

令和元年5月28日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12558

研究課題名（和文）思考実験型モデリング学習環境の支援機能拡充と学習効果測定法の開発

研究課題名（英文）Development of assisting functions and an achievement test for the thought experiment learning environment

研究代表者

堀口 知也（Horiguchi, Tomoya）

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：00294257

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、「思考実験型」モデリング学習環境の実用化を指向して、学習者のモデリング活動を支援する諸機能を設計・実装してその効果を検証するとともに、そのような学習活動の効果測定法を開発し、その妥当性を実証的に検証したものである。さらに、種々の支援法が学習者の活動や学習効果に与える影響、および学習者の先行知識による影響を様々な観点から比較することで、モデリング学習における認知モデルの一端をも明らかにした。本研究による成果は、「思考実験型」モデリング学習を教育実践において活用し、その効果を評価する際の有用な知見を提供するものと期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者らは先行研究において、「誤りのシミュレーション」が、単に誤答の修正だけでなくその背後にある誤概念自体の修正を促進することを、領域毎・問題毎に実証してきたが、本システムはこれを汎用化して、様々な領域・問題への展開を可能にしたものであり、広範囲にわたる学習改善が期待できる。また、思考実験型学習を実現するシステムは世界的にも研究・開発例が見当たらず、独創的な成果であるとともに、モデリング学習環境を教育現場へ普及させる端緒を開くものとしての意義も有している。

研究成果の概要（英文）：In this research, aiming at practical use of the model-building learning environment based on 'thought experiment,' we developed a set of functions that assist learners in making and testing models of dynamical systems. We also developed a test that can measure the effect of learning through modeling. We empirically verified the effectiveness of the functions and the usefulness of the test. In addition, we investigated how learners acquire modeling skills and concepts of system dynamics, focusing on how students' behavior and understanding are influenced by the type of assistance and their prior knowledge through an experiment. The result revealed a part of cognitive model of learning through modeling. The findings of this research would provide the useful information for the practical use and evaluation of the model-building learning environment based on 'thought experiment.'

研究分野：知識工学

キーワード：モデリング学習環境 誤りの可視化 動的システム 知的学習支援 定性推論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、科学教育において、学習者に対象系のモデルを作成するための手段を与え、その振る舞いを計算機でシミュレートする「モデリング学習環境」の導入が試みられている[1]。同環境では、学習者は所与のモデル部品を組合せることでモデルを作成し、それは何らかの形式的表現に翻訳されて振る舞いが計算され、学習者に提示される。このようなシステムは、モデル作成を通して自己の知識を外化・精緻化する「作ることによる学習」、および試行の当否がモデルの振る舞いとしてフィードバックされる「誤りからの学習」を促進する可能性を持つが、しかし既存のシステムが持つ支援機能は不十分である。すなわち(1)モデルが計算不可能となるような制約違反を含むとき、何のフィードバックも出力できない。また(2)誤ったモデルの振る舞いがどのようにおかしいか/どのように修正すべきかについて、何ら説明能力を持たない[2]。

この問題に対して、研究代表者らは、非単調推論に基づく制約処理により、通常は計算不可能なモデルの振る舞いをもシミュレートでき、かつ誤った振る舞いが物理的に何を意味するかを説明する機能を持つモデリング学習環境を開発した[2]。これにより、学習者は制約違反を気にすることなく、自己の仮説を自由に「モデル」として表現し、その帰結を適切な説明と共に受け取ることのできる「思考実験型の学習」が可能となった。

2. 研究の目的

研究代表者らの先行研究(H26~27年度科研費挑戦的萌芽研究,他)により、本システムは、学習者が自己の仮説を「モデル」として自由に表現し、その帰結を適切な説明と共に受け取る「思考実験型の学習活動」を可能とすることが実証されてきたが、その可能性を十分に活用するためには、なおシステムの機能拡張や教育的評価法の整備が必要であることも判明した。すなわち、多くの学習者にとって(1)モデル作成の負荷が大きい、(2)誤った振る舞いに必ずしも気づけるわけではない、(3)「思考実験型の学習活動」の学習としての特徴が十分に分析されていない、ことが明らかになった。これら三つの課題を解決するため、本研究では、(1)モデル作成における負荷を軽減するための支援機能、(2)モデルに含まれる誤りに応じて誤りを顕在化しやすいシナリオを選択する機能、の実現を目指した。また、(3)新しい学習活動である思考実験型学習が具体的にどのような効果を持つかを測定するための方法論を、実験を通して確立することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、(1)学習者のモデル作成の負荷を軽減するためのアクティブヘルプの実装と検証、(2)誤ったモデルの振る舞いが正しいモデルのそれと区別し難いとき両者の差異を顕在化するようシナリオを変更する機能の実装と検証、(3)思考実験型学習の具体的な効果を測定するための各種テスト法の開発と評価、を実施した。

平成28年度は、これまでに得られているログデータに基づき、モデルの作成段階および各段階における部品の典型的な(正しい・誤った)組合せパターンを予め分析・整理しておくことで(1)の機能を実現した。平成29年度は、これまでに開発した学習シナリオを再整理し、類似の状況を扱う複数の異なるモデルをグループ化しておくことで(2)の機能を実現した。また、大学生を対象とした学習実験によって(1)(2)の機能の有用性を検証した。平成30年度は、それまでに得られた学習ログを分析して学習効果を測定する数種類のテスト法(物理系の分類課題、振る舞い予測課題等を考えている)を開発し、大学生を対象とした試験的利用を通してその妥当性・有用性を検証した。

4. 研究成果

本研究の成果は、大きく二つに分けられる。一つ目は、本モデリング環境(Evans(Error Visualization of Students' Answer))と呼ばれる)において学習者のモデル作成を支援する機能、および学習者の誤りを顕在化する機能を実現し、その有効性を検証したことである。二つ目は、「思考実験型の学習活動」における学習効果の評価法を開発し、様々な学習支援機能を用いたときの学習活動の分析を通して、支援方法と特徴的な学習行動、学習効果の関係の一端を明らかにしたことである。以下、それぞれについて記述する。

4.1 モデル作成の支援機能・モデルの誤り顕在化機能

まず、モデリング学習環境において、特にモデル作成の初期段階における行き詰まりを支援するための「アクティブヘルプ」システムを実装・評価した。行き詰まり原因の多くがモデル部品の数学的・物理的意味や対象系の構造の不理解にあるものの、モデリング課題の文脈から独立した一般的な説明では効果が低いとの知見(予備実験による)に基づき、同システムは課題の文脈を考慮した説明を提供する。説明生成の方式は、これまでに蓄積されたログデータを分析し、課題やモデルの作成段階毎に必要な説明内容を抽出・整理してルールベース化することで、学習者の状態を推定し適切な助言を与えるというものである。また、本システムは、学習者が作成したモデルに対して、誤り箇所を診断し、予め用意された誤りパターンに分類して、それに応じた助言を与える機能をも備えている。与える助言はレベル分けされており、レベルを上げるほど詳しい助言が与えられる。誤りの種類は、ログデータにおけるモデルの誤り

分析に基づき、5カテゴリの局所的關係、および3カテゴリの準局所的關係（それぞれ8つ、5つ、4つの下位カテゴリを持つ）に分類されている。例えば、局所的關係1では初め「 x と y の間の關係を考えてみなさい」と助言され、レベルが上がるごとに「 x が正のとき y は増加しますね？」→「 x と y の間には關係 $I+$ （積分的關係）があります」というように具体的にになっていく。ログデータ中の誤りモデル197例に対して同機能を適用したところ、再現率、適合率ともに89.8%という高水準を示し、その妥当性が示された。さらに、検証実験の結果、同システムの支援を得てモデリング学習を行った被験者は、これ以前に実装された支援機能（学習者作成モデルと正解モデルを比較して異なっている部分を指摘する「差異リスト」）を用いた被験者に比べて、モデルに対するより深い理解を獲得することが示された（実際にモデリングを行った系のみならず、そうでない系（転移課題）に関しても一定の効果が見られた）。一方で、アクティブヘルプはモデル完成度の改善に関しても一定の効果を示したものの、差異リストには及ばなかった（特に、複雑な課題のモデルをアクティブヘルプのみで完成できる被験者は限られていた）。実験の結果、アクティブヘルプと差異リストのそれぞれの効果が明らかとなり、これらを組み合わせて学習支援を行うための基盤的知見が得られた。

次に、モデリング学習環境において、誤り顕在化のためのシナリオ変更機能の実装・検証を行った。先行研究において、誤ったモデルの振舞いが定性的には正しい振舞いと弁別できない場合、シミュレーションや説明が効果を持たない（誤りに気づくことができない）例が見られた。このとき、シナリオつまり物理的状況を変更することで、モデル中の誤りを顕在化することができる場合がある。そこで、これまでの学習シナリオを再整理し、類似の状況でありながら異なるモデルを必要とするものにグループ化しておき、適宜シナリオを変更してモデルの誤りを顕在化する機能を実装した。類似の状況やモデルを蓄積・検索するための機構は、研究代表者らの先行研究で開発された「マイクロワールドグラフ」（物理状況及びモデルの索引付けの枠組み）を利用した。検証実験の結果、同機能の支援を得てモデリング学習を行った被験者は、モデルの誤りがそのままでは顕在化されないときにもそれを顕在化するシナリオを与えられ、元の誤りに気づくことが示された。但し、その効果は一定の前提知識を持つ学習者に限られ、そうでない学習者にはシナリオ変更は必ずしも効果的でないことも示され、今後学習者に適応した支援を行う際の基礎的知見が得られた。

4.2 支援方法と学習活動・学習効果の關係

まず、モデリング学習環境において、思考実験型学習における学習効果の測定法の開発を行った。先行研究では、事後アンケートの結果等から、本環境における活動が学習者の興味や積極性を大きく促進したことが確認されたが、通常の問題解決課題を用いたプレ・ポストテストの間では顕著な成績上昇が見られなかった。これは、本環境の学習効果が、ときに解法パターンの暗記等で対処できる通常の問題解決課題の成績には表れ難い、概念レベルでの理解を促進するものであるからであると考えられる。そこで、本環境における学習目標は、対象系を動的システムとして理解することであるとの視点から、それまでに得られた学習ログを分析して、そのような学習効果を測定するテストを開発した。テストには、部品間の接続關係の認識、フィードバックの同定、動的振舞いの理解、概念モデルでの説明能力を問う問題が含まれる。本テストを、モデリング学習実験の前後にプレ、ポスト、遅延テストとして運用する方法で検証実験を実施した結果、学習後に被験者にインタビューを行って推定した各被験者の理解度とテスト結果とは良い相関を示し、また、それまでの学習実験においてモデリング学習中に「良い（理解度向上に貢献する）学習行動」とされた行動を、テスト得点上位者の多くがとっていたことが確認され、本テストの妥当性・有用性が検証された。

次に、従来、モデリング学習環境において、支援のタイプと学習活動・学習効果の關係が必ずしも明らかにされていなかったことを受けて、次のような実験を実施した。すなわち、学習者の誤りに対する直接的支援である「構造説明（モデルの誤り箇所を指摘）」と、間接的支援である「振舞い説明（モデルの振舞いのおかしさを指摘）」という二種類の支援機能を実装し、それぞれの支援を受けた学習者の活動および学習効果を比較する実験を計画・実施した。その結果、構造説明はモデルの完成を強く促進するものの、理解度向上に寄与するか否かはその使い方に依存すること（適切に用いて理解を深める学習者がいる一方、濫用して理解を伴わずにモデルの完成を目指す学習者が一定数存在する）、振舞い説明はモデルの熟考を促進し、モデルの完成が理解度向上につながるということが明らかになった。また、本システムによる学習効果は一定期間経過後も強く維持されており、概念的理解に貢献したことも示唆された（表1）。本研究は、知的学習支援システムにおける代表的フィードバック手法である直接的・間接的支援を比較する実験を計画・実施し、様々な角度から結果を分析・検証することで、モデリング学習環境における両支援の特徴を事実上初めて比較・検証したものであり、これらの支援手法を活用・評価する際の有用な知見を提供するものと期待される。

表1 モデリング実験テスト得点結果（発表論文〔学会発表〕より引用）

	プレテスト	ポストテスト	遅延テスト	テスト単純主効果	プレ-ポスト	ポスト-遅延	プレ-遅延
構造説明群 (n=8)	15.50 (4.42)	20.75 (4.97)	22.63 (3.77)	F=23.783 p<.01***	t=4.764 p<.01***	t=1.701 p<.10*	t=6.465 p<.01***
振舞い説明群 (n=9)	17.67 (5.31)	19.33 (4.74)	21.67 (6.73)	F=7.039 p<.01***	t=1.604 p>.10	t=2.246 p<.05**	t=3.850 p<.01***

<引用文献>

- [1] Bredeweg, B. & Forbus, K.D.: Qualitative Modeling in Education, *AI Magazine*, Winter 2003, pp.35-46 (2003).
 [2] Horiguchi, T., Hirashima, T. & Forbus, K.D.: A Model-Building Learning Environment with Explanatory Feedback to Erroneous Models, *Proc. of ITS2012*, pp.620-621 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

Horiguchi, T., Masuda, T., Tomoto, T. and Hirashima, T., Comparison between behavioral and structural explanation in learning by model-building, *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 査読有, Vol.14, Issue.6, 2019, online journal につき頁数なし,

DOI: 10.1186/s41039-019-0101-8

黒川 魁、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、軌跡を題材とした数学の表現変換と能動的誤りの発見支援機能を有する学習支援システムの開発と評価、電子情報通信学会論文誌、査読有、Vol.J101-D、No.6、2018、pp.864-873、

DOI: 10.14923/transinfj.2017LEP0023

Horiguchi, T., Masuda, T., Tomoto, T. and Hirashima, T., Behavioral Explanation versus Structural Explanation in Learning by Model-Building, *Proc. of AIED2018*, 査読有, 2018, pp.139-144,

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93846-2_25

Hirashima, T., Shinohara, T., Yamada, A., Hayashi, Y. and Horiguchi, T., Effects of Error-Based Simulation as a Counterexample for Correcting MIF Misconception, *Proc. of AIED2017*, 査読有, 2017, pp.90-101,

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-61425-0_8

Kurokawa, K., Tomoto, T., Horiguchi, T., Hirashima, T., A Learning Support System for Mathematics with Visualization of Errors in Symbolic Expression by mapping to Graphical Expression, *ICE2017 Workshop*, 査読有, 2017, pp.461-470,

Horiguchi, T., Masuda, T., Evaluation of the function that detects the difference of learner's model from the correct model in a model-building learning environment, *Proc. of HCI2017*, 査読有, 2017, pp.40-49,

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58524-6_4

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、

DOI: 10.14923/transinfj.2016JDL8008

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、

DOI: 10.1527/tjsai.A-F44

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、

DOI: 10.14923/transinfj.2015JDP7058

〔学会発表〕(計17件)

古池 謙人、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、プログラミングにおける部品の獲得・拡張活動プロセス、第85回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2019

加藤 由季、堀口 知也、村井 康二、守下 奈美子、淵 真輝、船舶の衝突回避判断において情報源の視点が方略に与える影響、第85回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2019

黒川 魁、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、軌跡を題材とした作図インタフェースから記号文への変換フィードバック機能を有する学習支援システムの開発、第84回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

黒川 魁、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、数学におけるテンプレート方式の解答へ図形フ

ィードバックを可能とする学習支援システムの活動評価、第 83 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

植野 和、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、観測器の操作を通して学習者試行錯誤促す力学学習支援システム、第 83 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

堀口 知也、益田 哲宏、東本 崇仁、平嶋 宗、モデリング学習環境における支援タイプの違いが学習者の振舞いおよび学習効果に与える影響の検証、第 83 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

古池 謙人、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、プログラミング課題を構造化することによる理解状態に適応した課題提示方法の検討、第 83 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

黒川 魁、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、解答テンプレートを用いた軌跡題材とし記号文の図形的フィードバックによる能動誤り発見支援機能を有する学習システムの開発、第 82 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

古池 謙人、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、プログラミング学習を対象とした課題系列の拡張、第 82 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

植野 和、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、速度・重量の観測器による誤り可視化を目的とした力学学習支援システムの開発と評価、第 82 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

平本 千裕、東本 崇仁、堀口 知也、平嶋 宗、Error-Based Simulation に対する力・加速度・運動間 の関係性理解 支援機能 の開発、第 82 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

安田 健汰、林 雄介、堀口 知也、平嶋 宗、Error-Based Simulation のデータ分析に基づく素朴概念修正効果の検証とモニタリング機能の拡張、第 82 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2018

下坂 涉哉、堀口 知也、物理の概念的理解を指向した問題索引付けの枠組みに基づく説明生成器の構築と評価、第 80 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2017

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、第 79 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2017

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、第 78 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会、2016

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、第 30 回人工知能学会全国大会、2016

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-、第 30 回人工知能学会全国大会、2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：平嶋 宗

ローマ字氏名：HIRASHIMA, Tsukasa

所属研究機関名：広島大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10238355

研究分担者氏名：東本 崇仁

ローマ字氏名：TOMOTO, Takahito

所属研究機関名：東京工芸大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10508435

(2)研究協力者

研究協力者氏名：今井 功

ローマ字氏名：IMAI, Isao

研究協力者氏名： Forbus, Kenneth D.

研究協力者氏名： Gentner, Dedre

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。