

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04292

研究課題名（和文）オンライン手書きデータからの論理的思考力の見える化

研究課題名（英文）Identification of logical thinking ability from online handwritten data

研究代表者

山名 早人（YAMANA, HAYATO）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40230502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究開発では、数学幾何問題を題材として、学習者の論理的思考力を明らかにすることを旨とし、解答戦略を自動的に分類する手法に取り組んだ。論理的思考力は、科学技術の発停に欠くことができない重要な能力の一つであると同時に社会生活を営む上での重要な要素の一つであり、一人一人の能力に合わせた教育を実現する上で基盤となるものである。本研究開発により、幾何問題中の図形への書き込み、及び、学習者が解答した文章を解析することにより、3種類の解法がある幾何問題に対して91.7%の正解率を達成した。本成果は国内外で初めてのものであり、本分野の研究発展に貢献することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本学術会議及び文部科学省では、教育において論理的思考力を養うことの重要性を説いている。論理的思考力の習得度合いは、これまで、教育現場における教員の経験やよく練られた試験により、学習者の学習過程を通して行われてきた。しかし、教員が24時間365日学習者を評価することはできない。学習者の個々の能力に応じた学習サポートを実現するためには、学習者の能力を瞬時に把握し、学習サポートに結びつけることが重要である。本研究開発は、数学の幾何問題を対象として、学習者の解答戦略を明らかにすることが可能であることを示しており、さらなる基礎・応用研究を通して、個別最適化された学習サポートへと繋がる。

研究成果の概要（英文）：This research and development project aimed to clarify the logical thinking ability of learners using mathematical geometry problems as the subject to develop a method for automatically categorizing solution strategies. The ability to think logically is one of the indispensable abilities for the development of science and technology, as well as an important element of social life, and is the foundation for realizing education customized to each individual's abilities. We achieved a 91.7% accuracy ratio for geometry problems with three different solutions by analyzing the strokes the figures in geometry problems and the sentences answered by the learners. This analysis was the first in the world and contributed to the analysis of logical thinking ability.

研究分野：ビッグデータ解析

キーワード：オンライン手書きデータ 論理的思考力 データマイニング ビッグデータ解析 学習データ解析 視線情報 ストローク情報

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

日本学術会議では、論理的思考力の養成において、数理科学を重要分野として位置づけている。これは、論理的思考力が科学技術発展に欠くことができない重要な能力の一つであると同時に社会生活を営む上で重要な素養の一つであるからである。また、文部科学省中央教育審議会では、算数・数学における論理的思考力を「知識・技能：基礎的な原理、法則の理解」「思考力・判断力・表現力：知識・技能を活用し問題を解決する力、論理的考察力」「学びに向かう力・人間性等：多様な考えを認め、よりよく問題解決する態度」と位置付けている。

このように、教育において論理的思考力を養うことが求められている。こうした論理的思考力の習得度合いは、教育現場における教員の経験やよく練られた試験により、学習者の学習過程を通して行われている。しかし、教員が学習者を 24 時間 365 日評価することはできない。一方、コンピュータにより学習者の論理的思考力の確認が随時できるようになれば、学習者の「今」の状況(習得度合い)に即した敏速かつ的確なサポートが可能となり、論理的思考力のさらなる向上をもたらすことができると考えられる。

2. 研究の目的

論理的思考力を自動的に認識するための基礎技術の開発に取り組むことが本研究の目的である。本研究開発では、論理的思考力を「知識理解度」「知識の多面的適用度」「論理展開の妥当性」の観点から、数理科学(幾何学など)を対象としたオンライン手書きデータ等の時系列データ解析により明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

幾何学問題を対象に 200 問題・人規模の学習者データを収集し、オンライン手書きデータ上に表現されるコンテキスト(解法戦略)(幾何学では、円周角の定理、 n 角形の内角の和、合同、二等辺三角形、正三角形、相似など)を単位としての手書きデータ分割手法を構築する。次に、学習者に対するヒアリングから得られた正解(どのような解法を用いたか、複数の解法を用いた場合はどのように適用したか)の推定を機械学習により行う。本推定が可能となれば、学習者の論理的思考力を判定するための基礎指標とすることが可能となる。

本研究において解決すべき事項は、同一の解法であっても次に示す特徴があり、一般的な機械学習手法による解決が困難である点である。

(1) 同一解法であっても幾何図形上に記入されるデータは一意ではなく様々なものがあること。さらに、学習者により、記入されるデータの時系列が異なること。

(2) 解答中の学習者は、「解答戦略を熟考している時」「解答戦略に基づいて解法している時」といった複数の状態を持ち、学習者の状態によって、記入されるデータが異なる可能性があること。

本研究開発では、大きく上記の 2 つの問題の解決と論理的思考力を明らかにするために欠くことのできない解答戦略の自動判定に重点的に取り組んだ。

4. 研究成果

以下に得られた主な成果をまとめる。

(1) 問題難易度と学習の定着度

問題難易度によって取得できる特徴量に変化が生じることから、難易度に依存しない特徴量抽出が必要となる。そこで、36 名の大学生に対し、幾何学 5 種類の単元(並行と合同、図形の性質、円、相似な図形、三平方の定理)から各 4 問の合計 20 題を解答してもらい(720 問題・人) 問題難易度による特徴量の変化を調査した。結果、難易度により大きく変化する特徴量として「筆記速度平均」「ストロークの時間間隔平均、標準偏差」「ストローク間移動距離平均、最大値」といったストローク固有の特徴量が影響を受けることがわかった。特に難易度の高い問題を解答している際に特徴的に発生する変化(易問では顕著な変化は発生しない)として「ストロークの時間間隔平均、標準偏差」があることが分かった。

上記の知見をもとに、ストローク特徴量を用いた「学習の定着判定(2 週間の間隔を空けて問題理解が定着したかどうかを判定)」への応用を試み、学習者にとっての「易問・難問」を除くことで、学習の定着判定に利用できることを確認した。同知見は、そのままでは利用が難しいが、学習者に対して適切な難易度の問題が出題される環境において、学習定着度の自動判定への可能性を示すことができた。

(2) 問題難易度に依存しない特徴量とメタデータ自動付与

(1) の結果より、問題難易度は、ストロークに大きな影響を与えることから、問題難易度に依存しない特徴量として、幾何問題中の図形に書き込まれるストロークの内、角を表現する記号を選定し、2,188 枚の学習用データセット(本研究で収集した 2,188 問題・人)から 17 種類の記号(「同一角を示す記号」「同一辺長を示す記号」「平行を示す記号」を含む図 1 に示す記号)を分類した。記号の大きさ・向きに依存せずに記号の種類を特定するため、SIFT 特徴量を抽出し

自動分類器を構築した。これにより、幾何学問題において図形に書き込まれる各種記号に対するメタデータの自動付与を完成させ、記号毎の判定精度として0.70~0.96(マクロ平均0.87)を達成した。

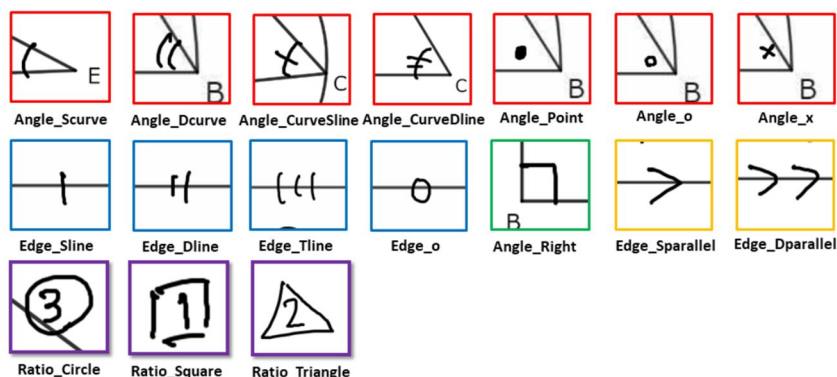


図1 判別対象とした記号

(3) 部分点付与手法

論理的思考力判定にあたり、「考え方は正しいがケアレスミス等で最後の解答を間違った」ような場合の判定が可能かについて検証を行った。大学生20名から5題(100問題・人)の幾何学証明問題解答時のストロークデータを収集し解析し、ケアレスミスをした解答を「本来であれば完答することのできた解答である」と仮定した場合、「完答できた解答」か「部分点を付与すべき解答」かの分類において、ストロークの解析により、0.83の正解率を得ることができることを確認した。

(4) 文章読解力の判定

論理的思考力を測る他の方法として文章読解力を推定できるかどうかという基礎研究に取り組んだ。具体的には、長文を読む際の視線の動き(視点停留、視線飛躍)をもとに読解力推定(学習者29名)を行い、3値分類(読解力高・中・低)において正解率0.68の結果を得た。本結果は実用化するには低い正解率であり、他の特徴量と併せて判定することが必要不可欠である。

(5) 解答戦略有無の判定

研究実施中に明らかとなった「解答中の学習者の挙動が解答戦略に与える影響」を明かにすることを目的とし、「眼球運動を用いた解答戦略有無の判定」へのチャレンジを行った。具体的には、解答中の「眼球運動データ」を14名から取得し、解答戦略の有無判定の可能性を検証した。眼球運動データから20の特徴量を抽出し、XGBoostを用い3状態(明確な解法に基づく解答、積極的解法探索、非積極的解法探索)の自動分類を行い、正解率0.77を得た。

(6) 論理的思考力判定のための解答戦略分類

論理的思考力を判定するために、学習者がどのような解答戦略により解答したかを自動判定する仕組みを構築した。具体的には2つの方法を提案・検証した。最初の方法は、(2)で検出した記号を単位とし、記号の出現順をもとに構成したuni-gram, bi-gram, 1-skip-gramの3つを特徴量として、XGBoostを学習する方法である。2番目の方法は、図形への書き込みを用いずに証明問題において記述される証明文からテキストデータをOCRにより抽出し、XGBoostを学習する方法である。実験では、学習者39名(理系13名、文系26名)に対して行った9問の幾何問題(証明問題)の解答(351問題・人)から、3種類の解答戦略が存在する1問(24解答)を抽出し評価を行った(図2)。図中への記号を用いた最初の方法においては、正解率0.792(bi-gramとuni-gramからなる特徴量を利用)を達成した。一方で、テキストデータを用いた手法では、正解率0.917を達成した。本結果から、解答戦略を判別する上では、図中への書き込まれる記号だけでなく、テキストデータを含める必要があることがわかった。

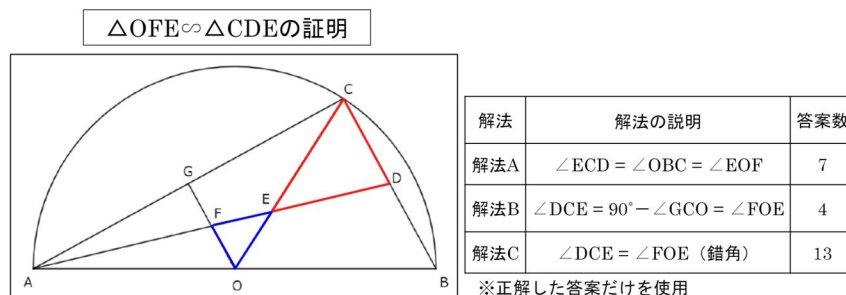


図2 実験に用いた幾何証明問題(右表は3つの解答戦略を示す)

以上述べた解答戦略の自動判定は、国内外において最初の試みであり、今後、本分野の研究の

活性化に繋がることが期待される。当初予期していなかった事象としては、「ストローク特徴量が問題難易度（学習者に対する難易度）に依存して影響を受ける点」がある。しかし、本研究開発では、同事象に対応するために、問題難易度に依存しない特徴量（図中に記入された記号の記述順序）を用いた手法を構築することで、この問題に対応した。一方で、学習者の解答中の状態は一定ではなく、「明確な解法に基づいて解答している状態」「積極的に様々な解法を探索している状態」「解法を模索している状態（非積極的解法探索）」に分類できることを示した。今後、学習者の解答中の戦略が明確であると予想される「明確な解法に基づいて解答している状態」中に得られるストローク等のデータを対象として解析することにより、解法戦略自動判定の精度向上に繋げることができると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kazushi Okada, Masashi Kudo, Hayato Yamana	4. 巻 1
2. 論文標題 Estimating Answer Strategies using Online Handwritten Data: A Study using Geometry Problems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of the 15th International Conference on Education Technology and Computers (ICETC 2023)	6. 最初と最後の頁 1,10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3629296.3629347	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9件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡田一洸, 工藤 雅士, 宮崎 公彦, 山名 早人
2. 発表標題 オンライン手書き解答データを用いた解答戦略の自動推定 - 幾何問題を題材として -
3. 学会等名 第15回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮崎 公彦, 青柳 宏紀, 岡田 一洸, 工藤 雅士, 山名 早人
2. 発表標題 眼球運動を用いた解答戦略有無の判定 - 数学問題を対象として -
3. 学会等名 第15回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦 将人, 工藤 雅士, 岡田 一洸, 中山 祐貴, 山名 早人
2. 発表標題 オンライン手書きデータを用いた学習定着度の自動推定 - 幾何数学問題を対象として -
3. 学会等名 第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム、H41-2
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田 一洸, 田中 聖也, 工藤 雅士, 三浦 将人, 山名 早人
2. 発表標題 幾何問題を題材とした解答戦略の自動推定 -オンライン解答データを用いて-
3. 学会等名 第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム、H34-3
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦将人, 工藤 雅士, 中山 祐貴, 山名 早人
2. 発表標題 オンライン手書きデータを用いたヒント参照前後における変化の調査ー幾何問題を対象として
3. 学会等名 第13回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (日本データベース学会、電子情報通通信学会、情報処理学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田一洸, 工藤雅士, 三浦将人, 田中聖也, 山名早人
2. 発表標題 幾何証明問題の解答に対する自動部分点付与の検討
3. 学会等名 第13回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (日本データベース学会、電子情報通通信学会、情報処理学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayato YAMANA
2. 発表標題 Learning Analytics in the Big Data era
3. 学会等名 The 5th IEEE International Conference on Big Data Analytics (ICBDA2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 凱博, 宮崎公彦, 工藤雅士, 山名早人
2. 発表標題 学習履歴データを用いた学習状態推定に関するサーベイ
3. 学会等名 信学技報, ET2023-12, pp.1-8
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林 凱博, 宮崎公彦, 工藤雅士, 山名早人
2. 発表標題 オンライン手書き解答データを使用した中学幾何問題の解答戦略自動推定 - 複数の問題における比較検証 -
3. 学会等名 第16回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

数学幾何問題解答公開データセット(2024年6月) <https://github.com/yamana1ab>

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

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
---------	---------