

# 物体にはたらく力・加速度・速度の 関連付けのための Error-Based Simulation

## Error-Based Simulation for Awareness of the Relationship among Force, Acceleration and Velocity on an Object

山田敦士<sup>1</sup> 安田健汰<sup>2</sup> 篠原智哉<sup>1</sup> 山元翔<sup>3</sup> 堀口知也<sup>4</sup> 林雄介<sup>1</sup> 平嶋宗<sup>1</sup>  
Atsushi YAMADA<sup>1</sup>, Kenta YASUDA<sup>2</sup>, Tomoya SHINOHARA<sup>1</sup>, Sho YAMAMOTO<sup>3</sup>,  
Tomoya HORIGUCHI<sup>4</sup>, Yusuke HAYASHI<sup>1</sup> and Tsukasa HIRASHIMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院 工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Hiroshima University

<sup>2</sup> 広島大学 工学部第二類

<sup>2</sup>Faculty of Engineering Division 2, Hiroshima University

<sup>3</sup> 近畿大学 工学部 情報学科

<sup>3</sup>Department of Informatics, Kinki University

<sup>4</sup> 神戸大学大学院 海事科学研究科

<sup>4</sup>Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

**Abstract:** In our research, we have developed Error-based Simulation for simulating errors in force, acceleration and velocity in behaviors. In this EBS, a learner is required to input not only forces by also acceleration and velocity. The EBS generates simulation for the three types of inputs. Then, errors are visualized not only by the strange behavior but also by the differences between the generated behaviors. The experimental use of this EBS by students of a national institute of technology (equal to senior high school students) is also reported.

## 1. はじめに

初等力学においては、物体の運動を知るためには運動方程式を立て、それを解く必要がある。そして、運動方程式を立てるためには、対象としている系にはたらく力の把握が重要である。方程式を立ててしまえば、後は代数の問題になるため、力学特有の難しさは、対象としている系に働く力の把握にあるとされており [1]、学習支援の重要な対象となっている。このような運動系でののはたらく力に関する学習支援は、これまでに数多く取り組まれているが[2][3]、これらの多くは、誤りを見つけ、その誤りに対する正解を学習者に教授するものであった。この場合、その誤りがなぜ誤りであるかは伝えられず、間違いとして否定されていたといえる。

これに対して、学習者の誤りがなぜ誤りであるかを可視化する仕組みとして提案されているのが、Error-Based Simulation である[4][5][6]。EBS では、学習者の誤った回答を正しいと仮定した場合に、どの

ようなことが起こるのかをシミュレーションするものであり、力学の場合、おかしな振る舞いとして誤りが可視化され、それが誤りであることの理由となる。この EBS は、中学校での実践を通して、その有効性が確認されている[7]。

しかしながら、この EBS の有効性は必ずしも一般的でないことが分かっている[8]。この理由として、EBS は誤りであることを学習者に気付かせる上では、誤りの可視化として大きな支援を行っているものの、その誤りがどうして誤りになっており、どう修正すればよいかに関しては、必ずしも十分な補助とはなっていないからではないかと考えられる。

従来力学で使われてきた EBS では、力を入力し、その入力を使って振る舞いを生成していた。シミュレーションを生成するという意味においては、この入力で十分であったといえるが、学習の観点からすると、必ずしも十分であったとはいえない。力に対応する加速度や速度というものについて、学習者がどのように考えているのか、それらに関する考えが

正しいかどうか、力と他の要素が適切に対応しているのか、といったことを学習者に考えさせることは重要だと思われる。そこで本研究では、力に加えて、物体の運動を導き出す上で必要な概念である加速度と速度についても表現させ、それぞれの表現を反映した運動を提示する方法を用いる。この方法を用いることで、力・加速度・速度・運動の間には密接な関係があることを学習者に気付かせ、また、それらの気付きからの誤りの修正を促す。

以上のことから、本稿では第2章において、先行研究で提案されているEBSとこのEBSを用いて行われた実験的利用について説明する。そして第3章において、2章の実験的利用で明らかになった問題を解決するために開発した本研究のシステムについて説明する。第4章においては、本研究で開発したシステムを評価するために、先行研究のシステムとの比較実験を行ったため、その結果を報告する。

## 2. 誤りからの学習

本章では、先行研究で提案されているEBSについて説明する。そして、このシステムを用いて評価実験が行われたので、その結果について説明する。

### 2.1 Error-based Simulation (EBS)

EBSとは、学習者の誤りに基づいて生成されるシミュレーションのことであり、力学系を構成する物体の不自然な振舞いを提示し、物体の正しい運動との差異として学習者の誤りを可視化する。

先行研究[8]では、このEBSをAndroidタブレット上に実装している。学習者はタブレットに表示されている物体にはたらくと考えられる力を作図する。そして作図が完了すると、システムによって学習者の作図結果の診断が行われる。仮に学習者の力の把握に誤りがあった場合、それに対応した不自然な運動シミュレーションが提示される。

### 2.2 システムに実装されている問題

このEBSシステムは、初速度を持った物体の運動について演習が行えるように開発されたものであり、教育現場で実際に活用されている具体的な課題を実装している。システムには、以下の(A)~(C)が基本問題として、(D)~(F)がより複雑な応用問題として実装されている(図1)。

- (A) 摩擦のない氷の上を等速直線運動する人
- (B) パラシュートを開いて等速で落下する人
- (C) 垂直に投げ上げられたボール
- (D) 宇宙空間で等速直線運動する宇宙船
- (E) 摩擦のある水平面上で物体を等速で押す
- (F) 斜方投射されたボール

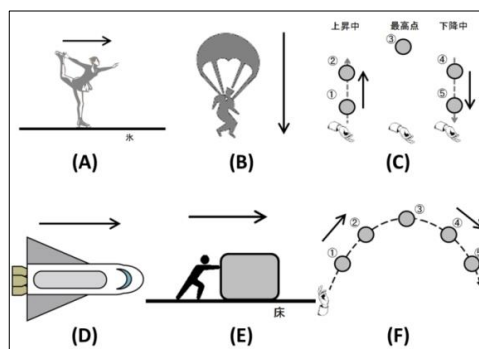


図1：先行研究のシステムに実装されている課題

## 2.3 先行研究のシステムの実験的利用

2.1節と2.2節で説明したEBSシステムを用いて、システムの学習効果を確認することを目的とした実験的利用[8]を実際の教育現場で行った。

この実験の結果として、EBSを利用することにより、自身の誤りを認識し、その誤りを修正することができた学習者群が確認された。一方で、この方法で教える場合よりも、高い効果が期待できる学習者群が存在することも確認された。そのため、先行研究のシステムのみでは十分に効果が得られない学習者への対応の必要性が生じた。よって、この問題を解決するための方法の検討を行った。

## 3. 本研究におけるEBSシステム

先行研究でのEBSシステムの実験的利用の結果から、システムで十分な効果が得られなかった学習者への対応と、システムの機能拡張の必要性が生まれた。本章では、新たに拡張する機能の設計・開発について概説する。

### 3.1 システム拡張の目的

先行研究での評価実験により、運動系の課題に対応させたEBSシステムの学習効果が確認された。しかしながら、システムを利用しても成績を向上させることができなかった学習者も見受けられた。この原因を考察した結果、成績を向上させることができなかった学習者は、自分が作図した力と、その作図によってシステムに提示された運動とを関連付けて思考することができないのではないかと考えた。そこで、力とは別に物体の運動を導き出す上で必要な概念である加速度と速度を学習者に提示し、それぞれの関係性について理解を促すことを提案する。また、ここでの力・加速度・速度の関係性というのは、力・加速度間の関係(運動方程式  $F=ma$ )、加速度・速度間の関係(瞬間の加速度  $a=\Delta v/\Delta t$ )に分解することができ、それぞれ「物体にはたらく力からどのように加速度が生じるのか」、「その生じた加速度か

らどのように速度が決まるのか」を考えさせることになる。

しかしながら、現時点の EBS システムでは力のみを扱っているため、学習者に対して、力・加速度・速度の関係性についての理解を促すことはできない。そこで、本件研究ではこの EBS を力についてだけでなく、加速度や速度についても演習が行えるように機能の拡張を行い、力と加速度と速度の間には、物体の運動を考える上で密接な関係があることを学習者に学習させる。

### 3.2 矢印情報の変更可能範囲の定義

初等力学問題に対する学習者の理解を外化させ、その作図結果を診断するためには、学習者がシステムで操作する矢印情報の変更可能範囲を定義しなければならない。この矢印は、大きさ、向き、作用点(物体のどの場所から作図するか)の3つの情報を持っており、この3つの情報の値をそれぞれ変更することによって、システムで学習者の理解の外化・診断を可能としている。

本研究のシステムでは、先行研究のシステムと同様に、2.2 節で説明した6つの課題を取り扱う。これらの課題を分析した結果、矢印の大きさを3段階に、向きを8方向に、物体の上下左右・中心から作用点が設定できるように定義した。

### 3.3 本研究におけるシステムの演習方法

本システムの作図画面を図2に示す。この作図画面の左側には、今回の演習において作図を行う、力と加速度と速度の矢印を切り替えるためのボタンが設けられている。本システムでは、力と加速度と速度の矢印を色で区別しており、それぞれ赤色、緑色、黄色のように割り当てている。このボタンを押すと、それぞれの色と対応した種類の矢印を作図することができる。

次に、画面の右下側にある「矢印の作成」ボタンについて説明する。図2は、このボタンに触れ、「矢印の作成」画面が表示された状態のものである。この画面は、自分がオブジェクトに描きたい矢印の「大きさ」と「向き」を設定するための画面である。画面には、3段階の大きさと8方向の向きが用意されており、この中から大きさと向きをそれぞれ選択し、「作成」ボタンを押すことによって、その大きさと向きの矢印を画面上に作成することができる。この時に作成される矢印の種類は、先述した作図する矢印の種類を切り替えるためのボタンで選択した種類の矢印である。

作成された矢印に触れると、その矢印は選択中の矢印となり、その矢印を移動させることができるよ

うになる。そして、その矢印をオブジェクト上に設けた作図可能地点まで移動させることで作図を行う。

作図が完了し、画面の左下にある「診断する」ボタンを押すと、その時の力と加速度と速度の作図結果に基づいたシミュレーション結果が提示されるシミュレーション画面へと画面が遷移する(図3)。そして、システムは各要素に基づいたシミュレーションを学習者に提示する。これにより、可視化できる関係が力・運動間の1つだけであったものが、力-運動間、加速度-運動間、速度-運動間の3つになった。また、3つの要素を反映した EBS を同時に見比べることによって、それぞれの運動の比較も行うことができる。これにより、運動と自分が作図した要素の間には矛盾があり、自分の作図だと、要素間の整合性が取れなくなってしまうことに気付かせることができ、発見的な学習の可能性が向上することが期待できる。



図2：本システムの作図画面

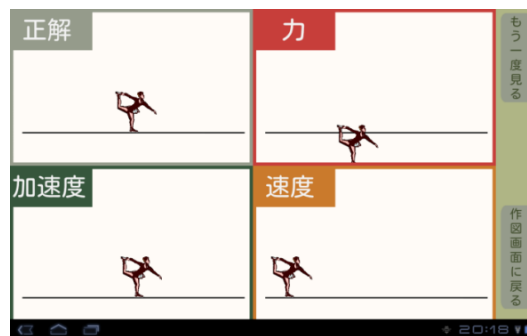


図3：本システムのシミュレーション画面

## 4. 本研究のシステムの実験的利用

本システムの効果を検証するために、物理の学習経験のある工業高等専門学校3年生32名を対象に先行研究と本研究で開発したシステムの比較実験を行ったので、これについて説明する。

### 4.1 実験的利用の目的

本実験の目的は、力・加速度・速度の関連付けを促す本システムを利用することで、先行研究のシス

テムで修正されなかった誤りが修正されるかどうかを検証することである。この目的を検証するための本実験の仮説を、以下のように設定した。

1. 力単体で物体の運動について考えたとしても修正されなかった誤りが、力・加速度・速度を関連付けながら物体の運動について考えることで、その誤りは修正される
2. 力・加速度・速度を関連付けて考えることによって修正された誤りは長期的に正しい考えとして保持される
3. 本研究で提案している物体にはたらく力・加速度・速度を関連付けながら考えるという演習が学習者に受け入れられる

## 4.2 実験手順

前節で設定した仮説を実証するために、以下のよう手順で、計 1 時間 43 分かけて実験を行った。

- |                      |        |
|----------------------|--------|
| (1) 力学の理解度の事前調査      | (20 分) |
| (2) 事前テスト            | (7 分)  |
| (3) 先行研究のシステムの利用     | (17 分) |
| (4) フロー体験・重要性認知度の調査① | (3 分)  |
| (5) 事後テスト①           | (10 分) |
| (6) 本研究のシステムの利用      | (17 分) |
| (7) フロー体験・重要性認知度の調査② | (3 分)  |
| (8) 事後テスト②           | (10 分) |
| (9) 本研究のシステムアンケート    | (6 分)  |
| (10) 遅延テスト           | (10 分) |

(1)の力学の理解度の調査は、システムの利用を行う前に、被験者の初等力学問題に対する理解を把握することを目的に実施した。初等力学問題の理解度の調査には、Hestenes らによって開発された Force Concept Inventory[9]を用いた。

(2), (5), (8), (10)は、先行研究と本研究のシステムの効果を測定するために実施した。各テストは、システムで行う演習と同様に、与えられた図に対して力の矢印の作図を行うものとなっている。事前テストでは、先行研究と本研究の EBS システムに実装されている課題と同じ課題を学習課題として出題している。先行研究と本研究のシステム利用後に行った事後テスト①②では、事前テストの課題 6 間に、さらに転移課題として追加の課題 4 問を加えた計 10 問を出題した。追加した 4 問を以下に示す(図 4)。

(G) 摩擦のない斜面上と水平面上を運動する台車

(H) 摩擦のない水の上で押されて加速するそり

(I) 摩擦のある床の上を減速しながら滑る箱

(J) 等速度で上昇するエレベータ

そして遅延テストでは、事後テスト①②に用いたものと同じ課題を用い、システム利用後の約 1.5 か月後(45 日後)に実施した。

(3), (6)は、第 2 章で説明した力を扱っている先行研究の EBS システムと、第 3 章で説明した力・加速度・速度を扱っている本研究の EBS システムの効果を比較する目的で順番に利用させた。

(4), (7)は、先行研究と本研究で提案している演習が被験者にとって集中して取り組めるものであるか、システムで扱っている演習が学習者にとって重要な内容であるか、を確認するために実施した。調査には、Rheinberg らによって作成された Flow Short Scale[10]を日本語に訳したものをを用いた。

(9)は、本研究で提案している力と加速度と速度を関連付けながら物体の運動について考えるという演習方法が、被験者にとって意義のあるものであるかを確認するために行った。この時、授業時間の都合により、本システム利用日の翌日に、システムを利用した被験者 30 名に対し実施した。

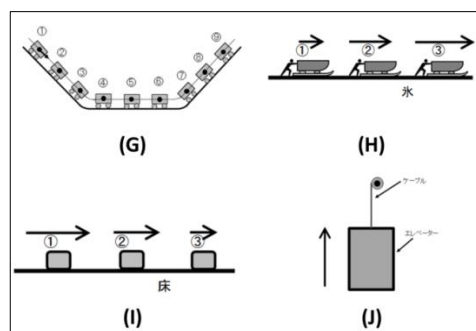


図 4：本実験で利用した転移課題

## 4.3 結果と分析

本節では、工業高等専門学校の 3 年生 32 名を対象としたシステムの実験的利用の結果を述べる。また、以下ではテストの正解数の分析を行っているが、統計処理には ANOVA4 on the Web[11]を用いた。

力学の理解度の事前調査の結果について述べる。この調査に用いた FCI のクラス全体の平均点は 11.84 点(S.D.=4.329)であった。この平均点を基準に被験者 32 名に対し、群分けを行い、以降の分析に利用した。この結果、上位群は 15 名(以下、FCI 上位群)、下位群は 17 名(以下、FCI 下位群)となった。

事前・事後①・事後②・遅延テストの結果について述べる。学習課題におけるクラス全体(N=32)の各テストの平均点の推移を、図 5 および表 1 に示す。この結果に分散分析を行ったところ、事前・事後①間( $p=0.000<0.05$ )、事後①・事後②間( $p=0.0017<0.05$ )、事後②・遅延間( $p=0.0001<0.05$ )にそれぞれ有意差が見られた。また、事後①と遅延の間には、 $p=0.438>0.05$  で有意差は認められなかった。転移課題におけるクラス全体(N=32)の各テストの平均点は、事後①は 1.13(S.D.=1.32)、事後②は 1.44(S.D.=1.20)、



遅延は 1.28(S.D.=1.15)であった。転移課題においては、事後①・事後②間、事後②・遅延間に有意差は認められなかった。

また、先述した FCI の平均点を基準に被験者を成績上位群と下位群に分け、分析を行った。FCI 上位下位群ごとの各テストの結果を、図 6 および表 2 に示す。また、分散分析を行った結果、FCI 上位群において、事前-事後①間( $p=0.000<0.005$ )、事後②-遅延間( $p=0.026<0.005$ )に有意差が認められた。FCI 下位群においては、事後①-事後②間( $p=0.002<0.05$ )で有意差が認められた。また、事前テスト①の上位下位群間( $p=0.075<0.10$ )に有意傾向が認められた。この結果から、本研究の EBS システムを利用することで、事後①での FCI 下位群の成績を有意に向上させることができたことが分かった。さらに、事後②において、FCI 上位下位群の間には有意差が認められなかったことから、FCI 下位群が上位群と同レベルの理解をしているといえる。

転移課題に関しては、FCI 上位群の事後①の平均点が 1.27(S.D.=1.18)、事後②の平均点が 1.73(S.D.=0.93)、遅延の平均点が 1.27(S.D.=1.06)であった。下位群の事後①の平均点が 1.00(S.D.=1.41)、事後②の平均点が 1.18(S.D.=1.34)、遅延の平均点が 1.29(S.D.=1.23)であった。このとき、どの群間においても有意差は認められなかった。

フロー体験・重要性認知度の調査の結果について述べる。本調査の質問項目として、フロー体験に関するもの 10 項目、重要性認知に関するもの 3 項目の計 13 項目を出題した。このフロー体験と重要性認知に関する項目では、7 段階のリッカート尺度が採用されており、マークされた数値が大きいほどフロー体験していた、取り組んだ課題に重要性を感じたことになる。先行研究のシステム利用後に行ったフロー体験と重要性認知度の調査での被験者全体の平均値は、フロー体験が 4.84(S.D.=1.45)、重要性認知度が 3.81(S.D.=1.43)であった。本研究のシステム利用後に行ったフロー体験と重要性認知度の調査での被験者全体の平均値は、フロー体験が 4.80(S.D.=1.40)、重要性認知度が 3.54(S.D.=1.33)であった。これらの値は、同様の質問紙を用いた実験[12]において明らかとなっている統計学の授業やフランス語の授業の値よりも高い数値を示している。この結果から、本研究で提案している演習は通常の授業と同様に集中して取り組むことができ、被験者にとって重要な内容であるといえる。

本研究のシステムアンケートの結果について述べる。アンケート項目は全てで 10 項目あり、以下のような内容となっている。(1)システムで行った作図は簡単であったか、(2)システムで作図している時の思

考は、普通の問題を解く時と同じであったか、(3)正しい作図を行った時に提示されるシミュレーションは、自分が納得できるものであったか、(4)誤った作図に基づいたシミュレーションを見たことによって、自分の作図が誤りであることに納得できたか、(5)誤った作図に基づいたシミュレーションを見たことによって、その作図を修正しようと思ったか、(6)誤った作図に基づいたシミュレーションを見ることは、誤りの修正に役立つと思うか、(7)誤った作図に基づいたシミュレーションを見た後の思考によって、出題された問題についての理解が深まったと思うか、(8)今回のシステムを利用するよりも前から、物体がどのような運動になるのかを予想する時に、力・加速度・速度について、普段から関連付けて考えていたか、(9)システムを利用することで、物体がどのような運動になるのかを予想する時に、力・加速度・速度について関連付けて考える必要があるということに気付いたか、(10)システムを利用する以前と比べて、物体がどのような運動になるのかを予想する時に、力・加速度・速度について関連付けて考えることが必要だと思うようになったか。このアンケートの結果を図 7 に示す。結果として、過半数の被験者から本研究で提案している演習とシステムの操作性について、肯定的な意見が得られた。

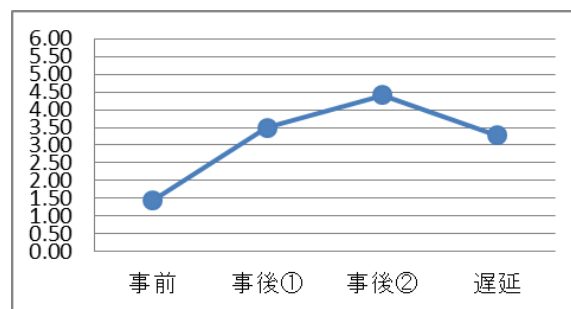


図 5：クラス全体の学習課題の平均点の推移(N=32)

表 1：クラス全体の学習課題の平均と標準偏差

N=32	事前	事後①	事後②	遅延
平均点	1.44	3.50	4.41	3.28
標準偏差	1.25	1.82	1.60	1.91

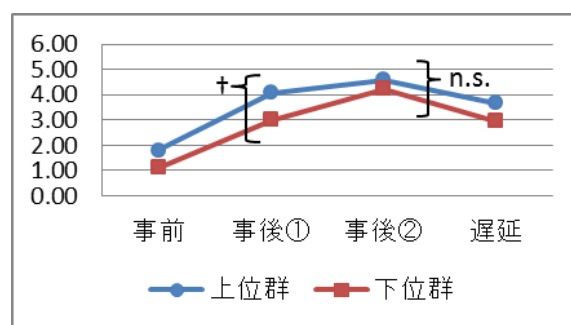


図 6：FCI 上位下位群の学習課題の平均点

表 2：FCI 上位下位群の学習課題の平均と標準偏差

		事前	事後①	事後②	遅延
上位群 (N=15)	平均	1.80	4.07	4.60	3.67
	標準偏差	1.47	1.81	1.67	1.96
下位群 (N=17)	平均	1.12	3.00	4.24	2.94
	標準偏差	0.90	1.68	1.52	1.80

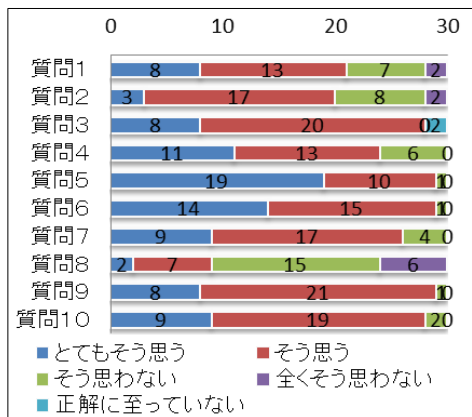


図 7：本研究のシステムアンケートの結果

#### 4.4 考察

今回の実験では、先行研究のシステムの利用を行った後に本システムを利用すると、さらに成績を向上させることができることが分かった。また、対象者のニュートン力学の理解度を定量的に測定することができる FCI を用いて成績上位と下位に群を分け、事前・事後①・事後②・遅延テストの分析を行ったところ、ニュートン力学の理解度の乏しい成績下位群に対しても、本研究のシステムの効果があることが確認された。また、本研究で提案している演習を行うことで、長期的に学習者の正しい考えとして保持させることができることが分かった。そして、フロー体験・重要性認知度のアンケートやシステムアンケートの結果から、本研究で提案している演習が学習者に受け入れられるものであることが分かった。

### 5. まとめと今後の展望

本研究では、運動する物体にはたらく力の理解支援のための手法の提案をしている。その具体的な方法として、誤りからのシミュレーションである Error-Based Simulation の利用を行っている。本稿では、運動する物体にはたらく力と加速度と速度の関連付けを促す EBS システムの設計・開発、およびその実験的利用の結果についての報告を行った。

今後の展望としては、今回の実験において、大きな効果が得られなかった転移課題の成績を向上させる方法を検討していく。また、先行研究で EBS システムと教授者による指導を組み合わせた教授活動が学習者に効果を与える可能性が示唆されていることから、学習者の学習過程を把握することによって可

能となる理解の支援方法の検討も行っていく。

### 謝辞

この度、実験の機会を提供して下さいました倉山めぐみ先生に心より感謝致します。

### 参考文献

- [1] 吉永千晴, 田上光輝, 竹内章, 大槻説平: 物理の学習環境における因果関係モデルと運動方程式の自動生成およびそのモデルを用いた学習支援, 電子情報通信学会技術報告. ET, 教育工学, 94(425), pp.93-100(1994)
- [2] 山崎翔平, 定本嘉郎, 牧井創: MIF 素朴概念をなくす教材の開発と中学校での授業実践, 物理教育, 57(3), pp.215-219(2009)
- [3] 加藤伸明, 定本嘉郎: 力の誤概念の解消を促す教材の開発と指導方法の改善, 日本物理教育学会, 物理教育, 59(3), pp.181-186(2011)
- [4] T Hirashima, T Horiguchi, A Kashiwara, J Toyoda : Error-Based Simulation for Error-Visualization and Its Management , International Journal of Artificial Intelligence in Education, 9 (1-2), pp.17-31(1998)
- [5] 堀口知也, 平嶋宗: 誤りの修正を支援するシミュレーション環境-誤りの原因の示唆性を考慮した Error-Based Simulation の制御-, 人工知能学会論文誌, Vol.17, pp.462-472(2002)
- [6] 堀口知也, 平嶋宗: 誤りの気づ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, 18(3), pp.364-376(2001)
- [7] T Horiguchi, I Imai, T Toumoto, T Hirashima : Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation, Educational Technology & Society, 17(3), pp.1-13(2014)
- [8] 篠原智哉, 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 山田敦士, 山元翔, 林雄介, 平嶋宗: “運動する物体にはたらく力を対象とした Error-based Simulation の中学校理科における利用”, 電子情報通信学会, 2016 年掲載予定
- [9] D. Hestenes, M. Wells, G. Swackhamer : Force Concept Inventory , The Physics Teacher , Vol.30 , pp.141-158(1992)
- [10] Rheinberg Falko, Regina Vollmeyer, Stefan Engeser : Die erfassung des flow-erlebens, Universität Potsdam, 2003
- [11] Anova4 on the Web, <http://www.hju.ac.jp/~kiriki/anova4/>, 2016.01.22
- [12] Stefan Engeser, Falko Rheinberg : Flow, performance and moderators of challenge-skill balance, Motivation and Emotion, 32(3), pp158-172(2008)