

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：62601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18684

研究課題名(和文) 手書きの数学記述式解答を対象とした文字・図形認識による採点支援システム

研究課題名(英文) Marking Support System by Handwriting Recognition of Characters and Figures for Mathematical Answer Sheets

研究代表者

安野 史子 (Yasuno, Fumiko)

国立教育政策研究所・教育課程研究センター基礎研究部・総括研究官

研究者番号：00370081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：タッチペンの利用によるタブレット端末への入力により、オンラインで「デジタルインク」データとして数学試験の手書きの記述式解答を収集し、そのデータを分析した。解答入力の頻度や解答の書き直しの頻度を中心に分析を行った結果、数式に関しては、オンラインの手書き数式認識により95%程度は正しく認識され、解答の書き直し回数もそれほど多くないことが実証的に示せた。さらに、数学特有の数式のストロークの順序が起きることが実証的に確認できた。本研究で採用した解答者が認識結果を確認して確定するという方式であれば、自動採点や採点支援に有効性が高いことが示唆された。図形認識は、有効性を示せるような結果が得られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数学の記述式試験は、受験者が文字、数式、図形、グラフ等を自由に記述した解答による評価であり、それらの採点はその専門性を有している者が行っている。数学は、教科の特性からも、評価において思考力・表現力が重視される。本来、問題を解くということは、思考過程を経ながら行うものであり、現在、実用化されている限定された形式のキーボード入力よりも、手書き(入力)の方が長けているだけでなく、広汎な能力を測ることができる。そこで、本研究の成果は、数学試験の手書きの記述式解答の数式に関して、自動採点や採点支援の実現に向けた基礎的資料となる。

研究成果の概要(英文)：We collected handwritten written responses to extended constructed-response questions in a mathematics examination as online "digital ink" data by inputting the data into a tablet device through the use of a stylus, and analyzed the data. The results of the analysis, which focused on the frequency of answer input and rewriting of answers, empirically showed that about 95% of mathematical expressions were correctly recognized by online handwritten mathematical expression recognition, and that the number of rewrites of answers was low. Furthermore, we were able to empirically verify that the mathematics-specific sequence of mathematical formula strokes can occur. Our results suggest that the method adopted in this study, in which the respondent confirms the recognition result and determines it, would be highly effective for automatic scoring and scoring assistance. We were unable to obtain results that could demonstrate effectiveness with respect to shape recognition.

研究分野：数学教育

キーワード：数学試験 手書き認識

1. 研究開始当初の背景

大学入試をはじめとするわが国の数学の試験は、半世紀以上の間、記述式が多用され、一定の評価を得ている。その一方で、機械式採点を前提とした共通第1次学力試験導入(1979)の際、まぐれあたりによる正解を含む多肢選択肢式を避けるための非常に有効な方法として、マークシート解答を用いた穴埋め式が開発され、その後の大学入試センター試験や大学入学共通テストにおいても継続的に採用されてきている。研究開始当初は、大学入試センター試験のシステムも限界を迎え、文部科学省において、高大接続システム改革会議「最終報告」(2016)を踏まえ、具体的な検討が進められ、「大学入学共通テスト」の数学の記述式問題の導入が具体的に検討されていた。その検討過程で、50万人規模の大規模試験における記述式の採点処理に関して、基本的には、旧態依然とした採点者による方式から脱することはなかった。(その後、2020年度開始の大学入学共通テストで導入予定だった国語と数学の記述式問題について、同年度の実施を見送ると正式に表明された[2019.12.17]。)

国際学力調査に目を向けると、OECD/PISA調査は2015年よりキーボード入力 of コンピュータ使用型、IEA/TIMSS調査は2019年よりeTIMSSとしてタブレット端末用型に移行となってきた。

しかし、数学の問題を解くという上で、手書き(入力)の方が、思考を整理したり、思考そのものを支援したりすることができる。つまり、思考過程は、書きながら考え、考えながら書くという行為が必要不可欠であるということである。実際、手書きによる数学記述式試験(大学入試のレベル)の解答は、文字、数式、図形、グラフ等を含み、それらの混在、配置等の自由度も高い。それらをキーボードの類のデバイスを用いて、デジタルテキストデータへの変換可能な形式で入力すること自体、一般的に困難が伴う。前出の国際調査で、わが国の高校生にとっては分数の入力でも困難を極める。

一方、情報科学において、キーボード入力でなく最も自然で直感的な手書き入力が見直される傾向にあり、指やタッチペン等の入力デバイスでデジタルに書くことによって得られた「デジタルインク(デジタル機器で手書きされたデータ)」に関する研究開発が進み、イメージキャプチャだけでなく、テキスト、数式、図形などを認識し変換され、ワードプロセッサを使っているようなことが現実になりつつある。このことは、人工知能、パターン識別、機械学習、自然言語処理による手書き認識エンジンの発達によるもので、複雑でなければ実用化の域に達している。前述のように、数学記述式試験の解答は、文字、数式、図形、グラフ等を含み、それらの混在、配置等の自由度も高く、他の教科と比較して、手書き認識によるデジタルテキストデータへの変換の困難度は高い。問題に対する採点基準も、状況に応じて異なるため、自動採点の可能性が極めて低いと考えられるが、手書き認識により、文字、数式、図形、グラフ等の切り分けが可能となり、(完全でないにしても)デジタルテキストデータへ変換できれば、事前に設定した数式やキーワードによる高度な答案の分類が可能となり、採点の効率化、信頼性の向上に貢献できるのではという着想に至った。

2. 研究の目的

数学試験は、選択肢式や穴埋め式よりも記述式の方がより広汎な能力を測ることができることは言うまでもない。そして、数学の記述式試験は、受験者が文字、数式、図形、グラフ等を自由に記述した解答による評価であり、それらの採点はその専門性を有している者が行い、人数、時間を要して信頼性を高めているばかりでなく、(採点)基準についても、状況に応じて変更可能であり、全く機械化できていない。特に、わが国は人の手によるその手法に長けている。近年、国内外で、Computer-Based Testing(CBT)の開発研究が進み、国際学力調査や海外の国内学力調査において、キーボード入力を中心としたCBTが実用化されている。しかし、それらの多くは、解答形式が選択肢であったり、単純なテキスト・数値等の入力によるものであったりがほとんどで、自動採点までいくものは、限定されたフォーマットとなっている。数学は、教科の特性からも、評価において思考力・表現力が重視されている。本来、問題を解くということは、思考過程を経ながら行うものであり、現在、実用化されているキーボード入力のCBTよりも、手書き(入力)の方が長けているだけでなく、広汎な能力を測ることができる。



文字、数式、図形、グラフ等が混在している数学の記述式解答は、意味を持つ情報を含むデジタルテキストデータへの変換の困難度が高い。その一方で、人工知能による手書き認識エンジンが実用化の域にまで発展している。そこで、本研究課題は、数学試験の手書きの記述式解答に関して、解答用紙によるオフライン手書き認識と、電子ペンや、タブレット端末への指、タッチペン等の入力デバイスを使ってデジタルで手書きされた「デジタルインク」によるオンライン手書き認識の両方のデータを収集し、採点の支援を提案することを目的とする。データ収集は、単なるイメージキャプチャのみでなく、意味を持つ情報を含むテキスト、TeXやMathML形式変換

によるデジタルテキストデータ表現の数式，図形に変換し，それらを採点の簡素化に活かす採点支援の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) オフライン手書き認識によるトライアル： 既存の解答用紙によるオフライン手書き認識の試行を行い，「デジタルインク」によるオンライン手書き認識で，どの程度の文字，数式，図形を扱うかの検討を行うこととした。具体的には，これまでの関連研究により得た数学試験の手書きの記述解答をイメージキャプチャしたデータを，トライアルデータとして利用した。現状，文字，数式，図形のそれぞれの認識モデルが異なり，統一化した認識モデルは未開拓であり，混在型の場合は，どういった閾値で切り替えるかという工程を経ることになるが，それぞれは別々のモデルでの認識となることから，独立型で行う方針とした。ただし，いわゆる自由度が高い記述解答は，既知のことではあるが，解答者によるレイアウトの自由度が高いため，複雑なレイアウト，例えば，矢印で続きを誘導していたりする場合は，現状は対応が困難であることが整理できた。

(2) オンライン手書き認識によるトライアル： 次の段階として，「デジタルインク」によるオンライン手書き認識のトライアルに移行した。電子ペンや，タブレット端末への指，タッチペン等の様々な入力デバイスで試み，タブレットにタッチペンを使って入力する方式を採用することとした。手書き文字認識は，様々な研究において，高い精度が示されていることから，数式と図形に関して，検討を行った。高等学校までで扱う数式について検討対象とし，「 ${}_5C_2$ 」のように添え字から始まる数式は，認識結果が下がることから，除外することとし，それ以外は実践調査で扱うことは可能と判断した。図形については，与えられた図形に対して，自由に手書きで線を書いたり，領域を示したりということや，与えられた座標に対して，関数のグラフを手書きで示したりしたものに對するオンライン手書き認識を試みた。手書きの線は，解答者によるゆがみの差が大きく，正答例との一致度の閾値の設定が難しい。領域を示すのは，線よりは良好であるが，領域を斜線で示すのか，塗りつぶすのかにも依存する。これらのことを考慮して，実践調査では，短答式の数式をメインターゲットにする方針とした。

図 1 は，短答式数式入力部分の手書き入力解答欄の画面遷移を示したものである。() の解答欄をタップすると，手書き入力画面() に遷移し，その画面にタッチペンを利用して手書き入力した状態が() となり，緑色のボタン  をタップして数式認識させると，認識結果が表示され() となる。正しく認識されない，あるいは解答を修正したい場合は，赤色のボタン  をタップすると入力画面() に戻る。書き直しは，一筆ごとに戻ること可能であるが，今回は短答式のみを扱うことから，入力方法を煩雑にするよりも，単純化することを優先し，修正するときは全て書き直すという仕様とした。テキスト解答で数行にわたる長いものは，一筆ごとに戻るボタンを用意した仕様とした。手書きのストロークデータのみを保持するところでとどめるか，解答者が認識されたテキストデータを確認しながら解答入力するかについては，議論の余地があるが，採点支援という観点から，本研究では後者を採用した。後者は，誤認識トラブルが大幅に軽減される利点がある。解答者のデータは，インターネットを通じてオンラインでやり取りをし，解答中のトラブルを考慮し，基本的にすべてサーバ側でデータ管理を行った。解答者が手書き数式認識イベントを実行したタイミングで，サーバにデータ送信される。解答を変更した場合には，その都度同様にデータが送信される。そのため，解答データログは，最終解答のみではなく，認識イベントを実行したすべてのストロークデータ (JSON 形式) 及び認識結果 (MathML 形式) である。

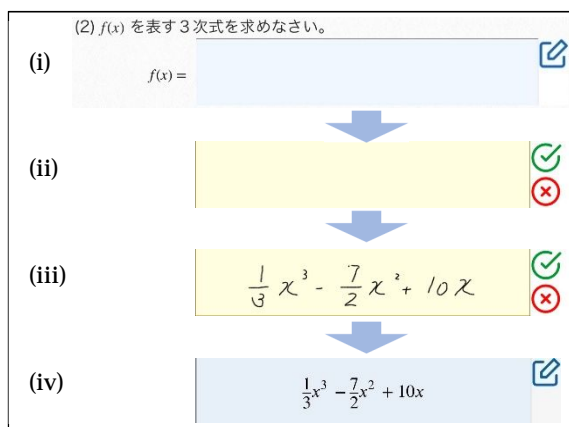


図 1 短答式の数式入力例

これらの準備を経て，大学生 18 名を対象にパイロット調査を実施し，アンケート調査も併せて行い，課題の洗い出しをある程度行った。具体的には，解答入力欄に触れてしまった結果，細かい点が付き，それも一緒に数式認識され書き直しになる事例，数式認識結果の中に，「1,21」，「0.3907」等のように，小数点が「，」(コンマ) や「・」(中点) と誤認識される事例，形が類似している数字や記号間の誤認識 (例えば，数字の「1」と「|」(パイプ) と「/」(スラッシュ)) が挙げられる。

(3) 実践調査： 高等学校の数学の問題を電子書籍で提示し，図 1 に示す解答欄を Browser Widget として電子書籍に埋め込み，それを用いて，実践調査の実施，デジタルで手書きされた「デジタルインク」データの収集，採点といった一連の作業を行った。調査は，2019 年 7 月～11 月に，高校生 2,3 年生を対象に「数学 I」「数学 II」「数学 A」「数学 B」の内容について実施した。

(4) 分析： 得られたデータによる探索的分析を行い，可能性の検証を行った。

4. 研究成果

3(3)で得られた手書きのストロークデータについて、分析を行った結果を示す。手書き数式認識による解答欄数は15で、正解例としては、分数、不等号、絶対値、括弧、指数、添え字を含む数式が主である。有効データ数は、書き直しも含め、897である。なお、このデータ数には、無解答や端末トラブルにより用紙に記入した解答データは含まれない。そこから、ノイズのみなどの欠損データ53を除いた844データを分析対象とする。前述のように、解答者が認識結果を確認して確定するという手順を踏んでいる。ある解答入力欄に、同一解答者が、同一解答を入力する頻度を、解答入力頻度と定義する。つまり、解答者が解答そのものを変更した場合は、別に扱うものとする。すると、解答入力頻度の分布は、図2に示すようになった。1回で済んでいるのが378(約67%)、2回(1回の書き直し)までが654(約92%)で、3回(2回の書き直し)までで741(約97%)に達し、ほぼ3回以内で入力を終えていることがわかる。一つの解答につき平均1.5回解答入力している計算になる。

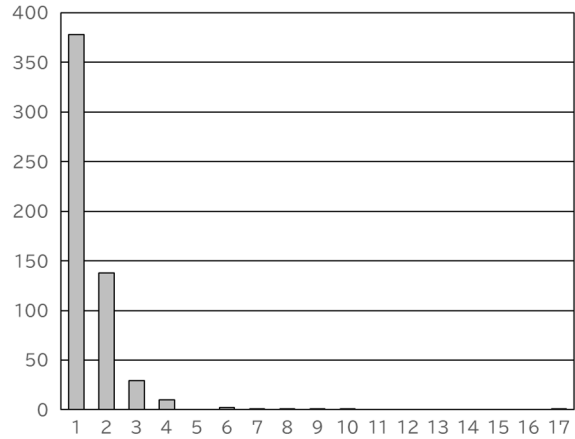


図2 解答入力の頻度 (同一解答別)

次に、手書き認識で書き直しがなされたデータは、844のうち280であった(844-378=282と一致していないのは、正しく認識できているにもかかわらず書き直した事例が2例)。表1はそれを分類したものである。誤認識による書き直しは、全体の60%近くに上る。また、ノイズ(解答入力欄に触れてしまった結果、細かい点が付く、それも一緒に認識されたもの)を含む書き直しは、全体の33.5%であった。ノイズは、ストロークデータとしての点であるような目視で確認しにくい程度のもものかなりあり、数式認識させてはじめて気が付くものも少なくない。逆に、小数点を書き込んだ(ストロークデータが生成された)が、目視で確認できない大きさの点であったため、再度小数点を付与し、認識結果として点がダブル(.)になっている事例も見られる。誤認識とノイズ以外の多くは、続け字や重ね書きなど手書き数式認識に不向きな記述であった。

表1 解答の書き直し

| 種別 | 度数 | 割合 |
|---------------|-----|-------|
| 誤認識 | 160 | 57.1% |
| ノイズ | 87 | 31.1% |
| 誤認識+ノイズ | 5 | 1.8% |
| 続け字 | 2 | 0.7% |
| 続け字+ノイズ | 1 | 0.4% |
| 重ね文字 | 1 | 0.4% |
| 重ね書き | 2 | 0.7% |
| 重ね書き+継ぎ足し+ノイズ | 1 | 0.4% |
| 認識不能の数式 | 2 | 0.7% |
| 数式とテキストの混在 | 1 | 0.4% |
| その他(目視で判読不能) | 18 | 6.4% |
| 計 | 280 | 100% |

誤認識は多岐に渡るが、小数点の誤認識は、「,」(コンマ)や数字の1が多く散見され、「・」(中点)、数字の1(添字の1)も観察されている。数字の誤認識は、1と7が目立つが、形に近い「0」が「o」, 「,」, 「6」が「o」, 「b」, 「9」が「q」等も散見される。また、数字の1, 「|」(パイプ), 「/」(スラッシュ), の間の誤認識も見られた。

最後に、数学特有の数式ストロークの順序について触れる。簡単な例を挙げると、 $x^2 - x - 12$ を因数分解する際、 $(x-3)(x-4)$ を先に書き、後から片方の「-」(マイナス)に縦棒を付与して「+」(プラス)にし、 $(x+3)(x-4)$ とすることは当然ある。数式を必ず左から右へ順に書いていくとは限らないし、左から右へ順に書かないことのほうが合理的であることさえあり得る。本データにおいても、図3に例示した書き順で入力した解答のストロークデータが存在した。この解答は導関数の問題の誤答である。したがって、 x^2 の項の係数、定数項、 x^3 の項の係数の順に決定していき、その順に書いていった可能性は否定できない。因みに、このストロークの認識結果は

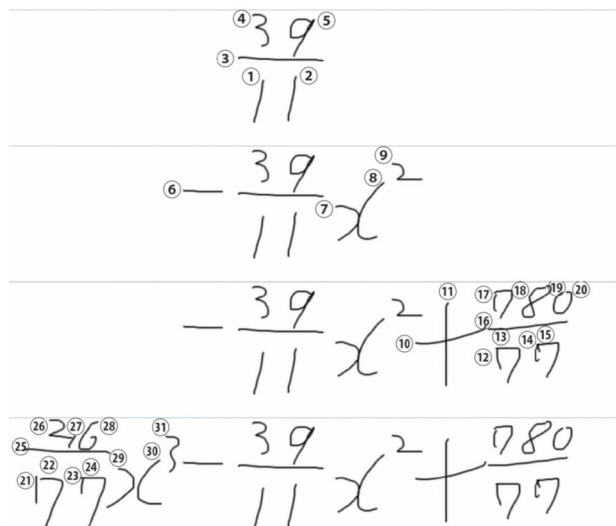


図3 数式の書き順例

この解答は導関数の問題の誤答である。したがって、 x^2 の項の係数、定数項、 x^3 の項の係数の順に決定していき、その順に書いていった可能性は否定できない。因みに、このストロークの認識結果は

$$\frac{2,6}{77}x^3 \prod_{i=1}^{-39} x^2 + \frac{780}{77}$$

であった。

調査で得られたストロークデータセットにより、手書き数式認識入力は、95%程度は正しく認識され、解答の書き直し回数も、それほど多くないことが実証された。この結果から、キーボードで入力が困難な数式記号などを受験者が容易に入力できるという点において、数式解答入力方法として、手書き数式認識入力は、非常に有効な方法であり、この部分では自動採点も可能であると考えられる。

さらに、このデータセットは、認識アクションのタイミングにタイムスタンプもログとして取得していることから、これらの時系列解答データログを探索的に分析し、解答変更回数、解答変更の正誤履歴、解答時間履歴などを明らかにする手掛かりを示した研究も行った。それにより、手書きのストロークログを活用することにより、解答過程が明らかになり、得点に現れない新たな能力評価の測定に繋がる可能性や、デジタルでの解答における制御の方向性が示唆された。

最後に、これらのシステムの汎用性を高めるために、オンライン LMS のための手書き入力 CBT の設計と実装についても行ったことを、付記しておく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 安野 史子 | 4. 巻 2142 |
| 2. 論文標題 電子書籍を利用したタブレット端末によるCBTの数式入力システムの検討 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所 講究録 | 6. 最初と最後の頁 71-78 |
| 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 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 安野 史子 | 4. 巻 2178 |
| 2. 論文標題 タブレット端末利用型CBTにおける解答入力方法の検討 - オンライン手書き数式認識の利用 - | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録 | 6. 最初と最後の頁 21-30 |
| 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 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 安野 史子, 西村 圭一, 浪川 幸彦 | 4. 巻 103 (5) |
| 2. 論文標題 ドイツの総合制学校におけるICTを活用した数学の授業実践からの示唆 - ヴォルテール総合制学校ポツダムの視察報告 - | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 日本数学教育学会誌 | 6. 最初と最後の頁 46-59 |
| 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 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 安野 史子 | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 タブレット端末利用型CBTによる時系列解答データログ分析の一考察 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 大学入試研究ジャーナル | 6. 最初と最後の頁 29-34 |
| 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 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 安野 史子 |
| 2. 発表標題 電子書籍を利用したタブレット端末によるCBTの解答入力システムの検討 |
| 3. 学会等名 RIMS 研究集会「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 安野 史子 |
| 2. 発表標題 タブレット端末利用型CBTにおける解答入力方法の検討 - オンライン手書き数式認識の利用 - |
| 3. 学会等名 京都大学数理解析研究所 共同研究（公開型）数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 矢嶋 遼, 安野 史子, 中川 正樹, 清水 郁子 |
| 2. 発表標題 オンラインLMSのための手書き入力CBTの設計と実装 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 |
| 4. 発表年 2022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 |
|-------|---------------------------|--|----|
| 研究協力者 | 矢嶋 遼 (Yajima Ryo) | 東京農工大学・工学府情報工学専攻・大学院生 (12605) | |

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 |
|-------|--|--|----|
| 連携研究者 | 中川 正樹 (Nakagawa Masaki) (10126295) | 東京農工大学・学内共同利用施設等・特任教授 (12605) | |

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 |
|---------|---------|
| | |