

力学における誤り修正支援を目的としたフェイクシミュレーションの提案

Fake Simulation for Supporting Error Correction in Dynamics

野田 尚志^{*,†} 平嶋 宗^{*}
Hisashi Noda Tsukasa Hirashima
柏原 昭博^{*} 豊田 順一^{*}
Akihiro Kashihara Jun'ichi Toyoda

* 大阪大学産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research,
Osaka University, Osaka 567, Japan.

1994年6月14日 受理

Keywords: error correction, error reflection, dynamics, simulation, ILE (interactive learning environment).

Summary

Students often fail to formulate phenomenon when they are solving dynamics problems. In the case of conventional ITS, their failures are tried to remedy in terms of dynamical concepts and formulas. However, the remediations are not always effective, because they often can't understand the errors including in their formulas. To correct the errors effectively, it is required to help them to recognize the errors.

Generally, human is more sensitive to contravention of constraints in real world than in formula world. From this point of view, we propose a framework of "Fake Simulation" which can simulate the phenomenon reflecting to the errors including in the formulas. The students can recognize contravention of constraints in motion easier than that in formulas. Fake Simulation is one of visualization method of errors, which enables them to understand their errors and to correct the errors. Furthermore, it can prevent them recurring.

We have already implemented Fake Simulation for dynamics. We also report the results of preliminary experiment for evaluating Fake Simulation.

1. はじめに

力学の問題解決過程においては、学習者が問題に対して不適切な式を立てることがよくある。このような場合、従来の教育支援システムでは力学的な概念や公式のレベルでその誤りを指摘し、修正するように導いていた。しかしながら、このような指導では学習者が自分の立てた式が誤りであることに納得しない場合がしばしば発生する。学習者の誤りを修正するためには、学習者自身に誤りであることを認識させることが重要であり[Laurillard 93], そのためには学習者の立てた式が誤りであることを顕在化するための工夫が必要となる。

人間は一般に形式的な世界での制約違反に比べて、具体的な世界での制約違反に敏感であるといわれている[Resnick 82]。例えば、力学の場合であれば式上での制約違反と比べて、挙動上の制約違反のほうが、学習者にとってはるかに認識しやすいといえる。本稿では、このような観点より学習者の立てた式に含まれる誤りを反映した現象のシミュレーションを行い、そのシミュレーション自身のおかしさあるいは正しいシミュレーションとの差異によって学習者に式の誤りを認識させ、修正へと導く枠組みを提案する[野田 94]。以下では、このようなシミュレーションをフェイクシミュレーション(Fake Simulation^{*1})と呼ぶことにする。シミュレーションを用いて誤りを顕在化することにより、力学的概念や公式レベルでの誤りに対する指摘に比べて、学習者により説得力を持って誤りであることを指摘することが可能であり、誤りの修正のみならず、誤りの再発を防ぐためにも効果があると期待できる。

シミュレーションの教育的利用としては、従来より環境型と呼ばれる教育支援システムにおいて概念の形成を主目的として研究されてきており、これまでに多くの成果をあげてきている[大槻 93, Papert 80, White 93]。しかしながら、これらのシステムでは現象

*1 fakeという言葉は、[1]だます・振りをする、[2]フェイントをかける(スポーツ)、[3]即興的に原曲をくずして演奏する(音楽)、といった意味で用いられる。

「本来のものは少し異なった(まったく異なるわけではないことに注意)ものを提示することによって、引きつけたる」という意味を持っており、本研究では、誤りを反映したあり得ない現象を提示することによって、動機づけを高め理解を深める、という意味で用いている。

† 現在、NEC 関西 C & C 研究所

を正しくシミュレーションすることのみを行っており、本稿で述べるような「誤りを反映させる」といった観点に欠けていた。また、誤った式に対応する現象は通常あり得ない現象になるので、従来の環境型のシミュレーション機能では困難であり、新しい枠組みが必要である。

本稿では、2章で力学を対象領域としたフェイクシミュレーションの枠組みおよびその実現について述べ、3章で予備的な検証実験の結果について報告し、4章で研究全体を総括する。

2. フェイクシミュレーション

2.1 枠組み

立式で誤っている学習者に対して、システムが正しい現象と正しい式を提示したとする。このような指導では、学習者が自分の式が誤っていることに納得しない場合がある。このとき、図1(a)に示すように学習者の状態は、自分自身が立てた式(実は誤っている)とシステムが提示した式(正しい式)の両方が、現象と結びついた状態になっていると考えられる。この場合、現実世界と対応づけて誤りであることを気づかせることが有効と考えられる。そのためには図1(b)に示すように、誤った式が実は別の現象を意味していることを提示すればよい。その多くは現実世界においてあり得ない現象になるので、学習者自身が式に誤りがあることに気づくことが期待でき、修正への動機づけにつながると考えられる*2。

2.2 実現手法

[1] フェイクシミュレーションの設計方針

フェイクシミュレーションを設計するには、効果と

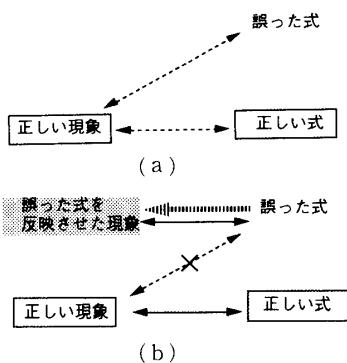


図1 学習者の状態の遷移

*2 学習者が現象自体を誤って推定しているような場合[de Kleer 77, McClosky 83]には、従来の環境型が行ってきたような、正しい現象の提示とその理解支援が必要となる。

一般性のトレードオフの問題を考える必要がある。ある問題に特化したやり方をとれば当然、効果的に誤りを反映させることが可能であるが(以下では、誤りを反映させたシミュレーションを生成することをフェイクと呼ぶ)、手法としての一般性は低くなる。手法としての一般性を重視すれば、効果的でない場合も出てくる。本研究では一般性を追求するという立場から、なるべく問題に依存しない実現手法を目指している。

また、誤りを複数含んだ式をそのままシミュレートする場合、値が不定になってシミュレートできないことが考えられる。本研究では、複数の式が誤っていたとしてもフェイクする式は一つずつとし、かつフェイクする物理属性も一つずつとすることによって、不定になることを防いでいる。

[2] フェイクシミュレーションの実現

ブロック、糸、台車などの力学的部品をここではオブジェクトと呼び、問題に従って物理属性値と挙動を規定する式とを与えている。この式に従って時刻ごとの遷移を計算していけば通常のシミュレーションが生成できる。フェイクシミュレーションでは、学習者の式の誤りを反映させて、修正につながるようにシミュレーションを制御する必要がある。そのためにはさまざまな要因があるが、そのなかでも特に重要と思われる五つの要因、FakeCond, FakeAtt, FakeValue, FakeObject, IndirectFakeObject について考察し、今回の実現で採用した手法について述べる。

・FakeCond: フェイクするかどうかの決定条件

誤った式が正しい式とあまりにもかけ離れている場合、フェイクした現象と正しい現象が離れすぎて、誤りの修正の方向が見えなくなることが予想できる。この場合はフェイクシミュレーションを行うよりも、直接指摘するなど別の教育方法を用いるほうが適切と考えられる。今回の実現では、単位系の次元の整合性をフェイクするかどうかの条件に採用し、式の両辺の次元が一致する場合のみフェイクすることとした。つまり、同じ物理属性を持つ項で、かつ加減算の範囲で誤りを犯している場合のみフェイクする。例えば、相対加速度に関する誤りや、ある力を忘れている場合などである。(加速度) + (力)のように次元の異なる項どうしの加減算や、 v のところを v^2 にしているような誤りに関してはフェイクしないことになる。

・FakeAtt: フェイクする物理属性

フェイクの対象となる物理属性は、「加速度」や「速度」、「物体の半径」などさまざま考えられる。今回の実現では、誤りを顕在化するためには挙動の違いとして表すほうが効果的である考え、フェイクする物理属性

は「加速度」または「速度」ということにした。式上で加速度もしくは速度の誤りがあれば、その誤った属性をフェイクし、それ以外の属性が誤っている場合は、速度、加速度の優先順位で、式上に存在する速度または加速度をフェイクする。例えば $F=ma$ で質量に関して誤っている場合、速度属性は式上に存在しないので加速度をフェイクする。

• **FakeValue** : フェイクする物理属性の値の決定法
フェイクする属性を未知数とし、その他の項には正規の値を代入した方程式を解く方法を用いている。したがって、方程式自体は変化せず、フェイクされる属性の値のみが変化することになる。

• **FakeObject** : 直接的にフェイクするオブジェクト
フェイクの対象となっている式で言及されているオブジェクトのみをフェイクし、その他のオブジェクトは、正常な動きをすることとした。

• **IndirectFakeObject** : 間接的にフェイクされるオブジェクト

糸など、式に明示的には現れないが、FakeObjectに連結されているオブジェクトが相当し、FakeObjectの接続関係を保つように動かすことにする。今回の実現では、糸とばねと滑車の支柱を IndirectFakeObject に設定した。

〔3〕 実現例

具体的なフェイクシミュレーションの例を示す。図2に示すような複合台車について各物体の運動方程式を立てるとする。例えば学習者が、block 3 に対する(式4)において、滑車の軸から受ける力 T を忘れて $m_3 \times b = -N$ としているとする。この場合式の次元は整合しているのでフェイクの対象となり、FakeAtt は加速度となる。FakeValue の決定法に従って、この場合の FakeAtt である b 以外の項に正規の値を代入して b を求めると、その値は T が無い分だけ正規の値より小さくなる。他のオブジェクトは正規の値に従っ

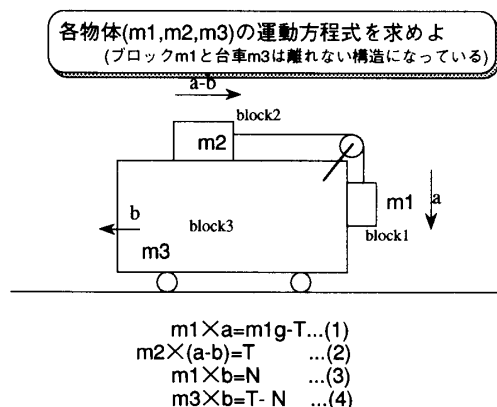


図2 設問

て動き、この block 3 だけが正規より小さい加速度で動くので、図3に示すように block 3 がめり込むような現象が提示される。また、block 2 に関する式、 $m_2 \times (a-b) = T$ (式(2)) に対して $m_2 \times a = T$ と誤る学習者もよく見られる。 a は下の大きい台車に対する相対加速度であるから、block 2 の静止系に対する加速度は $a-b$ でなければならないが、その点を考慮していない学習者である。この場合も同様にしてフェイクすると加速度が a となり、正解の場合の $a-b$ に比べて大きい値になるので、図4に示すような block 2 だけが実際より速く進み、糸がどんどん短くなっていくような運動が提示される。これによって、学習者は自らの式が誤っていることを知るとともに、実際より加速度が大きくなってしまいうような式を書いていることを知ることができる。また、block 1 に対する水平方向の式、(式(3))を忘れる学習者もよくいるが、この場合にフェイクすると水平方向の抗力が0になるため、図5に示すように m_1 だけが浮いたような現象が提示される。

なお、現在実現しているシステムでは、正しいシミ

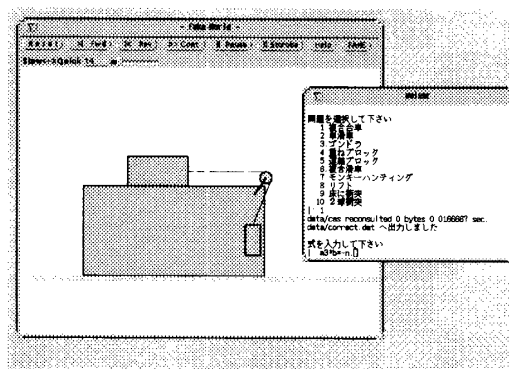


図3 めり込む例

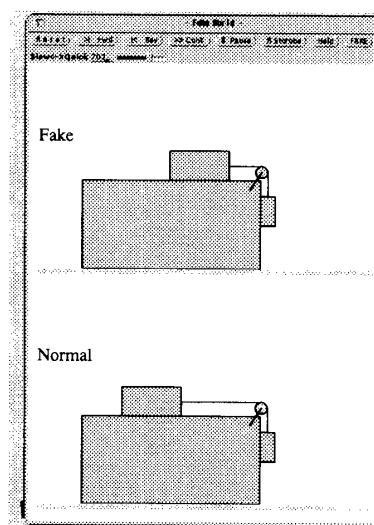


図4 糸が短くなる例

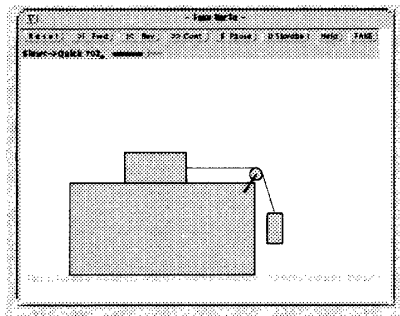


図5 離れてしまう例

シミュレーションとフェイクシミュレーションを並べて学習者に提示するようにしている。

3. 考 察

3・1 実 験

フェイクシミュレーションの効果についての予備的な検証実験を行ったので報告する。

図2に示す問題を理系大学生6人に与え、以下のような状況設定のもとで解いてもらった。

- ・正しいシミュレーションとフェイクシミュレーションは、何回でも実行可能。
- ・正しいシミュレーションとフェイクシミュレーションは上下2段に同時に表示することにより、比較可能。
- ・誤りの存在・箇所・原因は、学習者に告げない。

結果は、被験者が犯したのべ15個の式の誤りに対して、(1)誤りの存在については、全部の誤りにおいて、フェイクシミュレーションと正しいシミュレーションのみから学習者は自分の式に誤りが存在していることを認識することができた、また(2)誤りの箇所・原因については15個の誤りのうち9個について自力で箇所・原因を同定することができた。終了後のアンケートにおいて、単なる誤りであるとの指摘よりも、修正への動機づけにつながるとのコメントを得ている。

3・2 実験に関する考察

誤りの存在の認識は100%であったが、箇所・原因については60%程度であった。箇所・原因について認識できなかった6個のうち、実験後のアンケートによると3個は、シミュレーションのみからでは箇所・原因について認識はできなかったが、正解を理解するうえで助けにはなったというコメントを得ている。残りの3個は役に立たなかったというコメントを得ているが、これらはすべて相対加速度の座標系設定の誤りであった。この誤りに対するフェイクは、ある物体だけ

が正常より大きな加速度で進むというものであった。この場合、フェイクの対象となった加速度と、誤りの原因である座標系の設定、との関係が離れすぎており、それが有効でなかった理由であると考えられる。つまり、フェイクシミュレーションを単に誤りであることの認識だけでなく、誤りの修正に適切に結びつけるためには、誤りの原因とフェイクされる属性との関係が重要となることを示している。これらの事例に対しては、より効果的なフェイクの方法は存在していると考えられる。しかしながら、本研究は力学領域における一般的なフェイクの手法を目指したものであり、今回採用したFakeCond, FakeValueなどの決定法は、一般性という観点から見て妥当であると考えている。誤りの原因・箇所の認識効果の向上を目的とする個別の事例に応じたフェイクの決定法は、今後の検討課題の一つである。

3・3 有効範囲の検討

力学分野はフェイクがうまくいく領域のように思われる。しかし、フェイクがうまくいくかどうかは、最終的には領域よりも、環境の設定の仕方によるものと筆者らは考えている。フェイクがうまくいくためには、「正しいものと誤りとの差が大きくなる」環境設定でなければならない。このことをError Amplificationと呼ぶことにする。

今回実現した力学での環境は、概念的には、「力学的制約を満たす模擬現実環境」を環境として設定したことに相当する。学習者は、式上では誤りに気づきにくい、物体がめり込んだり物体が飛ぶように離れていく現象では誤りに気づきやすいといえる。したがってこのような環境は、多くの学習者にとって誤りを増幅することが可能な環境である。

Error Amplificationがフェイクの本質であるから、差が大きくなるのであれば、現象から式へのフェイクも考えられる。例えば、図6にあげる問題において、点線のようにボールがもと同じ高さまで上がるという誤った挙動推定をする学習者はよく見られるが、それが正しいとすると、エネルギーの式が $mgh = mgh + (1/2)mv^2$ となり、運動エネルギーの分だけ右辺が大

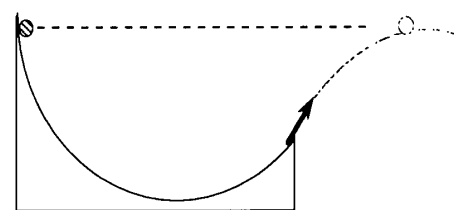


図6 誤った挙動推定例

きくなるので、等式が成立しなくなることを示すことができる。この場合、式のほうが現象よりも誤りを顕在化しているといえる。将来的にはこのようなフェイクも検討する必要があると考えている。

4. お わ り に

本稿では、学習者の立てた式に含まれる誤りを反映した現象のシミュレーションを行い、そのシミュレーション自身のおかしさ、あるいは正しいシミュレーションとの差異によって学習者に式の誤りを認識させ、修正へと導く枠組み、フェイクシミュレーションを提案した。従来の力学的概念や公式レベルでの誤りに対する指摘に比べて、シミュレーションを用いて誤りを顕在化することにより、学習者により説得力を持って誤りであることを認識させることが可能であり、誤りの修正のみならず、誤りの再発を防ぐためにも効果があると期待できる。本稿では、概念的な提案だけでなく、力学を対象としたフェイクシミュレーションの実現と、予備的な検証実験について述べた。

今後の課題としては、(1)本フェイク手法の改良、(2)誤概念を扱うフェイク手法の検討、があげられる。(1)に関して、今回の実験でシミュレーションが学習者に誤りの存在を認識させるために効果的であることは確認できたが、誤りの原因・箇所の認識については必ずしも十分ではなかった。今後、これらを改良していくには、まずある誤りに対して、どのように現象を提示すると誤り原因・箇所が認識しやすく、どのように現象を提示すると認識しにくいのかといった要因を分析していく必要がある。(2)に関しては、今回は式の誤りについて扱っていたが、概念自体が誤っていた場合も、概念的にはフェイクシミュレーションを行うことは可能である。例えば、反作用という概念が欠落している学習者に、反作用をなくしたシミュレーションを提示することがこれに相当する。しかしながら、誤概念の修正には、そのために用いる事例の選択が非常に重要であるといわれている[石野 93]。これらの事例研究を踏まえたうえで、誤概念の修正についても一般性のあるフェイク手法を検討していく必要がある。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [de Kleer 77] de Kleer, J.: Multipul representations of knowledge in a mechanics problem solver, *Proc. IJCAI-77*, pp. 299-304(1977).
- [石野 93] 石野久美子, 池田 満, 溝口理一郎: 科学的思考を支援する IES の設計, CAI 学会第 18 回全大, pp. 67-70(1993).
- [Laurillard 93] Laurillard, D.: From Learning Need to Teaching Strategy: What is the Nature of Link?, *Proc. AI-ED-93*, pp. 12-14(1993).
- [McClosky 83] McClosky, M., Washburn, A. and FelchMichael, L.: Intuitive Physics: The Straight-Down Belief and Its Origin, *J. Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, Vol. 9, No. 4, pp. 636-649(1983).
- [野田 94] 野田尚志, 平嶋 宗, 柏原昭博, 豊田順一: 操作型学習環境における誤りの修正支援, 情処学会ヒューマンインタフェース研報, 94-HI-53-17, pp. 125-132(1994).
- [大槻 93] 大槻説平: 発見学習とその支援環境, 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 4, pp. 21-28(1993).
- [Papert 80] Papert, S.: *MINDSTORM Children, Computers, and Powerful Ideas*, Basic Books, New York (1980).
- [Resnick 82] Resnick, L. B.: Syntax and semantics in learning to subtract, Carpenter, T., Moser, J. and Romberg, T. (eds.), *Addition and Subtraction: A cognitive perspective*, Lawrence Erlbaum Associate, New Jersey (1982).
- [White 93] White, B. Y.: ThinkerTools: Causal Models, Conceptual Change, and Science Education, *Cognition and Instruction*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-100(1993).

{担当編集委員・査読者: 石崎 俊}

著 者 紹 介



野田 尚志(正会員)

1991年大阪大学基礎工学部情報学科卒業。1994年同大学院前期課程修了。同年、日本電気(株)入社。現在、関西C&C研究所勤務。在学中、ITSの研究に従事。情報処理学会会員。

平嶋 宗(正会員), 柏原 昭博(正会員)

は、前掲(Vol. 10, No. 3, p. 402)参照。

豊田 順一(正会員)は、前掲(Vol. 10, No.

1, p. 87)参照。