

シミュレーションによる物理問題解答のための問題分類

Categories of Questions for Simulation-based Physics Test Solver

横野 光*¹ 稲邑 哲也*^{1*2}
Hikaru Yokono Tetsunari Inamura

*¹国立情報学研究所 National Institute of Informatics
*²総合研究大学院大学 The Graduate University for Advanced Studies

We are constructing a physics test solver using physics simulator. There are various questions in physics test and it is difficult to solve them with a unique solver. Therefore, we need to use different solver according to each question type. In this paper, we categorize physics questions and discuss properties of questions which a simulation-based solver can not answer.

1. はじめに

大学入学試験の物理の問題では、与えられた状況において発生する物理現象に関する問題や物理的な知識を問う問題などの様々な形式の問いが出題される。我々は国立情報学研究所の人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか」[新井 12]において、このような物理問題を解答するシステムの構築を行っている。

物理に限らず他の科目にも共通することであるが、大学入学試験では様々な種類の問題が出題されるため、問題解答のためには対象としている科目においてどのような問題が存在し、それらの特徴や必要となる知識処理を分析する必要がある。現在、物理問題解答において、我々は主に物理シミュレータを用いた問題解答システムの構築を行っている [Yokono 14] が、このシステムが解答できる問題の種類も限られている。そのため、システムが解答できない問題については異なる解答器を構築する必要がある。

本稿では大学入試センター試験を中心に物理問題の分類を行い、特徴毎に必要な処理と現時点でのシステムの対応状況について述べる。

2. シミュレーションによる問題解答システム

物理シミュレータを用いた問題解答システム [Yokono 14] の概要を図 1 に示す。

システムは自然文やイラストなどで構成される問題を入力として受け取り、その意味内容を表した形式表現に変換し、それから物理シミュレータへの入力に変換し、シミュレーションを行う。問題文をシミュレータの入力へ直接変換することも可能であるが、本システムでは複数のシミュレータの使用を想定しているため、共通の形式表現を定義している。この形式表現では、問題を物体やその属性、物体に対して行われる操作、物理現象、問題の解答形式などを意味する一階述語の論理式として表現する。なお、現時点では自然文のみからの問題解釈を行っており、イラストに含まれている情報については人手でアノテーションを行っている。

シミュレーションの結果は観測可能な物理量の時系列データとして得られ、それをもとに問われている内容と形式にあわせて問題に解答する。例えば、“初速度 v で運動する物体が停

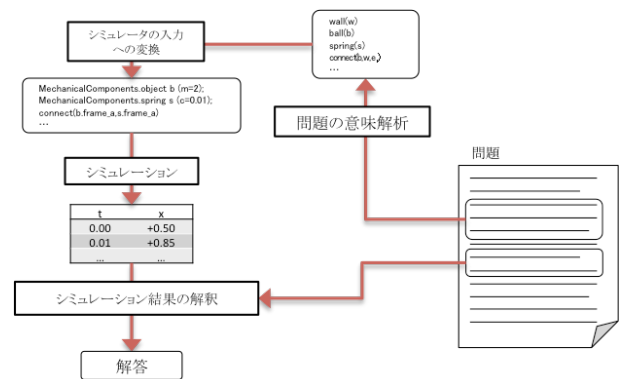


図 1: システムの概要

止した時間を求めよ”という問題では、“停止する”=“速度が 0 になる”という知識からこれを満たす時点をシミュレーション結果から探索し、その値を返す。

一般的な問題解答の手順は問題の状況から発生する物理現象を推測し、それに関わる物理公式を用いて、計算を行うというものである。本システムではこの過程において物理現象の推測を物理シミュレータが担当しているとみなすことができる。

3. 物理試験問題の特徴分析

センター試験 2005, 2009, 2013 年度物理の本試験、追試験と 2011 年版代々木ゼミナール編 大学入試センター試験実践問題集 (以下、実践問題集) の問題の分析を人手で行った。問題の例を図 2 に示す。センター試験は基本的に 4,5 個の大問で構成され、第 1 問は各分野からの小問の集合、以降の大問は主に分野毎に分かれており、各大問はある状況についての複数の小問で構成されている。センター試験の過去問は大学入試センターの Web サイト*¹等で公開されている。実践問題集は 7 回の選択式の模擬試験で構成されており、各試験の形式はセンター試験のものと同様のものとなっている。

本節では一般的な問題の特徴と本システムの観点からの特徴について述べる。以下の分析は小問単位で行っており、小問の総数は 323 個である。

連絡先: 横野光, 国立情報学研究所, 〒 101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2, yokono@nii.ac.jp

*¹ <http://www.dnc.ac.jp/>

問 4 図 3 のように、高さ h の位置から小物体 A を静かに離すと同時に、地面から小物体 B を鉛直上方に速さ v で投げ上げたところ、二つの小物体は同時に地面に到達した。 v を表す式として正しいものを、下の①～⑤のうちから一つ選べ。ただし、二つの小物体は同一鉛直線上にないものとし、重力加速度の大きさを g とする。

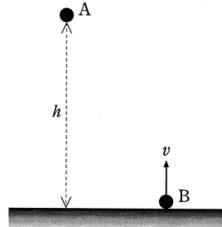


図 3

- ① $\frac{\sqrt{gh}}{2}$ ② $\sqrt{\frac{gh}{2}}$ ③ \sqrt{gh} ④ $\sqrt{2gh}$ ⑤ $2\sqrt{gh}$

図 2: 物理問題の例 (2013 年度センター試験物理 I 本試験より引用)

3.1 分野

高校の物理は“力と運動”，“波”，“熱と気体”，“電気と磁気”，“原子”という 5 つの分野からなる*2。分野での分類結果を表 1 に示す。“物理一般”は物理史に関する問題である。

表 1: 小問の分野

分野	小問数
力と運動	104
波	93
熱と気体	31
電気と磁気	88
熱と気体, 電気と磁気	4
原子	2
物理一般	1

この分類は問題の状況が物理シミュレーションでどの程度再現できるかということと対応する。例えば，“力と運動”における物体の運動や“電気と磁気”における電気回路などに関しては、既存の物理シミュレータの多くが対応しており、本システムにおいても比較的解答可能であると考えられる。一方、波や電磁気、熱力学などは、その物理現象をシミュレーションするシステムは存在するものの、高校物理におけるこれらの分野で扱われる物理現象は限定的であり、ある程度抽象化された状況での出題がなされる。そのような問題に対して既存のシミュレータを使う場合、問題には記述されていないようなことがシミュレーションの実行に必要ななど、そのまま利用するのは困難であることが多い。

また、基本的には各問題は 1 つの分野に関してのものがほとんどであるが、複数の分野が関係するものもある。例えば、エネルギー保存則が関係する問題では熱によって得られたエネルギーを電気エネルギーに変換するといったような状況が出題される。全ての現象を再現できるようなシミュレータであればシミュレーションによって問題解答が可能であろうが、このような問題で求められていることは、どのような物理現象が起き

*2 この分類の名前は数研出版チャート式新物理から引用している

たかの理解ではなくエネルギー保存則が正しく適用できるかどうかであるため、物理シミュレーションによる解答ではなく、数式処理を用いた解答の方が望ましいと考えられる。

3.2 問題の種類と焦点となっている時点

物理の問題は大きく分けて、時間に沿って展開する状況に対して、そのある時点での物理的な状況についてのものと知識を問うものがある。前者は状況の基本的な構造は初期状態とそれに対する何らかの操作、その結果として発生する物理現象が記述され、この一連の展開から例えば初期状態と結果状態での物理量の値についての問題が出題されるという形になっている。また、例えば“初速度を 2 倍にすると停止するまでの距離はどうなるか”といったような、異なる条件での状況間の比較も出題されることもある。

問題の種類と、状況のどの時点での物理量が問題となっているか、また、単一の状況か複数の状況かという観点からの分類を表 2 に示す。1 つの小問で複数の解答を求める問題もあるため、それらは重複して数えている。“状況変化”とは例えば初

表 2: 問題の種類と焦点となっている時点

種類	焦点の時点	単一の状況	複数の状況
ある状況に関する問題	初期状態	70	2
	結果状態	156	62
	状況変化	25	
知識問題		13	

期状態から結果状態までにおける物体の運動の様子や物理量の変化の度合いを問うような問題である。

物理シミュレータは与えられた初期状態から物理法則に基づいて次の状況を予測する、演繹的なシステムであるとみることができる。従って、この分類では結果状態を問うような問題に関しては、物理シミュレータをそのまま適用して解答することができる。状況変化を問う問題は与えられた初期状態から結果状態までのシミュレーション結果に基づいて解答を行えば良いため同様であると言える。

一方で、初期状態が焦点となっている問題では、シミュレーションの実行に必要な値が問題で問われているため、そのままではシミュレーションを実行することができない。そこで本システムを用いた解答手法ではこの種の問題に対しては、シミュレーションの実行に必要な値を適当に設定し、それに基づいてシミュレーションを行い、その結果を検証することで、初期状態として設定した値の妥当性を判定し、もし妥当であると判定されればその値を用いて問題に解答することを考えている。物理の問題では状況の一連の変化が記述されていることが多い。そこで、仮定した初期状態から得られたシミュレーション結果と問題文の記述を比較することでシミュレーションの妥当性を判断することが可能であると考えられる。

また、複数の状況が出現する問題に関しては、それぞれの状況について解答に必要な値をシミュレーションによって獲得し、それらの値を用いることで解答する。

3.3 問題文の言語表現の特徴

ある状況についての物理現象に関する問題のテキストは状況に関する記述と、解答形式に関する記述に分けることができる。例えば、図 2 の問題の場合、“ v を表す式として正しいものを……”という文が後者にあたり、それ以外が前者にあたる。

問題に書かれている状況の理解では基本的にこの前者のタイプの文を解釈することになる。我々のシステムではこの文の解

釈によって問題文を一階述語論理形式の形式表現へと変換し、そこからシミュレータへの入力へと変換する。新聞などの一般的なテキストに比べて物理問題の状況記述は事実が時系列順に書かれていることが多く、“かもしれない”といったモダリティ表現はほとんど現れず、文の構造も平易であるため、問題文の意味解析は比較的容易だと考えられる。

しかし、物理シミュレーションによる問題解答を考えると、問題文の解析結果から得られた状況がシミュレータによって実行可能である必要がある。すなわち、問題文をある種の形式的な表現へと変換することが意味解析の目的であれば、必要に応じて述語などを定義することで程度自由に表現することができるが、本システムではこの意味解析の結果を物理シミュレーションに用いるため、定義された述語が物理シミュレータの機能と対応している必要がある。物理の問題に出現する要素の多くは“おもり”や“ばね”などのような基本的な物体であり、物理シミュレータでもあらかじめ実装されているため、“平らな床の上に置かれた物体”のような基本的な要素で構成された状況であれば実行が可能であるが、例えば“穴の空いた円板”のような複雑な形状の物体や、“細い金属でできた棒を直角に折り曲げ……”といったような物体の変形操作を物理シミュレータ上で実行することは困難である。

また、問題によっては、初期状態の状況があらかじめ与えられている場合もあれば、何らかの操作によって初期状態の状況を構築する過程を含む場合もある。しかし、実際のシミュレーションではシミュレーション開始時の状況が何らかの形で与えられればそれがどのように構築されたかは問題ではない。例えば、前述のような棒を折り曲げるといった操作は初期状態を構築するための手順であり、問題解答には直接関係が無い。このことから、問題に書かれてある全ての事象をシミュレータ上で再現するのではなく、初期状態として与えられるべき状況のみを前もって認識することで、“折り曲げる”のようなシミュレータでは再現が困難な事象を除外することが可能であると考えられる。

3.4 画像の有無

多くの問題では自然文による問題記述に加えて、それに関する画像やグラフが添付されることがある。しかし、全ての問題が問題内容の理解に必須というわけではなく、受験者の理解の補助のために図が使われる場合もある。例えば、図2に付与されている図を用いずに問題に解答することは可能である。このような場合、画像解析は問題解答に必要ではない。

各設問における画像の有無と、問題の理解に画像解釈が必要か否かを表3に示す。画像解釈が必要か否かは人手で判断している。

表 3: 画像の有無と画像理解の要不要

		小問数
画像あり	問題理解に必要	143
	問題理解に不要	143
画像無し		37

問題理解に画像の解釈が必要な問題では、主に、対象の状況における物体の位置関係や、自然言語で表現することが困難な物体の形状などを画像から理解する必要がある。現時点では、我々のシステムは画像解析を行っておらず、問題文からのみ状況の理解を行っているため、画像理解が必要な問題は解答することができない。

物理問題で用いられる画像は要素が抽象化されたイラストであることが多く、また、図中に補助線など実際の状況には現れない要素が用いられることもあるため、一般的な画像認識に比べて困難なタスクであると考えられる。その一方で、物理問題の画像で出現する要素は非常に限られているため、この特徴を利用することで、画像理解が可能であると考えられる。

3.5 解答形式

物理の問題では対象となっている状況において、様々な形式での問いがなされる。問題の解答形式による分類を表4に示す。

表 4: 解答形式

解答形式	小問数 (重複あり)
数値, 数式	228
自然文	33
単語	22
グラフ	19
画像	19
その他	7

ある時点における特定の物理量の値やそれを表す数式を答える問題がほとんどであるが、それ以外にはその時にどのようなことが起きたのか、あるいは物理量がどのように変化したのかを記述した自然言語での表現を選択するものや、物理量の変化を表すグラフ、力の向きを表す画像など様々なものが存在する。

4. 物理問題解答に向けて

4.1 本システムの対応状況

これまで述べたように大学入試における物理の問題では対象とされた状況において発生する物理量についての問いが多く出題される傾向にあるが、分野や問われている内容、解答形式などが様々であり、これら全てを一つのシステムで解答することは困難である。

シミュレーションによる解答システムでは、物理シミュレータを用いて対象の状況を再現することで問題の解答を目指している。このシステムで解答が可能と考えられる問題は、主に記述された状況で発生する物理量についてのものである。

問題文の意味解析ではそもそも本システムの形式表現の定義がどの程度の問題を記述できるかが重要となる。昨年行った代ゼミセンター模試タスクにおいて代々木ゼミナールのセンター模試の過去問5回分の問題に対して人手で形式表現が記述できるかを評価したところ、記述できた問題の割合は0.53(55/103)であった。記述不可能な問題は3.3節で述べたような記述を含んでいたり、定義していない述語が必要となるようなものであった。後者に関しては辞書の拡張で対応できるが、前者に関しては形式表現の定義などを再考する必要がある。

採用しているシミュレータはOpenModelica^{*3}というモデリング言語 Modelica の実装である。Modelica の標準ライブラリには様々なモジュールが実装されており、力学の問題と電気回路の問題についてはこれらを用いて解答を行っている。但し、高校の物理では理想化された状況での物体の挙動が対象となることが多く、ある程度現実即した状況を想定している既存の物理シミュレータでは対応できない状況も存在するため、それに関しては独自のモジュールを作成して対応している。

*3 <https://openmodelica.org/>

一方で、波や電磁気のような分野では抽象化された状況の問題が出されることが多く、既存のシミュレータの直接的な利用は困難であると考えられる。これらに対しては、それぞれの分野での汎用的なシミュレータではなく、例えば波の重ね合わせや、電磁誘導などの個々の物理現象に特化した簡易的なシミュレータを構築しこれらを用いることによる解答を考えている。

しかし、シミュレーションが可能であるからといって入力された問題を解答できるというわけではない。物理の問題を解く際に我々はいわゆる物理問題の約束事のような常識や仮定を利用している。例えば、“糸で吊したおもりを板で支える”という表現を我々は特に疑問を持つこともなく理解することができるだろう。そのため、この“板で支える”という行為がどのように行われているのか、という点について問題文では言及されないことが多い。だが、この状況をシミュレータで行うためには“板で支える”という行為がどのようにして実現されているかということの考慮する必要がある。問題文から状況を理解しシミュレーションに繋げるためにはこの暗黙的に用いられている知識を顕在化させる必要がある。

解答の出力において、シミュレーション結果は具体的な物理量として得られるため、数値や数式、グラフとして解答すべき問題はほぼそのまま解答できる。しかし、結果状態を自然文による記述として解答すべき場合は、シミュレーション結果の解釈が必要となる。この処理は一種の記号設置問題 (symbol grounding) であるとなしめるため、例えば画像の説明文の生成などを行っている既存手法 [Ushiku 11] を利用することが可能であると考えられる。また、自然文を解答する問題では例えばコイルに流れた電流の向きのような、定性的な内容が聞かれることがある。物理現象の定性的な挙動の推論に関しては定性推論という分野で研究がなされており (e.g. [Forbus 84]), また、物理シミュレーションと定性推論を繋げる研究 [Klenk 14] も行われており、これらを利用した解答が考えられる。

現状では、本システムが対応可能な問題は利用可能なシミュレータの状況から、主に力学や電気回路で結果状態における物理量の値を解答する問題となっている。3.1 節の分類からこの種の問題が占める割合は高いが、現状ではその全てが解けているというわけでも無く、意味解析結果と物理シミュレーションの接合における個別の問題など、解決すべき課題も多く、また試験全体から見れば未対応の問題も多い。

初期状態における物理量を解答する問題については、3.2 節で述べたように、本システムにおいて初期状態として適当な値を設定し、そのシミュレーション結果と問題に記述されている結果状態とを比較しシミュレーションの妥当性を検証することで、解答が可能であると考えられる。しかし、どのように初期状態を仮定すればよいかについては明らかではない。単純には問題となっている物理量に値を代入して、シミュレーションの実行と検証を繰り返せば良いが、仮定すべき物理量が複数になった場合、試行回数が膨大となることが予想されるため、効率的に解を探索する手法が必要となる。

4.2 未着手の問題

本システムでの解答が困難と考えられる問題としては、特定の状況についての問題ではあるがシミュレーションが困難であると考えられる問題と知識を問う問題である。

シミュレーションが困難であると考えられる状況としては、前述のように複数の分野にまたがるようなものがある。その典型的なものはエネルギー保存則が関係する問題であるが、その他にも、振り子の運動と電磁誘導を組み合わせたような問題もある。これらの問題に対しては、例えば数学の問題解答モデル [Matsuzaki 14] のように数式処理をによる方法などの他の

手法による解答が必要となる。

また、物理に関する知識が問われる問題も本システムの対象外の問題である。この種の問題は教科書に記述されてあるような知識を用いて問題に解答するというものであり、自然言語処理における質問応答のタスクとして定式化ができると考えられる。しかし、一般的な質問応答とは異なり、物理の知識問題では、例えばある物理現象と関係が深い日常の状況を選択するというような問題が出題されることがある。このような問題は抽象的な記述である物理現象の説明と具体的な記述である日常の状況の対応関係の同定とみることができ、問題解答には単なる表層の対応だけではなく、推論が必要となる。

5. おわりに

本稿ではセンター試験の物理問題の分類を行い、この分類に基づいて、現在我々が取り組んでいるシミュレーションによる問題解答システムが対象とする問題について述べた。また、このシステムが対象としていない問題について、その解答手法について考察を行った。

物理問題の多くは対象とされた状況において発生する物理現象に関するものであり、シミュレーションによる問題解答システムはこの種の問題を対象としている。しかし、現状では全ての状況がシミュレーション可能というわけではなく、それらへの対応を進めている。また、本システムが対象としていない問題としては、知識問題があり、これについては質問応答として定式化し解答する必要がある。

問題の内容理解では現時点では自然言語で記述された問題文のみを対象としているが、内容理解に必要な情報が画像にのみ存在しているような問題もあるため、画像理解が必須となるため、今後はこれらについても取り組む予定である。

参考文献

- [Forbus 84] Forbus, K. D.: *Qualitative Process Theory*, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, No. 1-3, pp. 85–168 (1984)
- [Klenk 14] Klenk, M., Kleer, de J., Bobrow, D. G., and Janssen, B.: *Qualitative Reasoning with Modelica Models*, in *Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-14)* (2014)
- [Matsuzaki 14] Matsuzaki, T., Iwane, H., Anai, H., and Arai, N. H.: *The Most Uncreative Examinee: A First Step toward Wide Coverage Natural Language Math Problem Solving*, in *Proceedings of the Twenty-eight AAAI Conference on Artificial Intelligence* (2014)
- [Ushiku 11] Ushiku, Y., Harada, T., and Kuniyoshi, Y.: *Automatic Sentence Generation from Images*, in *the 19th Annual ACM International Conference on Multimedia*, pp. 1533–1536 (2011)
- [Yokono 14] Yokono, H. and Inamura, T.: *A Framework of Recognizing Physical Situation in Text Description with Physics Simulation*, in *Proceedings of ISEEE 2014* (2014)
- [新井 12] 新井 紀子, 松崎 拓也: ロボットは東大に入れるか? -国立情報学研究所「人工頭脳」プロジェクト, 人工知能学会誌, 第 27 巻, pp. 463–469 (2012)