

対話型物理学習環境 I P E のマルチメディア化

対馬勝英, 植野雅之, 早野秀樹, 藤井研一[#]

大阪電気通信大学

大阪大学[#]

寝屋川市初町 18-8

学習者に任意の物理的環境の設計と任意の初期条件よりのシミュレーションを許す対話型の力学の学習環境 I P E (Interactive Physical Environment) を開発した. I P E はシミュレートした物理現象をオブジェクトに記述したスクリプトを用いて理解することができる. この理解を基に学習者の入力した現象理解のための視点に応じた理解を生成に言葉による理解内容を表示できる. このシステムは発見学習を行う教具として開発されたものであり, 学習者の主導性を損なわず, 教授を行わずに物理に関する試行錯誤を行う知的な環境である.

環境型知的教具 シミュレーション 力学 理解生成システム 発見学習

Development of Interactive Learning Environment for Dynamics

Katsuhide TSUSHIMA Masayuki UENO

Hideki HAYANO and Kenichi FUJII⁺

Osaka Electro-Communication Univ.

Osaka Univ⁺.

18-8, Hatsucho, Neyagawa, JAPAN

Interactive Learning Environment called Interactive Physical Environment for Dynamic is developed. IPE can understand the simultad physical phenomena with help of scripts described using CLOS.

Simulation, Dynamics, Intelligent learning Environment

1. 序—力学における発見学習

物理教育においては、発見学習が望ましい教育方式であることは、長年、主張されてきたが、それを実践することには以下に述べる種々の問題があった。

- 1) 学習者の自由な発想に基づく実験を行うことは資源的にも、物理的にも容易でない。
- 2) 実験を行ってもその結果を誤りなく捉えることは教師が側に居ない限り、容易でない。
特に、学習者に任意の実験を許そうとする場合、この傾向は強く、発見型教育を実験を通じて行う場合の大きな障害になっていた。
- 3) 実験とそれを説明する図式とが乖離しやすいので、学習者が実験を数量的に正確に捉えたとしても、それを理解することにつながらない。従って、この説明も側にいる教師の説明能力を前提とせざるを得なかった。

これらの問題点のため、多人数教育としての発見学習は成功しなかった。

上記の問題点をみて判るように実験の認知、理解に関して教師の認知、説明能力に強く依存せざるを得ないことが力学に関する従来型の発見学習の問題点である。コンピュータの能力をこの問題点を克服することに利用することが本研究の目標である。その際に、通常のCAIのように教え込むのではなく、学習者が自ら気づくことを重視したシステム作りを行うことを前提とした。

この種の試みとしてInteractive Physics¹⁾ (以下IPと略す)がある。これはDMI環境下で学習者に自由な環境設定と、任意の初期条件より出発するシミュレーションを許す学習環境であり、それまでのシミュレーション型CAIとは一線を画すものである。

しかし、既に、我々が報告したようにInteractive Physicsのような単に自由なシミュレーションの可能な環境型教具を学習者に与えるだけでは、学習者の多くはシミュレートした実験の意味をくみ取れず、立ちすくむことが多い。そこで、我々はIPを用いた実習において学習者が教師の説明に依存せざるを得なかった部分をコンピュータにより代行することが可能か否かを検討した。(2章に述べる。)

この検討を通じて知識処理技術とハイパーテキスト環境を用いて上記の困難を克服するシミュレーション環境が作れることが判ってきたので、我々はシミュレーションを通じた力学の発見学習を可能とするコンピュータ上の学習環境に関する一連の研究に着手した。^{2), 3), 4), 5), 6)}

2. 実現すべき機能

IPを用いた予備的な教育によりIPのようなシミュレーション環境を用いた教育には次のような問題点のあることが判った。

- 1) 学習者の視察能力に過度に依存してはいけない。

例えば、図1の平面上で質点が移動しているように見えた場合でもこれがBのような運動でないという保証はない。システムはこの運動を表示するときに言葉で起こって

- いる事象の指摘を行う能力を持つ必要がある。
 2) 学習者の注視点は定まらない。

図2の運動においては学習者はどこを注視すべきかを迷う。そのために視点に関するメニューを用意しておいてマウスで囲んだ質点の重心を選ぶとそれを表示するといった機能が必要となる。

- 3) 学習者は見ているものの内的関係に気づかない。

図3のベクトルをみてもその間の関連にそのまま気づくことは稀である。この種の提示においては、ある種の概念的な関連の示唆が必要となる。

以上の問題点を解消する機能を実現するためにはシステムに以下に示す機能を賦与する必要がある。

- 1) 生成される物理現象を理解する機能を持たす必要がある。
- 2) 物理に関するトップダウンの視点をシステムに持たし、それに関して問い合わせが可能なメカニズムを作る必要がある。
- 3) 学習者の認知を助ける種々の補助的な図的、数値的な表示手段を持たせる必要がある。

3. 実現手段

人間の物理理解は図4のような段階を踏むといわれている。⁷⁾ これを念頭におき、我々はIPEの物理理解をどのように設計すべきであるかを分析した。シミュレーションが可能であるためにはシステムはニュートンの運動方程式を利用して作動するシミュレータを内蔵しなければならない。シミュレーションの過程で生成される運動方程式の数値解を利用して生成された現象の低レベルの理解を入手することにした。(図5)

この低レベルの理解の集積よりボトムアップに中間的な状況理解を入手する。一方、学習者が知りたい項目や視点を入力した場合にはトップダウンにそれにマッチした事象を中間的、低レベルの理解の中から検索して高レベルの理解を入手する必要がある。この過程の模式図を図6に示した。

この理解に関する戦略はオブジェクト的であり、これは人間の物理理解に近いものと考えられる。CD表現を用いて全ての物理現象が記述できる訳ではないが、低レベルの理解を記

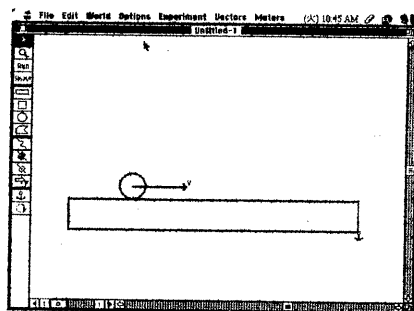


図1 I Pの教育的問題点
シミュレートされた事象に関する視察の分解能は低い。

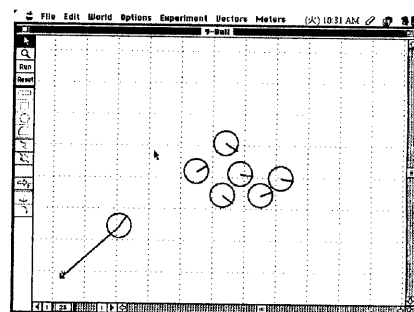


図2 I Pの教育的問題点
多様な物理的対象の存在する場合は注視点を定め難い。

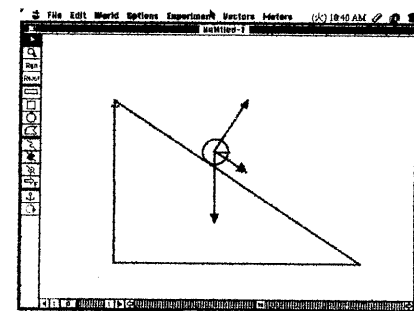


図3 I Pの教育的問題点
図示された内容の内的関連は読取り難い。

述するにはCD表現は参考になる。一般にCD表現は人間が理解したものについての理解に関するものであり、本研究での物理解解においては理解の直接的生成を行う必要があり、CD表現をそのまま用いたのでは困難がある。

我々は力学に関する事象、事象の連結に関する理解等をオブジェクト指向でスクリプトを記述することでこの理解システムの実現を図った。

4. IPE

以上の分析にたち我々はInteractive Physical Environment (以下IPEと略す)と名付けた、学習者が自由に設定した環境と初期条件よりのシミュレーションを許す力学に関する対話型学習環境を開発した。これは従来のシミュレーション型の教具と異なり、学習者が自由に設定した環境の元で、任意の初期条件より出発するシミュレーションを許す。

また、IPEは教授知識を一切持たず、学習者が意図したシミュレーションを実行し、それについて学習者の要求した問い合わせに答える機能を持つ。その意味でIPEは発見学習を試行したものであり、教授に関しては消極的なシステム理念を持つ。

IPEは学習者の設定した任意の条件より出発する力学現象を理解する機能を持ち、それに基づいて記号化された解説、説明等を提示する機能を持つ。

また、学習者の視点や説明を求める対象物の名前等より、ボトムアップに獲得した理解を用いて視点を絞り込んだ説明を生成する機能を持つ。

DMI機能を持ち、かつ、オブジェクト指向の形で知識処理が行えるための処理系としてはMacintoshコンピュータの上で利用できるCommon Lispは最適のものである。特に、オブジェクト指向システムCLOS(Common Lisp Object System)を利用することで、グラフィックスや低レベルの理解から高レベルの理解までをオブジェクト指向の形でスクリプトとして記述できる。この方式はシステムを段階的に拡張することが容易であるという特徴を持つ。

また、学習者がマウスとアイコンにより物理的環境を設計できるので直接、物理的対象を操作しているという心理的な実感を持って、コンピュータの導入による対象との乖離という問

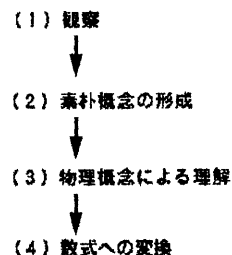


図4 人間の物理解解の段階

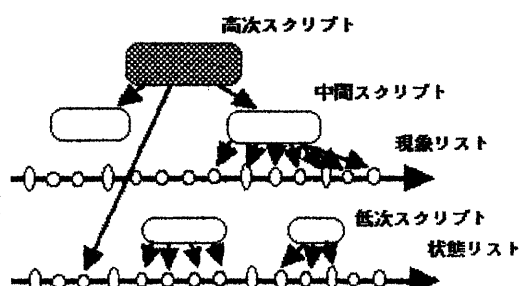


図5 IPEにおける物理解解の生成

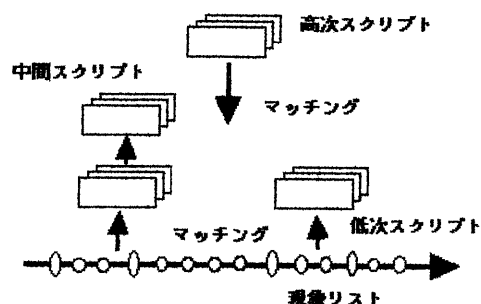


図6 IPEにおける物理解解——視点の導入

題点を回避できる。D M Iは利用者に問題のみを意識させるので、学習環境として望ましい。

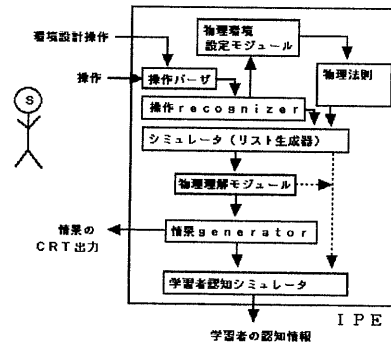
5 I P Eの構造

図7にI P Eの構造を示した。I P Eにおいては学習者はC R T上で図的に物理的環境を設定する。操作バーザによりアイコンやメニューに依存した学習者の操作が解釈され、「世界モデル」と名付けた物理環境に関するスクリプトが形成される。この情報は世界モデルの内に連立微分方程式の形をした運動方程式を生成するためにも利用される。世界モデルは運動方程式以外の種々の常識的前提を明示的に持つこともできるが、現時点では方程式等の内に暗黙に記述されている。

シミュレーションモジュールは運動方程式を差分化して求積する。その結果は座標、速度、加速度に関する数値よりなるリストとして蓄えられる。これを状態リストと呼び、これを用いてある種の低次の理解を行って得たリストを現象リストと呼んでいる。

物理理解モジュールはボトムアップに理解できる低次理解と中間的理解の一部を状態リスト、現象リストを用いて生成する。学習者が入力した視点等の高次の理解に関わるフラグが立っている場合にはI P Eはこれを充足する理解をトップダウンにマッチングにより検索する。

理解が完結するとそれより生じた情報がメッセージ生成モジュールに渡され学習者の要求に対応したメッセージが生成される。また、シミュレートされた情景は情景生成モジュールの助けを借りて線的な動画の形でC R T上に出力される。以下にI P Eの主要なモジュールについて個別に述べたい。



7 図 I P Eシステムの構造図

操作バーザ

入力はマウスによるアイコン選択、キーボード入力、マウスによるメニュー選択、既に画面に表示されている物体の選択、移動、変形等多岐にわたり、これらの何れもが利用できることがユーザにインタフェースがフレンドリーであるとの心理的な印象を与えている。

物理環境設定モジュール

ユーザの入力より運動方程式を決定し、それらについての初期条件を生成する。これにより個々の物体に関するオブジェクトに数値が与えられる。個々の物体に設定することのできる物理量として位置、速度、回転角、角速度、摩擦係数、跳ね返り係数、質量、密度がある。力は環境設定により決るが、重力のように物体の配置によらず大域的に与えられるこ

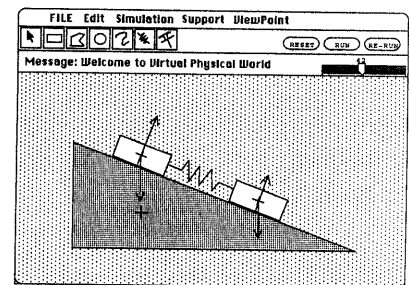


図8 I P Eのトップレベル画面

ともある。

シミュレータモジュール

IPEは2次元の運動に関するシミュレーションを実行する。連立微分方程式を差分法により求積することで1ステップ毎のシミュレーションが行われるが、一回毎に接触判定、力の計算、力の伝達計算、反作用の計算、力の加算、次の加速度、速度、位置の計算が行われる。物体の衝突は、接触判定の時点で検出する。このシミュレーションの過程より状態リストが形成される。また、どのような衝突をしたか、どのような力が働いたか、どのような運動をしたかといった情報はオブジェクト化されて現象リストに蓄えられる。単なるシミュレーションを行うだけであればこの情報は必要でないが物理理解モジュールにおいてスクリプトへのマッチングを行う際にこの情報は有用である。再度のシミュレーションを行わずにある程度の運動に関する情報を要約しておく現象リストの採用はIPEを有効に動かす技術的な工夫である。

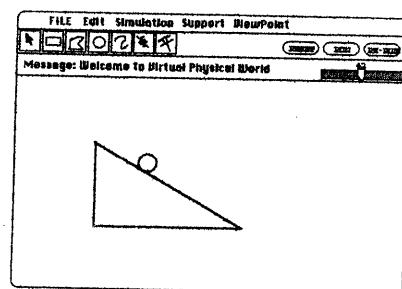


図9 IPEでの環境設計

時間の巾が有限であるために、シミュレーションを進めていくと物体が壁に侵入したり、二つの物体が重なる等の矛盾を生ずることがあり、この場合の再計算を行うサブモジュールが用意されている。

情景生成モジュール

シミュレーションの結果として得られた状態リストを用いて任意の瞬間の物理的状況に対応する線画を生成する。これを更新することで動画が生成される。この動画の描画速度はユーザがコントロールできる。シミュレーションを停止したり、途中より再生することも現象リストが保存されているので容易に行える。

物理理解モジュール

このモジュールはシミュレーションモジュールによる現象リストと状態リストを用いて物理現象の理解を生成する。低次のスクリプトについては総当りのマッチングを行うが、視点に関わる高次のスクリプトに関してはトップダウンにマッチングを行う。

図6に示したように低次スクリプトは状態リストより生成される。しかし、時系列の全てについていちいちマッチングを行うと処理が膨大になる。現象オブジェクトの構造を調べて同じ構造のものを時系列として切りだし、数値が変化しても構造が同じであれば、定性的な理解は同じものである。

メッセージ生成モジュール

このモジュールは物理理解モジュールで生成した理解オブジェクトからメッセージを生成する。力学においては複雑な文章は必要とされず、定型的な文章に当てはめる方式で十分である。システムはいくつかの理解オブジェクトを生成するので説明を一つに絞り込むにはそ

れらに優先度をつける必要を生ずる。現在の I P E では複数の理解を要約することはできないので高次のものを優先させ、そうでない場合は経験的な優先度を振ってある。

6. I P E の操作

図 8 に I P E のトップレベルの画面を示す。ユーザは図 9 のように該当するアイコンをクリック、ドラッグして C R T 上に環境を設計する。次にいくつかの物理的対象や環境に関するパラメータの入力を数値的に行う。次いで、R U N をクリックするとシミュレーションが開始される。シミュレーションは R E - R U N により最実行が可能である。また、S u p p o r t , V i e w P o i n t により説明を求めるものを指定し言語による説明をシミュレーションと平行して出力させることもできる。また、実行後に説明を求めることもできる。

また、シミュレーションの速度を変化差するために時間を制御するレバーアイコンが用意されている。

また、S u p p o r t の中に事象テンプレートが用意されており、これにより該当する運動物体が等速、減速、加速運動をする、放物運動をするといった問い合わせが可能である。

7. I P E のマルチメディア化

我々は追記型レーザディスクを核とするマルチメディアオーサリングシステムを持っている。これを用いて V T R に撮影した力学実験の映像をランダムアクセスが可能な形で記録し、それを I P E より呼ぶことにより実映像を用いた予備的なシミュレーションを可能にする試行を行っている。任意の映像を生成することはできないので、学習者は予め V T R に撮影されランダムアクセス可能な形に追記型レーザディスクに格納された実験の映像に対応した限られた数個の条件をクリックして選択することになる。

この方式は中等教育等で I P E に移行する過程で有効と思われるが以下に述べるいくつかの問題点がある。

- 1) 視点の問題
- 2) 実映像は認知しやしくない。
- 3) I P E の特徴と矛盾する。
- 4) 映像の理解の問題

1) は等速運動は映像上は等速にならないが、I P E では等速運動は C R T 上で等速運動として表示している。実験を実際の視点を設定して表示するのか、それとも仮想的に視点を考えない表示に徹するのかという問題である。

2) は予備的試行によると現実の映像は C R T 上で分解能の高い形に認知しにくく線画のほうが理解しやすいことに関したものである。

元来、I P E は学習者に任意の環境と初期条件を許すことを最大の特徴としていた。V T R で撮影した実映像を持ち込む替りにこの特徴を失うことは 3) として挙げたように問題である。

I P E は自らがシミュレートして得た物理現象を理解することはできても、映像を理解することはできない。従って、映像を元にした場合には、システムより現象理解に基づいた解

説、助言を求めることはできない。従って、映像はあくまで補助手段としてしか使えない。学習者が映像にマウスによりマークを行うことで映像についての問答を行い、実験に関する注意を喚起した後、I P Eに移行する教育方式が有望であろう。

8. 結論

I P Eは現時点では、まだ、試作段階であるが、基本的なシステムの理念とそれを基にした設計が妥当であることがシステムの動作より確認できた。中間的、高次のスクリプトに関しては検討の余地があり今後の課題である。また、本システムの行う物理解は人間の行う理解とは異なるものであり、より素朴な人間に理解のシミュレータをI P Eに組み込むことは種々の点で興味深いがこれも今後の課題である。⁸⁾

I P Eに映像を取り込むことに関してはI P Eの本質と抵触する可能性もあり、I P Eへの移行過程として補助的に使用する方式をとることとなる。

文献

1. Interactive Physicsは米国Knowledge Revolution社の製品である。
2. 対馬、植野、早野、「物理の教育とマイクロワールド」、信学報ET91-89, (1991)。
3. 対馬、植野、早野、「物理解における素朴概念と対話型物理教育」、信学報ET91-101, (1991)。
4. 植野、対馬、早野、藤井「力学における対話型支援システム」、信学報ET91-, (1991)
5. 対馬勝英、植野雅之、早野秀樹、藤井研一、「対話型物理学習環境I P Eと定性推論」、CAI学会研究会, (1992)。
6. 植野、対馬、早野、藤井、「マルチメディア技術を用いた物理学習環境の開発」、信学報ET92-133, (1993)。
7. 鈴木他、「教科理解の認知心理学」、新曜社, (1990)。
8. Weld and de Kleer, "Qualitative Reasoning about Physical Systems", Morgan Kaufmann. (1990)。