

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00936

研究課題名(和文) 力覚デバイスを用いた視覚障害者のための科学e-learning用補助教材の作成

研究課題名(英文) Production of an e-learning materials of science using haptic device for 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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、視覚障害を持つ生徒の理科、とくに物理の学習を支援するICTによるe-learningシステムを構築した。理科の学習では、自然事象をイメージすることがとても重要な役割を果たすが、そのようなイメージは自然の観察を基礎として形成される。本研究では、視覚障害生徒には知覚しづらい数々の事象をPC内に仮想現実として構築し、それを力覚デバイスを用いてリアルに触体験させるプログラムを作成した。さらに、力覚デバイスによる触体験を行いながら、同時に、それらの事象の物理的基礎を定性的、かつ定量的に学べる電子媒体の参考書を作成した。

研究成果の概要(英文)：We have developed an e-learning system to support visually impaired students in learning science, especially in physics. In learning science, it plays a quite important role to have image of natural phenomena, which are created based on observations of nature. However, blind students have severe handicaps in such an observation, since the sensations available for them are mainly touching and hearing. Our system gives them opportunities to broaden their correct image of nature and study physics systematically. We have built in PC virtual realities of such natural phenomena that blind students can hardly perceive, and made some application-programs so that they can perceive realistically these virtual realities by touching with the haptic devices. Further, we have written a textbook for e-learning of physics which enables them to study physical essence of the phenomenon they observe using the haptic device.

研究分野：情報技術を用いた視覚障害生徒の理科、とくに物理教育用教材開発

キーワード：力覚デバイス 視覚障害者の理科学習支援 視覚障害者向けの物理e-learning用教材

1. 研究開始当初の背景

視覚に障害を持つ生徒(以下、視覚障害生徒と呼ぶ)の学習には、視覚を十分に使うことができないことに起因する数多くの困難が伴う。とりわけ理科は自然の観察に足場を置く科目であり、自然の中で起こる事物の動きや変化の観察を通して培ったイメージを核として理解が促進される。自然事象の観察では視覚が他の感覚に比べて圧倒的に有利なため、視覚障害生徒のハンディは深刻である。実際、晴眼者は子どものころから積み重ねてきた数々の視覚的経験を素材として、様々な事象のイメージを創りだすことができる。たとえ見た経験のない現象であっても、それを自分なりにイメージすることができる。

一方、視覚障害生徒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い限り、観察できる事象は著しく制限されてしまう。とくに、動きをとまなう事象に対してはなおさらである。空中を飛んでいるボールに触れることはできない。また、振り子やばねによる振動運動を、その動きを妨げることなく触れることは不可能である。さらに、進行する波の全体像を知覚することも難しい。このように、自然を観察する経験の不足から、視覚障害生徒がイメージできる事象は量的にも質的にも限られたものになってしまい、そのことが視覚障害生徒の理科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。

視覚障害生徒が置かれたこのような状況を改善するために、一部の盲学校の教員たちによって、視覚障害生徒が視覚以外の感覚をフルに活用して自然を観察、実験できるような理科教育の方法が研究され、適切な教材が開発されている。しかし、そのような教材の作成にはある程度の労力と費用がかかるため、多くの盲学校に普及するまでには至っていない。

また、筆者が研究代表者として行った平成24年度から26年度の科学研究費補助金による研究では、力覚デバイスという情報技術を活用し、視覚障害生徒に「手軽に」自然事象を仮想触体験させてイメージ形成を可能にする支援システムを開発してきた。この支援システムによって、知覚することが困難な自然事象をありのままに仮想触体験できるようになり、とくに、先天盲の生徒のイメージ形成には極めて有効であることが確認された。ところが、ひとつひとつの事象の仮想触体験は可能になって、個々の事象の背後にどのような物理法則があるのかなど、理科を系統立てて学べるようにはなっていなかった。触体験によって芽生えた理科への興味から一歩進んで学ぼうとする意欲に結びつけ、それが可能な環境を早急に整えなければならないという、大変重要な課題が残っていた。

2. 研究の目的

本研究は、力覚デバイスを利用した理科、とくに物理全般を系統的に学ぶことができるe-learning用補助教材を構築することである。具体的には、この補助教材を使って、動きをとまなう事象を正しく認識させ、それらの明瞭なイメージ形成と、個々の事象の物理的内容を定性的に理解させることである。

仮想現実とは、PCによって理想的な状況を理論通りに実現できるため、現実の実験では避けることができない摩擦力や空気抵抗などを排除でき、現実には実施不可能な状況下での実験も可能になり、物理の法則に直結するエッセンスを柔軟に学習することができる。さらに、ブラウザ上で利用できる、数式を含めた内容を音声で聞く電子媒体の物理の参考書を作成し、仮想触体験と組み合わせることで、物理を系統的に学習できるようにする。物理の内容を学びながら適所で仮想実験ができれば、理解が促進するだけでなく、事象のイメージも強化され、主体的な学びにつながるかと期待できる。

3. 研究の方法

本研究の目的を遂行するためには、補助教材を構成する次の2つの要素を作成しなければならない。

(1) 触体験用の学習教材コンテンツ:

学習教材コンテンツとは、物理の学習内容として扱われるさまざまな自然事象を、力覚デバイスを通してありのまま触体験させるアプリケーションプログラム(以下、触知モデルと呼ぶ)である。平成24年度から26年度まで行った研究ではいくつかの触知モデルのサンプルを作成し、力覚デバイスによる物理学習の有効性を評価実験によって検証した。その結果、全体的な有効性は強く認められたが、状況によっては触覚だけでは知覚しづらいなど、いくつかの解決すべき問題があることも明らかになった。そこで本研究は、これらの問題を解決することから始め、再度評価実験で改善されたことを確認し、さらに多くの事象に対して触知モデルを設計した。触知モデルの作成においては、一部は、株式会社 スリーディーに依頼した。

(2) 電子媒体のテキスト本体:

力学から電磁気、熱、波動までの、高校、大学初年度レベルの物理の参考書を書き、それを「Chatty book」(NPO法人 サイエンス・アクセシビリティ・ネット)というソフトウェアを用いて、数式を含む文書をブラウザ上で聞けるように、電子ブックの形式に変換する。内容は、視覚障害生徒が理解しやすいように、身近に知覚できる具体例を挙げて解説するように心掛けた。また、学年や学習段階に応じて学習箇所を取捨選択できるように、数多くのリンク項目で構成した。

上記の(1)と(2)は、e-learning用補助教材全体において、お互いが相補的な役割を果た

すように配慮した。すなわち、テキストを読みながら仮想体験によって内容のイメージを強化させ、理解を定着させる。逆に、触体験した事象の物理的内容と背後にある法則をテキストで定量的にも学習できる。このように、本研究では、物理を事象のイメージ形成から定性的理解、さらに定量的理解へと進めるよう、(1)と(2)の関連を綿密に検討しながら遂行した。

4. 研究成果

(1) 補助教材システムの概要

本研究で構築したe-learning用補助教材システムは、PC一式とそれに接続された2台の力覚デバイス、およびPC内部に構築された学習教材(参考書テキスト、触知モデルのコンテンツ)から成る。本システムのハードウェアとしての主要部は2台の力覚デバイス(Geomagic phantom(3D Systems社))である。力覚デバイスはPC内に構築された仮想現実とユーザーとの間で力覚の相互作用を実現する。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、また制御することもできる。

補助教材における仮想現実触知モデルが作り出す仮想的な物理的事象(以下、仮想事象と呼ぶ)であり、触知モデルは仮想事象をスタイラスの駆動域に実現させ、スタイラスを通してその仮想事象を学習者に知覚させるまでの一連の作業を行う。学習者の手は物体の運動と同調するスタイラスに誘導され、物体の運動をリアルに認識することができる。また、学習者が能動的にスタイラスを操作することで、事象の全体像を触察したり、物体を動かして物体に作用している力を体感することができる。触知モデルの設計では、事象ごとに、力覚デバイスを受動的に利用するのか、能動的に利用するのかを検討した。

なお、学習者が触体験からイメージを形成する過程では、知覚した内容を言語化することが不可欠である。学習補助者は適所で質問するなどして、学習者の言語化を促すように働きかけることが大切である。そこで、彼らが学習している内容をディスプレイ画像で常に確認できるようにした。

(2) 期間中に作成した触知モデル

完成した触知モデルのうち、典型的なものを紹介する。触知モデルの構築にあたっては、次の2点に留意した。ひとつは、触知モデルによる触体験を通して、それぞれ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囲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。ふたつめは、事象の物理的エッセンスを定性的に理解させるために、効果的な機能を実装することである。そのひとつとして、それぞれの事象で本質的な役割をする物理

量の値を学習者が自由に入力できるようにした。この機能によって、入力値に応じて事象がどのように変化するかを直ちに認識でき、その物理量の役割が理解できるようになる。

一様重力場での運動：

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触知モデルを作成した。この触知モデルの仮想事象は一様な重力を受けて運動するボールであり、その運動をありのままスタイラスに実現させ、学習者はスタイラスに誘導された手の運動感覚で放物運動を知覚する。学習者に入力させる量は初期条件、すなわち投射角度と初速、投げ位置の地面からの高さ、重力加速度の大きさ、ボールの質量である。

放物運動の物理的エッセンスを理解させるためには、ボールの速度変化を明確に知覚させなければならない。しかし以前の研究で行った評価実験では、スタイラスに誘導される手の運動感覚だけでは微妙な速度変化を認識できないことがわかっていった。そこで、手の運動感覚に加えて聴覚も併せて活用できるように、音の機能を導入した。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がボールの運動と同時に鳴り、音の高低でそれぞれの時間的変化を知覚する。確認したい音は初期条件の入力時に学習者が適宜選択する。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とわかる。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。

さらに、空気抵抗の有無も選択できるようにした。例えば、バドミントンのシャトルなどの運動では空気抵抗は無視できない。そのような運動のイメージを形成させ、さらに、空気抵抗の有無に応じて運動にどのような差異が生じるのかを認識させることを目的とした。重力に加えて物体の速度に比例する空気抵抗を受ける物体の運動を理解させるため、学習者には粘性(空気)抵抗の比例定数も入力させる。

中心力場での運動：

中心力場での運動で、最も典型的なものは惑星の公転運動である。その運動には法則性があり、ケプラーの法則として知られている。そこで、ケプラーの法則を学習するために、ひとつの惑星の公転運動を触察させる触知モデルを作成した。おもにケプラー第1法則と第2法則を定性的に理解させることを目標として、触知モデルには次のような機能を実装した。

まず、第1法則に関連して、楕円の離心率を学習者が入力し、その値に応じて楕円軌道

の形状、および太陽の位置(焦点)が変化することを理解できるようにした。離心率を入力すると、仮想事象として惑星の軌道と太陽が現れる。学習者はスタイラスを能動的に動かして、楕円の形状と太陽の位置を触察する。一方、第2法則を理解させるためには、惑星の速さと太陽との距離を同時に知覚させなければならない。惑星の速さの変化は、惑星と同じ動きをするスタイラスを持っていれば手の運動感覚で知覚できるが、同時に太陽との距離の変化を知覚させるために、距離に応じた周波数の音を鳴らす機能を取り入れた。学習者は手の運動感覚で惑星の運動を速度変化を含めて知覚しながら、同時に音の高低で惑星と太陽との距離を確認する。

復元力による振動運動：

復元力を受ける物体は振動運動をすることを理解させるために、典型的な2つの振動運動の触知モデルを作成した。ひとつは、天井からつり下げられた振り子の振動運動の触知モデルである。振り子は、盲学校でも実験されている身近な運動である。もうひとつは、ばねにつながれたおもりが、水平な台の上で行う単振動の触知モデルである。一般に、振動現象の学習では、(固有)振動数と振幅が何によって決まるのかを理解させることが本質である。その達成のために、どのような機能を実装するのかを十分検討した。

振り子の触知モデルでは、振り子のひもの長さとおもりの質量、最初の振れ角を学習者に入力させ、周期と振幅が入力値によってどのように変化するのかを認識できるようにした。さらに、振り子の振動とおもりが受ける重力の強さとの関係を理解させるために、重力加速度の大きさも入力させる。この触知モデルによる学習では、重力加速度の値を固定しておけば周期はひもの長さだけに依存し、振幅やおもりの質量には依らない事実を理解させる。しかし、一回ごとに値を変えて、つまり時間差で触体験しても、周期の微妙な変化を知覚することは困難である。例えば、あるひもの長さで振動を知覚し、次にひもの長さを2倍にしたとする。このとき、周期は1.4倍程度であるが、一回ごとの触体験では、その程度の周期の違いは曖昧になる。そこで、2つの振り子の仮想事象と2台の力覚デバイスを用意し、ひとつの振り子を1台の力覚デバイスで触体験するようにした。学習者はそれぞれの振り子に対して、適宜異なる入力値を入力し、2つの振り子を同時に振動させる。もし左右の振り子の振動数が異なっていれば、左右の手で感じる振動のタイミングが徐々にずれてくるため、わずかな周期の違いでも容易に知覚できる。

ばねにつながれたおもりの振動触知モデルでも、固有振動数と振幅が何によって決まるのかを理解させるために、おもりの質量とばね定数を学習者に入力させるようにした。一方、初期振幅の値も学習者に自由に入力さ

せなければならないが、その際、2通りの方法で学習者が設定できるようにした。ひとつの方法は、学習者がキーボードで数値を入力する。この方法での仮想事象では、おもりははじめから入力した初期振幅の位置にセットされる。

もうひとつの方法は、振動運動の前段階で、学習者が仮想事象のおもりを能動的に動かして、初期振幅を設定する。はじめの状態では、おもりはばねが自然の長さ、すなわち、ばねが伸縮していない状態のときの位置に静止している。そのおもりにスタイラスを固定させ、学習者がスタイラスを引いておもりを適当な位置まで動かす。スタイラスに付いているスイッチを押すと、そこが初期振幅に設定される。この初期振幅の設定方法では、おもりを引いている間、PCはばねの復元力を計算し、その大きさの力をスタイラスに返す。学習者はばねの伸びに比例する復元力をスタイラスを通して実感できるため、臨場感のある仮想触体験ができる。なお、この機能のプログラム開発は、株式会社スリーディーに依頼した。

いずれの初期振幅の設定方法でも、設定後に運動を開始させ、学習者はおもりと同じ単振動運動するスタイラスに誘導される手の運動感覚でおもりの振動を認識する。また、音の機能を利用して、おもりの位置(原点からの距離)、速さ、加速度、および復元力の大きさに比例する周波数の音を鳴らす機能も取り入れた。学習者は聞きたい音を選択し、おもりの振動を触体験しながらそれぞれの物理量の変化を確認できる。

進行する波動現象：

進行する1次元の横波を学習する触知モデルを作成した。この触知モデルの目的は、波を特徴づける物理量、つまり波長、振動数、および波の速さのイメージ形成と、それらの間に成り立つ関係を理解させることである。また、進行する横波の各点は、波の進行方向に垂直な上下の方向に振動していることが理解できるように設計した。

この触知モデルでは波の速さはプログラム上で固定し、振動数だけを学習者に自由に設定させ、そのときの波形と振動の様子を触察させる。振動数は次の2つの方法で設定できるようにした。ひとつは、キーボードで値を直接入力する方法である。もうひとつの方法は、一定時間、学習者にスタイラスを上下に振らせ、その振動数をPCが取得する。このように自分の手の運動で振動数を調節できるため、振動数のイメージが実感できる。なお、この機能のプログラム開発は株式会社スリーディーに依頼した。

いずれの設定方法でも、振動数の設定後は、以下のように進行波を触察する。力覚デバイスは2台使用し、波の異なる2点での振動を知覚できるようにした。はじめ、設定された振動数に対応する波長の正弦波が静止した状

態で現れる。学習者は左右のスタイラスで波形をなぞり、波の全体像を触察する。次に、それぞれのスタイラスを波形に沿って適当にずらし、適当な位置に固定した後、波を進捗させる。スタイラスは固定した点で上下に振動し、学習者はそれぞれの点での上下振動を両手で確認する。左右の手で異なる2点の波動を触体験することで、位相差と振動のずれの関係を理解することができる。

(3) 触知モデルの有効性の評価

作成した物理の補助教材、とくに触知モデルの学習効果を評価するために、10数名以上の視覚障碍の大学生と高校生を被験者として評価実験を行った。本節では、その結果を簡単に報告する。

放物運動について、被験者全員が触体験前から軌道が放物線だと知っていたが、ボールの速度変化についてはほぼ全員が曖昧だった。弱視の被験者でもボールが手から離れた後の運動はわからないと答えた。ところが、触知モデルでの学習後は、すべての被験者が速度変化も明確に認識でき、投射角度や初速を変えることでボールの運動にバラエティーが生じることにほぼ全員が興味を示した。「速度の音を聞くことで、ぼんやりしていたイメージが鮮明になった」との意見があり、速度変化を明瞭に知覚させるために実装した音の機能は極めて有効であることが確認できた。さらに、投射角度を変えると飛距離が変わることも気づき、「今度ボール投げをするときは45度で投げてみる」との声も聞こえた。

中心力場での運動の触知モデルによる触体験前は、数名の大学生だけが惑星の軌道は楕円だと知っていたが、惑星の速さが太陽との距離に応じて変化することは全員が知らなかった。触体験でこれらの事実を認識し、ほとんどの被験者が惑星の運動に強い関心を示した。とくにひとりの高校生が、「なぜ惑星は太陽に近づくときに加速し、遠ざかるときに減速するのだろうか」と自分なりに納得しようとして、繰り返し触体験していたことは特筆すべきである。

振り子の振動現象は、盲学校でも実験されているようである。しかし、前述したように、振り子を直接触って運動を確認することはできない。弱視の被験者でさえ、振動のイメージは曖昧であった。本教材での学習前は、ほとんどの被験者が振動の周期は初期振幅やおもりの質量に依存すると思っていたが、触体験後は全員が、周期はひもの長さだけで決まり、初期振幅やおもりの質量には依存しないことを明確に理解した。この事実を理解させるためには、2台の力覚デバイスを使用することが必須であると確認できた。事実、ひもの長さを4倍にすると周期が2倍になることに数名の被験者が気づいた。被験者は、それまで持っていたイメージと異なる事実に驚き、今までの理解は間違っていたことに

気づいたにもかかわらず、ほとんどの被験者は腑に落ちていないようであった。触体験中「どうしてだろう」という言葉が多くの被験者から何度も出ていた。

(4) 本補助教材の有効性について

本研究の目的は、視覚障碍生徒に自然事象の正しいイメージを形成させ、さらに物理の法則を定性的、かつ定量的に理解させることであった。そのために、自然事象を仮想的に触体験できる触知モデルコンテンツと、触知モデルによる仮想実験を適所で行いながら物理を系統的に学習できる電子ブック形式の参考書を作成してきた。現時点では最終的な達成には至っていないものの、本教材の有効性が一定のレベルで確認できたと考えている。イメージをほとんど持っていなかった事象についてはもちろん、曖昧だったり誤ったイメージを持っていた事象についても正しくかつ明瞭に認識させることができた。個々の事象に本質的な役割をする物理量をフレキシブルに変化させ、その応答を直ちに確認できるため、イメージの形成や本質的な内容の理解には有効であると考えられる。

さらに、次のような注目すべき効果も認められた。視覚障碍生徒が実際には知覚できない、または知覚しづらい自然事象の触体験を通じてリアルなイメージが形成でき、さらに物理のエッセンスを定性的に理解したことで「なぜ」という疑問が芽生え、一歩進んで考えるきっかけを与えられたということである。このように、本教材は視覚障碍生徒の自然に対する疑問や興味を引き出すとともに、参考書で学習することによってイメージ形成から定性的理解を経て定量的な理解に至る学習が可能になると十分期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

鈴木 貴, 荒木 智行, 長尾 博: 力覚デバイスを利用した視覚障碍者への物理学習支援の試み, 応用物理教育, 40巻, pp.93-99, 2016年, 査読あり.

〔学会発表〕(計3件)

— 鈴木 貴, 荒木 智行, 長尾 博: 視覚障碍者の物理学習を支援するひとつのアプローチ, 情報アクセシビリティをめぐる諸問題に関する研究集会, 2018年.

— 鈴木 貴, 荒木 智行: 力覚デバイスによる物理的事象のイメージ創生支援について, 障害者福祉の諸問題を解決するための情報処理技術に関する研究集会, 2017年.

— 鈴木 貴, 荒木 智行, 長尾 博: 力覚デバイスを利用した視覚障碍者のための物理学習支援システムの構築, 日本特殊教育学会, 2016年.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

荒木 智行 (Araki Tomoyuki)
広島工業大学・工学部・教授
研究者番号：20257413
長尾 博 (Nagao Hiroshi)
宮城教育大学・特別支援教育講座・教授
研究者番号：60712908

(3) 連携研究者

宮川 正弘 (Miyakawa Masahiro)
筑波技術大学・保険科学部・名誉教授
研究者番号：70248748

巽 久行 (Tatsumi Hisayuki)
筑波技術大学・保険科学部・教授
研究者番号：30188271

村井 保之 (Murai Yasuyuki)
日本薬科大学・薬学科・准教授
研究者番号：30373054