分散遺伝的アルゴリズムを用いた教授・学習活動系列化システム

Teaching and Learning Activity Sequencing System using Distributed Genetic Algorithms

松居 辰則

Tatsunori MATSUI

電気通信大学大学院情報システム学研究科

Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications
matsui-t@ai.is.uec.ac.jp

石川 智剛

Tomotake ISHIKAWA

株式会社 村田製作所

Murata Manufacturing Co., Ltd.
fugue@k3.dion.ne.jp

岡本 敏雄

Toshio OKAMOTO

電気通信大学大学院情報システム学研究科

Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications
okamoto@ai.is.uec.ac.jp

keywords: Distributed Genetic Algorithm, Teaching and Learning Process/Activity, Learning Strategy, Contents Sequencing, Learning Reference Model

Summary

The purpose of this study is development of a supporting system for teacher's design of lesson plan. Especially design of lesson plan which relates to the new subject "Information Study" is supported. In this study, we developed a system which generates teaching and learning activity sequences by interlinking lesson's activities corresponding to the various conditions according to the user's input. Because user's input is multiple information, there will be caused contradiction which the system should solve. This multiobjective optimization problem is resolved by Distributed Genetic Algorithms, in which some fitness functions are defined with reference models on lesson, thinking and teaching style. From results of various experiments, effectivity and validity of the proposed methods and reference models were verified; on the other hand, some future works on reference models and evaluation functions were also pointed out.

1. は じ め に

情報通信技術の進展やインターネットの普及に伴い、教育の分野においても大きなパラダイムシフトが求められている。特に、教室における教授・学習活動においても情報通信技術の有効利用による学習者への新しい学習環境の提供が可能となり、それに伴い教授者にも対応する指導力の育成と資質の向上が強く求められている。教師が指導力や資質を向上させる方法の一つとして、授業の実践事例や指導方法に関する知見の蓄積・再利用があり、それらを支援するシステムの開発が行われている [井上 99, 関 00]。教師は蓄積された情報を検索・参照することによって、自らの状況やニーズに合わせた授業設計・授業評価を行う。

一方、授業^{*1}、すなわち教授・学習過程を表現する場合には概念表現、形式表現、内容表現の3種類の表現手法が用いられる。概念表現とは「問題解決的な授業展開」

「帰納的な授業展開」など教授・学習過程における教授戦略に主眼を置いた表現手法である。形式表現とは「教授者の発問」「学習者の質問」「学習者同士の議論」など、教授・学習過程における具体的な教授・学習活動に主眼を置いた表現手法である。内容表現とは「三平方の定理に関する問題を説明する」「インターネットで今年の雨量を調査する」など、教材（コンテンツ）やツールを明確にした教授・学習活動の具体的な表現手法である^{*2}。

さて、授業の実践事例や指導方法に関する知見の蓄積・再利用を支援するためには、実践事例や指導方法に関するデータベースを構築し、検索・登録サービスを提供するのが一般的である。その際、蓄積されるデータには適切なインデックスを付与するが、現在までに開発され実用的に利用されているシステムにおいては、内容表現に対応したインデックスが付与されている。しかしながら、内容表現に対応したインデックスを用いる場合、ユーザ

*1 本論文では「授業」と「教授・学習過程」を同義に扱う。

*2 形式表現と内容表現との相違点は教材・ツールに関する明確な記述の有無である。

の検索要求に過度な具体性を求められるため、ユーザのニーズに対する柔軟性が低くなるとの問題点が指摘されている [関 00]。これに対して [井上 99] では、概念表現に対応したインデックスが用いられているが、概念表現は一般のユーザに対して解釈が困難であり、ニーズの表現の障害となるとの問題点が指摘されている。

そこで、本研究では、実践事例データベースの付加的な機能として、概念表現と内容表現で表現された教授・学習活動を形式表現によって表現するシステムを構築する。具体的には、ユーザの概念表現と内容表現によるニーズ（想定する教授・学習活動）に対して、それを実現するための教授・学習活動の系列、すなわち形式表現の系列として出力するシステムを構築する。本システムでは、教授・学習活動の系列化を複数の系列化戦略を反映させた課題系列化問題として定式化し、分散遺伝的アルゴリズムを用いて実現する手法を実装する。

本論文では、2 章で本研究の目的と手法を述べ、3 章で本研究で提案する系列化手法の位置付けを明確にする。続いて、4 章で教授・学習活動系列生成システムの概要を述べ、5 章でシステム内の遺伝的操作時に参照する系列の適合度評価の参照モデル、6 章でシステム内の遺伝的操作の詳細、7 章でシステムに実装されている対話機構について述べる。最後に、8 章で評価実験を通して提案手法およびシステムの有効性と妥当性に関して考察し、今後の課題を明らかにする。

2. 研究の目的と手法

ここでは、本研究の目的と、手法として遺伝的アルゴリズム、特に分散遺伝的アルゴリズムを基本にした手法を適用することの妥当性に関して述べる。

2.1 研究の目的

本研究の目的は、授業実践事例データベースの付加的な機能として、概念表現と内容表現^{*3}で表現された教授・学習活動を、形式表現によって表現する手法を提案することにある。具体的には、概念表現と内容表現によって表現された教授・学習活動に対応する形式表現、すなわち教授・学習活動の系列（以下、単に系列という）を生成するシステムの構築を行う。その中で、系列化を複数の系列化方略を反映させた課題系列化問題^{*4}として定式化し、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）を用いて実現する。特に、本研究では系列化に複数の系列化戦略を反映させるため、系列化問題を多目的最適化問題として捉え、分散遺伝的アルゴリズム（Distributed Genetic Algorithm: DGA）を基本にした手法を提案する。

^{*3} 本研究では特に、高等学校普通科新教科「情報」における教授・学習活動を対象にする。

^{*4} 本研究における「課題」は教授・学習活動の構成要素に対応する。

2.2 研究の手法

DGA は GA における全個体をサブ母集団（以下、これを島と呼ぶ）に分割し、各島内で通常の遺伝的操作を行い、移住間隔と呼ばれるパラメータで決定される世代ごとに、移住率と呼ばれるパラメータを基に島内で個体を選択し、他の島へ移動させる。この操作は移住と呼ばれる。DGA では単一母集団での GA と比較して高品質の解が得られると報告されている [三木 98, 三木 99, 廣安 99] が、その理由についてはあまり解明されていない。しかしながら、DGA において高品質な解が得られる一要因として、島ごとに生成されたビルディングブロックが移住によって他の島のビルディングブロックと結合し、成長することが考えられる。

ここで、本研究において DGA の考えを適用することの妥当性を明確にする。

まず、GA を適用することの妥当性に関して述べる。本システムでは 3 種類の評価観点（授業形式、思考形態、指導様式）で系列を評価し、全ての観点での適合度が高くなるような系列化方略をとる。その際、各評価観点には評価観点ごとに異なる参照モデル（5 章）と異なる評価関数（6 章）を用いる。したがって、この系列化の問題は多目的最適化問題に帰着され、GA はその有効な解法であると考えられる。

次に DGA の考えを適用すること、特に島ごとに異なった評価関数を用いることの妥当性に関して述べる。本システムでは、3 種類の評価観点から生成される系列を評価し遺伝的操作を実行し、ユーザの要求に適合した系列を出力する。そして、本研究では「評価観点の相違により生成される系列がどのように異なるか」を可視化することによって、ユーザが教授・学習過程の系列化をメタなレベルで認識することを期待している。そのため、7 章で述べる対話機構の実装が重要となる。すなわち、系列化方略の系列生成への影響を明確にできること、ユーザが重要視する評価観点の切り替え（系列化方略の変更）によって、要求に対する複数の準最適解の中で異なった系列を出力すること、系列の明示的な変更をユーザに求め、それを反映させた遺伝的パラメータで遺伝的操作の再実行を行うこと、等の機能が必要となる。これらのインタフェース（対話機構）を実現するためには、GA に次のような特徴が必要となり、DGA はこれらを同時に満足する 1 つの解法の 1 つと考えられる。

- (1) 複数の評価観点ごとに評価関数を設定可能
- (2) 各評価観点での評価値の高い系列が生成され保存される
- (3) 総合的に評価値の高い系列が生成される
- (4) 遺伝的操作における各評価関数の重みを変更することが可能

3. 課題系列化問題としての定式化

本研究における課題系列化の手順は次のとおりである．
()内は対応する遺伝的操作を表す．本手法はDGAを基本としておりStep 3～Step 6において各島ごとに独自の系列化方略に基づき系列化を行い、特に、Step 5において常に島間で優良な系列群を交換し、優良な系列には他の系列化方略も反映されるようにしている点が特徴である．

- Step 1 教授・学習活動系列群の生成（個体群の生成）
- Step 2 系列群の分割（個体群の分割、島の構成）
- Step 3 各島内での系列間の交叉（交叉）
- Step 4 各島内での系列における突然変異（突然変異）
- Step 5 島間での系列群の交換（移住）
- Step 6 各島内での各系列の評価（選択）
- Step 7 終了判定．条件を満足しない場合はStep 3～Step 6の繰り返し．

ここで、従来の課題系列化手法を概観し、本手法の位置付けを明確にする．

3.1 従来の課題系列化手法とその分類

授業設計において、複数の学習コンテンツ（学習課題）を順序関係に着目して構造化するアプローチは、教材の構造化法と呼ばれ、Gagneの学習階層[Gagne 79]や沼野の論理分析[沼野 76]などが著名である．教材の構造化法は、学習課題をノード（節）、学習課題間の順序関係をアーク（有向枝）にそれぞれ対応させた2次元のグラフ構造の形式に表現する技法である．これに対して2次元にグラフ構造化された教材をもとにして、授業展開のために1次元的に学習課題を配列するための方法は、学習課題系列化法（以下、単に、系列化手法と略す）と呼ばれている．系列化においては授業設計者の意図、すなわち教授方略が反映される．この教授方略に数学的なモデルを導入することによって、教授方略モデルを記述し、そのもとで課題の系列化を行うのが一般的である．

従来の系列化手法は全て「系列化の手続き（アルゴリズム）が明確に記述することが可能」であること、すなわち「系列化の手続きが再現可能（説明可能）」であることが特長である．このような系列化手法はアルゴリズム的であると呼ぶことにする．[赤堀 92, 竹谷 92, 豊田 99]等で提案されている手法は全てアルゴリズム的な手法に分類される．これに対して「系列化の手続き（アルゴリズム）が明確に記述することが困難」、すなわち「系列化の手続きが再現困難（説明困難）」な系列化手法は、計算的であると呼ぶことにする．また、従来の系列化手法は全て「系列化の対象となる教材構造は静的に与えられており、得られた課題系列が変化することはない」という前提を置いている点も特長である．このような系列化手法を静的であると呼ぶことにする．これに対して「系列化の対象となる教材構造が動的に変化し、その変化に

基づき課題系列も更新する」という前提のもとでの系列化手法を動的であると呼ぶことにする．以上より、系列化手法を「アルゴリズム的 計算的」「静的 動的」という観点から整理・分類することが可能である．

3.2 提案手法の位置付け

提案手法においては系列化の対象（教授・学習活動の構成要素）の詳細度が比較的大きい（小さくすることが困難である）ため、

- 系列化のための明確な指標の定義が困難
- 課題間の2項関係が明確に記述できない
- 唯一の教授方略によって系列化することは不適切

という問題が生じアルゴリズム的な手法は適用できない．よって、系列化を多目的最適化問題として定式化し、系列化の対象となる教授・学習過程の構成要素を遺伝子に、構成要素の系列を個体に、系列化方略を系列の評価関数に対応させてDGAを基本にした計算的な手法を用いている．また、系列化の対象となる教授・学習過程の構成要素は不変であるため、静的な手法に分類される．

2.2節で述べたように、本研究では対話機構の実装が重要となる．したがって、系列化方略の系列生成への影響を明確にできることが必要となる．一方、提案手法と類似した手法が[岡本 98]において提案されている．この手法は「実際の人間（教師）が教授・学習活動を系列化する場合には、複数の観点からの評価を同時に行いつつ最適な系列を求める」という思考過程をモデル化した手法である．したがって、この手法においては、個体の適合度関数を複数の各系列化方略に対応した評価関数の線形和として構成している．そのため、系列化方略の生成される系列への影響を明確にすることが困難であり、本研究で開発するシステムの対話機構として実装することはできない．

4. システムの概要

システムの概要を図1に示す．システムは、インタフェイス、対話機構、系列生成機構、ルールベース、系列出力機構、活動項目データベースから構成される．ルールベースにはモデルルール（後述）、共通ルール（後述）が格納される．活動項目データベースには、教授・学習活動の形式的表現による具体的活動が格納されている．

システムへの入力の利用者が想定する教授・学習活動の概念的表現と内容的表現であり、出力は教授・学習活動の形式的表現の系列である．入力には「授業形式」「思考形態」「指導様式」「グループ構成」「使用機器」「使用ツール・ソフトウェア」の6情報である．この中で「授業形式」「思考形態」「指導様式」は概念的表現による入力、その他の3情報は内容的表現による入力となる．表1に、システムへの入力属性とその属性値を示す．

ユーザはインタフェースを通して想定する教授・学習

図 1 システム構成図

活動に関する情報を入力する。その情報をもとに系列生成機構はルールベースを参照して遺伝的操作により最適な活動系列を生成する。その後、系列出力機構は活動項目データベースを参照し、生成された系列に具体的な教授・学習活動の割当を行い出力とする。更に、ユーザは対話機構において出力された授業系列を評価・修正し、システムはその情報をもとに再実行を行う。

表 1 システムへの入力属性と属性値

入力属性	属性値
授業形式	《実験》《実習》《講義》《演習》《自習》
思考形式	《演繹的》《帰納的》《発見的》《創作的》《問題解決的》
指導様式	《非常に指示的》《やや指示的》《やや主体的》《非常に主体的》
グループ構成	《個別》《ペア》《小グループ》《一斉》
使用機器	《なし》《プロジェクタ》《PC》《AV 機器》
使用ツール・ソフトウェア	《なし》《Web ブラウザ》《電子メール》《チャット》《ワープロ》《表計算ソフト》

5. 参照モデル

ここでは、生成された系列の評価（適合度の算出）における参照モデルを定義する。

4 章で述べた入力情報のうち、「授業形式」「思考形態」「指導様式」とその属性値は全て概念表現であり、生成された活動系列のこれらの観点に対する適合度の明確な判断基準を設けることは困難である。そこで、本研究では表 1 に示した全ての属性値を形式表現（教授・学習過程の構成要素）の状態遷移図として表現し、生成された系列の評価時（適合度の算出時）における参照モデルとして記述した。形式表現による教授・学習過程の構成要素（以下、構成要素とよぶ）は、多数の授業実践事例 [IPA 98, IPA 99a, IPA 99b]、および授業案作成に関する資料 [岡田 98] より抽出した。表 2 に教授過程の構成要素、表 3 に学習過程の構成要素を示す。例えば、 $T3a$ は「実例を示すことによって指示をする」、 $T1a$ は「具体例を用いて説明する」という解釈になる。 $T3a$ はある教授・学習活動に対する指示を実例によって（具体的にどのよう

な活動をすればよい等）を示すことによって行う。これに対して $T1a$ は知識や事実に関する説明が抽象的・概念的な説明では理解・伝達不可能な場合に、具体例を用いて説明することを意味する。

参照モデルはモデルルールとしてルールベースに、教授・学習過程の構成要素は活動項目データベースに格納されている。

なお、本システムでは内容表現（グループ構成、使用機器、使用ソフトウェア）に関しては参照モデルとして記述していない。これは、内容表現属性に対する属性値は「使用している / していない」等、2 値的であるため内容表現に関する制約条件を系列生成時に加えると、系列生成のため探索空間が極めて狭いものになり、局所的な解に陥る可能性が高まるためである。よって、本システムではユーザが指定した内容表現に関しては「満足するもの / しないもの」を全て出力する。内容表現に関する評価を系列生成に反映させることは今後の課題である。

表 2 教授過程の構成要素

$T1$: 説明	$T1a$: 具体例を示す $T1b$: 知識を示す $T1c$: 目的・観点を示す
$T2$: 発問	$T2a$: 知識に関する出題をする $T2b$: 計算・調査等が必要な出題をする $T2c$: 議論の促進、意見を求める
$T3$: 指示	$T3a$: 実例を示す $T3b$: 簡単な口述による指示を与える
$T4$: 応答	$T4a$: 解答の一例を提示・実行する $T4b$: 方向性を提示・助言する
$T5$: 評価	$T5a$: 想定された手法・結果と合致しているかどうかを評価する $T5b$: 長所・短所を指摘する

表 3 学習過程の構成要素

$S1$: 発表	$S1a$: 回答として知識を示す $S1b$: 学習活動による結果を報告する $S1c$: 意見を述べる
$S2$: 質問	$S2a$: 行動の正否を確認する $S2b$: 教師の発言に対して質問する
$S3$: 反応	$S3a$: ノートにまとめる、PC へ入力する $S3b$: 資料・HP を作成する $S3c$: 資料・Web の調査により知識を収集する $S3d$: 教科書を読む、視聴覚教材を見る $S3e$: 話し合いによる意見を統合、確認する $S3f$: 指示に従う、説明で理解したことを行動にうつす

5.1 授業形式の参照モデル

図 2 に「授業形式」の各属性値の参照モデルを示す。これらのモデルは、教授・学習過程の概念表現を形式表現（構成要素）の系列として記述したものであり、内容表現は含まれない。ただし、モデル中の空白のノードは、空白のノードを始点（終点）として巡回する系列を任意回数繰り返し、その後、空白のノードから巡回しているノード以外のノードへ移動することを意味する。

- a) 授業形式モデル 1:《実験》 教授者が説明した内容を学習者が作成・実行し、その結果を考察する授業として定義した。そのため、学習者の発表、教授者による評価が重視される。
- b) 授業形式モデル 2:《実習》 教授者が説明した内容を学習者が作成・実行し、それに習熟ための作業を繰り返す授業として定義した。そのため《実験》と比較して生徒の活動が重視される。
- c) 授業形式モデル 3:《講義》 教授者が教材を用い学習者に解説・説明を行う授業として定義した。教授者の説明が最も重視され、それに対する学習者の反応も重視される。
- d) 授業形式モデル 4:《演習》 既に学習された知識を用いて作成・実行を行う授業と定義した。基本的には《実習》と同様であるが、教授者の説明に関連する活動が重視されない。
- e) 授業形式モデル 5:《自習》 学習者自らが学習する授業として定義した。学習者の活動のみが行われる系列と、教授者による指導後、学習者のみでの活動が続く系列の 2 種が存在する。

5.2 思考形態の参照モデル

図 3 に「思考形態」の各属性値の参照モデルを示す。授業形式モデル同様、思考形態の概念表現を形式表現の系列で記述したものである。図中の空白のノードの意味は 5.1 節と同様である。

- a) 思考形態モデル 1:《演繹的》 論理的な展開により結論を導く授業として定義した。具体例の提示よりも理論的な説明を優先する活動が重視される。
- b) 思考形態モデル 2:《帰納的》 事実・事例を挙げ、それに対する意見・議論によって結論を出す授業として定義した。具体例を用いた説明・実行を重視し、同時に学習者と教授者の議論が重視される。
- c) 思考形態モデル 3:《発見的》 情報の検索・試行錯誤・討論によって法則・事実を見つけ出す授業として定義した。学習者の主体的な活動が重視され、教授者はその支援を行う。
- d) 思考形態モデル 4:《創作的》 もの（資料・HP 等）を作り、公開・発表する授業として定義した。学習者の活動、学習者の発表、教授者による評価が重視される。
- e) 思考形態モデル 5:《問題解決的》 問題について質問・討論等によって解決する授業として定義した《帰納的》と類似しているが、問題そのものを学習者自身によって調査・作成することも考慮し、学習者の活動が特に重視される。

5.3 指導様式の参照モデル

指導様式の参照モデルは各構成要素の指示的、主体的のレベル（4 段階）による分類表として記述される「授業

図 2 授業形式の参照モデル

形式」「思考形態」の参照モデルが活動の構成要素間の関係をもとに記述されたのに対して、指導様式の参照モデルは各構成要素に対して記述される。したがって、適合度の算出時には該当する活動の構成要素が分類されるレベル（数値）を参照することになる。図 4 に指導様式の参照モデルを示す。縦軸は指示的、主体的のレベルを表す。横軸は特に尺度上の意味はもたない。一般的には教授活動は指示的、学習活動は主体的な活動に分類されるが、学習者の行動に反応する教授活動は主体的、教授者の指示に反応する学習活動は指示的な活動に分類される。

5.4 共通ルール

授業形式、思考形態、指導様式の参照モデルはモデルルールとしてルールベースに格納され、系列の適合度の算出時に参照される。ここでは、さらに、モデルルールの細部を補完するために共通ルールを定義する。共通ルールは教授・学習活動における基本的な活動（質問、回答、

図 7 個体例

6.1 遺伝的操作

§1 初期集団の生成

活動構成要素データベースからランダムに選ばれた活動構成要素を遺伝子とし、個体長 20 の個体を複数生成し初期集団とする。その後、適合度の評価関数と同数の島に分割する（本システムでは島の数、すなわち評価の観点（評価関数）の数は 3 である）。

§2 評価

個体の評価は、評価の観点に応じて参照モデルを参照することにより行う。すなわち、評価の対象となる個体が参照モデル（モデルルール、共通ルール）に記述された構成要素や部分系列^{*5}をどの程度満足しているかによって評価結果を数値化する。評価の手順（図 8 参照）は次のとおりである。ただし、紙面の都合上、個体数 10 の図を用いて説明する。

Step 1 系列を構成する構成要素の中で参照モデルに記述されている構成要素を検索。

Step2 Step 1 で検索された構成要素を先頭にした任意長の部分系列の中で、モデルルールに記述されている部分系列に一致するものを検索（検索された部分系列には「L」のラベルを付与）。

Step 3 モデルルールで検索されなかった場合には Step 1, Step 2 と同様の手続きで共通ルールを用いて検索を実行（検索された部分系列には「C」のラベルを付与）。

Step 4 Step 2, Step 3 で検索されない部分系列は、存在しない教授・学習活動と判断し「D」のラベルを付与。

Step 5 Step 4 までにラベル付けされた部分系列で「D」を含まない連続した部分系列を結合し連続系列を構成（図 8 参照）。

Step 6 各参照モデルの「L」の番号（構成要素間の先頭「S」に近い順）で Step 5 で得られた連続系列を整理。

Step 7 Step 6 で得られた系列の適合度を評価関数を用いて算出。

以下に、各観点における評価関数の定義を述べる。

A) 観点 1: 「授業形式」 授業形式の参照モデルおよび共通ルールを用いて評価を行う。系列の評価値は式

【修正前の個体】

【修正後の個体】

図 8 遺伝子の修正

(1) を用いて算出される。

$$(\text{評価値}) = \frac{\alpha(L_{num}) + \beta(C_{num})}{(\text{系列長}) + 1} \quad ((1))$$

ただし、 α, β は $0 < \alpha, \beta < 1$ を満たす定数である。 α, β の値はモデルルール、共通ルールのどちらを重視するかによって経験的もしくは目的的に決定する。 L_{num} はモデルルール内で検索された部分系列の数、 C_{num} は共通ルール内で検索された部分系列の数を表す。たとえば、図 8 の修正後の系列（個体）の評価値は、 $\alpha = 0.7, \beta = 0.3$ の場合、式 (1) に代入して、

$$(\text{評価値}) = \frac{0.7 * 6 + 0.3 * 3}{10 + 1} = 0.463$$

となる。

B) 観点 2: 「思考形態」 思考形態の参照モデルおよび共通ルールを用いて評価を行う。系列の評価値は式 (2) で算出される。

$$(\text{評価値}) = \frac{\alpha(T_{num}) + \beta(C_{num})}{(\text{系列長}) + 1} \quad ((2))$$

ただし、 α, β は $0 < \alpha, \beta < 1$ を満たす定数である。 T_{num} はモデルルール内で検索された部分系列の数、 C_{num} は共通ルール内で検索された部分系列の数を表す。

C) 観点 3 「指導様式」 指導様式の参照モデルおよび共通ルールを用いて評価を行う。指導様式の評価値は

*5 本システムでは部分系列の長さを 2 に固定しているため、部分系列とは隣接する 2 構成要素間の関係意味する。

式 (3) を用いて算出される .

$$(\text{評価値}) = \frac{\alpha(C_{num}) + \beta(\gamma \sum_{l=1}^4 T_l + \delta \sum_{l=1}^4 S_l)}{(\text{系列長}) + 1} \quad ((3))$$

ただし, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は $0 < \alpha, \beta < 1$, $0 < \gamma, \delta < 1$ を満たす定数である. l は指導形式の参照モデルにおけるレベル, T_l は指示的側のレベル l の構成要素数, S_l は主体的側のレベル l の構成要素数を表す.

§3 交叉

交叉では, 優良な部分系列が壊される可能性を低くすることを目的として, 以下の手順によって行う.

- (1) 集団の中から式 (4) を用いて適応度比例戦略により 2 個の親系列 (個体) を選択する. ただし, $Select_i$ は系列 i の選択確率, f_i は系列 i の評価値を表す.

$$Select(i) = \frac{f_i^2}{\sum_i f_i^2} \quad ((4))$$

- (2) (1) で選択された 2 個の親系列の構成要素間に交叉確率 p_c を設定する. ただし, $0 < p_c(L) < p_c(C) < p_c(D) < 1$ である. ここで, $p_c(L)$ は評価の段階で L のラベルが付与された構成要素間で交叉が起きる確率, $p_c(C)$ は C のラベルが付与された構成要素間で交叉が起きる確率, $p_c(D)$ は D のラベルが付与された構成要素間で交叉が起きる確率を表す. すなわち, 優良な系列の部分系列が壊されないよう, モデルルールや共通ルール内で検索された構成要素間での交叉が起こる確率を低く設定する.

- (3) 式 (5) の確率に従い 2 箇所の交叉点を選択する.

$$p_c(C_r) = p_c(A_r) * p_c(B_r) \quad (r = 1, 2, \dots, 21) \quad ((5))$$

ただし, $p_c(C_r)$ は構成要素間 r での交叉点選択確率, $p_c(A_r)$, $p_c(B_r)$ はそれぞれ親系列 A , 親系列 B の構成要素間 r での交叉が起きる確率 ($p_c(L)$, $p_c(C)$, $p_c(D)$ のいずれか) を表す.

- (4) (3) で選択された 2 箇所の交叉点を用い 2 点交叉を行う.
- (5) 2 点交叉により生成された 2 個の子系列, 及び親系列の 4 系列の中で, 最も評価値の低い 1 系列を淘汰し, 残りの 3 系列を新たな系列集団に加える.
- (6) (1) ~ (5) を, 次の世代を形成する系列 (個体) 数になるまで繰り返す.

手順 (1) において, 遺伝的操作 (選択) において適応度比例戦略を行っており, 各系列の適応度に比例した確率で子系列を残すことができる. また, 手順 (3) により, 交叉点は最も関連性の引低い構成要素間が選択され, 交叉によって優良な部分系列 (構成要素間の関係) が壊される可能性が低くなる.

§4 突然変異

突然変異でも, 優良な部分系列が壊される可能性を低くすることを目的として, 次の手順で行う.

- (1) 各系列の構成要素間に突然変異確率 p_m を設定する. ただし, $0 < p_m(L) < p_m(C) < p_m(D) < 1$ である. ここで, $p_m(L)$ は評価の段階で L のラベルが付与された構成要素間で突然変異が起こる確率, $p_m(C)$ は C のラベルが付与された構成要素間で突然変異が起こる確率, $p_m(D)$ は D のラベルが付与された構成要素間で突然変異が起こる確率を表す. すなわち, 優良な部分系列が壊されないよう, モデルルールや共通ルール内で検索された構成要素間での突然変異が起こる確率を低く設定する.
- (2) 式 (6) で得られる確率で構成要素 (遺伝子) の突然変異を行う.

$$p_m(j) = p_m(j-1, j) * p_m(j, j+1) \quad ((6))$$

ただし, $j = 1, 2, \dots, 20$ で, $p_m(j)$ は j 番目の構成要素での突然変異確率, $p_m(j, j+1)$ は j 番目と $j+1$ 番目の構成要素間で突然変異が起こる確率 ($p_m(L)$, $p_m(C)$, $p_m(D)$ のいずれか) を表す.

以上の手順により, 前後の構成要素との関係の強い構成要素 (遺伝子) が突然変異によって壊される確率は低くなる.

§5 移住

数世代ごとに, 各島ごとに設定された移住率に従い島間での系列群 (個体群) の移住を行う. 移住する系列群は, 各島において §3 の手順 (1) と同様に適応度比例戦略によって選択される. これにより, 各島内で高い評価値をもつ系列群が移住することになり, 各評価観点での適合度の高い系列群は他の観点での評価も高められ, 最終的に全ての評価観点で高い評価値をもつ系列群の生成が期待される. また, 移住する系列群の選択と同時に移住する先の島を決定する. 本システムにおいては各島の系列数 (個体数) は固定してるため, 他の島からの移住に伴い移住先の系列数を減らす必要がある. そこで, 移住先の各島においては式 (7) で与えられる確率に従い評価値の低い系列の淘汰を行う.

$$Select(i) = \frac{1 - f_i^2}{\sum_i (1 - f_i^2)} \quad ((7))$$

ただし, $Select(i)$ は系列 i が選択される確率, f_i は系列 i の評価値を表す.

7. 対話機構

教授・学習活動系列生成システムにおけるインタフェース, および対話機構について実例を用いて述べる.

図 9 入力インタフェース

7.1 入力インターフェイス

図 9 に本システムの入力インタフェースを示す。ユーザは表 1 の入力情報、初期集団個体数、世代数の入力を行い系列化を実行する。図 9 では「授業形式＝《実験》」「思考形態＝《創作的》」「指導様式＝《やや主体的》」(以上、概念表現)、「グループ構成＝《小グループ》」「使用機器＝《PC》」「使用ソフトウェア・ツール＝《Web ブラウザ》」(以上、内容表現)として入力し、初期集団個体数 400、世代数 100 として実行したものである。右下の window は実行経過を示している。

7.2 出力インタフェース

本システムの出力インタフェースとユーザとの対話について述べる。

§1 系列の出力

図 10 に出力結果の例を示す。左の window に生成された系列が出力され、同時に個体番号、評価値、染色体(使用された構成要素)、活動関係(構成要素の系列)が出力される。個体番号は評価値によってソートされた番号である。図 10 は評価観点として「授業形式」を選択した場合の出力結果である。「授業形式」の観点での評価値は 0.958 であり極めて高い評価値の系列が生成されていることがわかる。この場合の「思考形態」の観点での評価値は 0.952、「指導様式」の観点での評価値は 0.749 である(他の観点での評価値は「全体評価」で閲覧することが可能である)。

ここで、具体的に生成された系列の主観的評価を行う。生成された系列は、教授者の説明から始まり、学習者の個人からの質疑応答、グループでの話し合い、話し合いの報告、教授者からの指摘、再びグループでの話し合い、話し合いの報告、という流れをもっており、《実験》《創作的》《主体的》という教授・学習活動が概ね表現されていると考えられる。また、生成された系列を「授業形式」

図 10 評価観点を「授業形式」に特化した場合の出力

図 11 「授業形式」の参照モデル《実験》上の部分系列

の参照モデル《実験》上に部分系列として表したものを図 11 に示す。図中の実線は出力系列に含まれている部分系列(重複を含む)、点線は出力系列に含まれない部分系列を表す。その結果、出力系列は参照モデルの殆どの部分を含んでいることがわかる。ただし、ここでは共通ルールを考慮して図示することは不可能であるため、評価値 0.958 は図中の実線のみから得られるものではないことに注意されたい。

§2 閲覧の支援

ユーザは個体番号を変化させたり、左下の window でユーザの評価観点(島)を切り替えることによって、様々な評価観点により生成された系列を閲覧することができる。実際、図 10 において評価観点(島)を「思考形態」に切り替えた場合、評価値 0.952 の系列が出力された。この場合の「授業形式」の観点での評価値は 0.925、「指導様式」の観点での評価値は 0.737 であり「思考形態」に関する評価値が最も高まるような系列化方略が反映されていることが示唆される。また、生成された系列を「思考形態」の参照モデル《創作的》上に部分系列として表したものを図 12 に示す。出力系列は参照モデルの殆どの部分を含んでいることがわかる。

さらに本システムでは、閲覧を支援するために以下の機能を実装している。

個体の保存 ユーザの満足度の高い活動系列が出力された場合、その情報を保存することができる。この情報はシステム内に保存され随時閲覧することがで

図 12 「思考形態」の参照モデル《創作的》上の部分系列

図 13 観点の変更のインタフェース

きる。

系列一覧の表示 各島内で生成された系列群を一覧することができる。評価値の分布の確認、特殊な個体の検索を行うことができる。

全体評価 出力されている情報は 1 つの島における観点によるものである。全体評価を行うことで、全ての評価観点を反映させた場合の情報に切り替えることができる。

以上の機能を用いて系列の閲覧を行い、満足度の高い系列が得られなかった場合は対話機構を用いて、更に満足度の高い系列の生成を対話的に実行する。

§ 3 対話機構の内容

本システムの対話機構では 2 つの機能が実装されている。まず「観点の重要度の決定」である。初期入力情報によって出力された各島における個体は、それらの観点到特化されている。この特化された出力を基準として、ユーザはそれぞれの観点の重要度を図 13 を用いて決定する。その決定により、システムは移住率を変更し再実行を行う。

もう 1 つは「個体の修正」である。ユーザは満足度の低い系列に対して修正を加えることができる。例えば、図 15 のように出力された系列に対してユーザが構成要素 E を構成要素 A の直後に移動した場合、システム、構成要素間 (A, E) , (E, B) , (D, F) の関係を強化するようルールベース内に修正を加える。ユーザは図 14 のインタフェースを用いて系列の修正を行う。

8. 評価実験

本システムにおいて用いた遺伝的手法の有効性、及び生成された授業系列の妥当性の検証を行った。

8.1 遺伝的手法の評価

本システムの系列生成機構において採用した遺伝的手法の有効性を数値実験によって検証した。

図 14 個体の修正のためのインタフェース

図 15 ユーザによる修正

§ 1 移住の効果

各島における個体数が少ない場合の、解の早期収束の移住による回避についての検証を行った。遺伝的パラメータを表 4 のように設定し、提案手法と単純遺伝的アルゴリズム (Simple Genetic Algorithm: SGA) との結果の比較を行った。移住による効果を明確にするために突然変異確率は 0.0 に設定した。これは突然変異による個体群の変化が移住による変化と類似することがあるとの知見を経験的に得ているためである。初期の入力情報は各属性値を《実験》《創作的》《やや主体的》(SGA は《実験》のみ) とし、完全に収束するまで世代交代を行った。DGA の評価値は 3 種類 (授業形式, 思考形態, 指導様式) の各観点に関する評価値, SGA は「授業形式」のみに関する評価値を用いた。SGA と DGA の授業形式《実験》の目的関数を持つ島における評価値の推移を図 16 に示す。

SGA は 13 世代で完全に収束し個体全てが同評価値となった。これに対して DGA は 5 世代で収束しているが、10 世代目で移住を行ったためその直後に評価値が変化している。個体数 50, 移住率 0.2 であるため、10 個体が移住しこの 10 個体が適応度比例戦略で淘汰されない場合は平均評価値が再変化を起こす。5 世代毎に移住が行われるため、15, 20 世代においても急激に変化している。

表 4 遺伝的パラメタ (移住実験時)

初期集団個体数	150 ("島" 数 3 であるため, 各 "島" 50 個体)
交叉率	0.6
突然変異率	0.0
移住間隔	5 世代毎
移住率	0.2

図 16 移住実験の結果

また, 5 世代, 25 世代においても移住は行われているが, 5 世代においては適応度比例戦略で移住先の島内で評価値の高かった系列群が淘汰されたために平均評価値に大きな変化が認められなかった. 25 世代においては類似した系列群が移住したため平均評価値の大きな変化は認められなかった. なお, DGA の場合はその後も変化繰り返しながら, 75 世代において完全に収束した. 以上より, DGA は SGA と比較して世代を早期収束を回避し, 世代毎に評価値の高い個体群を得ることが可能であることがわかる. これは DGA においては各島でのビルディングブロックが移住のたびに結合し, 総合的に評価値の高い系列群を生成していることを示している.

図 16 では, SGA での結果が世代を重ねるにつれて (第 5 世代まで) 評価値が低下している. これは, 偶然に初期集団の平均評価値が高く, その後の遺伝子操作で, 初期集団よりも評価値の高い系列が生成されなかったものと考えられる. その原因は, DGA の移住の効果を明確にするために, DGA, SGA とともに突然変異確率を 0.0 に設定しているため, 劇的な変化を遺伝子集団に与えることができなかったことが原因であると考えられる.

§ 2 交叉点選択確率の効果

本システムに実装した交叉点の選択確率設定の有効性について検証した. 交叉点をランダムに設定する交叉手法を単純交叉と呼び, 交叉点を確率的に選択する本手法を確率交叉と呼ぶことにする. この両者による結果を比較することにより, 検証を行った. 本実験に用いた遺伝的パラメータを表 4 に示した移住実験時のものと同様である. なお, 結果は全て 12 回の試行での最高値と最低値を除いた 10 回の試行の平均値を用いた. 授業形式に関する実験結果を図 17 に示す. 確率交叉は単純交叉を平均的に上回っており, 交叉点を選択する本手法の有効性が確認された. 紙面の都合上, 割愛するが思考形態, 指導

図 17 確率交叉実験結果 (授業形式)

様式に関しても同様の結果が得られた.

8・2 システム評価

システム全体の評価, 特に数値実験では判断不可な対話機構部分に対する評価及び考察について述べる.

§ 1 実験手順

本システムを 17 名の被験者 (教員養成系大学学部生 10 名, 情報系大学院生 3 名, 教員養成系教員 4 名) に使用を求め, 5 段階の評定尺度法 (5 が最も評価が高い) によるアンケート調査を行った. アンケート項目を表 5 に, 実験時の遺伝パラメータを表 6 に示す. 実験に際しシステムの機能が有効に機能するように被験者には次の条件を与えた.

条件 1 初期集団個体数は 100 体以上, 世代数は 20 世代以上に設定すること.

条件 2 再実行においては「島評価 (10 段階)」「個体の修正」を必ず行うこと.

表 5 アンケート項目

《再実行前》	
①	授業として自然な流れが出力されている.
②	入力情報がそれぞれの「島」に反映されている. (ア) 授業形式 (イ) 思考形態 (ウ) 指導様式
③	自分が想定していた系列に近い系列が出力されている.
《再実行後》	
④	「島」の評価をそれぞれ変化させたときそれぞれの「島」に変化が反映された. (ア) 授業形式 (イ) 思考形態 (ウ) 指導様式
⑤	施した系列への修正が再実行後の個体に反映された.
《総合》	
⑥	再実行により自分が想定していた系列により近い系列が得られた.
⑦	出力を見ることで自分の想定する授業が明確になった.
⑧	このシステムは実際の授業案作成に役立つ.
⑨	個体番号の順番と評価値の大小関係は妥当である.

表 6 GA パラメタ (アンケート時)

交叉率	0.6	
突然変異率	0.02 (活動関係によって 0.005 ~ 0.08)	
	再実行前	再実行後
移住間隔	5 世代毎	3 世代毎
移住率	0.2	0 ~ 0.4

§ 2 実験結果

アンケート結果を図 18 に示す.

図 18 アンケート結果

アンケート結果より以下のことが考察される．

- 質問①に対して約 80%が肯定的である．このことからシステムは一般的な教授・学習過程の流れを反映した系列を生成していると考えられる．
- 質問③に対して約 20%が肯定的，約 40%が否定的である．しかし，質問①に対して約 80%が肯定的であること，質問②に対しては評価が中間的であることから，移住による島ごとでの遺伝的操作が有効に機能していると考えられる．すなわち，DGA により複数の系列化戦略を各島に特化したことにより，それらの影響が明確に示されていることがわかる．

また，質問②，③に対して否定的であった被験者が質問④，⑤，⑥に対して肯定的である傾向がみられた．このことは，ユーザによる修正がシステム内に有効に機能し，再実行により，より満足度の高い系列が生成されたことを示唆している．さらに，質問④に対して肯定的である被験者は，質問②に対しても肯定的である傾向がみられた．このことから「島評価」により被験者の系列生成時の意図が反映されていることを示唆している．

以上のように，システムに実装された機能は有効に機能していると考えられる．しかし，次のような問題点も示唆される．

- 質問⑤に対しては評価が中間的である．これは「個体の修正」はある程度多数の修正を行わなければ反映されないことに起因すると考えられる．ユーザの修正によって新規にルールが追加されるが，これと比較してモデルルールや共有ルール数は多数であるため，追加ルール数が少ないと，再実行後の個体に反映される可能性が低くなる．追加ルールとルールベースに蓄積されたルールとの関連付けに関する考察が必要である．
- 評価関数，参照モデルの妥当性に関しては今回の評価実験では検証することができなかった．これに関

しては継続的な検討が必要である．

9. まとめと今後の課題

本研究では，教授・学習過程の概念表現を学習活動の構成要素の系列として形式表現に変換するシステムの開発を行った．系列の生成には分散遺伝的アルゴリズムを基本にした系列化手法を実装した．特に今回は，高等学校普通科新教科「情報」における教授・学習過程を想定してモデルを記述した．

各種実験を通して，システムの有効性，妥当性の検証を行った．その結果，実装した機能は有効に機能しているものの，モデルの記述，評価関数の設定に関しては継続的な検討が必要であると考えられる．特に，今回作成したモデルは，複数の既存資料より導出したものであり，実験などによって妥当性が示されたものではない．よって，現在ある授業モデルの妥当性の評価，及び利用者の意見・修正を学習し，モデルの評価・修正を行うシステムの開発は今後の課題である．また，今回のシステムでは内容表現（使用ツール等）に関する参照モデルを記述していない．よって，内容表現に関する評価を系列化に反映させることも発展的な課題である．さらに，今回のシステムは各構成要素に対して対応する項目をテキスト文で割り当てているが，視覚的に表現するために各構成要素に対応する動画像を割り当てることにより，様々な授業の動画系列を作成するシステムへの発展も考えられる．また，本研究では個体長は固定長としている個体長を可変にし，長さのことは教授・学習過程を扱えるようなシステムを拡張することは興味深い．

さて，本研究で用いた課題系列化手法は数学的モデルに基づく系列化手法に分類される．系列化手法は授業設計のみならず，教育システムにおける適応性を実現する機能として重要な理論・技術である．数学モデルによる手法は統計的手法を理論的基盤におくことが多く，普遍性の高い実装方法が期待される．数学モデルに基づく手法は知識モデルに基づく手法と頻繁に対比される．双方の特徴，特性を明らかにし共通性，相補性を見出すこともさらに柔軟な系列化手法を実現する上で重要な課題である．

謝 辞

システムの評価実験にご協力頂いた，東京学芸大学教育学部，山口大学教育学部の皆様に感謝いたします．

◇ 参 考 文 献 ◇

- [赤堀 92] 赤堀侃司: あいまいな教授方略を反映した学習課題系列の生成, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-A, No.2, pp.382-389 (1992).
- [Fonseca 93] Fonseca, C.M. and Fleming, P.J.: *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generation*, Proc. of the Fifth International

- Conference on Genetic Algorithms, pp.416-423 (1993).
- [Gagne 79] Gagne R.M. and Briggs L.J.: *Principles of Instructional Design*, Holt Rinehart and Winston, New York (1979).
- [Goldberg 89] Goldberg, D.E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley (1989).
- [廣安 99] 廣安知之, 三木光範, 渡邊真也: 多目的最適化のための分散遺伝的アルゴリズムにおける広域ランドスケープ形成スキーム, 情報処理学会研究報告, 数理モデル化と問題解決 23-2, pp.7-12 (1999).
- [池田 94] 池田稔, 酒井豊: 教育実習総説, 学文社 (1994).
- [井上 99] 井上久祥, 岡本敏雄: 「情報教育」のための授業実践事例ベースシステムの研究～事例修正機構の実装～, 信学技報, ET99-103, pp.59-66 (1999).
- [IPA 98] 情報処理振興事業協会, 財団法人コンピュータ教育開発センター: インターネットを利用した授業実践事例集, (1998).
- [IPA 99a] 情報処理振興事業協会, 財団法人コンピュータ教育開発センター: インターネット教育利用の新しい道, (1999).
- [IPA 99b] 情報処理振興事業協会, 財団法人コンピュータ教育開発センター: インターネットを利用した授業実践事例集 (1999).
- [北野 93] 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993).
- [三木 98] 三木光範, 畠中一幸: 並列分散 GA による計算時間の短縮と解の高品質化, JSME 最適化シンポジウム講演論文集 (1998).
- [三木 99] 三木光範, 廣安知之, 金子美華: 分散 GA における探索能力, 第 13 回人工知能学会全国大会講演論文集, pp.240-241 (1999).
- [沼野 76] 沼野一男: 授業の設計入門 (1976).
- [岡田 98] 教育実習の理論と実践, 文化書房博文社 (1998).
- [岡本 98] 岡本敏雄, 松本剛: 遺伝的アルゴリズムを用いた教授項目系列の生成, 人工知能学会誌, Vol.13, No.1, pp.91-99 (1998).
- [Reigeluth 78] Reigeluth C.M., Merrill M.D. and Bunderson C.V.: *The Structure of Subject Matter Content and Its Instructional Design Implications*, Instructional Science, 7 (1978).
- [Schaffer 85] Schaffer, J.D.: *Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*, Proc. of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, pp.93-100 (1985).
- [関 00] 関一也, 松居辰則, 岡本敏雄: School Based Curriculumに基づく遠隔教師研修システムの構築, 教育システム情報学会誌, Vol.17, No.3, pp.307-318 (2000).
- [竹谷 92] 竹谷誠: 関連測度をもつ課題の系列化法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-A, No.3, pp.624-632 (1992).
- [豊田 99] 豊田規人, 三枝武男: 重み付きグラフを用いたクラスタ分析に基づく無矛盾な学習項目の系列化法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D2, No.3, pp.543-555 (1999).

〔担当委員: 平嶋 宗〕

2001 年 12 月 1 日 受理

著者紹介

松居 辰則 (正会員)

1994 年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。早稲田大学理工学部助手, 東京学芸大学助手を経て, 1997 年より電気通信大学大学院情報システム学研究科助教授。教育情報解析, 教育支援システム, 教育におけるデータマイニング等の研究に従事。博士(理学)。人工知能学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会, 日本教育工学会(評議員), IEEE, AACE 等会員。

石川 智剛

2001 年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程修了。現在, 株式会社村田製作所勤務, 回路モジュール商品事業部において PDC 用 RF モジュールの開発・設計を担当。在学中は分散遺伝的アルゴリズム, 教科「情報」の授業設計・教材設計に関する調査・研究に従事。

岡本 敏雄 (正会員)

1975 年東京学芸大学大学院修了。金沢工業大学, 東京学芸大学を経て, 1992 年より電気通信大学大学院情報システム学研究科教授。分散協調学習環境, 知的 CAI, 情報教育カリキュラム開発, e-learning, 標準化の研究に従事。工学博士(東京工業大学), 人工知能学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会(会長), 日本教育工学会(理事), AAAI 等会員。