

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ー

三浦 将人^{†1} 工藤 雅士^{†1} 中山 祐貴^{‡2} 山名 早人^{§3}

^{†1} 早稲田大学大学院基幹理工学研究科 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

^{‡2} 早稲田大学グローバルエデュケーションセンター 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田 1-6-1

^{§3} 早稲田大学理工学術院 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail: † § {masato, kudoma34, yamana}@yama.info waseda.jp,

‡ nakayama@aoni.waseda.jp

あらまし 近年, タブレット端末を用いた学習用アプリケーションの利用が広がりを見せている. オンライン学習においては, 人の目による学習者の監視が難しいため, 学習者一人一人の理解度に合わせた適切なフィードバックを自動的に生成することが求められる. 著者らの先行研究では, 「ヒント参照有無の情報がフィードバックに活用できる」という考えの下, 幾何の問題を対象としたオンライン手書き解答データを用いて, 解答者が「ヒントを閲覧したか否か」を Recursive Feature Elimination(RFE)により選択した特徴量を用いて線形 SVM により判定した. 先行研究においては, 書き込みが停滞した時間の割合や, 幾何図中に限定した筆圧などのデータを特徴量として追加することで精度が向上した. しかし, 先行研究の精度は実用のためには十分とは言えず, 更なる精度向上が必要である. そこで本研究では, さらなる精度向上の手がかりをつかむため, 多数の問題における解答データを収集し, 難易度毎における解答者のヒント参照前後の筆圧や筆記速度などの特徴量の変化について調査した.

キーワード 手書き, 電子ペン, 数学, 論理的思考力, 幾何問題

1. はじめに

近年, スマートフォンなどのタブレット端末を用いた学習用アプリケーションの利用が広がりを見せている. 2020 年の内閣府の発表¹によると, インターネットを利用する学生の内, 高校生では 53.6%, 中学生では 40.9%が学習を目的としたアプリケーションやサービスを利用していると回答しており, 学習用アプリケーションを用いた学習が一般的になっていることがわかる.

実際の教育の場におけるタブレット端末の利用についても広がりを見せてきている. 文部科学省は 2019 年度から「GIGA スクール」²という学校教育のデジタル化政策を進めており, 1 人 1 台の学習用コンピュータの配布を目指している. 特に近年では新型コロナウイルスの影響でオンライン授業の需要が高まっており, 文部科学省は「1 人 1 台端末」の実現について前倒しを進めている³.

一般に教育においては学習者一人一人に合わせた適切なフィードバックを提供することが求められる. しかし, アプリケーションを用いたオンラインの学習においては, 学習者の様子を人の目によって確認する

ことができない. そのため, 学習者に合わせた適切なフィードバックを, アプリケーション上で自動的に返すシステムが求められる.

現在, 学習用アプリケーションにおいて実現されているフィードバック手法としては, 学習者の解答について正誤データを収集し, 過去に誤答した問題を再度出題する, という手法が挙げられる. しかし, 既存の正誤情報によるフィードバック手法においては「理解している」, 「理解が不十分のため再出題が必要である」の 2 通りにしか分類できず, 細かくフィードバックを返すことができない.

フィードバックの種類を増やす方法として, 学習者が取り組んだ問題に対して, 正解を導くためのヒントを参照したかどうかについての情報を利用する方法が考えられる. ヒント参照有無の情報を加えることで, ヒントを参照して正解した場合は「解法の理解はできたが復習のため再出題が必要である」, ヒントを参照して不正解であった場合には「その問題に挑戦するには理解が足りておらず, より基礎的な内容の復習が必要である」のように判断することが可能になる. しかし, 本手法をアプリケーションに実装するためには, 学習

¹ 内閣府, “令和元年度 青少年のインターネット利用環境実態調査 調査結果 (速報)”, 2020, https://www8.cao.go.jp/youth/kankyau/internet_torikumi/tyousa/r01/net-jittai/pdf/sokuhou.pdf

² 文部科学省, “GIGA スクール構想の実現について”, 2020, https://www.mext.go.jp/a_menu/other/index_00001.htm

³ 文部科学省, “令和 2 年度補正予算案への対応について”, 2020, https://www.mext.go.jp/content/20200408-mxt_jogai02-000003278_412.pdf

者がヒントを参照して解答を行ったかについて、正確に状況を把握する必要がある。この時、アプリケーション中のヒント機能を使用する場合は、ヒント参照有無を直接「した」「してない」の2値で得ることができるが、参考書など外部のヒントを参照しながら解いている場合は、ヒントを参照したか否かの情報を得ることができない。そのため、自動的にヒント参照の有無を判断するシステムが必要になる。

ヒント参照の有無について、解答済みの答案から判断することは難しいが、オンライン手書きデータにおいては、通常のオフライン手書きにおいては収集することができない座標データや、筆圧データなどを時系列データとして取得することができる。そのため、それらのデータをヒントの参照有無の判定に利用することができる。本研究では、解答を記述する方法が定式化されておらず、目視による思考過程の判断が困難な幾何学図形問題を対象とし、オンライン手書きデータから解答者のヒント参照有無を自動判定する手法の提案を目指す。

オンライン手書きデータを利用したヒント参照有無の自動判定に関する研究では、これまでの成果として、正答のオンライン手書きデータのみをヒント参照の自動分類に用いることで平均 0.819 の F 値を得ている[1]。また、[1]をベースラインとした著者らの先行研究[2]においては、誤答データを含む場合のヒント参照有無の判定において、幾何の問題文や、問題の図中への記入における筆圧などの特徴量を追加し、追加した特徴量について一定の有効性を確認した。

しかし、実用のためにはさらに高い精度が求められる。先行研究においては、誤答データを含む場合における F 値の平均は 0.622 であり、この場合 10 問あたり約 4 問の割合で無駄な再出題や基礎学習を行うことになり、効率的な学習の妨げとなる。無駄な出題を 10 問に 1 問程度に抑えたいと考えた場合は 9 割ほどの精度が求められ、先行研究の精度は十分とは言えず、更なる精度向上が必要である。

本稿では、ヒント参照有無の分類精度向上の手がかりをつかむため、幾何学の図形問題におけるオンライン手書きデータを収集し、難易度毎における解答者のヒント参照前後の筆圧などの変化について調査を行う。本稿では次の構成をとる、2 節で関連研究について述べ、3 節で提案手法について述べる。4 節では収集したデータの調査方法について述べ、調査結果を基に考察を行い、最後に 5 節で本稿についてまとめる。

2. 関連研究

数学の問題の学習支援を行っている研究について、図形の解答データを対象として行った研究、オンライン手書きデータを用いた研究、幾何学問題のオンライン手書き解答データを用いた研究に分類して関連研究を紹介する。

図形の解答データを対象として行った研究には Youngwook らの研究[3]があり、製図の非手書き解答データを対象とした自動採点システムにおいて、解答の拡大・縮小や記入位置のずれに対応して自動採点を行うことができるシステムを考案している。

オンライン手書きデータを用いた研究のうち、数学を対象としたものには前田らの研究[4]があり、オンライン手書きデータを用いて、二重線などの削除・修正を目的としたストロークの検出を行っている。また、飯山らの研究[5]では、ストロークの時間間隔データを使用し、他の学習者に比べて停滞している部分の検出を行うことにより、解答者のつまずきの把握を可能にした。浅井らの研究[6]では、多項式展開の手書き答案について解法の分類を行っており、採点や解法の分類における教師の負担の軽減を図っている。

これらの研究は、いずれも数式を対象とした研究であり、幾何問題の手書きデータを対象とした研究については、筆者が調べた限りでは以下で示す 2 本の研究を除いて確認できなかった。

幾何の解答データを用いた研究には森山らの研究[7]がある。森山らは解法パターンの分類、及び解答者が勘で問題を解いたか否かの判定を行い、勘で解いたか否かの判定において解答時間の他ストロークの筆圧・筆記速度などのデータの特徴量として用いることにより、それらのデータの特徴量として使用しない場合と比較して精度よく分類が可能であることを示した。また、村上らの研究[1]においては、ヒント参照有無の判定を行っており、解答データを正答かつサンプル数の多いデータだけに絞ることで、すべての解答データを使用する場合と比較して精度が上昇することを示した。著者らの先行研究[2]では、誤答データやサンプル数が少ない解法データに関してヒント参照有無を判定するために、解答データを絞らずに高い精度を得る手法として問題文・幾何図中への記入における筆圧などを特徴量として追加する手法を提案し、追加した特徴量について一定の有効性を確認した。

しかし、特徴量を追加したのみでは実用のため十分な精度は得られておらず、更なる精度向上のため調査が必要である。

3. 提案手法

誤答データやサンプル数が少ない解法データを含む場合において精度の向上を目指す。

幾何学の図形問題におけるオンライン手書きデータを収集し、アンケートにより収集した「問題難易度」を3段階に分割する。分割した難易度毎における解答者のヒント参照前後の変化について調査し、ヒント参照有無の判定に有効な特徴量を考察する。

4. ヒント参照前後の変化の調査と検証

本節では、ヒント参照有無の判定における有効な特徴量の調査と検証について詳しく述べる。

4.1 データ収集に用いたアプリケーション

幾何の問題を解く場合におけるオンライン手書きデータを取得するために実施したデータ収集について詳しく述べる。

データ収集には村上らの論文[1]にて用いられたアプリケーション「GeoSol」を利用した。(図1)

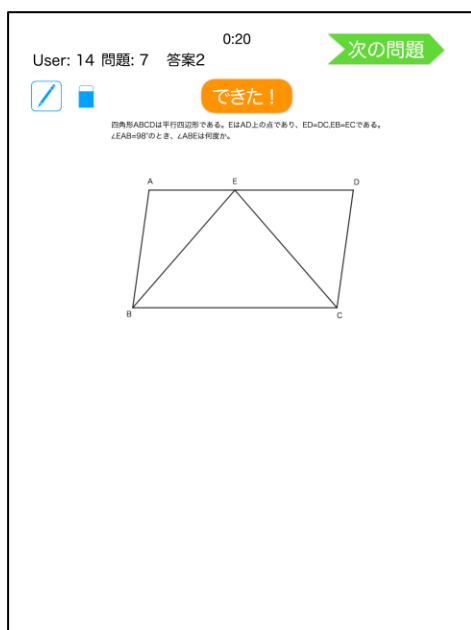


図1.データ収集に用いたアプリケーション

GeoSolでは、タブレット端末(iPad Pro)上に幾何問題を表示し、解答者はApple pencilを用いて画面上に自由に線の描画を行う。また、画面左上の消しゴムのアイコンをタップすることで機能が切り替わり、記述済みのストロークをタップしてストロークを削除できる。また、画面右上の「ヒント」ボタンをタップすることでヒントを参照できる。また、ヒントは2段階になっている。画面右上の「できた」ボタンをタップすることで、画面のスクリーンショット及びストロー

クのデータが保存される。本アプリケーションで取得可能な手書きデータを表1に示す。

表1. 取得したデータ

項目	定義
解答開始時間	問題が表示された時刻
解答終了時間	「できた」ボタンをタップした時刻
記入時刻	ストロークを記入した時刻
座標	ストロークを記入した座標
筆圧	各ストロークにおける筆圧
ペン角度	記入時のペン先の角度(仰角, 方位角)

4.2 実験の概要

早稲田大学の学生36名を被験者として、4.1にて示したアプリケーションを用いてデータ収集を行った。なお、被験者には募集の際に、収集したデータはヒント参照判定実験に活用することを伝えた。

判定に使用した問題は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)からそれぞれ4問ずつ用意し、計20題を用いた。取得したデータを用いて、難易度毎に解答者のヒント参照前後の筆圧などの変化について調査し、精度向上のための手法を考察する。

4.3 アンケート

問題解答後にアンケートを実施した。アンケートの回答については、回答者自身の基準で回答してもらった。アンケートの内容を以下の表2に示す。なお、ヒント1、ヒント2はそれぞれ2段階のヒントの1段階目、2段階目を指し、1段階目のヒントは使用する公式などを示す程度のものであり、2段階目のヒントは詳細な解法を示すものである。

表2.アンケート内容

アンケート項目	解答方法
解答時間(長かったか短かったか)	5段階
ヒント1の分かりやすさ	5段階
ヒント1を見てすぐに理解できたか	6段階
ヒント2の分かりやすさ	5段階
ヒント2を見てすぐに理解できたか	6段階
問題難易度(ヒントを見ない場合)	5段階
問題難易度(ヒント1参照時)	5段階
問題難易度(ヒント2参照時)	5段階

回答方法としては、「簡単だった(分かりやすかった, 短かった等)」, 「どちらかと言えば簡単だった」, 「普通

だった」,「どちらかと言えば難しかった」,「難しかった」のような 5 段階から一つを選ぶ形式とし,「すぐに理解できたか」の項目については 5 段階に加え「理解できなかった」の 6 段階から一つを選択させた。

4.4 検証対象の特徴量

検証の対象とする特徴量を以下の表 3 に示す。対象とする特徴量は、著者らの論文[2]で用いた特徴量の内,「解答にかけた時間」などのヒント参照の前後での変化が見られないものを除いた特徴量である。

表 3.調査対象とする特徴量

特徴量		定義
時間間隔	平均	n 番目のストロークを書き 終えてから n+1 番目のストロ ークを書き終えるまでの時間 [ms]
	標準偏差	
	最大	
速度	平均	ストロークの筆記速度 [pt/ms]
	標準偏差	
	最大	
筆圧	平均	Apple pencil から取得した 電子ペンのタッチ圧力
	標準偏差	
	最大	
端点移動距離	平均	n 番目のストロークの終点と n+1 番目のストロークの始点 の距離[pt]
	標準偏差	
	最大	
図中速度	平均	問題文・幾何図形中への 記入におけるストロークの筆 記速度[pt/ms]
	標準偏差	
	最大	
図中筆圧	平均	Apple pencil から取得した 問題文・幾何図形中 への記入における 電子ペンのタッチ圧力
	標準偏差	
	最大	

4.5 検証方法

表 3 において示した各特徴量について、ヒント参照前後の変化を比較する。また、その変化が有意なものであるか否かをマン・ホイットニーの U 検定により確認する。

アンケート項目より「問題難易度(ヒントを見ない場合)」について 3 段階に分類を行い、問題難易度毎に、各特徴量についてヒント参照前後の変化を比較する。比較結果から、問題難易度毎にヒントの参照有無判定に利用可能な特徴量を明らかにする。

4.6 問題難易度の分割

「問題難易度(ヒントを見ない場合)」のアンケート回答データから、今回用意した 20 問の問題を問題難易度毎に 3 段階に分割する。アンケートの「簡単だった」という回答を 1,「難しかった」という回答を 5 として問題毎に平均値を求め、その平均値をその問題の難易度とした。

3 段階におおよそ同じ問題数が含まれ、かつ段階間の難易度の差が大きくなるように分割した。各段階ごとの難易度の分布を以下の図 2 に示す。

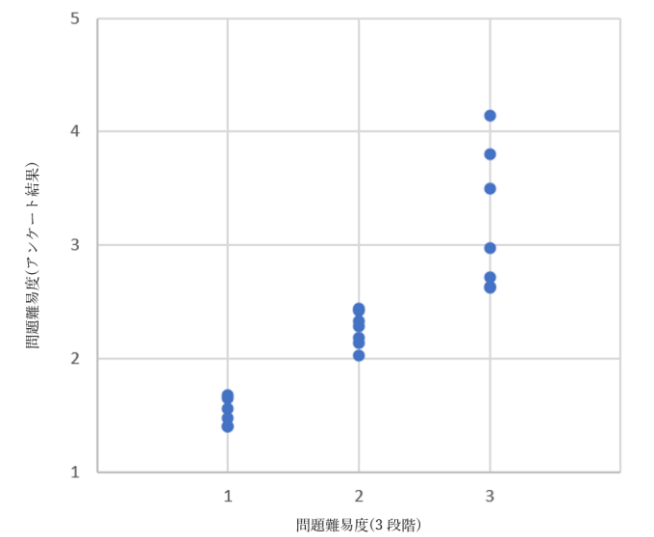


図 2. 各段階ごとの難易度分布

以降、簡単な問題のグループをレベル 1 (Lv1)、中間のグループをレベル 2 (Lv2)、難しい問題のグループをレベル 3 (Lv3)とする。レベル 1 には 6 問、レベル 2 には 7 問、レベル 3 には 7 問の問題を含む。

4.7.ヒント参照前後の特徴量変化

表 3 に示した各特徴量について、難易度毎のヒント参照前後の変化を調べた。

ヒント参照前のそのグループにおける特徴量の値の平均を 1 とした時の、ヒント参照後の値を比較する。すなわち、値が 1 より大きくなっていればヒント参照前に比べヒント参照後に値が大きくなったことを示す。

問題難易度毎の特徴量の変化を表 4 に示す。また、マン・ホイットニーの U 検定により有意水準 0.05 の両側検定を行い、特徴量の変化が統計的に有意であるか否かを判定した。表 4 中の黄色く塗りつぶされている項目は、特徴量の変化が統計的に有意であった項目である。

表 4.難易度毎における特徴量変化

特徴量		Lv1	Lv2	Lv3	全 Lv
時間間隔	平均	1.045	0.684	0.717	0.773
	標準偏差	1.175	1.051	0.745	0.970
	最大	1.346	1.257	0.897	1.141
速度	平均	1.078	1.064	1.086	1.080
	標準偏差	1.135	1.094	1.108	1.113
	最大	1.129	1.141	1.127	1.132
筆圧	平均	0.952	1.102	0.972	1.013
	標準偏差	1.003	1.133	1.011	1.053
	最大	1.008	1.121	1.028	1.055
端点移動距離	平均	0.946	0.821	0.830	0.860
	標準偏差	0.980	1.044	0.990	1.006
	最大	1.016	1.143	1.080	1.080
図中速度	平均	1.060	1.071	1.035	1.061
	標準偏差	1.038	1.062	1.002	1.044
	最大	1.001	1.071	1.008	1.039
図中筆圧	平均	1.037	1.032	1.021	1.029
	標準偏差	0.882	1.047	0.937	0.963
	最大	0.901	1.038	1.007	0.990

筆記速度の平均については、レベル 1 からレベル 3 までのすべての難易度において上昇している。このことから、ヒント参照によって解き方を理解したことにより、スムーズに問題を解くことができていることが分かる。また、筆記速度の平均においてはすべての難易度において統計的に有意な変化が見られ、筆記速度の平均は難易度に関わらずヒント参照有無の判定に利用可能な特徴量であると考えられる。

時間間隔の平均及び標準偏差、端点移動距離の平均については、難度の高い問題において減少傾向が見られ、難度の高い問題においてのみ統計的に有意な差が見られた。時間間隔が難度の高い問題においてのみ短くなる理由としては、特に難しい問題をヒント無しで解こうとする場合においては、解法が思いつかずペンが止まる時間が長くなり、ヒントを参照することによって解法を知りペンを動かすことができるようになるため、時間間隔が短くなると考えられる。

一方、筆圧及び図中筆圧については、今回の調査ではすべての難易度において統計的に有意な差は見られなかった。

5.おわりに

本稿では、解答者のヒント参照前後の特徴量の変化について、難易度毎に分割して調査を行った。その結果、広い難易度の問題において「筆記速度」が特徴量として有効であり、高い難度の問題においては「時間間隔」、「端点移動距離」が特徴量として有効であると考えられることが分かった。

今後の展望としては、難易度毎以外の手法による分割を行いさらに調査を進める事、今回判明した有効な特徴量を利用してヒント参照有無の判定精度を向上させる事が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（20H04292）による。

参考文献

- [1] 村上 統馬, 山名 早人, “オンライン手書きデータを用いた幾何学図形問題に対する答案の自動分類と解答者の理解度推定,” 早稲田大学基幹理工学部情報理工学科卒業論文, 2019.
- [2] 三浦将人, 村上統馬, 中山祐貴, 山名早人, “オンライン手書き解答データを用いた解答者のヒント参照有無の判定 ～ 幾何学問題を対象として～”, 電子情報通信学会, 信学技法, vol.119, no.393, pp.27-32, 2020.
- [3] Youngwook Paul Kwon, Sara McMains, “An Automated Grading/Feedback System for 3-View Engineering Drawings using RANSAC,” Learning@Scale, L@S’15, pp.157-166, 2015
- [4] 前田祐樹, 三浦元喜, 小林祐作 “デジタルペン筆記における学習状況把握のための削除・非削除ストロークの検出”, 情報処理学会 情報教育シンポジウム 2015 論文集, pp.109-116, 2015.
- [5] 飯山将晃, 中塚智尋, 森村吉貴, 橋本敦史, 村上正行, 美濃導彦, “ペンストロークの時間間隔を用いた解答停滞箇所の検出”, 教育システム情報学会教育システム情報学会誌, vol.34, No.2, pp.166-171, 2017
- [6] 浅井洋樹, 山名早人, “電子ペンを利用した数学手書き答案の戦略分類手法～多項式展開問題を題材として～”, 情報処理学会研究報告, コンピュータと教育研究会報告, vol.2016, no.6, pp.1-8, 2016
- [7] 森山優姫菜, 下岡純也, 浅井洋樹, 山名早人. “電子ペンを用いた手書き解答データによる幾何学解答パターン分類手法”, 2016 年情報科学技術フォーラム(FIT), pp. 321-328, 2016.