

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21782

研究課題名（和文）プログラム動作の理解を表出する課題における誤答原因推定手法の開発

研究課題名（英文）Development of an estimation method of error causes in problems for representing learners' understanding of program behavior

研究代表者

國宗 永佳（Kunimune, Hisayoshi）

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：90377648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、(1) 基本的概念の理解誤りによって起こる誤った振る舞い（誤答）を再現するプログラムの自動生成手法、(2) 誤答生成手法、(3) 誤答生成手法についての検証、(4) 誤答要因の分析手法についての研究を行った。  
 (1)、(2)の手法についてこれらを実装したプログラムを開発し、その結果得られる誤答と実践から得られた誤答の比較によって手法の妥当性を検証した結果、これまでに検討してきた誤答要因以外にも多く含まれる理解誤りの要因があることが分かったため、(4)の研究を行い、より幅広い誤答要因に対応するための手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トレース課題については、これまでも類似の課題が提案されているが、この研究においては学習者へのフィードバックは正答との比較によるもののみで、誤答の原因にまで踏み込んだ分析は行われていない。一方、本研究課題において構想している、基本概念を誤って理解している学習者が想定する動作を行うプログラムによる誤答生成を行うという方法論については、これまでに類を見ないものであり、挑戦的かつ萌芽的な研究であると考えている。

また、本研究課題が提案する方法論は、トレース課題に関する誤答の原因分析のみならず、プログラミング教育における誤答分析の様々な局面に応用可能なものであり、この研究の意義は高いと考えている。

研究成果の概要（英文）：This project investigated (1) a method of automatic generation of programs, which reproduces wrong answers by misunderstandings of basic programming concepts, (2) a method for generating wrong answers, (3) verification of the methods, and (4) an analysis method for causes of wrong answers.

We developed programs, which implement methods (1) and (2), and verified the adequacy of the methods by comparing the wrong answers reproduced by the programs with actual wrong answers collected in practice. According to the result of the comparison, we found some causes of wrong answers, which we have not investigated. Therefore, we developed method (4), which can cover more causes of wrong answers.

研究分野：教育工学

キーワード：プログラム動作 理解表出課題 誤答原因推定 トレース課題 プログラミング基礎概念 誤答分析

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者・研究分担者らは、本研究課題の申請前後を通して研究開始までに初学者を対象としたビジュアルプログラミング環境 AT の研究開発および、これを用いた教育実践研究を行ってきた。AT を用いることによって、図形要素の組み合わせによってプログラムを作成することができるため、特定の言語の文法・キーワードの誤りによるエラーを排除した上で、アルゴリズムを考え、それを実現するプログラムを作成することに集中できる。考えたアルゴリズムを適切にプログラムとして表現するためには、データ構造や制御構造などのプログラミングにおける基本的な概念を正確に把握している必要がある。

そのため研究代表者・研究分担者らは、学習者がこれらの基本的概念について正確に把握しているかを確認するために、与えられたプログラムの動作(変数値の遷移、真偽判断、処理の流れ)を表に記述し、学習者自身の理解を表出するための課題(トレース課題)を提案した。トレース課題の正答については、与えられたプログラムから容易に導出することができる。また、学習者の解答と正答との比較を行い、その正誤を判定することも容易である。

解答の正誤という情報だけでは、基本的概念をどのように理解した結果生じた誤答であるかが分からない。誤答を導いた原因を明らかにすることが基本的概念の理解には重要であるが、これまでの研究の結果、誤答には複数の基本的概念の理解不足が複合的に反映されることが明らかとなった。この場合、誤答から原因を明らかにすることが困難である。

そこで研究代表者・研究分担者らは、与えられたプログラムに対して、基本概念を誤って理解している学習者が想定する動作を行うような改変を加え、正答の生成と同様に誤答を生成し、これを学習者の解答と比較するという方法を考えるに至った。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、プログラミング初学者がプログラムの動作を誤って理解している場合に、その要因を明確にすることを目的としている。この目的を達成するために、プログラムの動作理解を表出する課題形式である「トレース課題」の誤答から、学習者がどのような概念について誤って理解しているかを分析する手法の開発を行う。

「トレース課題」は、研究代表者らが提案する学習者のプログラム動作理解を表出するための課題で、プログラム(図1右側)と表(図1左側)を横並びに提示し、プログラムの各行で起こる変数の値の変化や真偽判定を、各行の実行順序に応じて対応する行のセルに記入することで、学習者が想定するプログラムの振る舞いの表出を行う。この課題を行うことで、学習者が手続き型プログラミングにおけるデータ構造と制御構造の基本的な概念を正しく理解しているかを確認することができる。図1では研究代表者らが開発したビジュアルプログラミング環境における(図形要素の組み合わせによる)プログラムが表示されているが、課題の形式自体は手続き型のプログラミング言語一般に適用可能なものである。

トレース課題の正誤判定については、与えられたプログラム(図1右側)から一意に定まる正答と学習者の解答を比較することで、実現することができる。また、これまでにトレース課題を実践的に使用して得られた学習者による誤答の一部では、要因が単独であることが明らかに読み取れたため、個別の要因によってどのような誤りが発生するかを確認することができた。一方、このような一部の単純な誤答を除いては、誤答となった要因を分析することは困難であることも分かった。なぜならば、誤答の要因となる基本的概念の理解誤りは複数におよぶことが多く、どの要因の組み合わせによる誤答であるかを判断することが難しいためである。

このような複合的な要因による誤答についても正しく要因を分析することで、学習者に適切なフィードバックを返し、基本的概念の理解を促進することが可能となると考えた。

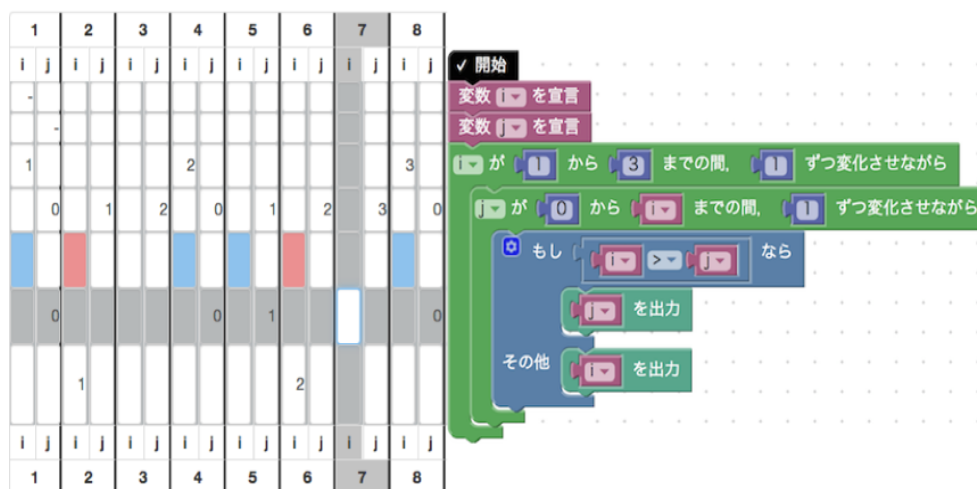


図1 トレース課題の例

### 3. 研究の方法

本研究課題では学習者による誤答から誤答要因の分析を行うのではなく、基本的概念の理解誤りによって起こる誤った振る舞い（誤答）を再現するプログラムを自動的に生成することと、生成した様々な要因を含む複数の誤答と学習者が解答した誤答との類似度を算出することによって、誤答の要因分析を試みた。このことを実現するために、大きく分けて以下のことを実施した。

#### (1) プログラムに対応する正答の生成方法についての研究

正答を生成するためには、プログラム内の各行についてどの変数の値が変化するか、真偽判定は行われているかといった振る舞いを事前に分析することが必要である。また、プログラムを実行して得られる変数の値や真偽判定の結果を、解答として生成することが必要となる。以上の分析・生成を行う方法を定め、これらを実現するプログラムの開発を行う必要がある。

#### (2) 誤答生成手法についての研究

プログラムからトレース課題の正答を生成する手法を確立した上で、誤答を再現するプログラムでも同様の手法を用いることになる。実践で得られた誤答から要因を分析した結果、正答を生成するプログラムの一部を変更することで生成可能になる誤答と、プログラムの実行順序などを大きく変更しなければ生成できないであろう誤答が存在することが分かっており、後者については実現方法の検討を行う必要がある。

#### (3) 誤答生成手法についての検証

上述した誤答生成プログラムによって生成された誤答群と、過去の実践で収集したトレース課題の誤答を比較することで、適切に誤答を生成できているかを検証する。また、検証の結果、適切でない誤答を生成していた場合には、その要因についての生成手法の修正を行う。

#### (4) 類似度算出による誤答要因分析手法についての研究

上述した誤答生成手法では、それぞれの誤り要因に対して典型的な誤りを含む誤答を生成することができるが、学習者による誤答については必ずしも典型的な誤りだけで構成されるわけではない。そのため、複数の生成された誤答と学習者による誤答との間で類似度の算出を行うことで誤答の要因を分析する手法を開発する必要がある。

### 4. 研究成果

2019 年度前半には、与えられたプログラムに対応するトレース課題の正答生成方法についての研究を行った。正答を生成するために、プログラム内の各行における変数の値の変化や真偽判定の有無を分析し、その結果を解答として生成するプログラムを開発し、本研究課題が分析対象としているプログラムについて、適切に正答を生成できていることを確認した。2019 年度後半には、単一の理解誤り要因ごとに想定される誤答を再現するプログラム生成の手法について研究を開始した。2019 年度前半に確立したトレース課題の正答生成手法と同様の手法を、誤答を再現するプログラムでも用いた。正答を生成するプログラムの一部を変更することで生成可能になる誤答については、一部の誤答パターンを除き、適切に誤答を生成するためのアルゴリズムを検討し、そのほとんどについて誤答を生成するプログラムを開発した。また、プログラムの実

行順序などを大きく変更しなければ生成できない誤答については実現方法の検討を行い、今後誤答生成プログラムを開発するための準備を進めた。また、並行して教育実践によるトレース課題の解答データを収集し、誤答の要因分析を行った。

2020年度前半には、2019年度に開発したトレース課題の単一要因による誤答生成プログラムについて、その妥当性を検証した。具体的には、2019年度までに収集した教育実践におけるトレース課題の解答データを用いて、誤答生成プログラムで生成した誤り要因ごとの誤答と、解答データ中の誤答を照合し、適切に誤答を生成できていることを検証した。また、検証の過程で発見された誤答生成プログラムの不具合については随時修正を行い、最終的には誤答生成プログラムの妥当性を検証することができた。

2020年度後半には、複数要因による誤答生成手法の研究を開始した。これまでに開発した誤答生成プログラムで生成可能な誤答の要因について、それらの関係性についての分析を行った。ここでいう関係性とは、複数の要因が同時に起こりえるか（独立性）や、実践から収集した誤答におけるそれぞれの誤答要因の共起関係などを指す。また、2020年度前半までに開発した誤答生成プログラムについて、当初単一要因のみの誤答を生成するように開発していたが、複数要因を同時に含む誤答を生成するように改修することで、2021年度以降の研究に用いることができたようにした。

2021年度には、2020年度に開発した複数の誤答要因によって起こる誤答の自動生成手法についての検証と修正を行った。この検証は自動生成手法によって生成された誤答と、実践から得られた誤答とを比較することで行った。2つの誤答要因の組み合わせによって、実践から得られた誤答(23問に対して364件)と同一の誤答を生成できることを見込んでいたが、結果的にはほとんどの誤答と一致しない誤答が生成された。実践から得られた誤答と生成した誤答の相違点を確認した結果、これまでに検討してきた誤答要因以外にも多く含まれる理解誤りの要因があることが分かった。また、364件中101件が、これまでに検討してきた誤答要因とは異なる、プログラム動作の理解誤りに起因しない要因(入力誤りなどに起因する)を含むことも分かった。前者については、要因が多岐にわたることは想定できており、研究計画段階で判明していた頻出する誤り要因に対応することにしていった。また後者についても、入力誤りなどに起因する誤答が含まれることは研究計画の時点で判明していたため、研究計画の中でこのことに対応する誤答要因分析手法の開発をこの後の研究課題として計画していた。

2022年度には、誤答要因の分析手法について研究を行った。この研究では、想定した誤答要因に基づいて生成した誤答と、学習者が実際に作成した誤答の類似度を算出することにより、これまでにを行った単純な比較のみでは検出できなかった学習者が作成した誤答の要因を推定した。類似度の算出については、プログラム動作をトレースした結果得られる時系列データに用いられる方法を適用した。しかし、単純な比較と同様にこれまでの研究で想定していないなかった誤りや、入力誤りによる差異によって、類似度に大きな差が出る結果となり適切に誤答要因を推定することができなかった。2022年度以前の研究では、単一の理解誤り要因による誤答をいくつかの要因について再現するためのプログラムを開発し、その結果について検証を行った上で修正した。また、複数の要因が関与した誤答についても、それを再現するプログラムを開発した上で、検証を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 平野晶, 國宗永佳	4. 巻 121 (225)
2. 論文標題 ビジュアルプログラミング環境ATにおけるC言語プログラミングへの移行支援機能の開発と評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 23-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 國宗永佳	4. 巻 121 (225)
2. 論文標題 Webベースの教授・学習支援システムと展開プラットフォームの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本樹, 稲垣忠, 金子大輔, 國宗永佳, 倉山めぐみ, 下郡啓夫, 辻靖彦, 村上正行	4. 巻 36(6)
2. 論文標題 「知見マップ」構築を目的としたプログラミング教育実践調査 -教科・対象・教材による考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 教育システム情報学会研究報告	6. 最初と最後の頁 141-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 平野晶, 國宗永佳	4. 巻 120 (289)
2. 論文標題 ビジュアルプログラミング環境ATにおけるC言語記述の混在を可能にする機能の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 47-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 野瀬裕昭, 北條史華	4. 巻 23
2. 論文標題 LEGO MINDSTORM EV3を用いた自律ロボットプログラミング教育の取り組み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 長野県工科短期大学紀要	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hisayoshi Kunimune, Shun Kamijima, Tatsuki Yamamoto, Masaaki Niimura	4. 巻 0
2. 論文標題 Trial to Increase Motivation on Programming by Using Hardware Control Functions in the AT Visual Programming Environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Education Technology Management	6. 最初と最後の頁 50-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3375900.3375917	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 國宗永佳, 仲林清	4. 巻 13(2)
2. 論文標題 プログラミング導入演習に対して学習支援システムと自己調整学習が与える影響の分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジンB-Plus	6. 最初と最後の頁 100-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 稲葉航平, 國宗永佳	4. 巻 0
2. 論文標題 プログラム動作理解を表出する課題における誤答生成手法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 教育システム情報学会2019年度学生研究発表会予稿集	6. 最初と最後の頁 55-56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 秋山直斗, 新村正明	4. 巻 34(6)
2. 論文標題 プログラミング課題における進捗状況可視化手法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 教育システム情報学会研究報告	6. 最初と最後の頁 51-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 北條史華, 野瀬裕昭	4. 巻 0
2. 論文標題 LEGO MINDSTORM EV3を用いた自律ロボットプログラミング教育の取り組み~ステートマシン図によるプログラミングツールの開発~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 教育システム情報学会2019年度学生研究発表会予稿集	6. 最初と最後の頁 43-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 平野晶, 國宗永佳
2. 発表標題 ビジュアルプログラミング環境ATにおけるC言語プログラミングへの移行支援機能の開発と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國宗永佳
2. 発表標題 Webベースの教授・学習支援システムと展開プラットフォームの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本樹, 稲垣忠, 金子大輔, 國宗永佳, 倉山めぐみ, 下郡啓夫, 辻靖彦, 村上正行
2. 発表標題 「知見マップ」構築を目的としたプログラミング教育実践調査 - 教科・対象・教材による考察
3. 学会等名 教育システム情報学会第6回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野晶, 國宗永佳
2. 発表標題 ビジュアルプログラミング環境ATにおけるC言語記述の混在を可能にする機能の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会 教育工学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisayoshi Kunimune, Shun Kamijima, Tatsuki Yamamoto, Masaaki Niimura
2. 発表標題 Trial to Increase Motivation on Programming by Using Hardware Control Functions in the AT Visual Programming Environment
3. 学会等名 2nd International Conference on Educational Technology Management (ICETM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲葉航平, 國宗永佳
2. 発表標題 プログラム動作理解を表出する課題における誤答生成手法の検討
3. 学会等名 教育システム情報学会2019年度学生研究発表会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 秋山直斗, 新村正明
2. 発表標題 プログラミング課題における進捗状況可視化手法の提案
3. 学会等名 教育システム情報学会2019年度第6回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北條史華, 野瀬裕昭
2. 発表標題 LEGO MINDSTORM EV3を用いた自律ロボットプログラミング教育の取り組み~ステートマシン図によるプログラミングツールの開発~
3. 学会等名 教育システム情報学会2019年度学生研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>初心者向けビジュアルプログラミング環境AT  <a href="https://algtoo.elc.net.it-chiba.ac.jp/">https://algtoo.elc.net.it-chiba.ac.jp/</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野瀬 裕昭  (Nose Hiroaki)  (60774940)	長野県工科短期大学校・知能情報システム学科・教授    (83602)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	新村 正明  (Niimura Masaaki)  (20345755)	信州大学・学術研究院総合人間科学系・教授    (13601)	
研究分担者	山本 樹  (Yamamoto Tatsuki)  (30535266)	明海大学・総合教育センター・准教授    (32404)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関