

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：23903
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2021～2023
課題番号：21K12177
研究課題名(和文) 地域連携プログラミング初等教育における操作履歴に基づく機械学習を用いた教え方支援

研究課題名(英文) Teaching Support Using Machine Learning Based on Operation History in Regional Collaborative Programming Elementary Education

研究代表者
渡邊 裕司 (Watanabe, Yuji)
名古屋市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60314100
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：2020年度の高校生23名対象のPythonプログラミング講座におけるコードとアンケート回答を分析した。コードの正誤関係の類似性分析により受講者がいくつかのクラスタに分かれることを見つけた。また、2021年度の中中学生48名対象のプログラミング教室に対しても分析した結果、高校生と同じく正誤関係からクラスタを確認した。さらに、ScratchやPythonのコードの正誤を自動で判定するために、JSON形式のファイルから入力コードをまず抽出した。そして、入力コードから抽象構文木を作成し、レーベンシュタイン距離により自動採点する方法を提案した。提案する自動採点は手動採点に近い点数を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
プログラミングの学習支援に関する従来研究の多くはJavaやPythonなど大学や大人相手のプログラミング言語を対象としてきた。それに対して、本研究のようにScratchや小中高生も対象とする初等プログラミング教育における学習支援を目指す研究はまだ少ない。本研究は緒に就いたばかりであり、現時点での研究成果に対してインパクトは小さいかもしれない。しかし、初等プログラミング教育の広がりに応じて、プログラミング教育における指導者や支援員の不足解消の一助となるとともに、機械学習を用いたシステム開発補助に大学生を従事させることによってAI人材の育成にもつながることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We analyzed the code and survey responses in a Python programming course for 23 high school students in 2020. We found that the participants were divided into several clusters based on similarity analysis of the correctness and incorrectness of the codes. We also analyzed a programming class for 48 junior high school students in 2021, and found clusters based on correct/incorrect relationships as in the case of high school students. Furthermore, in order to automatically determine the correctness of Scratch and Python code, we first created a program to extract an input code from a JSON format file. Then, we proposed a method to create an abstract syntax tree from the input code and grade it automatically using the Levenshtein distance. The proposed automatic scoring method can give scores close to that of manual scoring.

研究分野：知能情報学、教育工学、情報セキュリティ

キーワード：プログラミング教育 機械学習 教え方支援 地域連携 Scratch Python 自動採点

1. 研究開始当初の背景

2020年度より順次施行される新学習指導要領では、小学校が2020年度から、中学校が2021年度から、高校が2022年度から「プログラミング教育」が必修化される。文部科学省と「未来の学びコンソーシアム」などの周知により「プログラミング教育」の文字を多く目にするようになった。また、文部科学省が「小学校プログラミング教育に関する指導案集」を公開したり、教育委員会等が研修会を実施したりして指導する先生の育成に努め、プログラミング授業を実施している小学校もある。しかし、2020年度の小学校では、新型コロナのため授業時間数が減らされて正課授業では何もできていなかったり、外部団体による課外のクラブ活動での実施であったり、小学5年生の算数の教科書でたった2ページしかプログラミングが取り上げられていなかったり、実際の学校現場における先生らから戸惑いの声を聞くことも多い。「GIGAスクール構想」で学校のICT環境整備が進められる中、プログラミング初等教育において教えられる指導者や支援員の育成が急務である。

また、研究代表者の長年の大学でのプログラミング授業の経験から言えば、教える内容だけでなく、学習者がプログラムを実際に入力している際の指導のポイントやタイミングも勘所である。プログラミングでは試行錯誤が伴い、バグに対して学習者自身がその誤りに気付くことが重要である。しかし、バグをなかなか見つけられない場合に、指導者や支援員が自身の指導経験に基づいて素早く対応できることが好ましい。指導が適切でなかったり時間がかかると、学習者は「プログラミングは難しい」と観念してしまう。特に興味が移り変わりやすい小学生などは、全く別のことを始めてしまうかもしれない。バグ発見は「経験や勘」によることが多く、プログラミング初等教育における指導ノウハウは研究代表者も含めて指導者や支援員全般にはほとんどなく、今後蓄えていくことが肝要である。つまり「教える内容」に加えて「教え方」の見える化も必要といえる。

その一方で代表者はこれまで「スマートフォンにおける行動的特徴に基づく機械学習を用いた個人認証」を主な研究テーマとしてきた。これは、例えばスマートフォン上でのタッチ操作履歴を取得して、操作の癖や特徴に基づいて機械学習のランダムフォレストやニューラルネットワーク(深層学習)などを用いて個人を認証する研究である。プログラミング授業では幸いにもパソコンやタブレット画面上での学習者の操作履歴をデータとして取得できるため、プログラミング学習支援への従来研究の展開を想定できる。

2. 研究の目的

本研究課題の申請時における核心をなす学術的「問い」として、

問い1. 小中高生のプログラミング授業や検定試験において蓄積された学習者のソースコードに対して機械学習によってバグを分類できるか?

問い2. 学習者のコードや操作履歴から機械学習によって、バグに対する熟練指導者と未熟指導者の指導方法における違いを明らかにできるか?

を挙げた。これらの「問い」に答えることによって、明確にされた熟練指導者の教え方を小中高の先生や支援員に提示する「プログラミング初等教育支援システム」を最終目標とする。

これは、プログラミング学習者が同じようなバグに困っている時に、熟練指導者ならばいつものように指導するかを示すシステムである。学習者の同じようなバグを体系化し、未熟者と比べた熟練指導者の指導方法を明確にするために機械学習を適用する。本研究が、プログラミング教育における指導者や支援員の不足解消の一助となるとともに、機械学習を用いたシステム開発補助に大学生を従事させることによってAI人材の育成にもつながることが大いに期待される。

本研究では、プログラミング授業でのソースコードと操作履歴を記録して体系化することにより、「教え方」の見える化を研究対象とする点に独自性がある。また、蓄積された大量のコードや操作履歴に対して類似のバグに分類して間違いの指導方法を明らかにするために機械学習を適用する点は新奇かつ創造的な発想である。また、研究代表者がこれまでに培った地域の小学校や団体や企業と連携して本研究を実施する点も特色である。本研究のイメージ図を図1に記す。

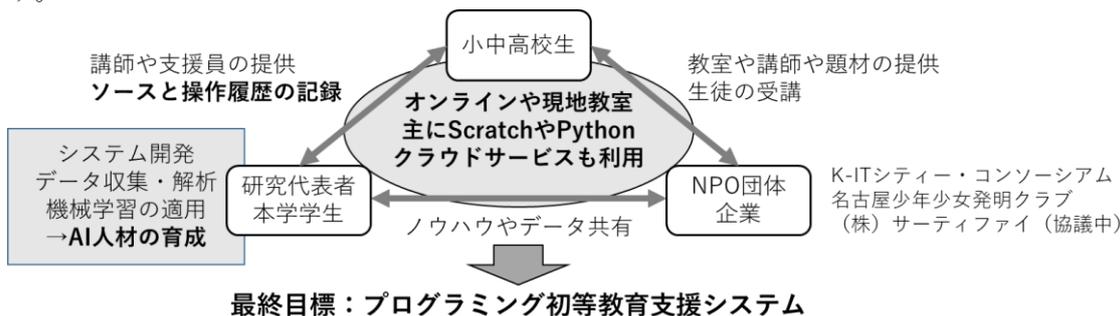


図1 本研究課題のイメージ図

3. 研究の方法

申請時には、以下に示す五つの方法で上記の研究目的を達成することを目指した。本研究で用いているプログラミング言語は、これまでの指導経験と世間での広範な利用状況から「Scratch」と「Python」とする。

(1) 学習者のソースコードの記録と検定試験の解答利用

Scratch では、教師用アカウントを使ってクラス内でコードを共有して蓄積する。Python については、クラウドサービスの Google Colaboratory や Classroom を使い、Google Drive の共有フォルダにコードを記録する。また、(株) サーティファイが 2016 年から開催している Scratch を使用した「ジュニア・プログラミング検定」の解答も利用する。

(2) 学習者のコードに対する機械学習によるバグの分類

(1) で記録した学習者のコードをまず実行して、正しく動くコード、実行できるが正しく動かないコード、実行できないコードに分ける。次に、後者二つに対して、教師なし学習によってコードのクラスタリングを行い、バグの種類や頻度など分類がどこまで可能かを明らかにする。ここで、テキストベースの Python に対して、Scratch はビジュアル言語であるため、コードの解析に工夫が必要である。そこで、Scratch から Python へ変換するプログラムを開発して Python として解析する方法、Scratch のコードを画像とみなして畳込みニューラルネットワークを用いてコードの類似度を測る方法などを試みる。

(3) 学習者の操作履歴を取得するブラウザ機能拡張の開発

教え方の見える化のためには、最終的なソースコードだけではなく、授業中のコードや操作の履歴も取得する必要がある。Scratch と Colaboratory とともにブラウザ上でプログラミングできるため、履歴を取得するブラウザの「機能拡張 (アドオン)」を開発する。

(4) プログラミング教室での履歴収集

機械学習を行うためには大量のデータが必要となる。そこで、研究代表者や NPO 団体や学校の先生が行うプログラミング教室において、(1) のソースコードに加えて、(3) で開発した機能拡張により操作履歴を収集する。既設パソコンへの機能拡張のインストールが不可の場合などは、本研究費で購入する Chromebook を貸し出す。プログラミングを学習する際の学習者のソースコードや操作履歴を取得する個人情報扱う実験であるため、被験者の同意ならびに倫理委員会の承認を得て実施する。このデータ収集は研究期間中継続して行う。

(5) 機械学習による熟練指導者の指導方法の違いの明確化

(4) で収集したコードと履歴を用いて、研究代表者や NPO 団体の指導を熟練者、指導経験の少ない先生や大学生の指導を未熟者としてラベル付けし、教師あり学習によって (2) で分類されたバグに対する熟練者と未熟者の指導方法の違いを明らかにする。もし違いが明らかになれば、学習者が同じようなバグに悩んでいるときに、明確になった熟練指導者の教え方を小中高の先生や支援員に分かりやすく提示できるようなシステムを開発する。

研究を進めていく中で、研究方法の一部を変更した。まず、プログラミング教室で学習者の (1) のソースコードと (4) の操作履歴に加えて、アンケートの収集も行った。そして、(5) を行う前に先に取り組むべきこととして、(2) と関連して以下の (6) を行うことにした。

(6) プログラムの自動採点

プログラミング検定問題などに対する学習者の解答コードが増えてくると、教室後などに先生が手作業でコードの正誤を判定するのは負担が大きくなる。そのため、自動採点の検討も先生の支援として大変重要となる。Python プログラムを Google Colaboratory で入力しているが、ファイルは入力と出力など様々な情報を含む JSON 形式のノートブックドキュメントである。そこで、JSON 形式のドキュメントから入力コード、コードの出力、状態の三つのプロセスに分けて、入力コードの抽象構文木の相違をレーベンシュタイン距離により正誤判定する方法を試行する。Scratch も同じく JSON 形式のため、同様の自動採点の方法を検討する。

4. 研究成果

研究方法に対応させながら研究成果について述べる。

(1) プログラミング教室での学習者のソースコードやアンケートの収集と検定試験の解答利用 (方法の (1) と (4))

Scratch に関しては、研究期間中の 2021~2023 年度の間に、小学校のプログラミングクラブ (毎年約 14 回実施) において検定試験に対する生徒 (毎年 20 名前後) のソースコードを集め、2023 年度にはアンケートも実施した。また、2021 年度には、(株) サーティファイと秘密保持契約を締結し、当研究室の学生らがサーティファイの「ジュニア・プログラミング検定」を実際に受験して解答ファイル等を取得した。さらに、2022 年度には中学校の出前講座において中

学2年生230名の生徒のScratchコードとアンケートを集め、2023年度には小学校の出前講座で生徒20名のScratchコードとアンケートを収集できた。

Pythonについては、2019年度から毎年夏に実施しているプログラミング教室（名古屋少年少女発明クラブ主催、本学共催）で中学生（毎年約50名）のソースコードとアンケートの収集を行った。

(2) 学習者のコードに対するクラスタやコンジョイント分析（方法の(2)）

2020年度に高校生23名を対象に行ったオンラインPythonプログラミング講座におけるコードとアンケート回答を分析した。コードの正誤関係の類似性分析により受講者がいくつかのクラスタ（図2の左）に分かれ、カテゴリ分析により正答率が各アンケート回答と関係することが分かった。また、2021年度に中学生48名に対して開催された中学生プログラミング教室におけるコードとアンケート回答の分析も行った。その結果、高校生と同じく正誤関係からクラスタ（図2の右）を確認し、アンケートに関しては高校生と同じまたは異なる傾向がみられた。

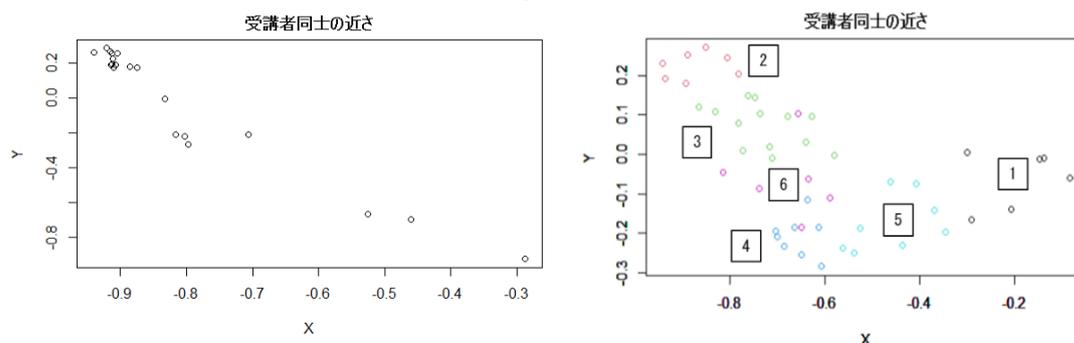


図2 コードの正誤に基づく受講者同士の近さ（左：高校生、右：中学生）

また、2022年度に行った中学校の出前講座において194名から得られたアンケート回答に対してコンジョイント分析を行った。その結果、今回の講座に対する難易度、プログラミングに対する興味、将来の仕事としての希望について、ゲームやYouTubeの頻度などとのいくつかの関係がわかった。

さらに、中学生対象のPythonプログラミング教室の2020～2023年度の4年間のデータに対して、項目反応理論を用いて生徒の正誤傾向や問題の難易度や適性度を分析した。この結果を査読付きの学術雑誌に投稿予定である。

(3) 学習者の操作履歴の取得（方法の(3)と(4)）

まず、操作履歴を取得できる既存のアプリケーションがあったため、これを使うことを試みたが、セキュリティ上の理由で当大学のパソコンにインストールできなかった。しかし、他のアプリケーション候補が見つかり、当大学のパソコンに当該アプリケーションをインストールして、中学生のPythonプログラミング教室にて操作履歴を取得した。

現状では操作履歴の取得に留まり、これらの分析等には至っていない。今後は、コードとアンケート回答に加えて操作履歴も分析対象に含めることによって、興味深い結果が得られるかもしれない。分析対象のデータが増えれば、各年度で結果に相違があるかどうか分かるとともに、プログラミング学習者の一般的な傾向が明らかになると予想される。そして、学習者の入力時の正誤の傾向が分かれば、本研究の最終目標である、誤りに対して先生や支援員がいかに指導するかを支援するシステムの開発につなげていける。

(4) プログラムの自動採点（方法の(2)と(6)）

Python (Google Colaboratory 上) と Scratch それぞれの JSON 形式のファイルから入力コードを抽出するプログラムをまず作成した。そして、入力コードから抽象構文木を作成し、レーベンシュタイン距離により自動的に正誤判定する方法を試した。

Python では、2021年8月に行った中学生プログラミング教室で収集した48名のコードに対して自動採点と手動採点を比較した。その結果、未入力とエラーの違い、大文字と小文字の違いなどの問題があったものの、168コード中10コードのみ手動採点の結果と違うだけであった。

一方のScratchでは、小学校のプログラミングクラブにおける生徒37名（2021年度18名と2022年度19名）が解答したコードに対して自動採点と手動採点を比較した。その結果として、自動採点と手動採点の点数分布を図3（左が2021年度、右が2022年度）に示す。2021年度の自動採点と手動採点の点数の相関係数は0.93であり、2022年度では0.77であった。2022年の相関係数が低かった理由は、ある生徒のプログラムが多くブロックを羅列しており、手動採点では部分点が積み重なったためと考えられる。しかし、強い正の相関がみられたことから、Scratch

プログラムの自動採点の可能性を示唆した。

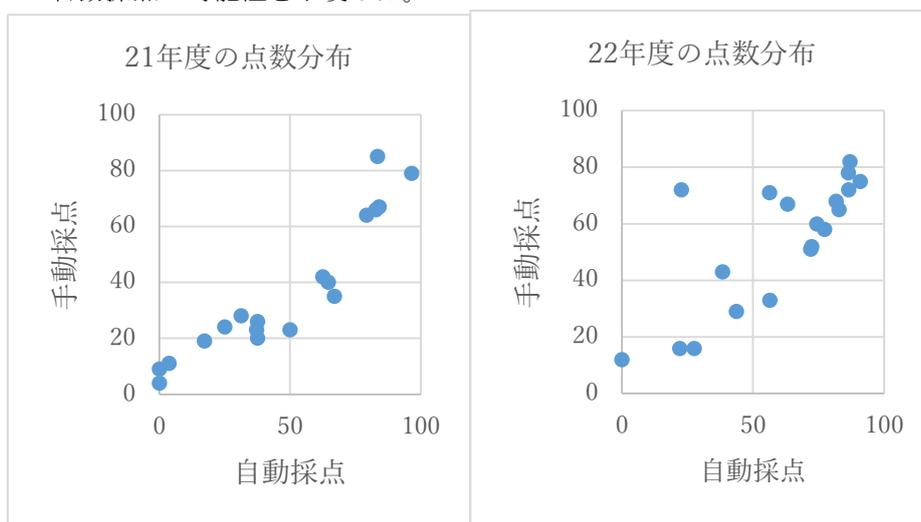


図3 自動採点と手動採点の点数分布 (左: 2021年度、右: 2022年度)

また、小学生のScratchプログラムに対して、抽象構文木やレーベンシュタイン距離を使った方法では手動採点と異なる点数となることがあったため、採点基準に基づいて直接自動採点する方法を新たに考案し、より手動採点に近い採点を可能にした。この結果を査読付きの学術雑誌に投稿予定である。

(5) 本研究課題に関連する研究

論理的推論の1つである帰納推論によってプログラムを自動生成することができる、一般化のためのネットワークプログラミング(NP4G: Network Programming for Generalization)を提案した。一例として、NP4Gを使って、数個の教師データから一般化によりビットNOT演算プログラムを自動で構築することを行った。ランダムにノードを選んで繋ぐだけであるが、ノードの数と段階的学習の段階の数を調整することにより、比較的短い時間かつ10回の実行のうち約7回の割合でビットNOT演算プログラムを自動で獲得できることを確認した。

また、プログラミング教育支援に向けた大規模言語モデルの研究を始め、自作のデータセットをもとに日本語大規模言語モデルのチューニングを試み、ある程度の有効性を確認した。

最後に、得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望について述べる。プログラミングの学習支援に関する研究は国内外で行われてきたが、従来研究の多くはJavaやPythonなど大学や大人相手のプログラミング言語を対象としてきた。それに対して、本研究のようにScratchや小中高生も対象とする初等プログラミング教育における学習支援を目指す研究はまだ少ない。本研究は緒に就いたばかりであり、現時点での研究成果に対してインパクトは小さいかもしれない。しかし、初等プログラミング教育の広がりに応じて、プログラミング教育における指導者や支援員の不足解消の一助となるとともに、機械学習を用いたシステム開発補助に大学生を従事させることによってAI人材の育成にもつながることが期待される。

今後は、最終目標である「プログラミング初等教育支援システム」を目指して、本研究を継続して経年変化などを調べるとともに、新たに深層学習の生成系AIやVRも活用する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 2件）

1. 著者名 Hara Shoichiro, Watanabe Yuji	4. 巻 1
2. 論文標題 NP4G: Network Programming for Generalization	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Intelligent Systems and Applications (Lecture Notes in Networks and Systems)	6. 最初と最後の頁 301-315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-47721-8_20	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 渡邊裕司	4. 巻 61
2. 論文標題 人工知能を学ぶ中高生向けPythonプログラミング教室	5. 発行年 2022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	6. 最初と最後の頁 46-54
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 Ryouta Kozakai, Toshiki Kobayashi, Zhang Wenxuan, Yuji Watanabe	4. 巻 207
2. 論文標題 Tendency Analysis of Python Programming Classes for Junior and Senior High School Students	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Procedia Computer Science	6. 最初と最後の頁 4603-4612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procs.2022.09.524	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小酒井亮太、張文軒、小林敏樹、渡邊裕司
2. 発表標題 中学校でのScratchプログラミング出前講座における傾向分析
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報ET2023-1
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船橋由衣、渡邊裕司
2. 発表標題 プログラミング教育支援に向けた自作データセットによる日本語大規模言語モデルのチューニング
3. 学会等名 電子情報通信学会 東海支部 令和5年度卒業研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小酒井亮太、楊群、張文軒、小林敏樹、渡邊裕司
2. 発表標題 Google ColaboratoryのPythonプログラムの自動採点について
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報ET2022-6
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富本将矢、渡邊裕司
2. 発表標題 編集距離を用いたScratchプログラムの自動採点の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 東海支部 令和4年度卒業研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小酒井亮太、小林敏樹、渡邊裕司
2. 発表標題 高校生向けオンラインPythonプログラミング講座における傾向分析
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報ET2021-2
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小酒井亮太、張文軒、小林敏樹、渡邊裕司
2. 発表標題 中学生プログラミング教室におけるPythonプログラムの傾向分析
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報ET2021-42
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------