

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：35403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750092

研究課題名(和文) 生体情報を活用した視覚誘導に基づくプログラミング学習の支援

研究課題名(英文) Supporting programming learning using biological information mainly eye movement

研究代表者

松本 慎平 (Matsumoto, Shimpei)

広島工業大学・情報学部・准教授

研究者番号：30455183

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)：プログラミング教育を広く普及させるためには、プログラミングを不得手とする学習者の存在を無視することはできない。本研究では、プログラミング教育の中でもトレースやデバッグなどの問題提示型教材を対象にして、眼球運動と主とした生体情報を活用して、視覚誘導に基づきプログラミング技能を養成するシステムの開発に繋がるような基礎データを収集し分析できるようにすることを目的とした。本研究では、非言語的な認知理解過程を推定する手段として視線運動に着眼し分析した結果と、読解学習支援システムを開発し実講義での学習支援から得た反応パターンを分析した結果を報告する。

研究成果の概要(英文)：To efficiently support novice programming learners feeling programming difficult, clarifying the cause of preventing programming understanding, and developing a new teaching method appropriate for their understanding degree would be necessary. The objective of this study is to examine the causes preventing novice programming learner's understanding from the programming education of reading source codes. This study firstly develops a learning support system for source code reading. Secondly, the authors have assumed that the degrees of programming experience and understanding would be estimated by using eye movement. Therefore, this study analyzes the characteristic of eye movement depending on the degree of student's programming experience / understanding during reading source codes.

研究分野：教育工学，社会システム工学，計算知能

キーワード：プログラミング学習 プログラミング読解 学習支援 眼球運動 読解学習

1. 研究開始当初の背景

昨今、プログラミングは特に重要な技能として社会的にも広く認識されている。一方で、プログラミングは、計算機システムの動作原理の理解、経験に裏付けられる創造力や表現力に加え、記憶力、数学力、国語力、論理的思考力、構造的把握力など、多岐に渡る基本素養を複雑に組み合わせた技能であると考えられる反面、プログラミングの技能標準やプログラミングの学習指針は十分に検討されていないため、プログラミング力の養成指針や到達目標、また、プログラミングで最も重視する基本素養は、多くの教育現場では未だ教授者の教育観に強く依存している。学習者のプログラミング力は、成績という観点では、教授者の教育観に基づく次元尺度で決定される。この場合、数理的論理思考力を強く要求する 경우가多く、これを得意とする学習者層は教授法や内容に依存せず優れた評価を獲得できる。反面、その他の学習者は、プログラミングに適正のない層として評価される。したがって、学習者の到達度は、二つの極端な層に分布する傾向にあり、この傾向は、年齢や性別、教育水準の差に関わらず、等しく発生し普遍的なものであると指摘されることも多い。日本のソフトウェア開発力の向上は、国際競争の中で不可欠である。したがって、プログラミングの学習評価が優れていない学習者を試験の結果のみで適正のない層として判断すべきでなく、学習者の理解度や力量の詳細を認知の水準から把握した上で、学習者の技能向上に効果的な適応教育を展開すべきであると考えられる。



図1 本研究の全体像及び流れ

2. 研究の目的

本研究では、プログラミングそのものは言語であること、経験主導型の技能であることの2点に着眼する。そして、プログラミング教育の中でもトレースやデバッグなどの問題提示型教材を対象にして、眼球運動と主とした生体情報を活用して、視覚誘導に基づきプログラミング技能を養成するシステムの開発に繋がるような基礎データを収集し分析できるようにすることを目的とした。本研究では、プログラミングが学習経験に強く関係する暗黙的思考技能であることから、蓄積経験が強く反映される眼球運動を分析する

ことで、プログラミングの技能や理解度を推定可能であると考えた。特に本研究は、プログラミングを不得手とする学習者層を対象とした学習支援システム開発に繋がるような知見の獲得を目指したものである。本研究での最終的な目標としては、生体情報に着眼し、プログラミング技能を感覚的に獲得可能な教材を構築することと位置付けている。図1に、本研究の全体像及び流れを表したものを示す。本研究での主な成果は、図1の①と②に関するものである。すなわち、①の具体的成果として、プログラミング読解教材の自動生成及び提供システムの開発を行った。②の成果として、学習者のソースコード読解過程での眼球運動を計測し、学習者の技量や特徴に応じた読解戦略の差異を眼球運動の観点から説明できることを明らかにした。当初の計画として、①により生成されたソースコードを題材として、その読解過程での視線運動を計測し分析することまでが本研究の課題に含まれていたが、本研究の取り組みの限りでは、①と②の成果の統合までには至っていない。なお、プログラミング読解の様子を眼球運動から調査する研究は既に報告されているが、プログラミングを不得意とする学習者層を対象として、成熟的に学習を進めるための学習支援法・教授法を構築する目的で眼球運動を動員した研究は、調査の限りでは確認されていない。

本研究では、C言語を想定して学習教材を開発した。次に、プログラミングを得意とする学習者のコーディング行動の特徴を眼球運動から明らかにした。得られた知識は、たとえば、利用者の眼球運動をリアルタイムで追跡・取得し、注目すべき箇所を強調表示して視覚の動作を誘導することや、コード修正や補完の洞察を促すなどで活用することを考えている。

3. 研究の方法

本研究では、ソースコード読解過程での視線運動の分析を対象とした。読解を学習教材に選定した理由は、読解の手軽さとトレース・デバッグ学習の基礎力向上に対しての有効性、プログラミングの基本である順次処理の反復学習の有効性を踏まえた上で、外的構造の意味に頼らない、プログラムソース自身が保持する内的な構造にのみ依存する学習課題であってもプログラムの理解過程と見なすことができると考えたからである。

本研究では、プログラムの構造の観点から視線運動を説明付け、学習者の思考過程を明らかにすることを目指した。そのためにはプログラムの構造ごとにどのような視線のパターンが存在するかを調査する必要がある。実際のソースコードには、変数の依存関係以外にプログラミング言語特有の書き方やアルゴリズムといった、内的構造とは直接的に関係のない要素が多く含まれる。これらは経験値による影響を強く受けるものと予測さ

れ、よって、実際のソースコードの利用は本研究の目的にはそぐわないと考えられる。加えて、読解課題を手で生成する場合、プログラムの複雑さや変数名、演算子、代入する値など、プログラムの構造以外の要素が問題作成者の意図のもとで決定されることになる。よって、プログラムの構造ごとの視線パターンを明らかにする上での外的な意味を極力排除すべきであると考えた。そこで、ソースコード単体には、特定の意味、すなわち、目的を持たせないようにソースコードを自動生成可能なシステムを開発した。プログラムに長けている者は問題領域の知識を豊富に有しており、彼らはその知識を利用しているという示唆を踏まえ、問題領域の知識に依存しない形式で問題を提示することで、我々の恣意性を排除した課題を提示できると考えている。これは、任意の規則で生成され、プログラムの内的な構造にのみ依存するソースコードであり、言語仕様に関する最も基本的な知識と日常で必要とされる程度の計算力のみの影響を考慮すれば十分である。なお、本研究では、非常に短い命令で構成されるソースコードを読解課題とし、加えて、理解できるまで何度も読解して良いというプロトコルを設計したため、記憶力の影響も最小限にとどめている。

上述の指針に基づき、命令文構築方式と変数設定方式を構築し、読解学習システムとして利用可能な Web ベースのソースコード自動生成システムを構築した。そして、プログラミングの基本を既に習得している大学生を被験者として、視線運動計測実験を行った。眼球運動計測には、トビー・テクノロジー社製 X2-30 アイトラッカーを使用した。

ソースコード読解過程中的の眼球運動計測実験では、まず、一般的な講義などで取り上げられるソースコードを対象として、学習者がソースコードを読解する過程に技量など学習者の特徴に応じた差異が視線に表出するかどうかを明らかにしたうえで、本研究で開発したソースコード自動生成システムを用いて眼球運動計測実験を行った。

4. 研究成果

(1) 読解教材用ソースコード自動生成及び提示システム

開発したシステムは、C 言語の読解学習を対象としたものであり、ソースコードを題材とした問が自動生成され学習者に提示される。生成されるソースコードは外的な目的のもとでの処理を行うものではなく、外的な意味を持たない処理の連続である。ただし、プログラム自身が持つ構造自体には意味を持っている。生成されるソースコードは数十行の短いものである。

開発システムは Web アプリケーションであり、Chrome など HTML5 に準拠したブラウザでの動作を推奨するものである。システムは Apache 2.4.7 でデータ入出力を行っており、

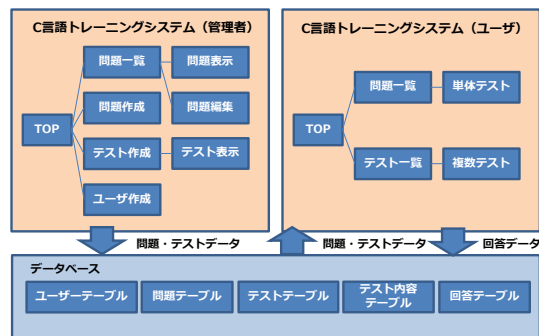


図2 システムの機能一覧

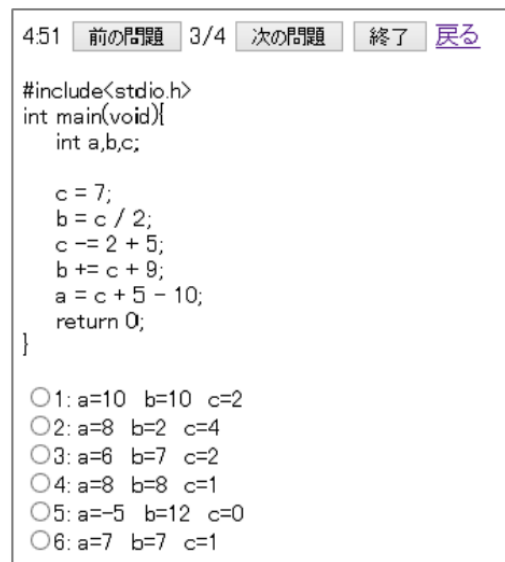


図3 テストの動作画面(多肢選択方式)

問題提示には JavaScript ライブラリである jquery 1.7.2, 問題データ管理には MySQL 5.6.16 を用いている。

アプリケーション自体は、php 5.5.9 で開発されている。図2はシステムに実装した機能の一覧を表したもので、図3はプログラミング学習者が使用するテスト問題の1例であり、この場合は多肢選択方式の問題が提示されている。開発システムが持つ問題生成機能では、任意の規則に基づいて問題を生成できる。「変数の数」、「命令文の数」、「演算対象の変数の数」、「利用演算子(代入演算子)」、「分岐・繰り返し利用の有無」、「条件判定文の記述に関する制約」など設定を事前に行うことで、条件に合ったソースコードを生成できる。なお、学習者の理解の度合いを確認するため、意味のない代入処理や、意味のない条件判定処理の有無を設定できるようになっている。設定情報を読み取った後、ヘッダ部の記述処理が行われ、変数の宣言記述が行われる。その後、設定された命令文数だけ本文生成処理が呼ばれ、C言語のプログラムが形成される。

開発したシステムの学習支援システムとしての有効性を明らかにするため、情報学を専攻するプログラミング初学者を対象とした講義内で本システムを利用し、プログラム読解指導の支援を試みた。本講義は、大学1年生のプログラミング未経験者を対象としたものであり、教授されるプログラミング言

語はC言語である。15回の講義終了後のアンケートから、自動生成された読解教材は基本的なプログラミング知識の修得に向けてある程度の貢献があったと大部分の学習者に感じられていたことを確認した。

```
#include <stdio.h>

int main(void)
{
    int i;
    for (i = 1; i <= 10; i++) {
        printf("メッセージ¥n");
    }
    return 0;
}
```

(a) 被験者1の視線運動

```
#include <stdio.h>

int main(void)
{
    int i;
    for (i = 1; i <= 10; i++) {
        printf("メッセージ¥n");
    }
    return 0;
}
```

(b) 被験者2の視線運動

図4 学習者の視線データ

(2) 読解過程中的視線運動の分析

学習者にはプログラムを読ませ、どのような結果が表示されるかを回答する問題を複数提示し、視線運動を計測した。一例として示している図4の視線データは、どちらも不正解の解答をした学習者である。一方で、視線データから学習者によって理解度が異なることが視線から確認された。具体的には、被験者1はプログラムの重要となるキーのラインを把握していることがわかる。ループのfor文のデータの流れも把握しているが、解答に至らなかったことが示されている。被験者2に関してはプログラムの重要なポイントが理解出来ておらず、何度も丁寧に1文、1文理解をしようと繰り返し読み直している様子が確認できる。このように、学習者に応じて、視線情報から学習者の特徴を読み取れることを確認した。

次に、被験者を増やして視線運動の詳細な分析を行った。被験者6名に対して行ったインタビューの結果から、プログラミングに対する得手不得手の主観評価とプログラミング関連科目の成績を参考として、被験者を得意群2名、普通群2名、不得意群2名の計3群に分類した。図5は、3種類のソースコードを例として取り上げ、群に応じた実験結果を示している。図5では、得意群をG、普通群をM、不得意群をBで表記し、群に応じた結果9種類の結果を(問題ラベル-群)の記法でそれぞれ示しており、各ソースコードに対して被験者が注目していた箇所をヒートマップ提示している。なお、実験では、被験者の理解度を問うために、図5のソースコードの中で改行コードやインデントの削除を任

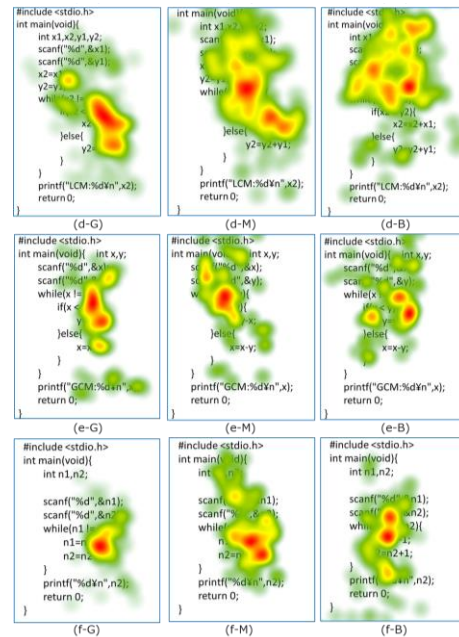


図5 技能に応じた注視個所の相違

意に行っている。

図5の注目箇所から群に応じた傾向が示されており、以下に結果とその理由を群ごとにまとめる。得意群では、注視箇所は狭い範囲に集まっており、とりわけ処理の中で重要な箇所を注視していたことを確認できる。たとえば条件判定や代入文に注目していたことが見て取れるばかりでなく、とりわけ代入文の場合、演算される側への注目が少なかった。注視箇所が集まっていた理由として、得意群2名の視線運動の軌跡や注視箇所が類似していたことにある。次に普通群では、注目箇所が全体的に発散している傾向にある。発散していた理由として、プログラミングの処理を全体的に何度も確認する傾向にあったこと、被験者間で視線軌道に相違が存在していたことがある。最後に不得意群では、普通群と同様に注視箇所に広がりが見られる。とりわけ、変数宣言やヘッダといった処理の中で本質的ではない部分にまで注視が行われていた点や、処理の中で必ず確認が必要な箇所への注視が行われていなかった点は不得意群の特徴である。また、理解度を問うために行った改行やインデントの任意抜粋に反応していたことを見て取れる。以上の理由として、まず注視箇所に広がりが見られる点については、被験者によって視線軌道に多様性が存在していたことがある。一方で注目箇所に広がりが生じなかった場合は、理解が不足していたために読解を途中で中断していた場合であり、実験中の口答説明から確認されている。また、改行やインデントの任意抜粋に反応した理由として、被験者が記憶に留めていない記述パターンであったため、何らかの処理がこの点に存在しているのではないかと、いうことを疑っていた結果であったことが事後インタビューから確認された。

a = -3	b = -5	c = -1	a = 0	a = -7
c = -9	d = -7 - b	a = 9	b = -1 + a	e = -a - 1
b = -1	a = -6	b = a * 4	d = -6	d = 3 + e
c = -a + 9 % c	d = -4 / b	c = b * 7 - c	c = 9	c = -9 - a
a = -a + 1 / b	c = -b + a - 1	a = -c / 6 - b	e = -7 * a % d	c = e / 8 - a
問(a)	問(b)	問(c)	問(d)	問(e)

図5 技能に応じた注視個所の相違

表1 読解フローのまとめ

問	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
仮説フロー	3-5-4	3-1-4-5	3-4-6	4-3-1-2-5	1-2-3-5-6
被験者 A	3-4-5	1-3-5-4	3-4-6	4-3-1-2-5	1-2-3-5-6
被験者 B	3-4-5	3-1-5-4	3-4-6	1-4-3-2-5	1-2-3-5-6

(3) スライシングに基づく読解過程分析

ソースコード読解中学習者はプログラムスライシングと似た思考を行っているという仮定を設定し、開発システムにより自動生成されたソースコードを課題として、その検証を行った。なお、プログラムのソースコードを読解する際、依存関係の一番少ない変数が確定する行から読み始める動作が視線運動から見いだせることを明らかにすることが目的となる。依存関係には、データ依存関係、制御依存関係の2種類が存在するが、本論文では、データ依存関係にのみ着目する。制御構文を追えるかといった技能は、知識依存の高い技能であると考えられる。制御構文が定着していない学習者は、制御構文が絡んだ変数間の依存関係も追うことは困難であると考えられる。よって、以上のプログラム依存グラフの定義のうち、本論文では最も基礎的な変数間の依存関係のみで構成されたデータ依存関係のみに着目した。

C 言語の全般的な基本文やアルゴリズム基礎・演習といったプログラミングの基本を既に習得しており、プログラミングを得意とする大学院1年生2名を被験者として実験を行った。実験課題は、読解教材用ソースコード自動生成システムを用いて生成したソースコードである。5種類のソースコードを読み、それぞれの変数の最終値を求め解答する。

表1に、実験課題のPDGと設定した仮説を元に構成した視線推移のフローと、実験結果から得られた各被験者の視線推移のフローを示す。例えば実験課題(a)の仮説フローは3-4-5となっており、この場合3行目にある変数bを最終値として確定した後、5行目の変数a、4行目の変数cという流れで実験課題を解いていく事を予測したものである。途中、「変数の値を確認するために1行目を見る」といった視線推移は考慮していない。実験の結果、「依存関係の一番少ない変数が確定する行から読み始める」動作が確認された。特に、全ての実験課題から同様の振る舞いが現れたので、仮説を裏付けられる可能性は高いと言える。今後は、データ依存関係を基本とした分析が可能となる。

(4) 視線分析用ソフトウェアの開発

プログラミング読解過程の分析に特化させた視線分析ソフトウェア Eye Processor を

開発した。Eye Processor は、安価に入手可能な The eye tribe に対応したソフトウェアであり、プログラミング教育現場に本提案の成果を広く普及させることを目的に開発されたものである。まず、Tobii X2-30 で取得したデータを Tobii Studio と Eye Processor で処理し、類似の結果(ゲイズプロット、ヒートマップ)が得られるよう出力画像を調整する(ソフトウェア間比較)。次に、類似の結果が得られていることを確認した後、X2-30 と The eye tribe でそれぞれ視線データを取得し、Eye Processor で処理を行うことで、デバイス間性能比較実験を行う。出力画像の類似度は、Perceptual Hash で評価し、被験者は8人とした。ソフトウェア間性能比較を行った結果、PCC(Peak of Cross Correlation)においてゲイズプロットの平均で0.793、ヒートマップの平均で0.627の値を得た。この結果を踏まえて、デバイス間比較を行い、プログラミング読解過程の分析に最適なソフトウェア設定を明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4件)

- (1) K. Okimoto, S. Matsumoto, S. Yamagishi, and T. Kashima, A source code reading based learning support system for novice programming education, Proc. of The 21nd International Symposium on Artificial Life and Robotics, PS3, pp. 765-768 (2016), 査読有.
- (2) T. Kashima, S. Matsumoto, and S. Yamagishi, Proposal of a Method to Measure Difficulty Level of Programming Code with Eye-Tracking, Human-Computer Interaction. Advanced Interaction Modalities and Techniques, Part II, pp. 264-272 (2014), 査読有.
- (3) T. Kashima, S. Matsumoto, and S. Yamagishi, Knowledge Acquisition with Eye-Tracking to Teach Programming Appropriate for Learner's Programming Skill, Proc. of The Third Asian Conference on Information Systems, pp. 287-292 (2014), 査読有.
- (4) S. Matsumoto, S. Yamagishi and T. Kashima, A web based programming learning management system with JavaScript libraries, Proc. of The Second Asian Conference on Information Systems, pp. 324-329 (2013), 査読有.

[学会発表](計 17件)

- (1) 石井元規, 岩井健吾, 松本慎平, 平嶋宗, 林雄介, プログラムを書かせないプログラミング学習支援の可能性検証ー命令を組み立てることによるプログラム作成方式ー, 2015年度教育システ

- ム情報学会学生研究発表会中国地区講演論文集, P02, pp.115-116 (2016年2月29日, 広島市立大学サテライトキャンパス, 広島県広島市)
- (2) 松本慎平, 沖本恒輝, 藤本宣人, 古岡良太, 山岸秀一, プログラムコード読解によるプログラミング導入教育の実践, 第20回日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会講演論文集, S3-1, pp. 35-36 (2015年12月12日, 広島市立大学サテライトキャンパス, 広島県広島市).
- (3) 花房亮, 沖本恒輝, 松本慎平, 山岸秀一, 林雄介, 平嶋宗, 確率モデルによるプログラム読解中の視線運動の分析, 平成27年度(第66回)電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, 27-11 (2015年10月17日, 山口大学工学部常盤キャンパス, 山口県山口市).
- (4) 沖本恒輝, 松本慎平, 加島智子, 山岸秀一, プログラミング読解過程での視線運動のプログラム構造に基づく解析, 平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, OS4-2, pp. 653-656 (2015年8月26日-29日, 長崎大学文教キャンパス, 長崎県長崎市).
- (5) 沖本恒輝, 松本慎平, 山岸秀一, 加島智子, プログラム読解中の注視箇所分析支援システムの開発, 2015 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会講演論文集, 講演ID:39, pp.115-116 (2015年7月18日, 広島市立大学, 広島県広島市).
- (6) 松本慎平, 山岸秀一, 加島智子, プログラミング読解学習教材の適応提供システム, 2015年度人工知能学会全国大会(第29回)講演論文集, 1N2-4 (2015年5月30日-6月2日, 公立ほこだて未来大学, 北海道函館市).
- (7) 花房亮, 山岸秀一, 松本慎平, 加島智子, 機械学習処理に基づいたプログラミング読解中の視線軌道の自動分類, 2015年度人工知能学会全国大会(第29回)講演論文集, 3N3-2 (2015年5月30日-6月2日, 公立ほこだて未来大学, 北海道函館市).
- (8) 杉本稜, 松本慎平, 加島智子, 山岸秀一, プログラム読解学習支援システムの開発とプログラムコードの困難度定量化, 2014年度教育システム情報学会学生研究発表会中国地区講演論文集, P01, pp.119-120 (2015年2月28日, 広島大学東広島キャンパス, 広島県東広島市)
- (9) 花房亮, 沖本恒輝, 山岸秀一, 加島智子, 松本慎平, 視線追跡に基づくプログラミング技能評価に関する研究 - データ分析ソフトウェアの開発 -, 2014年度教育システム情報学会学生研究発表会中国地区講演論文集, A02, pp.105-106 (2015年2月28日, 広島大学東広島キャンパス, 広島県東広島市)
- (10) 北川浩也, 松本慎平, 加島智子, 山岸秀一, プログラム読解学習支援システムの開発と技能分析, 第16回IEEE広島支部学生シンポジウム論文集, B-43, In CD-ROM (2014年11月15日-16日, 広島市立大学, 広島県広島市).
- (11) 沖本恒輝, 松本慎平, 加島智子, 山岸秀一, 青木真吾, プログラミングトレース学習の思考過程推定法の提案, 第39回教育システム情報学会全国大会講演論文集, SG1-2, pp.309-310 (2014年9月10日-12日, 和歌山大学, 和歌山県和歌山市).
- (12) 松本慎平, 山岸秀一, 青木真吾, 竹野英敏, 加島智子, プログラミング学習における視線データを活用した理解度の調査, 平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, OS11-6, pp.1136-1139 (2014年9月3日-6日, 島根大学松江キャンパス, 島根県松江市).
- (13) 内藤将, 山岸秀一, 松本慎平, 加島智子, 視線追跡に基づいたアルゴリズム思考過程の推定, 2014 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会講演論文集, pp.29-30 (2014年7月19日, 広島市立大学, 広島県広島市).
- (14) 都宮隆之, 山岸秀一, 松本慎平, プログラミング学習における間違えの典型パターンに基づいた学習者分類, 教育システム情報学会2013年度学生研究発表会中国支部講演論文集, D2, pp.43-44 (2014年3月1日, 広島工業大学, 広島県広島市)
- (15) 沖本恒輝, 加島智子, 松本慎平, 山岸秀一, 視線追跡に基づいたプログラミング思考過程の推定, 教育システム情報学会2013年度学生研究発表会中国支部講演論文集, D3, pp.45-46 (2014年3月1日, 広島工業大学, 広島県広島市)
- (16) 松本慎平, 感性工学的アプローチによるプログラミング難易度推定, 第15回日本感性工学会大会講演論文集, P10, (2013年9月5日-7日, 東京女子大学, 東京都杉並区).
- (17) 都宮隆之, 山岸秀一, 小野大地, 松本慎平, プログラミング教育における間違典型パターンに基づいた学習者分類, 2013 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会講演論文集, pp.71-72 (2013年7月13日, 広島市立大学, 広島県広島市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 慎平 (Shimpei Matsumoto)
 広島工業大学・情報学部・准教授
 研究者番号: 30455183