

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K00488

研究課題名(和文) プログラミング教育のための効果的なEラーニングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of Effective e-Learning System for Programming Education

研究代表者

大久保 弘崇 (Ohkubo, Hiroataka)

愛知県立大学・情報科学部・講師

研究者番号：40295580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：プログラミング演習問題の答案の正誤は、単純な実行例の動作確認だけでは正しく行えない。より信頼できる判定方法として、入力例をランダムに生成してそれに対する動作を確認する方法を、Eラーニングシステムで運用できるように実現した。判定基準の作成を作問者が行う際の支援機構も開発した。これらは、ソフトウェア工学における研究成果を応用している。

学習効果を高めるためには、誤答に対して適切な応答を返すことこそが重要である。その一例として、言語処理系が構文的な誤りに対して出力するエラーメッセージにおいて、初学者にも有用な情報を提供できるようにするために、構文解析器ライブラリの改善を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、プログラミング演習問題を自動採点するシステムを考え、正確な正誤判定をより容易に行えるようにする技法を開発した。提案手法を活用することで多くの演習問題が作成されれば、情報系の専門教育としてのプログラミングの初等学習の効果が大きく高まる。

これは、情報系の学生にとってもプログラミング的思考がこれまで馴染みのない発想で、それを体得するためには多くの演習を行う他ないからである。また、プログラミングはその他の教育科目と異なり答えは一つではなく、自己採点で計算ドリルをこなすようには自学自習できず、Eラーニングシステムの支援が不可欠であることによる。

研究成果の概要(英文)：Correctness of the answers to the programming exercises cannot be correctly verified only by checking the simple execution examples. As a more reliable judgment method, we implemented a method of randomly generating input examples and confirming the result for them, so that can be used in the moodle e-learning system. We also developed a support toolset for the questioner to create the criteria. These apply research results in software engineering.

In order to improve the learning effect, it is important to give a proper response to the wrong answer. As an example, we proposed the improvement of the parser library so that the compiler can easily provide useful information for beginners in the error message of syntax errors.

研究分野：プログラミング言語論

キーワード：関数型言語 自動判定 言語処理系 エラーメッセージ Eラーニングシステム プログラミング教育

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報系を専攻する学生にとってもプログラミング的思考とはこれまで馴染みのない発想で、情報系の専門教育としてのプログラミングの初等教育ではこれを習得させるために大きな努力を必要としていた。

その方法とはして多くの演習問題の実施が効果的であることはよく知られているが、プログラミングはその他の教育科目と異なり答えは一つではなく、自己採点で計算ドリルをこなすようには自学自習できない。従来から一般的に行われてきた、レポート用紙で提出されたプログラムが本当に正しいのかを採点者が頭で考え評価する方法は、必要とする人的リソースが大きい。この教育課程を E ラーニングシステムにより支援することは有効であると考えられるが、プログラミング教育という対象の性質には既存の E ラーニングシステムと整合しない部分があり、その問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、効果的なプログラミング教育を実現するために必要な E ラーニングシステムが持つべき機能を明らかにし、それを実用的な形で実現することを目的とする。中でも、解答にプログラムを入力させる形式の演習問題を対象とする。

本研究では、プログラミング教育の演習問題を E ラーニングシステム上で自動的に実施する際の障害を解決し、学習効果を高めるために必要な機構を実現することを目的とする。具体的に検討している課題は以下のとおりである。

- (1) 答案に対する正誤の自動判定機構
- (2) 入力された誤答に対する画一的でなく適応的なフィードバックの提示方法
- (3) コンパイラよりも適切なエラーメッセージの提示方法
- (4) 正しく問題を作成するための支援方法

3. 研究の方法

(1) 答案に対する正誤の自動判定機構

既存のプラグインが提供している正誤判定の機構は、入力された答案プログラムのコンパイルと、あらかじめ設定されたテストケースに対する応答の確認を自動化する。我々は、特定のテストケースに対してだけでなく、形式仕様を用いたランダムテストを実施する方式を実現した。ランダムテストには Haskell 向けのランダムテストフレームワークである QuickCheck を利用しているが、テストフレームワークと課題の正誤判定という課題の差異を原因とする不整合がある。この不整合を解消した、答案の正誤判定機構を実現する。

現在既に作成されている演習問題データでは、正誤判定機構のフレームワークが本来担当すべき汎用的な機構が、全ての問題のテンプレートにコピーされている。これらの既作成問題に蓄積された知見を集約し、フレームワークに機能をまとめる。その後、フレームワークを利用する形で問題を修正し、また新たに問題を作成することで、フレームワーク設計の妥当性を確認していく。

(2) 入力された誤答に対する画一的でなく適応的なフィードバックの提示方法

人手によるレポートのチェックでは、学生の誤りに対して、適切な助言が行える。これに対して、機械的な正誤判定ではそのようなフィードバックが行えないことにより学習効果が損なわれる。これに対して Moodle では、誤答のパターンを予測してそれに対するフィードバックを設定する機構を有しているが、この機能はプログラミング問題に対しては利用できない。

提出された誤答の内容を機械的に分類し、それぞれのグループに対するフィードバックを登録する方法を検討する。この方法により、人手による個別対応と同等の、誤りの内容に応じたフィードバックを適切に学習者に提示することが可能になる。誤答をグループ分けするための評価軸には、ソフトウェアのメトリクスや、テスト入力に対する応答が利用できる。また、分類のための母集団としては、今年度を実施した際の提出データを来年度以降に利用する。

Moodle が対話的なオンラインシステムであることから、一つの問題と一人の学生に対して、最終的に提出された答案だけでなく、学生が試みた細かな修正の全てがデータベースに蓄積される。これを横断的に分析して、指導に適した分類を自動的に発見する手法を開発する。

(3) コンパイラよりも適切なエラーメッセージの提示方法

誤答には「コンパイルができない」と「実行結果が正しくない」ものの二通りがある。前者に関して、通常のコンパイラが出力するエラーメッセージは熟練したプログラマを想定としており、プログラミング教育を受ける初心者には理解しがたい。Haskell においては、標準的なコンパイラである GHC よりも適切なエラーメッセージを提示する Haskell コンパイラ Helium が研究されている。Helium の成果を活用し、さらに演習問題に適応させる。

後者に関しては、現在利用している QuickCheck の出力するエラーメッセージはやはり熟練したプログラマを想定しているため、課題(1)に含める形で、適切なエラーメッセージを生成する方法を検討する。

(4) 正しく問題を作成するための支援方法

自動採点できる問題の作成には、問題そのものの他に、答案の正誤を判定する QuickCheck 記述が必要である。QuickCheck 記述に誤りがあると、学生のシステムへの信頼を大きく失うことになる。また、ランダムテストによる判定だけでは、コーナーケースにおける誤りを見過ごす恐れがあるため、適切なコーナーケースのテストを加える必要がある。QuickCheck 記述やコーナーケーステストを正しく作成するための支援や、性質を記述しやすくする DSL を、課題(1)と連動して開発する。

4. 研究成果

(1) 答案に対する正誤の自動判定機構

この課題については、研究期間を通じて演習問題の作成を継続し、その過程で得られた問題作成、自動判定機構の構成に関するノウハウを蓄積し、またそのノウハウの適用を支援するためのライブラリを改良した。

期間中に得られた成果として、答案プログラムまたは模範解答プログラムが実行時エラーを起こす可能性を持つプログラムであっても、正誤判定が異常終了することなく続行できるようにテンプレートを拡張した。

これは単に誤りのある場合だけではなく、意図的にプログラムの仕様として定義域に対して網羅的でないような場合も出題できまたそこも含めて正しさを確認できるため、より効果的な自動判定を実現できた。

(2) 入力された誤答に対する画一的でなく適応的なフィードバックの提示方法

Moodle に蓄積された答案データに基づき、試行錯誤の経過、コンパイラが出力するエラーメッセージの傾向、誤答プログラムの入出力関係など、様々な角度から分析を行ったが、その特徴を捉えるには至らなかった。

その原因として、研究代表者が担当しているプログラミング教育が最初の入門段階であることが推察される。より進んだ、中級や上級レベルのコースであれば、出現する構文エラーやプログラムの誤りは、ある程度理にかなったものとなり、傾向の分析が可能になると考えられる。

この推測に基づき、競技プログラミングのサイトに蓄積された解答プログラムを上級レベルの演習の答案と見立てて、この課題で目指したフィードバックのための分析を本研究の発展として着手している。

(3) コンパイラよりも適切なエラーメッセージの提示方法

この課題に対する成果として「コンピネータパーサによる構文解析器における言語指向のエラー報告」を学会発表した。構文解析器を記述するためのライブラリである parsec を対象に、構文解析の誤りに関するエラー報告をその修正に寄与するような内容にすることを目標に、エラー関係のライブラリ関数の利用法や、構文解析器のよい設計方針について論じている。

コンパイラの主要な目的は正しい入力に対する効率的なコンパイルであり、誤りのある入力に対するエラー報告は「利用者として専門家を想定している」という弁解の下で対応は遅れている。また実際、誤りの形態は無数に存在し、それに対する「正しい」対応が何かを定めることがまず困難といえる。本論文は、そのような状況を変えるための基盤として、構文解析におけるエラー報告に有意義な情報を持たせる方法に取り組んでいる。

さらに発展させた成果を報告した「パーサコンピネータにおける網羅的なエラー報告候補集合の生成とそれに基づくエラー報告」は、言語処理系における構文解析器を実現するためのライブラリに対して、構文エラーの報告をより理解しやすいものにするための試みである。

(4) 正しく問題を作成するための支援方法

コンテンツとしての演習問題を拡充する際には、採点の自動化に対応するためのコストが従来の(紙ベースの)演習問題の作成よりも労力を必要とする。このコストを軽減し、かつ正確な自動採点の実現のため、問題作成を支援する技術について研究することは本テーマにおいて非常に重要である。

情報処理学会の研究報告として「分岐カバレッジ向上を目的とした静的解析を用いたテストケース自動生成」を発表した。ここで提案した手法を用いることで、課題に対して受講者から提出されるプログラム答案の正誤を判定する機構について、より判定の精度を高めることが可能となる。これは適切なコーナーケースのテストを加えるための手法である。

「プログラミング演習における自動正誤判定の精度向上を目的とするミュレーション手法」として学会発表した。ソフトウェア工学の分野で利用されているミュレーションテストの手法を応用して、正誤判定の条件に不足があればそれを指摘するシステムを提案している。

(5) その他

当初の研究目的で掲げた目標の他にも、Eラーニングの活用にあ資するいくつかの研究成果を得て

いる。

・リアルタイム解答状況提示システム

e-Learning 演習における学習意欲を刺激するリアルタイム解答状況提示システムを開発した。これは、オンラインでの試験中に、各小問の回答率や得点状況のヒストグラムなどをリアルタイムに表示するものである。単に講義者が状況を把握するためにも利用できるが、これを受験者に開示することで、各自が自分の位置づけを把握でき、優秀な学生は自己評価を高めることができ、努力不足の学生にはその現実を可視化することで学習の必要性を理解させることができる。

・プログラムの振る舞い理解支援

理解には様々な段階があり、プログラミング教育でいえばプログラムが作成できるよりも手前の段階として、例題プログラムの挙動を推測して意味を理解できる、がある。この段階の学習を支援するために、プログラムの動作理解を支援する技法について研究を行った。その成果を「Haskell を対象とした先行評価を模したトレースの実現手法」として学会発表した。Haskell は遅延評価に基づいて実行が行われるため、プログラムに誤りがあるとき、人の、特に初心者の直観とは異なるタイミングやエラー内容でのエラーが発生する。この認識のずれを補完するようにプログラムの振る舞いを提示する手法を提案している。

また、「Haskell を対象とした値コンストラクタへの関数注入によるトレース手法」はプログラムの実行時の振る舞いを観察する新たな手法を提案している。この提案手法は初学者にとどまらず、実務レベルのプログラムも対象にしている。

・Web 上のプログラミング言語実行系

E ラーニングシステムが Web を介して利用するものであること、またユーザのコンピュータにソフトウェアをインストールして利用するのではなくブラウザ上で即座に利用できる web アプリという形態が普及しつつあることから、Web 上で利用可能なプログラム言語処理系、実行系の開発を行った。その一つとして、プログラミング教育用言語 Sunaba のプレイグラウンド環境を開発した。また、後述する独自の Haskell 処理系も同様に Web 上で利用できるようになっている。

・独自の Haskell 処理系の開発

中途より、プログラム作成課題に至る前の学習段階を支援することの重要性を認識し、プログラムの動作理解支援を追加課題として設定した。そのためには教育に適したプログラミング言語処理系・実行系が必要と考え、独自の Haskell 処理系の開発を始めた。「Haskell 処理系 HiTS を用いたスペースリーク検出手法」はこの処理系の応用例で、意図しない実行時の振る舞いの発見を支援する手法を提案しており、上述の振る舞い理解支援の一部をなしている。

今後について

提案手法は教育対象のプログラミング言語として設定した Haskell に対して具体的に実装されているが、中核的に使用しているランダムテスト技法である QuickCheck はその有用性から様々な言語に移植されている。これを活用することで、本研究成果を他の様々な言語に展開することは比較的容易に可能であろう。

掲げた研究課題のうち、十分な成果を得られなかった(2) 入力された誤答に対する画一的でなく適応的なフィードバックの提示方法については、さらに分析を進める他、より効果が期待できる中上級レベルのプログラミング演習を対象としてその可能性を探りたい。

昨今の事情により全国の大学で遠隔教育の導入が急激に進められたが、本研究の成果を利用している本学のプログラミング入門講義では、反転授業の活用と相まってほぼ従来と変わらない教育が実施できている。この成果が広く普及することを願う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤 知樹, 大久保 弘崇, 粕谷 英人, 山本 晋一郎 |
| 2. 発表標題 Haskellを対象とした値コンストラクタへの関数注入によるトレース手法 |
| 3. 学会等名 第22回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊東忠彦, 大久保弘崇, 粕谷英人, 山本晋一郎 |
| 2. 発表標題 パーサコンビネータにおける網羅的なエラー報告候補集合の生成とそれに基づくエラー報告 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 第204回 ソフトウェア工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田航, 大久保弘崇, 粕谷英人, 山本晋一郎 |
| 2. 発表標題 Haskell処理系HiTSを用いたスペースリーク検出手法 |
| 3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 ソフトウェア工学の基礎ワークショップ FOSE2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中井 舞人, 山本 晋一郎, 粕谷 英人, 大久保 弘崇 |
| 2. 発表標題 プログラミング演習における自動正誤判定の精度向上を目的とするミュートーション手法 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤 知樹, 大久保 弘崇, 粕谷英人, 山本 晋一郎 |
| 2. 発表標題 Haskellを対象とした先行評価を模したトレースの実現手法 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊東忠彦, 大久保弘崇, 粕谷英人, 山本晋一郎 |
| 2. 発表標題 コンビネータパーサによる構文解析器における言語指向のエラー報告 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 堀内哲熙, 大久保弘崇, 粕谷英人, 山本晋一郎 |
| 2. 発表標題 Haskellプログラムへの状態モナドの自動挿入 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 額田 蓮, 大久保弘崇, 粕谷英人, 山本晋一郎 |
| 2. 発表標題 再利用のためのWebページからのHTML/CSSテンプレート生成 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田誠也, 大久保弘崇, 粕谷英人, 山本晋一郎 |
| 2. 発表標題 分岐カバレッジ向上を目的とした静的解析を用いたテストケース自動生成 |
| 3. 学会等名 情報処理学会 |
| 4. 発表年 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|