

# 力学における力の因果関係に基づく 再帰的な補助問題自動生成システムの試作

## Prototype of a Recursive Automatic Generation System for Auxiliary Problems Based on Causality of Force in Mechanics

相川 野々香<sup>\*1</sup>, 前田 新太郎<sup>\*2</sup>, 古池 謙人<sup>\*3</sup>, 東本 崇仁<sup>\*4</sup>, 堀口 知也<sup>\*5</sup>, 平嶋 宗<sup>\*6</sup>  
Nonoka AIKAWA<sup>\*1</sup>, Shintaro MAEDA<sup>\*2</sup>, Kento KOIKE<sup>\*3</sup>, Takahito TOMOTO<sup>\*4</sup>, Tomoya HORIGUCHI<sup>\*5</sup>, Tsukasa HIRASHIMA<sup>\*6</sup>

<sup>\*1</sup> 東京工芸大学大学院工学研究科

<sup>\*1</sup> Graduate School of Engineering, Tokyo Polytechnic University

<sup>\*2</sup> 千葉工業大学大学院情報科学研究科

<sup>\*2</sup> Graduate School of Information and Computer Science, Chiba Institute of Technology

<sup>\*3</sup> 京都大学学術情報メディアセンター

<sup>\*3</sup> Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

<sup>\*4</sup> 千葉工業大学情報科学部

<sup>\*4</sup> Faculty of Information and Computer Science, Chiba Institute of Technology

<sup>\*5</sup> 神戸大学大学院海事科学研究科

<sup>\*5</sup> Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

<sup>\*6</sup> 広島大学大学院先進理工系科学研究科

<sup>\*6</sup> Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

Email: n.aikawa@st.t-kougei.ac.jp

あらまし：本研究では、力学の作図問題を対象に、誤った学習者に適応的な補助問題提示を行うことを目指し、補助問題の再帰的な自動生成システムの開発を行った。結果として、システム実装前の先行研究で考えられていた数よりも多くの補助問題を自動生成することができた。

キーワード：補助問題, 自動生成, 問題演習システム, 力学

### 1. はじめに

問題演習は、知識を教授された学習者が想定される問題に取り組む学習方法であり、知識を深め、理解が不十分な箇所を確認することができる。しかし、学習者が問題演習で誤った際、正解やその解説を与えることが一般的な手法であるが、それでは学習者が単に正解を暗記してしまう場合もある。このような場合に有効な手法の一つとして、誤った学習者に補助問題を提示することが挙げられる。

補助問題とは、学習者がある問題を理解することに役立つ問題であり、例えば元の問題を少し単純化することで作成することができる。補助問題提示による学習では、学習者は補助問題を解くことで元の問題への気づきを得て、理解を深めることができると考えられる。これまで、力学の作図問題を対象に、問題に誤った学習者に補助問題提示を行う学習支援システムが開発され、学習効果が確認されてきた<sup>(1)</sup>。

しかし、補助問題提示による学習は、補助問題を事前に用意する必要があり、さらに何パターンもある学習者の誤りに適応的な問題を作成する必要がある。先行研究<sup>(1)</sup>のシステムでも、実装された補助問題はシステム開発者が手動で設計を行っていた。

そこで本研究では、力学の作図問題を扱った問題演習システムを対象に、補助問題を自動生成する試みを行ってきた<sup>(2)</sup>。本稿では、補助問題を再帰的に

自動生成する機能をシステムに実装し、生成された補助問題について紹介を行う。

### 2. 補助問題生成システム

#### 2.1 問題の特徴づけ

本研究では、対象となる問題に特徴づけを行い、その特徴に基づいて一貫したルールで問題の要素を削除し、問題を単純化することで補助問題を自動生成する機能をシステムに実装する。具体的には、まず力と運動に関する因果推論理論<sup>(3)</sup>(以下、因果推論理論)に基づいて問題の特徴づけを行った。因果推論理論とは、ある現象において物体に働く力とそれによる運動を対象に、力や運動の原因と結果の関係を整理した理論である。これによって、複雑な物理現象でも要素の一つ一つを原因と結果の関係で説明することが可能になる。

本研究ではこの因果推論理論を用いて、作図問題の物体に働く力に原因と結果の関係に基づいた順番関係の特徴づけを行った。

#### 2.2 3種類の補助問題生成

本研究では2.1節の特徴づけから、3つの補助問題生成方法を提案した(図1)。補助問題は、元の問題をベースに、力の原因と結果の関係に基づいて問題の要素を一貫した方法で削除することによって生成する。本研究ではこの3つの方法を、「釣り合い維持

削除」「単純削除」「置換」と定義した。

「釣り合い維持削除」は、ある一つの力に着目した時、その力と順番関係を持つ一連の力を削除することで補助問題を生成する方法である。図1は二つの物体が横に並び、物体Xが外力で横に押しつけられるという現象である。釣り合い維持削除では、力(2)に着目した時、横向きの一連の力を削除する。これにより、二つの物体が並んで静止しているという現象の補助問題が生成される。

「置換」は、ある一つの力に着目した時、その力とその力の原因の力の順番関係を削除することで生成する方法である。図1では、力(2)とその原因の力(1)の順番関係を削除し、力(1)を外力に置き換える。これにより、一つの物体が外力に押されて壁に押し付けられるという現象の補助問題が生成される。

「単純削除」は、ある一つの力に着目した時、その力とその力が影響を与える力の順番関係を削除することで生成する方法である。図1では、力(2)とその力が影響を与える力(3)の順番関係を削除する。これにより、二つの物体が外力に押されて加速しているという現象の補助問題が生成される。

### 3. システムによって生成された補助問題

本システムは「特徴づけされたある問題」を入力することで、「その問題に存在する力ごとにそれぞれ3種類ずつ」の補助問題を自動生成する。つまり、例えば5つの力が存在する問題を入力された場合、理論上15個の補助問題が生成される。ただし、問題の構造によっては生成できない問題があったり、別の力から生成された複数の補助問題が結果的に同じ問題になったりすることもあると考えられる。

本稿では二つの問題を題材として、補助問題の自動生成を行った。一つ目の題材は、図1の元の問題である。この問題中には、12個の力が存在する問題であるが、結果として生成された補助問題は、釣り合い維持削除による問題が12個、置換による問題が9個、単純削除による問題が4個であった。そのうち、釣り合い維持削除による問題は重複する問題があり、それを除くと3個になった。よって、生成できた補助問題は合計16個であった。さらに、生成された補助問題から補助問題を生成する「再帰的な生

成」を行った。その結果、重複する問題を除くと元の問題も合わせて214個の補助問題が生成された。

二つ目の題材は、補助問題を手動で設計した研究<sup>(1)</sup>において元の問題として扱われた問題であり、この問題中には18個の力が存在する。結果として生成された補助問題は、釣り合い維持削除による問題が17個、置換による問題が11個、単純削除による問題が7個であった。そのうち、釣り合い維持削除による問題は重複する問題があり、それを除くと5個になった。よって、生成できた補助問題は合計23個であった。さらに再帰的な生成を行ったところ、生成された問題は重複を除くと合計457個となった。

先行研究<sup>(2)</sup>においてシステム実装前に生成できると考えていた補助問題は14個であったため、本システムは先行研究<sup>(2)</sup>よりも多くの補助問題を生成できたことがわかった。

### 4. おわりに

本研究では、力学の作図問題を対象に、補助問題の自動生成システムの開発を行った。結果、先行研究よりも多くの補助問題を生成できたことが分かった。今後の課題として、生成できた補助問題の適切性の調査を行うことが挙げられる。

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP22K12322, JP21H03565, JP20H01730 の助成による。

### 参考文献

- (1) 相川野々香, 古池謙人, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗: “力学を対象とした Error-based Simulation における行き詰まりの解消を指向した補助問題の提示システム”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.106, No.2, pp.132-143 (2023)
- (2) Aikawa, N., Koike, K., Tomoto, T., Horiguchi, T., and Hirashima, T.: “Characterization of auxiliary problems for automated generation in error-based simulation”, in International Conference on Human-Computer Interaction, pp.3-13, Springer (2021)
- (3) 溝口理一郎, 平嶋宗, 堀口知也: “力と運動に関する因果推論理論”, 人工知能学会論文誌, Vol.31, No.4, pp.A-F44 1-13 (2016)

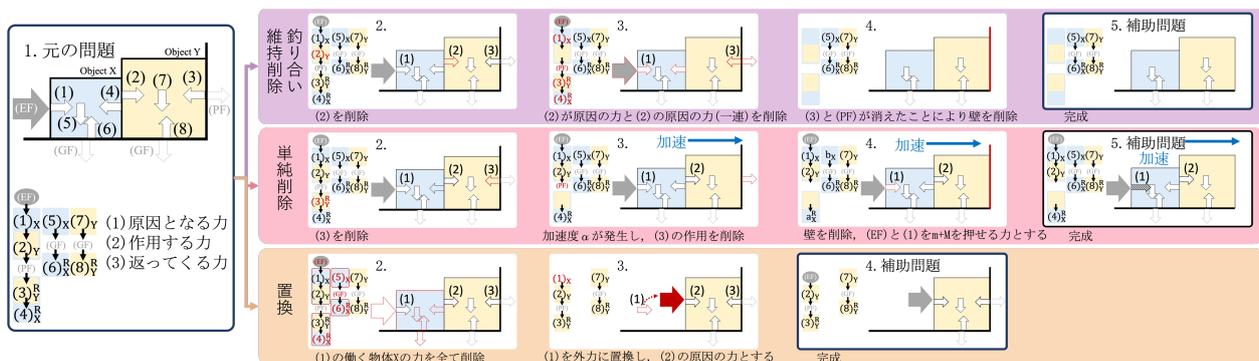


図1 補助問題の自動生成方法