

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	中本 陵介
論文題目	Development of a Mathematics Learning Support System through the Analysis of Handwritten Responses and Self-Explanations（自己説明と手書き回答の分析による数学学習支援システムの構築）		
（論文内容の要旨） 本研究は、数学を対象としたデジタルドリル学習環境における、生徒の思考過程の可視化とつまずきの検出を目的としている。GIGA スクール構想により、オンラインドリルやデジタル教科書が重要なツールとなったが、これらは正答の確認には有効である一方、生徒の思考過程やつまずきの特定には限界がある。効果的な学習支援には、学習過程を可視化し、つまずきを特定する仕組みが必要である。生徒が自分の思考過程を言語化するも試みとして自己説明があり、これまでの研究では深い理解やメタ認知能力を向上させる効果が示されているが、生徒や教師にとって作成や確認のための負担が大きく実用性が限られている。この課題に対し、本研究では自己説明と手書きデータを統合したシステムを提案し、つまずき検知と分析の自動化による負担軽減に取り組んだ。本研究では、以下の4つの研究課題に分けて解決し、最終的に自己説明能力向上のための支援システムを構築した。 研究1では、自己説明や手書きデータ、標準的自己説明を活用して、学習者のつまずき箇所を検出するフレームワークを構築した。このフレームワークは、つまずきを80%の精度で検知できた。研究2では、つまずき検知を自動化するためには標準的自己説明を自動で生成する必要があるため、収集した自己説明データを基に標準的自己説明を自動生成するモデルを開発した。このモデルでは、Stepに基づいた評価指標を導入し、72%の精度でモデルを生成することができた。しかし、知識要素や手順を含む生成精度には課題が残り、データから重要な情報を適切に抽出する前処理が必要であることが分かった。研究3では、数学テキストや大規模言語モデル（LLM）を活用して、研究2で必要とする自己説明のスコアリング(前処理)精度の向上を目指した。その結果、数学テキストを活用したモデルは最も高い精度を達成した。しかし、LLMを用いた生成データにはノイズが多く、安定した精度を確保するためにはデータの慎重なキュレーションが求められた。研究4では、研究1から研究3で得られた成果を統合し、自己説明のスキルを向上させるために自動フィードバックシステムを開発した。このシステムは、リアルタイムで学習者の自己説明を分析し、個別化されたフィードバックを提供することが可能となり、特に自己説明スキルが低い生徒に対して有効であることを示した。一方で、今回の評価では、長期的な利用において自己説明の質が低下する傾向が見られ、フィードバックの適応性をさらに高める必要がある。 本研究を通じ、自己説明を活用したつまずき検知や数学の学習支援の可能性が示される一方、データのばらつき、一貫性の課題、フィードバック効果の長期維持が課題として浮き彫りになった。これらを解決するためには、学校現場でのさらなる実践やフィードバック方法の改善が求められる。また、本研究の成果は数学教育だけでなく、幅広い教育現場での応用が期待される。			

(論文審査の結果の要旨)

デジタル技術の進展により、GIGA スクール構想を通じて教育環境が大きく変化し、オンラインクイズやデジタル教材が広く活用されている。しかし、これらのツールは正答の確認には有効である一方で、生徒の思考過程やつまずきポイントを特定するには限界がある。本研究は、数学教育を対象に、自己説明 (self-explanation) と手書きデータを統合した新しい枠組みを提案し、生徒のつまずき箇所を特定して適応的なフィードバックを提供するシステムの開発と評価を行った。

本研究は、以下の4つの研究で構成される。第一に、自己説明、手書きデータ、標準的自己説明を用いた分析により、学習者が直面するつまずきを約80%の精度で検出するフレームワークを構築した。この手法は、個別化されたフィードバックの基盤を提供するものの、自己説明データのばらつきが精度に影響を与える課題が明らかになった。第二に、収集した自己説明データを基に標準的自己説明を自動生成するモデルを開発し、72%の知識要素をカバーしたが、手順の一貫性維持が課題として残った。第三に、数学テキストや大規模言語モデル (LLM) を活用してデータ拡張を行い、スコアリング精度を向上させたが、LLM生成データの一貫性に課題があり、慎重なキュレーションの必要性が示された。第四に、自己説明ベースの自動フィードバックシステムを開発し、自己説明スキルが低い学習者に対して有効性を確認したものの、フィードバックの質が時間経過とともに低下する課題が浮き彫りになった。

本研究では、自己説明を活用した学習支援の可能性を示し、個別化されたフィードバックの構築に向けた重要な知見を提供した。特に、学習ログを活用して学習者の思考プロセスを可視化し、数学教育におけるつまずきポイントを明確化する新たなアプローチを提示した点が大きな成果である。また、これらの知見は、数学学習における個別化やパーソナライズされた学習支援システムの実現に寄与する可能性がある。今後の展望として、初等・中等教育を超え、多様な教育現場や日常生活での継続的な学習活動への応用が期待される。特に、リアルタイムで学習ログを活用する適応型システムは、生徒の主体性を引き出し、深い学びを支える基盤として一層の発展が見込まれる。

以上のことから、本論文は博士 (情報学) の学位論文として十分な価値があると認める。令和 6 年 12 月 16 日、論文内容および関連事項について試問を行い、合格と認定した。また、本論文のインターネットでの全文公表についても問題がないことを確認した。