

# Error-Based Simulation のデータ分析に基づく

## 素朴概念修正効果の検証とモニタリング機能の拡張

Analysis of Correction Effect of Error-Based Simulation Exercise against MIF-Misconception and Development of Monitoring Function in the Exercise

安田 健汰<sup>1</sup> 林 雄介<sup>1</sup> 堀口 知也<sup>2</sup> 平嶋 宗<sup>1</sup>

Kenta Yasuda<sup>1</sup>, Yusuke Hayashi<sup>1</sup>, Tomoya Horiguchi<sup>2</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> 神戸大学大学院海事科学研究科

<sup>2</sup> Graduate School of Maritime Sciences | Kobe University

**Abstract:** MIF (Motion Implies Force) misconception is one of the most famous and difficult to correct misconceptions that many learners have even after learnt Newtonian physics in high school and/or college. We have investigated effect of EBS(Error-Based Simulation) exercise for correction of MIF-misconception. We had conducted practical use of EBS exercise in a college for two years and analyzed the practices mainly with pre, post and delayed tests. The results suggest that MIF-misconception is not only effectively corrected in post-test but also keep the correction in delayed-test.

### 1. はじめに

力学は物体の挙動を説明したり予測したりするための体系であり、この導入学習においては、学習者にとって身近な事物が用いられることが多い。導入学習における身近な事物の利用は、力学学習の導入を容易にするとともに、現実世界において事物の置かれている状況と、力学において取り扱われている理想的な状況のギャップが誤った概念形成の原因になっていることも指摘されている[1][2][3]。この誤った概念は素朴概念と呼ばれ、現実世界における経験に基づいて形成されているため、単純に正しい概念を教えるだけでは修正するのは難しく、また、正しい概念の獲得を妨げるものとなっている。

この素朴概念の修正は、力学学習の支援における重要な課題となっているが、その修正支援の一つの手法として、Error-Based Simulation (以下 EBS) [4][5][6][7]が先行研究で開発されている。EBS は、学習者の立てた運動方程式に基づいて生成される運動のシミュレーションである。そのため、学習者に誤りがあった場合、EBS は学習者の誤りを反映した現実とは異なる物体の振舞いを提示する。それによ

り、物体の正しい挙動との差違として、学習者に対し、その誤りを可視化することができる。

またこの EBS システムは、力のシミュレーションだけでは誤りを修正することができない学習者に対して、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新たに提示し、それぞれの関係性について理解を促すことを目的とした多視点機能を追加したシステムが先行研究にて搭載されている。

EBS システムはいくつかの中学校、実際の教育現場で実践的利用が行われており、テストスコアの上昇から、演習システムとしての効果が報告されている[7]。一方で、一方で、テストスコアが上昇した一方、(1)素朴概念の修正は行われたのか、(2)EBS を利用することによる学習者ごとの効果の違いはあるのか、の2点についてはまだ確認されていない。

本研究の目的は、EBS システムにおけるテスト・プロセス両側面からのデータ分析により、有効性の検証と、それに基づく新機能の設計・開発を行うことである。それらを確かめるために、工業高等専門学校にて同一学校の同一学年に対して異なる年度での実践利用を行った。プロセスデータにおける分析

で示唆率と点数変化に正の相関が見られたことは、EBS が可視化する誤りに対する学習者の振る舞いによって、その効果が異なってくることを示唆している。つまり、学習効果の点から見て効果的とは言えない学習者の振る舞いが存在することを意味している。このことは、EBS 利用中の学習者の振る舞いの診断および振る舞いに対する支援、の必要性を示唆しているといえる。そこで本研究では、学習者の演習中の振る舞いをモニタリングし、EBS が示唆性を持っているかどうか、学習者の振る舞いが EBS が示す示唆性にそっているかどうか、を自動判定し、それを可視化するモニタリングツールの開発を行った。

## 2. 誤りからの学習

### 2.1 素朴概念とは

素朴概念とは、「学習者が学習する以前から持っている、科学的に正しいとされる考え方に反した考え方」のことである。[1][2][3]。この素朴概念はキャッチボールをしたり、自転車を漕いだり、おもちゃを動かしたりといったような、学習者の日常生活における観察や経験の蓄積によって形成される。そのため、学習者の持つ考えが自然法則に反していたとしても、その考えを保持しやすい。しかしながら、この素朴概念は大変強固な考え方であり、通常の教授を行ったとしても修正するのは困難であると言われている。そのため、素朴概念が原因で引き起こされる誤りを減らし、物理力学の学習を円滑に進めるためには、学習者の素朴概念を正しい科学的概念へと転換させる必要があると言える。

### 2.2 Error-Based Simulation (EBS)

Error-Based Simulation(以下、EBS)[4][5][6][7]とは、先行研究において素朴概念修正の手法として提案されている手法で、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る。この EBS は、力学系を構成する物体の不自然な振舞いを提示し、物体の正しい挙動との差異として学習者の誤りを可視化することで、学習者に自分の誤りに気付かせることができる。

### 2.3 顕在性・もっともらしさ・示唆性

EBS によって提示される誤った挙動は、学習者の持つ誤った考え方から生成されるため、正しい挙動との間に差異が生じ、この差異によって誤りが可視化される。しかしながら、この差異が必ずしも学習者に誤りの気付きを与えるわけではなく、この誤

りの可視化を達成するためには、その差異が学習者にとって許容できないものであることが必要となる。

ただ、学習者の誤りへの気付き、という観点からすると、単に誤った挙動と正しい挙動との間に大きな差異を持っていれば良いというわけではなく、その差異を顕在化した結果が「もっともらしさ」を伴っていなければならない。この「もっともらしさ」は顕在化のためのパラメータ変動に影響を受けるとされている。

「顕在性」と「もっともらしさ」を備えた EBS を提示することができれば、学習者に自分の誤りに気付かせ、誤りからの学習へと促すことができる。この誤りからの学習を円滑に進めるために、EBS によって顕在化された差異が学習者の学習すべきことを適切に示唆しているという「示唆性」が重要であると言われている。EBS の有効性は、これまでに挙げた「顕在性」「もっともらしさ」「示唆性」の3つの要因に影響を受ける。

### 2.4 先行研究で開発された EBS システム

先行研究[7]では、この EBS を Android タブレット上に実装している(図 1)。

システムにおける活動において、学習者が作図を行うにあたり使用する考え方が前節で説明した「理論クラス」に相当し、その具体物である作図結果が「理論インスタンス」と言える。そして、その作図結果に基づいてシステムに提示されるシミュレーションが「挙動」と言える。そして、このシミュレーションと学習者が既知である正しい物体の運動を比較することによって、学習者は自分の考えの矛盾に気付き、認知的葛藤が生起される。その結果、学習者に対し誤りからの学習が促進される。

### 2.5 多視点機能への拡張

EBS システムには、力のシミュレーションを提示するだけでは十分に効果が得られない学習者も存在した。そのような学習者群は、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られた。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目的とした、多視点 EBS が開発されている(図 2-4)。

力のみで作図・シミュレーション演習を行うシステムを単視点 EBS、加速度、速度の作図、シミュレーションを行う多視点機能を追加したシステムを多視点 EBS と呼ぶ。

### 2.6 システムの実験的利用

これまでに説明した 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[3]を実際の教育現場で行った。

この実験の結果として、システム利用前に行った力の把握問題を用いたテストの成績が上位の生徒に対しては、EBS を用いた演習が効果的であることが確認された。一方で、(i)テストスコアの上昇は確認できた一方で、素朴概念の修正が行われたのか、(ii)EBS システムを利用することによる学習者ごとの効果の違いはあるのかという、2点についてはまだ確認されていない。本研究では、EBS のデータ分析を行い、有効性の検証をすること、そこから浮上した課題を基に、機能の拡張を行うことを目的とする。



図 1 : EBS システムの作図画面

### 3. EBS の利用とデータ分析

#### 3.1 実践的利用の目的

本実験の目的は、2016 年度、2017 年度を合わせると 3 点存在する。

2016 年度

1. 学習者のテストデータから、EBS システムの利用による学習効果の確認と、素朴概念の修正を確認する
2. 学習者の EBS システム利用中のプロセスデータから、システム利用における学習者毎の効果の違いを示唆性の観点によるプロセス分析によって明らかにする

2017 年度

3. 学習者のテストデータを 2016 年度の実践的利用時のテストデータと比較し、再現性のあるデータが取得できるのかを確認する

#### 3.2 実験手順

前節で設定した目的を実証するために、2016 年度、

2017 年度共に以下のような手順で実験を行った。尚、2016 年度は工業高等専門学校 3 年生 37 名、2017 年度は高等専門学校生 35 名が被験者となっている。

- (1) 力学の理解度の事前調査 (20 分)
- (2) 事前テスト (7 分)
- (3) 単視点 EBS システムの利用 (17 分)
- (4) 中間テスト (10 分)
- (5) 多視点 EBS システムの利用 (17 分)
- (6) 事後テスト (10 分)
- (7) 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 を、石本らによって和訳されたものを用いた。

(2), (4), (6), (7)は、本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、EBS システムに実装されている課題と同じ課題(計 6 問)を出題している。システム利用後に行った中間テスト、事後テストでは、事前テストの課題 6 問に、さらに転移課題として課題 4 問を加えた計 10 問を出題した。遅延テストでは、中間テスト、事後テストに用いたものと同じ課題を用い、システム利用後の約 1 か月後(2016 年度:33 日後、2017 年度:30 日後)に実施した。

#### 3.3 結果と分析

##### テストデータ分析 (学習課題 / 転移課題)

本節では、クラス全体の事前テスト・事後テスト・遅延テストの結果について述べる。そして、前節で説明した FCI の結果を用いて、被験者を成績上位群と下位群に群分けを行い、それぞれの群の各テストの平均点がどのように推移しているのかを分析する。**クラス全体の学習課題の正答数について**

2016 年度におけるクラス全体の学習課題の平均点の推移は、事前テストの平均点は 1.24(SD=1.48)、事後テストの平均点は 3.81(SD=2.10)、遅延テストの平均点は 3.03(SD=1.95)であった。2017 年度におけるクラス全体の学習課題の平均点の推移は、事前テストの平均点は 1.60(SD=1.80)、事後テストの平均点は 4.69(SD=1.58)、遅延テストの平均点は 3.51(SD=1.69)であった。これらの内容について、表 4-2 にまとめ

る。このとき、ウィルコクソンの符号順位検定と Bonferroni の調整を用いて検定を行ったところ、両年度共に、事前テスト・遅延テスト間(2016 年度: $p=3.042e-5<0.05$ , 2017 年度: $p=8.763e-6<0.05$ )に有意差が見られた。また、効果量を測定したところ、2016 年度は 1.03 で効果量大、2017 年度は 1.09 で効果量大となった。このことから、EBS システムを利用することで、先行研究までで示されてきたように、演習システムとしての効果を繰り返し確認することができた。

次に、学習者の持つ素朴概念がどのように変化したのかを確認するために、学習者の誤答について集計・分析を行った。学習者の誤答を集計するにあたって、学習課題・転移課題の誤答の分類を行った。

#### 学習課題・転移課題の誤答の分類について

学習者の誤答を分類する際に、大きく二つに分類した。(1)素朴概念による間違い(2)その他の間違いの二種類である。その中でもそれぞれの分類について、さらに3種類に分けて集計した。

(1)素朴概念による間違いについては、素朴概念の代表とされる(i)運動の向きに力が働く、をベースとして、問題における特殊な物理状況で見られる素朴概念の2種類(ii)摩擦がある場合、運動の向きの力が大きい、(iii)速度の変化を力の変化と捉える、の二種類をさらに分類した。

(2)その他の間違いについては、素朴概念による間違いと分類されない中でも、見られることの多い間違いと、それ以外の間違いというように3種類に分類した。(iv)重力、垂直抗力の書き忘れ、(v)矢印の始点の間違い、(vi)その他の間違い、である。この6種類の分類について図2に示す。

#### クラス全体の学習課題と転移課題の誤答について

2016 年度において、学習課題における素朴概念誤答数は、事前テストの平均点は 3.50(SD=1.76)、事後テストの平均点は 1.14(SD=1.56)、遅延テストの平均点は 1.53(SD=1.80)であった。学習課題におけるその他の誤答数は、事前テストの平均点は 1.28(SD=1.07)、事後テストの平均点は 0.72(SD=0.96)、遅延テストの平均点は 1.00(SD=1.00)であった。転移課題における素朴概念誤答数は、事後テストの平均点は 0.78(SD=0.86)、遅延テストの平均点は 0.53(SD=0.64)であった。転移課題におけるその他の誤答数は、事後テストの平均点は 1.36(SD=1.16)、遅延テストの平均点は 1.58(SD=1.46)であった。このとき、ウィルコクソンの符号順位検定と Bonferroni の調整を用いて検定を行ったところ、学習課題における素朴概念誤答の事前テスト・遅延テスト間( $p=0.0003048<0.05$ )に有意差が認められ、効果量は 1.11 で大となった。その他誤答の事前テスト・遅延テスト間

( $p=0.81>0.05$ )に有意差が認められなかった。また、ウィルコクソンの符号順位検定をおこなったところ、転移課題における素朴概念誤答の事後テスト・遅延テスト間( $p=0.14>0.05$ )に有意差が認められず、その他誤答の事後テスト・遅延テスト間( $p=0.45>0.05$ )に有意差が認められなかった。

2017 年度において、学習課題における素朴概念誤答数は、事前テストの平均点は 3.54(SD=1.76)、事後テストの平均点は 0.86(SD=1.29)、遅延テストの平均点は 1.77(SD=1.65)であった。学習課題におけるその他の誤答数は、事前テストの平均点は 0.86(SD=0.96)、事後テストの平均点は 0.46(SD=0.77)、遅延テストの平均点は 0.71(SD=0.91)であった。転移課題における素朴概念誤答数は、事後テストの平均点は 0.61(SD=0.64)、遅延テストの平均点は 0.80(SD=0.95)であった。転移課題におけるその他の誤答数は、事後テストの平均点は 1.50(SD=1.15)、遅延テストの平均点は 1.40(SD=1.18)であった。ウィルコクソンの符号順位検定と Bonferroni の調整を用いて検定を行ったところ、学習課題における素朴概念誤答の事前テスト・遅延テスト間( $p=8.748e-5<0.05$ )に有意差が認められ、効果量は 1.00 で大となった。その他誤答の事前テスト・遅延テスト間( $p=1.44>0.05$ )に有意差が認められなかった。また、ウィルコクソンの符号順位検定をおこなったところ、転移課題における素朴概念誤答の事後テスト・遅延テスト間( $p=0.18>0.05$ )に有意差が認められず、その他誤答の事後テスト・遅延テスト間( $p=0.56>0.05$ )に有意差が認められなかった。

これらの集計・分析結果により、3つのことが明らかになった。一つ目は、学習課題と転移課題における、その他誤答の有意差が認められなかったことにより、課題の点数向上・維持の要因として、その他の間違いが修正されたことによるものではなく、素朴概念による間違いが修正されたことによるものであることである。二つ目は、学習課題における素朴概念誤答に有意差が認められたこと、転移課題における素朴概念誤答に有意差が認められなかったことから、解消された素朴概念が維持されていること、三つ目は、学習課題における事後テストの低い素朴概念の検出量、転移課題における素朴概念の低い検出量より、学習課題における事後テストにおいて、素朴概念の誤答の検出数が低くなっているのは、転移課題における素朴概念の誤答数も少なくなっていることから、「正しい答えを暗記して答えることができただけ」ではなく、「概念レベルで考え方の修正がなされたから」であることである。

さらに、これまでに記したように、2016 年度、2017 年度ともに同じ結果が得られたことから、効果の再

現性が確認できた。これらのことから、EBS システムは素朴概念の修正に有効なシステムであると考えられる。

### プロセスデータ分析

EBS システム利用による学習者ごとの効果の違いを確認するために、2016 年度実践における EBS システム利用中の学習者のプロセスデータの分析を行った。分析を行うにあたり、2 章で説明した EBS の有効性に影響を与える要素の一つである、示唆性に着目した。システム利用中に発生した作図の変化において、示唆性に即した作図の変化が見られる割合を「示唆率」とし、学習者ごとの EBS システム利用全体の平均示唆率と EBS 利用前後の点数変化の相関を調べた。平均示唆率は、以下の計算式で表すことができる。

$$\text{学習者の平均示唆率} = \frac{\text{示唆性に即した作図の変化回数}}{\text{作図の変更総数}}$$

クラス全体の平均示唆率と EBS システム利用前後の点数変化の相関グラフを図 3 に示す。このとき、 $r=0.66$ ,  $p=0.0000144 < 0.05$  となり、有意に平均示唆率と点数変化に正の相関が確認された。このことから、EBS システム利用における効果の違いは、EBS の提示する示唆性に即した作図の変更ができていないかと言い換えることができると。これら考察すると、EBS システム利用の効果をより高めるには、演習中の学習者を支援すること、示唆性に即した作図ができていない学習者を支援することが必要であると考えられる。

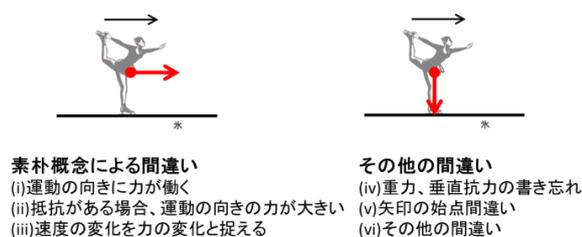


図 2：学習者の誤答の分類

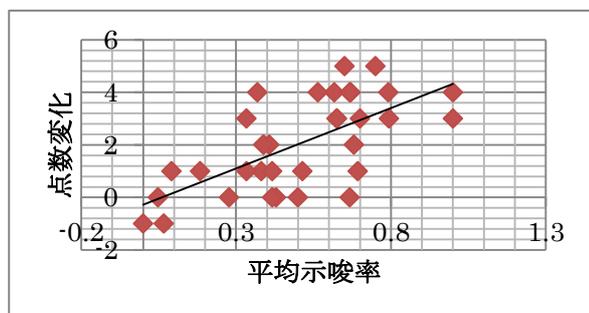


図 3：点数変化と平均示唆率の相関

## 4. EBS モニタリングツールの設計・開発

### 4.1 EBS の作図活動の可視化機能（一覧）

図 4 に、EBS の作図活動の可視化機能の中でも、一覧表示した機能を示す。この機能では、それぞれの学習者の作図にかかった時間を長さで、作図の変化が示唆性に沿ったものであったかを色で分けて表示している。

色の分け方機械的に判定するフローチャートを図 5 に示す。内訳としては、正解に至った作図の変更であった場合には青色、正解に至らなかった作図の中でも、示唆性の無かった作図の変更、例えば、摩擦の無い氷上を等速直線運動する女性にかかる力を全て作図する問題で、合力が 0 となる作図のシミュレーションを見た後、合力が 0 となる作図をした場合には、黄色を、示唆性に即した作図の変更であった場合には灰色、示唆性に即していない作図の変更であった場合には赤色となっている。

この機能の利点としては、悪い試行錯誤をしている学習者を視覚的に発見しやすい点にある。示唆性に即した作図ができていないかを確認していることから、EBS システム利用による試行錯誤中の学習者の中でも、「試行錯誤をしている」から助けるのではなく、「質の悪い試行錯誤をしている」つまり、EBS を有効に利用できていないから助けるという活動が可能である。

### 4.2 EBS の作図活動の可視化機能（詳細）

図 6 に、学習者の作図活動を可視化した機能の中でも、詳細表示した機能を示す。この機能では、学習者の過去の作図結果を一度に確認することができる。示唆性に沿わない作図を繰り返す学習者を発見する機能を併用することで、学習者の試行錯誤の質が良かったのかを確認することができる。

この機能は、単視点機能だけでなく、多視点機能の EBS システムにも対応している。多視点 EBS では、力、加速度、速度の 3 要素の中から、1 要素のみをピックアップしてシミュレーションを返すことができる。この場合には、その他の要素の背景を暗くすることで、学習者が見たシミュレーションがどれなのかを特定することができる。



図 4 : EBS の作図活動の可視化 (一覧表示)

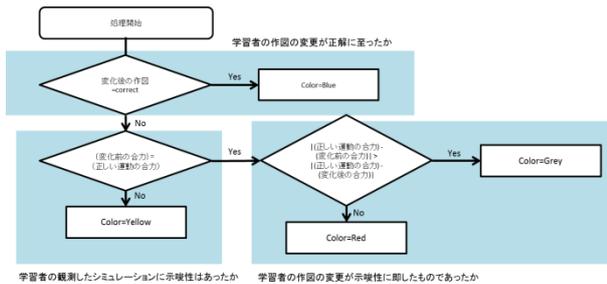


図 5 : 作図の変化における色分けのフロー

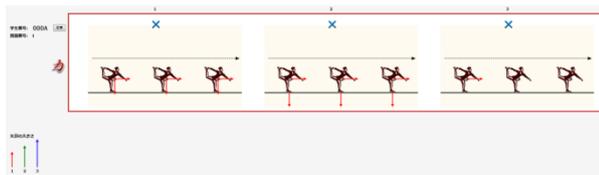


図 6 : EBS の作図活動の可視化 (詳細表示)

## 5. まとめ

本研究では、MIF 誤概念に関する EBS システムの効果の検証と、それに基づく機能の設計・開発を行った。EBS システムを用いて、工業高等専門学校 の学生 35 名程度を対象とした評価実験を二年度に渡って行った。評価実験では、本実験の目的は、2016 年度、2017 年度を合わせると 3 点存在する。

2016 年度(1)学習者のテストデータから、EBS システムの利用による学習効果の確認と、素朴概念の修正を確認する(2)学習者の EBS システム利用中のプロセスデータから、システム利用における学習者毎の効果の違いを示唆性の観点によるプロセス分析によって明らかにする。2017 年度(3)学習者のテストデータを 2016 年度の実践的利用時のテストデータと比較し、再現性のあるデータが取得できるのかを確認する、の 3 点について検証した。

その結果、(1)学習効果については、先行研究までで示されてきたように、確かに演習システムとしての効果が確認された。次に、先行研究では調べられていなかった素朴概念の修正を確認したところ、

「答えを覚えただけ」ではなく、素朴概念による間違いが「概念レベルで修正されて」おり、その修正が遅延テストでも維持されていることが確認された。また、(2) システム利用中に発生した作図の変化において、示唆性に即した作図の変化が見られる割合を「示唆率」とし、学習者ごとの EBS システム利用全体の平均示唆率と EBS 利用前後の点数変化の相関を調べたところ、正の相関が確認された。そして、(3) 2016 年度のテストデータの分析結果と同様の結果を得ることができ、再現性のあるデータを取得できることが確認された。

これらのデータ分析に基づき、EBS モニタリングツールの設計・開発を行った。EBS モニタリングツールでは、EBS の作図活動を可視化する機能を実装し、教授者によるフィードバックを可能にした。

本研究の今後の展望としては、本システムを用いた教育現場での実践的利用である。教授者によるフィードバックを追加した実践的利用により学習者の学習効果が向上されることが期待される。

## 謝辞

実験に協力頂いた倉山めぐみ助教授に感謝します。

## 参考文献

- [1] J.Clement : Student's Preconceptions in Introductory Mechanics, Am.J.Phys, 50(1), pp.66-70(1982)
- [2] 井田暁, 越桐國雄 : 物理教育における誤概念のデータベース化について, 大阪教育大学紀要 第 5 部門 教科教育, 59(1), pp.29-39(2010)
- [3] 新田英雄 : 素朴概念の分類, 物理教育学会, 60(1), pp.17-22(2012)
- [4] 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一 : 定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御, 人工知能学会誌, 12(2), pp.285-296(1997)
- [5] 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一 : 定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御, 人工知能学会誌, 12(2), pp.285-296(1997)
- [6] 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, 25(2), pp.113-116(2008)
- [7] 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 : 力と運動に関する誤概念の修正を目的とした Error-based Simulation の開発と中学校での実践的利用, 先進的学習科学と工学研究会, pp.61-66(2015)