

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23501107

研究課題名(和文)「作ることによる学習」と「誤りからの学習」を統合するモデリング学習環境の開発

研究課題名(英文)The development of a learning environment that integrates 'learning by modeling' and 'learning from errors'

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) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：学習者が対象系のモデルを作成することを通じた「作ることによる学習」と、誤った考えに対するフィードバックを受け取って仮説を修正する「誤りからの学習」を統合するモデリング学習環境を開発し、その効果を予備実験によって検証した。誤り(制約違反)を含むモデルに対する頑健な計算能力を持つシミュレータ(ロバストシミュレータ)、モデルのおかしな振る舞いの物理的意味を物理世界オントロジー(制約の意味論)に基づいて診断するための知識ベースの実現により、二つの学習方略の長所を兼ね備えたモデリング学習環境を世界で始めて実現し、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We have implemented a model-building learning environment which integrates 'learning through modeling' and 'learning from errors,' and evaluated its effectiveness. Two key technologies are developed: (1) the robust simulator which can calculate the behavior of an erroneous model even if the model includes constraint-violation, and (2) the semantics of constraints which is a systematic description of physical meanings of constraints and provides heuristics for explaining the unnatural behavior of models. These technologies enabled the new model-building learning environment which combines the merits of both 'learning through modeling' and 'learning from errors' pedagogy. A preliminary experiment suggested it is promising in learning science.

研究分野：総合領域

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：モデリング学習環境 定性推論 誤りへの気づき/修正 ロバストシミュレータ 制約の意味論

1. 研究開始当初の背景

(1) 様々な現象の背後にある法則や原理を探究・理解する能力を養うことは、科学教育の最も重要な目的の1つである。これを達成するための1つの方法として、学習者に対象系の振る舞いを説明するモデルを明示的に作成させる「モデリング学習環境」が数多く開発され、教育現場においてその有効性が確認されている。一般に、モデリング学習環境において学習者はモデル部品のセットを与えられ、それらを組合せてモデルを作成する(通常、GUIベースの環境が提供される)。各モデル部品は何らかの形式言語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形式的表現に翻訳された上で計算され、振る舞いがシミュレートされる。従来、形式言語としては専ら数学(微分方程式)が用いられてきたが、近年、系のより概念的な側面を捉えるため定性推論の語彙に基づき定性シミュレーションを行うシステムも開発されている。

(2) これらのシステムの利点は、対象のモデリングを通して自己の知識を明確化する「作ることによる学習」を支援できること、及び学習者の試行の結果がモデルの振る舞いとして明示的にフィードバックされ「誤りからの学習」を促進することである。すなわち、学習者は作成したモデルの成否を見ながら試行錯誤的にモデリングを繰り返すことにより、領域の基本概念を探究・理解することができる。一方、幾つかの問題点も指摘される。まず、各モデル部品は厳密に数理科学的概念(速度/加速度、比例関係/積分的関係など)に対応しており、それらを形式言語の文法に従って適切に組合せることは必ずしも容易でない。また、誤ったモデルの振る舞いがシミュレートされたとき、それがどのようにおかしいか/どのように修正すべきかを考察する作業は学習者自身又は教師に任されており、システムは何ら説明能力を持たない。既存のシステムが提供する支援は専ら問題、すなわち「作ることからの学習」に伴う困難を扱っており、対象とする形式言語の文法に従うモデルを作成するためのガイド、すなわちチュートリアルやオンラインヘルプ、モデルの文法チェック機構などが実装されている。しかし、問題を扱うシステムは皆無である。モデルに含まれる誤りの分析と修正は学習者、ときに教師にとっても困難な作業であり、何らかの支援が望まれる。モデリング学習環境の主目的の1つが「誤りからの学習」である以上、この問題への対処は本質的である。

2. 研究の目的

(1) 上記の問題の難しさは次の2つに分けられる。1つは、(a)学習者のあらゆる誤りを予想してその説明を用意することの困難であり、もう1つは、(b)誤ったモデルは

ときに計算不可能-制約を充足する解を持たない-となりフィードバック自体を生成できないことである。この問題に対して、申請者は先行研究においてError-based Simulation (EBS)の枠組みを提案し、任意の誤ったモデルの振る舞いをシミュレートし、かつその説明を生成する手法を開発した。EBSでは「誤ったモデルの振る舞いが正しいモデルのそれとどのような差異を持つか=正しい現象が満たすべきどのような制約に違反するか」に注目して説明を生成することにより、困難(a)を解決する(対象系の正しい振る舞いは有限個であるため、そのような制約群を用意しておくことは可能である)。また、モデルに含まれる制約群の一貫性を非単調推論により解析することによってモデルの計算可能性をチェックし、計算不可能なときはその原因となる制約を同定・緩和することによってシミュレーションを生成する。これにより困難(b)が解決される。例えば図1(上)は、床上に置かれた物体に働く力は重力のみであると誤ったモデルである。このとき「物体に働く合力は重力に等しい(制約1)」「合力による下向き加速度により物体は $x < 0$ の次状態を持つ(制約2)」「物体と床は重なり得ないため常に $x \geq 0$ である(制約3)」という3

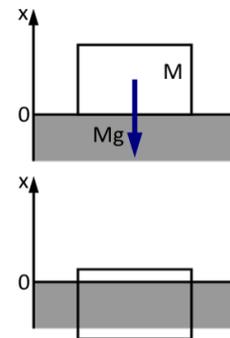


図1 制約処理の例

つの制約は同時には充足され得ないことがEBS生成機構によって検知される。そして、制約3が物理世界において最も基本的な制約-それに違反する振る舞いは最も不自然なものとなる-であるとの知識を用いて、同制約を緩和したシミュレーションが生成される(図1(下))。これを見た学習者はモデルに含まれる誤りを強く意識し、修正へのヒントを与えられることになる。

(2) EBSの実現には複雑な制約解析機構、及び制約群の物理的意味に関する詳細な知識表現が必要であるため、従来は対象とする領域や問題を限定した上で、個別にEBS生成機構や知識を作り込むことで実装してきた。本研究では同手法をモデリング学習環境へ拡張することにより、任意の誤ったモデルの振る舞いをシミュレートし、かつその説明を生成する機能を持つモデリング学習環境の構築を試みる。すなわち、その目的は、(A)EBSの手法によってモデリング環境における上述の適応的フィードバック機能を実現すること、(B)説明生成に必要な知識ベース-対象領域の制約群の物理的意味の記述-の構築方法を明らかにすることである。

(3) 本研究は、EBSに関する申請者の従来の

研究成果を受けたものではあるが、モデリング学習環境へ適用するため汎用的なEBS生成機構を新たに設計した上で、その最初のプロトタイプを実装するものである。また、基盤となるモデリング学習環境自身も新たに構築する。従って、開発した各機能及びそれらを統合したシステムの動作を検証することが研究の中心課題となり、システムの実用性や学習効果を実証する次段階に先立つ準備段階として位置づけられる。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究で構築するシステムは、GUIによりモデル部品を組合せてモデルを作成するモデル作成インターフェース、作成されたモデルを内部の形式表現に翻訳するモデル翻訳器、形式表現されたモデルの計算可能性をチェックした上で(必要ならば制約緩和を行い)その振る舞いを計算するロバストシミュレータ、学習者の作成したモデルと正しいモデルを照合して両者の差異を同定するモデル照合器、両者の差異に基づき作成されたモデルの振る舞いを説明する説明生成器、モデルを構成する制約群の物理的意味を格納した知識ベース、対象系とその正しいモデル(それが充足すべき制約群)を問題作成者が記述するためのシナリオ作成支援ツールから成る。平成23年度は～を、平成24年度は～を実装する。平成25年度は前年度までに開発したモジュールを統合して動作検証を行いながらの仕様を決定し、これを実装する。

(2) 第一段階として、まずモデル作成インターフェース、モデル翻訳器、及びロバストシミュレータの実装を行う。これらの設計には基盤となる形式言語を決定する必要があるが、本システムは初・中等教育を対象とするため、系の概念的理解に適した定性推論の語彙を採用し、定性シミュレーションを行うものとする。

モデル作成インターフェース：定性推論に基づくモデリング学習環境には幾つかの開発事例があり、ユーザビリティに関してそれぞれ好評価が報告されているため、モデル作成インターフェースの設計はこれらを踏襲して行う。すなわち、学習者は対象系を構成する基本的オブジェクトとその属性、及びそれらの間の関係をグラフ(概念マップ)状に描くことで、直感的にモデルを作成することができる。仕様の詳細を決定した上で実装を行う。また、使用のためのオンラインヘルプ及びチュートリアルも併せて作成する。開発言語は豊富なGUI機能を持つJavaとする。

モデル翻訳器：作成されたモデルの各部品はそれぞれ定性推論の語彙に直接対応するため、グラフのエッジ(関係)を中心として比較的簡単に定性方程式表現を抽出することができる。開発言語はJavaとするが、出力する定性方程式はロバストシミュレータ

により可読な形(LispのS式表現)とする。

ロバストシミュレータ：本研究では、標準的な定性シミュレーション手法であるQSIMを用いる。ロバストシミュレータは、まず(現状から)QSIMの状態遷移規則を用いて次状態の計算を試みる。次状態が存在すればそれを系の振る舞いとして出力する。次状態が存在しなければ定性方程式が過制約であることを意味するため、その原因となる制約を緩和した上で次状態を計算する。過制約の原因同定を効率的に行うため、推論の過程はすべてTMS(Truth maintenance system)に記録され必要に応じて参照される。ここで注意すべきことは、通常、緩和の候補となる制約は複数存在し、どれを緩和するかによってモデルの振る舞いが大きく異なることである。つまり、その選択には教育的配慮が必要であり、そのための知識が後述の知識ベースから提供される。複雑な推論系の開発に適した人工知能言語であるLispを用いる。

(3) 第二段階として、モデル照合器、説明生成器、及び知識ベースの実装を行い、最終段階では、それまでに開発したモジュールを統合して動作検証を行いながら、シナリオ作成支援ツールの仕様を決定してこれを実装する。

モデル照合器：「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」を説明するため、EBSでは「それが正しいモデルとどのような差異を持つか=正しい現象が満たすべきどのような制約に違反するか」に注目する。モデル照合器は、学習者の作成したモデルを対象系の正しいモデルと照合してこのような情報を抽出する。具体的には、比較すべき2つのモデルを制約グラフ(オブジェクトの属性量をノード、それらの関係をエッジとする)とみなしてパターン照合を行い、不足制約(正しいモデルにあって誤ったモデルにはない制約)や誤り制約(正しいモデルにあるが誤ったモデルでは誤記されている制約)などを同定する。照合の精度を上げるため、モデル中の属性量や関係に適宜重みを与えることも検討する。これらの制約は、物理的に正しい制約の物理的意味を格納した知識ベースを参照することでその「おかしさ」の含意を推定することができる。

説明生成器：モデル照合器の出力した差異情報(「おかしさ」の含意を含む)に基づき、学習者に提示する説明を生成する。用意された言語テンプレートのセットを用いて簡単な自然言語による説明文を出力する。

知識ベース：物理系のモデルを構成する種々の制約群の物理的意味を格納し、ロバストシミュレータによる制約緩和処理やモデル照合・説明生成器における説明生成に必要な情報を提供する。そのような制約群を認識論的重大性の違いによって階層的に体系化した研究代表者らの先行研究(例えば合力に

比例した加速度が生じるのは「物理法則レベル」における制約であるのに対し、物体同士が重ならないのは「(固体としての)存在論レベル」における制約であるため、人間によってより重大(違反時の「おかしさ」が大きい)である)に基づいて構築を行う。

システムの統合とシナリオ作成支援ツール: ~ のモジュールを統合した上でシステムとしての動作検証を行う。動作検証に用いるためのシナリオを、初等力学を対象として10個程度作成する。シナリオはモデル化すべき対象系とその正解モデルから成り、正解モデルにおける各制約は知識ベース中の「制約クラス」(制約の物理的意味とその認識論的重大性)に対応付けられ、それに基づく説明や教育的含意及びその重要度が付されている。作成したシナリオを用いて動作検証・調整を行う。上記のシナリオを作成するためには、正解モデルの各制約を知識ベース中の適切な制約クラスに対応付け、その情報を参照しながら各制約に関する説明や教育的含意、及びその重要度を記述していかなければならない。一般の教材作成者がこれを行うのは困難であるため、シナリオ作成をガイドし、各段階において知識ベース中の適切な情報を参照できるブラウザを提供するシナリオ作成支援ツールの設計・実装を行う。

#### 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 23 年度は、第一段階において予定した3つのモジュール、モデル作成インターフェース、モデル翻訳器、ロバストシミュレータの実装を完了した。さらに、これらの実装が予定よりも早く完了したため、引き続きモデル照合器および説明生成器の実装を開始し、実装をほぼ完了した。各モジュールの単体テストの結果は良好であり、これらを統合しての動作検証においても、問題ない動作を確認した。また、の開発にあたり、当初予定にはなかったが、米 Northwestern 大学 K.D. Forbus 教授の協力を得て、SME (構造写像エンジン) を組み込み、効率性・汎用性を大幅に改善した。同エンジンは、人間の類推のモデルに基づき、一対の述語論理式系を高次の関係性に注目して比較するものであり、これを利用することでより頑健なモデルの照合が可能となった。

(2) 平成 24 年度末までに、第二段階において予定した3つのモジュール、モデル照合器、説明生成器、モデルを構成する制約群の物理的意味を格納した知識ベースの実装を完了し、各々の単体テストを行って良好な結果を得た。また、上述の通り、モジュールの実装に SME (構造写像エンジン) を用いた結果、(検証作業にやや時間を要したものの)学習者が作成したモデルを正解モデル

と照合する際の効率性・汎用性が大幅に改善され、同様の照合を行う既存のシステムに比してアドバンテージを持つことを確認した。

(3) 平成 25 年度は、第二段階までに開発した6つのモジュールをシステムとして統合した。また、最終段階において予定したモジュール、シナリオ作成支援ツール設計・実装を行い、検証を完了した。これを用いて初等力学を対象とした10個の検証用シナリオを作成し、統合システムの動作検証を行い、良好な結果を得た。さらに、初等力学を対象とした6つの学習用シナリオを作成し、大学生数名を被験者として、システムによる学習効果を検証する予備実験を実施した。実験の結果、本システムが「作ることによる学習」および「誤りからの学習」において当初の狙い通りの効果を持つことを示唆するデータが得られた。

(4) 本研究では、「作ることによる学習」と「誤りからの学習」の統合を指向して、学習者が自由に(制約違反の心配をすることなく)自らの仮説をモデルとして表現し、その振る舞いの物理的意味を説明することによって誤りへの適切なフィードバックを返す機能を持つ、世界初のモデリング学習環境を実現した。また、それが有用な学習支援となり得ることを示唆する(予備的ではあるが)実証データを得た。

「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」に関する説明能力を持つモデリング学習環境は、国内外を通して現在まで存在しない。しかし、同環境の主目的の1つが「誤りからの学習」の促進である以上、そのような支援の実現は本質的である。本研究の成果は、その実現のための具体的な手法を与え、システムの機能として実装した世界初のものであり、高い独創性を持つと言える。また EBS が「誤りからの学習」においてきわめて高い学習効果を持つことは申請者のこれまでの一連の研究で実証済みであり、モデリング学習環境における教育的フィードバックとしても大きな効果が期待できる。すなわち、本研究の成果は工学的見地からも教育学的見地からも、先進性・独創性・有用性において大きな意義を有するものである。

これらの研究成果は、国内外の研究会・国際会議において発表済みである。これらの成果を踏まえ、本システムを実用に耐えるものへと改良し、教育現場において運用する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25件)

- Horiguchi, T., Imai, I., Toumoto, T. & Hirashima, T., Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation, Journal of Educational Technology & Society, 査読有, 掲載決定, 2014
- 東本 崇仁、今井 功、堀口 知也、平嶋 宗、誤りの可視化による階層構造の理解を指向したコンセプトマップ構築学習の支援環境、教育システム情報学会誌、査読有、Vol.30、No.1、2013、pp.42-53
- 篠原智哉、山元翔、平嶋宗、力学を対象とした問題理解過程の外化環境の設計・開発、教育システム情報学会論文誌、査読有、Vol.30、No.1、2013、pp.20-31
- 水田曜平、平嶋宗、舟生日出男、概念マップの作成を促進するヒントの自動生成とその実験的検証、教育システム情報学会論文誌、査読有、Vol.30、No.1、2013、pp.32-41
- Takata, K., Morikawa K., Hirashima, T., Error Analysis for Tablet User Interface Transfers Based on Operational Knowledge Interference, Proc. of HCII2013, 査読有, 2013
- Yoshida, K., Osada, T., Sugihara, K., Nino, Y., Shida, M., Hirashima, T., Instantaneous Assessment of Learners' Comprehension for Lecture by using Kit-Build Concept Map System, Proc. of HIMI/HCII2013 Part III (Springer LNCS8018), 査読有, 2013, pp.175-181
- Yamamoto, S., Kanbe, T., Yoshida, Y., Maeda, K., Hirashima, T., Learning by Problem-Posing with Online Connected Media Tablets. Proc. of HIMI/HCII2013 Part III (LNCS 8018), 査読有, 2013, pp.165-174
- Horiguchi, T., Hirashima, T. and Forbus, K.D., A Model-Building Learning Environment with Error-based Simulation, Proc. of QR2012, 査読有, 2012
- Horiguchi, T., Hirashima, T. and Forbus, K.D., A Model-Building Learning Environment with Explanatory Feedback to Erroneous Models, Proc. of ITS2012 (Springer LNCS7315), 査読有, 2012, pp.620-621
- Toumoto, T., Imai, I., Horiguchi, T. & Hirashima, T., Error-based Simulation for Learning of Meaning of Class Structure by Concept Mapping, Proc. of ICCE2012, 査読有, 2012
- 山元翔、脇浩美、平嶋宗、問題変更演習への近傍選択課題の導入とその実験的評価、教育システム情報学会論文誌、査読有、Vol.29、No.4、2012、pp.201-206
- 大川内祐介、上野拓也、平嶋宗、派生問題の自動生成機能の開発とその実験的評価、人工知能学会論文誌、査読有、Vol.27、No.6、2012、pp.391-400
- Yamamoto, S., Kanbe, T., Yoshida, Y., Maeda, K., Hirashima, T., A Case Study of Learning by Problem-Posing in Introductory Phase of Arithmetic Word Problems, Proc. of ICCE2012, 査読有, 2012, pp.25-32
- Sugihara, K., Osada, T., Nakata, S., Funaoi, H., Hirashima, T., Experimental Evaluation of Kit-Build Concept Map for Science Classes in an Elementary School, Proc. of ICCE2012, 査読有, 2012, pp.17-24
- Kurayama, M., Murakami, M., Hirashima, T., Analysis of Lesson using Interactive Environment for Learning by Problem-Posing in Elementary School Arithmetic, Proc. of E-LEARN2012, 査読有, 2012, pp.1511-1517
- Sugihara, K., Nino, Y., Moriyama, S., Moriyama, R., Ishida, K., Osada, T., Mizuta, Y., Hirashima, T., Funaoi, H., Implementation of Kit-Build Concept Map with Media Table, Proc. of WMUTE2012, 査読有, 2012, pp.325-327
- Horiguchi, T. and Hirashima, T., Preliminary Evaluation of an Intelligent Authoring System for 'Graph of Microworlds', Proc. of ICCE2011, 査読有, 2011
- Toumoto, T., Imai, I., Horiguchi, T. & Hirashima, T., Error-based Simulation in Dynamics and its Evaluation in Junior High School, Proc. of ICCE2011, 査読有, 2011, pp.81-85
- 舟生日出男、石田耕平、福田裕之、山崎和也、平嶋宗、概念マップ作成方式の違いによる記憶効果の差異の比較、日本教育工学会論文誌、査読有、Vol.35、No.2、2011、pp.125-134
- Hirashima, T., Kurayama, M., Learning by Problem-Posing for Reverse-Thinking Problems, Proc. of AIED2011, 査読有, 2011, pp.123-130
- 21 Hirashima, T., Yamasaki, K., Fukuda, H., Funaoi, H., Kit-Build Concept Map for Automatic Diagnosis, Proc. of AIED2011, 査読有, 2011, pp.466-468
- 22 Hirashima, T., Yamasaki, K., Fukuda, H., Funaoi, H., Diagnosable Concept Map toward Group Formation and Peer Help, Proc. of CSCL2011, 査読有, 2011, pp.880-881
- 23 Funaoi, H., Ishida, K., Hirashima, T., Comparison of Kit-Build and Scratch-Build Concept Mapping

- Methods on Memory Retention, Proc. of ICCE2011, 査読有, 2011, pp.539-546
- 24 Shinohara, T., Yamamoto, S., Hirashima, T., Kit-Build External Expression of Problem Solving Process in Physics Learning, Proc. of ICCE2011, 査読有, 2011, pp.70-75
- 25 Mizuta, Y., Hirashima, T., Funaoi, H., Support for Concept Map Building based on Learner's Building History, Proc. of ICCE2011, 査読有, 2011, pp.76-80

〔学会発表〕(計3件)

堀口知也、東本崇仁、平嶋宗、モデルの誤りに関する説明能力を持つモデリング学習環境の開発、第67回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会(ALST-67) 2013年3月4日、高知  
東本崇仁、今井功、堀口知也、平嶋宗、階層構造の意味的理解のための誤りへのフィードバック環境の設計と評価、教育システム情報学会第37回全国大会、2011年8月31日、広島  
東本崇仁、今井功、堀口知也、平嶋宗、生物領域におけるコンセプトマップ構築学習のための誤りの可視化、第62回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会(ALST-62) 2011年7月29日、千葉

〔図書〕(計1件)

矢野米雄、平嶋宗 他、ミネルヴァ書房、教育工学とシステム開発、2012、217

〔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;jsessionid=39477B2B4B5E6A3E0A1A4B21084360EB](http://kuid.ofc.kobe-u.ac.jp/InfoSearch/html/researcher/researcher_Y5b0npqDd0_0-1BQ3mbe3w_ja.html;jsessionid=39477B2B4B5E6A3E0A1A4B21084360EB)

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