

オントロジーアウェアな学習コンテンツ設計環境

林 雄介[†] 山崎 龍太郎[†]
池田 満[†] 溝口 理一郎[†]

学習コンテンツの設計はその対象が抽象的であり、それを適切に表現する枠組みを設定することが難しいため、物理的な実体を持つものの設計行為と比べて相対的に支援が難しい。本研究ではこのような問題に対して、学習コンテンツ設計に関する抽象概念をオントロジー化し、それを基礎とした設計支援環境 *iDesigner* を開発した。*iDesigner* では、以下の 2 点を実現している。1) 抽象的設計物の設計にかかわる思考を深めさせるために、従来は暗黙的であった作業結果を外化することを設計者に促す。2) 設計の中間成果物である概念レベルの学習コンテンツモデルにおいて、学習者の理解変化のシミュレーションを行うことによって、設計者がコンテンツの妥当性を検証するための基礎情報を提供する。

An Ontology-aware Design Environment for Learning Contents

YUSUKE HAYASHI,[†] RYUTARO YAMASAKI,[†] MITSURU IKEDA[†]
and RIICHIRO MIZOGUCHI[†]

It is relatively more difficult to support designing learning contents than designing physical object. The major problem is that we don't have a framework to describe the abstract design object appropriately. To solve the problem, we define an ontology for learning contents design and have designed and developed a design support environment: *iDesigner* based on it. Laying the ontology as a basis for functionalities of *iDesigner*, following two functionalities are implemented. 1) Providing designers with an environment, to facilitate designer's externalizing design issues that tend to be implicit. 2) Simulating change of understanding status of supposed learners to provide designers with information to verify the learning content.

1. はじめに

学習コンテンツの設計者は、学習コンテンツを介して行われる学習プロセスを設計している。コンテンツの利用者となる学習者の知識状態や能力を想定し、学習目的を考慮に入れて、学習者が学習目的を達成するまでの理想とする学習プロセスを頭に描き、それを学習コンテンツとして具体化する。我々はこの過程を以下の 4 つのサブタスクからなるものにとらえている。学習ニーズ分析 どのような学習者に何を学習させる必要があるかを特定する。学習プロセス設計 学習ニーズを満たす学習プロセスを構成する。学習コンテンツ製作 学習オブジェクト(学習素材)を制御構造(コースウェアなど)上に配列して学習コンテンツとして具体化する。

学習オブジェクト製作 メディア上に学習内容を表現する。

Authorware¹⁾ に代表される商用オーサリングツールの多くにおいては、デジタルメディアの利点を活かした学習素材・学習コンテンツの製作に有用なメディア編集機能を中心とした構成になっている。学習ニーズ分析・学習プロセス設計については、ツール上での作業から除外されているか、簡易メモ機能など補助的機能を提供しているにすぎない。そのような中で、Murray²⁾ が述べているように、教育を実現するための知識を適切に分解・抽出することが学習コンテンツを知的に運用するシステムを構築するために必要であり、そのための設計支援を行うシステムの重要性が高まっている。

学習ニーズ分析・学習プロセス設計がツール上での作業から除外されがちなことの主な理由としては、設計対象が抽象的で、それを適切に表現する枠組みを想定できないことが第 1 にあげられる。実体が抽象的で表現の分節記号化が難しいために、学習を対象とする

[†] 大阪大学産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research
(ISIR), Osaka University

設計行為は、物理的な実体を持つものの設計行為と比べて相対的に支援が難しいといえる。

本研究では学習プロセス設計と学習コンテンツ制作を主な対象として、学習コンテンツ設計環境の設計・開発を行った。特に学習プロセス設計のためのオントロジーを理解したうえでユーザの知的作業を支援する能力(オントロジーウェアネス)を備えたツールの実現を目指した。なお、学習ニーズ分析については本研究とは別プロジェクトで研究を進めており³⁾、将来的に統合する予定である。また、学習オブジェクト製作に関しては既存のメディア編集ツールを利用して作成した学習オブジェクトをHTML, PDF等の汎用フォーマットで設計環境にインポートすることになっている。

オントロジーウェアな設計環境の開発にあたって、次の2つの支援の実現を主要な目的とした。

(1) 設計意図のモデル化

設計者が設計時の意図をモデル化し、学習コンテンツと一緒に記録できるようにすること

(2) 設計意図の妥当性の検証

設計意図が適切に学習コンテンツに反映されているかを設計者が確認し、修正できるようにすること

我々は先行研究において電力系統事故復旧操作訓練システム構築用オーサリングツールSmartTrainer/ATを開発した⁴⁾。その研究においては、電力系統事故復旧操作の訓練システムを対象を特化したオントロジーウェアな設計環境を開発した。本研究では、この開発で得られた知見を出発点として、より汎用的な枠組みとして学習コンテンツ設計支援環境*iDesigner*の開発を進めてきた。

SmartTrainer/ATの開発をふまえて、*iDesigner*の設計・開発にあたって設定した主要な目的は以下の3点である。

A. 学習コンテンツ設計タスクオントロジーの一般化

SmartTrainer/ATでは具体的なニーズをふまえて特定業務のオーサリング支援ツールの構築を目指したが、本研究では対象に独立で教育・訓練に一般的な概念レベルでオントロジーを構築し、それを基盤とした汎用的な設計環境を開発する。

B. 構造化プロセスと系列化プロセスの連携支援

SmartTrainer/ATでは学習コンテンツの制御構造を設計する系列化プロセスの支援を実現した。本研究では系列化プロセスに加えて、それに先立って設計者が学習の対象を整理するプロセスとして、学習内容に関する体系的なモデルである学

習項目ネットワークを構築するための構造化プロセスを導入する。そして、構造化プロセスの成果物である学習項目ネットワークを参照しながら系列化することの支援機能を開発する。

C. 概念レベルシミュレーションの導入

学習コンテンツの妥当性を検証するために、学習の進行を概念レベルで実行して可視化する機能として概念レベルシミュレーションを新たに導入する。

以下、2章では、A.について本研究で一般化を目指して構築したオントロジーの概要を述べる。続く3章では、B., C.について本研究で設計・開発した学習コンテンツ設計支援環境*iDesigner*の支援機能について述べ、4章では、C.の概念レベルシミュレーションについてその内部処理の詳細を述べる。

2. 学習コンテンツのモデル

抽象的な概念世界での思考を対象としてユーザの作業を支援するツールの設計・開発にあたっては、対象に関する概念体系を明確にすることが重要である。ツールが前提とする概念体系は近似的であることは避けられないが、その近似の度合いを高め、ユーザにとって親和性の高い情報処理機能を実現することが望まれる。本研究では、この問題に対して1章のA.で述べたようにオントロジー工学的手法^{5)~7)}を採用し、学習内容と学習プロセスに関する概念をオントロジー化することによって解決を目指している。有用度の高いオントロジーを構築するためには、対象の分析、オントロジーの構築・運用を通じた蓄積・洗練サイクルを利用者を増やしながら繰り返す必要がある。このサイクルにおいてはオントロジーの蓄積・洗練に頑強な設計環境の開発と汎用性を考慮した核となる上流オントロジーの構築が出発点となる。以下で示すオントロジーはSmartTrainer/ATの開発で得られた知見を一般化し、オントロジーの蓄積・洗練サイクルの出発点としたものであり、本研究で開発した*iDesigner*はSmartTrainer/ATを汎化し、オントロジーの蓄積・洗練プロセスに有用な機能を強化したものである。なお、洗練サイクルの遂行、およびその結果として構築されるオントロジーの有用性の確認は今後の課題と考えている。

2.1 学習コンテンツの設計タスクオントロジー

*iDesigner*は特定の学習内容に依存しない汎用ツールで、そのデータモデルの基礎となるオントロジーは学習コンテンツ設計にかかわるタスク概念をドメインモデル(学習の対象世界)に独立なレベルでとらえた

もの(タスクオントロジー)になっている。以下に、iDesignerにデータモデルとして実装されたオントロジーの上位概念を簡単に説明する。各概念の定義や概念階層の詳細については別稿⁸⁾で述べている。

学習項目 知識・スキル・コンピテンシーなどの学習単位を表す。

学習項目リンク 学習項目間の先行関係，一般化関係などの関係を表す。

学習項目ネットワーク 学習項目ノードを学習項目リンクで結合したネットワーク構造で学習内容を表す。

学習支援システム目的 システムの行為の意図を表す概念であり，以下に示す教授・学習目的，分類目的に分類される。

教授・学習目的 システムの教授行為に期待する学習者の状態の変化(知識獲得・スキル修得・コンピテンシー育成など)を表す。

分類目的 システムによる学習者の分類行為において，学習者をどのような状態として明確化しようとしているかを表す。

目的階層 ある具体的な学習コンテンツに込められた教育的意図の階層構造を表す。学習支援システム目的をノードとし，上位から下位へ学習コンテンツの目的を段階的に詳細化する構造となっている。

教授行為 学習者に対するシステムの振舞いを表す。

学習コンテンツ制御構造 学習オブジェクトを配列した構造を表す。コースウェアなど。

学習オブジェクト 学習者に提示される電子化オブジェクトを表す。

学習者モデル 学習者の理解状態を表すモデル。

学習項目はタスク概念の中で，ドメイン概念との接点として働いて学習内容をモデル化するための特異な役割を担っている。iDesignerでの実装上は，学習項目はドメインモデル中の概念へのポインタを格納するデータとして具体化されている。

このオントロジーで定義した概念とそれらの関係を図1に示すようなオントロジーエディタ(OE⁹⁾上で記述している。以下，2.2，2.3節ではこのオントロジーに基づく学習内容と学習プロセスのモデルの概要を説明する。

2.2 学習内容のモデル

学習内容のモデルはドメインモデルを学習の観点から再組織化したものである。学習の観点から知識・スキルの粒度を考慮して設定される学習項目をノードとし，学習項目間の関係(先行関係など)を学習項目リンクとする学習項目ネットワークとして表現される。表1に学習項目ネットワークの構成概念をまとめて

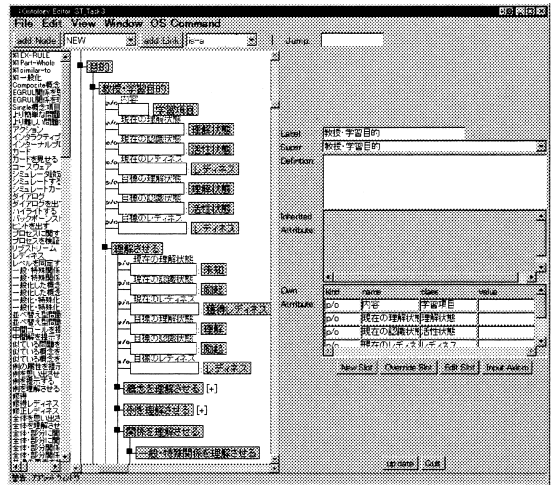


図1 オントロジーエディタ
Fig.1 Ontology Editor.

表1 学習項目とリンクの種類
Table 1 Learning items and links.

| | |
|----------------|-------------------------------|
| 学習項目 | |
| Single 学習項目 | 学習内容の基本単位を表す |
| Composite 学習項目 | あるコンテキストで関連する学習項目をまとめる学習内容を表す |
| 学習項目リンク | |
| 一般化関係 | 一般化・特殊化の関係 |
| 全体・部分関係 | 全体と部分の関係 |
| 先行関係 | 系列化の際の順序関係 |
| EGRUL 関係 | 例と概念・法則などの関係 |
| 類似関係 | 類似性を表す関係 |
| 集積化関係 | Composite 学習項目とその要素との関係 |

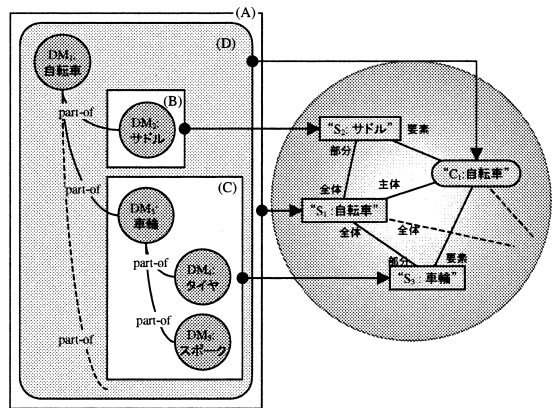


図2 学習項目ネットワーク
Fig.2 Learning item network.

いる。

図2の左側はドメインモデルを，右側は対応する学習項目ネットワークを示している。ドメインモデルでは“DM₁: 自転車”が“DM₂: サドル”，“DM₃: 車輪”を部分に持つことなど，ドメインの概念的な構成を示している。これを学習の観点から組織化したのが

学習項目ネットワークで、たとえば、図 2 (C) の領域に含まれる 3 つのドメイン概念が学習項目 S_3 としてモデル化されている。 S_3 は学習の基本単位を表す Single 学習項目であり、3 つのドメイン概念が 1 つの学習単位と認定されたことを表している。図 2 (C) の領域について S_3 より詳細な学習項目が設定されていないことは、このモデル化においてはタイヤやスポークといったドメイン概念が学習単位と認定されなかったことを意味している。ある概念の学習が他の概念の学習に依存するとき、その依存性を表すための概念が Composite 学習項目である。たとえば図 2 の Composite 学習項目 C_1 は、自転車の部品の学習項目 (S_2, S_3) の理解に基づいて自転車の理解 (S_1) にまとめる学習内容を表している。このモデル化においては自転車に関する学習プロセスについて 2 つの考え方が想定されている。Composite 学習項目 C_1 を介して S_2, S_3 で部分を学習してから全体である S_1 に進むものと、図 2 (A) に含まれる概念を Single 学習項目 S_1 として一括して学習するものである。このどちらを選ぶかは学習プロセス設計上での意志決定になる。

学習項目間リンクは、学習の観点でとらえられる学習項目間の相互依存関係 (学習順序における先行性など) を表現する。このリンク自体は学習内容を表すものではなく、学習プロセス設計時の参照情報である。

2.3 学習プロセスのモデル

学習目的を満足するような学習プロセスを想定し、それに沿って学習オブジェクトを配列したものが学習コンテンツ制御構造であり、それを学習支援システムにロードし実行可能な形式にしたものが学習コンテンツである。この関係を学習コンテンツ設計モデルとして図 3 に概略的に示している。

本研究では図 3 に示しているように設計モデルを概念レベル、オブジェクトレベル、デリバリーレベルの 3 つのレベルに区分している。概念レベルでは目的階層と教授・学習行為構造を設計し、オブジェクトレベルでは学習コンテンツ制御構造を作成する。オブジェクトレベルは設計の最終成果物として実体化されるのに対して、概念レベルは設計の中間成果物であり、思考上の抽象物である。最後にデリバリーレベルは実行環境で動作する学習コンテンツに位置付けられる。以下では、概念レベルを中心としてモデル構造を説明する。

図 4 は学習支援システム目的の概念の is-a 階層の一部を示している。これは、学習支援システムの行為の教育的意図を記述するための概念を定義している。教育的意図は後述するように学習支援システム目的

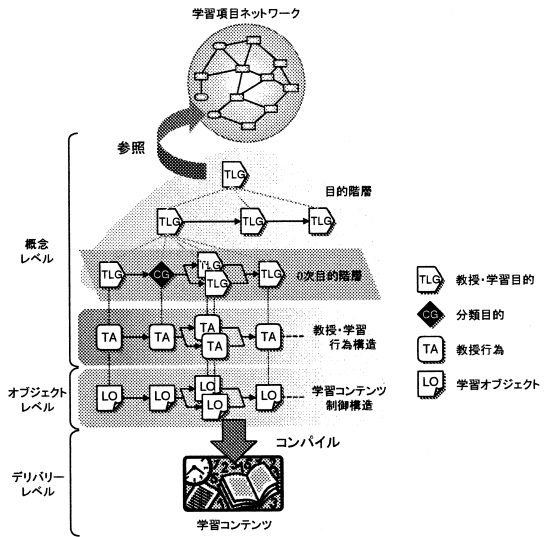


図 3 学習プロセスのモデル構造
Fig. 3 Model structure of a learning process.

- 1. 学習支援システム目的
 - 2. 一教授・学習目的
 - 3. 一認識させる
 - 4. 一例を認識させる
 - 5. 一...
 - 3. 一再認させる
 - 4. 一...
 - 3. 一理解させる
 - 4. 一例を理解させる
 - 4. 一概念を理解させる
 - 4. 一関係を理解させる
 - 5. 一...
 - 3. 一棄却させる
 - 4. 一...
 - 3. 一定着させる
 - 4. 一...
 - 3. 一獲得させる
 - 4. 一...
 - 3. 一修得させる
 - 4. 一...
 - 3. 一修正させる
 - 4. 一...
 - 2. 一分類目的
 - 3. 一評価する
 - 4. 一...
 - 3. 一同定する
 - 4. 一...
- "一"は is-a 関係、その前の数字は階層

図 4 目的の概念定義の is-a 階層 (一部)
Fig. 4 Concept hierarchy of goals (partly).

表 2 知識状態の記述内容
Table 2 Description of knowledge status.

| 種類 | 説明 | 値域 |
|----------------|----------|-------------------|
| 理解状態(u-state) | 長期記憶上の状態 | 未知 理解 修得 |
| 活性状態(a-state) | 短期記憶上の状態 | 潜在 励起 |
| レディネス(r-state) | 認識状態 | 獲得 修得 修正 前提 |

ノードとする目的階層として記述される。学習支援システム目的の概念定義は is-a 階層の最上位で、学習者の理解状態の変化を期待する教授・学習目的と、学習者をどのような理解状態として想定しているかを表す分類目的の 2 種類に分類している。

教授・学習目的は「学習項目に関する学習者の状態変化を目指す行為」を抽象化した概念として定義している。表 2 に知識状態の定義を示している。レディネス、活性、理解の 3 種類の状態を考え、それぞれについて値を設定する。図 4 のそれぞれの目的が目指す変

化を状態の変化の記述によって定義している。たとえば「認識させる」と「再認識させる」はレディネスと活性状態に関する作用を目的としている。

一方、分類目的は「学習項目に関する知識状態に応じて学習者を分類する行為」を抽象化した概念として定義している。これは学習コンテンツ上の分岐に対応し、ここに記述される分岐条件は分岐先の学習プロセスに対して設計者が想定している学習者の状態記述である。

これらの目的の記述レベルの設定にあたっては代表的な教授理論として知られている Gagne の学習成果の 5 分類¹⁰⁾ や Bloom の教育目標のタクソノミー¹¹⁾ に現れる概念を参考している。しかし、現状ではそれらの概念が構成する階層の意義を、オントロジー的に明確にすることができていない。この点は今後、オントロジーの蓄積・洗練プロセスを遂行する過程で検討を進める予定である。

ある具体的な学習コンテンツに対して構成される目的階層は、「どのような状態の学習者に対して、何について、どのような学習（効果）を期待するか」ということを表現する。最上位に設定される学習支援システム目的は図 3 の底辺に構成される学習コンテンツ全体が満たすべき学習ニーズに相当している。目的階層は、おおむね上位の目的を達成するための下位の複数の目的の系列に展開する形式で全体・部分関係を構成している。合理的な目的の系列は表 2 に示す状態変化を段階的に進むものと考えられる。たとえば、例を与えて規則を理解させるという系列は、理解状態（u-state）が「未知」である規則に対して、その「例を認識させる」ことによって規則に対するレディネスを高めたうえで、「規則を理解させる」ことによって理解状態を「理解」に変化させるということになる。教授・学習行為構造、学習コンテンツ制御構造と同型になる目的階層の底辺部を 0 次目的階層と呼ぶ。

教授・学習行為は、学習支援システム目的と学習オブジェクトを結びつける概念で、その目的を達成するために学習者に提示される学習オブジェクトが教授・学習行為（「説明する」「ヒントを出す」）で果たす役割を明確にする。学習コンテンツ制御構造は分岐や繰返しなどの制御構造上に学習オブジェクトを配列したモデルである。

目的階層の底辺に位置する 0 次目的階層、教授・学習行為構造、学習コンテンツ制御構造の 3 つは構造的に同型であり、この 3 つの対応によって、学習オブジェクトが学習コンテンツ全体の文脈において、何を目的としてどのような行為を具体化するものが明確

になる。

このようにして、本研究で開発した iDesigner は、概念レベルとオブジェクトレベルの 2 つのレベルで連続性を保ちながら、設計成果物を表現する枠組みを設計者に与え、設計作業を支援する点に特徴がある。

3. 学習コンテンツ設計支援環境 iDesigner

オントロジーを理解し、ユーザの知的作業を支援するために運用するツールの能力を、我々はオントロジーアウェアネスと呼び、その能力を備えたツールをオントロジーアウェアなツール¹²⁾と呼んでいる。iDesigner の開発においては、まず 2.2 節で示したオントロジーの上位概念に基づいて、基本的なデータモデルとそのデータモデルに対するオントロジーアウェアネスを実装した。

2 章の冒頭で述べたように、iDesigner にはオントロジーの蓄積・洗練サイクルに対する頑強性が求められる。これを満たすために iDesigner では、オントロジーの追加・更新に追従できるように、基本的なデータモデルを拡張するためのオントロジーのインポート機能を実装している。OE（オントロジーエディタ）上で追加・更新したオントロジーの XML 形式出力をインポートすると、iDesigner 内部に対応するデータ構造が構成される。

基本データモデルに対するオントロジーアウェアネスについては、具体的には、1 章で述べた目的 B. 構造化プロセスと系列化プロセスの連携支援に関して、

- 概念レベルモデルを記述する語彙・概念を提供し、
- それを視覚的に表現する枠組み

を実装し、目的 C. 概念レベルシミュレーションの導入に関して、

- 概念レベルでのモデルのシミュレーションを行い、
- 学習コンテンツの振舞いを視覚的に提示し、検証支援する機能

を実装した。これらはオントロジーに基づいて iDesigner が学習コンテンツのモデルの内容やプロセスを解釈する能力を備えることによって実現されている。

本章では上記の機能的特徴を全体的に説明し、次章でオントロジーアウェアネスの利点の説明を主眼として目的 C. に対応する概念レベルシミュレーション機能を詳細に説明する。

3.1 設計プロセス

iDesigner 上で設計者が行う作業を大きく次の 3 つのサブタスクに分けている。

構造化 学習コンテンツの作成基準としての学習項

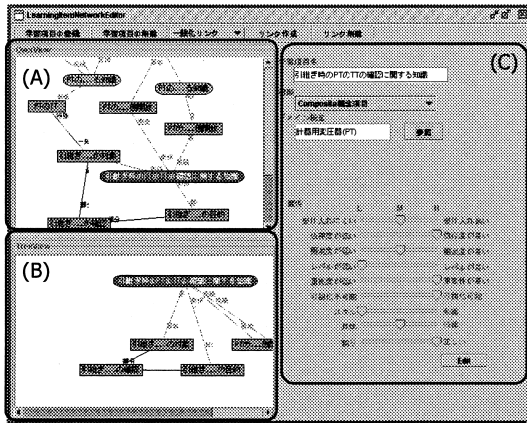


図 5 構造化環境

Fig.5 An environment for construction phase.

目ネットワークの作成 .

系列化 学習項目ネットワークの内容 (一部) の学習コンテンツ制御構造への配列 .

検証 学習コンテンツの妥当性の検証 .

構造化は 2.2 節で述べた学習内容のモデルを構築する作業にあたり, 系列化は 2.3 節で述べた学習プロセスのモデルを構築する作業にあたる. この 2 つの関係は学習指導要領と教科書の関係に近い. 学習指導要領は学習内容の体系であり, それを文書構造に配列したものが教科書である. 教科書の作成は学習指導要領で示される制約を満たす範囲内で著者の意図 (学習目的・対象学習者など) に応じて多様な具体化が行われる.

Designer は 3.2~3.4 節で述べるように, それぞれの作業に対して環境を提供するが, 3.2 節で説明する構造化環境は普遍性の高い指針となる学習内容の体系化を目指す設計者に限定的に提供することを想定している. また, 大部分の一般設計者にとっては系列化・検証が主目的となるために構造化環境は不要となり, 既存の学習項目ネットワークを参照しながら 3.3 節で説明する系列化環境と 3.4 節で説明する検証環境を利用することを想定している.

3.2 構造化環境

図 5 は構造化のための学習項目ネットワークエディタを示している. 学習項目ネットワークは表 1 に示した学習項目と学習項目リンクの分類に対応した 2 種類のノードと 6 種類のリンクによって表現される.

図 5 (A), (B) のネットワーク中の各ノードが 1 つの学習項目を表しており, ノード間の線は学習項目リンクを表している. 図 5 (A) では学習項目ネットワーク全体を示し, その中で注目するノードを選択すると図 5 (B) にそのノードをルートとして近傍の学習項目

表 3 学習項目のデータ構造

Table 3 Data structure of a learning item.

| 属性名 | 説明 | 値域 | 例 |
|-------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| id | インスタンスの識別子 | 識別子 | li-a |
| name | 学習項目名 | 文字列 | "64 リレーの概要" |
| type | 学習項目の種類 | Single Composite | Single |
| domain | 対応するドメインインスタンス | 識別子 (名前) | 64relay#1 (64 リレー) |
| 受け入れ易さ | 一般性, 認知度の高さの指標 | H ML | M |
| 難易度 | 学習者に対する難易度 | H ML | L |
| 対象レベル | 対象とする学習者のレベル | 初級 中級 上級 | 初級 |
| participant | Composite, 関係の場合に要素となる学習項目 | 学習項目 | |

をツリー状に表示する.

図 5 (C) のエリアに表示されているのは, ドメイン概念に対してタスクの観点から付加された情報である. 具体的には表 3 に示すような名前やタイプ, 対象レベルといった属性データが記述される. この情報とドメイン概念自体が持っている情報との総計が学習項目の内容となる. 表 3 では, ある電力系統におけるリレー機器のインスタンス 64relay#1 に対して設定された Single 概念項目を例示しており, 名前として "64 リレーの概要", 対象レベルとして初級の属性値が与えられている.

3.3 系列化環境

図 6 は系列化のためのツール群を示している. この中で中心的な役割を担うのが図 6 (A) のフローラインエディタである. フローラインは学習プロセスモデルの表示形式であり, 概念レベルとオブジェクトレベルの 2 つのレベルに対応した表現形式を用意している. 図 6 (A) は概念レベルフローラインを示しており, 目的階層と教授行為系列を教授・学習目的ノード, 分類目的ノード, 教授行為ノードの 3 種類のノードと制御リンク, 目的詳細化リンクの 2 種類の有向リンクで表現する. 一方, オブジェクトレベルフローラインは学習コンテンツ制御構造の表示で, 学習オブジェクトノードと制御リンクで表現する.

教授・学習目的ノードには, 何に (学習項目) ついて何のため (目的タイプ) の行為をするかが図 6 (B) のように記述される. 入力可能な目的タイプは教授・学習目的参照ウィンドウ (図 6 (C)) で設計者に提示される. ここではリストの並びが概念階層を示しており, 概念間の is-a, part-of 関係に基づいて各教授・学習目的のラベルのリストを左側 (上位) から右側 (下位) へ段階的に設計者に提示している. また, 入力可

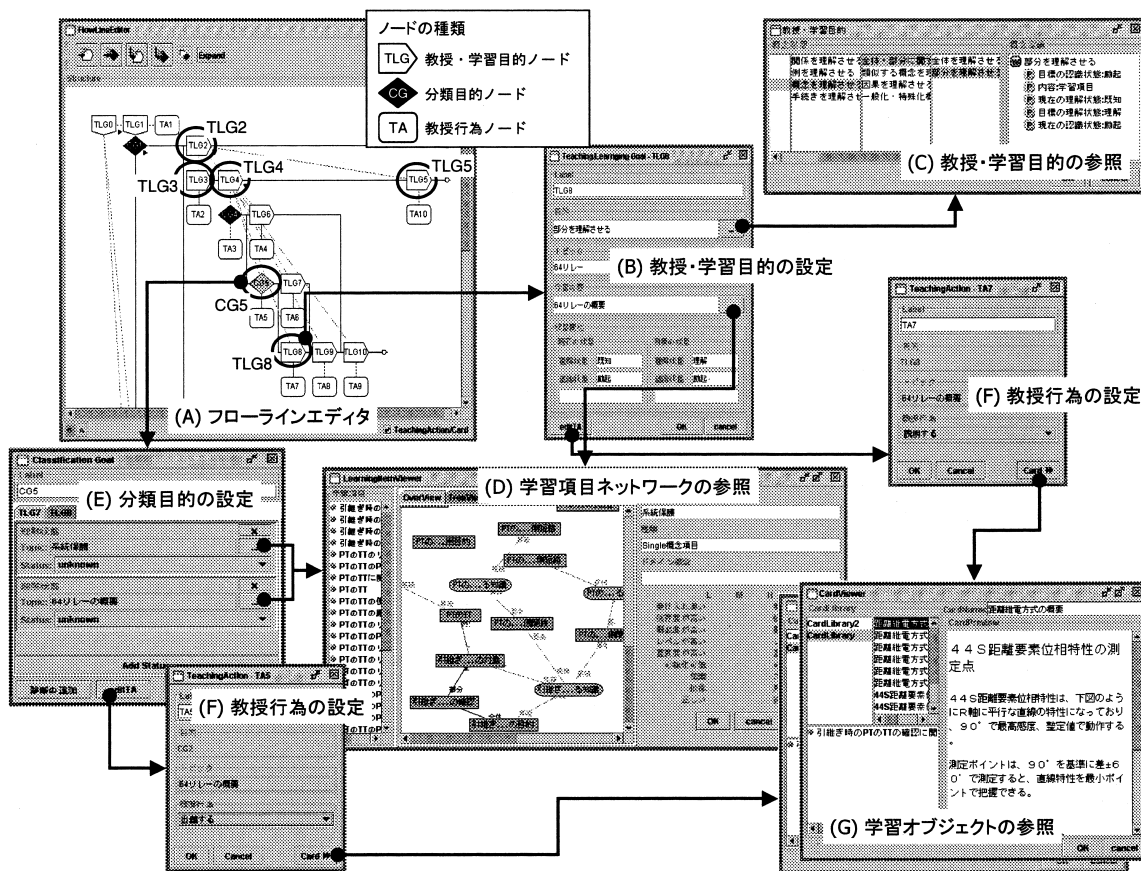


図 6 系列化環境

Fig. 6 An environment for sequencing phase.

能な学習項目を図 6 (D) のように学習項目ネットワークの形式で提示する。

分類目的は適応的な制御構造を構成するために、学習者の状況を分類することを表している。何に(学習項目)ついて、どのような理解状態(「未知」「理解」「修得」など)にあるかを判断するための情報が記述される。このノードには、学習者の回答に応じた制御構造の分岐とそれぞれにおいて想定される理解状態が記述される。たとえば図 6 (A) の分類目的ノード CG5 は図 6 (E) に示すように記述されており、「理解」と「未知」の 2 つの理解状態に応じて 2 方向への分岐が記述されている。分類目的は最終的に、学習者への直接的な働きかけを含む診断行為(テストなど)、または内部データ(学習者モデル)との照合行為で具体化される。

図 6 (A) において、概念レベルフローラインの目的詳細化リンクが点線、制御リンクが実線で示されている。目的詳細化リンクを用いて 1 つの目的を複数の目的に展開する構造が表現される。たとえば、図中の

教授・学習目的 TLG2 は TLG3, TLG4, TLG5 の 3 個の目的に詳細化されている。詳細化については、上位の大きな学習項目に関する学習を下位で分割するパターン、上位の学習目的を達成するための手順に分割するパターンなど様々な形態が考えられる。この作業において重要なことは分割に関連する学習項目を把握し、設計者の意図に沿って適切に系列化することであり、構造化環境で設定した学習項目リンクがそのための参照情報となる。たとえば、図 2 に示した Single 学習項目 S₁ を対象とする上位目的を詳細化する場合、S₁ を主体とする Composite 学習項目 C₁ とそれに関する集積化関係によって、S₁ を学習項目 C₁, S₂, S₃ に分割できることを設計者に提示する。また、C₁, S₂, S₃ 間の先行関係などが設定されていれば、それが下位目的での順序付けのための基礎情報となる。

学習コンテンツは、オブジェクトフローラインで表現される。オブジェクトフローラインは、図 6 (G) に示される具体的な学習オブジェクトの構成として記述される。学習オブジェクトは図 6 (F) に示されるよう

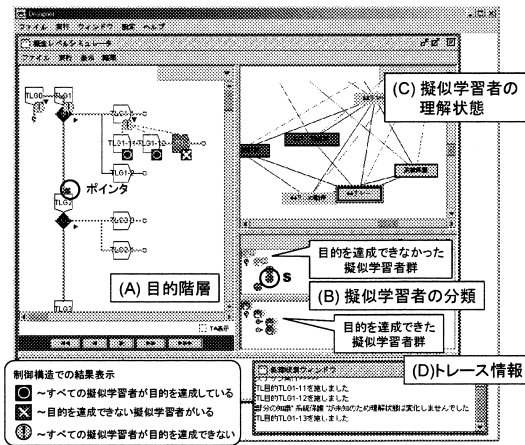


図7 検証環境

Fig. 7 An environment for verification phase.

に教授行為の記述に対応して設定される。

なお、この環境の設計にあたっては、上位から下位へ目的階層を展開しながら、段階的に学習コンテンツ制御構造まで具体化していくという設計者の作業形態を想定しているが、必ずしも多段階構成である必要はなく、1段階構成の簡易的な設計も許している。

3.4 検証環境

検証環境では学習コンテンツの振舞いに関する情報を概念レベルで視覚的に示す。図7(A)の学習コンテンツで想定された学習者(擬似学習者と呼ぶ)をアイコン化して図7(B)に示し、その理解状態の様子を図7(C)に示している。

図7(B)にアイコンで示された擬似学習者は概念レベルフローラインに基づいて生成する。たとえば、2分岐の分類目的は分岐条件によって異なる2つの状態の学習者を想定したことを意味するので、2人の擬似学習者を生成する。本研究では0次目的階層に従った擬似学習者の学習プロセスをトレースする機能を概念レベルシミュレーションと呼んでいる。ここでは検証環境の概要を説明し、概念レベルシミュレーションの詳細は4章で述べる。

シミュレーションを実行すると、図7(B)のように学習目的を達成できなかった擬似学習者(上側)と達成した擬似学習者(下側)が区分されて表示される。学習コンテンツにおいて設計者が記述した意図が妥当である場合には上部が空になる。これはオントロジーを構築する際に参照した理論や経験則に従えば、期待される効果を学習者が得る可能性が高いことを示している。検証環境での設計者の基本作業は、目的未達成の擬似学習者の学習プロセスをトレースし、未達成の原因を明らかにすることである。設計者は、どのよう

な学習者のどの時点の学習に問題があるかを、図7(B)で擬似学習者を選択し、その学習進行を図7(A)下部のコントロールボタンで制御しながら、システムが提示する情報(図7(C)に示される理解状態の変化など)に基づいて同定する。たとえば、図7では(B)で選ばれた擬似学習者(図中Sで示したアイコン)の目的未達成の原因を調べている様子を示している。擬似学習者の学習パスが概念レベルフローライン上で強調表示され、そのパス上でのポイントの位置まで学習を進行させると、そのときの理解状態が図7(C)の学習項目ネットワーク上に表示される。トレース情報ウィンドウ(図7(D))に「64リレーの機能」の学習が失敗した理由として、部分知識として先に学ぶべき知識(先行知識)の「系統保護」が未知の状態であったことが示されている。このとき概念レベルモデルに記述された近似的な内容に基づいて変化をトレースすることになるため、たとえば次のような要素は捨象される。

- 学習の不安定性 学んだことを忘れるなど、人間の不安定な認知的特性に強く依存する学習特性
- 開かれた学習 学習者の自主的学習など、学習コンテンツの外側で起こる学習効果
- コンテンツの表現の質 具体的な学習オブジェクトの品質に依存する学習効果の差異

4. 概念レベルシミュレーション

概念レベルシミュレーションは、検証環境において設計者に検証情報を提供するために概念レベルモデルを用いて学習コンテンツの設計にあたって想定された学習者(擬似学習者)の知識状態の変化プロセスを構成する。

4.1 擬似学習者

擬似学習者のデータモデルは、その学習者がたどる学習パス(target-path)と、そのパス上での知識状態の系列(k-states)で表現される。知識状態(Knowledge-State)はある時刻における擬似学習者の状況を表す。時刻はパス上の位置により表現し、状況は学習項目ネットワークのノードに知識状態情報(表2)を付加したオーバーレイで表現する。図8に擬似学習者の知識状態を例示している。図8(右)の学習項目ネットワークに対して、図8(左)の擬似学習者pl-3は時刻 t_s において、li-a, li-b, li-c, li-dについて理解状態が「未知」であることを示している。

4.2 擬似学習者の生成

2.3節で述べたように分類目的に記述される分岐条件は、分岐先の学習プロセスに対して設計者が想定している学習者の状態記述である。図9は0次目的階層

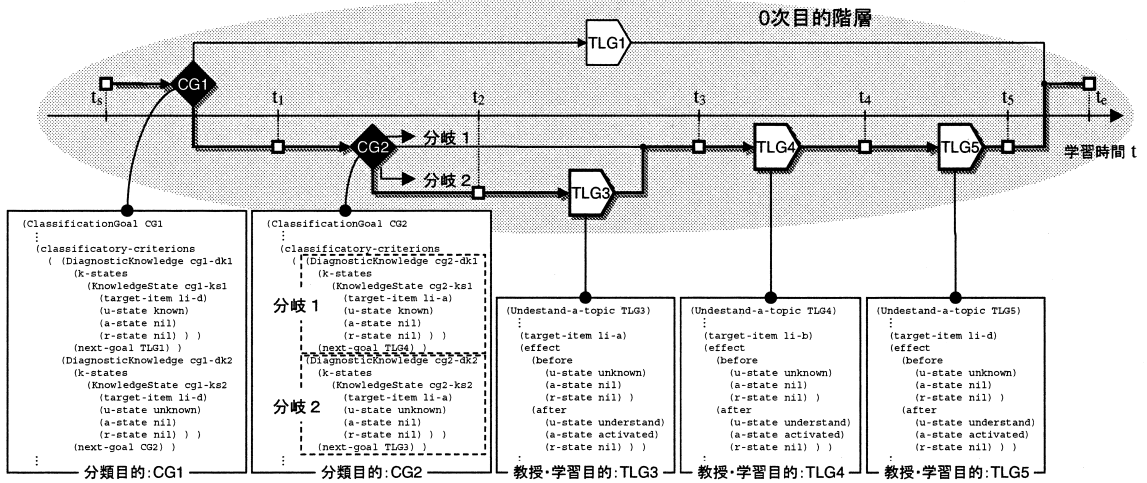


図 9 0 次目的階層の例

Fig. 9 An example of base goal hierarchy.

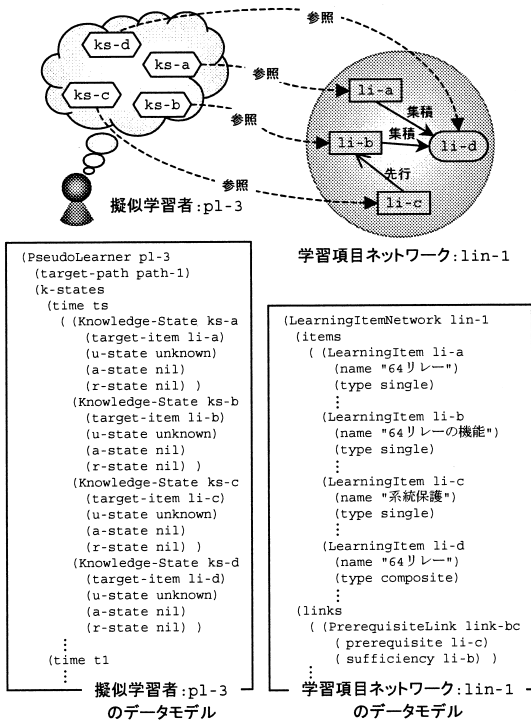


図 8 擬似学習者

Fig. 8 Pseudo learner.

の例を示している．この図の分類目的 CG2 の 2 分岐で考えると，分岐 1 (cg2-dk1) では学習項目 li-a を知っている学習者を，分岐 2 (cg2-dk2) では知らない学習者を想定している．この記述から，分岐 1 に進む擬似学習者の li-a についての理解状態の必要条件は「理解」，分岐 2 については「未知」となる．このよう

に分岐条件の記述を 0 次目的階層上で学習パスに沿って集約していくと，ある学習パスに対して想定している学習者の理解状態の必要条件を構成することができる．この必要条件を学習コンテンツの各パスについてそれぞれ構成し，各擬似学習者の初期状態 ($t = t_s$) として設定する．

また，ある学習パスにおける分類目的で分岐条件が記述されていない学習項目については「不定」として設定する．たとえば，図 9 では分類目的 CG1 と CG2 で li-d, li-a について分岐条件を記述されているが，li-b, li-c については記述されていない．このように分類目的で記述されていない学習項目については設計者の意図を想定できないので「不定」と設定する．このようにして各学習パスを通る必要条件を初期状態とする擬似学習者を生成する．図 8 に示した擬似学習者 pl-3 は図 9 に太線で示す学習パスに対応する擬似学習者の初期状態 ($t = t_s$) を示している．

4.3 教授・学習目的の効果

各パスの擬似学習者の初期状態に対して，対応するパスの教授・学習目的を順に適用することによって擬似学習者の知識状態の変化をトレースする．本節では，個々の教授・学習目的における妥当性の検証方法について述べる．この結果の集約による学習コンテンツの構成の妥当性の検証については 4.6 節で述べる．

各教授・学習目的には，作用記述とその適用の妥当性を判定する適用制約によって概念的な意味を記述している．表 4 は教授・学習目的のデータモデルを示しており，適用制約はこの中の作用記述 (effect) が成立するための必要条件の記述である．なお，この記述

表 4 教授・学習目的のデータモデル
Table 4 A data model of teaching/learning goal.

| 属性名 | 説明 | 値域 | 例 1 | 例 2 |
|----------------|------------------------------|--|----------|----------|
| id | インスタンスの識別子 | インスタンス識別子 | TL3 | TL6 |
| type | 教授・学習目的の種類 | 認識させる 再認させる 理解させる 棄却させる 定着させる 獲得させる 修正させる | 理解させる | 棄却させる |
| target-item | 対象とする学習項目を表す. | インスタンス識別子 | li-a | li-a |
| target-learner | 対象とする学習者を表す. 実行時に具体的な値が設定される | インスタンス識別子 | ?learner | ?learner |
| target-ks | 適用制約の判定対象となる知識状態を表す. | インスタンス識別子 | ?ks | ?ks |
| effect | 知識状態への作用記述. type によって決定される | | | |
| before | 入力が持つべき状態を表す. type によって決定される | | | |
| u-state | 長期記憶上の状態 | 未知 理解 修得 | 未知 | 理解 |
| a-state | 短期記憶上の状態 | 励起 定常 | — | — |
| r-state | 認識状態 | 獲得 修得 修正 前提 | 獲得 | 修正 |
| after | 効果適用後の状態を表す. type によって決定される | | | |
| u-state | 長期記憶上の状態 | 未知 理解 修得 | 理解 | 未知 |
| a-state | 短期記憶上の状態 | 励起 定常 | 励起 | — |
| r-state | 認識状態 | 獲得 修得 修正 前提 | — | — |

の大部分は図 6 (B) で設計者が入力した内容から半自動的に生成される。

以下に、教授・学習目的の概念定義に含まれている適用制約の一部を示す。

- 適用制約 1: ある目的・行為が対象とする学習項目の学習が成立するのは、その学習項目に対して先行関係にある学習項目について「理解」または「修得」の状態になければならない、
- 適用制約 2: ある目的・行為が対象とする Composite 学習項目の学習が成立するのは、その項目に対して要素となっている学習項目すべてについて「理解」または「修得」の状態になければならない、
- 適用制約 3: 「棄却させる」行為が成立するのは、対象となるバグ知識に関して理解状態が「理解」であるとともにレディネスが「修正」でなければならない、

といった制約が定義されている。この中で、適用制約 1, 2 はすべての教授・学習目的に共通する制約、制約 3 は教授・学習目的「棄却させる」に固有の制約として定義している。これらの制約は表 4 に示す各概念の作用記述 (effect) として記述される。たとえば、制約 3 は表 4 に示す各概念の作用記述 (effect) の before フィールドで記述されている。この適用制約を擬似学習者の知識状態と照合し、制約が充足されたときは作用記述に従って変化イベントを発生させ、擬似学習者の知識状態をその目的の適用後の知識状態 (after) の値に更新する。制約が充足されないときは適用失敗と

して更新しない。この適用処理は iDesigner 上で手続き的な記述として実装し、OE から読み込んだ教授・学習目的の各概念と対応付けることによって実現している。また、これらの制約については、設計者が自分の主観や参照する学習理論、教授理論に基づいて、不必要な制約を除外できるようになっている。

また、適用制約の判定に必要な学習項目について、理解状態が「不定」である場合は、設計者に値の決定を求めると、デフォルト仮定 (設計者が「未知」または「理解」をあらかじめ指定する) のもとで実行する。デフォルト仮定の設定もシミュレーション情報として記録される。3.4 節で示した例では、理解状態を「未知」にするという仮定のもとで処理している。その仮定を図 7 (D) のトレース情報ウィンドウで表示している。

4.4 学習プロセスのシミュレーション

各擬似学習者に対して学習パスに沿って教授・学習目的を作用させていくことで学習進行のシミュレーションを行う。図 9 では太線で示す学習パスの各教授・学習目的の記述内容を示している。図 10 はそのパスにおける擬似学習者 pl-3 の理解状態の変化を示している。ks-a ~ ks-d はそれぞれ擬似学習者 pl-3 の学習項目 li-a ~ li-d に対する理解状態を示している。

最終的なシミュレーション結果は、各擬似学習者における学習パスの始まりから終わりまでの各教授・学習目的における作用適用イベントの情報と状態変化の履歴として記録される。

4.5 概念レベルシミュレーションの例

図 11 に擬似学習者 pl-3 に対するシミュレーション

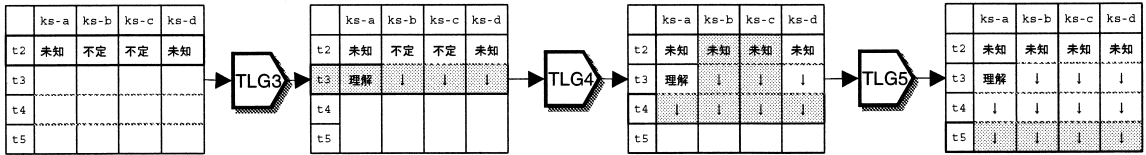


図 11 シミュレーションの流れ
Fig. 11 Progress of a simulation.

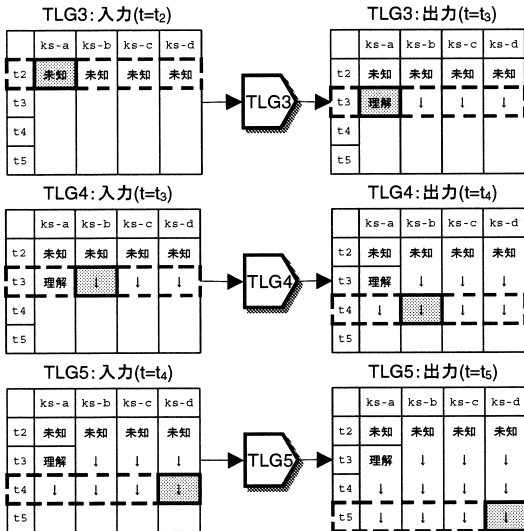


図 10 学習プロセス
Fig. 10 A process of learning.

過程を示している。教授・学習目的 TLG4 を適用する処理を説明する。TLG4 適用前のデータでは、学習項目 li-b と li-c に対する知識状態 (ks-b, ks-c) が「不定」となっているが、TLG4 の適用制約の判定には、対象学習項目 li-b の先行学習項目 li-c に対する理解状態が必要になる。この例では、デフォルト仮定によって li-c に対する理解状態 ks-c を「未知」と設定する。TLG4 適用の時刻は t_3 であるが、 t_3 以前に li-c の理解に影響する教授・学習目的はないため t_s から「未知」としている。li-c の時刻 t_3 における理解状態が「未知」であるため、それを先行学習項目とする li-b の学習は前述の適用制約 1 が満たされずに失敗し、状態は更新されない。したがって、TLG4 終了時 (t_4) の li-b の理解状態は適用前状態 (before) に記述された「未知」とする。また、li-c の場合と同様に t_3 以前に li-b の理解に影響する教授・学習目的はないため、 t_s から未知であるものとする。

このような処理を繰り返し、学習コンテンツで扱われるすべての学習項目について、擬似学習者の理解状態の履歴を決定する。

4.6 シミュレーション結果の集約

学習コンテンツが、すべての想定された学習者に対して妥当に設計されているかを判定するために、各学習パスごとのシミュレーション結果を目的階層に沿って上位の目的に集約する。最上位の目的までシミュレーション結果を集約することによって、学習コンテンツ全体の振舞いを設計時に想定した概念レベルのモデルと対応付けて可視化することができる。

上位目的に対応する下位の目的階層での学習パスを、その目的に対する部分学習パスと呼ぶ。一般に上位目的に対して複数の部分学習パスが想定される。図 12 の目的 TLG2 に対しては、2 つの部分学習パス A, B が対応している。部分学習パスのシミュレーション結果を以下の 2 つの観点で上位の目的のシミュレーション結果に集約する。

- 目的達成：上位目的に対するすべての部分学習パスの終了状態が、上位目的の適用後状態を達成しているかを判定する。
- 0 次遂行：目的に対応する 0 次目的階層上のすべての部分学習パス上のすべての学習目的が達成されているかを判定する。

0 次目的階層の目的は下位目的を持たないため、目的達成と目的行動の遂行に差はない。この区別は、設計者に修正作業の指針を明確にする効果がある。

たとえば、図 12 の目的 TLG2 の判定では、TLG2 での目標状態 (li-d について理解) を TLG5 終了後 (t_5) の pl-3 の理解状態が満たしていないので目的達成はなされていない。また、部分学習パス A, B のどちらにおいても適用に失敗した目的があるため、目的行動の遂行もなされていない。この情報は、まずは失敗した下位目的に関する修正作業が必要なことを示唆する。

また、部分学習パスに設定された目的群が上位の目的に対して不十分な場合には、目的行動は遂行されたが目的達成がなされていないという状況になる。この場合には、部分パスを見直し上位目的の達成に不足した目的を補う作業が必要なことを設計者に示唆している。

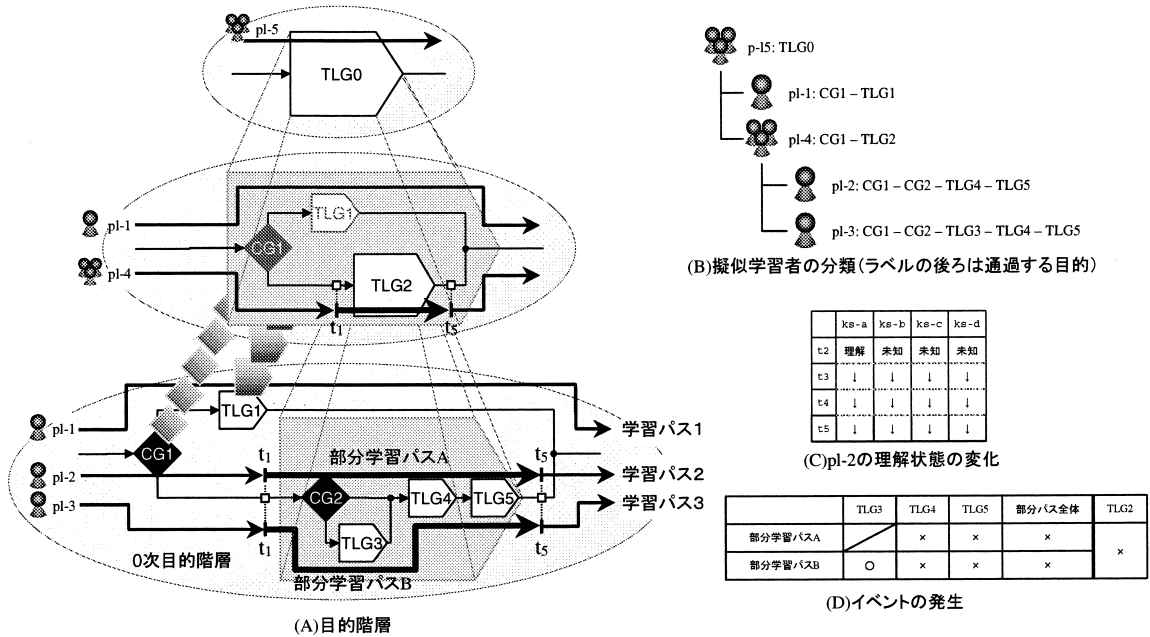


図 12 目的階層
Fig. 12 An example of a goal hierarchy.

5. おわりに

学習コンテンツ設計の成果物は抽象性が高いため分節記号化して表現する枠組みの設定が難しい。本研究ではこの問題に対するアプローチとして、抽象的概念をオントロジー化し、それを基礎とした設計支援環境 *iDesigner* を開発した。

本稿の2章および3章では、オントロジーを基礎とした設計成果物の概念レベル表現とその支援環境を説明した。この環境では従来は暗黙的であった作業結果を外化することを設計者に促すことで、設計過程を視覚的に再認識させる効果をもたらし、設計にかかわる思考を深める効果が期待できると考えている。また、2章の冒頭で述べたように、*iDesigner* はオントロジーの蓄積・洗練に対して頑強である必要がある。このことを確認するために本研究では、訓練と教科教育の2つのオントロジーをOE(オントロジーエディタ)上で記述し、そのXML形式出力を*iDesigner*に組み入れ、対応するデータ構造を構成し、動作確認を行った。

動作確認にあたっては、高校教科の物理と企業訓練科目の電力系統保護リレー試験操作を対象として学習コンテンツの設計を行った。物理学学習を対象とした学習コンテンツ設計では、比較的規模の小さな物体の運動に関する学習項目ネットワーク(学習項目数約50個)を作成し、系列化した。この系列化では、様々な

分岐形態を持つフローラインを作成した。電力系統保護リレー試験操作を対象とした学習項目ネットワークは学習項目数約300個からなり企業訓練分野の実状に即した大きさを持つ。系列化では初級者訓練に含まれる業務の1つを対象とした設問数が10で、それともなう分岐が33と比較的複雑なフローラインを作成した。これらのフローラインに対して、意図的に学習項目の欠落、順序の間違いなど考えられるすべての種類の状況を設定し、概念レベルシミュレータの動作を検証した。その結果、*iDesigner*は、想定された学習の進行を視覚的に提示するとともに、設定された誤りのすべてを検出し、その箇所を指摘することを確認した。

他の形態の教育では異なったオントロジーが必要になる。その際にも、OEでオントロジーを構成し、そのXML形式出力を*iDesigner*に組み入れることで、対応するデータ構造を構成する。ただし、オントロジーの上位概念に対応するエディタ画面の表現オブジェクト(たとえば、学習項目ノードなど)と概念レベルでのシミュレーションに関する制約検査は、プログラムコードとして実装しているため、2.2節で示した上位概念や4章で示した制約に変更が及ぶ場合は再コーディングが必要となる。

今後の課題としては、学習コンテンツの標準化規格であるSCORM¹³⁾への対応を検討しながら、その他

の形態のオブジェクトレベルモデルの設計について実証していきたいと考えている。

また、4章で示した概念レベルシミュレーションは、ツールのオントロジーアウェアネスのメリットを示すうえで格好の実装例であると考えている。設計された学習プロセスの妥当性を確認するには、次の2つの方法がとられる。1つは実際に学習者に与えて効果を測定する実践的手法で、もう1つは設計の中間成果物である概念レベルのモデルにおいて理解の変化についてのシミュレーションを行って妥当性を検証する思考上の近似的手法である。iDesignerでは概念レベルシミュレーション機能により後者の作業を環境上で行うことを可能にした。概念モデルに表現された設計意図をツールが解釈し、その概念レベルの振舞いを推定し、視覚的に表現して設計者にフィードバックする。このときの設計者とツールの概念レベルのインタラクションはオントロジーを基礎として実現されている。

もちろん、オントロジーに従ったモデル化を設計者に強いることのデメリットが一方で容易に想像される。オントロジーへの合意性が低ければ、ツールとユーザのインタラクションの疎通の度合いが低くなる。しかし、これは2者択一の問題ではなく、メリットを可能な限り高めて、デメリットを可能な限り抑制することが望まれるトレードオフの問題である¹²⁾。これを解決するためには、どれだけ合意性の高いオントロジーをツールに実装することができるかが鍵になる。本研究のこれまでの取り組みではツールのオントロジーアウェアネスの実装を主眼に進めてきており、オントロジーの質と設計ツールの利便性に関する直接的な検討は行っていない。構築した学習コンテンツ設計タスクオントロジーによる既存の教授理論やモデル、たとえば、Gagneの学習成果の5分類¹⁰⁾やBloomの教育目標のタクソノミー¹¹⁾などの再現性の検証が必要である。この検討については今後の研究でより深めていきたいと考えている。

謝辞 本研究を遂行するうえで、iDesignerの支援機能の動作を確認するために企業訓練科目の電力系統保護リレー試験操作を対象とした学習コンテンツの内容を提供していただいた東光精機株式会社制御機器事業部コンテンツビジネス開発グループ高岡良行氏、田中孝一氏、太田衛氏、吉田修啓氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Authorware, Computer Software, Macromedia (1997).
- 2) Murray, T.: Authoring Knowledge Based Tu-

tors: Tools for Content, Instructional Strategy, Student Model, and Interface Design, *Journal of the Learning Sciences*, Vol.7, No.1, pp.5-64 (1998).

- 3) 平田謙次, 池田 満, 溝口理一郎: コンピテンシー・オントロジーに基づく人的資源設計支援, 教育システム情報学会誌, Vol.18, No.34, pp.340-351 (2001).
- 4) 金 来, 林 雄介, 池田 満, 溝口理一郎, 太田 衛, 高岡良行: 訓練システム SmartTrainer 構築用オーサリングツール, 教育システム情報学会誌, Vol.16, No.3, pp.139-148 (1999).
- 5) 溝口理一郎: オントロジー研究の基礎と応用, 人工知能学科学論文誌, Vol.14, pp.977-988 (1999).
- 6) Mizoguchi, R. and Bourdeau, J.: Using Ontological Engineering to Overcome AI-ED Problems, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol.11, No.2, pp.107-121 (2000).
- 7) Ikeda, M., Seta, K. and Mizoguchi, R.: Task Ontology Makes It Easier To Use Authoring Tools, *Proc. IJCAI'97*, Nagoya, Japan, pp.342-347 (1997).
- 8) 林 雄介: 訓練タスクオントロジーに基づくオーサリング支援環境, 大阪大学修士学位論文 (2000). URL: http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/~hayashi/master_thesis/
- 9) Kouji, K., Kitamura, Y., Ikeda, M. and Mizoguchi, R.: Development of an Environment for Building Ontologies which is Based on a Fundamental Consideration of "Relationship" and "Role", *The 6th Pacific Knowledge Acquisition Work Shop (PKAW2000)*, pp.205-221, Sydney, Australia (Dec. 11-13 2000).
- 10) Gagne, A.M. and Briggs, L.J.: *Principles of Instructional Design*, Holt Rinehart and Winston, Inc. (1974). 持留英世, 持留初野(訳): カリキュラムと授業の構成, 北大路書房 (1986).
- 11) Bloom, B.S., Hastings, J.T. and Maclaus, G.F.: *Handbook on Formative and Summative Evaluation of Student Learning*, McGraw-Hill (1971). 梶田叡一, 藤田恵穂, 渋谷憲一(訳): 教育評価ハンドブック, 第一法規 (1973).
- 12) 池田 満, 林 雄介, 瀬田和久, 金 来, 角所収, 溝口理一郎, 高岡良行, 太田 衛: タスクオントロジーはオーサリングを楽にする? 訓練タスクオントロジーの構成とオーサリング支援, 人工知能学会研究会資料, SIG-J-9801-11, pp.47-54 (1998).
- 13) ADLNet: Sharable Content Object Reference Model: SCORM, Ver. 1.1 (2001). <http://www.adlnet.org/>

(平成13年12月25日受付)

(平成14年10月7日採録)



林 雄介(学生会員)

1998年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。2000年大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻博士前期課程修了。現在、同大学院基礎工学研究科システム人間

系専攻博士後期課程在学中。オントロジー工学，知的教育システム，組織知の創造・継承支援システムに関する研究に従事。人工知能学会，教育工学会，教育システム情報学会各会員。



山崎龍太郎

2000年大阪大学工学部電子工学科卒業。2002年同大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年セイコーエプソン(株)入社。大阪大学大学院在学時はオント

ロジー工学，知的教育システム等の研究に従事。



池田 満(正会員)

1984年宇都宮大学工学部卒業。1986年宇都宮大学大学院修士課程修了。1989年大阪大学大学院博士課程修了。同年宇都宮大学助手。1991年大阪大学産業科学研究所助手。1997

年同助教授。工学博士。形式言語の構文解析，仮説推論，帰納推論，知的教育システム，オントロジー工学の研究に従事。人工知能学会設立10周年記念優秀論文賞受賞。人工知能学会，電子情報通信学会，教育システム情報学会各会員。



溝口理一郎(正会員)

1977年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。1978年大阪大学産業科学研究所助手。1987年同研究所助教授。1990年同教授。現在に至る。工学博士。音声の認識・理解，

エキスパートシステム，知的CAIシステム，オントロジー工学の研究に従事。1985年Pattern Recognition Society論文賞，1988年電子情報通信学会論文賞，1996年人工知能学会創立10周年記念論文賞，1999年ICCE99 Best Paper Award受賞。電子情報通信学会，教育システム情報学会，日本認知科学会，Intl. AI in Education (IAIED) Soc.，AAAI，IEEE，APC of AACE各会員。現在，IAIED Soc.会長，およびAPC of AACE会長。