

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11567

研究課題名(和文) プログラム挙動可視化ツールTEDViT普及のためのモデル授業・教材ライブラリ開発

研究課題名(英文) Development of model courses and educational materials for popularizing program visualizing tool TEDViT

研究代表者

伊東 幸宏 (ITO, Yukihiro)

静岡大学・情報学部・名誉教授

研究者番号：20193526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：(1)「動的データ構造」「オブジェクト指向型言語」「アルゴリズムの段階的詳細化」「情報セキュリティ学習」など多様な学習対象・学習方法について、我々が先行研究で開発したプログラム挙動可視化ツールTEDViTを導入したモデル授業計画を設計し、それぞれの授業計画に沿ったシステムの機能拡張を行った。(2)以上の成果をもとにモデル授業を実践するとともに、教材データライブラリを構築した。(3)一般教員が挙動の「見せ方」を容易にカスタマイズできるオーサリングシステムを開発した。(4)以上の成果について、実授業や模擬授業環境における実験的評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、プログラムの挙動を可視化するシステムは他にも数多く開発されているが、学習対象毎に注意深く設計された「見せ方」を授業担当教員がカスタマイズできるシステムは他に類例がない。
社会的意義としては、これまで先進的技術に基づく多くのプログラミング学習支援システムが開発されているが、ほとんどが論文発表のための小規模な実験を行うにとどまっておき、本研究のように開発したシステムの普及をめざして、システムを導入した授業を多様なテーマで実践し、かつ授業の方法論やオーサリングツールなどの各種教育資源を整備している研究は社会的価値が高い。

研究成果の概要(英文)：(1) We have constructed model plans for lectures in which our visualizing tool of program behavior named TEDViT is fully applied. TEDViT was developed our previous research. The lectures have various learning purposes: “dynamic data structure”, “object oriented programming language”, “stepwise refinement of algorithm”, “security of computer systems” and so on. (2) We have actually conducted the lectures based on the result (1), and have constructed learning materials for the lectures. (3) We have developed an authoring tool that enable for teachers to customize presentation design of behavior of target programs easily. (4) We have conducted experimental evaluation on these results in actual lectures or mock lectures.

研究分野：教育工学 学習教育支援システム 知識処理システム ヒューマンインタフェース

キーワード：学習支援システム プログラミング教育 視覚化 教材開発 オーサリングシステム

1. 研究開始当初の背景

プログラミング学習において、プログラムの挙動を GUI 上で可視化することは極めて有効であるとされている。これまでも Jeliot3[Moreno04]、ViLLE[Rajala07]、JUUhistle[Sorva13] など多くのプログラム挙動可視化システムが構築されている。しかしながらこれらのシステムは、学習対象であるプログラムによらず一定のデザインでしかプログラムの挙動を可視化できないという共通の欠点を持っている。プログラムの挙動をわかりやすく説明する図を描くには、対象のプログラムの性質に合わせて、変数などのオブジェクトの形や配置・強調点を示すための色使い・処理の意味の理解を補助するために適切なタイミングで提示されるメッセージなど、いわば「見せ方」を注意深くデザインする必要がある。実際、人間の教師が描く説明図ではこの「見せ方」が工夫されている。

研究代表者らはこの点に着目し、プログラムの挙動可視化ツール TEDViT (Teacher's Explaining Design Visualization Tool) を開発した。TEDViT はプログラムコードを解析し、プログラムの対象世界(スタック、木、表など当該プログラムの処理対象データで構成される世界)の上での挙動を実行ステップ毎に可視化する。その際教師は「可視化ルール」を記述することで、上述の「見せ方」をデザインできる。「可視化ルール」にはプログラム内の変数などのオブジェクトを画面内のどの座標に・どのような形状で・大きさを・色使いで表示するかを指定できる。またプログラム中である条件を満たした場合に提示するメッセージ枠についても上記変数と同様のプロパティとメッセージ内容を指定できる。以上により TEDViT では人間の教師が描くプログラムの挙動説明図に近いクオリティのプログラム挙動トレースが可能となっている。

TEDViT は既に、研究代表者らが担当する大学理工系学部授業、大学文系学部授業、高校生向けプログラミング講座、社会人向けプログラミング講座にて試験利用されており、その有効性も確認されている。しかしながら TEDViT を含め、プログラム挙動可視化システムは未だ広く一般のプログラミング教育に普及しているとは言い難い状況にあった。

以上のように、可視化ルールを記述することでプログラムの挙動の「見せ方」をカスタマイズできるシステムを構築する技術は既に開発されていた。しかしながら本システムがプログラミング担当教員に広く活用されるには至っていなかった。その原因は、このシステムを用いて効果的・魅力的な授業を設計する方法論が確立されていないことにあると我々は考えた。このことから我々が行うべきことは、プログラミング学習における多様な学習テーマに対して、TEDViT を十分に活用したモデル授業計画を策定し、モデル教材を作成し、実授業にこれを投入することであると思いついた。さらには現場教員の TEDViT 利活用を促進するには、TEDViT の教材を簡単に作成できるオーサリングシステムも必要であると考えた。以上が研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

本研究は以下の事柄を達成することを目的とする。

- (1) 多様な学習対象・学習方法について、我々が先行研究で開発したプログラム挙動可視化ツール TEDViT を導入したモデル授業計画を設計し、それぞれの授業計画に沿ったシステムの機能拡張を行う。具体的学習対象・学習方法としては「動的データ構造」「オブジェクト指向型言語」「アルゴリズムの段階的詳細化」「ひな型提示学習」「情報セキュリティ」などを取り上げる。
- (2) 以上の成果をもとにモデル授業を実践するとともに、教材データライブラリを構築する。
- (3) 一般教員が挙動の「見せ方」を容易にカスタマイズできるオーサリングシステムを開発する。
- (4) 以上の成果について、実授業や模擬授業環境における実験的評価を行う。

3. 研究の方法

(A) モデルカリキュラムの設計とシステムの機能拡張

研究代表者・分担者らが所属する教育機関におけるプログラミング授業や学外で開催する講座などについて、そのカリキュラム中で TEDViT の使用に適した学習テーマを抽出する。その授業担当者らとの議論・インタビューを通じて、TEDViT を使用した授業計画を設計する。対象とする大学カリキュラム・その他の講座は以下のようなものである。

- ・理系大学生 静岡大学情報学部情報科学科カリキュラム
- ・理系大学生 enPiTSec「PBL 演習-0 Basic SecCap 演習(サイバー攻防基礎演習)」
- ・文系大学生 常葉大学経営学部経営学科カリキュラム
- ・高校生 情報オリンピック参加者向けプログラミング講座(静岡地区で開催のもの)
- ・社会人 社会人向け C プログラミング講座(組込ソフトウェア技術コンソーシアム主催)

(B) 教材データライブラリの構築と実授業への試験的導入、実験的評価

(A)で述べたモデル授業で用いる教材データ（学習対象プログラムと可視化ルール集）を作成する。教材データは実授業で使用して実験的に評価し、担当教員や学生など現場の意見を取り入れて随時改善する（デザイン研究アプローチ）。

(C) オーサリングシステムの開発

TEDViT の可視化ルールの編集と実行テストを支援する GUI ベースのツールを開発する。可視化ルールはテキストベースであるが、本ツールでは可視化されたオブジェクトをマウスで操作することにより対象オブジェクトの見せ方を定義できる。これにより一般の教員が可視化ルールを定義・変更することがより容易になる。

4. 研究成果

(A-1)TEDViT を活用した授業のモデルカリキュラムの設計とシステムの機能拡張

(A-1) C 言語ポインタの学習への TEDViT の適用：

C 言語初学者がしばしば困難を感じるポインタの取り扱いについて、ポインタを扱うプログラムの挙動を視覚化し、また GUI 上のオブジェクト（通常変数、ポインタ変数、ポインタによる参照を意味する矢印など）を学習者がダイレクトマニピュレーションすることによって自らの理解を確認できる学習教材を作成した。

(A-2) 学習者プログラム挙動可視化のための TEDViT の機能拡張と発見学習への適用：

TEDViT の基本機能は教師が作成したサンプルプログラムの挙動を可視化することであるが、これを学習者が一定の自由度の範囲内で作成したプログラムの挙動を可視化できるよう拡張した。またこの拡張システムを大学の実授業に導入し、システムのロバストネス、ユーザビリティ、主観的な学習効果について実験的に評価し、肯定的な結果を得た。

(A-3) オブジェクト指向プログラミング学習への TEDViT の適用：

TEDViT をオブジェクト指向言語におけるオブジェクト、クラスなどの概念の視覚化に対応できるよう機能拡張した。これによりオブジェクト指向型プログラムの挙動を再現でき、この種のプログラムの学習に TEDViT を適用できるようになった。

(A-4) 動的データ構造の学習への TEDViT の適用：

TEDViT を機能拡張し、ポインタの値の変化による指示対象メモリ（動的変数）の変動を矢印を用いて視覚化できるように、可視化ルールの自動生成機能を実現した。これにより、拡張前のシステムよりも必要とされる視覚化ルールの記述量が激減し、教材作成者のルール記述に要する時間も現実的な水準まで改善されることが実験的に明らかになった。

(A-5) 変数値の変化を視覚化することが有用なアルゴリズムの学習への適用：

変数の持つ値とその描画時の見え方（たとえば画面上の変数オブジェクトの大きさ）を連動させるなど、値の変化の様子をより直観的に理解しやすい描画を可能にする機能を TEDViT に追加した。これにより、物理シミュレーションなど値の変化の観察が重要な意味を持つプログラムの学習において、より理解しやすい教材を開発した。

(A-6) アルゴリズムの段階的詳細化を学ぶ学習への TEDViT の適用：

TEDViT はステートメント単位の挙動視覚化が可能だがブロック単位の視覚化はできない。またアルゴリズム学習では段階的詳細化など挙動再現の単位を徐々に変更することも有効である。本研究では段階型拡張 PAD を利用して挙動再現時のブロック単位を学習中に変更出来るよう TEDViT を拡張した。

(A-7) 情報セキュリティの学習への TEDViT の適用：

セキュリティ上重要な概念であるバッファオーバーフロー・バッファアンダーランの発生する仕組みの理解とソースコード実装の関係性の学習のために、脆弱性のあるプログラムの挙動を TEDViT により視覚化した教材を構築した。この教材を用いて、enPiTSec「PBL 演習-0 Basic SecCap 演習（サイバー攻防基礎演習）」（2019 年度）を実施した。当該科目は学部生（3 年生）を中心とした科目で、セキュリティを攻撃側・防御側の両方の観点から演習を通して学ぶ設計である。

(A-8) 雛形提示学習への TEDViT の適用

雛形を渡すタイプのプログラミング演習の学習支援を行うために、教師が指定した範囲のプログラムを学習者が自由に入力できるように TEDViT を機能拡張した。この枠組みにより、学習

者は自らが作ったプログラムの断片部分が意図通りに動いているか確認できる。コンパイルはできているが意図通りの結果を出力しないプログラムのどこが誤りか確認しつつプログラムを修正することがより容易になる。

(B)教材データライブラリの構築と実授業への導入・実験的評価

(A-1)～(A-8)は全て研究代表者・分担者が担当する大学の授業や大学主催の講座等で実授業・模擬授業として実践しており、それぞれの教材データはライブラリとして保存されている。それぞれの授業実践において学習効果を実験的に評価し、ねらいとする一定の効果を挙げていることを確認した。

(C) TEDViT 用オーサリングシステム (教材開発支援システム) の開発

TEDViT の可視化ルールの編集と実行テストを支援する GUI ベースのツールを開発した。可視化ルールの発火順序はルール中に陽に示されていないため、対象プログラム実行プロセス中の特定の時点の見え方を変更したい場合に、どのルールを編集すればよいか探すのにコストがかかるという問題があった。この問題に対し本ツールでは可視化されたプログラム実行プロセスのタイムラインが表示され、見え方を変更したい時点に関わるルールをすぐに特定できる。これにより一般の教員が可視化ルールを定義・変更することがより容易になった。

【参考文献】

- [Moreno04] Moreno, N., Sutinen, M. E. "Visualizing programs with Jeliot 3", AVI 04: Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, 373–376 (2004).
- [Rajala07] Rajala, T., Laakso, M. J., Kaila, E., Salakoski, T. "VILLE: a language-independent program visualization tool", Proceedings of the Seventh Baltic Sea Conference on Computing Education Research-Volume 88, 151-159 (2007).
- [Sorva13] Sorva, J., Karavirta, V., Malmi, L. "A review of generic program visualization systems for introductory programming education", ACM Transactions on Computing Education (TOCE), 13(4), 15 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koichi YAMASHITA, Miyu SUZUKI, Satoru KOGURE, Yasuhiro NOGUCHI, Raiya YAMAMOTO, Tatsuhiko KONISHI and Yukihiro ITOH	4. 巻 1
2. 論文標題 GUI Based System for Effortless Program Visualization Creation Using Time Series Information	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE2021	6. 最初と最後の頁 579-588
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 Hiroyuki SOMA, Satoru KOGURE, Yasuhiro NOGUCHI, Koichi YAMASHITA, Raiya YAMAMOTO, Tatsuhiko KONISHI and Yukihiro ITOH	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of Mapping Function between Variable Value and Object Properties for Program Behavior Visualization Tool TEDViT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 WIPP Proceedings of ICCE2021	6. 最初と最後の頁 694-696
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 Koichi YAMASHITA, Keisuke SAKATA, Satoru KOGURE, Yasuhiro NOGUCHI, Tatsuhiko KONISHI, Yukihiro ITOH	4. 巻 -
2. 論文標題 Learning Support System for Understanding Pointers Based on Pair of Program Visualizations and Classroom Practices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE2020	6. 最初と最後の頁 658-663
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 Raiya YAMAMOTO, Yasuhiro NOGUCHI, Satoru KOGURE, Koichi YAMAMOTO, Tatsuhiko KONISHI, Yukihiro ITOH	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental Design of a Learning Support System for Algorithm Refinement in Debugging Learning for Novice Programming Learners	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of TALE2020	6. 最初と最後の頁 340-343
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 Satoru KOGURE, Kento OGASAWARA, Koichi YAMASHITA, Yasuhiro NOGUCHI, Tatsuhiro KONISHI, Yukihiro ITOH	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of Programming Learning Support System to Object-Oriented Language	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE2019	6. 最初と最後の頁 348-350
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 Koichi YAMASHITA, Yuta HIRAMATSU, Satoru KOGURE, Yasuhiro NOGUCHI, Tatsuhiro KONISHI, Yukihiro ITOH	4. 巻 -
2. 論文標題 Extending Program Visualization System Based on Teacher 's Intent of Instruction to Support Learning Dynamic Data Structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE2019	6. 最初と最後の頁 354-356
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 Satoru KOGURE, Yun YE, Koichi YAMASHITA, Yasuhiro NOGUCHI, Tatsuhiro KONISHI, Yukihiro ITOH	4. 巻 1
2. 論文標題 A Learning Support System for Understanding Pointers in C Language Based on Program Behavior Visualization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE2018	6. 最初と最後の頁 355-357
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 Koichi YAMASHITA, Daiki TEZUKA, Satoru KOGURE, Yasuhiro NOGUCHI, Tatsuhiro KONISHI, Yukihiro ITOH	4. 巻 1
2. 論文標題 A Learning Support System for Visualizing Behaviors of Students ' Programs Based on Teachers ' Intents of Instruction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE2018	6. 最初と最後の頁 761-766
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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 相馬 洗希, 小暮 悟, 野口 靖浩, 山下 浩一, 山本 頼弥, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 プログラム挙動視覚化ツールTEDViT におけるオブジェクトプロパティへの変数値写像機能の構築
3. 学会等名 教育システム情報学会第46回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相馬 洗希, 小暮 悟, 野口 靖浩, 山下 浩一, 山本 頼弥, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 段階型拡張PADに基づくアルゴリズム学習に対応したTEDViTの開発
3. 学会等名 人工知能学会 先進的学習科学と工学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 友佑, 小暮 悟, 野口 靖浩, 山下 浩一, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 オブジェクト指向言語に対応したプログラム挙動視覚化システムTEDViT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 2022年

1. 発表者名 鈴木 友佑, 小暮 悟, 野口 靖浩, 山下 浩一, 山本 頼弥, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 プログラム挙動視覚化システムTEDViTの雛型提示型演習への対応
3. 学会等名 人工知能学会 第91回 先進的学習科学と工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 友佑, 小暮 悟, 野口 靖浩, 山下 浩一, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 プログラム挙動視覚化システムTEDViTの発見学習利用と視覚化ルール自動生成機構の構築
3. 学会等名 人工知能学会 第88回 先進的学習科学と工学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊原 大貴, 野口 靖浩, 小暮 悟, 山下 浩一, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 Testabilityに基づくプログラム設計学習支援システムの構築と教育実践
3. 学会等名 電子情報通信学会, 教育工学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小暮 悟, 木下 恭輔, 山下 浩一, 野口 靖浩, 小西 達裕, 伊東 幸宏
2. 発表標題 プログラミング演習中の学習者の行動分析に基づく課題依存型行き詰まり検出器の試作
3. 学会等名 人工知能学会 第32回全国大会
4. 発表年 2018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
研究 分担者	小西 達裕 (KONISHI Tatsuhiko) (30234800)	静岡大学・情報学部・教授 (13801)	

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	小暮 悟 (KOGURE Satoru) (40359758)	静岡大学・情報学部・准教授 (13801)	
研究分担者	野口 靖浩 (NOGUCHI Yasuhiro) (50536919)	静岡大学・情報学部・准教授 (13801)	
研究分担者	山下 浩一 (YAMASHITA Koichi) (30340110)	常葉大学・経営学部・准教授 (33801)	

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