

機関番号：14501

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500804

研究課題名 (和文) 発展的な知識獲得を支援する仮想実験環境におけるタスク制御機能の構築

研究課題名 (英文) Development of a function to adaptively provide a series of tasks for progressive knowledge acquisition in virtual experimental environments

研究代表者

堀口 知也 (HORIGUCHI TOMOYA)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：00294257

研究成果の概要 (和文)：計算機シミュレーションにより手軽に「実験を通した学習」を行えるツールである「仮想実験環境」において、個々の学習者の進度に応じて適切な課題を順次生成する機能を開発・検証した。課題は学習目標や対象とするモデルと共に「マイクロワールドグラフ」と呼ばれる知識構造に組織化され、学習者の理解状態を推定する機能と連携して、学習進度に応じた課題が適応的に生成・提示される。予備実験により本機能の有効性を確認した。

研究成果の概要 (英文)：We have developed a task-generation function in virtual experimental environments which enable learners make scientific experiments on computers. It generates a series of tasks adaptive to each learner's progress. 'Microworld graph (GMW)' is used for organizing tasks with their learning purposes and target models. GMW cooperates with the function which models a learner's understanding to generate appropriate tasks automatically. Preliminary tests validated its usefulness.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：知識工学

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学・教育工学

キーワード：仮想実験環境、マイクロワールド、適応的系列化、オーサリング、Compositional Modeling、Intelligent Tutoring System

1. 研究開始当初の背景

(1) 計算機上でより多くの学習者が安全かつ手軽に「実験を通した学習」を行うことを可能にするツールとして、「仮想実験環境」に関する研究開発が盛んに行われている。屢々マイクロワールド (Microworld: MW) とも呼ばれるこの環境では、学習者が対象に自ら働きかけることを通して、能動的な知識の発見・獲得が起こることが期待される。しかし反面、学習者は屢々次に何をよいかわ

からなくなったり、知識発見の契機となるべく与えられるタスク (課題) の遂行に行き詰まったりすることも指摘されている。

MW において学習が適切に行われるためには、学習進度に応じた難易度を持つタスクが継続的に与えられる必要がある。典型的には、限られた条件下での単純な現象から、より一般的な条件下での複雑な現象を扱うタスクへと漸進的に移行させる。これは MW の対象モデルを順次複雑化することに相当し、この

ように学習対象を「徐々に複雑化する複数の MW 系列」として設計する方法論は ICM (Increasingly Complex Microworlds) と呼ばれている。

(2) これまで、ICM に基づく幾つかのシステムが開発され、一定の有用性が確認されている。しかし、それらのシステムでは提供される MW 系列が固定的であり、個々の学習者への適応性に問題があった。学習者の理解状態の変化に合わせて次に学ぶべき MW を選択していくためには、各々の MW における学習対象（目標）および MW 同士の関係が明示化されている必要がある。従来のシステムではこれらが明示的に記述されておらず、学習の文脈に応じた適切な（次に学ぶべき）MW の選択や、なぜ次の MW へ進むべきかの説明が不可能であった。そこで、我々は先行研究「発展的な知識の獲得を支援する仮想実験環境の構築」(平成 17, 18 年度科学研究費・基盤(C)一般)において、これらの知識を明示的に記述する枠組みであるマイクロワールドグラフ (Graph of Microworlds: GMW) を提案し、適応的に MW 系列を生成する機能および MW の移行を支援するための基本機能を持つシステムを構築・検証した。GMW は、各 MW における学習目標と行うべきタスクの記述をノード、MW 間の学習目標の差異および移行のために行うべきタスク（移行タスクと呼ぶ）の記述をエッジとするグラフ構造である。任意のノード (MW) において、次に学ぶべき（漸進的な学習が可能な）MW の候補および移行タスクが、その隣接ノードおよび対応するエッジを参照することで得られる。学習の文脈に応じて GMW 上の経路を変更することにより、一連の MW における適応的な漸進的学習が可能となる。

2. 研究の目的

しかし、GMW を記述することは、複数の MW およびそれらの関係を考慮する必要があるため、多くの労力を要する作業である。また、GMW に基づくシステムを用いて実際に適応的な MW 系列を生成するためには、学習者の理解状態をモデル化することが必要である。そこで本研究では、これらの問題点を踏まえ、次の機能を実現することを目的とした。

①個々の MW の記述から GMW を半自動生成するための機能の実現

②一連のタスクの遂行状況から学習者の理解状態を推定する機能の実現

3. 研究の方法

(1) 上記の目的①の実現手法の概要は次の通りである。GMW は、隣接する MW 同士におけるモデル間の関係を記述したモデルグラフ (Graph of Models: GoM) を下部構造として

持っており、これに（個別に記述された）MW の情報を合成することで MW 同士の関係を半自動生成する。また GoM は、モデル間の差異とそれに基づく現象間の差異を対応付ける記述を持っており、これを利用して MW 間の移行を促すタスク（移行タスク）を自動生成することができる。

目的②の実現手法の概要は次の通りである。各 MW におけるタスクおよび移行タスクの遂行に必要な知識・技能・行動とそれらの依存関係をベイジアンネットワーク（各事象—ここでは知識・技能・行動—の生起確率をノード、隣接する事象間の条件付確率をエッジとするネットワーク。観察された事象から他の事象の事後確率を確率伝播によって計算することができる）として表現しておき、学習者によるタスクの遂行状況（観察可能な行動）からその理解状態（知識・技能の有無）を確率的に推定する。

これらの機能モジュールをシステムとして統合した上で、予備的実験によりその実用性を評価した。

(2) マイクロワールドグラフ (GMW) の半自動生成機能の実装の枠組みは、①モデルグラフ (GoM) の記述、②マイクロワールド (MW) の記述、③MW と GoM の自動合成、④移行タスクの自動生成、の 4 ステップから成る。各ステップに対応する機能モジュールを実装し、それらを統合して GMW の半自動生成機能を実現する。

①モデルグラフの記述：GMW の下部構造であるモデルグラフ (GoM) の各ノードにはモデルとその成立要件が記述され、モデルの成立条件（モデル化仮定と呼ぶ）および振る舞いの差異が十分小さいノード間には、その差異を記述したエッジが張られる。本研究では、自動モデリング分野での知見に基づき、ソフトウェア技術者による GoM の記述を支援するオーサリング環境を実現した。

②マイクロワールドの記述：一方、個々の MW は、教育的背景を持つ（複数の）オーサにより記述される。その際、各 MW において対象とするモデルを GoM により提供される（モデル化仮定を表す）語彙を用いて指定しておく。MW の記述では、主として対象モデルを理解するために行うべきタスクや状況設定の指定を行うが、これは簡単な GUI インターフェースを備えたオーサリング環境として実現した。

③MW と GoM の自動合成：次に、記述された MW の組を GoM 上に配置して GMW を生成する。各 MW では対象とするモデルが GoM におけるモデル化仮定の語彙を用いて記述されてい

るため、自動的に GoM のノードに対応付けることができる。ある MW が GoM 上に配置されると、そこから漸進的に移行可能な MW の組、及びそれらとのモデル、成立条件の差異、振る舞いの差異などの情報を得ることができる。

④移行タスクの自動生成：移行タスクは「現在のモデルを変更しなければ予測値と観測値の差異を説明できない」ような状況設定の変化を伴うタスクである。GoM の持つモデルベース推論能力を利用すれば、ある MW における状況設定をどのように変化させればそのモデルが不成立となり、隣接する MW のモデルが成立となるか、またその際の両者の振る舞いの差異に関する情報を得ることができる。これにより、個々に記述された MW が配置された GMW から、MW 間の移行タスクを自動生成する機能が実現できる。

(3) 学習者の一連のタスク遂行状況からその理解状態を推定する機能の実装の枠組みは次の通りである。学習活動における学習者の振る舞いには、決定された問題解決モデルでは捉えきれない不確定な要素が多く、近年これを確率的に処理して学習者モデリングを行うベイジアンネットワークが注目されており、本研究でもこれを用いた。

ベイジアンネットワークでは、タスク遂行に必要な知識・技能・行動とそれらの依存関係を有向グラフとして表現するが、ここでは特に移行タスク、すなわちモデル変更を伴うタスクの遂行時の学習者の状態のモデル化を試みた。学習者が習得済みのモデルを新たな環境（そのモデルを用いることが不適切であるような）において用いた場合、予測と観察が異なり認知的葛藤が生じる可能性が高い。環境において観察可能な学習者の行動（解答の作成を含むインターフェース上の操作）から、このような学習者の「概念変容」の過程をモデル化することが、本研究における学習者モデリングの特徴である。

モジュールの実装はフリーウェアとして公開されているベイジアンネットワーク作成ツールを使用し、実験室における試験運用を通してパラメータ調整を行い、本手法の有効性を確認した。

4. 研究成果

(1) 3 年間の研究実施において得られた成果を、まず各年度毎に述べ、最後に総括する。

①平成 20 年度は、マイクロワールドグラフ (GMW) を半自動生成する機能を開発した。上述の枠組みに従い、(a)ソフトウェア技術者を対象とした GoM のオーサリング環境と支援機能、(b)教師を対象とした MW のオーサリ

ング環境、(c)パターン照合による MW と GoM の自動合成機能、(d)GoM の推論能力による移行タスクの自動生成機能、を個別に開発した上で統合し、GMW を半自動生成する機能を完成した。特に、GoM 及び MW のオーサリングを行うために合成モデリング技術 (Compositional Modeling) を用いることが有効であるとの知見が開発中に得られたため、これを採用した結果、同オーサリングを効率的に行うことが可能となった。本機能を試用した結果、初等力学における基本的な例題を扱うことができる GMW を半自動生成することができ、その有効性が確認された。

個々のマイクロワールドに対するオーサリング支援の試みはこれまでも存在するが、本研究は一定の教育目的に従って一連のマイクロワールド群を作成・組織化することを支援するものであり、仮想実験環境を用いた学習の普及・実用化へ向けて重要な成果が得られたといえる。

②平成 21 年度は、学習者の一連のタスク遂行状況からその理解状態を推定する機能を実現した。特に、マイクロワールド (MW) 間の移行タスク、すなわちモデル変更を伴うタスクの遂行時の学習者の状態を、ベイジアンネットワークによってモデル化した。すなわち、初等力学を対象としてベイジアンネットワークにおけるタスク構造を決定し、学習者モデル生成機構を実装して既存モジュールと統合し、試験運用を通してパラメータ調整を行い動作を確認した。上記により、ベイジアンネットワークに基づく学習者モデル生成モジュールを開発し、数回の統合・調整作業を経て、同年度の目的である、学習者の一連のタスク遂行状況からその理解状態を推定する機能の実装を完了した。

学習支援システムにおいて、ベイジアンネットワークを用いた学習者モデル構築の試みはこれまでに数多く行われているが、学習者の「概念変容」のモデル化に用いた例はこれまでになく、本研究により独創的な成果が得られたと言える。

③平成 22 年度は、平成 20、21 年度に開発されたモジュールをシステムとして統合した上で、予備的実験によりその実用性を評価した。すなわち、仮想実験環境において漸進的学習を実現するための知識記述の枠組みであるマイクロワールドグラフ (GMW) 及びその半自動生成機能、GMW 上で学習者の一連のタスク遂行状況からその理解状態を推定する機能を持つシステムを構築した。実験室における試験運用を通して動作確認及びパラメータ調整を行った結果、システムが設計通り良好に機能していることを確認した。また、実用性に関する予備的実験を計画・実施した。

実験は、(a)実現したオーサリングツールによって実用的なGMWがソフトウェア技術者及び教師にとって過度の負荷なく記述可能か否か、(b)実現した学習者モデリングモジュールにより学習者の一連のタスク遂行状況からその理解状態を正しく推定できるか否か、の検証からなる。(a)については、本システムの開発者補助者である大学院生をソフトウェア技術者、家庭教師経験を持つ数名の大学院生を教師とみなして高校物理教科書の「力学I」をカバーするGMWを作成させたところ、過度の負荷なく適切なGMWを作成することができた(インタビューの結果などによる)。(b)については、数名の大学生を被験者としてシステム上で実際に幾つかの問題系列を生成しながら問題演習を行わせたところ、適切な問題系列が生成できていることが確認された(各問題が自己の理解状態に照らして適切であったか否かを評定させた結果などによる)。このことにより、仮想実験環境において漸進的学習を支援するための知識記述の枠組み及び支援機能の設計における本研究の提案手法の有効性が検証されたと考える。本研究により、仮想実験環境を用いた学習の普及・実用化へ向けて重要な成果が得られたといえる。

(2) 対象分野における知識・技能を簡単なものから複雑なものへと段階的に学習させるというアイデア自体は、特に新規なものではない。実際、単一の仮想実験環境(MW)においても、一定のシナリオに従って徐々に複雑な状況やタスクを与えるものは国内外に数多く存在する。また、複数のMWから成る系列を設計しておき、発展的な知識獲得の支援を試みるものも(主として米国に)少数ながら存在する。しかし、前者のタイプでは、状況やタスクの配列の仕方がしばしば教材作成者の恣意性に任され、教育効果の保証されるシナリオの設計が困難であるとともに、学習活動の明示的な支援が難しい。後者のタイプにおいては、対象領域の詳細な分析に基づいてMWの系列が設計されているものの、その設計知識がシステム上に明示的に記述されていないため、運用に際してはその設計思想を熟知した教師の存在が不可欠である。

本研究は、適切な環境やタスクの設定、およびタスク遂行時の誤りの認識・修正など、学習支援を行う上で不可欠となるシステムの設計知識をモデルに基づいて明示的に記述することによってICMを実現しようとする初めての試みであり、知的学習支援を指向した仮想実験環境の設計法およびその機能において、先進的・独創的な成果を持つものと言える。今後、実用化を指向したシステム機能の拡張および運用体制の整備を行い、実践的にその効果を検証していく予定である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計19件)

- ① Matsuda, N., Hirashima, T., Horiguchi, T., Taki, H., A Technique of Error Awareness for Pencil Drawing, Proc. Of ICCE2010, 査読有, 2010
- ② 中道孝之、平嶋宗、力学の情報不備問題を対象とした演習支援システム、教育システム情報学会誌、査読有、Vol. 27、No. 2、2010、pp. 3-11
- ③ 舟生日出男、稲山雅史、平嶋宗、問題解決プロセスを利用した選択問題の誤選択肢および解説の自動生成、電子情報通信学会誌D、査読有、Vol. 93-D、No. 3、2010、pp. 292-302
- ④ Hirashima, T., Yamamoto, S., Waki, H.: An Interactive Learning Environment for Problem-Changing Exercise, Proc. of ITS2010, 査読有, 2010, pp. 343-345
- ⑤ Yamamoto, S., Waki, H., Hirashima, T., An Interactive Environment for Learning by Problem-Changing, Proc. of ICCE2010, 査読有, 2010, pp. 1-8
- ⑥ 脇浩美、浦智幸、堀口知也、平嶋宗、初等力学を対象とした問題変更演習支援システムの設計・開発、教育システム情報学会誌、査読有、Vol. 26、No. 4、2009、pp. 329-338
- ⑦ 舟生日出男、亀田卓司、平嶋宗、幾何証明課題の解決過程における推論の誤りのインタラクティブな可視化、日本教育工学会論文誌、査読有、Vol. 32、No. 4、2009、pp. 425-433
- ⑧ Hirashima, T., Increasingly Problem Simplification as Scaffolding in Exercises, Proc. of the Workshop on Question Generation, 査読有, 2009, pp. 58-65
- ⑨ Hirashima, T., Imai, I., Horiguchi, T. & Toumoto, T., Error-Based Simulation to Promote Awareness of Errors in Elementary Mechanics and Its Evaluation, Proc. of AIED2009, 査読有, 2009, pp. 409-416
- ⑩ Horiguchi, T. & Hirashima, T., Intelligent Authoring of 'Graph of Microworlds' for Adaptive Learning with Microworlds based on Compositional Modeling, Proc. of AIED2009, 査読有, 2009, pp. 207-214
- ⑪ Horiguchi, T. & Hirashima, T., Intelligent Authoring of 'Graph of

- Microworlds' for Adaptive Learning with Microworlds, Proc. of 22nd International Workshop on Qualitative Reasoning (QR'09), 査読有, 2009, pp.49-53
- ⑫ Hirashima, T., Ueno, T., Yamamoto, S., Problem Generation as Structure Simplification Following Problem-Solving Process, Proc of International Workshop of Modeling, Management and Generation of Problems/Questions in Technology-Enhanced Learning, 査読有, 2009, pp.10-14
- ⑬ 堀口知也、今井功、東本崇仁、平嶋宗、Error-based Simulationを用いた中学理科の授業実践 -ニュートンの第三法則を事例として-, 日本教育工学会論文誌、査読有、32 卷Suppl.号、2008、pp.113-116
- ⑭ Horiguchi, T. & Hirashima, T., Domain-Independent Error-Based Simulation for Error-Awareness and Its Preliminary Evaluation, Proc. of PRICAI 2008 (Lecture Notes in Artificial Intelligence, Volume 5351), 査読有, 2008, pp.951-958
- ⑮ 倉山めぐみ、匂坂洋介、東本崇仁、平嶋宗、数式に基づく状況の設計を通じた力学学習の支援システムの設計・開発、教育システム情報学会学会誌、査読有、Vol.25、No.3、2008、pp282-291
- ⑯ 今井功、東本崇仁、堀口知也、平嶋宗、中学理科における Error-based Simulationを用いた授業実践-「ニュートンに挑戦」プロジェクト-, 教育システム情報学会誌、査読有、Vol.25、No.2、2008、pp.194-203
- ⑰ Horiguchi, T. & Hirashima, T., Intelligent Support for Authoring' Graph of Microworlds' based on Compositional Modeling Technique, Proc. of 23rd International Workshop on Qualitative Reasoning (QR'08), 査読有, 2008, pp.49-57
- ⑱ 東本崇仁、堀口知也、平嶋宗、シミュレーションに基づく学習環境における漸進的な知識獲得支援のためのマイクロワールドグラフ、電子情報通信学会論文誌、査読有、J91-D、No.02、2008、pp.303-313
- ⑲ 松田憲幸、高木佐恵子、曾我真人、堀口知也、平嶋宗、瀧寛和、吉本富士市、鉛筆デッサンが表す写実誤りの三次元モデルによる顕在化、電子情報通信学会論文誌、査読有、J91-D、No.02、2008、pp.324-332

[学会発表] (計13件)

- ① 堀口知也、平嶋宗、Error-based Simulationのモデリング学習環境への展開へ向けて、人工知能学会先進的学習科学と工学研究会 (ALST-59)、2010年7月、東京
- ② 堀口知也、平嶋宗、モデリング学習環境におけるフィードバック設計の枠組み、人工知能学会全国大会(第24回)、2010年6月、長崎
- ③ 上野拓也、堀口知也、平嶋宗、マイクロワールドグラフを用いた派生問題の対話的自動生成システム、人工知能学会全国大会(第23回)、2009年6月、香川
- ④ 堀口知也、平嶋宗、現象のモデル化プロセスに基づく物理問題の特徴付けとその支援手法、人工知能学会全国大会(第23回)、2009年6月、香川
- ⑤ 脇浩美、浦智之、平嶋宗、堀口知也、問題ベースの作問学習支援システムとその利用実験、教育システム情報学会第33回全国大会、2008年9月、熊本
- ⑥ 浦智幸、脇浩美、堀口知也、平嶋宗、問題ベースの作問学習支援システムの設計開発、人工知能学会先進的学習科学と工学研究会 (ALST-52)、2008年3月、広島
- ⑦ 堀口知也、平嶋宗、合成モデリング技法を用いたマイクロワールドグラフの記述支援、人工知能学会先進的学習科学と工学研究会 (ALST-52)、2008年3月、広島

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀口 知也 (HORIGUCHI TOMOYA)
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
研究者番号：00294257

(2) 研究分担者

平嶋 宗 (HIRASHIMA TSUKASA)
広島大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10238355

(3) 連携研究者