

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 — 合成モデリング技法によるアプローチ —

A model-based indexing framework of physics problems and a method of the authoring
- Compositional modeling approach -

堀口 知也*¹
Tomoya HORIGUCHI

平嶋 宗*²
Tsukasa HIRASHIMA

*¹ 神戸大学大学院海事科学研究科 *² 広島大学大学院工学研究科
Grad. School of Maritime Sciences, Kobe University Dept. of Information Engineering, Hiroshima University

Abstract. In ITS (Intelligent Tutoring System), which aims at adaptivity to students' understanding, it is essential to index the problems with the model of problem-solving. Especially in science education, the modeling process in which a given situation is formulated into a set of constraints should be focused on. Graph of Microworlds (GMW) is a framework for indexing a set of microworlds (which means physics problems) based on the modeling process of phenomena. GMW makes it possible to compare the problems based on the differences of their situations and models, which is important to promote *learning with model-progression*. Such capability comes from indexing the situations with their *modeling assumptions* which constrain the viewpoint in modeling the system and the behavioral range of it to be considered. This paper presents how GMW helps students learn domain theory progressively and how to help an author describe a GMW. A prototype of GMW-authoring is also introduced.

1. はじめに

問題演習を通じた学習においては、問題群を学習文脈に応じて系列化することが必要である。そのためには各々の問題を適切に特徴付けておかねばならない。特に、学習者の理解状態への適応を指向する ITS (Intelligent Tutoring System) においては、問題解決のモデルに基づく特徴付けが不可欠である。これは、主として解法プロセス—定式化された制約の組から解を導出する過程—に注目した特徴付けと、モデル化プロセス—所与の状況を定式化して必要な制約の組を生成する過程—に注目した特徴付けとに分けられる。例えば、代数計算やデータベースへのクエリ生成などを対象とする場合、そこで扱われる概念は比較的明快であり、制約操作が主たる学習対象となる。すなわち、解法プロセスに基づく特徴付けで十分である。一方、算数の文章題や物理問題などでは、所与の状況を構成する概念自体(速度、質量、作用・反作用など)の理解がしばしば難しく、それらを用いて対象のモデルを生成する過程が重要となる。このような場合、モデル化プロセスに基づく特徴付けがなされねばならない。

マイクロワールドグラフ (Graph of Microworlds: GMW) [Horiguchi 2005, 東本 2008]は、物理の問題群を対象のモデル生成プロセスに基づいて特徴付けるための枠組みである。物理問題においては、学習者に領域理論のどのような要素(概念や法則・原理)を学ばせたいかという観点から、対象とする系を選択しその振る舞いの範囲を限定する。これをマイクロワールド (microworld)と呼ぶ。各々のマイクロワールド(即ち問題)は、所与の状況に領域理論が適用されモデルが生成されるプロセスによって特長付けられる。

同枠組みの特長は、問題間の比較を、それらが扱う状況及びモデルの差異に基づいて行えることである。このことにより、状況が類似しているが異なるモデルを必要とする問題系列を提供することができ、「モデルの進化」による学習 [White 1990,

1993]が可能となる。例えば、床上の物体の運動を対象とした場合、床の表面が滑らかな状況下では等速直線運動のモデルを用いれば良いのに対し、床の表面が粗い状況に変化したとき、摩擦力及びそれに起因する等加速度直線運動のモデルへと、先のモデルを発展させる必要が生じる。このような学習は、様々な状況下において現象を適切にモデル化する能力、即ち領域理論の体系的な理解を促進することが知られている。

GMW では、このような問題間の比較を可能にするため、扱う状況をモデル化仮定 (modeling assumption) [Addanki 1991, Falkenhainer 1991, Levy 1997]の組として記述する。モデル化仮定とは、モデル化の際に系を捉える視点(考慮すべき物理属性の同定など)や考慮する振る舞いの範囲(法則の適用条件など)に関する制約であり、モデルが成立するための系やその状態に関する条件を表す。ここで、モデル化仮定は単なる境界条件ではなく、モデル化における種々の意志決定を概念化したものである。状況をモデル化仮定に基づいて記述することは、即ち、現象をどのような状況としてモデル化したか(例えば、摩擦力を考慮するか/しないか)を明示することであり、特に、類似の状況に対するモデル間の比較に役立つ。筆者らは、物理系のモデル化において用いられるモデル化仮定を分類・整理し、それが GMW における各々の問題を特徴付けるための「概念ツール」として有効に働くことを示した [Horiguchi 2008]。

GMW を構成する問題群の作成及びそれらの特徴付けは、しかし必ずしも容易でない。そこで筆者らは、GMW の記述を半自動化する支援手法をも提案した [Horiguchi 2008, 2009]。

本稿では、先ず、GMW を用いた物理問題の特徴付け及びそれによって可能となる学習支援について述べ、次に、従来の ITS における物理問題の特徴付けの方法と比較する。さらに、合成モデリング技法 (compositional modeling) [Falkenhainer 1991, Levy 1997]を用いた GMW の記述支援手法についても述べる。

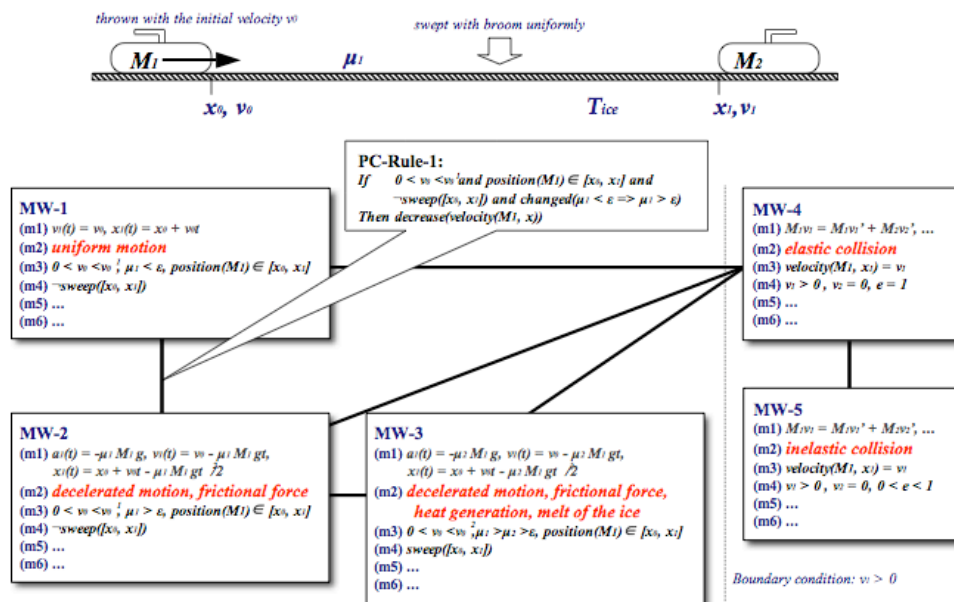


図1 マイクロワールドグラフの例

2. マイクロワールドグラフ

2.1 マイクロワールドグラフによる学習支援

初等力学を対象領域とする GMW の例を図1に示す。各々のマイクロワールドは扱う状況とそのモデル、及びその生成プロセスによって特徴付けられており、そこで必要となる概念や法則・原理、モデルを用いた解法などが学習項目となる。また、類似した状況を扱う異なるモデルを持つ（必要とする概念や法則・原理が異なる）マイクロワールド間はエッジで結合され、各々における状況の差分とモデルの振る舞いの差分とを関係付けるパラメータ修正規則[Addanki 1991]が付されている。これは、一方のモデルが他方のモデルの（状況の摂動に伴う）何らかの発展として得られることを表し、このとき、両者は「教育的意味を持つ」関係にあるという（現在、一般化／特殊化、部分／全体、精密化の三つの関係を考慮している）。GMW において一連の学習項目を学習させる際には、可能な限りこのような関係を持つマイクロワールド系列に沿うことが望ましい。

例えば、MW-1 において「等速直線運動」を習得した学習者に対し、それに隣接するノードを調べることで、次に学ぶべきマイクロワールドの候補として MW-2 及び MW-4 が同定される。また、MW-1 から MW-2 への移行を支援するため、両者の差分に対応するパラメータ修正規則を用いて、摩擦 μ_1 が無視できなくなったときの M_1 の速度を求めるタスクやその説明を生成することができる（同タスクでは、MW-1 のモデル（摩擦を無視する）に基づく解法では説明できない振る舞いの差分が生じるため、MW-2 のモデルの必要性が強く示唆される）。

2.2 マイクロワールドグラフの特長

科学教育を対象とした従来の ITS（例えば[Murray 2003, VanLehn 2005]）では、主として問題の解法プロセスに焦点が当てられており、物理的な状況及び領域理論の概念化は必ずしも十分でなかった。解法プロセスは、所与の物理属性の値から所望の物理属性の値を導出する過程のネットワーク（根拠となる法則・原理を含む）として表現され、これによって各々の問題は特徴付けられる。解がその法則・原理からどのように計算されたかに関する説明は生成できるものの、それがなぜ適用可能である

のか、状況が変化したとき解法がどのように変化するかを説明することができない。

これに対して、GMW では、マイクロワールドが扱う状況をモデル化仮定によって記述する。その上で、現象のモデル化プロセス—その状況に特定の法則・原理を適用してモデルを生成する過程—によって各々のマイクロワールド（即ち問題）が特徴付けられる。モデル化仮定は、ある現象をどのような状況としてモデル化したかを明示するものであり、そのモデルがなぜ成立するのか、すなわちその法則・原理がなぜ適用可能であるのかを説明することができる。また、ある現象は、どのような振る舞いに注目するかに応じて様々な

モデル化することができるため、あるモデル化仮定は、しばしばそれと背反する他のモデル化仮定（後者は、前者に基づくものとは定性的に異なるモデルを導く）と共にグループ化することができる。これにより、状況が変化したときモデル及び解法がどのように変化するかを説明することができる。

従って、モデル化仮定は、様々なモデルやそれらの間の差異を特徴付ける／説明するための「概念ツール」として有効に働く。また、モデル化仮定を用いて法則・原理の適用条件を記述することで、領域理論をより概念的なレベルで体系化することができる。筆者らは、物理系のモデル化において用いられるモデル化仮定を分類・整理した[Horiguchi 2008]。

3. マイクロワールドグラフの記述支援

3.1 マイクロワールドグラフの記述上の困難

GMW を記述することは、以下の理由により必ずしも容易ではない。まず、(1)モデルをそのモデル化仮定によって特徴付けることは、後者が通常は明示化されない情報であるため、領域理論に関する十全な理解を必要とする。また、(2)対象領域における学習項目（概念や法則・原理）の所定の範囲をカバーするよう、それらを具体化する様々な状況（マイクロワールド）の組を見出すことも、探索空間が広大となるため難しい。さらに、(3)それらの間には可能な限り「教育的意味を持つ」関係がなければならない。

3.2 記述支援の手法

そこで筆者らは、対象領域における様々な状況のモデルを次々に半自動生成し、それらが GMW に属するものとして適切か否かを教育的観点から記述者が判断する構成法を用い、その際の支援手法を提案している[Horiguchi 2008, 2009]。同手法においては、モデル化仮定に基づいて対象系のモデルを自動生成する機構が必要となるが、これを合成モデリング技法[Falkenhainer 1991, Levy 1997]によって実現する。合成モデリングでは、領域理論をモデル片と呼ばれるプリミティブの集合（モデル片ライブラリ）として記述する。モデル片は、各々が表す法則・原理が適用できる部分的状況（系の部分的構造とその状態）と、それが成立するとき物理属性間に成り立つ制約とから成る（前者はモデル化仮定によって記述される）。ある状況が合成

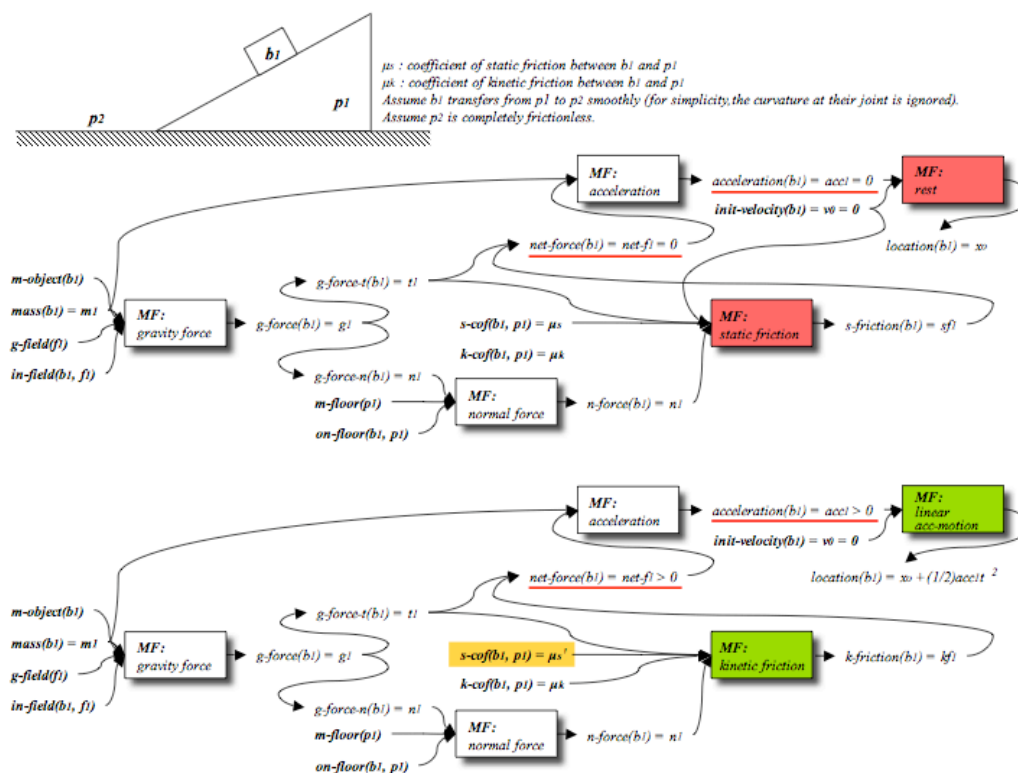


図2 モデル間の差異の例

モデリング機構に入力されると、そのとき成立しているモデル化仮定に照合するモデル片の組が例化され、それらが与える制約の組がその状況のモデルとして出力される。GMW 記述の手順は次の通りである。まず(1)ある1つの学習項目(概念や法則・原理)を具体化する状況とそのモデルを1つ見出す(それは合成モデリング機構によりモデル化仮定で特徴付けられる)。次に(2)そのモデルにおける状況(モデル化仮定の組として記述される)を摂動し、新しい状況に対するモデルを自動生成する。(3)新しいモデルが、元のモデルのそれと隣接することが適切な学習項目を具体化するものであれば、記述者の判断—モデル間の関係が教育的意味を持つか否か—により、元のモデル(マイクロワールド)とエッジ付けした上で GMW に追加する。このような手順を繰り返して、必要な範囲の学習項目を所与の(半)順序に沿って具体化する GMW(マイクロワールド群)を作成することができる。

本手法において記述者の行うべきことは、状況の摂動(モデル化仮定の組の差分)及びモデルの差分からマイクロワールド間の関係を同定し、「教育的意味を持つ」移行であるか否かを判断することである。合成モデリングにおいては、モデルは例化されたモデル片の組として得られる。そこで、二つのモデルに含まれる例化されたモデル片を、それらのモデル化仮定の差異に基づいて比較する際の助言機能を実現することが望ましい。筆者らは、先述のモデル化仮定の分類・整理に基づき、これを実現した。

[例]

図2は、斜面 p_1 (及びそれに続く水平面 p_2) 上にある物体 b_1 の幾つかのモデルが、例化されたモデル片の組として生成される様子を表している(簡潔のため、幾つかの細部を省略している)。同図 b は、 b_1 に働く重力の(p_1 上での)接線方向成分が最大静止摩擦力を越えず静止する状況を表すモデルであり、静止摩擦力(static friction)や静止状態(rest)に関するものを含む

4つのモデル片から構成されている(モデル 1)。この状況において静止摩擦係数の値を減少させると、 b_1 が重力(及び動摩擦力)を受けて等加速度直線運動する状況が生じ得る。これを表すモデルが同図 c であり、動摩擦力(kinetic friction)や等加速度直線運動(linear acc-motion)に関するものを含む5つのモデル片から構成されている(モデル 2)。

このとき、モデル 1 のモデル片 static friction とモデル 2 のモデル片 kinetic friction は、同一の物理的構造との照合により例化されていることから、互いに対応付けられる。両者は、静止摩擦係数の値の範囲を規定するモデル化仮定(動作範囲制約)のみが(背反的に)異なるため、モデル間の関係として「 b_1 と p_1 の間の)静止摩擦係数の値の変化、及びそれに伴う静止摩擦力から動摩擦力への変化」が推定される。モデル 1 のモデル片 rest とモデル 2 のモデル片 linear acc-motion も、同じ理由により、互いに対応付けられる。両者は、 b_1 の加速度の値の範囲を規定するモデル化仮定(動作範囲制約)のみが(背反的に)異なるため、モデル間の関係として「(b_1 の)加速度の値の変化、及びそれに伴う静止から等加速度直線運動への変化」が推定される。さらに、モデル 2 のモデル片 acceleration は、対応するモデル片がモデル 1 に存在しない。そこで、同モデル片が例化された原因を調べると、 b_1 に働く合力の値の変化に伴い、その値の範囲を規定するモデル化仮定(動作範囲制約)が(背反的に)変化したためであることがわかる。そこで、モデル間の関係として「(b_1 に働く)合力の変化、及びそれに伴う加速度の生成」が推定される。

枚挙されたこれら3つのモデル間の関係を参照しながら、記述者は適切な関係を同定した上で、その教育的意味を判断する。

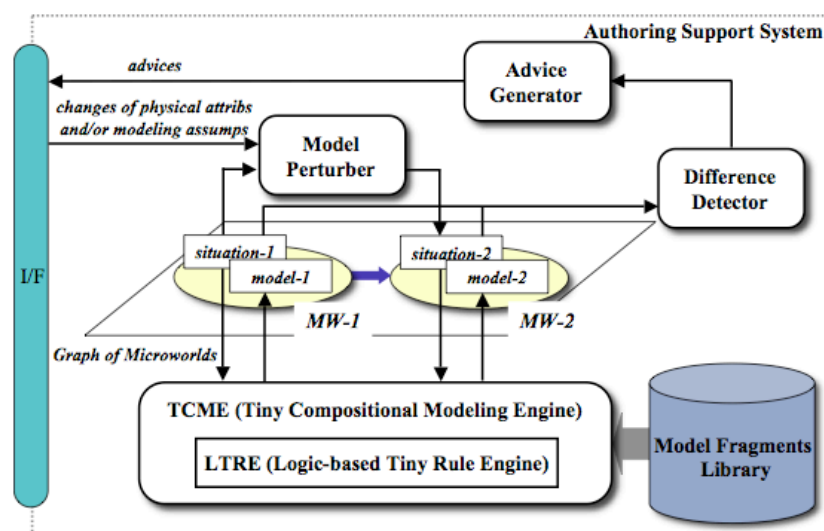


図3 システムの構成

4. 記述支援システムの試作

前章で述べた手法による GMW 記述支援システムの試作を進めている。現在、基本機能(状況解釈/摂動器, モデルの自動生成器及び差分検出器)の実装が完了しているが, (GUI などによる)ユーザインターフェースは未実装である。システムの構成図を図3に示す。

合成モデリング機構 (TCME: Tiny Compositional Modeling Engine) は, 所与の状況 (系の境界条件及びモデル化仮定の組) に対し, 領域知識 (モデル片ライブラリ) を適用してモデルを生成する。モデル片ライブラリにはルール形式のモデル片が格納され, 節形式の論理式に変換された上で, LTRE (Logic-based Tiny Rule Engine) [Forbus 1993] での推論に用いられる。LTRE は論理に基づく TMS (Logic-based Truth Maintenance System) 機構を備えたルール・エンジンであり, 生成されたモデルの導出過程 (制約の依存関係) を保持し無矛盾性を保証する。

状況解釈/摂動器は, 所与の物理属性とその値の組を, TCME での推論に用い得るモデル化仮定の組へ変換する (例えば, 部品同士の位置関係に関する定量的表現を定性的表現に変換する)。ある状況の物理属性の値が変更されると, 新しい状況に対するモデル化仮定の組を出力する。記述者は, 物理属性の値を変更又はモデル化仮定を直接操作することによってあるモデルの状況を摂動させ, 新しいモデルを作成する。

差分検出器は, TCME によって生成された (状況の摂動前/後の) 2つのモデルから, 前章で述べた手法によってそれらの差分を枚挙する (それらは, 助言生成器 (未実装) によってその原因と共に記述者に提示される)。

初等力学の基本的な例題群を対象として, モデル片ライブラリ及び状況解釈/摂動器のためのルールの組を作成し, 本試作システムの動作確認を行った。例えば, 図2のモデル1を初期モデルとして, 静止摩擦係数の値を減少させると, 新しい状況のモデル2が生成され, 例1で示したそれらの差異がシステムにより出力された。また, モデル2において b_1 と p_1 の間の摩擦を無視すると (モデル化仮定の直接操作), b_1 が重力のみを受けて (動摩擦力なしで) 等加速度直線運動する状況が生じる (モデル3とする)。このとき, モデル間の差異として「(b_1 と p_1 の間の) 摩擦の無視, およびそれに伴う動摩擦力の消滅 (モデルの特殊化)」が正しく出力された。さらに, モデル2において時間変数を増加させる (時間を進めると), b_1 が p_1 上から p_2 上へと移行し, この状況を表すモデル (モデル4とする) が生成された。このとき,

モデル間の差異として「(時間的发展による) b_1, p_1, p_2 の位置関係の変化, およびそれに伴う動摩擦力の消滅/ b_1 と p_1 の間の垂直抗力の消滅/ b_1 と p_2 の間の垂直抗力の生成」及び「(b_1 の) 加速度の値の変化, およびそれに伴う等加速度直線運動から等速直線運動への変化」が正しく出力された。

5. おわりに

本稿では, 物理問題を現象のモデル化プロセスに基づいて特徴付けるための枠組みであるマイクロワールドグラフ, 及びそれを記述するための支援手法について述べた。今後, 試作システムの規模を拡大すると共に, 種々の対象領域における試験運用を行いその有用性を検証していく予定である。

参考文献

- [Addanki 1991] Addanki, S., Cremonini, R. and Penberthy, J.S.: Graphs of models, *Artificial Intelligence*, 51, pp.145-177, 1991.
- [Falkenhainer 1991] Falkenhainer, B. and Forbus, K.D.: *Compositional Modeling: Finding the Right Model for the Job*, *Artificial Intelligence*, 51, pp.95-143, 1991.
- [Forbus 1993] Forbus, K.D. and deKleer, J.: *Building Problem Solvers*, MIT Press, 1993.
- [東本 2008] 東本, 堀口, 平嶋: 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, J91-D, No.02*, pp.303-313, 2008.
- [Horiguchi 2005] Horiguchi, T. and Hirashima, T.: Graph of Microworld: A Framework for Assisting Progressive Knowledge Acquisition in Simulation-based Learning Environments, *Proc. of AIED2005*, pp.670-677, 2005.
- [Horiguchi 2008] Horiguchi, T. and Hirashima, T.: Intelligent Support for Authoring 'Graph of Microworlds' based on Compositional Modeling Technique, *Proc. of QR'08*, pp.49-57, 2008.
- [Horiguchi 2009] Horiguchi, T. and Hirashima, T.: Intelligent Authoring of 'Graph of Microworlds' for Adaptive Learning with Microworlds based on Compositional Modeling, *Proc. of AIED2009, 2009 (to be appeared)*.
- [Levy 1997] Levy, A.Y., Iwasaki, Y. and Fikes, R.: Automated model selection for simulation based on relevance reasoning, *Artificial Intelligence*, 96, pp.351-394, 1997.
- [Murray 2003] Murray, T., Blessing, S. and Ainsworth, S. (Eds.), *Authoring Tools for Advanced Technology Learning Environments*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [VanLehn 2005] VanLehn, K. et al.: The Andes Physics Tutoring System: Lessons Learned. *Int. J. of Artificial Intelligence and Education*, 15 (3), pp.147-204, 2005.
- [White 1990] White, B. and Frederiksen, J.: Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environments, *Artificial Intelligence*, 42, pp.99-157, 1990.
- [White 1993] White, B. and Frederiksen, J.: ThinkerTools: Causal models, conceptual change, and science education, *Cognition and Instruction*, 10, pp.1-100, 1993.