

問題解決プロセスを利用した選択問題の誤選択肢及び解説の自動生成

舟生日出男^{†a)} 穠山 雅史^{††} 平嶋 宗[†]

Automatic Generation of Distracters and Their Comments for a Multiple Choice Question through a Problem Solution Process

Hideo FUNAOI^{†a)}, Masafumi AKIYAMA^{††}, and Tsukasa HIRASHIMA[†]

あらまし 近年、eラーニングにおける多肢選択問題やその誤選択肢、解説を自動生成するシステムが研究されている。誤選択肢は、誤りの原因を発見し、学習を進める手段でもあり、そのためには誤選択肢についての解説が不可欠である。しかし現状では、誤選択肢の自動生成は実現されているものの、解説の自動生成については未だ実現されていない。そこで、本研究では高校物理の力学問題を対象とし、誤選択肢と解説を自動生成するシステムを開発した。提案システムは、選択問題の提供者から与えられた問題を表現するネットワークと、システム開発者からあらかじめ与えられている領域知識を利用しながら、正答に至る問題解決プロセスの途上にある概念の一部を、類似のもの置き換えることで誤選択肢を生成する。とともに、その誤選択肢の生成プロセスと正答の生成プロセスの相違点を利用して解説を生成する。このようにすることで、すべての誤選択肢に対して解説が自動生成される。評価実験の結果から、提案システムによって自動生成された誤選択肢と解説の妥当性が示唆された。

キーワード 誤選択肢、解説、自動生成、問題解決プロセス、eラーニング

1. ま え が き

近年、インターネットの普及に伴い、自学自習のためにeラーニングの利用者は増加しつつあり、良質なコンテンツが求められている。eラーニングにおいて多肢選択問題の需要は高く、これまで、多肢選択問題やその誤選択肢、及び解説を作成するためのシステムが提案されている。

選択問題における「誤選択肢」の最も基本的な機能は、正答以外の選択肢も併せて提示することで、学習者に問題の解決と正答の特定をさせることにある。この機能を満たすだけであるのなら、誤選択肢は正答でさえなければどのようなものであっても差し支えない。しかしながら実際には、学習者が誤って選んでしまいそうな誤選択肢を用意する機会が多い。ここで、「学習

者が誤りそうである」こと背景には、何らかの「間違いの原因」が想定されている。そして、その誤選択肢を選んだ学習者はその誤りの原因を抱えていると推定される。したがって、このような誤選択肢が選ばれることは、その誤選択肢の背景にある誤りの原因が解消され、正しい知識が学習されるための絶好の機会であるといえよう。つまり、誤選択肢は単に正答を紛れさせるだけではなく、誤りの原因を発見し、学習を進める手段でもあるといえる。

初期の先行研究（例えば、[1], [2]）では、誤選択肢とその解説は人手によって作成されていた。しかし、人手による作成は、選択問題の提供者（以降、一次ユーザ）にとって大きな負担となるため、自動作成の手法が求められる。だが、誤選択肢とその解説をセットで自動で作成するための方法論は未だ確立されていない。

例えば、金西ら[3]は、基本情報処理技術者試験を対象とし、演習問題を自動生成するシステムを提案している。このシステムは、一次ユーザが記述した、教材の知識と演習問題を作成するための知識を利用して、演習問題を自動生成する。しかし、演習問題の自

[†] 広島大学大学院工学研究科，東広島市 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, 739-8527 Japan

^{††} 日本電気株式会社，東京都 NEC Corporation, 5-7-1 Shiba, Minato-ku, Tokyo, 108-0014 Japan

a) E-mail: funaoi@hiroshima-u.ac.jp

動生成が主眼であるため、解説の自動生成は行われていない。

磯本ら [4] は、学習者が選択肢を選ぶ際に、選択した解答に対する確信度を入力させることによって学力評価と学習指導を行うシステムを開発している。しかし、学習者にフィードバックされるのは、「ほとんど知識がないので、基礎的なことからしっかりと勉強し直そう」などのような、一般的な学習指導のコメントであり、誤選択肢についての解説ではない。

北岡ら [5] は、正答を求めるための解法に着目し、その解法に摂動を加えて誤選択肢を生成するとともに、正答との差分を利用して解説を生成する手法を提案している。この手法は抽象的に見れば、正答との差分を利用するという点では、本研究と同じ方向性を指向しているといえる。しかし、世界史を対象としていることから、知識ベースに基づいて誤答選択肢作成モデルが提案されているため、モデルに対するアプローチは本研究とは異なる。また、その後、具体的なシステムを開発するなどの展開も見られない。

これらの関連研究と先述した誤選択肢についての考え方を踏まえ、本研究の目的を、1) 学習のために有用な誤選択肢と解説を提供すること、2) 一次ユーザの負担を軽減すること、の2点とした。その上で、高校物理の力学問題を対象とした誤選択肢群とそれらの解説を自動生成する手法を開発し、提案システムに実装した。本システムでは、数学や物理の文章題などの手続き的知識を扱う問題解決モデル [6] ~ [8] を利用している。

提案システムは、一次ユーザから与えられた問題を表現するネットワーク (4. で後述する「表層構造」と、システム開発者からあらかじめ与えられている領域知識 (5. で後述する「概念の置換え候補」と「概念構造」) を利用しながら、正答に至る問題解決プロセスの途上にある概念の一部を、類似のものと置き換えることで「誤選択肢」を生成する。とともに、その誤選択肢の生成プロセスと正答の生成プロセスの相違点を利用して「解説」を生成する。このようにして生成することで、すべての誤選択肢に対して解説が生成される。

そのため、一次ユーザは、問題文とそれに対応する表層構造を用意するだけで、問題文についての誤選択肢群とそれらの解説を得ることが可能である。

また、選択問題の利用者である学習者 (以降、二次ユーザ) は、どの誤選択肢を選択しても、解説を見る

ことで、それがどのような誤りに起因しているのかを理解することができる。このような誤選択肢と解説によって、eラーニングにおける自学自習を有効に支援できると考えられる。具体的な学習場面としては、高校生が授業において当該の力学問題を学習した後で、理解の程度を確認したり、誤った理解を修正するために、本システムを利用することが想定される。また、大学入学時のリメディアル教育においても同様に活用できると考えられる。

以降、2. で、問題解決プロセスについて説明し、3. では、問題解決プロセスを用いることの妥当性を示すために、問題集に掲載されている誤選択肢の分類について述べる。4. で、問題解決モデルによる問題解決プロセスの定式化について述べ、5. では、誤選択肢と解説を自動生成する方法について説明する。6. で、誤選択肢と解説の自動生成の機能を実装した提案システムの概要を示し、7. では、提案システムによって自動生成された誤選択肢と解説の妥当性の評価について述べる。最後に 8. で、本研究を総括する。

2. 問題解決プロセス

問題解決プロセス (Problem solution process) とは、問題解決モデル [6] ~ [8] に基づいて問題を解決する処理過程である。これは、数学や物理などの文章題を解く過程を表現するためのものであり、「問題解釈プロセス (Question interpretation process)」、「知識検索プロセス (Knowledge retrieval process)」、「知識実行プロセス (Knowledge execution process)」の三つの下位プロセスから構成される (図 1)。本研究では、これらの下位プロセスに対応させて、誤選択肢を、「問題解釈プロセスの誤り」、「知識検索プロセスの誤り」、「知識実行プロセスの誤り」に分類する。

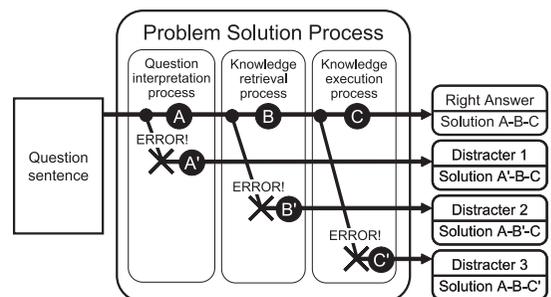


図 1 問題解決プロセスと誤選択肢及び解説

Fig. 1 Problem solution process, distracters, and comments.

表 1 誤選択肢の分類結果
Table 1 Categorization results of distracters.

誤選択肢の分類		誤選択肢の種類	個数(延べ)	割合
意味的な紛らわしさに基づいた誤り	問題解釈プロセスの誤り	向きの誤り	54	83%
		概念の誤り	141	
	知識検索プロセスの誤り	解法の誤り	69	
		知識実行プロセスの誤り	公式の誤り(係数)	
	公式の誤り(次元)		62	
	正弦・余弦の誤り		76	
		変化量の誤り	3	
解の形の紛らわしさに基づいた誤り		桁数の誤り	19	14%
		係数の誤り	29	
		値の誤り	65	
原因を特定できない誤り		不明	30	4%

正答に至る問題解決プロセスのうち、いずれかの下位プロセスにおいて、知識や計算方法を類似のものに置き換えることによって、問題解決の手順に沿った誤選択肢を生成することができる。

とともに、どの下位プロセスでどのように知識や計算方法を置き換えたのかを示すことで、解説を生成する。例えば、問題解釈プロセスにおいて、知識 A を知識 A' に置き換えた場合、「問題解釈プロセスで A とするところを A' としています」という解説が生成される。

以降では、三つの下位プロセスについて、説明する。

2.1 問題解釈プロセス

問題解釈プロセスでは、問題文に記述されている状況を読み取る作業が行われる。このプロセスで発生する誤りには、問題文の状況を正しく読み取れていない、つまり、異なる問題としてとらえてしまったが、知識の検索・実行は正しく処理できているものが分類される。

2.2 知識検索プロセス

知識検索プロセスでは、問題を解くために必要な知識を選択する作業が行われる。このプロセスで発生する誤りには、問題文は正しく読み取れており、知識の実行は正しく処理できているが、不適切な知識を選択しているものが分類される。

2.3 知識実行プロセス

知識実行プロセスでは、選択した知識を実際に計算する作業が行われる。このプロセスで発生する誤りには、問題文は正しく読み取れており、知識の選択も正しいが、知識に記述された操作が正しくないものが分類される。

3. 誤選択肢の調査

3.1 調査の目的

調査の目的は、問題解決プロセスに基づいて、誤選択肢の種類を分類し、誤選択肢と解説を生成することの妥当性を検証することである。

3.2 調査の方法

センター試験対策用の選択式問題集 [9] を対象として、数式や定数が選択肢となっている 159 問の問題、662 個の誤選択肢を分析し、「問題解決プロセスに即した誤りであると判断できるか？」という観点に基づいて、誤選択肢を分類した。

一つの誤選択肢に複数の誤りの原因が考えられる場合には、それぞれの原因ごとの種類に分類した。分類は 3 名で行い、2 名以上が判断した誤選択肢の種類を採用した。判断が三者三様に割れた誤選択肢に関しては、協議の上で(筆者が再度調査を行い)種類を決定した。そのような誤選択肢は 72 個存在した。

3.3 結果と考察

分類の結果を表 1 に示す。表には、誤選択肢の種類と個数(のべ)、割合を示している。誤選択肢は、「意味的な紛らわしさに基づいた誤り」、「解の形の紛らわしさに基づいた誤り」、「原因を特定できない誤り」の 3 種類に大別した。

まず、「意味的な紛らわしさに基づいた誤り」は、問題解決プロセスに即していると判断できる誤りである。そこで、問題解決の下位プロセスに基づいて分類し、更に以下の 7 種類に分類した。

向きの誤り 速度や加速度の向きを誤ったもの。

概念の誤り: 例えば、初速度 V とすべきところを初速度 0 としてとらえてしまうような、問題文中の概念を誤解したもの。

解法の誤り： 知識自体は正しいが、使うべきではない知識を利用したもの。

公式の誤り（係数）： 例えば、公式 $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ を、 $x = v_0t + at^2$ のように、係数を誤解したもの。

公式の誤り（次元）： 例えば、公式 $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ を、 $x = v_0t + \frac{1}{2}at$ のように、次元を誤解したもの。

正弦・余弦の誤り： 正弦または余弦の計算を誤ったもの。

変化量の誤り： 「変化後の値 - 変化前の値」とすべきところを「変化前の値 - 変化後の値」としてしまったもの。

次に、「解の形の紛らわしさに基づいた誤り」は、単に正解の形を変化させただけであると判断できる、ケアレスミスの類の誤りであり、次の3種類に分類した。けた数の誤り： 正答の桁数を変化させたもの。

係数の誤り： 正答が文字式で与えられる場合に、係数を変化させたもの。

値の誤り： 正答が実数で与えられている場合に、誤選択肢の値を規則的に変化させたもの。

表に示したように、83%の誤選択肢が、意味的な紛らわしさに基づいた誤りによる誤選択肢に分類された。この結果から、誤選択肢と解説を、問題解決プロセスを用いて生成することの妥当性が示されたといえる。

4. 問題解決モデルによる問題解決プロセスの定式化

4.1 問題解決モデル

問題解決モデルは、以下で説明する七つの要素から構成される。

表層構造 (Surface structure)： 問題文中に明示的に含まれているオブジェクト、属性、オブジェクト間の関係を表現した意味ネットワーク。

定式化構造 (Formulation structure)： 知識が適用可能なように、表層構造のすべての属性を数量的記述に変換したもの。

目標構造 (Target structure)： 最終的に求めたい解を含んだ定式化構造。

解法構造 (Solution structure)： 解導出のために必要な知識のネットワーク。

制約構造 (Constraint structure)： 問題が対象としている状況に存在しているすべての知識であり、対象としている範囲に応じてあらかじめ用意しておく必要がある。

概念の置換え候補 (Concept replacement candi-

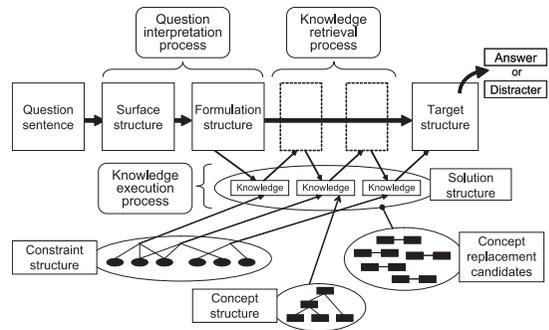


図2 問題解決モデルと問題解決プロセス
Fig. 2 Problem solution model and problem solution process.

dates)： 学習者が誤りそうな概念の候補である。ここでの概念とは「物体の速度」や、「等速度直線運動の公式」などであり、問題解釈プロセスの誤り (5.2.1 で後述) と知識実行プロセスの誤り (5.2.3 で後述) の生成に用いる。

概念構造 (Concept structure)： 一般-特殊の関係をもった知識の構造で、知識検索プロセスの誤り (5.2.2 で後述) の生成に用いる。概念の置き換え候補と概念構造は、(専ら、システム提供者が) あらかじめ用意しておく必要がある。

これらの要素は、図2に示すように、問題解決プロセスと密接に関係している。問題解釈プロセスでは、表層構造、更に定式化構造が生成される。次に、知識検索プロセスでは、制約構造から適用可能な知識を検索し、検索された知識と定式化構造をもとに、解法構造が生成される。最後に、知識実行プロセスでは、解法構造を実際に計算して解を導出し、目標構造が生成される。

4.2 正答を導く問題解決例

ここでは、図3の問題を例に説明する。まず一次ユーザは、問題文をもとに表層構造 (Surface structure) のデータ (図4、ただし、実際のデータを示すために和文表記とした) を作成して、システムに与える。図中の1行目 (ただし、行の折返しは改行記号で示している) は問題文であり、2行目以降が表層構造を構成するデータである。データ中で表記される概念やオブジェクトは、後述する制約構造内に含まれているものを用いる必要があるため、システムで適用可能な問題は、この制約構造に依存する。そのため一次ユーザには、問題文にどのようなオブジェクトや概念が含まれ、属性がどのようにになっているのかを把握し、制約構造

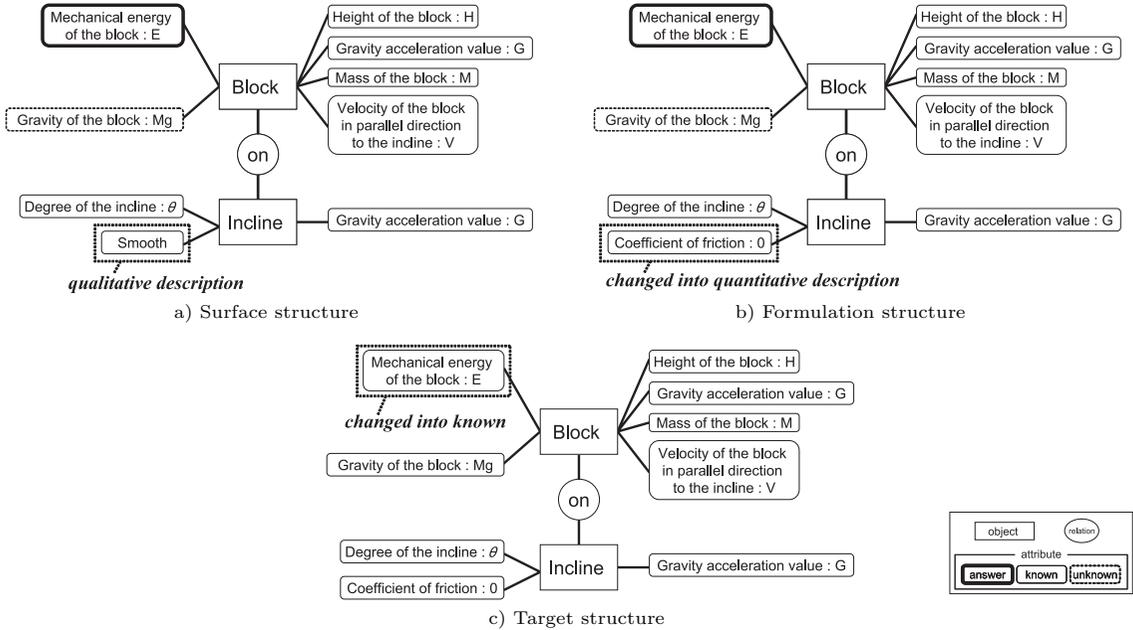


図 5 問題解決プロセスと問題の構造
Fig. 5 Problem solution process and the structure of the problem.

A block of mass M is put on a smooth incline.
The angle of the incline is θ and the gravity acceleration value is G .
Find the mechanical energy (E) in height H when the initial velocity of the block is V .

図 3 問題例
Fig. 3 An example of problem.

問題 1 質量 M のブロックを 2 斜面上に置く。 3 の傾斜角度を 30° 、重力加速度を 4 とする。 5 の初速度が V 、 6 の高さ H での力学的エネルギーを求めよ。
 ブロック質量 M known
 動摩擦係数 なめらか known
 斜面傾角 30 known
 重力加速度 G known
 ブロック斜面方向初速度 V known
 ブロック高さ H known
 ブロック力学的エネルギー E answer

図 4 表層構造のデータ例
Fig. 4 An example of problem.

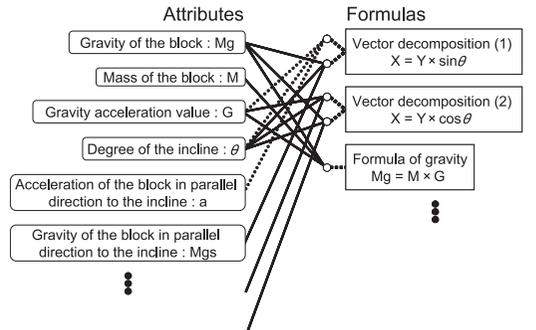


図 6 制約構造の一部
Fig. 6 A part of constraint structure.

に基づいて適切に表層構造を記述することが求められる。なお、誤選択肢と解説を生成するために一次ユーザに必要な手動の作業は、この作業のみである。

図 5 中で, known とした属性は既知の属性, unknown とした属性は既知の属性, answer とした属性は求めるべき属性である。システムは、一次ユーザから与えられた表層構造 (図 5(a)) から、定式化構造

(Formulation structure : 図 5(b)) を経て, 目標構造 (Target structure : 図 5(c)) を自動生成する。

まずシステムは、与えられた表層構造 (図 5(a)) から定式化構造 (図 5(b)) を生成する。この過程で, 定性的属性「滑らかな (Smooth)」が, 定量的属性「摩擦係数 (Coefficient of friction): 0」に変更される。次に, 定式化構造の known 属性を利用して, 制約構造 (Constraint structure : 図 6, データ表現は図 7) の中から, answer 属性を known 属性に変化させられるような知識を検索する。制約構造には, 130 種類 (延べ数では 532) の知識から構成される 185 個の式

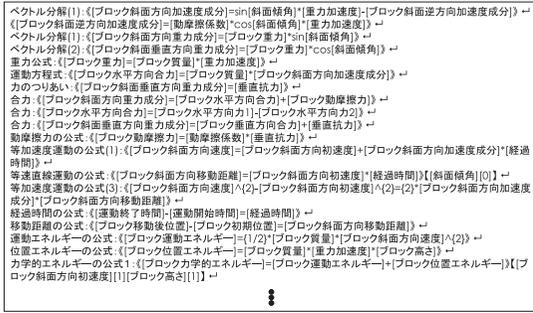


図 7 制約構造のデータ例
Fig. 7 An example of problem.

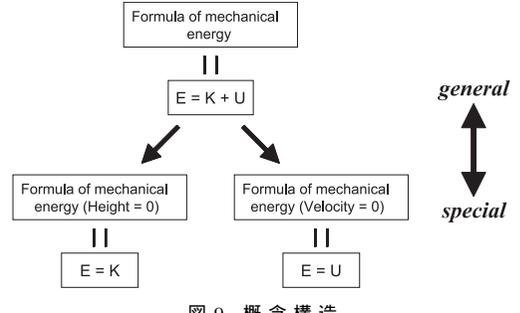


図 9 概念構造
Fig. 9 Concept structure.

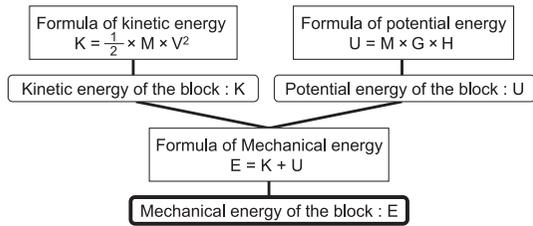


図 8 解法構造
Fig. 8 Solution structure.

が含まれている．この中から「ベクトル分解 (Vector decomposition (1))」など，必要な式を選択して組み合わせることで，解法構造 (Solution structure: 図 8) を生成する．最後に，解法構造を計算することによって，定式化構造の answer 属性を known 属性に変化させ，目標構造 (図 5 (c)) を生成する．

5. 誤選択肢と解説の生成

本研究のシステムでは，表層構造の属性や制約構造の知識といった問題解決モデル中の概念を「似ているが異なる概念」に置き換えることによって，問題解決プロセスの下位プロセスの一つを誤ったプロセスに置き換え，正答の解法と意味的に紛らわしい誤選択肢を生成する．更に，その概念がどのプロセスでどのように置き換えられたのかを示すことによって，正答との解法との相違点に基づいた解説を生成する．

5.1 概念の置換えによるプロセスの置換え

正答の解法と意味的に紛らわしい誤選択肢を生成するために，問題解釈プロセスの誤りと知識実行プロセスの誤りでは「概念の置換え候補」を，知識検索プロセスの誤りでは「概念構造」を，それぞれ用いる．それらを利用する理由は，ある概念を近傍の概念に置き換えることで，「似ているが異なるプロセス」を生成

できるからである．

概念の置換え候補とは，「物体の速度」や「等速度直線運動の公式」などの概念ごとに用意された，学習者が誤りそうな概念の候補である．物体の速度では， $[0]$ や $[V]$ や $[-V]$ などの値が，等速度直線運動の公式では $[x = v_0 \times t + a \times t^2]$ や $[x = v_0 \times t + \frac{1}{2} \times a \times t]$ などの式が候補となる．

概念構造とは，対象領域に存在する知識間の一般-特殊関係を表現したものである．図 9 の場合，物体に高さや速度が存在するときの力学的エネルギーの公式 $[E = K + U]$ という知識に対して，高さが 0 のときの公式 $[E = K]$ と，物体の速度が 0 のときの公式 $[E = U]$ が置換えの候補となる．こうした概念の置換えにより生成された誤りのプロセスは，もとのプロセスと「似ているが異なるプロセス」であるといえる．この概念構造には，図 9 に示したような関係構造が 11 個，含まれている．なお，本研究では，一つの誤選択肢につき一つの概念の置換えが行われ，二つ以上の誤りが複合されている場合は考慮しない．原理的には二つ以上の概念の置換えも可能だが，誤選択肢生成のモデルを単純化するために，一つの誤りに止めている．

5.2 誤選択肢と解説の生成例

誤選択肢と解説の生成について，例題に基づいて 3 種類の誤りごとに説明する．

5.2.1 問題解釈プロセス

表層構造から定式化構造を生成する過程で，概念の置換え候補を用いる．概念の置換え候補は 38 個用意されており，係数や符号を変えることで 1 候補につき 2~4 パターンの誤り候補が含まれている．

例えば，初速度を $[V]$ から $[-V]$ や $[0]$ に置き換えたとする (図 10)．この場合，生成される誤選択肢はそれぞれ， $[\frac{1}{2}MV^2 + MGH]$ ， $[MGH]$ である．

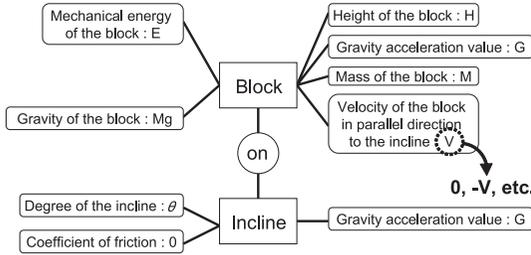


図 10 問題解釈プロセスの誤りの生成
Fig. 10 Error generation in question interpretation process.

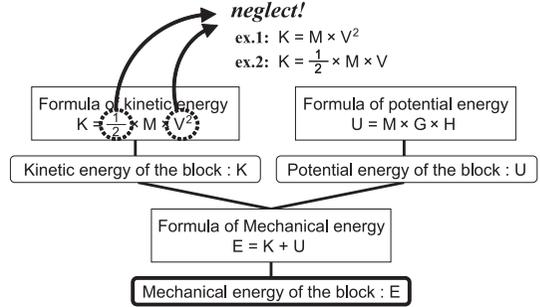


図 12 知識実行プロセスの誤りの生成
Fig. 12 Error generation in knowledge execution process.

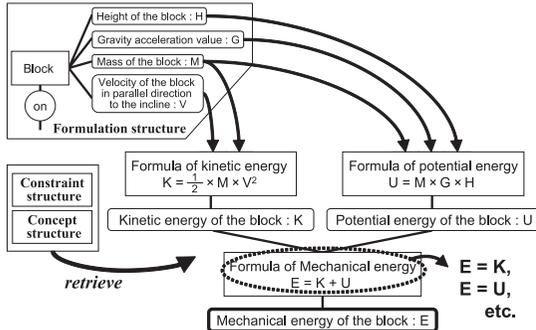


図 11 知識検索プロセスの誤りの生成
Fig. 11 Error generation in knowledge retrieval process.

なお前者は、速度が 2 乗されるため正答と同じ形となっているが、プロセスが異なるため、本研究ではこれも誤選択肢として出力する。

解説はそれぞれ、「問題解釈プロセスの誤りです。物体の初速度を [V] とするところが [-V] となっています」、「問題解釈プロセスの誤りです。物体の初速度を [V] とするところが [0] となっています」となる。

5.2.2 知識検索プロセス

定式化構造の属性を使い、制約構造中の知識から解導出に必要なものを検索し、解法構造を生成する。その過程で、知識の概念構造を用い、物体に高さや速度が存在するときの力学的エネルギーの公式 $[E = K + U]$ を、高さ 0 のときの公式 $[E = K]$ や、速度 0 のときの公式 $[E = U]$ に置き換えたとする (図 11)。この場合、生成される誤選択肢はそれぞれ、 $[\frac{1}{2}MV^2]$ 、 $[MGH]$ である。

解説はそれぞれ、「知識検索プロセスの誤りです。物体に高さや速度が存在するときの力学的エネルギーの公式 $[E = K + U]$ を使うところで、高さが 0 のときの力学的エネルギーの公式 $[E = K]$ を使って

います」、「知識検索プロセスの誤りです。物体に高さや速度が存在するときの力学的エネルギーの公式 $[E = K + U]$ を使うところで、速度が 0 のときの力学的エネルギーの公式 $[E = U]$ を使っています」が生成される。

5.2.3 知識実行プロセス

解法構造を実際に計算して答えを求め、概念の置換え候補を利用しながら、目標構造を生成する。概念の置換え候補は、150 個用意されている。

例えば、運動エネルギーの公式 $[K = \frac{1}{2} \times M \times V^2]$ を、 $[K = M \times V^2]$ や $[K = \frac{1}{2} \times M \times V]$ に置き換えたとする (図 12)。この場合、生成される誤選択肢はそれぞれ、 $[MV^2 + MGH]$ 、 $[\frac{1}{2}MV + MGH]$ である。

解説はそれぞれ、「知識実行プロセスの誤りです。運動エネルギーの公式を $[K = \frac{1}{2} \times M \times V^2]$ とするところが $[K = M \times V^2]$ となっています」、「知識実行プロセスの誤りです。運動エネルギーの公式を $[K = \frac{1}{2} \times M \times V^2]$ とするところが $[K = \frac{1}{2} \times M \times V]$ となっています」となる。

6. 提案システム

4.、5. で説明した手法に基づき、Java2 (SE) SDK を用いて、提案システム (図 13) を開発した。

「問題送り (Next question)」「問題戻し (Previous question)」ボタンで、処理する問題を切り換えることができる。問題の範囲は問題集 [10] の第 1 編、第 1 章：運動の表し方、第 2 章：運動の法則、第 3 章：仕事と力学的エネルギーの各章末にある演習問題 11 問の内、小問 32 問を対象とした。小問同士をまとめられる場合、例えば小問 (1) の結果をそのまま小問 (2)

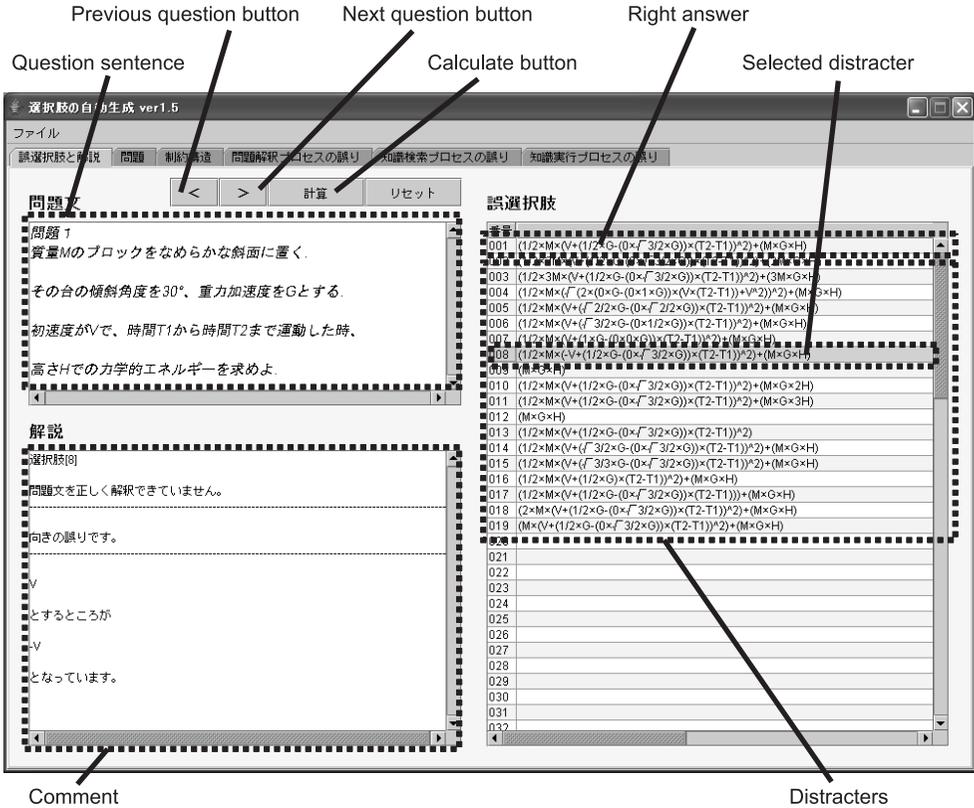


図 13 提案システムのユーザインタフェース
Fig. 13 User interface of proposed system.

に利用する場合には組み合わせて一つの小問とした。なお、本システムでは連立方程式を扱えないので、そのような問題（小問で 6 問存在した）は排除した。最終的に 16 問をシステムに実装した。また、問題解釈プロセスの誤りと知識実行プロセスの誤りを生成するための「概念の置換え候補」と知識検索プロセスの誤りを生成するための「概念構造」、及び制約構造については、上記の問題の範囲で作成し、実装した。

「計算 (Calculate)」ボタンを押すことで、正答 (Right answer) と誤選択肢 (Distracters) の一覧が出力される。更に、誤選択肢を選択すると、解説欄にその解説 (Comment) が出力される。図の例では、1 個の正答と 16 個の誤選択肢が表示されており、そのうち、問題解釈の誤りに基づいた誤選択肢 [$M \times G \times H$] が選択され、その解説が出力されている。

7. 自動生成機能の評価実験

7.1 目的と方法

システムで自動生成される個々の誤選択肢と解説について、二次ユーザとしての学習者から見た妥当性と有効性を検証することが目的である。我々の研究グループでは、システムの評価実験を 2 段階に分けて実施している。まず第 1 段階では、モデルやシステムの設計の妥当性を検証することを目的として、大学生を被験者とした比較的簡易な評価にとどめている。そして第 2 段階では、学習における有効性を検証することを目的として、システムの実践利用を含めた本格的な評価を実施している。本実験は第 1 段階であるため、高校での履修及び大学入試時の科目選択から、高校レベルの物理を十分に学習している工学系の大学生 8 人を被験者とした。その理由は、高校レベルの物理についての理解が二次ユーザよりも深い者でなければ、想定する二次ユーザ（高校生）にとっての妥当性や有効

表 2 質問項目ごとの集計結果
Table 2 Results summarized by question items.

質問項目	肯定的な回答を得た 誤選択肢と解説の組	中間的な回答を得た 誤選択肢と解説の組	否定的な回答を得た 誤選択肢と解説の組
1a. 問題を解く過程で何か一つ間違えば、この選択肢を選び得る	111 68.1%	23 14.1%	29 17.8%
1b. 市販の物理の問題集の誤選択肢と比べて違和感がない	119 73.0%	27 16.6%	17 10.4%
1c. 高校生なら間違えて選択することがあり得る	97 59.5%	38 23.3%	28 17.2%
1d. 解説で示された場所でこのような間違いは起こり得る	84 51.5%	32 19.6%	47 28.8%
2a. 正しい解き方との相違点に基づいた説明になっている	139 85.3%	16 9.8%	8 4.9%
2b. 市販の物理の問題集の解説と比べて違和感がない	110 67.5%	29 17.8%	24 14.7%
2c. 高校生でも解説を理解できる	137 84.0%	15 9.2%	11 6.7%

性を判断できないと考えたためである。

問題を解かせた後で、システムが出力した誤選択肢と解説の組の一覧が印刷されている用紙を見せ、誤選択肢と解説の組ごとに、七つの質問項目（表 2）に対し「そう思う」、「ややそう思う」、「ややそう思わない」、「そう思わない」の 4 段階で評価させた。評価に際しては、本システムの利用者は問題解決プロセスに則った学習活動を行うという前提で判断させた。より具体的には、問題の内容を読み取り、どのように問題を解決するかを考え、概念や公式を利用して実際に問題を解決していくという学習活動を想定させ、そうした活動の中で、誤選択肢やその解説の妥当性や有効性を評価させた。

誤選択肢に関しては、本システムの出力をそのまま利用すると数式に冗長な部分があるため、積算の「 \times 」記号を除いたり、0 が掛けられている項を削除して、数式を整理したものを利用した。例えば、

$$\left(\frac{1}{2} \times M \times \left(V + \left(\frac{1}{2} \times G - \left(0 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times G \right) \right) \right) \times (T2 - T1) \right)^2 + (M \times G \times H)$$

という数式は

$$\frac{M}{2} \left(V + \frac{G}{2} (T2 - T1) \right)^2 + MGH$$

と整理した上で被験者に提示した。なお、今回の実験では手動で数式を整理したが、これらの処理は形式的に実行可能であるため、今後、自動で整理する機能の実装を考えている。

また、問題によっては誤選択肢の数が 40 以上、自動生成されるものもあった。そこで被験者の負荷を減らすために、同じ種類の誤選択肢が多く存在する問題に関しては誤選択肢と解説の組を減らすことで調整した。このとき、1 問につき 3 種類の誤りのタイプがそれぞれ 3~4 組ずつ含まれるようにしつつ、似通ったものが複数ある場合にはそれらから代表的なものを選ぶようにして、平均で約 10 組になるように調整した。全体では、163 組であった。

提案システムに実装した 16 問に対し、各問題当たり 2 人の被験者に評価させた（被験者 1 人当たり 4 問を評価）。「そう思う」~「そう思わない」に対して 4~1 を割り当て、2 人の被験者の回答の平均値を評価値とした。3 以上を肯定的な回答、2 以下を否定的な回答、2.5 を中間的な回答とした。回答についての制限時間は設けなかった。

7.2 結果

表 2 は、質問項目ごとに、どの程度の誤選択肢と解説の組が肯定的に評価されたのかを示している。質問項目 1a~1d は選択肢について、2a~2c は解説についてたずねている。

解説そのものについての質問である 2a, 2c に対しては、おおむね良好な評価を得たといえる。その一方で、問題集との比較に関する 2b に対する評価はやや低い結果となった。しかし、これまで接してきた紙媒体の問題集と比較して、本システムに対する慣れを考慮すると、やや低い評価にとどまるのはやむを得ないと考えられる。これらの結果を総合すると、自動生成された解説については、おおむね高く評価されたといえよう。

表 3 誤選択肢と解説の組ごとの集計結果

Table 3 Results summarized by pairs of a distracter and a comment.

回答傾向	組数	割合
肯定的な回答を得た誤選択肢と解説の組	118	72.4%
中間的な回答を得た誤選択肢と解説の組	10	6.1%
否定的な回答を得た誤選択肢と解説の組	10	6.1%
評価が割れた誤選択肢と解説の組	25	15.3%

選択肢に関しては、全体的に、解説と比べて相対的に低い評価にとどまっている。市販の問題集との比較である 1b に対する評価が最も高く、否定的な回答は 1 割程度であった。

現時点では、自動生成される選択肢を特にフィルタリングせずに提示している段階での評価であり、今後更に研究を進めて、より適切な選択肢の提示を目指していることから、現時点での可能性は十分に示唆できていると考えられる。

以上の結果から、少なくとも個々の組み合わせで評価した場合、本システムで自動生成される誤選択肢はおおむね妥当であり、その解説もまたおおむね有効であるといえる。

表 3 は、誤選択肢と解説の組ごとに、肯定的な回答をどの程度得たのかを示している。大半の誤選択肢と解説の組が七つの質問項目のうち四つ以上で肯定的な回答を得ており、おおむね良好な評価結果が得られたといえる。

7.3 考 察

評価結果から、提案システムによって自動生成された誤選択肢と解説の妥当性と有効性が示唆されたといえる。このことから、問題解決プロセスに則った学習活動、つまり、問題の内容を読み取り、どのように問題を解決するかを考え、概念や公式を利用して問題を解決していくという学習活動においては、提案システムの有効性が期待できる。また、そうした自動生成によって、一次ユーザの負担を軽減することが期待できる。しかし 4. で述べたように、一次ユーザには、制約構造に基づいて適切に表層構造を記述することが求められる。そのため、この点については評価が必要であり、今後の課題として残されている。

表 3 に示した集計では、評価が割れた誤選択肢が 25 個あったが、そのうち、概念の誤りが 10 個、解法の誤りが 9 個であった。システムが出力した解説には、概念の値は記述されているが、概念の名前が記述されていなかった。概念の誤りについては、このことが、被

験者の評価を割れさせた原因ではないかと考えられる。また、解法の誤りに関しては、概念構造の一部に妥当ではないものが含まれていた可能性が考えられる。システムの出力の妥当性は、4. で説明した各種構造に依存する。しかしながら一般に、対象の概念群の数が多くなるほど、それらを対象の概念群を正しく構造化できていることを保証することは困難である。実装済みの概念構造が、必要な範囲を網羅できているか、更には、より広い範囲から検討した場合に妥当であるのかなど、概念構造の妥当性については今後、検証する必要があるだろう。

なお、多肢選択問題としての評価を行うためには、(1) 正答選択肢と誤答選択肢の組み合わせを評価すること、更に、(2) その選択肢問題が学習やテストとして有用であることを確認すること、の 2 点が必要であるが今後の課題である。これらについて、以下でより詳細に述べる。

まず、(1) の組合せの評価について、説明する。選択肢問題は、正答選択肢と複数の誤選択肢の組として構成されるが、その際には、正答と誤選択肢全体の関係を考慮して、組合せを決定する必要がある。例えば、表面的に明らかに他の選択肢と傾向の違った選択肢が含まれていれば、学習者はその選択肢の意味を考慮することなく、その選択を回避してしまうことが推察される。そのため、どのように誤選択肢を組み合わせるのが重要な問題となる。本研究で達成できたのは、選択問題の素材としての誤選択肢と解説の生成までであり、誤選択肢群の組合せ方については、多肢選択問題の自動生成を実現するための今後の最も重要な課題となる。

次に、(2) の学習における有用性について、説明する。本研究の中心的なアイデアは、「正解を隠すための誤選択肢」ではなく、「学習者の誤りをとらえるための誤選択肢」を生成することである。このような誤選択肢は、それぞれの答えを吟味するために必要な情報を含んでおり、従来の誤選択肢とは異なった意味をもっている我々は考えている。そうした誤選択肢の学習効果について検討することも、今後の重要な課題であると考えている。

8. む す び

本研究では、e ラーニング環境などで行う自学自習用の、多肢選択問題の誤選択肢とその解説を自動生成する手法と、それを実装したシステムを開発した。

本システムは、問題解決プロセスを用いて、正答に至るプロセスの一部を意図的に誤ることにより、誤選択肢を生成する。と同時に、正答に至るプロセスと誤ったプロセスとの差分の情報を用いて、誤選択肢についての解説を自動生成する。

評価の結果、自動生成された誤選択肢と解説は、学習者にとっておおむね妥当であることが示唆され、本システムによって、学習のために有用な誤選択肢と解説を自動生成するとともに、今後の評価実験による検証が必要であるものの、一次ユーザの負担の軽減を期待できることが明らかになった。

最後に、これまでの成果を踏まえて、本研究の可能性について考察する。本論文で提案した自動生成を実現するためには、実行可能な問題解決過程のモデルが必要となり、また、生成される選択肢や解説の質もこのモデルに依存することとなる。我々の仮説として、(1) 物理の問題には、本研究で提示したモデルが適合しており、物理の問題に関しては本システムを拡張していくことで網羅できる、(2) 算数や数学の文章題の多くについても、問題解決過程のモデルを同様に作成することが可能であり、本研究の成果を適用可能であると考えている。これらの仮説の検証については、今後の課題である。その他、様々な学習課題において部分的ではあるものの、同様な問題解決過程のモデルを想定することができる対象は存在しており(例えば[3]で対象としている一部の情報処理試験の問題)、それらへの適用の試みも今後の大きな課題となる。また、モデル作成のコストを考えるとそのオーサリングの支援に関する検討も必要となるだろう。

文 献

- [1] 坂田 篤, 村上誠一, 小清水誠, “Web を活用した演習問題の生成ソフトの試作” 釧路工業高等専門学校紀要, vol.35, pp.11-14, 2001.
- [2] 河崎雅人, “多肢選択型 Web 教材作成支援システムの開発” 信学技報, ET2004-3, May 2004.
- [3] 金西計英, 林賢太郎, 光原弘幸, 矢野米雄, “教材知識に基づき WBT 上で演習問題を生成する機能の実現” 教育システム情報学会誌, vol.20, no.2, pp.71-82, 2003.
- [4] 磯本征雄, A. Dumbuya, 津森伸一, “多肢選択問題を用いた学力評価システムの WBT による実践利用” 教育システム情報学会誌, vol.21, no.4, pp.379-383, 2004.
- [5] 北岡大輔, 松田憲幸, 平嶋 宗, 瀧 寛和, “補助教材のための選択問題と誤答解説文の自動生成の構想” 信学技報, ET2003-38, Sept. 2003.
- [6] 平嶋 宗, 中村祐一, 上原邦昭, 豊田順一, “認知的考察に基づく知的 CAI のための学生モデルの生成法—プロセス駆動型モデル推論法” 信学論 (D-II), vol.J73-D-II, no.3, pp.408-417, March 1990.
- [7] 平嶋 宗, 東 正造, 柏原昭博, 豊田順一, “補助問題の定式化” 人工知能誌, vol.10, no.3, pp.83-90, 1995.
- [8] T. Hirashima, T. Niitsu, K. Hirose, A. Kashihara, and J. Toyoda, “An indexing framework for adaptive arrangement of mechanics problems for ITS,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E77-D, no.1, pp.19-26, Jan. 1994.
- [9] 駿台 大学入試完全対策シリーズ 2005-大学入試センター試験実践問題集 物理 IB, 駿台文庫, 2004.
- [10] 教科書ガイド数研版 物理 I, 数研図書, 2007.

(平成 21 年 6 月 22 日受付, 10 月 13 日再受付)



舟生日出男 (正員)

1995 創価大・教育卒。1998 東工大大学院修士課程了。2001 東京理科大学大学院博士後期課程満期退学。2002 茨城大学人文学部講師。2004 同助教授。2005 広島大学大学院工学研究科助教授。現在、同准教授。博士(工学)。協調学習環境における知識の外化・共有を促進する学習支援システムの研究に従事。日本教育工学会、日本科学教育学会、人工知能学会、情報処理学会、教育システム情報学会、日本工学教育協会等各会員。



穰山 雅史

2008 広島大学院博士前期課程了。同年 NEC 入社。在学中は、問題解決過程のモデル化に関する研究に従事。



平嶋 宗 (正員)

1986 阪大・工・応用物理卒。1991 同大学院博士課程了。同年同大産業科学研究所助手。1996 同講師。1997 九州工業大学情報工学部助教授, 2004 より広島大学大学院工学研究科教授。工博。人間を系に含んだ計算機システムの高度化に興味をもち、特に知的学習支援システムの研究に従事。人工知能学会、情報処理学会、教育システム情報学会、日本教育工学会、日本教育心理学会等各会員。