

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280127

研究課題名(和文) マイクロワールドグラフの説明生成機能の拡充に基づく知識構成支援に関する研究

研究課題名(英文) Development of a learning environment that assists students' knowledge construction with 'graph of microworlds' and enhanced explanation generator

研究代表者

堀口 知也 (Horiguchi, Tomoya)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：00294257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：初等物理学の概念的理解を段階的に達成することを支援するため、適応的な問題系列化および問題間関係の説明生成の自動化を実現するための知識記述の枠組みを与え、そのような能力を持つ学習支援システムを構築し、実験によってその有用性を検証した。すなわち、(1)説明の基盤となる概念の体系化、(2)説明生成機能の実装と問題系列生成機能を有する既存システムへの統合、(3)実験的利用を通じた学習プロセス・効果の分析を実施し、システムによる説明が概念的理解を促進すること、種々の条件下での問題系列の学習の促進要因に関する認知モデルを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For promoting students' conceptual understanding of mechanics, a system was developed and empirically evaluated that adaptively sequences problems and explains the difference between them with a framework for indexing physical models based on their assumptions. We (1) systematized the concepts for explanation, (2) implemented an explanation generator and integrated it into the previously developed system that can adaptively sequence problems, and (3) validated its effectiveness in learning mechanics and analyzed students' learning process through experiments. Consequently, this research clarified the fact that explanations by the system promoted students' conceptual understanding, and the cognitive model about the factors that promote students' learning under various conditions.

研究分野：知識工学

キーワード：知的学習支援システム 科学教育 問題系列化 説明生成 知識工学

1. 研究開始当初の背景

科学教育における重要な目標の一つは、様々な対象系とその振る舞いについて、目的に応じた適切なモデルを作成する能力(領域の概念的的理解と呼ぶ)を養うことである。そのためには、従来(1)限られた状況を扱う簡単な問題(考慮すべき原理・法則が少数)から始めて徐々に複雑な状況を扱う問題(多数の原理・法則を組合せる必要がある)へ移行させる問題系列化が有効とされており、また最近の研究では(2)問題系列化が有効に働くためには問題間の関係(差分)に関する説明を適切に行うことが不可欠であることが実証されている。ここで注意すべきことは、物理学のように複雑な知識体系を持つ領域においては、個々の学習者や学習目的によって最適な問題系列はしばしば異なること、従って問題間関係の説明も系列化の際の視点を反映して適応的に行う必要があること(例えば問題の表面的特徴/その背後にある原理・法則の差分を説明)である。これまで人間の教師によって(対象領域毎・目的毎に)行われてきた問題の系列化や問題間関係の説明は視点が固定的であったため、そのような適応的支援が困難であった。つまり従来の教授法では、概念的的理解を得るためには学習者が自ら問題を適切な順序に並べ替え、問題間の関係を推測しなければならなかった。これは大多数の学習者にとって非常に困難であり、物理学における習熟失敗の主要な原因となってきたと考えられる。

研究代表者らはこれまで、物理問題をそれが扱う対象系のモデルに基づいて特徴付けることで適応的・自動的に問題系列を生成可能とする知識記述の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、その有用性を検証してきた。GMWは一つの問題(マイクロワールドと呼ばれる)をノード、二つの問題間の差分をエッジとするグラフ構造である。ノードには、問題が対象とする系の状況とそのモデル、およびモデル化における仮定が記述され、これら(モデルの成立過程)を理解することが一つのマイクロワールドにおける目標となる。エッジは二つの問題間を移行することが教育的である場合、すなわちノード間の差分が十分小さい場合に付けられており、GMW上で一つの問題に隣接する問題を適切に選択していくことによって学習状況に応じた系列が生成可能となる(図1)。

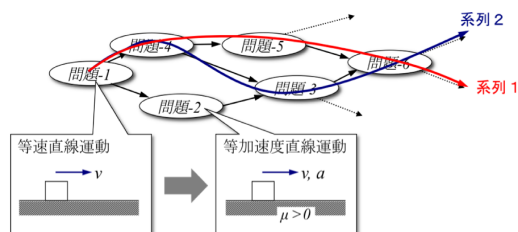


図1 マイクロワールドグラフの例

2. 研究の目的

研究代表者らはこれまでに、GMWに基づく力学問題演習システムを開発し、実験的評価を行ってきた。その結果、ある問題の「特殊化/一般化問題」(例えば図1の問題-1は問題-2で $\mu=0$ となる特殊な場合)や「部分問題」(例えば問題-2の物体が他の物体と衝突する問題は前者を部分問題として含む)を、学習状況に合わせて適切に選択・提示できることが確認された。しかしそれらは学習者によって必ずしも有効活用されず、対象領域の概念的的理解を支援するまでには至らなかった。分析の結果、その原因はシステムが問題間関係の説明能力を持たないことによるものと結論づけられた。現システムの説明能力は問題間の移行を促すタスクに関するものに限られており(エッジ毎に個別に記述されたルールに基づいて行う)、任意の問題間関係を説明ことはできない。しかし、良い問題系列の効果は問題間関係への気づきによって初めて発揮される、という先行研究の知見を踏まえると、問題間関係を適応的に説明する能力は領域の概念的的理解を支援するために不可欠なものであると言える。そのような機能を実現するには、一つの問題における状況がどのような仮定に繋がってどのようなモデルを導き、またその状況・仮定が変化するとモデル(問題)かがどのように変化するかを、個別の問題ペアに依存せずに記述するための概念体系が必要である。以上より、モデル化の仮定およびその関連概念を体系化(「制約の意味論」と呼ぶ)し、それをベースとした問題間関係の適応的説明生成機能を実現することによって、本枠組みが本来持つ可能性を発揮し、領域の概念的的理解を支援し得るシステムの実現を図ることが必要となる。

本研究では、適応的な問題系列化および問題間関係の説明生成の自動化を実現するための知識記述の枠組みを与え、そのような能力を持つシステムの有用性を実証することを目的とする。すなわち、主に物理学を対象として、領域の概念的的理解を段階的に達成することを支援する、問題間関係の説明生成機能を実現・検証する。具体的には、(1)説明の基盤となる概念の体系化、(2)説明生成機能の実装と現システムへの統合、(3)実験的利用を通じた学習プロセス・効果の分析と検証、および有効利用法の検討、を実施する。

3. 研究の方法

本研究では、良い問題系列の効果は問題間関係を正しく理解させることで初めて発揮されるとの認識の下に、そのような支援を、(1)適応的説明の基盤となる概念の体系化を行った上で、(2)問題間関係の説明生成機能として実現する。これを既存の問題演習システムへ統合し、実験的・試験的利用を通して、適応的な問題系列生成および説明機能の有効性を検証・評価する。(3)大学生を

対象とした実験的利用を通して、主に学習プロセスの分析を行い、種々の条件下での習熟の促進/障害要因を明らかにするとともに、学習効果の評価および有効な運用方法に関する検討も併せて行う。これらを通して、領域の概念的理解支援における本システムの有用性を評価する。

(1) 説明概念の体系化：はじめに、説明生成の基盤となる概念の体系化を、研究代表者らの先行研究において開発した「制約の意味論」を拡充する形で行う。まず領域独立層における概念の整備・拡充を行い、それを用いて領域依存層におけるモデルパターンの記述を進め、部品データベースを構築する（対象領域は力学）。

(2) 説明生成機能の実装：次に、先行研究で用いた問題のモデル（約 50 個）を部品データベースの部品を用いて記述可能であることを確認し、問題があればデータベースを（必要に応じて上位概念も）修正する。次に、拡充した制約の意味論に基づく説明生成機能の実装を行い、記述したモデルに対して、問題および問題間の関係の説明が適切に生成されることを検証した上で、現在の問題演習システムへ統合する。

(3) 実験的利用のための準備：実験的利用の目的は、本システムによる支援が種々の条件下（既有知識の多寡、問題の難易度など）において習熟をどのように促進（障害）するかを、学習プロセスの分析を通して明らかにすることである。特に問題系列化の効果は「類推」と関係が深い。以前の問題で習得した事項を現在の問題へ適用する、問題同士の比較を行うなどの学習行動が頻繁に見られるからである。そこで、特に「類推」を示唆する学習行動の有無、行われる類推の「質」に注目してデータ収集を行う。まず学習中の種々のデータ（システム操作履歴など）を自動記録する機能をシステムに追加する。次に実験用の教材を、先行研究で用いたものをベースにして作成する。

(4) 実験的利用の実施：実験的利用は、詳細なデータを得る目的で被験者に負荷のかかる調査を行う必要があることから、大学生を対象として行う。大学初年度の「物理学」の受講者などから被験者を募り、研究室にて個別実験を行う。事前/事後テストにより学習効果を測定すると共に、システムログ、発話思考法、調査紙、インタビュー等によってより詳細なデータを取得する。

4. 研究成果

三年間の研究実施において得られた成果をまず年度毎に述べ、最後に総括する。

(1) 平成 26 年度：まず、適応的説明の基盤

となる概念の体系化を行った。「制約の意味論」における領域独立層の概念の整備・拡充に関しては研究代表者が中心となって行い、研究分担者および研究協力者によるレビューに基づいて改良を重ねる形で実施した。これに用いた領域依存層のモデルパターンの記述は研究代表者および研究分担者が協働して行い、力学領域を対象とした部品データベースを構築した。次に、既存の問題のモデル（約 50 個）を部品データベースの部品を用いて記述可能であることを第三者の視点で検証するため、研究代表者が雇用した大学院生に試用させることで確認した。幾つか生じた記述上の問題点に対応するため、データベースの修正を複数回行った結果、対象領域における典型的な問題において、本データベースはモデル記述のための十分な部品を提供可能であることが明らかとなった。

(2) 平成 27 年度：まず、拡充した制約の意味論に基づく説明生成機能の実装を行い、記述したモデルに対して、問題および問題間の関係の説明が適切に生成されることを検証した上で、既存の問題演習システムへ統合した。実装作業およびモデルの記述と確認は研究代表者および雇用した大学院生が担当した。説明の妥当性の検証は、研究代表者、研究分担者および雇用した大学院生が行い、対象領域における 90%以上の典型的問題において、十分な情報量を含んだ説明が生成可能であることを確認した。次に、本システムの実験的利用の準備として、学習用教材、学習効果を測るためのプレ/ポストテストを作成するとともにシステム使用時のデータを収集するためのログ記録機能等の実装を行った。前者は主として研究分担者が、後者は研究代表者および雇用した大学院生が担当した。

(3) 平成 28 年度：前年度までに実装したシステムおよび作成した実験用諸材料を用いて、大学生を対象とした実験を実施した。まず、少数の被験者を用いて予備の実験を実施し、システムおよび学習用教材等の調整を行った後、約 40 名の被験者を用いて学習実験を実施した。同実験では、システムが生成した二種類の問題系列の学習効果を比較するという枠組みを用い、その中における説明の効果測定した。実験の実施は、研究代表者、研究分担者および雇用した大学院生が担当した。

実験の結果得られた主要な知見について次に述べる。実験では、二種類の問題系列を用いた。1つは構造ブロック系列と呼ばれ、異なる表層構造を持つが同一/類似の深層構造を持つ問題が隣接するように配列されている。もう1つは表層ブロック系列と呼ばれ、類似の表層構造を持つが異なる深層構造を持つ問題が隣接するように配列されている。実験では、三つの仮説を設定した。

(仮説1) 構造ブロック系列は、同一の原理を様々な状況へ適用して解法を定着させるための学習において表層ブロック系列よりも効果が高い。すなわち、一つの原理を適用して解ける比較的単純な問題においては、前者は後者よりも学習効果が高い。(仮説2) 表層ブロック系列は、問題の表層構造に惑わされずに適切な原理を選択・適用するための学習において構造ブロック系列よりも効果が高い。すなわち、幾つかの原理を組み合わせる必要がある複雑な問題においては、前者は後者よりも学習効果が高い。(仮説3) 表層ブロック系列の効果は、問題の深層構造に気づくことのできる学習者においてより顕著に現れる。ここで、深層構造への気づきは問題間の関係の説明によって与えられる。実験の結果、構造ブロック系列を用いた学習は、問題の深層構造への気づき(説明)の有無に関わらず、比較的単純な問題において、表層ブロック系列を用いた学習よりも高い効果を持つことが示唆された。また、表層ブロック系列を用いた学習は、より複雑な問題において、構造ブロック系列を用いた学習よりも高い効果を持つことが示唆された。そして、表層ブロック系列の学習効果は、学習者が問題の深層構造に気づいているとき(すなわち説明を与えられたとき)により明確に現れることが示された。これらのことは、上記三つの仮説が妥当であることを示唆している。すなわち、物理の問題演習において、(1)構造ブロック系列は、同一の原理を様々な状況へ適用して解法を定着することを促進するため、一つの原理を適用して解ける比較的単純な問題においては、表層ブロック系列よりも効果が高い。また、(2)表層ブロック系列は、状況に応じて適切な原理を選択・適用することを促進するため、幾つかの原理を組み合わせる必要がある複雑な問題においては、構造ブロック系列よりも効果が高い。ただし、後者の学習はより難しいため、その効果は問題の深層構造への気づき(説明の有無)に依存する。

(4) 総括：本研究では、良い問題系列の効果は問題間の関係を正しく理解させることで初めて発揮されるとの認識の下に、そのような支援を、(1)適応的説明の基盤となる概念の体系化を行った上で、(2)問題間の関係の説明生成機能として実現した。これを既存の問題演習システムへ統合し、実験的利用を通して、適応的な問題系列生成および説明機能の有効性を検証・評価した。そして、(3)大学生を対象とした実験的利用において学習プロセスの分析を行い、種々の条件下での習熟の促進/阻害要因に関する認知モデルを明らかにすることができた。

本研究は、領域の概念的理解の促進を指向して、精密な特徴付けの枠組みに基づき(従来の固定的問題系列に対して)適応的に問題系列を生成するシステムを初めて実現する

ものであり、国際的に見ても高い独創性、先進性を持つ成果であると言える。また、本システムが生成する問題間関係の適応的説明は、問題系列が有効に働くために不可欠な支援を初めて実現するものであり、高い教育効果を期待することができる。すなわち本研究は、工学的、教育学的、心理学的に大きな異議を有する。これらの研究成果は、国内外の学術雑誌、国際会議、研究会において発表済みである。これらの成果を踏まえ、本システムを教育現場へ展開していくための方法論の構築を、今後実施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11件)

山田敦士, 篠原智哉, 堀口知也, 林雄介, 平嶋宗, 多視点 Error-Based Simulation の設計・開発と実験的評価, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J99-D, No.12, 2016, pp.1158-1161

溝口理一郎, 平嶋宗, 堀口知也, 力と運動に関する因果推論理論, 人工知能学会論文誌, 査読有, Vol.31, No.4, 2016, pp.A-F44_1-13

篠原智哉, 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 山田敦士, 山元翔, 林雄介, 平嶋宗, 運動する物体にはたらく力を対象とした Error-based Simulation の中学校理科における実践利用, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J99-D, No.4, 2016, pp.439-451

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., A Framework of Generating Explanation for Conceptual Understanding based on 'Semantics of Constraints', Research and Practice in Technology Enhanced Learning, 査読有, Vol.10, Issue.1, 2015

Shinohara, T., Imai, I., Tomoto, T., Horiguchi, T., Yamada, A., Yamamoto, S., Hayashi, Y. & Hirashima, T., Experimental Evaluation of Error-Based Simulation for Dynamics 265 Problems in Science Class at Junior High School, Workshop Proc. of ICCE2015, 査読有, 2015, pp.265-270

Shinohara, T., Tomoto, T., Horiguchi, T., Yamada, A., Yamamoto, S., Hayashi, Y. & Hirashima, T., Experimental Use of Error-Based Simulation for Dynamics Problems in National Institutes of Technology, WIPP Proc. of ICCE2015, 査読有, 2015, pp.13-15

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., The Effect of Problem Sequence on Students' Conceptual Understanding in Physics, Proc. of HCI2015, 査読有, 2015,

pp.313-322

Horiguchi, T., Imai, I., Tomoto, T. & Hirashima, T., Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation, Journal of Educational Technology & Society, 査読有, Vol.17, No.3, 2014, pp.1-13

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., Structured Explanation Generation for Conceptual Understanding in Physics, Workshop Proc. of ICCE2014, 査読有, 2014, pp.359-368

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., A Framework of Generating Explanation for Conceptual Understanding based on 'Semantics of Constraints', Proc. of ICCE2014, 査読有, 2014, pp.107-109

Hayashi, N., Shinohara, T., Yamamoto, S., Hayashi, Y., Horiguchi, T. & Hirashima, T., Scaffolding for Self-overcoming of Impasse by Using Problem Simplification, Proc. of ICCE2014, 査読有, 2014, pp.50-58

〔学会発表〕(計9件)

益田哲宏, 堀口知也, モデリング学習環境におけるモデルの構造レベル及び振る舞いレベルの支援比較, 人工知能学会第79回先進的学習科学と工学研究会, 2017年3月8日, 花びしホテル(北海道)

堀口知也, 東本崇仁, 平嶋宗, 力学の概念的理解における問題系列の効果について, 人工知能学会第78回先進的学習科学と工学研究会, 2016年11月12日, 慶応義塾大学日吉キャンパス来往舎(神奈川県)

益田哲宏, 堀口知也, モデリング学習環境におけるモデルの差異検出機能とその評価, 人工知能学会第30回全国大会, 2016年6月6日, 北九州国際会議場(福岡県)

津守庸平, 林直也, 篠原智哉, 山元翔, 堀口知也, 林雄介, 平嶋宗, 自己調整活動の経験型支援システムの設計・開発 - 単純化方略を用いた行き詰まりの自己克服を対象として -, 人工知能学会第30回全国大会, 2016年6月6日, 北九州国際会議場(福岡県)

山田敦士, 安田健汰, 篠原智哉, 山元翔, 堀口知也, 林雄介, 平嶋宗, 物体にはたらく力・加速度・速度の関連付けのための Error-Based Simulation, 人工知能学会第76回先進的学習科学と工学研究会, 2016年3月6日, かんぼの宿有馬(兵庫県)

安田健汰, 山田敦士, 篠原智哉, 山元翔, 堀口知也, 林雄介, 平嶋宗, Error-Based Simulation を用いた力学演習におけるモニタリングツールの設計・開発, 2015年

度 JSiSE 学生研究発表会, 2016年2月29日, 広島市立大学サテライトキャンパス(広島県)

篠原智哉, 東本崇仁, 堀口知也, 山田敦士, 林雄介, 平嶋宗, 運動系における力の把握の促進を目指した Error-based Simulation とその評価実験, 教育システム情報学会第40回全国大会, 2015年9月3日, 徳島大学常三島キャンパス(徳島県)

堀口知也, 平嶋宗, 溝口理一郎, 人間の素朴な因果理解に準拠した汎用運動シミュレータ, 人工知能学会第29回全国大会, 2015年5月30日(北海道)

篠原智哉, 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 山田敦士, 山元翔, 林雄介, 平嶋宗, 力と運動に関する誤概念の修正を目的とした Error-based Simulation の開発と中学校での実践的利用, 人工知能学会第73回先進的学習科学と工学研究会, 2015年3月5日(愛知県)

〔図書〕(計1件)

Hirashima, T., Horiguchi, T., Springer International Publishing, Learning, Design, and Technology: An International Compendium of Theory, Research, Practice, and Policy, 2016, 17000 (1-33)

〔その他〕

ホームページ等

http://kuid.ofc.kobe-u.ac.jp/InfoSearch/html/researcher/researcher_Y5b0npqDd0_0-1BQ3mbe3w_ja.html?q=堀口+知也&wayf=keywords&backtoResultPath=/InfoSearch/View.do

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

東本 崇仁 (TOMOTO, Takahito)
東京工芸大学・工学部・助教
研究者番号: 10508435

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

今井功 (IMAI, Isao)
千葉市立花園中学校・教頭

Kenneth D. Forbus
Northwestern University • Department of
Electrical Engineering and Computer
Science • Professor

Dedre Gentner
Northwestern University • Department of
Psychology • Professor