

マイクロワールドグラフを用いた派生問題の対話的自動生成システム Interactive Generation of Derivative Problems Using Graph of Microworlds

上野 拓也^{*1}
Takuya Ueno

堀口 知也^{*2}
Tomoya Horiguchi

平嶋 宗^{*1}
Tsukasa Hirashima

^{*1} 広島大学大学院工学研究科 ^{*2} 神戸大学大学院海事科学研究科
Department of Information Engineering, Hiroshima University Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

In the practice of problem-solving in physics learning, increasing complex practice is an effective approach. However, it is not easy to realize such practice, because, it is necessary to prepare many and various problems with meaningful relation among other problems. In order to support the preparation of the problems, we propose a method to generate derivative problems. The derivative problems are defined as simplification and complication of the base problem. Such derivative problems is expected to be useful to assist students in problem solving. In this paper, first, we explain a framework of problem description, Graph of Microworld and Solution Structure. Second, we explain the classification of the derivative problem. And last, we propose a method of generating derivative problems and introduce a system implemented based on the method.

1. はじめに

物理の力学の問題演習において、学習者に与える問題の順序、つまり問題の系列は、学習者が対象領域を体系的に理解できるように適切に用意する必要がある。しかし、適切な問題系列を用意するためには、個々の問題や問題同士の関係、物理状況や問題解法といった観点で理解・把握した上で大量の問題を用意することが必要となり、非常に労力のかかる作業となる。

そこで、それらの労力を省けるように、あるひとつの問題をもとに、それを変化させることによってできる問題である、派生問題を自動生成するための仕組みやシステムを提案する。

派生問題は、何を基準に問題を変化させるかによって、様々な種類の問題の生成が考えられる。例えば、問題の解法や、問題文の表現の仕方などがその変化の基準として考えられる。その派生問題の中でも、問題の解き方、つまり問題解決過程を基準に変化させた問題は、学習者が問題を解く上で躓いた点の克服や、さらなる知識の習得を手助けする問題として重要である。

本稿では、その問題解決過程を基準にした派生問題として、(1)部分化・合成化問題、と(2)特殊化・一般化問題、の定式化と、その自動生成の試みについて報告する。部分化・合成化問題は、元の問題の問題解決過程を部分化する、あるいはつなぎ合わせて合成することによって生成される問題であり、1つの問題を解法の途中で小問に分けたり、逆に複数の小問を1つの問題に合わせたりした問題のことである。例えば、加速度を求める1つの問題を、動摩擦力を求める小問1と、加速度を求める小問2に分けるといった問題がこれに当たる。特殊化・一般化問題とは、問題解決過程を特殊化・一般化した問題であり、ある問題における物理状況を、そこに存在するパラメータ設定をより一般化したり、逆に特殊なものにすることで生成できる。例えば、摩擦の無い斜面上の問題に、摩擦を生じさせた問題などがこれに当たる。

これらの問題は、問題解決過程について比較を行うと、部分

化・合成化問題では、生成された部分化問題は、もとの問題の問題解決過程の一部として含まれているということから PART-OF 関係にあるとみることができる。また、特殊化・一般化問題では、特殊化された問題の解決過程は、もとの問題の問題解決過程を特殊化したものとなっていることから、IS-A 関係になっているといえる。本稿では派生問題の内、元の問題の問題解決過程と PART-OF 関係を持った部分化・合成化問題と、IS-A 関係を持った特殊化・一般化問題について述べた上で、部分化問題と特殊化問題の生成手法と、その実現の概要について説明する。

2. 問題の特徴記述

問題演習の制御・問題の生成を行うためには、問題の特徴をシステムが理解できるような形で記述しておく必要がある。本研究では、そのための記述方法として、マイクロワールドグラフと、解法構造という記述方法を用いている。この章では、まず本研究における問題の定義を述べ、その後、それらの記述方法について説明する。

2.1 問題の定義

まず、本研究における問題の定義について述べる。本研究において、問題とは、物理状況・入力属性・出力属性の三つからなるとする。物理状況とは、その問題が設定されている物理系のことである。例えば、「摩擦のある斜面上を物体が滑り落ちている」といったものがこれに当たる。

入力属性とは、物理的状況において存在する属性のうち、問題においてその値が与えられている属性のことである。例えば、「重力加速度を g とする」という記述があったならば、「重力加速度」が入力属性となる。

出力属性とは、問題においてその値を求めることが指定されている属性のことである。例えば、「物体の加速度を求めよ」という記述があったならば、「物体の加速度」が出力属性となる。ここで、出力属性は一つの問題に一つしか存在しないことを前提とする。

2.2 マイクロワールドグラフ

問題の特徴を記述するためには、その問題が成立している物理状況を記述する必要があり、ここではそれを属性間に成り立

つ制約関係として表現し、その制約の集合をモデルと呼ぶ。さらに、個々のモデルのみでなく、複数のモデル間の関係についての記述が必要となる。

個々のモデルは、属性間の数量関係として記述可能であるが、モデル間の関係については単にそれらの数量関係の違いとしてのみ表現するのは適当ではない。数式の変化はモデル間の差の結果であり、モデル間の差そのものを記述することが求められる。

モデル同士の関係を単なる数式の差で表現するのではなく、各モデルに、そのモデルの成立条件の情報(モデル化仮定)を持たせ、モデル化仮定の差分=モデルの差分として処理しようとする枠組みが考えられている。それをマイクロワールドグラフ(Graph of Microworld:GMW)と呼ぶ [Horiguchi 2008]。この研究では、問題間の差分を取り出すための基盤として、このマイクロワールドグラフを用いる。

2.3 解法構造

2.1 で述べたマイクロワールドグラフを用いると、個々の問題の状況と、問題の状況同士の関係が記述できる。しかし、派生問題の生成を考えた際には、問題の物理状況の差のみではなく、各問題の問題解決過程、つまり解法についても扱える必要がある。

そこで、問題解決の過程をあらわすモデルとして、解法構造と呼ばれるものを用いて、解法も含めた問題制御ができるようにする。解法構造とは、目標の解を導出するために用いられる、一連の数量関係の構造であり、図1のような構造となる。

図1において、楕円で囲まれたものが属性であり、長方形で囲まれたものが数量関係となっている。属性において、一番上の根の部分にあるものが出力属性であり、構造の下、葉の部分にあるものが入力属性となる。また、それらの中間にある属性は中間属性と呼ばれ、入力属性から出力属性を導出する過程で得られる属性を表している。

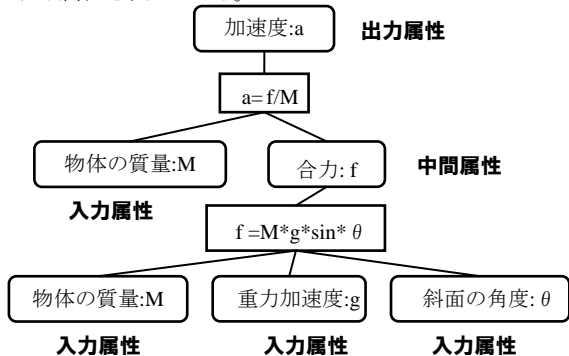


図2 解法構造の例

3. 派生問題

この章では、2章で述べた問題の特徴記述に基づき、1章で述べた2つのタイプの派生問題についてより詳しく説明する。その後、これらの学習における有効性について、先行研究を紹介する。

3.1 部分化・合成化問題と特殊化・一般化問題

(1) 部分化・合成化問題

部分化・合成化問題は、解法構造の部分化・合成化によって生成される問題のことであり、同一の物理モデル内で生成されるものである。

一般的に力学の問題を解く際には、複数の数式・法則を用いる。例えば、摩擦のある斜面上を物体が滑り落ちていく状況で、物体の加速度を考える際には、先に重力の分力を求め、そこから物体にかかる垂直抗力を求め、動摩擦力を求め、それらをもとにして加速度を求める、といった手順を経る。こうしたことから、力学の問題演習では、手順を分断した小問を与え、それらを1つ1つ解いていくことにより、最終的に理解して欲しい解法まで導くといった手法がとられる。

この部分化・合成化問題は、そういった問題の部分化(小問の作成)、合成化(小問の結合)を行った問題のことである。

まず、部分化問題は、もとの問題の解法構造の中間属性を、入力属性・出力属性へと変更することによって新たな解法構造を生成し、その解法構造をもとにして作られた問題のことであり、問題解決の過程を複数のステップに分けたものである。図2の例では、物体の加速度を求める問題を、物体にかかる斜面平行方向の分力を求める問題と、それが分かるとして加速度を求める問題の二つに分けて部分化している。

次に、合成化問題は、ある問題Aの出力属性aが、ある問題Bの入力属性aと同じ時、Aの解法構造をBの解法構造に、Bの解法構造の入力属性a以下に結合することによって生成された解法構造をもとにして作られた問題のことであり、もとの問題を複雑にした問題といえる。図2の例では、元々物体にかかる斜面平行方向の分力を求める問題と、その結果と物体の質量を用いて物体の加速度を求める問題の2つの問題があった時に、それらをまとめて物体の質量と物体にかかる重力が分かっている際に加速度を求める問題へと合成している。

図2の例を見ると分かるように、この部分化・合成化問題の解法構造は、PART-OFの関係になっている。

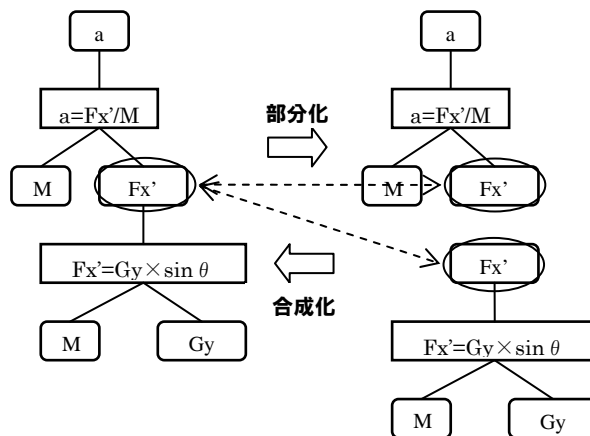


図3 部分化問題・合成化問題の解法構造の例

(2) 特殊化問題・一般化問題

マイクロワールドグラフにおいて、隣接したモデル同士は、一般化・特殊化の関係となっている。力学の場合、特殊化とはいくつかの属性に、ある特殊な値を与えることであり、たとえば等速直線運動は、加速度を固定値にすることで運動が特殊化されているといえ、考慮すべき属性が減ることになる。一般化とはこの逆であり、考慮すべき属性が増えることを意味する。本研究では、特殊化問題・一般化問題とは、その問題の物理モデルを一般化・特殊化した際に変化した解法構造をもとにして作られる問

題であり、隣接した二つのモデル間で生成される派生問題であるとする。

まず、特殊化問題とは、種問題のモデルの特殊化に伴い、解法構造も特殊化された場合に、その特殊化された解法構造をもとに生成された問題のことである。解法構造が特殊化されたということは、問題を解く際に考慮すべき属性が減少したということであり、もとの問題を簡単にした問題であるということができる。例を挙げると、図 3 のように、摩擦のある斜面上を物体が滑り落ちている時に物体の加速度を求める問題があった場合に、これを摩擦の無い斜面の同問題に変更したものが挙げられる。この例では、摩擦係数を 0 に特殊化することによって、特殊化問題では動摩擦力を考慮する必要が無くなっている。

次に、一般化問題とは、種問題のモデルの一般化に伴い、解法構造も一般化された場合に、その一般化された解法構造をもとに生成された問題のことである。特殊化問題の逆で、図 3 では、もとの問題では、特殊化されていたため考慮する必要が無かった動摩擦力が、一般化問題では考慮しなければならないように一般化されている。

図 3 の例を見ると分かるように、この特殊問題・一般化問題の解法構造は、IS-A の関係になっている。

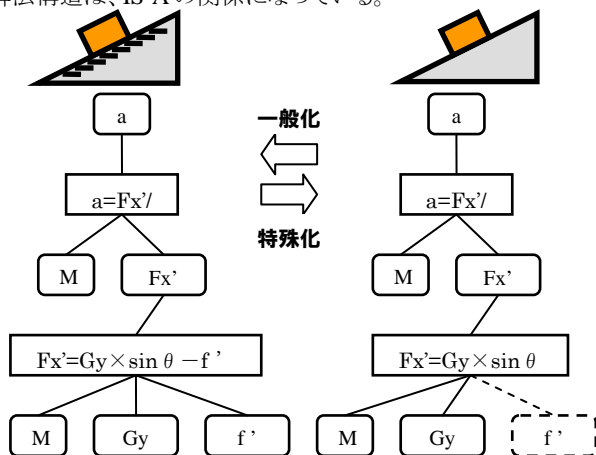


図 3 特殊化問題・一般化問題の解法構造の例

3.2 派生問題の分類の学習における有効性

ここまで述べてきた派生問題は、実際に学習に有効な問題であるかを分析する必要があるが、この節では、補助問題の定式化[平嶋 1995]の研究で行われた、派生問題と密接な関係にある、補助問題の妥当性の検証を紹介する。

まず、補助問題とは、もとの問題を単純化した補助的な問題[平嶋 1995]であり、部分化問題・特殊化問題に、問題文での属性の明示方法の違いによる単純化が行われた問題である同等問題などを加えたものである。平嶋らは、この補助問題の研究において、補助問題生成実験及び、問題集の分析を行っている。この研究によると、家庭教師経験者 15 名に問題解決の補助となるような問題を生成してもらう補助問題生成実験においては、作成された 65 題の問題のうち、部分化問題が 30 題、特殊化問題が 25 題という内訳になり、85%を今回の 4 種類の派生問題が占めるという結果になった。また、問題解決の補助となっていると思われる問題を抽出してその分類を行った問題集の分析では、全 497 題中、部分化問題が 230 題、特殊化問題が 29 題という内訳となり、63%の問題が今回の 4 種類の派生問題に分類されるという結果になった。

このことから、本研究における 4 種類の派生問題の定義で生成できる問題には、学習者の問題解決過程を補助する問題が

含まれる可能性が高いと言える。しかし、もちろんこれにより派生問題の有効性の全てが示せたわけではなく、今後更なる検証を続ける必要がある。

4. 派生問題の生成

これまで、2 章で問題の特徴記述のための枠組みの紹介と、3 章で 4 種類の派生問題について述べてきた。この章では、実際に派生問題を生成する方法について述べていく。

4.1 マイクロワールドグラフと解法構造

派生問題の生成を行うためには、マイクロワールドグラフと解法構造を用いると述べてきたが、それぞれがどのように準備されるかをここで述べる。

まず、マイクロワールドグラフについては、その記述方法を熟知したシステム作成者が、あらかじめ記述したものを用意しておく。すると、解法構造は、マイクロワールドグラフのモデルを利用することによって容易に生成できる。なぜなら、マイクロワールドグラフには、ある物理状況のモデル、つまり、その物理系に存在する属性同士の関係を記述したものが用意されており、その属性同士の関係を辿っていき、構造として取り出したものが解法構造となるからである。

4.2 問題文と解法構造

ここで、派生問題の生成を行うと述べているが、実際には派生問題の解法構造を生成することと同義になる。何故なら、問題の要素は、物理状況・入力属性・出力属性であり、解法構造はこれらの情報を全て保持しているからである。そのため、解法構造が生成できれば、そこから実際の問題(実際の問題集で見られるような問題)を生成することができる。従って、本節では、派生問題の解法構造の生成手法について主に述べている。

4.3 派生問題の生成手法

今回は、特殊化問題と部分化問題の生成についてのみ扱う。これは、種問題はすでに教育的に意味のある問題であるので、そこから要素を取り除いてできる両問題も、教育的に意味のある問題である可能性が高いと思われるからである。残りの一般化問題については、何らかの属性を加えなければならない問題であり、何を加えるべきか、それを加えた問題に教育的に意味があるのかといったことを議論しなければならず、まだその議論が十分になされていないため、今回は扱っていない。さらに、合成化問題については、複数の問題間の関係を扱わなければならないが、まだ複数の派生問題間の関係に関する議論がまとまっておらず、今回は扱っていない。

(1) 部分化問題の生成手法

まず、部分化問題の生成手法について述べる。部分化問題は、解法構造の中間属性を、入力属性か出力属性に変化させた問題である。ある中間属性を選ぶと、そこから解法構造を二分し、一つは中間属性から入力属性へ、もう一つは中間属性から出力属性へ変化させた木構造が二つ出来上がる。このそれぞれが元の問題の部分化問題の解法構造となる(図2)。

(2) 特殊化問題の生成手法

特殊化問題は、まず、マイクロワールドグラフを用いて、隣接する 2 つの物理モデル間で特殊化される属性を調べる。これは、モデル化仮定の差と、各モデルの属性同士の関係記述を用いることで容易に可能である。そして、特殊化される属性が、種問題の解法構造の中に含まれていれば、その属性以下の構造を

取り除くことにより、特殊化問題の解法構造を生成することができる(図3)。

5. システム

本研究では、これまで述べてきた生成手法を用いて、実際に部分化問題と特殊化問題を生成するシステムを設計・開発した。

5.1 問題入力

まず、システムの利用者は、派生問題を作成したい問題の入力を行う。先ほど説明した問題の定義にある、問題の物理状況と、入力属性・出力属性の3つを入力する。

物理状況は、すでに用意してあるマイクロワールドグラフから、選択形式で入力する。入力属性・出力属性は、その選んだモデルに存在する属性を表示し、その中から選択形式で入力する。

5.2 問題生成

このシステムが問題として表示するのは、問題文と図である。まず問題文は、3つの文から形成されている(図4)。1文目はその問題における物理状況を表す文である。例えば、「摩擦の無い斜面上を物体が滑り落ちている。」といった文であり、それぞれの状況に合った文をはじめから用意しておき、それを表示することで可能としている。次に2文目は、入力属性についての文であり、「重力加速度を g 、物体の質量を M とする。」といった文がこれに当たる。これは、「○○を△とする。」といったテンプレートを用意しておき、入力属性によってシステムが文を自動で生成する。最後の文は出力属性に関する文であり、「物体の加速度を求めよ。」といった文がこれに当たる。これは、入力属性の文と同様に、「○○を求めよ。」というテンプレートを用意しておき、それに当てはめることで自動生成する。そして、図については、問題文の1文目と同様に、物理状況に合った図を用意しておき、それを表示することで可能としている(図4,図5)。

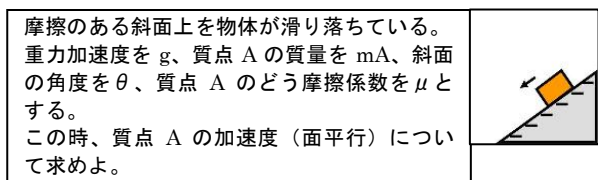


図4 生成される問題の例

(1) 部分化問題の生成画面

部分化問題の生成は、種問題の解法構造から、ある中間属性を選び、そこから解法構造を分けることによって生成を行うものであるが、どの中間属性で問題を分けるかをシステムが判断することは、解法構造のどの部分がどのような教育的意味を持っているかを判断しなければならず、非常に難しい。また、あらゆる部分化問題を生成し、教育者に提示するという方法も考えられるが、部分化できる箇所は、中間属性の数の2乗個存在するため、莫大な数になってしまう。

そこで、今回のシステムでは、種問題の解法構造を表示し、その解法構造のどこで部分化を行うかはシステム使用者に判断してもらう形式とした。システムは、使用者が選んだ中間属性から部分化を行った場合の部分化問題の自動生成を行い、その結果を表示する。

図5では、生成した部分化問題の表示画面例を示している。画面左側の問題が種問題、右側の2問が生成された部分問題となっている。画面上部のタブを操作することで、生成された問題の表示か、種問題、部分化問題それぞれの解法構造の表示

かを切り替えることができる。また、どの部分が問題間の差であるのかを、色を変えて表示することもできる。

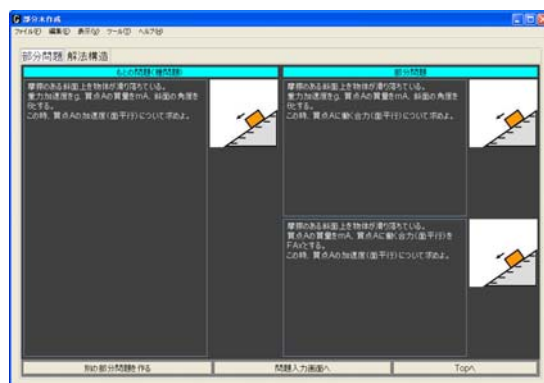


図5 部分化問題生成画面

(2) 特殊化問題の生成画面

特殊化問題の生成は、種問題の入力があれば、システムが自動で生成する。問題が入力されると、種問題の物理モデルよりも単純なモデルを、マイクロワールドグラフ上から探し、それら1つ1つに対して特殊化問題の生成を試みる。そして、生成できた特殊化問題を、解法構造と共に、タブで並べて表示する。部分問題と同様に、問題間の差を表示することもできる。

6. まとめと今後の課題

これまで、マイクロワールドグラフや解法構造といった、問題の特徴記述の研究[HIRASHIMA 1994年, 平嶋 1995年, 堀口 2004年, 堀口 2008年]が行われていたが、実際にその記述方法に基づいて問題を生成するなどの研究は行われてこなかった。本研究は、そういった先行研究に基づいて、問題の生成を行った研究である。

今後の課題としては、残りの派生問題の生成手法の研究、システムの設計・開発、生成された派生問題の妥当性の検証などが挙げられる。また、生成した問題を用いて、生徒の演習を総合的に支援する手法・システムを検討していく予定である。

参考文献

- [Hirashima 1994] Tsukasa HIRASHIMA, Toshitada NIITSU, Kentaro HIROSE, Akihiro KASHIHARA, Jun'ichi TOYODA: An Indexing Framework for Adaptive Arrangement of Mechanics Problems for ITS, IEICE transactions on information and systems, Vol.E77-D, No1, pp.19-26, 1994.01.25.
- [平嶋 1995] 平嶋 宗, 東 正造, 柏原 昭博, 豊田 順一: 補助問題の定式化, 人工知能学会誌, pp.413-420, 1995.05.01.
- [堀口 2004] 堀口 知也, 平嶋 宗: モデルグラフに基づく発展的知識獲得の支援環境, 人工知能学会第42回先進的学習科学と工学研究会(SIG-ALST), pp.7-14, 2004.
- [Horiguchi 08] Horiguchi, T. & Hirashima, T: Intelligent Support for Authoring 'Graph of Microworlds' based on Compositional Modeling Technique., Proc. of QR'08, pp.49-57 (2008)