

学習者による観測器の活用を通じた 解答の検証を指向する力学学習支援システムの試作

Development of a Learning Support System with Measurement for Assisting Trial and Error in Physics

植野 和¹ 東本 崇仁² 堀口 知也³ 平嶋 宗⁴

Urara UENO¹, Takahito TOMOTO², Tomoya HORIGUCHI³, and Tsukasa HIRASHIMA⁴

¹ 東京工芸大学大学院工学研究科

¹Graduate School of Engineering, Tokyo Polytechnic University

² 東京工芸大学工学部

²Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

³ 神戸大学大学院海事科学研究科

³Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

⁴ 広島大学大学院工学研究科

⁴Graduate School of Engineering, Hiroshima University

Abstract: EBS: Error-Based Simulation makes the learner's error noticed by simulation in physics learning. Therefore, we expanded this and we proposed an activity to confirm the validity of learner's thinking using the measurement of a parameter after solving on EBS. In this paper, we develop a learning system for that activity and verify the learning effect of our system.

1. はじめに

初等力学の学習においては、学習者のこれまでの経験から既知とされる振舞いを対象として、振舞いに発生する力などの力学的概念を学習することがしばしば行われる。このとき、学習者は振舞いととも概念を理解するが、「運動方向に力が働く」などのように振舞いを誤概念とともに理解した学習者に対して、誤った知識を通常の教室講義等で説明することによって正しい知識に修正することは難しい[1]。このため、力学的概念を学習する際には、実験による学習等によって学習者自身が実際に振舞いを観察することで概念と振舞いとを結び付けて学習することが非常に有効である。初等力学の学習において誤りを可視化することで力学的概念を学習するためのシステムとして、Error-Based Simulation (EBS) を用いて学習者の解答した概念から振舞いをシステム上で生成することが、学習者の誤りに気づかせることに有効であることが報告されている[1][2]。また、仮想実験環境を用いた学習では、学習者が振舞いに対して観測道具を用いて実験を企図することにより自ら必要な概念のパラメータ取得を行い、また取得したパラメータを適切に用いることが可能な公式を学

習者自身に選択させることで、力学的概念と振舞いとを結び付ける学習の提案が行われている[3]。

筆者らはこれまで、力学 EBS を用いた学習の際に振舞いを用いて可視化することが難しい解答が存在することから、振舞いにおける誤り可視化条件 (CEV) をもとにシステムが診断し、該当する解答を行った学習者に対して、振舞いに加えて荷重や速度のパラメータを観測器によってフィードバックすることで誤りを可視化し、学習者自身による誤りの気づきを指向する手法を提案した[4]。

本稿では、従来誤りに応じて与えていた観測器のパラメータを学習者が自ら探索し、誤りに対応するパラメータや記入した力に対応する適切なパラメータを学習者自身によって確認し、自ら振舞いや力とともに結び付けて理解させる手法として、力学 EBS による力の解答を行った後に観測器を自ら設置しパラメータの観察を行う活動を通して、力の解答および観測器の設置についてそれぞれ学習者による試行錯誤を指向する学習支援システムの提案を行う。また、このシステムを使用した試用実験を実施し、力学的概念の理解において観測器のパラメータをもとにした理解が行えているかを評価する。

2. 先行研究

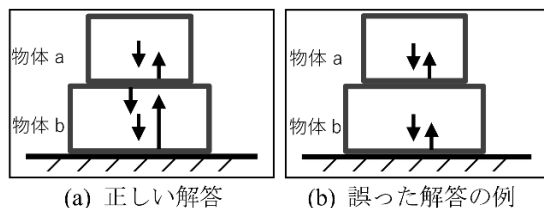


図1 2物体の積み上げ問題における解答例

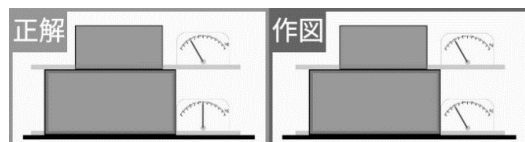


図2 2物体問題における観測器のフィードバック例

2.1. 観測器を用いた力学 EBS

EBS による学習においては、図1に示した2物体の積み上げ問題での(b)のような解答例のように、振舞いによるフィードバックで正解との違いを示せない事例や、同様に振舞いの違いを学習者が誤りとして理解することが難しい事例の存在が堀口らの誤りの可視化条件 (Criteria for Error-Visualization: CEV) 等により示されていた[5]。このような解答を行った場合を対象として、筆者らは振舞いに観測器のパラメータをフィードバックとして付加する手法を提案した[4]。観測器の示すパラメータによって、正しい現象と学習者の解答に対応した現象の間での違いを見せることで、学習者に対して正しい力の働きを理解させることを目的とした。図1(a)(b)で示したそれぞれの解答に対して、重量を示す観測器を付加したフィードバックを図2に示す。観測器によるフィードバックにおいては、矢印の有無や大小関係をもとにフィードバックするパラメータの大きさを決定する。図1(b)で示した誤答では下の物体が上の物体から受ける外力がないため、解答に対応する振舞いに設置された重量観測器が正答より小さい重量のパラメータを示している。ここでは観察すべき対象をシステムが判断し、フィードバックとして与えているが、学習者自身によって観察すべきパラメータを選択できれば、力に対応するパラメータの理解を行えるようになると思われる。

2.2. 仮想実験環境

東本らは、力学学習における実験方法考案課題を対象とした仮想実験環境を開発した[2]。実験方法考案課題では、振舞いを対象とした実験において、ある値を求めるための公式の選択や、その公式に用いる値を得ることを学習者自身で行うことを指向する。

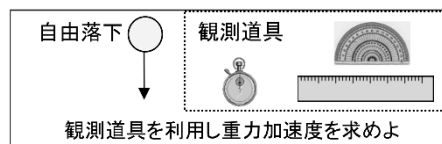


図3 実験方法考案課題の例

図3に実験方法考案課題の例を示す。この例では、自由落下する物体を対象とした振舞いを実験環境として与えた上で、求める属性値を重力加速度とし、属性値を求めるための公式を学習者に選択させ、公式に用いる値を系に対して観測道具に適用させた測定から得る。このことで、学習者自身によって実験方法を考える学習を支援し、この学習を通して、抽象的に教授された公式の実際の系への適用方法を学ぶことが可能となる。

3. 提案手法

3.1. 学習手順

筆者らの従前の研究では学習者のEBSにおける誤りをもとにシステムが観測器を通してパラメータを誤りとしてフィードバックしていたが、本手法においては学習者自身が観測器を設置する活動を通して、学習者が自ら試行錯誤し設置した観測器から解答した力の誤りに気づくことや、力と観測器の示すパラメータとの関係性を発見することで、力学的概念を理解させることを指向する。本提案手法では、まず従来の力学EBSと同様に振舞いを学習者に提示し力を解答させ、その後力学EBSによってフィードバックされる学習者の解答に対応する振舞い及び正しい振舞いに対して学習者が観測器を設置し、振舞いにかかる荷重・速度・加速度のパラメータを確認する活動を行い、解答の修正および観測器の設置について学習者自身が試行錯誤を行うことを指向する。

3.2. システム画面

本提案手法の学習支援システムの概要を、図1(b)に示した問題例および誤答例を用いて示す。まず、図4のように左側の画面で問題文とともに振舞いを示し、右側の画面で学習者に矢印によって力を解答させる。解答後には従来EBSと同様に力の解答をもとにした振舞いを生成しフィードバックを行う。このとき、図1(b)の誤答に対応する振舞いは正解と差がない振舞いを生成する。その後、図5(a)に示した観測器の設置画面に移り、(c)のように力と同様に学習者に振舞いを観察するための観測器の設置を促す。このとき、設置した観測器は画面左に示す正しい振舞いと、学習者の解答をもとにした振舞いの双方に表示され、それぞれかかる力をもとにパラメータと

して可視化した値を示す。図 5(b)で示した例では荷重を示す観測器が両物体の直下に設置されており、下の物体にかかる荷重のパラメータを確認すると、右側に示した学習者の解答に対応する振舞いでの荷重のパラメータが、左側に示した正しい振舞いでの荷重のパラメータと比較して小さいこと、また学習者の解答に対応する振舞いでの 2 物体の荷重のパラメータが同じ大きさを示していることが確認できる。

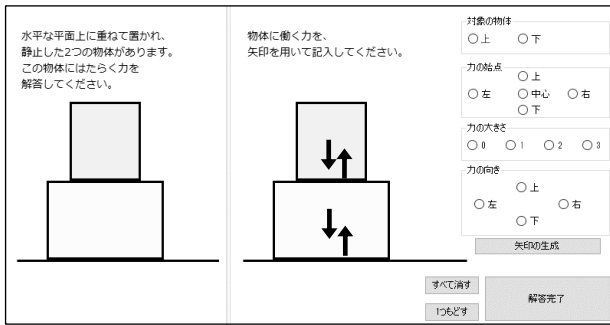
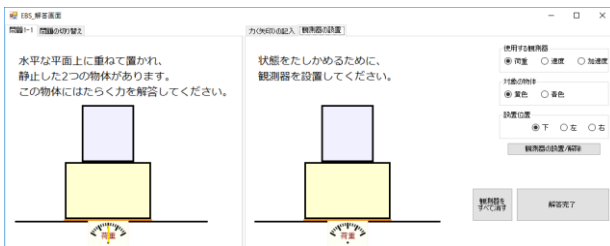
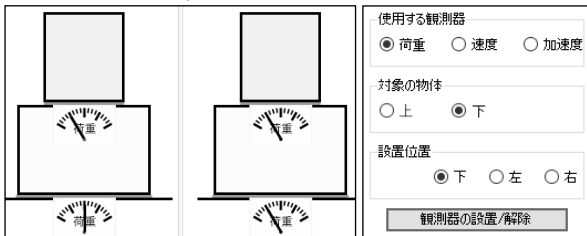


図 4 システム：力の解答画面



(a) 観測器の設置画面



(b) 重量観測器の設置

(c) 選択画面

図 5 システム：観測器の設置

学習者が観測器を含んだフィードバックを確認する際には、学習者の解答に誤りが含まれる場合に、誤りに対応して変化したパラメータに対応する観測器の設置が行われているかをシステムが誤り可視化条件に基づいて診断する。誤りを可視化できる適切な観測器の設置が行われている場合には、誤りを適切に観察できる観測器を設置できていることをフィードバックとして学習者に知らせることで、学習者に観測器へ注目するよう促している。

4. 実験

本稿で提案した観測器の設置を行うシステムによ

る学習を通して、(a)振舞いにおける力を解答させる問題において学習効果が観測されるか、(b)力以外の力学的概念によって振舞いを解釈しているか、の 2 点を評価するために実験を行った。

4.1. 予備実験

初等力学を学んだ経験のある大学生 1 名を被験者とした。システム利用学習においては本稿で提案する観測器の設置による学習を行うシステムを用い、以下の手順で実験を行った。

- (1)事前テスト①：静止系課題 (15 分)
- (2)事前テスト②：運動系課題 (15 分)
- (3)システム利用 (15 分)
- (4)事後テスト①：静止系課題 (15 分)
- (5)事後テスト②：運動系課題 (15 分)
- (6)事後テスト③：誤りの説明課題 (5 分)

実験の前に、テストの解答方法およびシステムの操作に関する十分な説明を行った。

(1)(2)および(4)(5)のテストでは、出題された振舞いに対して矢印を直接記入する形で力を回答する問題で構成されたペーパーテストを行った。テストは静止系・運動系ともに 5 問で構成されており、(1)と(4)、(2)と(5)の各テストは事前と事後で同じ問題を使用した。静止系の課題は(a)床に重ねて置かれた 2 物体、(b)壁と床に接し壁に向かって押される物体、(c)床に接し壁に向かって押される 2 物体、(d)糸に吊られたボール、(e)糸で引っ張られ静止するブロック、の 5 問であり、運動系の課題は(a)摩擦のない平面を等速で動くブロック、(b)宇宙を等速で動くロケット、(c)摩擦と外力のある平面を等速で動くそり、(d)投げ上げたボール、(e)摩擦のない平面から摩擦のある平面へ移動する人、の 5 問である。それぞれ(a)で示した課題がシステム学習課題である。また、(6)のテストでは、水平な床の上で静止している振舞い図 6(a)の誤答を被験者に示した上で、誤っている解答箇所とその理由を説明させるペーパーテストを実施した。

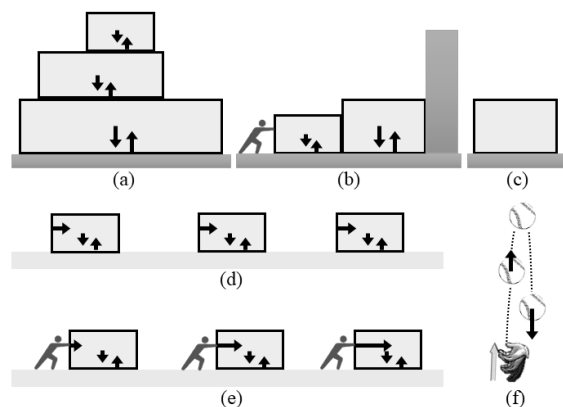


図 6 誤りの説明課題で示した誤答例

この実験では、(1)(2)で行った事前テストの点数が高く、事前事後間での点数の向上は見られなかったが、(6)の説明テストにおいて観測器のパラメータを用いた説明を行っていた。この結果から、次節では説明に特化した課題として図 6(b)~(f)の各課題を追加し学習者の解答傾向を調べるとともに、従来の EBS のみを利用した学習を行う統制群を用意し、両群の解答の相違を確認する実験を実施した。

4.2. 試用実験

表1 事前事後テスト平均正答数

点数	実験群			統制群		
	事前	事後	差分	事前	事後	差分
正解数	3.7	6.7	3.0	3.3	5.0	1.7
静止系	3.0	4.0	1.0	2.3	2.7	0.4
運動系	0.7	2.7	2.0	1.0	2.3	1.3

表2 説明テストにおける学習者解答 (抜粋)

番号	被験者属性	問題	記述内容
(1)	実験群	(a)	物体は動かないが 物体や床にかかる重さがなくなる
(2)	実験群	(b)	観測器を各物体の右に置いたとき 示すパラメータが0になる
(3)	実験群	(c)	加速度の観測器を置いたとき 物体の加速度が徐々に上がる
(4)	統制群	(a)	静止しているが物体が物体を 押す力が働いていない
(5)	統制群	(b)	静止しているが物体を押す力や 壁が物体を押し返す力がない
(6)	統制群	(d)	等速運動する物体の力は つり合っていないといけない

初等力学を学んだ経験のある大学生 6 名を被験者とした。システム利用学習において、予備実験と同様に提案システムを用いる実験群 3 名と、従来の力学 EBS のみを用いる統制群 3 名に割り振り、前節で述べた手順で実験を行った。(6)は図 6 に示した 6 問を 15 分で行い、(a)および(c)は床の上での静止系、(b)は左側から物体が押されている静止系、(d)は摩擦のない等速運動、(e)は摩擦のない等加速度運動、(f)は鉛直投げ上げ運動を扱った問題を用いた。

事前テストおよび事後テストの群ごとの平均点を表 1 に示す。事前テスト全体の平均点は実験群が 3.7 点、統制群が 3.3 点であり、事後テスト全体の平均点は実験群が 6.7 点、統制群が 5.0 点であった。このことから、観測器の設置課題を行った実験群、従来の力学 EBS を用いた統制群ともに事前事後間において点数の向上がみられ、また被験者は少ないものの実験群が統制群と比較して高い伸びを示した。また、静止系と運動系を分けて比較した場合にも、同様に事前事後間で両群の点数が向上し、統制群と比較して実験群の点数の伸びが大きいことが示された。

また、誤りの説明課題における被験者の解答の抜粋を表 2 に示す。従来の EBS を用いた統制群の学習者では、説明課題の解答において(4)(5)(6)のように力と振舞いのみ言及した解答を行っており、従来の

力学 EBS を用いた学習が有効に働いたことが示唆される。一方で、観測器の設置を行った実験群の学習者では、(1)(2)(3)に示したように観測器の示す力学的概念に言及して誤りを指摘できている解答がみられた。この中で、荷重のパラメータに言及した解答を行っていた被験者が実験群および予備実験の 4 名中 3 名おり(統制群は 0 名)、観測器の設置を行う学習によって観測器のパラメータと振舞い・力を関連付けて理解できたことが示唆された。また、(2)(3)に示したような「こうするとこうなる」などの試行錯誤をもとにした記述を行った被験者が予備実験の被験者および実験群の 1 名において見られ、観測器の設置による試行錯誤が記述に寄与したと考えられる。

5. おわりに

本稿では、学習者が差分の発生箇所を自ら考え観測器を置かせる活動を提案し、この活動によって学習者が観測器の示すパラメータと振舞いとを関連付けて思考することを指向した。試用実験から、この活動が学習者の力学的概念の理解に繋がり、学習者の試行錯誤を促す可能性があることが示唆された。

一方、誤りのない場合に学習者が観察する振舞いに差が出ないことから観測器の設置活動が不十分になる背景がある。よって今後は、予め誤った解答を学習者に与える課題を利用し、観測器を設置させて観察を促す活動の実現が課題である。これにより、誤りに対する思考を通して振舞いを理解し、また解答状況を探る学習活動をより促進させる。

謝辞

本研究の一部は基盤研究 (B) (17H01839) および基盤研究 (C) (18H11586) の助成による。

参考文献

- [1] 篠原智哉, 山田敦士, 林雄介, 平嶋宗: Error-Based Simulation による MIF 素朴概念の修正の効果の検証, 電子情報通信学会論文誌 D J100-D(3), 447-450, (2017)
- [2] 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗: 中学理科における Error-based Simulation を用いた授業実践—「ニュートンに挑戦」プロジェクト—, 教育システム情報学会誌, vol.25, no.2, pp.194-203, (2008)
- [3] 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗, 竹内章: 実験方法の考案による学習を支援する仮想実験環境の構築, 教育システム情報学会誌, vol.24, no.2, pp.83-94, (2007)
- [4] 植野和, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗: 速度・重量の観測器による誤りの可視化を目的とした力学学習支援システムの開発と評価, 人工知能学会研究会資料, SIG-ALST-B509-13, pp.73-78, (2018)
- [5] 堀口知也, 平嶋宗: 誤りへの気付きを支援するシミュレーション環境 - 表現手法と視覚効果を考慮した Error-Based Simulation の制御 -, 教育システム情報学会誌, vol.18, no.3, pp.364-376, (2001)