

Error-based Simulation における学習者の誤り傾向に基づく 適応的な補助問題提示システムの開発と評価

Development and Evaluation of an Adaptive Auxiliary Problem Presentation System Based on Learners' Error Tendency in Error-based Simulation

相川 野々香¹ 東本 崇仁¹

Nonoka AIKAWA¹, Takahito TOMOTO¹

¹ 東京工芸大学工学部

¹ Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

Abstract: Error-based Simulation (EBS) is a system that generates a simulation based on the learner's error and engages to aware of the error by oneself. The authors have developed and evaluated a system for presenting auxiliary problems adaptively based on learners' error tendency in EBS. In this paper, we improve and evaluate the problem presentation function by examining and expanding the sequence of auxiliary problems based on Causality-Compliant Theory.

1. はじめに

力学の学習に、Error-based Simulation (EBS) は有効である[1]. EBS は学習者の解答を基に「もしも学習者の(誤った)知識が正しいと仮定すればどのような現象が生起するか」をシミュレートするシステムである. 誤った知識が正しいと仮定した不自然な振る舞いのシミュレーションを見せることで、学習者がその不自然さを認識し、正しい概念を獲得することを狙っている.

EBS は「学習者の誤概念を可視化する」という性質上、正解の提示は行わない. しかし学習者の中には、一度行詰ってしまうと新たな働きかけがない限り、同じ間違いから抜け出せない場合が存在する.

そこで筆者らは、学習者の行詰まりを解消する方法の一つである補助問題の提示に着目した[2]. 補助問題はもとの問題を単純化した補助的な問題のことである. 補助問題を提示することにより、問題解決に行詰まった学習者に新たな手がかりを与え、その解決を支援する効果が見込める.

筆者らはこれまで、従来の EBS を拡張し、学習者の解答の誤り傾向から理解の不足している概念を診断することで、適応的に補助問題を提示する学習支援システムを開発し、評価を行ってきた[3]. 本稿では、力と運動の因果推論理論[4]に基づいて補助問題の系列を精査・拡張し、学習支援システムに実装した. そして、それをを用いた評価実験を行い、結果について考察した.

2. Error-based Simulation

Error-based Simulation (EBS)は「誤りの可視化」を指向したシステムであり、誤った知識が正しいと仮定した不自然な振る舞いのシミュレーションを見ることで、学習者がその不自然さを認識し自身の誤りに気づくことを狙っている.

力学の作図問題の EBS では、まず物体を対象とした図を提示し、学習者は図中の物体に働く力を矢印などで作図するよう求められる. 学習者が誤った概念を持つとき、学習者は不適切な力を描いたり必要な力を描かなかったりするなどの誤った作図を行う. EBS はこの作図に基づいて、各物体の動きを計算する. そして誤った作図であれば不自然な、正しい作図であれば自然なシミュレーションを生成する(図1).

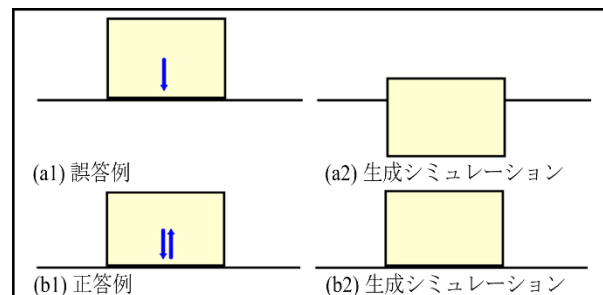


図1 EBS の正答・誤答例

3. 因果推論

因果推論とは、ある現象に対してその原因から結果を一定のルールに従って推定するプロセスのことである。

力学において誤概念を持つ学習者は多くおり、そういった学習者は力学現象の因果的理解が適切にできていないことが原因の一つとして挙げられる。例えば作用反作用に関して、多くの学習者は力 F で押された物体が $-F$ の反作用を返すことに納得できない。何故なら人が壁を押したとき、壁から押し返される体験をしたことがないからである。しかし因果推論に基づいてこれを表現すると、「力 F で押す」は「力 F である物体を押そうとしたら、その物体から大きさ F の反作用が返ってきたので力 F で押すことができた」ということができる。これは豆腐などの柔らかい物体を押すと、崩れてしまって押すことができないことから理解できる。

溝口らは方程式だけでは理解されにくい中学・高校の範囲で学ぶべき力と運動の諸現象について、人間が実感を伴って理解しやすい因果推論に沿って一貫性のある思考で、理解し説明できるように基礎となる力と運動のための因果推論理論を構築した[4]。

4. 提案システム

筆者らはこれまで、EBS での問題の行詰まり解決を支援する手法として、補助問題を従来の EBS に導入したシステムを開発した。問題を一定回数正答できなかった学習者には、もとの問題に包含される少し簡単な補助問題を提示する。その際にシステムは、学習者がそれまでに入力した解答の傾向を解析し、より学習者の行詰まりの原因に対して適当だと考えられる問題を選択し提示する。それを学習者が解き、正答が得られた場合には、段階的にもとの問題へと戻る。正答が得られなかった場合には、また入力された解答を解析し、さらにその問題と包含関係にある少し簡単な補助問題に移行する。これにより、学習者の行詰まりの部分がより効率的に明らかになり、学習者の今後の学習の指針になることが可能となる。

このような補助問題の提示を行うには、問題系列が重要である。複雑さの異なる複数の問題を段階的に学習させるには、問題の差分を明確にし、学習者の知識状態に合わせて適応的に学習順序を設定しなければならない。本研究では、溝口ら[4]の力と運動の因果推論理論を基に問題系列を再考し、学習支援システムに実装した。

4. 1. 単純化した補助問題

図 2 に、システムで最初に提示する問題を示す。

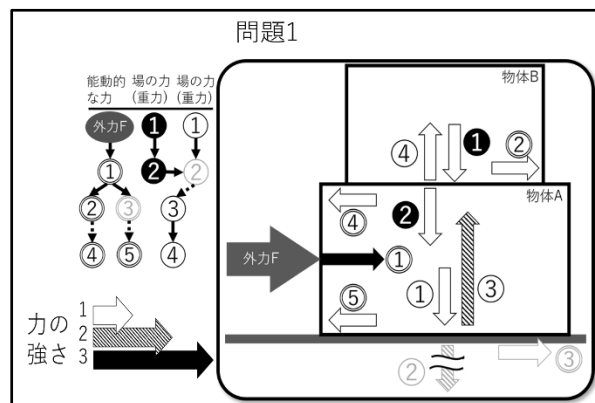


図 2 最初の問題

この問題は、「床の上に物体 A と物体 B が重ねて置かれ、物体 A が横から押されてどちらの物体も一定の加速度で加速しながら左から右へ滑っている」という問題である。

因果推論を用いてこの問題を解釈すると、まず①①のように物体 A、B には重力が働いている。物体 B の重力は②のように下にある物体 A を押している、それらの力は②のようにすべて床にかかっている。床からは③のように反作用として垂直抗力が物体 A を押し返している、④のように物体 A も物体 B を押し返している。したがって、物体 A も B も鉛直方向には静止している。また、物体 A は①のように外力 F で左から右に押そうとし、①の力は物体 A と接している物体 B と床に②③のように伝播する。その結果、それぞれの接面では摩擦力が④⑤のように反対側に働いている。この問題では初速なしの等加速度運動と規定しているため、摩擦力④⑤より大きな外力から受ける力①で押されており、一定の力を及ぼし続けることで加速することとなる。また、この合力の値は、②とも等しいため、物体 A、B は同じ加速度で移動することとなる。

これに基づいて、筆者らは図 3 のように単純化した補助問題を作成した。

問題 6 は、問題 1 の鉛直方向に働く力を学びやすいように単純化した補助問題である。外力 F を発生させないことでそれを原因とする力の伝播を削除している。これにより、学習者に鉛直方向の力のみを考えさせる単純化した問題とした。

問題 7 は、問題 1 あるいは問題 6 の②の力が学びやすいように単純化した補助問題である。問題 1 や問題 6 では、②は物体 B の重力①から伝播して発生している。そのため、②を考えるためには①と①からの伝播関係を考える必要がある。そこで①と②の

因果の関係を切り、**②**が発生するもととなる力**①**を外力 F にすることにより、学習者は**②**の力を意識しやすくなる。

問題 2 は、問題 1 の**④**と**⑤**の力を学びやすいように単純化した補助問題である。問題 1 では鉛直方向における物体 B からの重力から発生する伝播を考慮する必要があったが、この問題ではそれらを考慮しなくてよい。そのため、力**①**や力**④**について意識せず、力**④**や**⑤**に意識しやすくなる。

問題 3 は、問題 2 の**⑤**の力を学びやすいように単純化した補助問題である。問題 2 では天井と接することで発生する力**②**やその反作用により発生する力**④**を考慮する必要があったが、この問題ではそれらを考慮しなくてよい。そのため、力**④**について意識せず、力**⑤**について意識しやすくなる。

問題 4 は、問題 3 の外力から生じる力**①**を学びやすいように単純化した補助問題である。問題 3 では床と物体 A の間に摩擦が働いており、摩擦力**③**と**⑤**を考慮する必要があったが、この問題ではそれらを考慮しなくてよい。そのため、力**③**と**⑤**は意識せず、力**①**を意識しやすくなる。

問題 5 は、問題 1 の**②**の力を学びやすいように単純化した補助問題である。問題 1 では外力により生じる力**①**、それから伝播する力**③**と**⑤**、および力**②**と**④**を考慮する必要があった。特に力**②**は力**①**からの因果として理解する必要があった。しかし、この問題ではそれらを考慮する必要がなく、動く床（ベルトコンベヤ）に摩擦があり、一定の加速度で動くことから、力**②**だけを意識しやすくなる。

問題 8 は、すべての問題の重力と垂直抗力を学びやすいように単純化した補助問題である。問題 8 以外の問題では、重力と垂直抗力以外を考慮する必要があったが、この問題ではそれらを考慮しなくてよい。そのため、重力**①**と垂直抗力**③**を意識しやすくなる。

また、問題 8 を単純化した単物体の自由落下問題を補助問題として用意することも考えられるが、今回は補助問題とはしなかった。この単純化により、ここで扱うすべての問題に共通していた鉛直方向においては静止しているという状況が崩れ、鉛直方向の等加速度運動となり、一概に単純化したとはいえないためである。本稿では力の因果関係を主として言及し、その結果生じる加速度や速度については深く言及していない。本来は力と運動の関係は重要であるため、今後はその関係についても検討する必要がある。

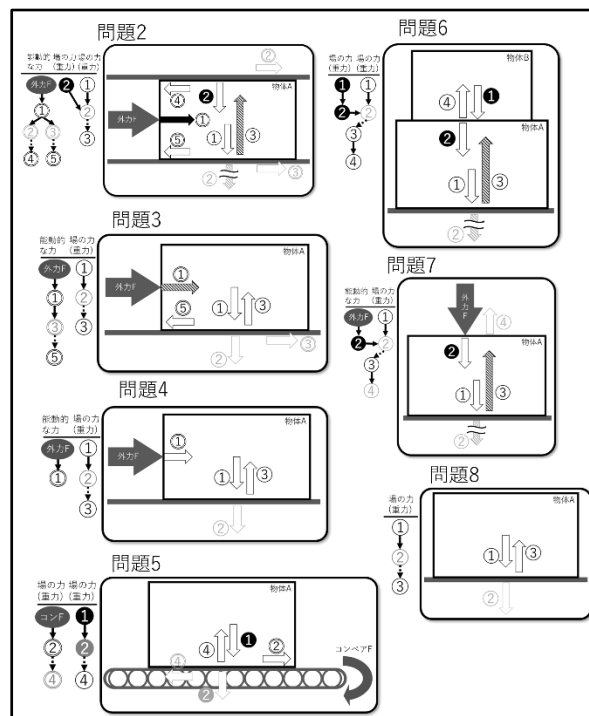


図 3 単純化問題

4. 2. 作成した問題系列と移行方法

図 4 は 4.1 で述べた単純化問題についてグラフ化したものである。図 4 では、学習者に最初に問題 1 を提示し、学習者の誤りに応じて、単純な問題に移行する。まず、正答と学習者の誤答を比較し、差分となる力を抽出する。差分として抽出された力は、学習者の理解できていない箇所であると考え、その差分に基づいて移行する。また、本研究では移行の方法の一つとして、学習者が理解できていない力を含む最も単純な問題にまず移行させ、その問題を解かせてから、エッジの関係に基づいて徐々に複雑化する。

たとえば、問題 1 において、上の物体 B から下の物体 A が押される力**②**を学習者が記入できていない場合、力**②**を含む最も単純な問題、つまり問題 7 に移行する。問題 1 では力**②**を導くためには、物体 B には重力**①**が発生しており、その力の伝播により**②**が発生することを理解する必要があったが、問題 7 では外力により直接的に力**②**が生じているため理解しやすい問題であるといえる。問題 7 が解けた後は、問題 6、問題 1 の順に複雑化する。また、問題 1 において、床と物体 A の間に生じる摩擦力**⑤**が記述されていなかった場合は、力**⑤**を含む最も単純な問題である問題 3 に移行する。

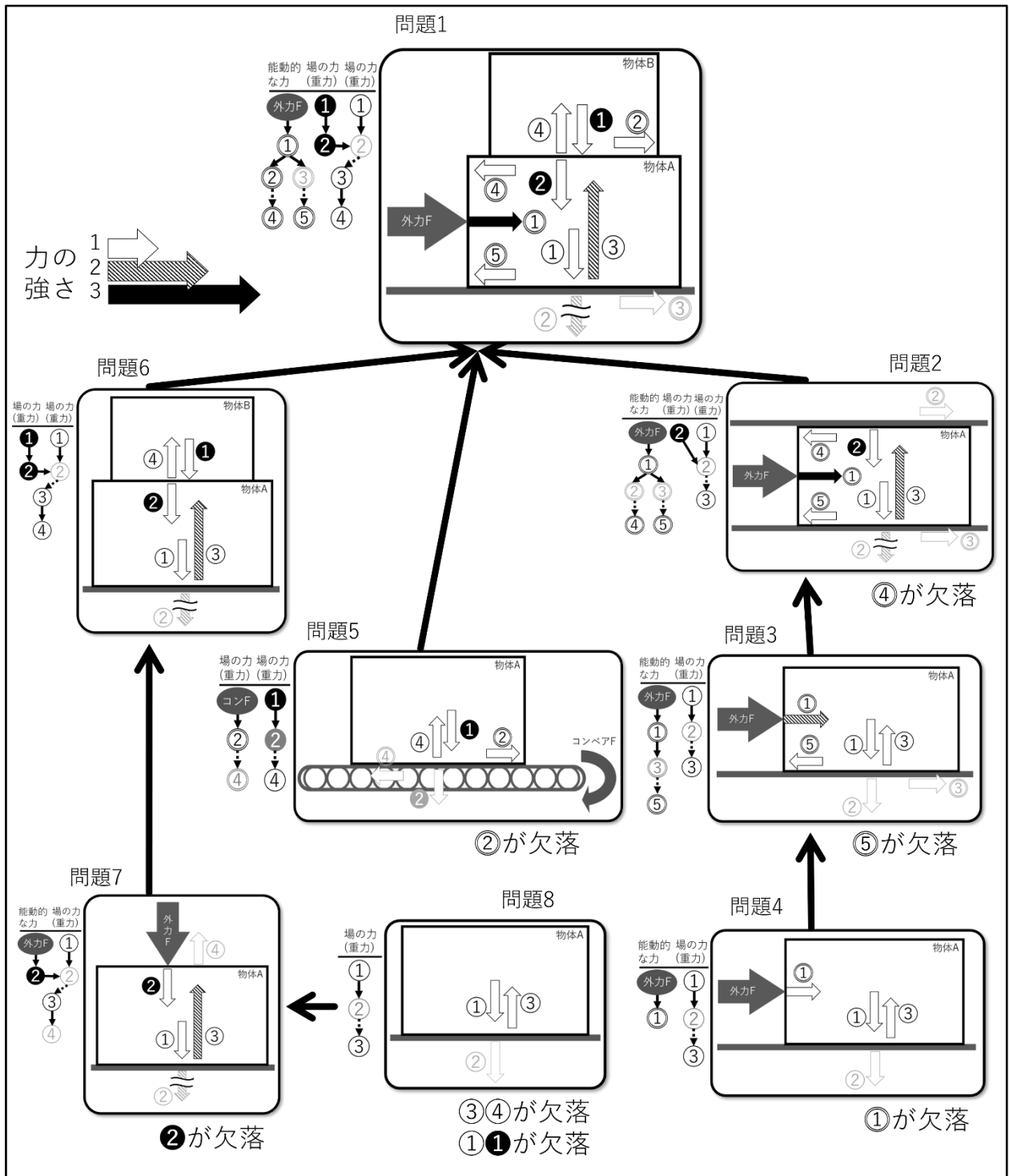


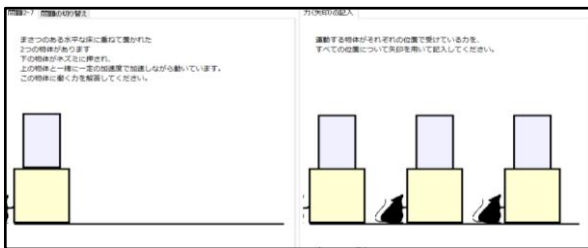
図4 問題移行系列

本研究では、上記のような移行方法を取り扱うこととする。しかし、本来はある概念を未取得の学習者に対してはその概念を含まない問題を与えたのちに、それを正解した後にその概念を含む問題を与えるなどの移行も考えられる。現在、このような移行の仕方についても検討中である。

4. 3. システムインターフェース

本システムは Visual Basic にて作成した。図 5 に本システムのインターフェースを示す。はじめに、(I)のように問題文と対応するシミュレーションを学習者に提示する。その後、力の大きさの矢印を用いて学習者に解答を行わせる。このとき、運動系においては移動する物体を 3 つ示し、それぞれの状態で受ける力について解答させた。解答終了後、「解答完了」ボタンを押すことでシミュレーションによるフィードバック及び正誤の提示を行う。ここまでは従来の EBS と同様の仕様である。

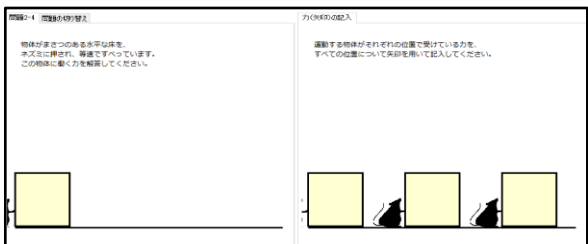
仮に学習者が一定回数を間違えた時は、それまでの解答の履歴から学習者が最も理解していないと思われる力を分析し、4.2 で述べた方法で移行する。ただし、引き続き試行錯誤を行いたい学習者も想定されるため、(II)のようにシステムによって選出された単純化した補助問題に移行するかどうかの選択肢を提示する。



(I)問題提示画面



(II)問題移行選択画面



(III)単純化問題移行後

図 5 システム画面

5. 予備的評価実験

5. 1. 実験概要

筆者らが開発した補助問題提示 EBS について、新たに定義した問題系列の学習効果を検証するために、いずれも初等力学を学習した経験のある工学部の大学生 7 名を被験者として、以下の手順で実験を行った。

- (1) 事前テスト (7 分)
- (2) システム利用 (40 分)
- (3) 事後テスト (7 分)
- (4) システム・テストに関するアンケート

実験の前に、解答の方法とシステムの操作について十分な説明を行った。(2)のシステム利用では、被験者を単純化問題に自動移行する EBS を用いる実験群に 4 名、単純化問題を学習者が任意で選んで移行できる EBS を用いる統制群に 3 名をそれぞれ割り振った。

(1)及び(3)のそれぞれのテストでは、提示した現象に対して働く力を矢印として直接記入する問題によるペーパーテストを行った。事前テストと事後テストは全く同じ問題 6 問を設定した。

5. 2. 実験結果

テストは全て 1 問 1 点として採点した。事前及び事後テストの平均点及び標準偏差を表 1 に示す。

表 1 テスト結果

	事前テスト		事後テスト		差
	平均	偏差	平均	偏差	
実験群	3.25	1.26	4.25	1.50	1.00
統制群	2.33	0.58	3.67	0.58	1.34

それぞれの平均点について、表 1 からそれぞれ事前テストから事後テストにかけていずれにおいても点数が上昇しているものの、平均点の差を取ると実験群の数値より統制群の数値の方が大きかった。そこで、Cohen's d を用いて効果量を算出した。算出結果より、統制群が 2.31 で効果量大であるのに対して実験群が 0.72 と効果量中であり、統制群の数値が実験群の数値を大きく上回ったことから、統制群が用いた単純化問題を学習者が自由に選べる EBS の方が、学習に有効であったことが示唆された。

次に、6 件法で行ったアンケートの結果の一部を表 2 にまとめる。このアンケートでは 6 が「とてもそう思う」、5 が「そう思う」、4 が「ややそう思う」、3 が「ややそう思わない」、2 が「そう思わない」、1

が「とてもそう思わない」ことを示す。

表では、各アンケート項目に対して、6件法のうち、4~6の肯定的な回答を行った人をPg.として集計し、1~3の回答を行ったものをNg.として集計して記載している。

表2 アンケート結果 (1~6の6段階評価)

項目	実験群		統制群	
	Pg.	Ng.	Pg.	Ng.
(a)システムを用いた学習で、正解に辿り着くことができると思うか	3	1	3	0
(b) (実験群のみ) システムが提示した単純化問題は、適切だったと思うか	3	1	-	-
(c) (統制群のみ) 自分で選んだ単純化問題は、適切だったと思うか	-	-	3	0
(d)システムが提示した単純化問題は、学習を進めるうえで役立つと思うか	3	1	3	0
(e)システムが提示した単純化問題が、もとの問題を解ききかけになると思うか	3	1	3	0

アンケート結果より、通常のEBSに付け加え、単純化された問題を学習者自身が自由に選べる統制群のシステムではすべての被験者3名が肯定的な回答をしていた。一方で、システムが提示する補助問題を決定する実験群では4名中3名が肯定的、1名が否定的な回答を行っていた。

5. 3. 考察

今回の評価実験においては実験群が用いたシステム、統制群が用いたシステムともに学習効果が得られたとともに、アンケートにおいても概ね肯定的な結果が得られた。しかしながら、学習効果については実験群より統制群が勝っていた。さらに、アンケートにおいても、統制群はすべて自身の力で適切な単純化問題を選択できていたと考えたことが分かった。本研究では、複雑な問題を解いているときには自分がどの点が分かっているかが自覚的ではなく、さらにどのような補助問題を解けばよいか分かりづらいたと考えた。しかしながら、一定の能力がある被験者であれば自身の誤解箇所を理解し、また本研究のように適切に設計された補助問題の一覧が与えられれば自身で適切な問題を選択できることが分かった。さらに、自身で問題を選択できる場合は、システムにより与えられるより多くの情報を得ることが

できる。そのため、今回対象とした自主学習能力が高い被験者に対して、適切な補助問題とEBS機能があれば有効な学習が行えることが分かった。今後は、被験者の数を増やすとともに、どのような問題を解けばよいか分からない被験者に焦点を当てた実験を行う必要があると考える。

6. おわりに

筆者らはこれまで、従来のEBSに単純化方略を組み込むことで、問題解決に行詰まった学習者の効率的な試行錯誤を支援する試みを行ってきた。本稿では、因果推論を基に特定の力に対してそれを学びやすいように単純化した問題を作成することで、問題系列を精査・拡張し、システムに実装してその評価を行った。

その結果、学習者の誤り傾向を分析し単純化問題に自動移行する実験群よりも、学習者が自分で単純化問題を選択する統制群の方がテスト結果アンケート結果共に高い結果となった。これは、学習者の誤りに応じて特定の問題に自動移行する機能が不十分であるために、逆に学習者に与える問題を制限してしまったためだと考えられる。

今後の課題として、被験者の数を増やすとともに、どのような問題を解けばよいか分からない被験者に焦点を当てた実験を行うことが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は科研費・基盤研究(C)(18K11586)の助成による。

参考文献

- [1] 武智俊平, 林直也, 篠原智哉, 山元翔, 林雄介, 平嶋宗: 単純化方略を用いた問題解決失敗の自己克服支援システムとその実践的評価—初等力学を対象として—, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J98-D, pp. 130-140, (2015)
- [2] 平嶋宗, 東正造, 柏原昭博, 豊田順一: 補助問題の定式化, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 413-420, (1995)
- [3] 相川野々香, 東本崇仁: EBSにおける学習者の誤り傾向に基づく問題の行詰まり解決支援システムの提案と予備的評価, SIG-ALST, Vol. 5, No. 2, pp. 28-31, (2019)
- [4] 溝口理一郎, 平嶋宗, 堀口知也: 力と運動の因果推論理論, 人工知能学会論文誌, 31 巻, 4 号, A, pp. 1-13, (2016)