

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540181

研究課題名(和文)「思考実験型」モデリング学習環境の運用方法論の構築と学習プロセスの分析

研究課題名(英文) The Analysis of the learning process through 'thought experiment' in model-building learning environment and the development of the methodology of its practical use

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) 2,700,000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における学習プロセスを実験的に解明し、その実践的な運用方法論を定式化することを目的とする。我々が開発したモデリング学習環境は、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、かつその物理的意味を説明する能力を持つ。つまり、学習者は自己の仮説を「モデル」として自由に表現し、その帰結を観察することができる。本環境のインターフェース他の機能を実験用に改良し、教材作成を作成した上で、大学生を対象とした試験的利用を行った結果、モデリング学習プロセスおよびその方法論を明らかにすることができ、当初の目的を達成した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to clarify the learning process through 'thought experiment' in model-building learning environment (MBE) and to formulate the methodology of its practical use. The MBE we developed can calculate even the models with constraint violation by using non-monotonic reasoning technique, and explain the physical meaning of the behavior. Therefore, students can freely express their hypotheses as models and observe what happens with appropriate explanation. In this research, we improved the interface and other functions of the MBL and developed teaching materials to conduct an experiment in which university students tried to made models of physical systems. Based on the collected data, we successfully formulated the cognitive model of learning through 'thought experiment' and the methodology of its practical use.

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 モデリング シミュレーション 知識工学

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。同環境では、学習者は与えられた(GUIベースの)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、振る舞いが計算される。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・明確化する「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[3]。

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。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で「思考実験型の学習」が可能となった。

2. 研究の目的

本システムは大きな可能性を持つが、教育的な活用法は未整備である。そこで、(1)効果的な思考実験型学習を実現・展開するための方法論(教材作成や評価法を含む)を確立することが目的となる。また、(2)新しい学習活動である思考実験型学習が学習者の誤概念をどのように変容させるかを実証的に分析・解明することも目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、(1)本モデリング学習環境の改良と機能拡充、(2)システムの試験的・実験的利用のための教材の検討と作成、(3)試験的・実験的利用の実施、(4)その結果に基づく「思考実験型学習」方法論の定式化と概念変容プロセスのモデル化、を実施した。

平成26年度は、既存のプロトタイプインターフェースを改良し、また、データ収集・分析のための機能を追加した。その上で、対象である大学生に適した題材を、すでに実績のある題材を中心として選定し、教材を作成した。既存のプロトタイプは必要最小限のインターフェースのみ備えており、これを学習実験に耐え得るよう強化するとともに、基本的な部品やその組合せ方に関するオンラインヘルプや文法チェックの他、正しいモデ

ル記述との差異を指摘する支援機能を実装した。また、学習実験における種々のデータを収集・分析する機能(モデル変更履歴の記録・再生など)も実装した。

平成26年度および27年度に、大学生を対象として実験的利用を実施し、学習過程の詳細なデータを収集した。これらの結果に基づいて、システムの教育利用のための方法論を定式化し、また、学習プロセスのモデル化を行った。

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を実現し、その有効性を検証したこと(研究目的1に対応)、二つ目は、本モデリング環境における学習活動の分析を通じ、特徴的な学習行動とその効果の解明への手がかりを得たことである(研究目的2に対応)。以下、具体的に記述する。

Evansでは、学習者はモデル部品のセットを与えられ、それらを組み合わせることでモデルを作成する。各モデル部品は定性推論における基本語彙に対応しており、学習者が作成したモデルは定性方程式に翻訳され、定性的にシミュレートされる。作成されたモデル及びそのシミュレーション結果の表示例を図1、図2に示す。

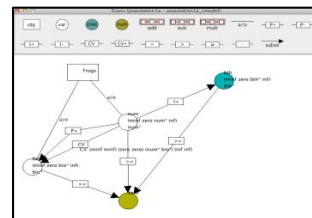


図1 モデリング画面

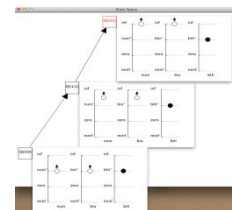


図2 シミュレーション画面

定性的語彙は、学習者の持つ直感的概念になじみやすいもののやはり形式言語であるため、モデルを正しく作成するためには背後にある数学的・物理的な概念の理解が必要となる。すなわち、モデルの作成は学習者にとって必ずしも容易なことではない。

そこで本研究では、モデル作成のためのインターフェースをできる限り直感的なものとすると共に、学習者にとって理解の難しい概念(例えば、二つの変数間の比例関係を表す「p+」、積分関係を表す「I+」など)の意

味をモデリング中に適宜参照できるようにするためヘルプシステムを実装した。ヘルプは図3のようなHTML文書形式であり、「基本操作」「ノード・リンクの意味」「シミュレーション」など7つの項目に分類されている。



図3 ヘルプ画面

さらに、学習者が作成したモデルに含まれる文法上の間違いを検出・指摘するモデルチェック機能を実装した。同機能には自動モデルチェックと手動モデルチェックの二つがある。前者では、モデル作成中に文法誤りを自動検出してその都度学習者に警告/エラーメッセージを提示する。後者では、学習者が任意のタイミングで同機能を起動し、モデル全体の文法チェックを行って検出された誤りに対する警告/エラーメッセージをすべて提示する。これにより、学習者が形式言語によってモデルを作成する際の負担を軽減することが見込まれる。

Evans にこれらの機能を組み込んだシステムを用いて、モデリング学習におけるヘルプシステム及びモデルチェック機能の有効性を検証すると共に、モデリングを通じた学習プロセスを分析するための実験を行った。平成26年度には予備の実験、平成27年度には本実験を行ったが、ここでは後者について述べる。実験の概要を次に示す。

実験目的：

- (1) 支援機能「ヘルプシステム」「モデルチェック機能」の有効性を調べた。これらはチュートリアル（紙媒体）と比較して役に立ったか、どのようなヘルプ項目、警告/エラーが役に立ったか、モデリングの各フェーズにおいてこれらがどう使われていたか、を調べた。
- (2) モデリング学習によってどのような学習効果が得られたかを調べた。被験者の体系的な考え方や動的システムの振る舞いの予測能力の向上に寄与したか等を検証した。

被験者：

理工系の大学生7名を対象とした。

道具：

- ・モデリング学習環境 Evans 被験者がモデリングを行うのに使用した。
- ・QuickTime 被験者のモデリング活動（画面上での操作）を記録するのに使用した。
- ・プレ・ポストテスト 動的システムに関する被験者の理解度を調査するためのテストであり、モデリング学習の前後に行った。

プレ・ポストテストは同じ内容であり、積分関係にあるふたつの量のうち片方の時間推移からもう片方の時間推移を推測させ、そのグラフを書かせるものである。難易度の異なる二問（一つは入力量が一定、もう一つは入力量が時間変化する）を用意した。

・チュートリアル Evans を用いたモデリングの手順を例題を用いて説明した冊子（紙媒体）。

・課題1・課題2 それぞれのモデリングセッションで被験者に解かせる課題。課題1はカエルの個体数、課題2は熱平衡のモデルを作成させた。（内容は付録を参照）

・アンケート ヘルプ、モデルチェック、及びチュートリアルについての使用頻度、役に立ったかなどを調査するアンケート。（内容は付録を参照）

手順：

・一週目

1. 概要説明（約5分） 実験全体の流れを被験者に説明した。

2. プレテスト（約20分） 被験者にプレテストを解かせた。

3. チュートリアルの説明（約20分） 被験者2名につき実験者1名が付き、チュートリアルを用いて Evans によるモデリング方法をシステムを操作しながら説明した。例題として、課題1と同形のモデルを用いた。

4. モデリングセッション1（約45分） 被験者に課題1を行わせた。被験者二人に対して実験者一人が付き、被験者の質問に対して、ヘルプやチュートリアルを見ても分からない部分（主として操作方法）のみ答えた。モデルの作成自体に関わる質問には答えなかった。なお、セッション中の被験者の活動は、システム操作ログ及びビデオとして記録し、分析に用いた。

・二週目

1. チュートリアルの説明（約15分） 被験者2名につき実験者1名が付き、チュートリアルを用いて Evans によるモデリング方法をシステムを操作しながら説明した。例題として、課題2と同形のモデルを用いた。

2. モデリングセッション2（約45分） 被験者に課題2を行わせた。実験者の役割は一週目と同様である。セッション中の被験者の活動は、システム操作ログ及びビデオとして記録し、分析に用いた。

3. ポストテスト（約20分） 被験者にポストテストを解かせた。

4. アンケート（約10分） 被験者に本実験に関するアンケートを配り回答させた。

実験結果

本実験の主要な結果を以下に示す。まず、セッション中のヘルプ/モデルチェック/チュートリアルの使用頻度とモデル完成度の推移を分析した結果、ヘルプシステムの有効性に関しては、ヘルプの参照直後にモデル

の完成度が顕著に上がった事例が4例あり（下がった事例は皆無）、ヘルプが完成度の上昇に貢献したことが示唆された。また、ヘルプの参照回数を項目の種類別に分けて集計すると、表1のように合計参照項目数は「ノード・リンクの意味」と「操作方法」が突出して多いことがわかった。また「操作方法」は見た被験者と見ていない被験者の個人差が大きい、「ノード・リンクの意味」は各被験者ごと合計14セッション中13セッションで見られていたことから、ほとんどの被験者が毎回参照したといえる。また、FAQに関しては一回目より二回目の参照回数が大きく減っており、有効な項目となっていなかったといえる。アンケートで「ヘルプで役に立った項目」を尋ねたところ、「ノード・リンクの意味」を挙げた者が4人、FAQを挙げた者が1人であり、他の項目を挙げた者はいなかった。なお、「ノード・リンクの意味」と「操作方法」の参照は各セッションの序盤から中盤にかけて多く、終盤にはあまり参照されなかったのに対し、「シミュレーション」は中盤から終盤にかけて参照頻度が増加する傾向が見られた。

表1 各被験者の参照項目数

合計	操作方法	ノード・リンクの意味	シミュレーションの見方	FAQ	その他	合計
1	12	7	3	7	8	37
2	0	4	5	5	5	19
3	0	3	0	0	3	6
4	6	5	0	0	9	20
5	18	7	2	1	5	33
6	12	12	4	1	4	33
7	0	1	0	0	1	2
合計	48	39	14	14	35	150

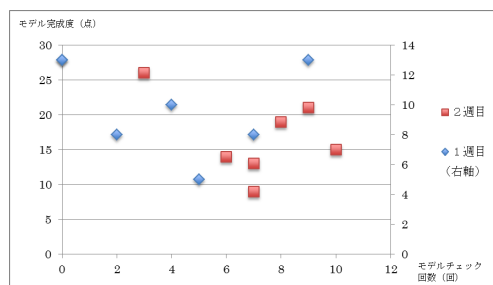


図4 モデルチェック総回数と完成度の関係

モデルチェック機能の有効性に関しては、モデルチェック直後にモデルの完成度が顕著に上がった事例が3例あり（下がった事例は皆無）、同機能が完成度の上昇に貢献したことが示唆された。また、シミュレーション実行直前にモデルチェックを行う事例が非常に多く、同機能がモデリング学習活動において有用であることが示唆された。また、各被験者におけるモデルチェックの総回数と最終的なモデル完成度との関係を図4に示す。モデルチェック総回数が少なくかつモデル完成度が高いケース（図の左上）は、被験者がシステムを十分理解しており支援機能があまり必要とならなかったと考えられる。これらを例外として除くと、残りのケースでは

モデルチェック総回数が増えるに従って完成度も上昇しており、同機能がモデルの完成度上昇に貢献したと考えることができる。

プレ・ポストテストについては、ポストテストの成績がプレテストの成績より若干向上したものの、顕著な差は見られなかった。また、各被験者におけるテスト成績とモデル完成度との間には正の相関が示唆されたものの、テスト成績の高い被験者はプレテストにおいてすでに好成績を示していたため、モデリング学習の効果は明らかではなかった。これは、本実験では、プレ・ポストテストがセッションの課題に対する遠転移課題のみから成っており、難易度が高すぎたことによると考えられる。

以上をまとめると、本研究において実現した支援機能であるヘルプシステム及びモデルチェック機能は、それぞれモデリングの過程において学習者により適切に用いられることができ、その支援はモデル完成度の向上に貢献することが明らかとなった。また、それぞれの機能がモデリング中のどのようなタイミングで使用され効果を発揮したかを分析することにより、学習者がモデリング活動をどのように進めていくのかについて、その一端を明らかにすることができたといえる。また、各セッション・各被験者において、モデルの完成度はいずれも時間軸に沿って徐々に向上し、最終的には正しいモデルもしくはそれに近いモデルにまで到達していることから、本実験で用意した課題はいずれも適切な難易度を持つものであったことが示唆される。動的システムに関する理解度を測るプレ・ポストテストについては、本実験では明確な学習効果を見ることができなかった。近転移課題を用いるなどして、これを明らかにすることは今後の課題である。これらのことから、本研究は「思考実験型の学習」実現のための方法論の確立に十分に寄与するものとなっており、またモデリング学習における学習プロセスの一端を明らかにしたものである。よって、本研究の目的は達成されたと考えられる。

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 3件)

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, 2016 (採録決定) Horiguchi, T., Toumoto, 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, 2015 (online Journal)

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, 2014, pp.1-13

〔学会発表〕(計 12 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 年 6 月 6 日~9 日, 北九州国際会議場(福岡県)(発表決定)

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(SIG-ALST), 2016 年 3 月 6 日~7 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(広島県)

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 of 23rd International Conference on Computers in Education (ICCE2015), 2015.11.30-12.4, Hangzhou (China)

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 of 23rd International Conference on Computers in Education (ICCE2015), 2015.11.30-12.4, Hangzhou (China)

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, 2015 年度教育システム情報学会第 40 回全国大会(JSiSE2015), 2015 年 9 月 1 日~3 日, 徳島大学(徳島県)

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., The Effect of Problem Sequence on Students' Conceptual Understanding in Physics, 17th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2015), 2015.8.2-7, Los

Angeles (USA)

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, 第 29 回人工知能学会全国大会, 2015 年 5 月 30 日~6 月 2 日, はこだて未来大学(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, 第 73 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会(ALST-73), 2015 年 3 月 5 日~6 日, 湯の風 HAZU(愛知県)

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., Structured Explanation Generation for Conceptual Understanding in Physics, Workshop of 22nd International Conference on Computers in Education (ICCE2014), 2014.11.30-12.4, Nara Prefectural New Public Hall (Nara)

Horiguchi, T., Tomoto, T. & Hirashima, T., A Framework of Generating Explanation for Conceptual Understanding based on 'Semantics of Constraints', 22nd International Conference on Computers in Education (ICCE2014), 2014.11.30-12.4, Nara Prefectural New Public Hall (Nara)

Hayashi, N., Shinohara, T., Yamamoto, S., Hayashi, Y., Horiguchi, T. & Hirashima, T., Scaffolding for Self-overcoming of Impasse by Using Problem Simplification, 22nd International Conference on Computers in Education (ICCE2014), 2014.11.30-12.4, Nara Prefectural New Public Hall (Nara)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

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)研究分担者

東本 崇仁 (TOMOTO, Takahito)

東京工芸大学・工学部・助教

研究者番号：10508435

(4)研究協力者

今井 功 (IMAI, Isao)

千葉市立花園中学校・教頭

(5)研究協力者

Kenneth D. Forbus

Northwestern University・Professor

(6)研究協力者

Dedre Gentner

Northwestern University・Professor