

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K02843

研究課題名（和文）視覚障がい者の物理学習を支援するマルチモーダルな学習教材の開発

研究課題名（英文）Development of a multimodal learning system of physics to support visually impaired students

研究代表者

鈴木 貴（Suzuki, Takashi）

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：40289260

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、視覚障がいをもつ学習者の物理の学習を支援するICTによるマルチモーダルな教材システムを開発した。物理の学習では、自然事象を観察したことにもとづくイメージが本質的な役割を果たす。そこで、本教材システムには電子媒体のテキストとリアルな仮想触体験をさせるアプリケーションを組み込み、観察の経験がほとんどもてなかった盲の学習者が物理的事象のイメージ形成から始められるように工夫した。また、今後アプリケーションを作成していくための技術開発もおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

視覚障がい者の物理の学習には、自然事象の観察経験がもちづらいことに起因する大きなハンディキャップがあることが指摘されていた。ところが、これまで作成されてきた学習教材は、動きをともなう事象のリアルなイメージを形成させるという、物理の学習では最も重要なことができなかった。本研究の学術的意義は、物理事象を可触化、可聴化して、それを力覚デバイスと音の機能を駆使することで、リアルなイメージ形成を可能にしたことである。

研究成果の概要（英文）：In this research, using ICT technology, we developed a multimodal learning system to support the learning physics for visually impaired students. This system incorporates electronic media text of physics and applications that provide a realistic virtual tactile experience, so that visually impaired students who have little experience in observation can start with creating images of natural phenomena. We have made some applications which enable them to perceive realistically these virtual realities by touching with the haptic device, and written a textbook which provides them with mainly qualitative understanding of physical essence. We, further, carried out development of technologies for future research.

研究分野：情報技術を用いた視覚障がい学習者の物理教育用教材開発

キーワード：力覚提示デバイス 視覚障がい者の物理学習支援 視覚障がい者向け物理学習用教材 物理事象の可触化 物理事象の可聴化 物理事象の可視化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

視覚障がい(以下、盲の学習者と呼ぶ)の学習では、視覚的情報の不足による数々のハンディキャップが立ちだかっている。とりわけ物理は対象が身の回りで起こる自然事象であり、物理の学習では数々の事物の動きや変化を観察して培ったイメージが要となる。ここで留意すべきことは、自然事象の観察には視覚が他の感覚に比べて圧倒的に優位だという紛れもない事実である。盲の学習者にとって観察の主たる手段は触覚や聴覚であるが、一目瞭然という視覚による観察とは大きく異なり、適切な手段を講じなければ観察できる事象は著しく限定されてしまう。例えば、よほど工夫しないと、空中を飛ぶボールに触ることはできない。そのため、多くの盲の学習者は「放物運動」という言葉は知っていても、軌道の形が放物線になるということと必ずしも結びついていない。また、波のように空間の広範囲に広がる事象の全体像を把握することもできない。確かに、触点図で波形を知覚することはできても、進行する波をイメージすることには限界がある。このように、自然をありのままに観察した経験の不足に起因して、盲の学習者にとっては物理の学習において基盤となる事象のイメージを駆使することが困難である。加えて、盲学校で使用されている物理の教科書は、図は配慮されているものの、説明自体は晴眼者用の教科書がそのまま点訳されているため、事象をイメージすることが難しい盲の学習者にとって適しているとは言えない。これらのことが盲の学習者の物理の学習を困難にしているばかりでなく、科学への興味を芽生えさせる機会をも奪いかねない。

これまで研究代表者らは、力覚提示デバイスと呼ばれる ICT 技術を利用して、可触化、可聴化されたさまざまな物理事象をありのままに触覚と聴覚によって仮想体験させ、イメージ形成を促す物理学習支援のアプリケーションの開発を進めてきた。いくつかの力学事象のアプリケーションを作成し、盲の学習者が手軽に自然観察ができるようになっていた。また、数回の評価実験で、これらのアプリケーションがイメージ形成にはかなり有効であることも確認された。ところが、力覚提示デバイスのシステムの問題により、メーカーがデバイスの仕様を一新したため、アプリケーションをもう一度作り直す必要に迫られていた。また、力学以外の事象の触体験アプリケーションはなく、なおかつ、つくられたイメージとともに物理を系統立てて学べるようになっていなかった。

2. 研究の目的

盲の学習者が置かれている上述のような状況を鑑み、研究の目的は彼らの学びを前提として、イメージ形成から始められるようにデザインされたマルチモーダルな物理学習教材システムを構築することである。マルチモーダルとは通常のテキストだけではなく、触覚や聴覚も総合して学べるようにすることを意味し、具体的には、音声や触点図によって文章や数式、図にアクセスできる通常のテキストと、さまざまな物理事象を触覚(手の運動感覚も含む)と聴覚によって仮想体験できるアプリケーション(以下、仮想体験アプリという)の二つのコンポーネントから成るシステム構築を計画した。教材作成の基本理念は物理事象のイメージへのアクセシビリティであり、盲の学習者に動きを伴う事象のイメージを芽生えさせ、イメージと言葉、数式を三位一体として物理の本質を理解させることである。

本研究では、1. で述べたように、これまでの研究で作成してきた仮想体験アプリを新たに作り直し、さらに多くの事象に対するアプリを作成する。それに加えてテキストの執筆も進め、力学だけではなく、電磁気学や波動、熱についてのテキストと仮想体験アプリもつくっていくことが具体的な目的である。

3. 研究の方法

物理学習教材システムは、PC 一式とそれに接続された力覚提示デバイス(Touch(3D Systems 社))、および PC 内部に構築された学習教材コンテンツ(テキスト本体と仮想体験アプリ群)から構成される。力覚提示デバイスは PC でつくられた仮想現実とユーザーとの間で、力覚によるインタラクティブな相互作用を可能にする装置である。ユーザーは「スタイラス」と呼ばれるペン状のハンドルを手で操作することで、仮想現実をあたかも実際に触っているかのように知覚でき、また仮想現実の物体を移動させるなど、制御することもできる。

本教材システムでの仮想現実とは可触化された物理事象であり、盲の学習者が力覚提示デバイスを使用することで、画像では見えない、見えにくい事象をありのままに触体験できるようになる。例えば、実際に触ることができない放物運動では、スタイラスにボールの運動を実現することで、速度変化も含めてボールの運動がリアルに触体験できる。さらに、力覚(触覚)だけではわかりづらい事柄は可聴化し、触覚にくわえて聴覚でもより鮮明に事象の本質を知覚できるようにする。このように、物理事象を可視化に加えて可触化、可聴化して仮想体験できるようにするアプリケーションが仮想体験アプリであり、事象ごとに何をどのように理解させたいかを検討し、機能の実装方法をデザインして作成する。機能実装が困難なところは業者(株式会社スリーディー)にアプリケーション開発を依頼した。

一方、物理の全分野(力学、電磁気学、波動、熱力学、量子力学)に渡るテキストは数式を含め

てブラウザ上で聞くことができるように音声化する。内容は大学初年度までを想定しているが、イメージをもたない盲の学習者にも理解できるように、極力言葉で事象や法則を説明し、イメージ形成から始められるように工夫する。また、数式は最低限にとどめ、微積分など高度な数学による扱いはリンクを貼って興味がある読者は参考にできるようにしておく。テキストの随所に仮想体験アプリを実行するリンクを貼り、テキストを聞き(読み)ながら仮想体験アプリで事象をリアルに体験し、学んだその場でイメージを形成していけるようにする。

4. 研究成果

本研究では物理学の教材システムのコンテンツの開発を行なった。3. で述べたように、教材コンテンツはテキストと仮想体験アプリのふたつのコンポーネントから成る。以下の(1)と(2)で、それぞれの研究成果を説明する。

(1) テキストの作成：

目標は物理の全分野(力学、電磁気学、波動、熱力学、量子力学)を網羅する参考書的な教材の作成であり、盲の学習者の学びを意識して視覚的経験を前提とせず、物理事象のイメージ形成から始められるようにすることである。力学の分野は目標としていた範囲についてほぼ完成した。運動学から始め、運動の三法則を説明し、具体的な力学現象として放物運動、円運動、単振動を取り上げた。さらに、仕事とエネルギーや運動量、角運動量と力のモーメントについても解説した。ここで心掛けたことは、視覚的経験がない読者にもイメージが伝わるような表現を選び、多くの事象に対して点図や仮想体験アプリを用い、触覚と聴覚によってイメージをつくりながら内容を理解できるようにしたことである。その際、数式よりも言葉による説明を大切に、言葉でイメージ形成を促してから数式を扱うようにした。最後に、数式を再びイメージに落とすことができるように、仮想体験アプリを作成し、適切な箇所に組み込んでいった。仮想体験アプリの詳細は(2)で説明する。また、高校の物理では「公式」として与えられていた式も、大学初年度レベルの読者を見据え、極力基本的なことから導くことを心掛けた。そのためには、微分や積分をつかう必要がある。微分方程式を解くなどのハイレベルな内容はリンクを貼って、興味があれば読めるようにしておくだけにとどめたが、微積分は物理を理解する上で欠かせない道具であることを踏まえ、微分の本質的なところ、すなわち「(瞬間的な)変化率を計算する手続き」が「微分」だということを、瞬間速度のイメージと瞬間変化率のイメージとを比較しながら高校生でも理解できるように工夫した。

力学以外の分野では、電磁気学、熱力学、波動および量子力学についてのテキストの執筆を行なった。ただし、これらの分野のテキストは現時点では草稿段階で止まっており、大学レベルの微積分の知識が前提とされているだけでなく、視覚的経験がないことへの配慮もされていない。高校レベルの初学者や盲の学習者を対象とした内容へと推敲する必要があるが、この作業は、どこに仮想体験アプリを配置し、それぞれにどのような機能を実装させるのかを検討しながら進めたほうがよい。ところが、後述するように、これらの分野の事象に関する仮想体験アプリの作成には大きな困難があって、それ以上進めることができなかった。

(2) 仮想体験アプリの作成：

仮想体験アプリの作成にあたっては、次の2点を基本方針とした。まず、盲の学習者が仮想体験アプリによる学習を通して個々の事象のイメージを正しく形成でき、かつ、そのイメージを核として広範な事象のイメージに般化できるよう、基本的な事象を選定することである。もうひとつは、個々の事象の物理的エッセンスが定性的に理解できるように、効果的な機能を実装することである。そのひとつの機能として、音を有効に利用し、触覚と聴覚で知覚できるようにした。力覚提示デバイスのスタイラスを通じての触覚や手の運動感覚だけでは知覚できない、または知覚しづらいことがある。例えば、空間を運動している物体の速度変化はスタイラスを持っている手の運動感覚で知覚させることができるが、物体と原点など、ひとつの定点との距離の時間変化は、スタイラスの動きだけではほとんどわからない。そこで、音の周波数を距離の関数としたピープ音を鳴らし、音の高低で距離を表現すれば、定性的ではあるが、速度と距離の時間変化を同時に認識させることができる。また、物体の速さの変化が小さいと、触覚だけでは微妙な速度変化を認識することは難しい。そのようなときも、速さの変化を音の高さの変化で表現することで、運動感覚では認識できないほどの微妙な速度変化を知覚できるようになる。このような音の有効性は、以前行なった評価実験によって確認している。

さらに、それぞれの事象で本質的な役割をする物理量を入力パラメータとして、学習者が自由に入力できるようにした。そうすると、入力値に応じて事象がどのように変化するかを直ちに確認でき、その物理量の役割が理解できる。例えば、等加速度直線運動を表わす式 $x(t) = at^2 + v_0t + x_0$ [m] で係数 a 、 v_0 、 x_0 をパラメータとすれば、 a が加速や減速のペースに関係し、 v_0 は初速、 x_0 は最初の位置であることが触覚や聴覚によって理解できる。

以下、期間中に完成した仮想体験アプリについて説明する。

放物運動アプリ：

一様な重力場の中で投げられたボールの放物運動を学習するためのアプリであり、ボールの速度変化を含めて放物運動をありのままスタイラスの運動として実現させる。このアプリは次の仕様で業者に開発してもらった。入力パラメータとしてボールの投射角度と初速、重力加速度の大きさ、ボールの質量を選び、盲の学習者にそれぞれの値を適宜入力させる。その後アプリを

スタートさせると、それらの値に応じた放物運動がスタイラスにフィードバックされ、盲の学習者はスタイラスに誘導される手の運動感覚で放物運動を知覚する。ここで、放物運動の物理的エッセンスを理解させるためには、速度の変化と運動の初期条件依存性を明確に知覚させなければならない。

ところが、以前の研究から、手の運動感覚だけでは微妙な速度変化は認識しづらいことがわかってきたため、聴覚も利用できるように音の機能実装も行なった。具体的には、速度や加速度の各成分、および速さに応じた周波数の音も同時に鳴らし、音の高低でそれぞれの時間的な変化を認識できるようにした。音で確認したい物理量は初期条件の入力時に盲の学習者が適宜選択できる。例えば速度の水平方向成分を選択すると、ボールの運動中は一定の高さの音が鳴り、その速度成分は変化していないことがわかる。また、速度の鉛直成分を選択すると、ボールが上昇するときは徐々に音は低くなり、下降するときは音は徐々に高くなるため、ボールは鉛直下方に加速度を持っていると理解できる。確認のため、加速度の水平方向成分を選択すると音は鳴らず、鉛直成分を選択すると一定の高さの音が鳴る。これを運動方程式と照らし合わせると、ボールは鉛直方向にだけ重力を受けていることが理解できる。ちなみに、これまでの盲の学習者を対象としたいくつかの評価実験では、半数以上の者は学習前は軌道を正しく理解していなかった。このアプリケーションでは、ボールが地面に落下すると軌道をスタイラスでなぞることができ、投射角度や初速に応じて放物線の形状が変化することも理解できるようにした。

力覚デバイスは力覚によって仮想現実を知覚するものだが、視覚によってとらえるには仮想現実を可視化するビューアが必要である。可視化には通常、Unity と呼ばれるツールを用いる。一方、力覚デバイスは OpenHaptics と呼ばれるソフトウェアによって制御される。OpenHaptics を Unity にプラグインさせることで画像と力覚デバイスとが同期し、ユーザーは可視化された仮想現実を見ながら力覚デバイスを操作できる。放物運動アプリでも、はじめは Unity に組み込まれている物理エンジンをつかって計算し、それを力覚デバイスにフィードバックさせていたが、ボールの速さが大きくなると Unity の物理エンジンと OpenHaptics との通信に乱れが生じ、スタイラスが発震する不具合が起こった。そこで業者と検討し、その他の事象に対する仮想体験アプリを作成することも見据えて、本システム用の物理エンジン「Haptic And Simulation Engine」を開発してもらい、そのエンジンを用いて放物運動アプリを作り直してもらった。このエンジンは物理計算を実行し、その結果を OpenHaptics に渡して力覚提示デバイスを制御し、さらに Unity に渡して事象を可視化する。

初速度の計測システム：

以前、盲の学習者から、実際に自分が投げたボールの運動を知りたいという要望があった。そこで、本研究ではその要望に応えるための開発も行なった。放物運動では、空気抵抗を無視すれば投射角度と初速だけがその後のボールの運動を決定するため、盲の学習者に実際のボールを投げてもらい、ボールが手から離れた瞬間の速度を計測すればよい。そして、その値をアプリの初速度として入力すれば、その値に応じた放物運動が再現され、学習者が投げたボールのその後を知覚できる。そのために、学習者がボールを投げるときの映像を撮影し、そこから画像解析によって投射角度と初速を取得するシステムを開発した。実際は空気抵抗が無視できないため、アプリが作り出す結果は実際の運動とは多少異なる。実際の飛距離とアプリが計算した飛距離とを比較したところ、平均 1% 程度の誤差が生じたが、例えば 20m の飛距離に対して 20cm 程度の差なので、定性的なイメージ形成を目指す本教材システムとしては十分だと考える。

(3) 計画外の成果

応募時の計画では、力学以外の分野での事象に関する仮想体験アプリも作成する予定であった。ところが、(2)の で述べたように、Unity が持っている物理エンジンは仮想体験アプリには適さず、スタイラスが発震してしまうという不具合が起こったため、「Haptic And Simulation Engine」を急遽開発してもらった。その開発費用が余分に発生し、ほかの仮想体験アプリの開発費用を拮出できなかった。そこで、その代替として、次の と の開発を行った。

csv データによる力覚提示デバイス制御システムの利用：

上述したように、力覚デバイスで触ることができる仮想現実の可視化には通常 Unity が用いられている。ところが、Unity は汎用性が低く、放物運動以外の事象のアプリを作成するには使い勝手が悪い。また、「Haptic And Simulation Engine」も複雑で、手軽に数多くの仮想体験アプリを作成していくには難易度が高い。そこで、Unity と「Haptic And Simulation Engine」を使用せずに、簡易的に力覚提示デバイスを制御する方法を検討した。その結果、既存の技術ではあるが、時系列に並べられた csv データを OpenHaptics が直接取り込んで、そのデータ通りにスタイラスを動かすことができるシステムを応用することにした。ビューアを通していないため可視化はできないが、物体の運動をリアルに可触化することはでき、しかも、運動方程式を解きさえすれば物体の位置を時系列に並べた csv データは容易に作成できるため、Unity でつくることが困難だった力学事象も容易に触体験させることが可能になった。試しに単振り子や二重振り子の運動を仮想体験するアプリを作成した。

http サーバーの作成：

力学以外の事象の仮想体験アプリの作成は、Unity を用いる従来の方法でも csv データで制御する方法でも困難をとまなう。そもそも Unity は、このような事象の可視化には適していない。一方で、電磁気現象や波動、熱現象は人間の目ではとらえられないものが多いため、晴眼者でも可視化や可聴化によるイメージ形成は大変有効である。盲の学習者だけでなく晴眼者も含めて、物理の学びを深めるためには可視化、可触化、可聴化された事象を仮想体験できる学習教材を準備しなければならない。そこで、これらの事象の可視化が容易にできる Python を用いて仮想体験アプリを作成することを検討した。そして、それを力覚提示デバイスで可触化するために、Python プログラムと OpenHaptics の間を通信する http サーバーの作成を計画し、作成を業者に依頼した。

まとめ：

本研究では、盲の学習者の物理学習を支援する教材システムを開発してきた。本教材システムの特徴は、盲の学習者が自然のイメージを形成するところから始められるようにデザインしたことである。そのために、晴眼者なら視覚的経験から培われる事象のイメージを、盲の学習者でも形成できるように内容や表現を工夫してテキストを執筆し、そこに、触覚や聴覚を通して動きを伴う事象をありのままに触体験させる仮想体験アプリを組み込んだシステムを計画した。ところが、アプリの作成には予想以上の難題が見つかり、当初の計画どおりの進展は得られなかった。それでも、作成した範囲の評価を行ない、一定の有効性が認められ、上の(3)で述べたように、計画段階では想定していなかった技術開発もできた。特に、Python が使えるようになったことを考慮すると、期間中に得られた成果は本システムの今後の発展に大きくつながると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 横山廉, 松本慎平, 寺西大, 鈴木貴
2. 発表標題 三次元触覚デバイスを用いた視覚障がい者のための可聴化機能を有する物理学習支援システムの構築
3. 学会等名 教育システム情報学会2022年度学生研究発表会（講演論文集, 中国地区, A24, pp.219-220 (2023.2.23, 広島工業大学及びオンライン)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横山廉, 前田暉正, 松本慎平, 寺西大, 鈴木貴
2. 発表標題 三次元触覚デバイスを用いた視覚障がい者のための物理学習支援システムの構築
3. 学会等名 令和4年度(第73回)電気・情報関連学会中国支部連合大会 (R22-27-03 (オンライン, 令和4年10月22日(土)))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本慎平, 寺西大, 竹野英敏, 鈴木貴
2. 発表標題 力覚デバイスを用いた学習支援システム
3. 学会等名 2022年電気学会 電子・情報・システム部門大会 (MC6-6, pp.931-932 (2022年8月31日-9月3日, 広島大学東広島キャンパス))
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 前田京剛, 市原光太郎, 岩佐真帆呂, 内村浩, 興治文字, 小沢啓, 川角博, 川村康文, 久野良孝, 久保井彬仁, 桑子研, 島野誠大, 常行真司, 手塚千幹, 豊田將章, 鳥井寿夫, 浜島清利, 林壮一, 三浦登 他 8名	4. 発行年 2022年
2. 出版社 東京書籍株式会社	5. 総ページ数 288
3. 書名 物理基礎 (高等学校理科用 文部科学省検定済教科書)	

1. 著者名 前田京剛，市原光太郎，岩佐真帆呂，内村浩，興治文字，小沢啓，川角博，川村康文，久野良孝，久保井彬仁，桑子研，島野誠大，常行真司，手塚千幹，豊田將章，鳥井寿夫，浜島清利，林壮一，三浦登 他 8名	4. 発行年 2022年
2. 出版社 東京書籍株式会社	5. 総ページ数 200
3. 書名 新編物理基礎（高等学校理科用 文部科学省検定済教科書）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松本 慎平 (Matsumoto Shimpei) (30455183)	広島工業大学・情報学部・教授 (35403)	
研究分担者	林 壮一 (Hayashi Soichi) (90804922)	福岡大学・理学部・教授 (37111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------