

# 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

横野 光, 稲邑 哲也

国立情報学研究所

{yokono, inamura}@nii.ac.jp

## 1 はじめに

現在, 国立情報学研究所では大学入試問題を解く計算機プログラムを開発するプロジェクトを進めている [1]. このプロジェクトにおいて我々の研究グループは理科系の科目を対象としており, 特に物理の試験問題に対してシミュレーションを用いたアプローチに基づいた研究を進めている [2].

シミュレーションを用いた問題解答では, 問題に記述されている状況をシミュレーションによって再現し, その結果をもとに解答する. この過程で得られる結果は物理量の時系列データである. 解答にはそのデータから問題として問われている時刻を特定し, その時刻における物理量を抽出する必要がある.

問題において問われている時刻は, 例えば“点 B を通過したときの物体の速度”といったようにテキストで記述されている. 従って, この言語表現によって説明されている物理現象が具体的にどの時刻を指すかを物理量の時系列データから特定しなければならない.

本論文では, この処理のために必要となる動詞の意味を物理量の変化に関する条件式で記述した辞書の構築と, それを用いて求められている時刻を抽出する手法について述べる.

## 2 関連研究

我々の研究は非言語の時系列データに対して言語表現で指定された時刻を特定するというタスクであるが, 数値データと言語表現の対応に関する研究では数値データの内容を自然文で表現するというタスクがある. これは一見分かりにくい数値データを理解しやすい形で提示するということを目指しており, 例えば, 株式動向の言語化 [3] や医療データからのテキスト生成 [4] など, 様々なデータに対しての研究がなされている.

また統計情報などの数値データに限らず, 非言語情報と言語情報との対応という観点に着目すれば, 画像の説明文を生成するという研究がある. 例えば, Kuznetsova らは入力画像をアスペクトに分解してそのそれぞれに対する言語表現を生成し, それらを組み合わせることで画像を説明するテキストを生

成する手法を提案している [5]. また, Greenbacker らはグラフを自然文で説明したコーパスを構築している [6].

## 3 シミュレーションを用いた物理問題解答

大学入学試験における物理の問題は多くの場合, ある特定の状況において発生した物理現象に関して, そのときの物理量を問うという形式になっている. 例えば, 図 1 に示す問題では, 最初に状況についての記述があり, 続いてその状況に対する操作とその結果となる物理現象が記述されている. そして, 問題では一連の物理現象のうち“物体が止まった”時の位置が解答すべきものとして指定されている.

一般的には, このような問題を解答する際にはその現象の背後にある物理法則を推測し, それに関する公式を用いて計算し解を求める. このような解法に対し, 我々は問題に記述されてある状況をシミュレータ上に再現し, そこで問題と同じような操作をシミュレーションすることによって物理量を観測し, それを用いて問題を解答することを目指す.

このアプローチは大きく分けて以下の 3 つの要素からなる.

- (1). 問題テキストからの状況理解
- (2). シミュレーション
- (3). シミュレーション結果を用いた問題解答

本論文での議論は (3) に関するものである.

## 4 物理量の変化に着目した動作表現の解釈

シミュレーション結果は物理量の時系列データとして得られる. この結果から問題で問われている物理現象が起きた時刻を特定し, その時刻における物理量を抽出し解答に利用する. 実際問題に問題文のうち特定すべき時刻を表す部分を同定する必要があるが, その同定は今後の

問 4 あらい水平面上での質量  $m$  の物体の運動を考える。図 3 のように、一端を固定したばねを自然の長さから  $d$  だけ縮め、他端に物体を置いて手で押さえた。次に、手を離すと物体は初速度 0 で動き始め、やがてばねから離れて、手を離れたときの位置から  $x$  だけ進んで止まった。  $x$  として正しいものを、下の①～⑥のうちから一つ選べ。ただし、ばねの質量は無視できるものとする。また、ばね定数を  $k$ 、面と物体の間の動摩擦係数を  $\mu'$ 、重力加速度の大きさを  $g$  とする。

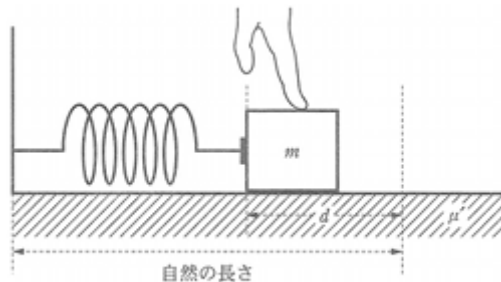


図 3

- ①  $\frac{k}{2\mu' mg}d^2 + d$  ②  $\frac{k}{\mu' mg}d^2 + d$  ③  $\frac{k}{2\mu' mg}d^2$  ④  $\frac{k}{\mu' mg}d^2$  ⑤  $\frac{2\mu' mg}{k}$  ⑥  $\frac{\mu' mg}{k}$

図 1: 物理の試験問題の例 (2009 年度センター試験物理追試験第 1 問より引用)

課題とし、本論文ではその表現は既知であるという仮定で議論を進める。

時刻の特定では該当表現中に含まれている動詞に注目する。表現としては“物体が着地したとき”や“台車が点を通過したとき”などがあり、これらの表現で用いられている動詞が対象要素のどの物理量の変化を表しているかを記述した辞書を用いて、特定すべき時刻の条件を推定する。

以下、現在構築中の辞書とそれを用いた条件の推定について述べる。

#### 4.1 動作表現辞書の構築

動詞の意味は、物理量の変化に関する条件式の論理積で記述する。意味の記述において考慮する物理量は、速度、角速度、位置、加速度、長さである。これは現時点では対象ドメインを力学に限定しているためであり、最終的には全ての物理量を対象とする。物理量の変化に関する条件としては、物理現象が発生した時刻  $t$  において、その物理量の値が 0 か、0 より大きいのか、その前の時刻の値と等しいか、より大きいのか、小さいかの 5 種類を考える。

辞書には見出し語と構文情報もあわせて記述し、意味記述において参照する要素は構文情報に出現する必須項の要素を利用する。

例えば“止まる”という動詞はその動詞の事象が発生した時点において対象となっている物体の速度が 0 であり、且つそれより前の時点では速度は

0 より大きいと考えられるため、以下のように速度に関する条件としてその意味を記述する。

$$\begin{aligned} \text{tomaru}(t) &= \text{obj.velocity}(t) == 0 \\ &\wedge \text{obj.velocity}(t-1) > 0 \end{aligned}$$

ここで“obj”は動詞の対象となっている物体を指し、“obj.velocity( $t$ )”は該当時点における物体の速度を表す。“ $t-1$ ”は該当時点の一つ前の時点の意味する。時刻  $t-1$  に関する条件はその動詞が成立するための前提条件と解釈することができる。以降、意味において時刻  $t$  に関する要素を**対象時刻における条件**、時刻  $t-1$  を**前提条件**と呼ぶ。

過去 5 回分のセンター試験の物理問題から物理現象を表す際に用いられる動詞を抽出し、そのうち物理現象を表す動詞に対して人手で意味記述を行った。その一部を表 1 に示す。position( $t$ ) は時刻  $t$  における物体の位置の 3 次元座標を、position<sub>y</sub>( $t$ ) は時刻  $t$  における物体の位置座標のうち重力方向の成分を表す。

#### 4.2 表現にあわせた意味の計算

動詞はそのままの形で使われるだけでなく、“ている”などのアスペクト表現を用いて特定の時間的局面上における意味を表したり、否定表現を用いてその動作が成立しないことを表すことがある。そのような表現に対しては、4.1 節で述べた辞書の意味記述をそのまま用いることはできず、また、可能な

表 1: 辞書の一部

見出し語	構文	意味記述
落ちる	obj が落ちる	$obj.position_y(t) < obj.position_y(t-1)$
通過する	obj1 が obj2 を通過する	$obj1.velocity(t) > 0 \wedge obj1.position(t) == obj2.position(t)$ $\wedge \neg(obj1.position(t-1) == obj2.position(t-1))$
離れる	obj1 が obj2(から   を) 離れる	$obj1.position(t-1) == obj2.position(t-1)$ $\wedge \neg(obj1.position(t) == obj2.position(t))$

表現を辞書の項目として用意しておくことは効率的ではないため、基礎となる動詞の意味を表現にあわせて操作するということが必要となる。

以下、試験問題によく用いられる表現に焦点を当て、それらに対して動詞の意味をどのように操作すれば良いかについて述べる。

#### 4.2.1 -ている

“-ている”というアスペクト表現には動作の持続、結果の維持、経歴を表す役割がある [7] が、本研究で対象としている試験問題というドメインにおいては経歴で用いられることはほとんどない。そのため、前者の 2 つに関する意味記述を考える。

両方の役割は直前においてその動詞を満たす条件が成立しており、現時点においても満たされているという点で共通している。例えば、“立っている”は現時点において“立つ”が成立し、且つ、直前においても“立つ”という状況が成立していると解釈できる。また、現時点でその状況が成立しているということが重要であり、その動作がいつ成立したかには焦点は当てられないと考えられる。

このことから動詞の意味を  $p(t)$  と表したとき、その“-ている”形における意味を

$$p_{teiru}(t) = current(p(t)) \wedge current(p(t-1))$$

と表す。  $current(p(t))$  は意味  $p(t)$  のうち、対象時刻に関係する要素を示す。例えば、前述の“止まる”に対して“止まっている”の意味は

$$tomaru_{teiru}(t) = obj.velocity(t) == 0 \\ \wedge obj.velocity(t-1) == 0$$

となる。

#### 4.2.2 -はじめる

“動きはじめる”のように“-はじめる”形は動詞が示す動作がその時点から開始することを表す。従って“-はじめる”が成立する時点の一つ前の時点ではその動作は成立していないことが前提となる。こ

の足を踏まえると“-はじめる”の意味は次のように表すことができる。

$$Phajimeru(t) = p(t) \wedge \neg p(t-1)$$

#### 4.2.3 否定表現

“止まらなかった”のように動詞に否定がともなっている場合は、単純にその時刻でその動詞が成立しなかったと考え、全体の意味を否定する。

#### 4.2.4 複数の現象からなる表現

“壁に衝突して静止した”という表現では“壁に衝突する”と“静止する”という 2 つの現象が含まれている。このような表現では、2 つの現象が順番に発生したと考えることができる。  $p_1(t)$  と  $p_2(t)$  という現象が順番に発生したとすると、それをあわせた意味を

$$p_1.p_2(t) = p_1(t') \wedge p_2(t) \wedge t' <_t t$$

と記述する。ここで、  $t' <_t t$  は時間の順序関係を表し、  $t'$  が  $t$  より先であることを示す。

### 4.3 例

例として図 1 に挙げた問題の解答を考える。

シミュレーションを行うために、まず人手で問題に書かれている状況を解析し、システムモデリングで用いられる言語である modelica で記述した。シミュレーションの実行にはその実装の一つである OpenModelica<sup>1</sup>を利用した。

シミュレーション結果は実行時に指定した時間幅の各時刻における観測可能な物理量の値の組として得られる。実際の実行結果の一部を表 2 に示す。問題中に変数として表れている物理量のうち、シミュレーションの実行に必要なものについては人手で指定している<sup>2</sup>。

<sup>1</sup><https://www.openmodelica.org/>

<sup>2</sup> $m = 1, k = 1, d = 0.5, \mu' = 0.01, g = 9.8$

表 2: シミュレーション結果 (一部)

Time	x	v
⋮	⋮	⋮
10.786	1.27535595	0.00088038
10.788	1.27535751	0.00068438
10.790	1.27535868	0.00048838
10.792	1.27535946	0.00029238
10.794	1.27535985	0.00009638
10.796	1.27535990	0.00000000
10.798	1.27535990	0.00000000
⋮	⋮	⋮

この問題において、解答として求められているものは“止まるまでに進んだ物体の距離”である。“止まる”の意味は前述の通りであり、その条件を満たす時刻は  $t = 10.796$  で、この条件を満たす時点での物体の距離は 1.27535990 である。実際に問題に解答する際には、与えられている選択肢の式にシミュレーションで用いた各変数の値を代入して得られた値とシミュレーション結果で得られた値とを比較し、その差が最も小さかったものを出力する。シミュレーションで用いた値を代入したときの各選択肢の値を以下に示す。シミュレーションの結果と

- ① 1.775510 ② 3.051020 ③ 1.275510  
 ④ 2.551020 ⑤ 0.196000 ⑥ 0.098000

して得られた値と最も差が小さい選択肢は③であり、これは正答と一致する。

## 5 おわりに

本論文では、物理量の時系列データに対して、与えられた言語表現に対応する時点を抽出するために必要な辞書の構築とそれをを用いた抽出方法について述べた。現時点では高校物理の力学という非常に限られたドメインについての語彙を対象として辞書を構築しているが、同義語による語彙の拡張や例えば日本語語彙大系 [8] などで定義されている動詞の概念に対しての条件の記述を行うことで辞書を自動的に拡張することが考えられる。

また、意味を表す条件式は物理量の変化のみに基づいて記述している。試験問題に解答するという場面においては特に問題はないが、これだけでは記述しきれない意味もある。例えば、物理量の変化だけで記述すれば“進む”と“滑る”は同じ

$$obj.velocity(t) > 0$$

という意味を持つと記述できるが、実際の場面では“滑る”には“進む”の意味に加えて“接地面と常に接触している”という条件が含まれていなければならない。このように同じ物理量の変化を意味する動作であっても様態が異なることがあり、例えば発話生成などへの応用では様態まで考慮した使い分けを行う必要がある。これらは幅広い応用を目指すためには考慮すべき要素である。

我々が現在取り組んでいる対象は試験問題であるため、与えられたテキストに対してそれに該当する時刻を推定するというタスクに取り組んでいるが、将来的には HRI (Human Robot Interaction) への応用を考えており、シミュレーション結果に基づいた発話生成などにも取り組む予定である。

## 参考文献

- [1] 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, Vol. 27, No. 5, pp. 463-469 (2012).
- [2] 稲邑哲也, 横野 光: 物理モデル理解と自然言語処理の統合による理科問題の回答, 人工知能学会誌, Vol. 27, No. 5, pp. 479-482 (2012).
- [3] 関亜沙美, 小林一郎: 時系列データの言語化への取り組み-日経平均株価を例として-, 第24回人工知能学会全国大会 (2010).
- [4] Portet, F., Reiter, E., Gatt, A., Hunter, J., Sripad, S., Freer, Y. and Sykes, C.: Automatic generation of textual summaries from neonatal intensive care data, *Artificial Intelligence*, Vol. 173, pp. 789-816 (2009).
- [5] Kuznetsova, P., Ordonez, V., Berg, A., Berg, T. and Choi, Y.: Collective Generation of Natural Image Descriptions, *Proceedings of the 50th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*, pp. 359-368 (2012).
- [6] Greenbacker, C., Carberry, S. and McCoy, K.: A Corpus of Human-written Summaries of Line Graphs, *Proceedings of the UC-NLG+Eval: Language Generation and Evaluation Workshop*, pp. 23-27 (2011).
- [7] 日本語記述文法研究会 (編): 現代日本語文法 3, くろしお出版 (2007).
- [8] 池原 悟, 宮崎正弘, 白井 諭, 横尾昭男, 中岩浩巳, 小倉健太郎, 大山芳史, 林 良彦: 日本語語彙大系, 岩波書店 (1997).