

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：34406
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21500846
 研究課題名（和文）
 体験から数理へ、アニメーション作成を通じて学ぶ物理教育システムの構築
 研究課題名（英文）
 Development of new type educational system on physics by making an animation of kinematics
 研究代表者
 藤井 研一 (FUJII KEN-ICHI)
 大阪工業大学・情報科学部・教授
 研究者番号：10189988

研究成果の概要（和文）：

本研究では、学習者が自らの手による実験をリアルタイムに解析可能な教育用システムを構築すること、そのシステムを用いた学習方法を提示することを目的として行なった。中心となるものは、コンピュータビジョン用ライブラリ OpenCV を用いて、ウェブカメラ内蔵のコンピュータのみで力学実験解析が可能となるソフトウェアの開発である。これにより、誰もが手軽に力学実験の解析を行うことが出来る様にした。

研究成果の概要（英文）：

An experimental study is quite important for students to understand physics. In the official educational systems in Japan, however, there is little chance for students to do experiments by themselves.

We developed the experimental and analysis system for the students studying physics in highschools and universities, assisting the experimental study of students. This system consists of experimental tools and a software implemented in a standard laptop PC with web-camera. The system gives precise analysis of the motion of an object from the recorded video data, which is quite useful for studying the physics.

交付決定額

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学、科学教育

キーワード：物理教育、力学実験、
 コンピュータビジョン、アニメーション、
 可視化、科学知と経験知

1. 研究開始当初の背景

物理学は、理工系のほとんどすべての学問領域の基礎として必要であるにも関わらず、現在大学初年度で学生が物理的な考え方を十分に理解し数理的なアプローチが可能になっているかについては、はなはだ疑わしいと言わざるを得ない。この一因として、通常の講義では、学生は数式を中心とする講義内容を受容するだけであることも理由の一つと思われる。

また物理学学習上の問題として指摘されるものに、学習者の運動に対する「経験知」がある。学校での物理以前に、学習者は多くの経験から運動に関して確固たる「経験知」を築き上げている。この経験知は学校教育で学ぶ「科学知」の理解に対し、妨げとなる場合が生じる。

具体的な例としてはニュートンの運動の第一法則の理解がある。経験から得られる運動の知識では物体間に働く摩擦力や空気抵抗のために、力を加え続けなければ物体の移動は起こらず、一様な運動を引き起こすためには継続的な力の印加が必要となる。そして、力が働かない場合はつねに物体は静止すると理解されている。

この経験知による刷り込みは強固で多くの調査において、学校教育で科学知を学習、理解した後でさえ、時間が経つとこの経験知に戻ってしまうという報告がある。学習環境での経験知から科学知への移行を確実とするためには、経験知と関連する実験教育の実施を通して経験知による認識の誤りを示し、科学知を理解させることが必要と思われる。

このような問題点を解決し、運動への自発的な関心を喚起し、リアリティを有しながら数理的な理解が得られる教育システム構築が強く求められている。このような教育システムを築くために、シミュレーションソフトウェアの作成等、情報科学の助けを借りる試みが多々なされている。こういったコンピュータの積極的利用は物理解にも大きな可能性を秘めているが、コンピュータ支援の利用をもってしても、現実の運動自体へのリアリティの獲得が大きな問題となる。リアリティの欠如は質量や初速などが現実的な値とはかけ離れた条件を無頓着に採用してシミュレーションを行い、現実の物理現象との比較を試みたりすることに現れている。

2. 研究の目的

本研究ではコンピュータを用いることで、実験の実施が可能となり、数値データ処理やシミュレーションを含む新しい型の複合的物理学教育システムを構築し、その利用方法について議論を行なうことにある。

物理教育に要求されていることは学習者が運動自体とその数理的な理解へ関心を持つことと思われる。このために、身体性に基づく物理現象に対するリアリティの獲得と学習への確固たる動機付けを与えられる教育システムが必要である。提案するシステムでは、現実の物体の運動をその場でアニメーションとして記録し、数量化することで運動に対する関心を呼び起こし、物理学学習の動機付けを与え、アニメーション作製のための裏付けとしての実験実施より身体性に基づくリアリティの獲得を与えることを目指す。運動を目に見えるアニメーションとして記録することは、学習意欲喚起に有効と思われる。したがって、アニメーション作製をこの教育システムの中心に据えて考える。

物理学理解のためには実験教育は避けて通れないものである。しかしながら比較的容易な初等力学の実験に限っても、装置を含む実験環境と学習者の技術的な理解とが必要となるため、高等教育の現場では学習者が自らの手によって実験を行うことは困難な場合が多い。

本研究では、コンピュータを利用し初等教育用途で導入と実行が容易な力学を題材とした物理実験システムの開発を行うことである。初等的な物理教育は力学から始まることが多いが、力学においては運動とそれを引き起こす力の関係の理解が求められる。対象となる物体の運動は視覚的に捉えることが可能で、実験自体も視覚に直接訴えるものとなる。現在、ラップトップコンピュータは比較的安価で容易に入手可能である。これらは動画再生や動画加工を十分に行える能力を有しており、ウェブカメラが付属する機種も多数存在している。また近年、iPadに代表されるタブレットPCの普及も目覚ましいが、これも動画再生能力をもち、カメラ機能を持つため、動画処理が可能である。したがって、物体の運動を記録した後、画像処理を用いて運動を調べることが可能となる。いずれにしろ多大な設備投資を新たに行うことなく、本研究の目的とする動画に基づく運動の記録と解析を実施するためのハードウェア環境は容易に入手可能と考えられる。

しかしながら記録した動画データからその場(in-situ)で物体の運動を抜き出し定量的に解析するためのソフトウェア環境は十分整っていないのが現状である。本研究の目的は、このような動画再生および加工可能なコンピュータ環境を前提として動画より運動解析が可能なソフトウェアを開発し、物理学の新しい実験教育を提案することにある。このために、動画記録から物体の運動のみを抽出し、

その場で定量的な解析を行えるソフトウェアの開発を行うものである。

3. 研究の方法

物理学の実験教育に関しては、高等学校教育での実験実施は主に教員の手により演示形式でなされる。一方、大学教育では理工系の学生を対象とした物理学実験が多く、大学で実施されている。前者は自らの手による実験ではないため、経験するという意味では説得力に欠けるものと思われる。また後者の実験は、高学年での専門教育への接続を考慮して実施されるために実験機器の取り扱いや実験精度の習得など実験技術的な側面に主眼がおかれており、実験テーマもこれに即して選ばれるため、必ずしも経験知を科学知へ接続するための教育がなされるものではないと考えられる。

したがって、大学においては物理を必須とする専門学部学科の以外の学生や高等学校の学生に手軽に経験知を科学知へ接続する教育手法が得られるならば、専門分野を問わず科学知を身につけた学生の増加に繋がり幅広い分野での活躍も期待出来る。

本研究の目的は、コンピュータを利用し実行可能な教育ツール構築を行うことにある。経験知は個人的な経験に基づく。また経験は感覚に強く依存するため、もっとも主要な感覚情報が視覚情報であることを鑑みるならば視覚に直接訴える実験教育が上記のような目的の教育においては重要な要素と考えられる。

翻って動画記録および再生について考えるならば現時点のラップトップコンピュータは動画再生や動画加工を十分に行える CPU とメモリー量を有しウェブカメラも付属している。また iPad に代表されるタブレット PC も動画再生機能面でもカメラ等の周辺装置内蔵に関しても十分利用可能と思われる。いずれにしる多大な設備投資を新たに行うことなく、本研究の目的とする教育環境が容易に構築出来ると考えられる。このような動画再生および加工に十分なコンピュータ環境が整っていることを前提として、動画記録および再生を用いた実験手法を考えてみる。

実験実習をより積極的に取り入れることで学習者の物理学のより一層の理解を促す。当初の計画とは異なり、学習者の利便性を向上させ、学習の敷居を下げることを第一目標として教育用システムを構築した。このシステムでは、運動のアニメーション制作を製作するが、そのために必要な機材はコンピュータ(PC)1台のみとした。1台のPCで製作が達成可能とするために、物体の運動を動画として記録し、その映像からコンピュータビジョ

ンを用いて、運動物体を抽出し、物体のアニメーションとして記録する方式を用いた。さらに、このアニメーションより、運動を解析可能とする機能も同一ソフトウェアに含めることで、本来の目的を唯一のPCのみで達成出来ることを目指した。

このようなソフトウェアを用いた実習型の講義のあり方や、独習のあり方については、発達心理学におけるウィゴツキーの学習理論に基づく方式に従い、学取者の協働に基づく実習型授業での本ソフトウェア利用を考えた。

4. 研究成果

上記の目的を満たす教育用ソフトウェアを開発することが出来た。これにより、コンピュータのみで実験を数理的に解析可能にし、学校教育中での実験実施が困難な現状を打破し得るものと考えられる。さらに、実験を行ううえで、使用するPCの性能にもあまり依存することないため、独習においても再現性の良い実験を学習者のみで得られると考えられる。これにより広範囲な教育現場で物理実験が可能となり、現在の物理履修者減少や苦手科目としての物理といった問題解決に寄与できるのではと期待している。

本システムでは、比較的高い精度を持った実験結果を得ることが出来たため、単純な物体の運動を超えて、人体の運動学などの研究にも利用が可能となっている。この分野での利用でも様々な活用が行われることを期待している。

このように本ソフトウェアは、手軽な器具環境で実験を実施出来るが、独習するための教材の充実も必要となる。また本ソフトウェアの利用が無条件に良い結果をもたらす訳でもないため、具体的な教育方法についても試験的な運用に基づいて実験を行い、独習に置いても利用可能な説明書も作成できた。

以下に具体的な成果物の内容について説明を行なう。

(1) 動画による運動解析

初等的な物理学実験としては重力下での質点の運動が考えられる。この実験を行うことを想定し、使用する機材として一般に入手可能なカメラとコンピュータを考えると、測定の律速条件はカメラのフレームレートと解像度によって決定される。ごく一般的なカメラを想定するとフレームレートは 30fps、解像度は 480 x 640 pixel となる。これを用いて高さ 2m の実空間の撮影を仮定すると時間分解能 $dt = 1/30 = 0.03 \text{ s}$ (30 ms)、空間分解能 $dx = 2/480 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$ となる。この分解能の元に $L = 2 \text{ m}$ の高さからの自由落下実験を行った場合、落下に要する時間は $T = (2h/g)^{1/2} = 0.6 \text{ s}$ となる。上記の条件では $0.6 / 0.03 = 20 \text{ frame}$ の画像データが記

録出来ることになる。また初速度を 0 とすると、落下直後の位置変化 $dt = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ と見積もれるが、これは使用カメラの分解能以下となるため測定可能であることも分かる。市販されているビデオカメラやウェブカメラにはさらに高い空間分解能を持つものも広く普及しつつあるので、それらを用いるならば、動画によって重力下での運動などの初等的力学実験を定量的な解析も含めて行うことが出来る。

初等力学のための教育ソフトとしては Design Simulation Technology 社から Interactive Physics⁽¹⁾ が、Lenox software 社から VideoPoint⁽²⁾ が市販されている。前者はコンピュータ上で実験をシミュレートするソフトウェアであり実験データの解析には直接利用できないが、後者は実験教育に利用可能である。このソフトウェアを使用した場合、記録された動画の映像中から運動物体の位置を手動で抽出する必要がある。一旦抽出した物体の位置は同一画面に重ね合わせることで物体の位置の時間変化が理解出来る。手動の位置抽出と座標設定より、定量的に位置データが取得でき、これより速度、加速度が求まる。このようにして運動の抽出を行なうことが出来、力の評価とともに運動を理解することが出来る。しかしながら、動画記録後の運動抽出は時間を要し、実験と解析をリアルタイムに行うことを想定されていない。実験を行ったその場で物理を議論するためには運動解析がリアルタイムに行えることが望ましい。

本研究ではリアルタイム性を有し運動解析がその場で出来るソフトウェア開発を行った。

(2) コンピュータビジョンによる運動抽出

画像から運動を抽出するためにコンピュータビジョン(CV)の手法を用いた。コンピュータビジョンという名の下にコンピュータによる画像認識及び処理の研究は広く行われ、すでに長い歴史があるが、現在 Intel 社により開発されたライブラリツール、OpenCV を用いることでコンピュータビジョンに関するソフトウェアの開発は非常に容易に行うことが出来るようになった。これは画像処理に関する様々なライブラリツールで著作権フリーで配布されているものである。このライブラリツールにより二値化やエッジ検出等の様々な画像処理を簡単に行うことが出来る。日本では奈良先端科学技術大学院大学⁽³⁾がマニュアル等を精力的に作成している。

本研究ではソフトウェア開発にこの OpenCV を使い OS として Linux 上と windows XP 上でソフトウェア開発を行なった。

運動物体の認識は様々な手法が考えられ、OpenCV を用いることで様々な手法の実現が可能であるが、本研究では特定の実験環境を想定して開発を行った。具体的には、物体認識のため運動物体を限定し、運動する物体の条件として赤色で比較的大きな直径(10cm 以上)を有する球状物体を考えた。もちろんこの条件は我々の実行可能な実験条件に合わせたもので、容易に変更可能であり本質的な制限ではない。

この球形物体の運動として、水平運動、重力下の落下運動、放物運動を想定し、これらの運動解析を行うことを考えた。カメラとしては Microsoft 社のウェブカメラ HD-5000 を用いた。このウェブカメラは解像度 1280 x 720 であり、フレームレートは 30fps である。前章の一般的なカメラの空間解像度より高いため、さらに高精度の実験が行えるものと期待した。

作成したソフトウェアでは、このウェブカメラを通して取得した画像から、対象である球形物体のみを検出する。ウェブカメラの取得した画像データが図 1 の様な場合を考える。

ここで、必要な画像データは運動物体である赤いボールのみのため、CV の技術を用いて、背景画像差分と赤色部分の抽出から図 2 の様にボール画像のみを抽出する。



図 1 カメラ取得画像

図 2 にはボール以外の像も抽出されているが、クロージングなどの CV 技術により、円形の画像をほぼ正確に抽出出来る。現時点では、画像中でのボール位置を決定する座標軸ならびに単位は現段階では手動で設定する必要がある。自動的に検出する時系列データ間に物体位置の移動がある場合はフレームレートに応じて動画を記録し、対象物体位置の時系列データを抽出して記録する。

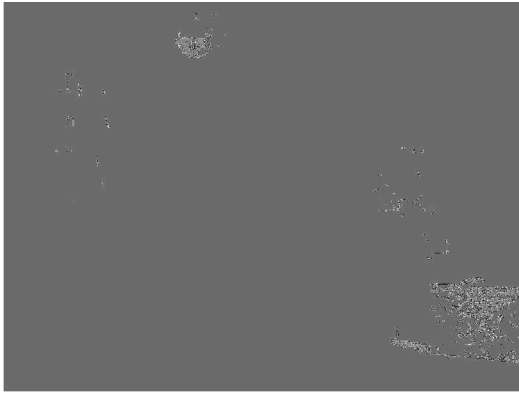


図2 抽出されたボール画像

この際、指示に従い設定した座標系にしたがって取得した画像データから物体運動抽出を行う。これより位置と時間の関係を求め、速度および加速度を得ることが可能となっている。現時点では、ソフトウェアによる画像取得数への影響はなく、ほぼフレームレートと同数（30fps）の物体の運動データを自動的に記録することが可能であった。得られた物体の位置の時系列データを重ね合わせ可視化することで運動の軌跡を直接見ることが出来た。また速度および加速度もその場で取得し可視化できた。図3に結果としてコンピュータの画面上に示される画像を示す。

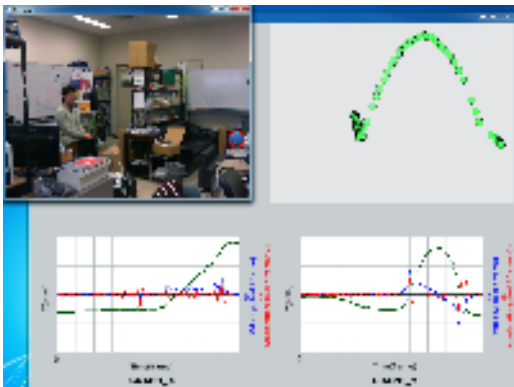


図3 運動物体の解析結果

ここには、カメラの画像とともに、定量的に得られた運動物体の軌跡、位置、速度、加速度をグラフとして示している。このような結果は、撮影と同時にリアルタイムに得られる。このため、実験結果の議論を学習者がグループで行なうことも容易となる。

さらに、得られた実験データを理論的に解析するためには、運動方程式に基づく解析解の表示と比較が必要となる。この解析解表示部分のソフトウェアの開発も行なった。しかしながら、物体によっては、空気抵抗等の効果が露になるものもあり、学習者にどのような解析を示すものが最適化については、議論が残っている。いずれにしろ、この解析部を併

せ持つことで、運動を引き起こす力と運動の関係とを明らかにすることができるため、学習者がその場で運動を理論的に理解することが可能になるものと思われる。したがって、自分の手による実験に基づいて物理を考えることとなり、これまでの座学と実験が分離した教育に新しい教育手法として導入することが可能と思われる。

(1) InteractivePhysics に関しては <http://www.design-simulation.com/ip/international.php> に紹介されている。

(2) Videopoint に関する web-site は <http://www.lsw.com/videopoint/>.

(3) 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム、”OpenCV プログラミングブック “、毎日コミュニケーションズ、東京（2007）。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

① 藤井研一、中島伸明、他 2 名、“コンピュータビジョンを用いた運動検出と物理教育への応用”、教育システム情報学会 第 36 回全国大会論文集 査読無（2011）214-215.

② 藤井研一、中川玄、他 2 名、“経験知と科学知を連続的に接続する物理教育の試案”教育システム情報学会 第 36 回全国大会論文集 査読無（2011）302-303.

〔学会発表〕（計 3 件）

① 「コンピュータビジョンを用いた運動のリアルタイム解析と物理教育への応用」、日本物理学会 2012 年年次大会（2012. 3. 26, 関西学院大学 藤井研一）

② 「コンピュータビジョンを用いた運動検出と物理教育への応用」、教育システム情報学会 第 36 回全国大会（2011. 9. 1, 広島市立大学 藤井研一）

③ 「経験知と科学知を連続的に接続する物理教育の提案」、教育システム情報学会 第 36 回全国大会（2011. 9. 1 広島市立大学 藤井研一）

〔その他〕

ホームページ等

作成中、近日公開

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 研一 (FUJII KEN-ICHI)

大阪工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：10189988