

操作型学習環境における誤りの修正支援

野田尚志 平嶋宗 柏原昭博 豊田順一

大阪大学産業科学研究所

本論文では、操作型学習環境を用いた誤りの修正支援について考察する。正しい概念の獲得に関する環境の利用についてはこれまで多くの研究がおこなわれてきた、しかしながら誤りの修正に関する環境の利用に関してはほとんど検討されてこなかった。本研究では、学習者の誤りを反映した現実であり得ない現象をつくり出すことによって、誤りの修正をおこなわせる学習環境"FakeWorld"を提案し、さらに力学を対象領域としたシステムを作成した。

Support for Student's Error Correction in ILE

Hisasi NODA Tsukasa HIRASHIMA Akihiro KASHIHARA Jun'ichi TOYODA

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
Mihogaoka, Ibaragi-si, Osaka, 567 JAPAN

In this paper, we discuss how to support a student to correct his errors with Interactive Learning Environment. Many studies have reported the effect of concept formation by using ILE. However, there is no studies that use ILE in order to correct student's errors. In this research, we propose "FakeWorld". It can produce unreal phenomenon which corresponds to his errors and can let him to correct his errors. We have already implemented "FakeWorld" for Dynamics.

1. はじめに

物理を学ぶということは、物理公式を学ぶということであろうか。物理の公式や法則は、そもそも現実世界のある側面を取り上げたものであるから、その抽象していく過程を学ぶことも大切であるし、また法則などに書き表すことによって現実に関する理解も深まっていくと考えられる。このような観点から筆者らは、物理教育の支援の一つとして、現実世界(*1)と物理学で定式化された世界とを対応付けながら学習することが重要であると考えている。

これらの対応付けの教育手段として、現実世界を模擬的に実現する環境型CAIがよく用いられてきた。しかし環境型CAIの研究では、正しい概念の獲得のための環境の利用法が中心的課題となっており、誤りの修正に関しての環境の利用法についてはほとんど考察されてこなかった。しかしながら現実世界で正しく現象を推定できているにもかかわらず定式化世界で誤りを犯している学習者は多くいると思われる。このような誤りを犯している学習者に対して、誤った式に対応するような現象をつくり出して提示することができれば、誤った式と現実世界での現象との対応が明確になり、誤り修正の動機付けとして効果的であると考えられる。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CAIのシミュレーション機能では実現不可

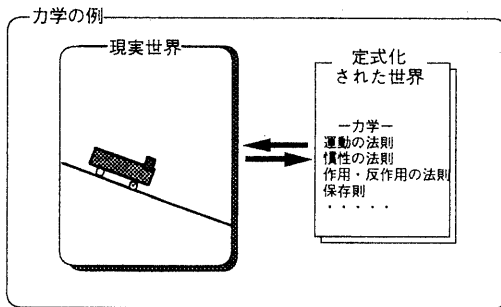


図2.1:現実世界と定式化された世界のマッピング支援

能であり、このような現象をシミュレートできる新しい枠組みが必要となる。

このような背景を踏まえ、「学習者の誤りを反映させて現実により得ない現象をつくり出し、誤りの修正支援を行なう学習環境」を提案する。以下ではこのような学習環境をFakeWorldと呼ぶ。FakeWorldは「あり得ない現象」という観点が最大の特徴である。

本稿では、2章において概念的な提案をおこない、3章において力学ドメインでの実現について述べる。さらに4章で他のドメインやタスクへの拡張について考察し、5章で研究全体を総括する。

2. 研究背景

2.1 従来の環境型の問題点

現在筆者らは、物理分野の教育支援の研究をおこなっている。筆者らは物理教育の支援の一つとして、現象等が起こる現実世界(*1)と物理学で定式化された世界とのマッピングが重要であると考えている。例えば図2.1のように、学習者は台車の実験から等加速度運動の規則性を抽出し、またその公式をシミュレートして(*2)観察することにより、等加速度運動を再確認することができる。このような場合、現実世界のある側面を切り出して式にしたり、また式の意味を現実世界に戻して考えたり、相互に関連付けることによって物理の理解が進むと考えられる。

このような現実的な世界と定式化された世界のマッピングの支援には、現実世界を模擬的に実現する環境型CAIがよく用いられている。環境型CAIは直接操作性、学習者主導の発見型学習などの特徴をもち、概念の獲得などに有用であるとの報告がなされてきた[大槻93][White 93]。しかしマッピングは正しい概念の獲得に有用なだけでなく、誤りの修正のためにも有用と思われる。以下環境を使った誤りの修正という観点から従来の環境型で不十分な点について述べ、その解決のために新しい教育手法を提案する。

誤りといっても様々考えられる。ここでは現実世界での認識が十分でなかった場合と定式化世界での認識が十分でなかった場合に分けて考察する。現実世界での認識が十分でな

(*1)何が現実かの定義は難しい。本研究では、個々の学習者の認識上の現実を現実とみなす。それぞれの学習者が現実と思っていることが現実、という立場である。

(*2)台車の実験は現実世界での実験であり、シミュレーションはコンピュータによる疑似現実世界での実験である。しかし(*1)で述べたように、本研究では学習者の認識上での現実を現実とみなしているため、コンピュータ上での疑似現実世界も、学習者が現実を反映しているとみなしている限り区別せず現実世界に含めて考える。

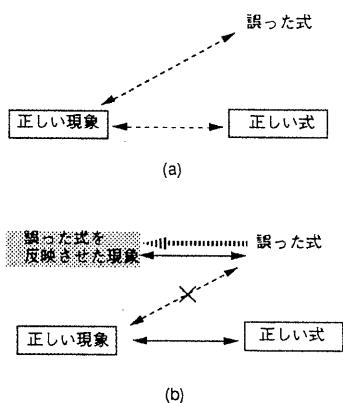


図2.2:学習者の状態の遷移

い場合は、まず現実の中で正しく認識する必要があり。これは例えば、力学においては挙動推定[de Kleer 77]が誤っていたことなどに相当する。この場合は、正しい挙動をシミュレーションするなどして、まず正しい挙動自体を知る必要がある。これは従来の環境型で扱っていた範囲である。しかし正しい現象は推定できたが、定式化世界で誤りを犯している場合が存在する。この場合従来の環境型のように正しい現象をシミュレートして提示したとしても、正しい挙動自体は分かっているのであまり意味をなさない。このように現象は正しく推定できるにもかかわらず、立式において誤りを犯している学習者に対して従来の環境型では有効な支援の方法を持たない。このような誤りに対しての支援は、これまで、式に対しての誤り指導という、定式化世界の中だけでおこなわれてきた。しかし、このような場合でも式の誤りを定式化世界だけでなく、現実世界と関連付けながら教授できれば、誤りの認識や修正に有効である。このような教育支援を目的として、式の誤りを現象の方に反映することによって、環境上で誤りの発見や修正を促すことができる枠組みを提案する。

2.2 FakeWorldの提案

2.1において従来の環境型では、現実世界では分かっているが定式化世界で誤りを犯している学習者に対して、支援が十分でないこと

(*3)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]、といった意味で使われる。

を示し、環境上での誤りの認識・修正の必要性を述べた。以下の節では環境上での誤り認識を、現実にはあり得ない環境をつくり出すことによって支援する手法を提案し、本手法で用いる語句について説明する。

2.2.1 FakeWorld

定式化世界で誤っている学習者に対して、従来のようにシステムが正しい現象と正しい式を提示したとする。このとき、図2.2(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、現象と結び付いた状態になっていると考えられる。従って、正しい式を提示するだけでは学習者に自身の誤りを理解させるには不十分である。定式化世界内に限れば、式の誤りや正しさをより深いレベルで説明することが可能であるが、マッピングが物理解理解において重要と考える本研究の立場では、現実世界と対応付けて誤りであることを気付かせる必要がある。そのためには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、式に誤りが誤りであることに気付くことが期待でき、修正への動機付けにつながると思われる。図2.2(b)参照。

以上のような教育を行うためには、従来の環境型のように現実を模倣した環境だけでなく、現実に反した環境を提示できるような枠組みが必要になる。このような計算機によってつくり出された現実にはあり得ない世界をFakeWorldと名付ける(*3)。FakeWorldが従来の環境型と比べて特徴的なことは、「学習者の誤りを反映させて現実にあり得ない現象を

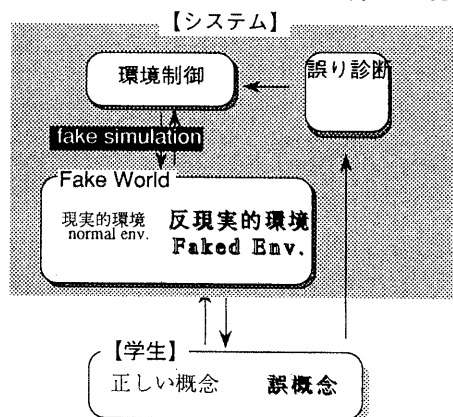


図2.3:システム側からみたFakeWorld

つくり出し、誤りの修正支援が可能」な点である。以下、FakeWorldについて詳細に説明する。

2.3 FakeWorldの枠組み

システム側からみたFakeWorldの枠組みを図2.3に示す。学習者が正しい問題解決をおこなっている間は通常的环境(NormalEnv.)であるが、学習者が誤った問題解決をおこなった場合、その誤りを診断しそれを環境に反映させる。このときつくり出されるあり得ない現象がFakedPhenomenonである。FakedPhenomenonを含むような環境をFakedEnvironmentと呼ぶ(以下、FakedEnv.と略記)。

次に学習者からみたFakeWorldの枠組みを図2.4に示す。誤った式(ErrorneousFormulation)を反映させて、現実反した現象をつくり出す(FakeSimulation.)。これによって誤り修正の動機付けを行う

2.4 従来の枠組みとの比較

図2.4に示すように、従来の環境型は正しい現象と正しい式とのマッピングしか扱っていなかった。反現実的な現象をつくり出すことによって、誤った式とのマッピングが可能になった点がFakeWorldの特徴である。また従来のITSは、定式化世界内での修正しか扱っていなかった、環境上での修正支援が可能な点がITSとの違いである。

また、従来のMicroWorldとFakeWorldとの相違を図2.5に示す。従来のMicroWorldには現実反した環境という概念が存在していない。本研究はMicroWorldにおいて、現実反した環境(FakedEnv.)という考え方を導入し概

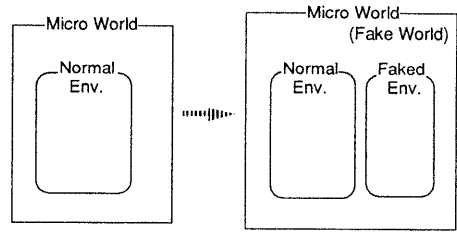


図2.5 MicroWorldとFakeWorld

念的な拡張をおこなった。

2.5 FakeSimulationの対象

この節では、本研究の対象について、タスク・学習者・ドメインという観点から述べる。

2.5.1 対象としているタスク

正しい概念の獲得に関しては従来から議論されてきた。本研究では既に述べてきたように、誤り修正タスクにおける環境の利用が主眼である。以下、誤りの修正タスクに限って議論を進める。

誤りの修正にも様々あるが、FakeWorldでは、学習者に以下のタスクを動機付けることを主眼とする。

- (1) 誤り存在の認識
- (2) 誤り箇所・原因の認識

の2つのタスクに対する動機付けである。これらの検証については5章で述べる。(1)誤り存在の認識とは、自分の式が誤りであることを学習者自身に認めさせることである。このことがそれほど容易ではないことは2.1で述べた。(2)誤り箇所・原因の認識は、例えば式のどの項が誤っているか、誤ったのはなぜか、などの認識をさせることである。

誤っていることを認め、その箇所と原因とをつかむことができれば、正しい式は提示しているのであるから、誤りの修正はほとんどなされたことになる。

2.5.2 対象としている学習者

誤りの修正を行うのであるから、概念自体は、ほぼ形成されていることが前提となる。立式に必要な概念は既にあり、現象を正しく推定しているにもかかわらず式で誤りを犯している学習者が、本研究で議論の対象として

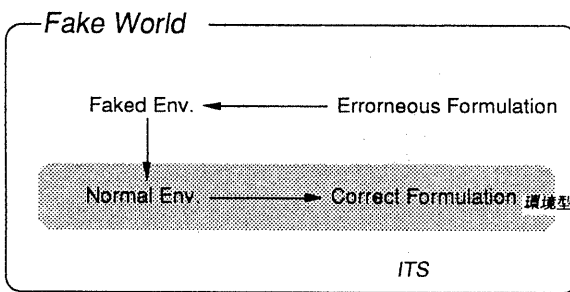


図2.4:学習者からみたFakeWorld

いる学習者である。

2.5.3 対象としているドメイン

定式化された世界と現実世界が存在するドメインであれば、fakeは可能である。よって物理一般でfakeは可能である。3章では力学のドメインに適用した例で説明する。物理一般および他のドメインへのfakeの適用は4章で考察する。

3. 実現手法

2章ではfakeの考え方について述べたが。本章ではそのfakeの考え方を力学ドメインに適用する手法について述べる。

3.1 FakeSimulationの概略

図3.1にFakeSimulationの概略を示す。オブジェクトは元々属性値を持っている。学習者が式を入力すると、その情報をもとにある物体のある物理属性の値を変更する。この変更された属性値をもとにシミュレーションをおこなうとFakeSimulationができる。ここで重要な点は以下の4点である。

- (i) FakeCond:
fakeするか否かの決定条件
- (ii) FakeAtt:
fakeする物理属性の選択条件
- (iii) FakeObj, IndirectFakeObj:
fakeするオブジェクトの選択条件
- (iv) FakeValue:
fakeする値を決定法

以下4点について詳細に説明し、力学ドメインへ適用するために、今回の実現で採用した方略について述べる。なお、誤りは一つずつ修正するべきであるとの考えから誤った式が複数ある場合でも、一つずつfakeし残りの式は正しいものとして扱っている。

3.2 力学ドメインへの適用

・ FakeCond

fakeするか否かの決定は重要である。誤った式が正しい式とあまりにもかけ離れている場合、fakeができなかったり、fakeした現象と正しい現象が離れ過ぎ、修正の方向が見えず動機付けが弱くなることが予想される。

今回の実現では、次元のチェックをfakeするかどうかの条件に採用した。式の

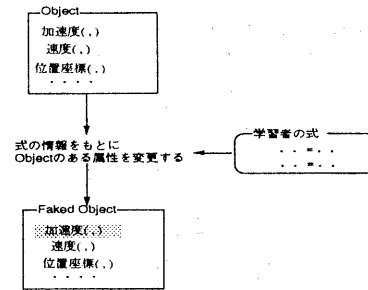


図3.1: FakeSimulationの概略

左右で次元が一致すればfakeし、一致しない場合はfakeしない。よって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fakeする。例えば相対加速度に関する誤りや、ある力を忘れていた場合などである。加速度+力のように次元の異なる項同士の加減算や、 v のところを v^2 にしているような誤りに関してはfakeしない。

・ FakeAtt

fakeする物理属性で、'加速度'や'速度'、'物体の半径'などが入る。加速度や速度をfakeすれば挙動の違いとなって現われる、また半径など物体の大きさでfakeすれば物体自身の違いとなって現われる。等加速度運動の学習においては'初期位置'をfakeすることも考えられる。

今回の実現では、挙動の違いとなって現われるよう、fakeする物理属性は加速度または速度ということにした。

・ FakeObject

全てのオブジェクトをfakeすると混乱が予想される。あるオブジェクトのみfakeし、他のオブジェクトはfakeしないのが一般的であろう。

今回の実現では、fakeする式に対応するオブジェクトのみをfakeし、fakeする式に対応しないオブジェクトは、正常な動きをとする。

・ IndirectFakeObject

式に明示的には現われないがfakeによって影響を受けるオブジェクトで、糸やバネなどFakeObjectに連結されているオブジェクトなどが相当する。

今回の実現では、糸とバネと滑車の支柱をIndirectFakeObjに設定した。

・ FakeValue

fakeするオブジェクトと物理属性が決定したのち、変更する値を決めなくてはならない、

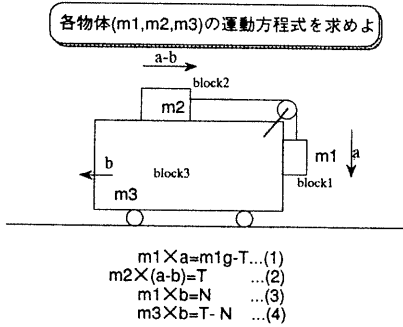


図3.2:複合台車問題

それには様々な方法が考えられる。今回の実現では、fakeする物理属性を持つ項を未知数とし、その他の項には正規の値を代入した方程式を解くこととした。

3.3 実現例

実際のシステムに実現した例を示す。図3.2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block2に関する式、 $m2 \times (a-b) = T$:(式2)に対して $m2 \times a = T$ と誤る学習者はよくいる。aは下の大きい台車に対する相対加速度であるから、block2の静止

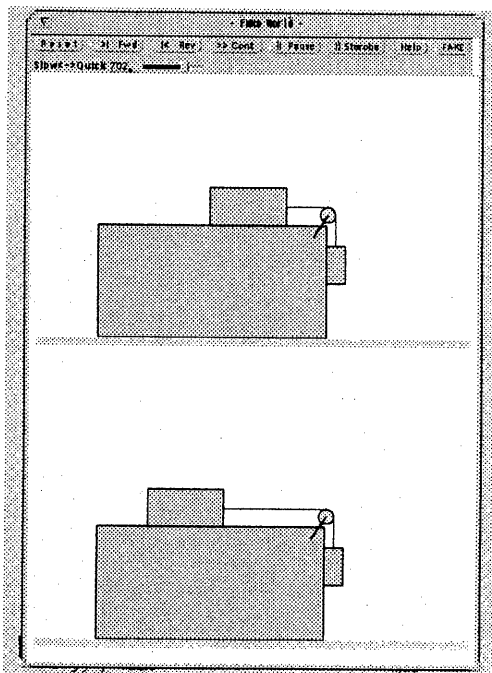


図3.3:糸が短くなる例

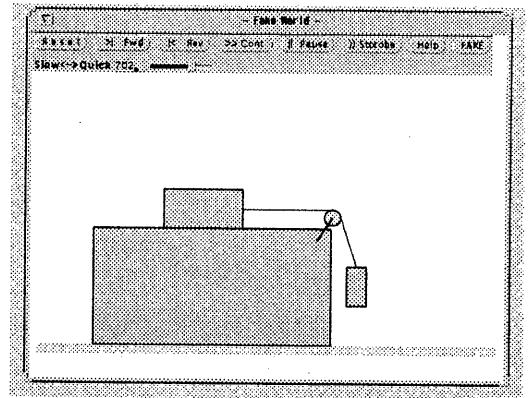


図3.4:離れてしまう例

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。この学習者の入力した式 $m2 \times a = T$ を上で述べた条件を考慮してfakeすると、実際の運動より加速度の値が大きくなり、block2だけが実際より速くすすみ、糸がどんどん短くなっていくような運動が提示される(図3.3)。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ったような式を書いていることを知る。またblock1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fakeすると水平方向の抗力が0になるため、m1だけが浮いたような現象が提示される(図3.4)。また、block3に対する式、 $m3 \times b = T - N$:(式4)において張力Tを学習者が忘れた場合、滑車の支柱にかかる力のバランスがくずれて図3.5に示すような滑車がブロックにめり込んでいく現象が提示される。

3.4 今回の実現手法についての考察

FakeValueの決定法から分かるように、今回の実現では、変数の値を変更するのみで、物体を制約している式自体は変更していない。例えば、運動方程式を誤っている学習者に対して運動方程式自体を別の形に変えるようなことはしていない。式の形も変更するようなfakeも当然考えられるが、式の形まで変更すると現象(FakedPhenomenon)と誤った式との対応がとりにくくなり、誤り修正につながらない場合が多いと考えられる。

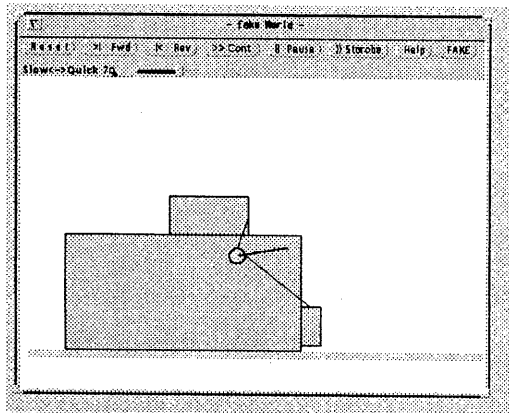


図3.5:めり込んでいく例

4. 考察

4.1 確認実験

FakeSimulationの効果についての確認実験を行ったので報告する。

図3.2に示す問題を理系大学生4人に与え、問題を解いてもらった。問題解決において、FakeSimulationおよびNormalSimulationは何度でも実行可能であるが、学習者の式が誤りかどうかは伝えないこととした。

結果は、学習者が犯した、のべ7つの式の誤りのうち、それぞれに対して(1)誤りの認識は、全部の誤りで自己認識可能であった。(2)誤りの箇所・原因については7つの誤りのうち4つが自己認識可能であった。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動機付けにつながるとのコメントを得ている。

今回の結果より、FakeSimulationの目的の一つである、修正への動機付けは達せられたと考えている。今後、NormalSimulationのみ使用可能のときと、FakeSimulationとNormalSimulationの両方が使用可能のときとの比較実験をする予定である。

4.2 有効範囲

この節ではfakeがうまくいく要因について考察を試みる。

力学分野はfakeがうまくいくドメインのように思われる。しかしfakeがうまくいくかどうかは、最終的にはドメインよりも、環境の設定の仕方によるものと筆者らは考える。fakeがうまくいく環境とはどんな環境であろうか、筆者らは次の点が重要であると考えている。

ドメイン	環境	式	ErrorAmplify
力学	疑似現実	物理式	○
熱力学	粒子モデル	物理式	△
波動	疑似現実	物理式	△
電気回路	水流モデル	物理式	△
化学	疑似物質	化学式	×
遺伝	疑似生物	遺伝子	△
幾何	図形	証明式	△
関数グラフ	図形	関数	△
算数文章題	疑似現実	数式	○
プログラミング教育	トレース	プログラム	×

図4.1:ドメインごとのErrorAmplify

○学習者にとって環境側の方が正しいものと誤りとの差が大きいこと (ErrorAmplify)

本研究で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。このような環境は多くの学習者にとってErrorAmplifyな環境である。式上では誤りに気づきにくい、物体がめりこんだり、物体が飛ぶように離れていく環境では誤りに気づきやすい。2章で述べた、環境上での修正の枠組みで考えると、式上の差よりも環境上の差の方が大きいとき誤りの認識がしやすいと言える。誤りに関して式側より差が大きくなるような環境。これが誤りにErrorAmplifyな環境である。力学ドメインの場合、比較的自然的にこのような環境が実現できるが、同じ物理でも電気回路のようなドメインの場合、ErrorAmplifyな環境をつくるのは容易ではない。ErrorAmplifyは単に視覚化すれば満たされるわけではない。例えば電流計や電圧計を付けて各パラメータの変化を明示的にしたとしても誤りの認識には力学の場合ほどは貢献しない。電気の流れを水の流れにしてfakeしてみるといった工夫が必要となる。図4.1に、いくつかのドメインに関して、ErrorAmplifyを検討した結果について示す。

4.3 科学におけるシミュレーションとの違い

FakeSimulationの考え方を、通常の科学におけるシミュレーションに応用したとするとどうなるであろうか。

通常の科学におけるシミュレーションは、複数の誤りや矛盾を含んだ式を同時にシミュレートすると、シミュレートできなかつたり、できても観察者にとってその結果が理解不能であったりする。FakeSimulationを行ったとすると、Simulatorが誤りや矛盾の取捨選択

を行い観察者が誤りを修正しやすいような現象に変形して提示することになる。誤りを含んでも実行できる点と、誤りの修正方向を示唆している点、の2点が単なるシミュレーターとの違いである。

4.4 概念形成タスクへの利用

fakeの主要タスクは誤りの修正であるが、以下のような場合、概念形成にも利用できる。

- (1)立式に本質的ではないパラメータを教える機会として利用できる。
- (2)fakeした結果と、類似した現象が存在する場合、概念形成の機会として利用できる。

(1)について、定式化とは、ある目的にとって本質的な側面を取り上げ、本質的でない側面を捨て去る行為とみることができる。対象には存在するが式に現れていないパラメータは、その捨て去られた現象と対応していると考えられる。通常fakeは式に現れているパラメータに対しておこなう。しかしその影響は式に現われていないパラメータにも波及する。例えば糸で連結した物体間の距離が短くなっていくようなfakeを行うと、糸の長さがどんどん短くなっていくような現象が起こる。このことより今回の立式において、糸の長さは本質的ではなく捨棄されていたことを学習者は再認識できる。fakeは、定式化によってどんな取捨選択が行われたか学習者に明示的に示すことができ、立式に本質的ではないパラメータを教える機会として利用できる。

(2)について例えば、ボールが床に衝突する現象において、反発係数を、垂直方向だけでなく水平方向にもかけている学習者がいたとする。Fake Simulationでは図4.2のようにな

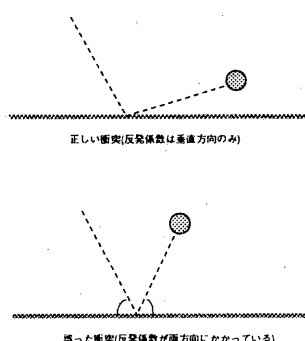


図4.2:概念形成に利用できる例

る。これは通常、力学としては誤りであるが、光学であれば光の反射という普通の現象になり、光学における反射を教える機会にできる。光学としてみれば正しいので、うまく用いれば副作用なく概念形成の機会とできる。

5. おわりに

5.1 まとめ

物理教育の支援の一つとして、現実世界を模擬的に実現する環境型のパラダイムがよく用いられている。正しい概念の獲得に関する環境の利用はこれまで考察されてきたが、誤りの修正に関する環境に対しての考察はほとんどなされてこなかった。本研究では誤り修正に対する環境の利用について考察をし、「学習者の誤りを反映させて現実にはあり得ない現象をつくり出し、誤りの修正支援を行なう学習環境」FakeWorldを提案した。FakeWorldにおいては「現実を反した現象」のシミュレーションが最大の特徴である。

本稿では、概念的な提案だけでなく、力学ドメインに実現する手法を示し、確認実験をおこなった。さらに、他のタスク・ドメインへの拡張について検討をおこなった。

5.2 今後の課題

今後の課題としては、運用面での検討があげられる。前述したfakeの手順に従うと、誤った式をfakeする場合、どれかのパラメータは必ず正しい値と異なってくる。よってそこから導かれる現象は正しい現象とは必ずどこかが違っている。しかし学習者がそれを認識する場合、誤りと認識できる場合と認識が困難な場合がある。例えば衝突におけるfakeは衝突前と衝突後それぞれの挙動は力学的には正常で、衝突前後の関係だけが力学制約を満たさない場合がよくある。このようにごく短時間だけ不自然な現象が起こる場合、なかなか誤りと認識できないことがある。誤りの認識が容易な場合と容易でない場合についての検討は今後の課題である。

参考文献

- [大槻 93]大槻説乎：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).
 [White 93]Barbara Y. White: "ThinkerTools:Causal Models, Conceptual Change, and Science Education", COGNITION AND INSTRUCTION, 1993, 10(1), 1-100
 [de Kleer 77]Jordan de Kleer: "Multipul representations of knowledge in a mechanics problem solver", Proceedings IJCAI-77, pp. 299-304, 1977.