着目し、2.1節で論じた行動分析プログラムには、以下の機能を持たせるように配慮した。まず、インデキシングプログラムで示されたグラフを行動パターンとして扱い、統計処理を行い、クラスター分析による行動パターンの分析を試みる。

クラスター分析は、異なったものが混ざり合った対象を、その対象間の類似度をもとにして群に分ける分析手法である¹⁹⁾。分析の手順は、始めに各対象間の距離を求め、それをもとに群に分ける計算を行う。始めに求める各対象間の距離は、場合に応じて以下の4種類を用いる¹⁹⁾。

- (1) ユークリッド距離
- (2) 重み付きユークリッド距離

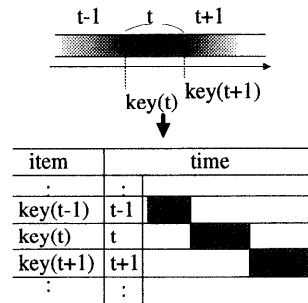


図5 行動パターンの見方
Fig. 5 Motion pattern from time series data.

(3) ミンコフスキー距離

(4) マハラノビスの汎距離

類似度を表す距離尺度の定義による違いは次のように考えられる。

(1) ユークリッド距離：全記録期間の各学習段階において、性質の異なる思考過程や学習過程が含まれず、したがって各段階での所要時間の平均値や分散による規準化を施す必要のない場合に用いる距離尺度。

(2) 重み付きユークリッド距離：全記録期間の各学習段階において、性質の異なる思考過程や学習過程が含まれるため、各段階での所要時間の平均値や分散による規準化を施す必要のある場合に用いる距離尺度。

(3) ミンコフスキー距離：類似度として用いる距離尺度に偏差2乗和の平方根を用いる場合 [(1), (2), (4)] は、各固体における距離尺度は線形な加重結合を前提としている。これに対し、各学習段階での個体差の最大値や最小値に注目するなど、非線形な加重結合をもって類似度とする場合に用いる距離尺度。

(4) マハラノビスの汎距離：全記録期間のそれぞれの学習段階の間に無視できない系列相関が存在する場合に用いる距離尺度。

一方、その後の群に分けるための計算は、場合に応じて以下の6種類を用いる。

- (a) 最短距離法
- (b) 最長距離法
- (c) 群平均法
- (d) 重心法
- (e) メジアン法
- (f) ウォード法

また、(a) から (e) に示した群分けのための判断規範の違いはそれぞれ以下ようになる。

(a) 最短距離法、(b) 最長距離法：全記録期間の各学習段階において、それぞれの学習者に相当するクラスター間を表す尺度がいわゆる長さを表す距離尺度や関連の強さを表す距離尺度で表される場合には、その

尺度が類似度を表す意味付けはその尺度の大小関係すなわち順序量で表される。このような場合に対象の順序量の小さいものが類似していると意味付けられる場合は (a) 最短距離法を、逆にこの順序量の大きいものの方が類似していると意味付けられる場合には (b) 最長距離法で判断するのが望ましい。

(c) 群平均法, (d) 重心法, (e) メジアン法: 全記録期間の各学習段階において, それぞれの学習者 (個体) に相当するクラスター間の類似度を, それぞれの学習段階における類似度の代表値で判断しようとする方法で, 用いる代表値として平均, 重心, メジアンがそれぞれ用いられる。それぞれの違いは, 代表値として採択される中央特性値にある。したがって, (c) 群平均法はクラスターに含まれる対象の数を考慮した算術平均を生かし, (d) 重心法では, クラスター内に含まれる個体の重心座標間距離を距離尺度とし, (e) メジアン法ではクラスター内の対象数による重みでなく, 各クラスター間の距離順位に注目して類似度を決定しているところに特徴がある。

(f) ウォード法: この方法は各学習段階において, それぞれの学習者 (個体) に相当するクラスター間の類似度を測る距離尺度や距離順位に注目せず, 統合するクラスター内平方和ができるだけ小さいことを望ましいとする考え方で, これまでの方法と判断基準を異にしている。こうした方法は, 学習対象の段階によって異なる種類のデータが得られる場合などに, クラスターの統合・分離に総合的規範で対応しようとするもので, きわめて応用範囲が広いのが特徴である。

本分析システムでは, すべての場合に応じた分析を実施できるように配慮している。しかし, データとして扱う時間間隔が間隔尺度であるために, 通常は, 各対象間の計算には重み付きユークリッド距離を用い, その後の群分けには, ウォード法を用いる。重み付きユークリッドの計算方法は, 得られたデータが m 変数でサンプル数が n 個の場合, 測定値 x_{ij} ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$) に関して, i と i' との距離 $d_{ii'}$ は, 重み w_j を用いて次のようになる。

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (x_{ji} - x_{ji'})^2} \quad (1)$$

またウォード法の計算は, α クラスターと β クラスターを統合して γ クラスターを作るとき, その γ クラスターと他の σ クラスターとの距離 $S_{\gamma\sigma}$ は, 各 $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ クラスターに含まれる対象の個数 $n_\alpha, n_\beta, n_\gamma, n_\sigma$ と各クラスター間の距離 $S_{\alpha\sigma}, S_{\beta\sigma}, S_{\alpha\beta}$ により, 次のように求められる。

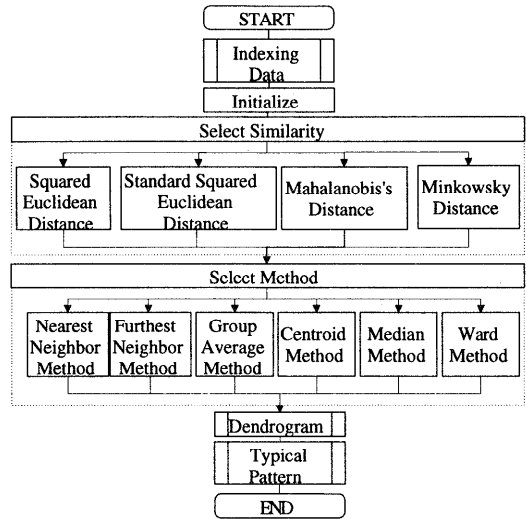


図6 クラスター分析の構成
Fig. 6 Configuration of clustering analysis.

$$S_{\gamma\sigma} = \frac{n_\alpha + n_\sigma}{n_\gamma + n_\sigma} S_{\alpha\sigma} + \frac{n_\beta + n_\sigma}{n_\beta + n_\sigma} S_{\beta\sigma} + \frac{n_\sigma}{n_\gamma + n_\sigma} S_{\alpha\beta} \quad (2)$$

図6は, 行動分析プログラムのクラスター分析部分の流れである。得られたデータをインデキシングプログラムで加工し, クラスター分析の特徴である距離の計算方法を選択することにより, 樹形図が描かれる。この樹形図から, データをいくつの群に分けるかを選ぶことができる。したがって, 群を表す代表的行動パターンを作成することで, 分析した状況における学習者の時間のかけ方を, 1つの代表的な行動パターンとして表すことができる。

樹形図は, 選択された類似度によって計算された値から描くことができる。最短距離法やウォード法を用いたクラスター分析の計算では, クラスター間の類似度が小さいものを順次得ることができる。このことを利用すれば, データをクラスター内で昇順に並べ替えた順に描くことで, クラスターを示す線が交差しないように表示できる。

代表的行動パターンは, クラスター分析によって分けられた群ごとに, 内包するデータの平均をとったものである。クラスター分析の結果から, 分ける群の個数は任意に決めることができる。実際には, クラスター間の距離が大きい部分で群を分けることが多い。

以上の機能は, 図7に示すことができる。この図では, データがインデキシングプログラムによって加工され, 行動分析プログラムによって行動分析を行うことを示している。

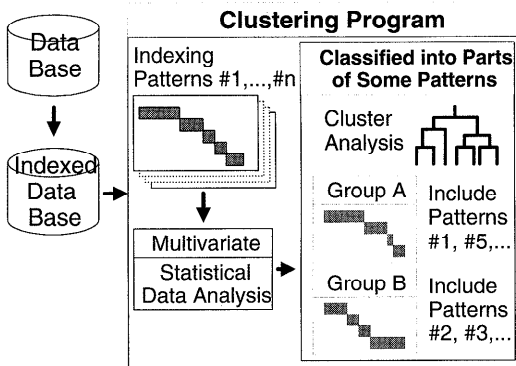


図7 行動分析プログラムの流れ
Fig. 7 Flow of clustering program.

3. 提案システムによる学習履歴分析

3.1 多桁減算を学習する研究授業

提案した学習履歴分析システムを用いた事例により、その効果を検討する。研究授業は、1996年10月に大阪府内の小学校で行われた²⁰⁾。対象は、小学5年生36人である。授業は、図8に示す配置を持った校内のPC教室で1時間程度行われ、そのうちの40分間ほどは、富士通のFMTOWNSFresh (CPU: i486SX/33MHz, メモリ: 8MB, OS: Microsoft Windows3.1) 上で試作した教材ソフトウェアを用いた授業が実施された。PCは全部で12台あり、子供たちは3人ずつ12の班(1班~12班)に分かれて授業を受けた。

この研究授業からは、各班ごとの子供たちのマウスの操作履歴、同じく設置したマイクで記録した会話と、PCを使った学習後に行ったアンケート調査の結果が得られた。また、8班と10班についてのみ、図8中に示すビデオカメラによって、授業開始から終了までの様子を録画した。そのときの様子を、図9に示す。

研究授業に用いた教材ソフトウェアは、筆者らが以前開発した「馴染みのない発想から学ぶ」環境の中で、小学2年生で学ぶ「くり下がりのある引き算」の単元について、3桁ひく2桁の計算を用いて学ぶものである²⁰⁾。馴染みのない発想から学ぶ環境は、ある学習対象に関して、学習者が有する知識とは異なる知識を知ることにより、学習対象に関してより深い理解を行うことを狙うものである。馴染みのない発想にイギリスの地方で用いられている引き算の計算方略を提示することにした。

図10にその計算例を示す。図中のStep2の計算過程が、日本で用いられている方略と異なる。これは、くり下がりが起こる場合に、上位の数から10を借り

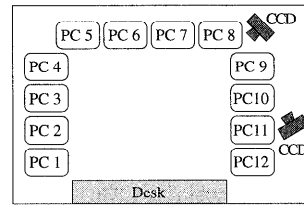


図8 PC教室の配置
Fig. 8 PC classroom.



図9 研究授業中の学習者の様子
Fig. 9 Photograph of the students in class.

$$\begin{array}{r}
 \text{step1} \qquad \text{step2} \qquad \text{step3} \\
 \begin{array}{r}
 158 \\
 - 39 \\
 \hline
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 158 \\
 - 49 \\
 \hline
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 158 \\
 - 49 \\
 \hline
 9
 \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{r}
 \text{step4} \qquad \text{step5} \\
 \begin{array}{r}
 158 \\
 - 49 \\
 \hline
 19
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 158 \\
 - 49 \\
 \hline
 119
 \end{array}
 \end{array}$$

図10 馴染みのない計算方略
Fig. 10 Calculation method in English country.

るのではなく、減数と被減数の差が一定ならばその答は変化しないことを利用し、被減数に10を足して減数の上位の数にも10を足すことを行っている。

実際の授業では、子供たちがPC上に引き算の問題を自由に作成し、PCがその問題を馴染みのない発想を用いて解く過程を見せる。この教材ソフトウェアでは、この環境を図11の流れで表現した。流れは大きく2つに分かれており、問題を作成する作成部と、その問題をPCが解く解答部がある。この教材ソフトウェアでの具体的な入力作成部での問題作成であり、解答部では、計算過程を眺めることと、それに対する理解の判断を行うことである。また、図12は試作した教材ソフトウェアの一場面である。PCに問題を入力したり、その問題を解くことは、図12右上にいるネズミのキャラクターを介して行われる。

2.2節の履歴を記録する機能は、教材ソフトウェア内部に、独立した機能として動作するように組み込んだ。記録データの出力形式は提案したものと同一のものであるが、記録間隔を200msごととした。これは、学習に使用したPCの処理能力の問題であり、間隔を伸

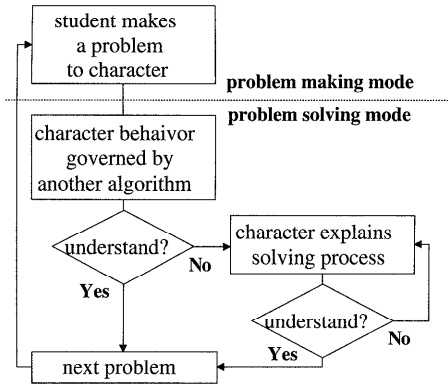


図 11 馴染みのない発想から学ぶ環境の流れ
Fig. 11 Flow chart of educational software with unfamiliar method.

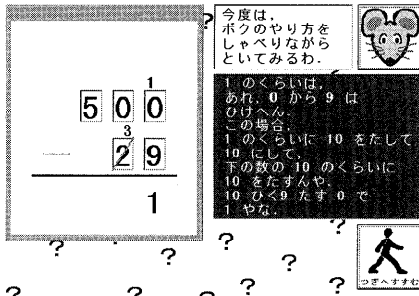


図 12 試作した教材ソフトウェアの一場面
Fig. 12 A screen shot of educational software.

ばさなくては、教材ソフトウェア自体の動作が停滞する支障が出たためである。

3.2 学習履歴の分析結果

2章で提案した教材学習履歴分析システムを、試作した教材ソフトウェアから得られた学習履歴データの分析に用いる。以下に示す図 13~図 15 は、提案したシステムによる出力例である。

2)の再生プログラムは、学習者が問題を作成して決定する過程を再現することを目的とした。実際には、記録されたイベントを画面を描き変えるための情報として解釈し、図 13 のように学習中の画面を取り込み、その上にマウスの軌跡を連続して描いて残すようにした。数字のボタンをマウスで選ぶイベントは、記録された数字を指定された場所に描くことで再現される。ボタンが押されるような内容までは再現していないが、マウスの軌跡と押したイベントの発生と同時に描かれる数字によって、学習者の行動は明確に知ることができる。また再生中の任意の場所で、一時停止・早送りの操作を行うことができる。そのほかにも、数値データを逐次表示しているために、画面上の変化とその時点での数値を確認しながら、学習者の行動を注意深く

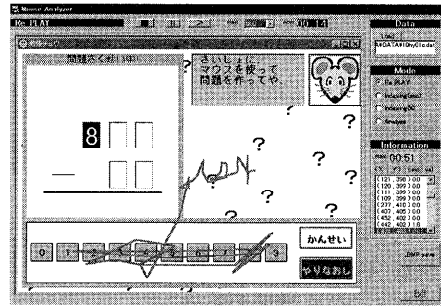


図 13 履歴の再生
Fig. 13 Screen shot of replay program.

item	ratio of duration time (%)
input 1	18
select 2	10
input 4	20
select 3	11
input 3	14
select 4	5
input 6	11
select 5	6
input 8	5

図 14 インデキシング表示
Fig. 14 Screen shot of indexing program.

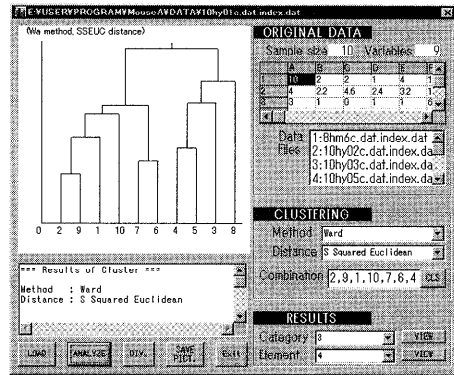


図 15 問題作成パターンの樹形図
Fig. 15 Dendrogram of problem making mode.

観察することができる。

3)のインデキシングプログラムは、図 14 のような出力を提示する。item 欄は学習者が行った入力内容を示し、ratio of duration time の列は入力に要した時間の割合を示し、その右側の欄は要した時間を棒グラフ状に視覚化している。時間を割合で示しているのは、行動分析プログラムにおいて標準化されたデータを必要とするからである。ここで行った標準化には、図 11 で示した作成部において、3 桁ひく 2 桁の問題を作成するための入力作業を最短手順で行ったデータを用いている。この手順は、以下の 9 つの行動から成

り立っている。

- (1) 被減数 100 の位に入れる数字を選択する
- (2) 被減数 10 の位を選択する。
- (3) 被減数 10 の位に入れる数字を選択する。
- (4) 被減数 1 の位を選択する。
- (5) 被減数 1 の位に入れる数字を選択する。
- (6) 減数 10 の位を選択する。
- (7) 減数 10 の位に入れる数字を選択する。
- (8) 減数 1 の位を選択する。
- (9) 減数 1 の位に入れる数字を選択する。

たとえば、上記に対応して図 14 に示された学習者の行動を示すと以下ようになる。

- (1) 被減数の 100 の位に 1 を入力。
- (2) 被減数の 10 の位を選択。
- (3) 被減数の 10 の位に 4 を入力。
- (4) 被減数の 1 の位を選択。
- (5) 被減数の 1 の位に 3 を入力。
- (6) 減数の 10 の位を選択。
- (7) 減数の 10 の位に 6 を入力。
- (8) 減数の 1 の位を選択。
- (9) 減数の 1 の位に 8 を入力。

したがって、上記の手順で「143-68」の問題を作成したことが分かる。さらに図 14 より、この学習者は上記の (1) と (3) の行動に全体の 4 割の時間を費やしていることが分かる。なお図中には所要時間比率で示したが、この作業完了までに約 22 秒の実時間を要している。

4) の行動分析プログラムは、図 15 のように樹形図で示される。分析に用いたデータがインデキシングプログラムによって標準化されているために、この樹形図から行動パターンを得ることができる。

3.3 提案システムの評価

3.3.1 行動分析プログラムによる評価

学習履歴データのみを用いて、学習者の思考過程の把握を試みた。行動分析プログラムによって得られた樹形図(図 15)より、授業中に得られた学習者の問題作成のための入力データは、図 16 に示す 3 種類の行動パターンに集約された。この図は、全学習者データに対してクラスター分析を行った結果を示している。したがって、図 16 に示された特徴的な行動パターンは、3 つの category に属する全学習者データの平均化されたパターンと見ることができる。

教師側は、このように生成されたデータを見ることで、学習者の学習課題に関する思考の様子を推測することができる。たとえば、階段形状に描かれた図 16 より、各パターンに共通した特徴、および各パターン

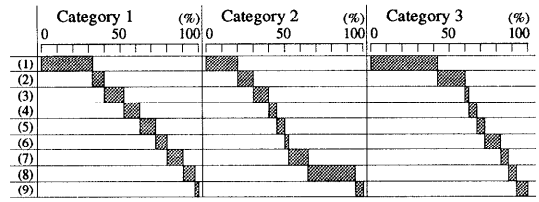


図 16 抽出された行動パターン
Fig. 16 Obtained indexing pattern.

表 1 行動パターンの特徴
Table 1 Clustered pattern.

全パターンに共通	
数を入力する手順は、被減数を入力し終えた後に減数を入力する。また数字の入力は、減数・被減数ともに上位の桁から下位の桁へと行われる。	
パターン別の特徴	
Category1	最初の入力に全体の 3 分の 1 の時間を要する。後の入力はほぼ一定間隔。
Category2	被減数と減数の入力時間がほぼ均等。ただし、被減数は入力時間が減少傾向にあり、減数は途中で長い時間を要する。
Category3	最初の入力に全体の半分の時間を要する。後の入力はほぼ一定間隔で行われるが、被減数の入力後から減数の入力開始には少し長い時間を要する。

ごとの特徴をまとめると、表 1 のようになる。

この表に共通した特徴からは、学習者の問題作時に共通の行動パターンが存在するものと考えられる。行動パターンの 1 つは、引き算の計算でくり下がりが起こるかどうかは減数と被減数の下位の数の関係で決まるにもかかわらず、学習者が重要な部分の入力を先に行っていないものである。さらに問題作成に見られる共通の行動パターンは、学習者はどのような問題にするかを最初に考え、それがまとまってから入力の行動に移るのではないかということが、最初の入力に時間をかけていることから推測できる。Category1 は、表 1 の共通した特徴を一番素直に反映している。

また、Category 別に注目した思考過程の推測も行える。たとえば、Category1 では問題の作成完了までの総所要時間の平均が 29 秒であることから、問題を考える時間として約 10 秒が費やされ、その後はほぼ 2~3 秒程度の一定間隔で問題を入力している。Category2 は、Category1 の行動に確認する思考過程が加わったものであると推測できる。これは、Category2 の行動では終了間際の行動に比較的多くの時間が費やされていることから推測できる。このような行動は、他のパターンでは見られない。また、Category3 は、Category1 に比べて初期入力時に異常に長い時間を費やしていることが分かる。実際 Category3 の総所

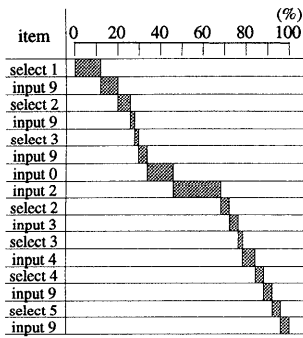


図 17 やり直しのパターン
Fig. 17 Remaking pattern.

要時間の平均は 54 秒であり、最初の入力時に Category1 の場合の 2 倍の 20 秒を要している。このことから Category3 には、問題を作成するための思考時間中に、他のことに気をとられたり幾度も問題を作り直したりするような、余分な介入があったのではないかと推測できる。

これら 3 つの Category に準じない例外的なパターンでも、同様に推測が可能である。その一例として、たとえば図 17 のパターンは、表 1 の Category1 で問題の入力を始めるが、途中で最初の入力に要した時間よりも長い時間を要し、再び同じパターンで入力をやり直していることを示している。この学習者の場合、やり直しに要した時間の長さが入力を始めるまでの時間よりも長い。このことは、くり下がりが起こるといふ課題に沿った問題の作成が完了していないことを示している。また、入力の行動中に問題を完成させる思考が行われておらず、被減数を入力し終えた後で不完全に気づいている。これより、この学習者は思考時間と行動時間をわけており、かつ、思考中の問題は、桁を持つ数としてではなく、1 つの数字として認識しているのではないかと推測することができる。

以上に示したのは、提案システムの行動分析プログラムを用いた学習者の行動パターン分析結果ならびに、これより得られる学習者の思考過程を推測した一例である。従来までのこの種の推測のためには、学習中の学習者の挙動や発話の記録を時間軸に沿って書き出し、かつまた聞き込みによって教師側が推測するしかなく、この作業には多くの時間と労力を要するものであった。本システムは、これらの作業の代わりに、学習者が学習中に残した個々の行動の所要時間のパターン分析結果を学習終了後にただちに教師側に提示できるため、教師が学習中の状況を正確に把握することができる。最近の知的教育システムの研究においては、認知過程を探るために、学習者の知識を外化して可視化する試

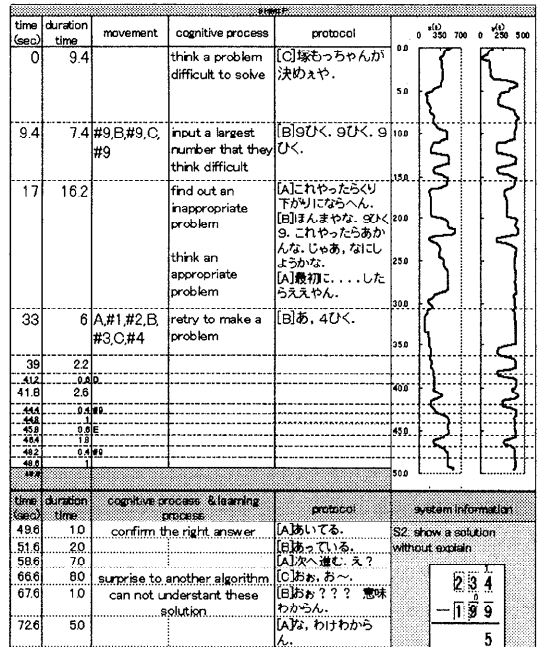


図 18 記録データと発話プロトコルを同期した学習履歴
Fig. 18 Detail of protocol synchronized flow.

みが行われている^{21),22)}。図 16 や図 17 は、こうした視点からも、学習支援に寄与できるものと期待される。

3.3.2 インデキシングプログラムによる評価

前項での学習者の思考過程の推測は、教師が自動生成されたパターンのグラフを見るだけで容易に行うことができる。しかしその反面、行った推測を詳細に検討することは難しい。そのために、同パターンの各作業時間とすでに得られたマウスの入力軌跡を用いて、同時刻の学習者の会話を分析したプロトコル²³⁾を同期させた図 18 を描き、学習者の思考過程を詳細に追跡し、前項で行った行動パターンの分析による各種の推測を検討した。

図 18 は、時間軸に沿って、左端から、行動に要した時間、学習者の行動内容、推測できる学習者の思考状態とプロトコル、および、システムの状態をまとめたものである。問題を作成する作成部には入力内容の時間、および入力内容の確認のためにマウスの X(t), Y(t) 座標を記し、問題の解答過程を見る解答部ではシステムの表示内容を記して区別している。この図に用いた学習者の行動データは、一例として図 17 に示した学習者の記録を作り直した過程を示している。この図からは、時間軸に沿って、プロトコルと行動内容を同期させた学習者の思考過程の推測を行うことができる。

学習者の行動は、最初に被減数「999」を入力後、被

減数を「234」に変更して減数「99」を入力して問題を完成している。学習者は出題前にしばらく考え、「9, 9, 9」と入力する数字を発言しながら作成していることが、この入力時刻のプロトコル分析により立証された。また、マウスの軌跡はそれぞれの入力作業の区分を識別するのに有用な情報として活かされている。図 18 から、同期したプロトコルより学習者は、最初に被減数を入力し終えた時点で問題の欠陥に気づいた発言を行っていることも確認できた。このことから、3.1 節の行動パターン分析結果から予測した思考過程の推測はほぼ正しいものであり、この学習者は問題を作成している途中は、数を 3 桁ないし 2 桁の数としての認識ではなく、各位に入る独立した数字として考えていると確認できた。また、図 18 中の 3 段目に相当する 17 秒後から 33 秒後までの 16 秒間は問題を作り直し始める部分であり、一番長い時間を占めている。同期したプロトコルからも、くり下がりになるか否かを思考していることがうかがえる。したがって、3.1 節で論じた図 16 の Category2 や図 17 での行動パターンから推測した思考過程は、ほぼ正しいといえる。

図 18 によって、教師は学習者の思考状態を詳細に推測することができる。しかし、この図を生成するためには、従来からある授業評価に用いられているプロトコル分析を行わなくてはならないために、結果を得るためにはかなりの時間が必要にならざるをえず、その結果の推測にも時間がかかる欠点がある。よって、学習者の思考過程を把握するための作業を、前項で行った行動分析プログラムによる推測過程、そしてプロトコル分析の結果を加味した確認過程に分け、場合に応じた利用をすれば、提案したシステムは教師側が学習者の学習中の行動、ならびに思考過程を推測するための有用な手段になるものと確信する。

4. 結 論

本論文では、実際の学校教育の場において、学習者と教師にとって意味のある情報機器の利用環境を前提とし、この環境における学習効果の評価を支援する目的のシステムを提案した。得られた成果をまとめると以下ようになる。

(1) 提案したシステムにより、自然な学習環境から得られた学習履歴の物理的計測データを用いて、時間軸に沿った客観的な評価を行えた。

(2) 物理的計測データのみで、学習者の思考過程についての推測を行うことができた。学習者、教師、情報機器の環境では、教師の意図した授業の展開以外に、学習者と情報機器の間で起こる独自の学習に多くの時

間が費やされる場合がある。そのような場合でも、情報機器に学習者の行動を丁寧に記録する工夫をして分析することで、対面では気付かなかった詳細な挙動から、教師は学習者の特徴をふまえた評価を行うことができる。

本論文の 3 章では、1 つの入力装置による物理的計測データの記録にとどまったが、映像などの記録も同じ情報機器によって記録することができれば、時間軸を同期させ、さらに多様な行動分析のための資料を提示することができる。事実、最近ではマルチメディア教材による教育支援もさかんであり、情報機器に記録された利用過程の情報を活かし、作業の状況と同期させて残すことも試みられている²⁴⁾。著者らが示した手法は、こうした状況の記録を学習支援に活かす方向を示すものである。また、情報機器が進歩することによって処理できる入力内容が増えれば、物理データとして扱うものも増えることになる。今後、授業中の音声や学習者の表情、生理計測などの情報処理が容易に行えるようになれば、本論文で示した思考過程を分析する手法への適用にも有効であり、情報機器による支援をより深く行うことができると期待される。

謝辞 本研究の一部は、甲南学園平生太郎基金科学研究奨励助成金、ならびに文部省科学研究書基盤研究(C)による経済的援助を受けたことを付記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 重松敬一, 勝美芳雄, 上田喜彦: 子供の思考を生かした算数指導 (2) — メタ認知の発達の変容調査と実践への示唆, 日本数学教育学会誌算数教育 40-6, Vol.73, No.12, pp.9-17 (1991).
- 2) テーマ'98 コンピュータと教育, 読売新聞 1998 年 10 月 30 日朝刊第 36 面記事.
- 3) 大槻説乎: 発見的学習とその支援環境, 人工知能学会誌, Vol.8, No.4, pp.411-418 (1993).
- 4) 波多野諄余夫: 理解と教授の相互作用, 人工知能学会誌, Vol.10, No.3, pp.354-360 (1995).
- 5) 岡本敏雄: 教育とメディアと人工知能, 人工知能学会誌, Vol.10, No.3, pp.361-367 (1995).
- 6) 中川聖一, Reyes, A.A., 鈴木英之, 谷口泰広: 音声認識技術を利用した英会話 CAI システム, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.8, pp.1649-1658 (1997).
- 7) 緒方広明, 矢野米雄: アウェアネスを指向した開放型グループ学習支援システム sharlock の構築, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.4, pp.874-883 (1997).
- 8) 岩根典之, 竹内 章, 大槻説乎: 算数の文章題を対象としたネットワーク型知的教育支援環境,

- 電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.4, pp.915-924 (1997).
- 9) Wenger, E., 岡本敏雄, 溝口理一郎 (監訳): 知的CAIシステム, オーム社 (1990).
- 10) Wood, S.L.: A New Approach to Interactive Tutorial Software for Engineering Education, *IEEE Trans. Education*, Vol.39, No.3, pp.399-408 (1996).
- 11) Carbonel, J.: AI in CAI: An artificial intelligence approach to computer-assisted instruction, *IEEE Trans. Man-Machine Systems*, Vol.11, No.4, pp.190-202 (1970).
- 12) Brown, J., Burton, R. and Bell, A.: SOPHE: A step towards a reactive learning environment, *Int Jnl Man-Machine Studies*, Vol.7, pp.675-696 (1975).
- 13) Brown, J. and Burton, R.: Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills, *Cognitive Science*, Vol.2, pp.155-191 (1978).
- 14) Barr, A., Beard, M. and Atkinson, R.: The computer as a tutorial laboratory, the Standard BIP Project, *Int Jnl Man-Machine Studies*, Vol.8, pp.567-596 (1976).
- 15) Papert, S.: *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*, Basic Books (1980).
- 16) 森田英嗣: 「誤りから学ぶ」環境の開発研究, 日本教育工学雑誌, Vol.18, No.1, pp.1-14 (1994).
- 17) 森田英嗣, 稲垣佳世子, 波多野諄余夫: 生物学的推論の発達—その3生物学的属性付与判断の反応時間による分析, 第30回総会発表論文集, 日本教育心理学会, pp.314-315 (1988).
- 18) 中易秀敏, 坪野博宣: 情報科学基礎編, 共立出版 (1997).
- 19) 田中 豊, 脇本和昌: 多変量統計解析法, 現代数学社 (1983).
- 20) Matsumoto, T., Nakayasu, H. and Morita, E.: Time History Analysis of GUI for CAI in elementary school, *Proc. IEEE RO-MAN'97*, pp.490-495 (1997).
- 21) 三宅芳雄: 知識の外化と認知過程, 人工知能学会研究会, Vol.SIG-IES-9802, pp.39-44 (1998).
- 22) 柏原昭博, 雲林院宏, 豊田順一: ハイパーメディア教材における学習履歴の再構成支援, 人工知能学会研究会, Vol.SIG-IES-9802, pp.39-44 (1998).
- 23) 海保博之, 原田悦子: プロトコル分析入門, 新曜社 (1993).

- 24) 片山 薫, 香川修見, 神谷泰宏, 對馬秀樹, 吉廣卓哉, 上林彌彦: 遠隔教育のための柔軟な講義検索手法, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.10, pp.2837-2845 (1998).

(平成10年12月1日受付)

(平成11年6月3日採録)



松本 寿一 (学生会員)

1971年生。1998年大阪工業大学大学院経営工学専攻博士前期課程修了。甲南大学自然科学研究科情報・システム科学専攻博士後期課程在学中。



中易 秀敏 (正会員)

1950年生。1980年大阪府立大学大学院工学研究科修了。金沢工業大学工学部教授, 大阪工業大学工学部教授を経て甲南大学理学部教授, 同大学ハイテク・リサーチ・センター (兼任)。知的システム設計の研究に従事, 工学博士。IEEE, ACM, 日本機械学会, 人工知能学会等会員。



森田 英嗣

1960年生。1979年茨城大学教育学部教育学科卒業後, 1987年千葉大学大学院教育学研究科修士課程修了, 大阪大学大学院人間科学部技官を経て, 大阪教育大学教育学部助教授。教育工学・教育方法学の研究に従事, 特に実践教育に関心を持つ。日本教育工学会, 教育方法学会, American Educational Research Association 等会員。



亀島 敏二 (正会員)

1949年生。1973年京都工芸繊維大学工学部研究科修士課程修了。(株)日立製作所機械研究所主任研究員を経て, 1994年大阪工業大学工学部教授。機械システムならびに協働情報システムの制御に関する研究に従事。工学博士。SIAM, IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会等会員。