

氏名	山口 琢
学位名	博士（システム情報科学）
学位記番号	第71号
学位授与年月日	令和6年9月20日
学位論文題目	思考プロセスを検出できる対話型アプリケーションの提案
論文審査委員	主査 新美 礼彦 副査 奥野 拓 副査 角 康之 副査 伊藤 恵 副査 松本 慎平（広島工業大学）

論文要旨

本研究は新しいアプリケーション・ソフトウェアのあり方を提案する。現在、想定しているのはオフィス・アプリケーションや、企業の情報系システムや、教育・人材育成における教材アプリケーションなどである。それらのアプリケーションは、それらを使って文章を書いたり何か問題解決するときの思考プロセスを検出・測定・分析・評価するのに役立つはずである。従来のアプリケーション研究・開発は、主に文章といった出力に注目し、プロセスについては使い勝手の観点で問題にしてきた。それに対して、本研究は出力を作り出すプロセスに注目する。

このようなアプリケーションを使う業務や教育は、アプリケーションが扱うコンテンツ、アプリケーションが備えるべき性質、アプリケーションが記録する測定データ、測定データの分析方法、分析結果に基づく評価や対応を含む。また、コンピューターシステムとしての安定性・性能、およびアクセシビリティも重要である。アプリケーションを教育における演習教材とすれば、コンテンツは問題、コンテンツを開発する作業は作問、測定データはアプリケーションの操作ログ、操作ログの分析結果に基づく評価・対応は学習・指導となる。本研究を構成するこれらの内容は互いに依存し合っている。「任意のアプリケーションでログを出力して分析すれば知りたいことが分かる」といったものではない。提案するような手法で分析するためには必要なデータがあり、それを記録できるようなアプリケーションである必要がある。

まず、最初の1章で、本研究のモチベーションとして、オフィス・アプリケーションの評判を情報の一貫性の観点から振り返る。また、本研究を重要性をもたらす教育分野のニーズ

を述べる:教育では、答えのない課題に試行錯誤で取り組める人の育成を重要視し始めている。

2章では関連する研究や取り組みの動向を述べる。本研究のヒントとなった、医薬品業界における strategic review や、学習分析の動向である。

3章では提案するアプリケーションや測定データが備えるべき性質、および、そのようなアプリケーションの例として、本研究で開発したアプリケーションを論じる。

アプリケーションが備えるべき性質で重要なものは、ユーザーの各操作をユーザーの認識や方略を表す「用語」と関連付けられることである。ユーザーのメンタルモデルや UI(User Interface)のオブジェクトをそのように設計する。また、障害のある人も一緒に使えるようなアクセシビリティを備える必要がある。このためには、Web アプリケーションとして実装するのが有利である。

測定データでは、前記の UI オブジェクトをライフサイクル全体にわたって追跡できる必要がある。機密性の高いコンテンツを扱えるために、コンテンツそのものを保存しない測定が望ましい。このことは、分析手法にも当てはまる。

このような性質を満たすアプリケーションとして、ワークシート作文の TopicWriter、文章の断片を取捨選択・並べ替えて作文するジグソー・テキスト、プログラム・コードの断片を取捨選択・並べ替えるプログラミングのジグソー・コード、15 パズルなどを開発した。ジグソー・テキストやジグソー・コードではゲームになぞらえて、断片をピース、ユーザーをプレイヤー、問題をパズル問題、パズル問題を解くことをプレイと呼んでいる。これらは、実際の授業などで使われている。本研究は、思考プロセスを顕在化するようなアプリケーションが備える性質や、プロセスを明らかにする方法を提案する。ジグソー・コードなどは、その例である。提案を踏まえて、新しいアプリケーションが開発されたり、既存のアプリケーションがエンハンスされたりすることを期待する。

4章から分析手法を論じる。測定データ(操作ログ)の分析手法は、それによって思考プロセスを検出するものであり、本研究の中核をなす。本研究では新たな分析手法を提案するだけでなく、既存の手法についても批判的に検討する。

4章では時間的な共起分析(temporal co-occurrence analysis)を論じる。これは、前記の UI オブジェクトが前後して操作対象となる頻度を分析するものである。アウトプットのテキストにおいて語が近くに出現する頻度を分析する、従来の共起分析にならった分析手法である。この分析によって、ユーザー(プレイヤー)にとって互いに関連するピースのペアを見いだせた。

5章では時間的な共起分析の応用例を論じる。時間的な共起分析を、不要なピースを含んだ問題(パズル問題)を解くジグソー・コードに適用すると、作問者が意図して紛れ込ませた間違いピースが、正しいピースとの間で取捨選択されたかどうかを検出できる。このような取捨選択は、試行錯誤の一部であり、本研究の目的にかなう。

6章では解の状態遷移を分析する。ジグソー・コードのようなアプリケーションでは、解

答の状態をピースの並びで表現することで、解答が作り上げられる様子を状態遷移として表現できる。この状態遷移において閉路を検出し、その閉路の起点が最終的な解答の部分列であるならば、その閉路は意図的な試行錯誤とみなせること示した。アプリケーションがアンドゥ機能を持っていて、それを使ったならば意図的な試行錯誤とみなせるだろう。アンドゥを使った場合、元の状態遷移を逆にたどることになる。本研究は、逆にたどらない遷移についても意図的な試行錯誤とみなせることを示した。

7章ではアプリケーション操作の時間間隔を分析する。ジグソー・テキストやジグソー・コードのピース操作の時間間隔にはプレイヤーの熟達度が現れる。ピースをソフトウェア開発のスクラムにおけるプロダクト・バックログ・アイテムとして、作る順番を決めるといいうパズル問題を解くとき、プロダクト・オーナー経験者の方が未経験者よりも、操作の時間間隔の分散が小さく平均値も小さいことが分かった。ピース操作の時間間隔にはプレイヤーの熟達度が現れるが、この熟達とはジグソー・テキストというアプリケーションの熟達ではなく、パズル問題の内容、この場合はプロダクト・オーナーの経験である。ただし、熟達度は試行錯誤の内容やプレイ戦略そのものではなく、本研究の狙いからは若干離れる。

8章ではプロセスの分析に正解との距離を導入することを論じる。正解との間の何らかの距離を適用して、解くプロセスの時間経過に伴う距離の変化を分析し、距離が大きくなる時にはプレイヤーが迷っていると判定する研究がある。このような判定が妥当かどうか、本研究では検証した。クイックソートなどのアルゴリズムでコンピューターに数を整列させ、途中の数の並び順を記録して、レーベンシュタイン距離など様々な距離の変化を分析した。その結果、整列のプロセスで、必ずしも距離が単調非増加せず、距離が広がることもあるし、正解に達したにもかかわらず再び誤った順序に変わることすらあることが分かった。整列アルゴリズムは、同じルールの判定と並べ替えを繰り返しているだけであり、途中で悩んでいるとみなすのは妥当ではない。ただし、検証した範囲では、単調非増加する距離も存在した。

9章では提案手法のコンピューター・システムとしての品質・性能を論じる。以上のようなアプリケーションや分析手法が、実験室ではなく実際の運用で、コンピューター・システムとして成立するかどうかは検証が必要である。従来、教育工学研究では、このような検証の報告が少ない。本研究では、サーバーへ送信される測定データの欠損を、提案手法による分析結果への影響の観点から評価して、問題ないレベルであることを確認した。また、本研究で開発したシステムは、200人規模など、いくつかの学校の授業で実際に使われてきた。これら事例をあげることで、提案アプリケーションや分析手法が実際に使えるものであることを示す。

10章では本研究をアクセシビリティの観点から論じる。障害者差別解消法の改正など、我が国は障害のある人もない人も共に暮らせる社会を目指している。新しい技術を開発し導入を目指す研究は、障害がある人でも、それによって利益を得られるよう努力する必要があるだろう。本研究では、ジグソー・テキストにスクリーン・リーダーで操作できるUIを

用意した。これによって、画面を見なくても並べ替え問題を解ける。この UI は前記のアプリケーションの条件を満たすものである。予備実験を実施し、この UI で解くプロセスを分析したところ、スクリーンリーダーで解く方が目で見て読んで解くよりも、最初の操作にかける時間が長い傾向が見られた。UI によって解くプロセスが異なることは、異なる思考が起きていることを示唆し、ひいては同じ問題を解いているといえるかどうかの疑問に達する。今後、さらなる研究が必要である。

最後に、残された課題・展望など続く研究への端緒や、アプリケーションを使った事例などをあげる。

以上から、本研究が提案するようなアプリケーションは、特に試行錯誤を含む思考プロセスを検出・測定するのに十分なデータを出力し、それらデータから思考プロセスを分析する手法が存在することを示せた。このような測定は実際の授業で使うのに十分な信頼性を備えている。このようなアプリケーションが多く考案され、実際に使われるようになれば、試行錯誤を含む思考プロセスの是非を評価するのに十分な実態が明らかになるだろう。

審査結果の要旨

・学位論文の構成

本論文は、思考プロセスを出力でなく、プロセスに基づいて定量的に評価するアプローチを提案し、提案するアプローチを実装したアプリケーションと複数の分析手法を提案している。

学位論文は、以下の3部構成、12章で構成されている。1部では、1章にて研究背景、2章にて関連する動向を論じた後に、3章にて、前提となる対話型アプリケーションおよび測定データについて論じている。2部では、本研究で提案する分析手法について論じている。4章では、時間的な共起分析を提案している。測定データから前後の操作の頻度を分析することにより、関連深い作業のペアを見つけることを可能とした。5章では、試行錯誤の一つである取捨選択の検出を提案している。時間的な共起分析を用いて、作問者が意図的に設定した間違いの選択肢と、正しい選択肢をどのように取捨選択したかを検出することを可能とした。6章では、測定データから、作業状態を状態遷移と見なすことで、状態遷移上の閉路から意図的な試行錯誤を抽出することを可能とした[1]。7章では、アプリケーションの操作間隔に注目し、ユーザの熟練度を比較することを提案している。プロダクト・オーナー経験者と未経験者にアプリケーションを操作してもらい、経験者の方が未経験者よりも操作の時間間隔の分散が小さく平均値も小さいことを示した。[2]。8章では、正解からの距離が遠のくことを学習者のつまずきと捉える分析に対し、問題に適した距離計算の定義の重要性を議論している。3部では、9章にて提案手法の性能評価について、10章にてアクセシビリティについて議論し、11章にて開発したアプリケーションの使用事例について紹介し、12章に

て論文のまとめを行う。9章では、対話型アプリケーションの性能設計とアクセス解析として、開発したアプリケーションが授業の現場で使われる際の性能について議論している。[3]。10章では、スクリーン・リーダーによる複雑な情報処理における考え方の分析として、開発したアプリケーションのアクセシビリティについて議論している。11章では、開発したアプリケーションの使用事例を紹介している。12章では、提案した分析手法と、開発したアプリケーションについて論文で議論したことをまとめている。

論文の構成に荒削りな部分が目立つが、提案する分析手法と開発したアプリケーションについて、十分な質と量の記述がなされている論文である。

・研究目的の妥当性、従来の手法との比較におけるの有意性、および理論・実験手法の新規性

本論文では思考プロセスをプロセスに基づいて定量的に評価するアプローチを提案している。教育分野では「答えのない課題」の評価や「試行錯誤」を肯定的に評価することが求められているという背景や、医薬業界ではStrategic Reviewによる文書推敲手法が用いられるという背景がある。このように申請者の提案するアプローチは社会に求められているものであり、研究目的は妥当であると言える。また、プログラミングの学習過程の従来のプロセス研究では、学習者がつまづいているかの判断のみだが、本論文ではつまづきの思考過程を分析しようというものである。

本論文では、提案するアプローチを実装した、TopicWriter、ジグソー・テキスト、ジグソー・コードを開発し、時間的な共起分析、取捨選択の検出、解の状態遷移における閉路の発見、操作間隔、距離による分析を行い、提案アプローチの優位性を示している。申請者が独自に開発したアプリケーションと分析手法を提案していること、開発したアプリケーションと分析手法が複数の研究者により実際の教育現場でも使われていることから、理論・実験手法の新規性はあると判断できる。

・得られた知見のシステム情報科学の分野における意義

本論文で提案している思考プロセスをプロセスに基づいて定量的に評価するアプローチは、正解の存在を仮定しない分析方法として既存研究にくらべ優れており、教育分野での学生をつまづき支援や職場での熟達度の評価など広い分野にとって意義がある。

・まとめ

以上のことから、提案する分析手法と開発したアプリケーションについて、十分な質と量の記述がなされていることが認められ、システム情報科学の博士論文として合格と判断する。

[1] Yamaguchi, T., Matsuzawa, Y., Niimi, A., Oba, M..

Cycles in State Transition as Trial-and-Errors in Solving Programming Exercises. In: Keane, T., Lewin, G., Brinda, T., Bottino, R. (eds) Towards a Collaborative

Society Through Creative Learning. WCCE 2022. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 685. Springer, Cham., 2023

[2] 山口琢, 歌田夢香, 加藤輝実, 新美礼彦, 大場みち子, プロダクト・オーナーによるプロダクト・バックログの優先順位付け操作の分析, 日本ソフトウェア科学会「実践的IT教育」特集, 投稿中, 2025年5月号 (公表予定)

[3] 山口琢, 松澤芳昭, 新美礼彦, 大場みち子, 並べ替えプログラミング・パズルにおけるユーザアクセス、測定データのリトライと欠損, 電気学会論文誌C 「人と人とを繋ぐ情報・システム技術」特集, 採録決定, 2024年8月号 (公表予定)