

## 論理演算と物理シミュレーションの結合による物理問題解答

## Integrating Logical Calculation and Physics Simulation for Physics Tests Solving

横野 光\*<sup>1</sup>      稲邑 哲也\*<sup>1</sup>  
 Hikaru Yokono      Tetsunari Inamura

\*<sup>1</sup>国立情報学研究所  
 National Institute of Informatics

Toward solving physics tests of university entrance examination, we propose a simulation-based model. In our model, the system simulates a situation described in a question with physics simulator and answers based on the simulation result. In the evaluation using practice entrance examination data of preparatory school, though our system could address some questions, it could answer correctly for them. We discuss effectivity of our model and issues to be addressed for improvement.

## 1. はじめに

現在、我々のグループは国立情報学研究所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]において物理問題解答に取り組んでいる。大学入試における物理問題では、受験者は主に物理現象に関する理解能力を問われる。問題を解くためには問題に書かれてある内容を理解する必要があり、物理の問題においては、この内容とは問題として記述されている状況、具体的には出現している物体やその属性、それらの位置関係、それらに対してなされる操作や、そこから起こるであろう物理現象を意味する。本研究ではこの物理現象を物理量に関する時系列データとして捉える。例えば、“物体が動いた”という物理現象は時刻によって変動するその物体の位置や速度で表現されると考える。この物理量を物理シミュレーションによって得る。従って、物理現象の理解とは指示された物理現象に対応する物理量の時系列データを物理シミュレーションによって生成することとみなす。

本研究では自然文で記述された問題文を入力として、そこに記述されている状況を物理シミュレータを用いてシミュレーションを行い、その結果を元に問題に解答するというモデルによって問題解答を目指す。また、提案モデルではシミュレーション結果を単に問題解答に使うだけではなく、問題の解釈における曖昧性の解消にも利用する。

本稿では 2013 年 11 月に行った、実際の予備校で使用されたセンター試験の模擬試験データを用いた評価タスクについて述べ、このタスクを通じて明らかになった提案モデルや物理問題解答に対する課題や問題点について議論する。

## 2. シミュレーションを用いた物理問題解答モデル

大学入試における物理問題の多くは、図 1 に示すような、ある状況において起きる物理現象に関するものである。

図 1 の問題では“物体が斜面をすべる”という物理現象における物体の加速度が問われている。我々人間が実際にこのような問題を解くときには、記述されている状況から起こるであろう物理現象に対して、どのような物理法則がどのように適用されるのかを推測し、それを計算することで解答する。例えば、

A 質量  $m$  の台車を、なめらかな斜面に沿って下方にすべらせる実験を行った。このときの台車の斜面方向の加速度の大きさは  $a$  であった。



図 1

問 1 斜面の角度は変えずに台車に質量  $m$  のおもりを乗せてすべらせる状態 A(図 2) と、斜面の傾きを大きくして台車だけをすべらせる状態(図 3) とで、台車が斜面を下る斜面方向の加速度の大きさは、図 1 の時の加速度の大きさ  $a$  と比べてそれぞれどのようになるか。その組合せとして最も適当なものを下の①～⑨のうちから一つ選べ。なお、図 3 の破線は図 1 の時の斜面を表す。ただし、図 2 においておもりは台車に対して静止した状態(台車と一体となった状態)ですべるものとする。

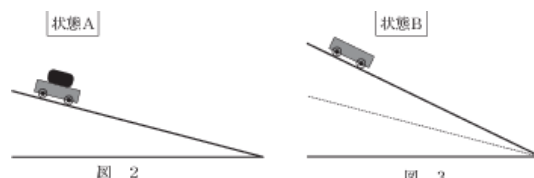


図 2

図 3

図 1: 物理問題の例 (代ゼミセンター模試より引用)

“縮めたばねから手を離すと物体は  $x$  だけ進んで止まった”という表現には“物体が進む”、“物体が止まる”という物理現象に関する記述があるが、実際には問題には書かれていない“物体がばねに押される”という物理現象が起きており、我々はこのことを踏まえた一連の状況を理解した上で、ばねのエネルギーが物体になされた仕事として解釈し、問題を解く。

このようなことを計算機が処理できるためには、例えば知識としてばねと物体の関係を記述しておくということが考えられる。しかし、要素をばねと物体に限ったとしてもその組合せは数多くあり、その全てに関して起こりうる事象を記述しておくというのは困難である。

物理現象は物理法則に従っており、この物理法則を正しく適用することができれば物理現象を予測することは可能であると

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

考えられる。この物理法則を用いた物理現象の計算を計算機上で実装したものが物理シミュレータである。本研究では問題に書かれてある状況を物理シミュレータ上で再現し、そのシミュレーションで観測された物理量の値を使って解答する。

提案モデルの概要を図2に示す。

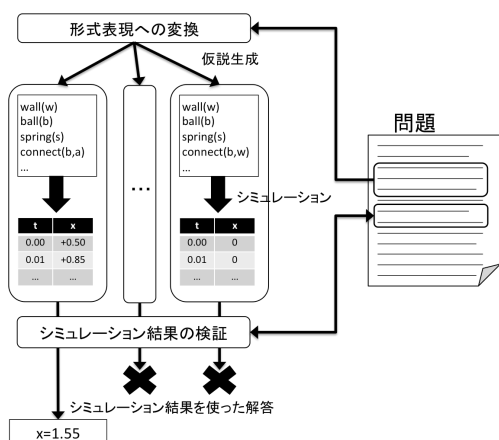


図2: 提案手法

自然文で記述されている問題を入力とし、そこから対応する形式表現を生成する。形式表現では問題に出現している物体やその属性、行われた操作、物理現象を一階述語論理の形式で記述する。試験問題はある程度現実的な設定で記述されることが多く、そのような設定を一般化し、その上でどのような物理現象が起きているかを推定するが必要となる。例えば、この問題では“おもり”や“台車”といった要素が出現しているが、“おもり”と“台車”がどのように違うのか、という点に着目する必要はなく、それらが同じ“質量を持った物体”であるということが理解できれば良い。さらに大学入試、つまり高校教育の物理の学習範囲に限定すれば、形式表現で必要となる述語は限られており、その全てを記述することは不可能ではない[横野 13a]。

また、問題にはあらかじめ与えられる物理量を変えたときの挙動の違いについての問題もあり、それに対応するためにそれぞれの初期状態にラベルを付け、それらの間での物理量を比較できるようなスキームを用意する。

図1の問題に対する形式表現を図3に示す。

この例ではある状況 (“@W”) に対して、質量を変えた場合 (“@W\_A”), 角度を変えた場合 (“@W\_B”) を考え、それぞれで得られた加速度を比較する (“compare(@W\_A,@W.a)”) ということが記述されている。

この形式表現は物理シミュレータの直接の入力形式ではないため、シミュレータの入力言語への変換を行う必要がある。変換には形式表現と対応する物理シミュレータの入力の構文を記述した辞書を用いる。物理シミュレーションの結果はシミュレーションの各時点における観測された物理量のデータとなっており、このデータから形式表現に記述されている物理現象を特定して値を抽出し、問題の解答に利用する [横野 13b]。

試験問題の記述は統制されており、人間が読めば一意に理解することができるが、計算機も同様に一意にその意味が理解できるかという点必ずしもそうではない。例えば、人間が読めば容易に分かる範囲で省略や同音異義語が用いられることがあり、処理においてはこの曖昧性を解消する必要がある。このような問題に対しては、自然言語処理の分野で様々な研究がな

```
@W
m,theta
mass(o)
floor(f)
weight(o,m,e1)
floor_angle(f,theta,e1)
length(f,l,e1)
puton(o,f,e1)
through(o,e2)
acceleration(o,a,e2)

@W_A
m=@W.m*2,theta=@W.theta

@W_B
m=@W.m,theta=@W.theta*2

@W_main
compare(@W_A.a,@W.a)
compare(@W_B.a,@W.a)
```

図3: 図1の問題に対する形式表現

されている (cf. [Navigli 09, Iida 12]) が、提案モデルでは曖昧性解消に対して、考えられる候補を生成し、そのシミュレーション結果を検証するという手法を考える。試験問題では、ある状況で行われた操作とその結果として起きた物理現象が記述されていることが多く、前述のシミュレーション結果からの解答生成の過程において、記述されている物理現象に対応する箇所が結果から発見できなかった場合、その候補の解釈が誤っているとみなして棄却する。候補を生成し、検証するというプロセスは曖昧性解消だけではなく、そもそも問題の解釈として生成した形式表現、シミュレータ用の入力表現の誤り検出にも用いることができると考えられる。

提案モデルでは問題に書かれている状況がシミュレーションできるかが重要となる。物理には、力学、波、電磁気といった分野が存在するが、次節で述べるタスクの参加時点ではこの全てに対応はできておらず、力学や波の問題の一部のみに対応している。

### 3. 東ロボプロジェクト代ゼミタスク

2013年11月に行われた東ロボプロジェクト代ゼミタスクとは、代々木ゼミナールで実際に使用されたセンター模試をテストデータとしてシステムの性能を評価するタスクである。このタスクではテストデータは試験問題の構造がアノテーションされたXMLで提供される。参加者には2012年度に実施された同センター模試のXMLが開発用データとして提供された。使用する言語資源、計算機資源に制限は設けられなかった。

試験問題の構造アノテーションではどの文字列が問題本文でどれが選択肢かといった情報が付与される。従って人間が実際に受験する環境とは異なっているが、このデータを入力としたとしても解答を出力するために行うべきことは多く存在し、その全てに対応し解答することは困難である。

そこで本タスクでは参加者がテストデータに対して追加の情報をアノテーションすることが認められた。これは何でも自由に付けて良いというわけではなく、テストデータ配布の前に追加したいアノテーションの仕様をオーガナイザに提出し、審査に通ればテストデータに追加アノテーションを行うことが認

められる。

我々のグループでは問題に対する形式表現のアノテーションを追加して行った。これは2節で述べた処理のうち、問題からの形式表現生成を省略することを意味する。問題からの形式表現生成は自然言語処理における semantic parsing と呼ばれるタスク [Poon 09] として見ることができ、形式表現の様子が決定すれば以降のシミュレーションに関する処理と独立することができる。この時点ではシミュレーションを用いた問題解答モデルの有効性の検証に焦点を当て、“形式表現が与えられたときに正しい解答が出力できるか”を評価することをこのタスクの目的とし、前半の形式表現生成は省略した。

#### 4. 代ゼミタスクの結果の考察

今回のタスクにおけるテストデータの物理問題は複数の小問で構成される4つの大問からなり、小問の合計は24個であったこのうち提案手法で解答を出力できた小問は4問であったが、その全てを正しく解答することができた。提案モデルは問題に対する被覆率は低い、適合率は高い傾向にあると見ることができる。解答した問題は、波の屈折、エネルギー保存則、斜面をすべる物体の運動、物体の投げ上げに関するものであり、エネルギー保存則に関する問題以外は物理シミュレーションによる解答モデルで解答したものである。エネルギー保存則に関する問題は形式表現から数式を導出し数式処理ソフトで解を出力するというモデルで解答した。

解答できなかった問題について人手で分析を行い、その理由毎に分類した物を表1に示す\*1。

表1: 解答できなかった理由

分類	小問数
シミュレーションが実行できない	7
未着手	5
形式表現の記述が困難	4
異なる解答モデルが必要	4

現時点では力学と波の一部のみに対応しているため、それ以外の問題で提案モデルで解答可能であると考えられるものに関しては“未着手”としている。従って、物理の問題の多くは提案モデルで解答できると考えられるが、被覆率の向上には物理シミュレーションが鍵であると言える。

以下、その他の各分類について詳細と今後の方針について述べる。

##### 4.1 シミュレーションが実行できない

これは形式表現は与えられるが、対応する物理シミュレータのモジュールの不足などによってシミュレーション用のモデルが生成できないというものである。高校物理でよく用いられる要素のうちいくつかは独自で実装を行っているが、任意の要素の組合せに完全に対応できているわけではなく、多くの要素が組み合わさると実行不可能となった場合もあった。

2節で述べたように全ての状況を列挙し、それに対応できるようにすることはほぼ不可能であるため、完全な対応は困難である。しかし、例えば問題として頻出する状況に対するモデルをアドホックではあるが構築することで、問題に対する提案モ

デルの被覆率を低コストで向上させることが可能であると考えられる。

##### 4.2 形式表現の記述が困難

提案手法で使用している形式表現は我々が独自に定義したものであるため、タスク参加時点では形式表現で記述できない言語表現が存在した。具体的には、相対速度のような観測者の座標系を考慮しなければならないというような物理量の表現である。また、この観測者という要素については物理量に限らず物理現象についても考慮する必要がある。例えば“浮かんでいく気球に乗っているAには風船が止まって見えた”という表現には“物体の静止”という物理現象が記述されているが、これはAという観測者が認識した物理現象であり、地上にいる人にとっては“物体の静止”という物理現象は発生していない。

このような観測者の視点を考慮するために、これまで定義した述語に対して、どの観測者から見た物理量、あるいは物理現象かを表す項を導入する。例えば、これまで物体の静止は  $stop(o, e_1)$  と記述していたが、これを  $stop(o, w, e_1)$  とする。ここで  $w$  は観測者を表す変数とし、実際の形式表現では基準となる物体を表す述語の変数が入るとする。また、絶対座標系にある観測者を表す定数  $ORG$  を導入し、観測者について記述がないときにはこの定数がデフォルトで与えられるとする。

このように拡張した形式表現に対しての処理に関しては、物理シミュレーションの結果として得られる物理量は絶対座標系であるため、まずこの結果を獲得し、それに対してこの形式表現から得られた観測者の情報を用いて観測者の座標系への値に変換を行うことで可能であると考えられる。

##### 4.3 異なる解答モデルが必要

物理の問題の多くは本稿で対象としている、ある状況における物理量に関するものであるが、当然のことながらそれ以外の問題も存在する。具体的には以下の2種類である。

- 知識を問う問題
- 定性的な性質を問う問題

知識を問う問題とは“エネルギーとして適切な単位を答えよ。”といったような教科書に書かれているような知識に関するものである。この種の問題に関しては、教科書に解答はあると考えられることができるので、質問応答システムを利用した手法 [石下 14] で解答できると考えられる。

また、定性的な性質を問う問題とは、設定は本稿の対象の問題と似ているが、実際に数式を計算することによって解くようなものではなく、“不導体を帯電体に近づけると帯電体はどのように動くか。”といった定性的な性質を問うものである。このような問題に解答するためには物理法則に関する知識などを利用した定性的な推論が必要となる。知識、規則は教科書に書かれているため、該当する部分を抽出し、利用することで解答は可能であると考えられる。しかし、教科書では例えば“不導体に帯電体を近づけると……”といったような一般的な状況での記述がなされていることが多く、それに対して実際の問題では“帯電していない木材片をストローの端に近づける”というように現実的な設定で記述されることがある。従って、このような種類の問題を解くためには、記述されている状況を一般的な物理現象の説明の記述と対応させるということが必要になる。

#### 5. 物理問題解答に向けて解くべき課題

今回のタスクでは、人手で記述した形式表現を利用したが、最終的には問題からこの形式表現を生成することが必要

\*1 ある状況に対して複数の小問が出題されることがあり、この状況記述に問題があった場合、その状況に属する小問全てがその状況記述の問題で解答できなかったと判断している。

となる。

物理問題では自然言語による問題記述だけでなく状況を示した図が加えられていることが多い。自然言語による記述のみから形式表現を生成することが可能な問題が多いが、必要な情報が図にのみ記述されているものも存在する。特に同じ種類の要素が複数出現している場合、その位置関係は図にのみ記述されていることがある。このような問題から形式表現を生成するためには、図からも情報を抽出することが必要となる。

図から抽出すべき情報は主に出現している物体とその位置関係である。画像の中の物体認識については様々な研究がなされている (cf. [Ushiku 11]) が、それらの多くは写真を対象としている。それに対して我々が対象としている物理問題では図 1 のように抽象化されたイラストが与えられる。このような図の多くは線図であるためどのような物体があるかを認識することは写真に比べて困難であると考えられる。

しかし、高校物理に対象の範囲を限定すれば、登場する要素は限られており、例えば“おもりは円で表現される”といったように、その要素の表現方法もある程度は決まっている。このことを考慮すると、物理問題における図の認識は各要素に対してプロトタイプとなるような図を用意しておき、入力図に対して、どのような要素がどのような配置になっているかを同定するというタスクとしてみるのが可能であると考えられる。

また、他に考えるべき課題として物理の常識の扱いがある。物理の問題では理想的な設定で出題されるため、現実で考えると不可解な状況が存在することもある。例えば“一端を支点に取り付けた棒を鉛直上方からしずかに離した”という状況では、物理の問題では棒が回転することが期待されるが、この状況を正確に実行すれば“棒は回転せずにその場に静止する”ということが起きる。これはいわば物理問題固有の常識のために生じる食い違いであるとみることができる。このような常識をどのようにモデルに組み込むかということも考慮すべき事項である。

## 6. 関連研究

自然文の入力に対して状況を構築するという点では SHRDLU[Winograd 87] という積み木の世界という限定的な状況に対してシステムが提案されている。このシステムでは状況を構築するだけでなく、その状況に関する質問にも答えることができる。しかし、現時点の状況に関しての質問のみを対象としており、本研究が対象としている将来起きる事象についての質問には対応していない。

ゼロ代名詞のような言語表現の曖昧性の解消については様々な研究がなされており、それらの研究では基本的に構文的な手がかりや大規模コーパスから抽出した語彙の手がかりを利用している [笹野 11, Imamura 09]。これに対して、本研究では候補に対してどのようなことが起こるかを物理シミュレーションを使った予測し、その結果がテキストに書かれてあることと一致するかを判定することで曖昧性解消を行う。

## 7. おわりに

本稿では実際のセンター試験模擬試験で使用された問題を用いた実験を通して物理シミュレーションによる問題解答モデルの有効性と問題点を検証した。現時点では最後まで出力できた問題が多くなかったが、解答した問題は正解であり、提案モデルで解答できると考えられる問題は少なくなかったため、今後はこのモデルの被覆率を上げることを目指す。そのためには、まずシミュレーションが可能なモデルを増やすことと形式

表現の定義を確定させる必要がある。これらにはセンター試験の過去問やその他の問題集から頻出するパターンに対しての記述から行っていく。

また、今回の実験によって提案モデルがある程度の問題解答が可能であるということが分かったため、今回人手での入力とした形式表現の問題文からの自動生成に取り組む予定である。

## 謝辞

本研究は国立情報学研究所人工頭脳プロジェクト「ロボットは東大に入れるか」によるものです。

## 参考文献

- [Iida 12] Iida, R. and Tokunaga, T.: A Metric for Evaluating Discourse Coherence based on Coreference Resolution, in *Proceedings of COLING 2012* (2012)
- [Imamura 09] Imamura, K., Saito, K., and Izumi, T.: Discriminative Approach to Predicate-Argument Structure Analysis with Zero-Anaphora Resolution, in *Proceedings of the ACL-IJCNLP 2009 Conference Short Papers*, pp. 85–88 (2009)
- [Navigli 09] Navigli, R.: Word sense disambiguation: A survey, *ACM Computing Surveys*, Vol. 41, No. 2 (2009)
- [Poon 09] Poon, H. and Domingos, P.: Unsupervised Semantic Parsing, in *Proceedings of the 2009 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, pp. 1–10 (2009)
- [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)
- [Winograd 87] Winograd, T. and Flores, F.: *Understanding Computers and Cognition: A New Foundation for Design*, Addison-Wesley (1987)
- [横野 13a] 横野 光, 稲邑 哲也: 物理シミュレーションと時系列データからの事象認識による物理問題解答, 第 27 回人工知能学会全国大会 (2013)
- [横野 13b] 横野 光, 稲邑 哲也: 物理問題解答に向けた物理量の変化に着目した動作表現の解釈, 言語処理学会第 19 回年次大会 (2013)
- [笹野 11] 笹野 遼平, 黒橋 禎夫: 大規模格フレームを用いた識別モデルに基づく日本語ゼロ照応解析, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 12, pp. 3328–3337 (2011)
- [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)
- [石下 14] 石下 円香, 狩野 芳伸, 神門 典子: 質問応答システムを用いた多岐選択式問題の解答器の作成に関する研究, 情報処理学会研究報告 NL-215 (2014)