

身体動作からの迷走状態の推定に基づく タブレット用振り返り学習支援システム

江崎 魁星^{*1} 市野 順子^{*1}

概要:学習者にとって、一度学んだことを振り返ることは重要であるが、ICTを用いて振り返りを支援するシステムは少ない。本研究は、タブレット端末を使用した学習において、学習者の状態に応じて、学習者にとって適切な情報を適切なタイミングで提示する振り返り支援システムを提案する。対象とする学習者を中高生とし、題材に数学を用いる。まず、迷走状態にある学習者の身体動作を調査する予備実験を行った。その結果、迷走状態にあると、指・手・頭部・上半身などさまざまな身体動作に表出すること、迷走度によってそれら動作の生起頻度が異なることがわかった。次に、予備実験の結果を踏まえ、手（ペン先）および身体の動作から迷走度を推定し、迷走度に応じたヒントを提示するシステムを実装した。実装したシステムを用いたパイロットスタディを行った結果、基本的な有効性を確認できたと同時に、さまざまな課題が抽出された。

1. はじめに

1.1 背景

学習の場面において、授業等で学習者が初めて遭遇する概念・公理・定理などを理解する場面と、一度学んだことを単独で振り返る場面では、参照する情報や行動パターンは全く異なる。後者の場面では、学習者は、しばしば過去に自分の取ったノート（以下、過去ノート）や教科書を見返す。学習者の学習内容によって見返すべき箇所は異なるし、また、同じ学習者でも学習者の思考状態によって見返すのに適した情報量も異なる。既存の学習者を支援するシステムの多くは、前者の、新規事項の理解を支援するもの（例えば[1][2]）が多く、後者の、一度学んだことの振り返りを支援するものは限られる。

一方で、ペーパーレス化や重量化した教科書の持ち運びによる子どもたちの腰痛対策を背景に、タブレットを導入する学校が増えてきている。タブレットはフリーハンド入力が可能なため、数学学習やデザイン思考等を支援する技術として特に有用と考えられる。それゆえ、タブレットを用いて学習者を支援する試みはさまざま行われている。例えば、研究[3][4]は、指やペンの動きから学習者の理解度を推定している。しかし、学習者は、学習時に空中を見上げる、頭を掻く等多様な行動を示すため、ペンの動きだけを用いて推定可能な学習者の状態は限られる。また、先行研究の多くは、冒頭で述べた新規事項を理解する場면을支援するものがほとんどである。

1.2 目的

以上より、本研究では、タブレット端末を使用した学習において、学習者の状態に応じて、学習者にとって適切な情報を適切なタイミングで提示する振り返り支援システムを提案する。対象とする学習者を中高生とし、題材に数学を用いる。

2. 関連研究

2.1 学習者に対する数学の学習支援

学習者の数学の新規事項の学習を支援することを目的とした研究は多く行われている[1][2]。紙ベースの数学学習では立体図形を考えるときに、1方向からの見た目を平面に書き起こすなど、多方向から見るのが困難である。これに対し、VR技術を用いた仮想空間に空間図形を投影して、図形を動かして多方向から見るができる手法が提案されている[1]。また、四則の計算などを実際の物を動かしてイメージする場合には、動かす物が大量に必要な場合がある。これに対し、AR技術を用いた拡張現実、現実世界の物体を複製して数学の問題解決の支援をする手法が提案されている[2]。

しかし、これらの手法は新規事項の学習を支援するものであるため、複雑な問題の支援が不十分である。複雑な問題を解くためには、複雑な問題の単元の新規事項の学習を支援するだけでなく、それを思い出させる振り返りフェーズの支援が必要である。

2.2 理解度の推定に関する研究

理解度の推定を目的とした研究は多く行われている[3][4]。タブレットに数学の問題を解いた際のペンの動

^{*1}: 東京都市大学 メディア情報学部情報システム学科

きから、その問題の単元の理解度を推定する手法が提案されている[3]。また、学習において答えを予想して勘で求めると、今後似たような問題が出てきた際に解くことができない可能性がある。これに対しタブレットでの学習において、ペンまたは指の動きから解答を推測して求めているかと、根拠を持って求めているかを判別して、追加の学習指導を受けるべき学習者を特定する手法が提案されている[4]。

これらの手法はペンの動きから理解度を推定しているが、学習者の解法がわからず、いろいろ考えている状態（以下、迷走状態）の学習者はタブレットからペンを離す時間も多くなる。よって、ペンの動きだけでは理解度が十分に推定できているとは言い難いため、身体動作も必要である。

2.3 デジタルノートの普及のため研究

スマートフォンやタブレット端末は紙ベースの学習と比べると作業領域が限られることが、問題として挙げられる。これに対し、スマートフォンを用いて手書きメモを取る際に、出力画面から手書き入力画面を独立させる手法が提案されている[5]。また、デジタルノートの強みである検索機能などを利用するためには、手書きの文字が正しく認識される必要があるため、手書き数式の認識を向上させる研究が行われている[6][7]。

3. システム要件の分析

本節では、学習者の振り返りを支援するシステムの要件を検討する。

第一に、数学の学習では、公式を覚えた後、公式を問題によって使い分けることができるのが望ましいため、知識だけではなく思考力をつけることが重要である[8]。振り返りの場面において、例えば、公式の意味をある程度理解しているが公式を正確に覚えていない学習者に対して、公式だけでなくその使い方までを与えてしまうと、学習者の思考の機会を奪いかねない。一方で、公式を根本的に理解していない学習者に、公式だけを教示しても問題を解くことはできず学習者の振り返りを支援できない。つまり、学習者の理解の程度に応じて、適切な情報量のヒントを提供する必要がある。

第二に、数学の学習では、問題を解き進める中で、いろいろな単元の公式が登場する。例えば、対数関数の方程式の問題において、対数関数の単元で登場する対数の定義の公式だけではなく、1次関数や2次関数の単元で登場する方程式の解き方の公式を用いることがある。そのため、学習者がその時に解いている箇所では使わないヒントを提示してしまうと、学習者にとって無益なヒントになりかねない。また、そのヒントを使った解き方を

すると学習者を勘違いさせてしまいかねない。つまり、学習者がその時点に使うべき解法をヒントとして提示する必要がある。

以上より、システム要件を表1にまとめる。

- | |
|-------------------------------------|
| ① 学習者の理解度に応じて適切な情報量のヒントを提示する |
| ② 解く過程においてその時点で最も関連するセクションのヒントを提示する |

表1 システム要件

4. 迷走状態にある学習者の身体動作に関する予備実験

理解度は直接的に測ることは困難なため、本研究では、身体動作にある程度表出する迷走度合いを、理解度の代替指標とする。

4.1 実験目的

一般に学習者は解法がわからないと、ペンを振る、上体をそらす等の身体動作をとる。そこで学習者の迷走度に応じて支援をするために、学習者の迷走度合いにより、どのような身体動作をするのか調査する実験を行った。

4.2 実験方法

3名の被験者（いずれも22歳男性）を対象に高校数学の問題を3問ずつ、タブレットとスタイラスペンを用いて解いてもらった。その際、わからない場合はヒントを見ることを許可し、学習者がヒントを見なくなるまでの時間も調査した。身体動作の分析には動画アノテーションソフトELAN[9]を用いた。図1にELANでのコーディングの様子を示す。

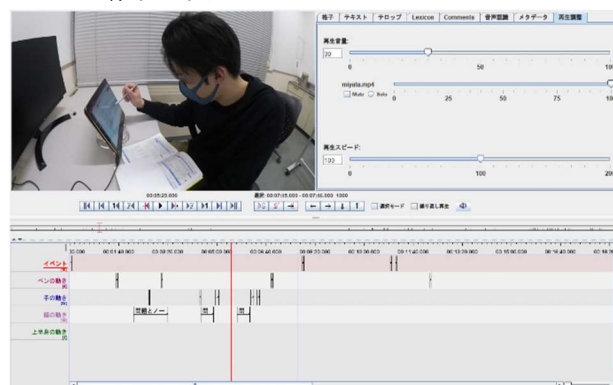


図1：ELANでのコーディングの様子

4.3 実験結果

実験で観察された迷走状態の身体動作を表2に、学習者がヒントを見るまでの時間を表3に示す。

被験者のヒントの見方により、公式のみを確認した場合は迷走度低、公式と使い方を確認した場合は迷走度高とした。表3から、被験者がヒントを見るまでの時間は

約 3 分であることがわかった。3 分間で観察された迷走度別での身体動作の平均生起回数を図 2 に示す。図 2 のグラフから、迷走度が異なっても身体動作のパターンは概ね同じであることが推測される。また、3 分間での身体動作の平均回数は、迷走度低で約 3.5 回、迷走度高で約 5.8 回であった。

ペンの動き	ペンをトントンする	
	ペンを振る	
	ペンを置く	
手の動き	頭部を触る	
	頬杖をつく	
	腕組をする	
	顎に手をあてる	
顔の動き	首をかしげる	
	斜め上を見る	
	下を向く/問題を見る	
上半身の動き	上体をそらす	

表 2：観察された迷走状態の身体動作

	1 問目	2 問目	3 問目	平均
A	3m24s	3m38s	2m4s	3n2s
B	—	3m22s	1m37s	2m30s
C	3m4s	—	5m20s	4m12s
計	—	—	—	3m13s

表 3：学習者がヒント見るまでの時間
(一部すらすら解けたため記録なし)

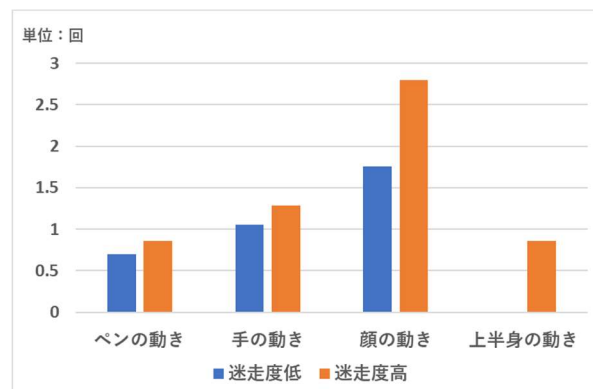


図 2 3 分間での迷走度別の身体動作の平均生起回数

5. システム設計

予備実験の結果を踏まえ、表 1 のシステム要件から表 4 のようにシステム設計を導出した。また、システムの流れを図 3 に示す。

[システム要件①] 学習者の理解度に応じて適切な情報量のヒントを提示する
3 分間の迷走状態の身体動作 ・ 3 回以上 5 回未満⇒迷走度低 ・ 5 回以上 ⇒迷走度高
[システム要件②] 解く過程においてその時点で最も関連するセクションのヒントを提示する
数学の単元マップ[10]から表示するヒントの単元を決定

表 4：システム設計

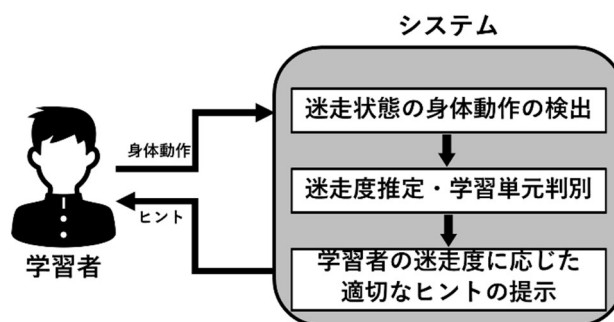


図 3：システムの流れ

6. システム実装

本研究で使用した、ハードウェアの構成を図 4 に示す。タブレット端末 (HP Spectre x360)、加速度センサ (MonoWireless TWELITE 2525A)、加速度センサ受信機 (MONOSTICK-B)、スタイラスペン (Surface Pen) を用いて実装した。

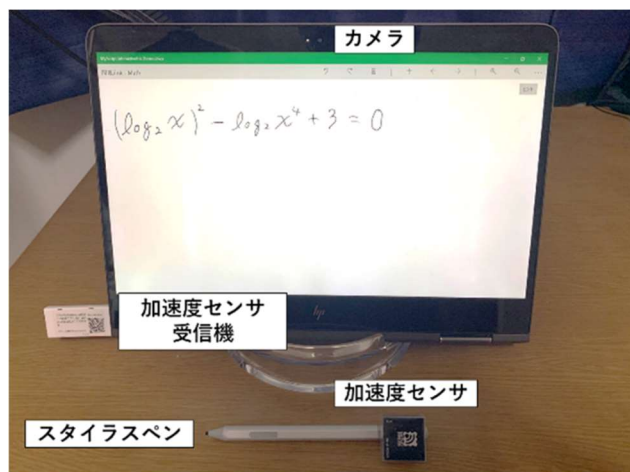


図4：ハードウェア構成

6.1 迷走状態の身体動作の検出

6.1.1 ペンの動きの検出

表2で示したペンの動きを検出および判別をするために、持ち手の邪魔にならないようスタイラスペンの上部に加速度センサ[11]を取り付けた。この加速度センサは加速度を3軸(x,y,z)で秒間100回測定して、100ms毎にtxtファイルを更新するようプログラムを作成した。表2で示したペンの動きの詳細を図5に示す。

加速度センサの3軸のいずれかが連続する2つの値の差分が、0に近い値を100ms続いたのち急激な増減を、3回以上繰り返したときに図5の「ペンをトントンする」とし、緩やかな増加5ms以上および緩やかな減少5ms以上を交互に繰り返したときに図5の「ペンを振る」と判別した。また、3軸すべてが限りなく0に近い値が2秒以上続いたときに図5の「ペンを置く」と判別した。

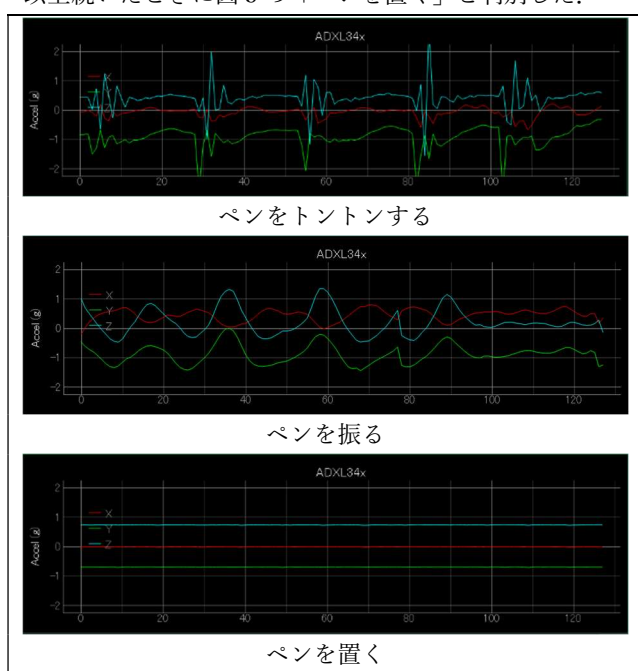


図5：ペンの動き

6.1.2 身体の動きの検出

表2で示した手の動きと顔の動き、上半身の動きの身体の動きを検出および判別するために、カメラの映像からリアルタイムに骨格座標を取得するOpenPose[12]を使用した。OpenPoseは頭から足先までの25か所の骨格で構成されており(図6)、それぞれの箇所の左上を原点とする座標と信頼度の3つで測定し、約毎秒20回でデータを出力した。表2で示した手の動きと顔の動き、上半身の動きの詳細を図7に示す。

身体の動きのうち特徴のある2点ないしは3点をそれぞれ選び、座標間の距離、傾き、差、なす角を計算して判別した。遠近で骨格間の距離が変化するため、基準となるbaseValueを肩幅の距離(図6の2,5の距離)とし、それぞれの判別に用いた値を表5にまとめる。計算方法の数字は図6の数字と対応している。

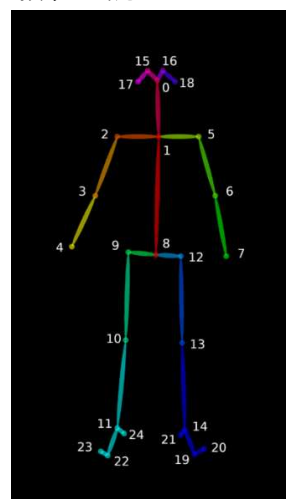


図6：OpenPoseの出力順

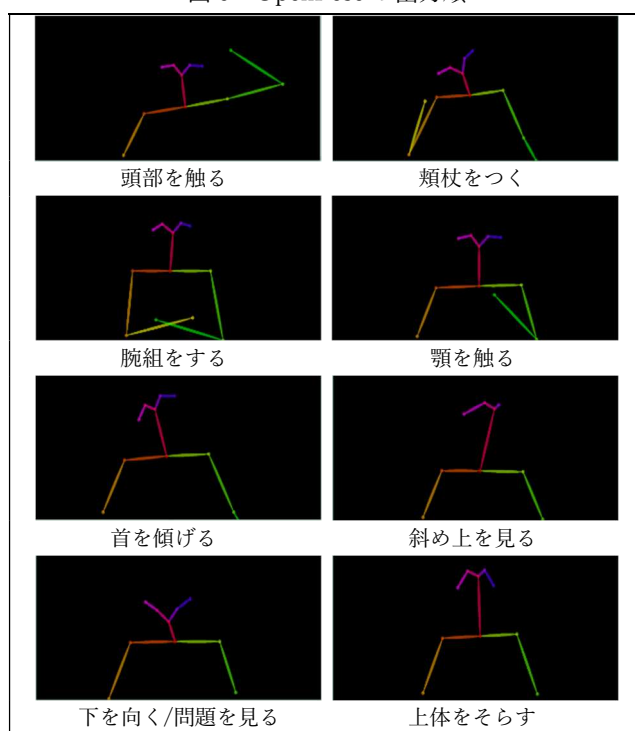


図7：身体の動き

行動	計算方法	設定
頭部を触る	4,17 or 7,18 の距離	baseValue / 2 以下
頬杖をつく	15,16 の傾き 2,3,4 or 5,6,7 のなす角	15 度以上 20 度以下
腕組をする	4,7 の x 座標の差分	0 未満
顎を触る	1,4 or 1,7 の距離	baseValue / 2 以下
首を傾げる	15,16 の傾き	20 度以上
斜め上を見る	15,17 or 16,18 の距離	baseValue / 3 以上
下を向く/ 問題を見る	0,17 or 0,18 の y 座標の差分	baseValue / 5 以下
上体をそらす	17,0 or 18,0 の y 座標の差分 15 と 16 の距離	baseValue / 5 以下 baseValue / 4 以下

表 5：選択する骨格と計算方法

6.2 迷走度推定・学習単元判別

6.2.1 迷走度の推定

表 4 のシステム設計に従い、6.1.1 節と 6.1.2 節で検出した迷走状態の身体動作の 3 分間での生起回数が 3 回以上 5 回未満の場合は迷走度低、5 回以上の場合には迷走度高と判別した。

6.2.2 学習単元の判別

本システムの実装は、手書き数式認識 API「MyScript Windows UWP」[13]のサンプルファイルを元に実装した。サンプルファイルの機能を表 6 に示す。

- ① 形式を指定して、手書き文字をデータに変換
- ② ファイル形式を指定して手書き文字を保存
- ③ 保存した手書き文字の呼び出し

表 6：MyScript Windows UWP の機能

本節では、表 6 の②の機能を用いて演習ノートに書かれている数式を tex ファイルで保存し、ファイル内の文字の最終行とその前から単元・解法を文字列照合により判別した。その流れを、図 8 に示す。

また本研究は、迷走度合いに応じたヒントを提示することによる振り返り支援の有効性を示すことが目的のため、対数関数および対数関数に関連する単元に範囲を縮小してシステムを実装した。

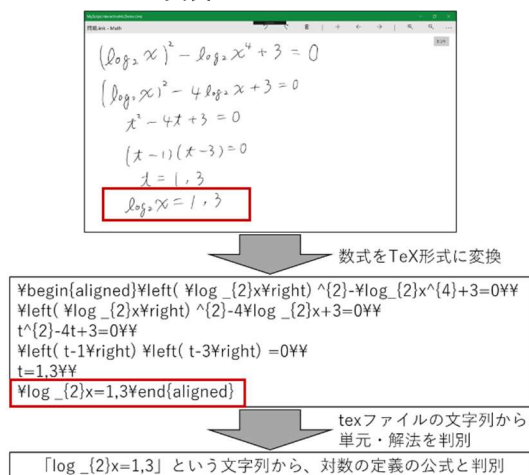


図 8：学習単元判別の流れ

6.3 学習者の迷走度に応じた適切なヒントの提示

本節では 6.2 節より判別した迷走度と学習単元より、ヒントの情報量と単元を決定し、表 6 の③の機能を用いてヒントの提示をする。

「ヒント画面」は学習開始時に閉じた状態ではじまり、3 分後にヒントを提示する場合に「演習ノート画面」右側に出現するようにした。また、問題終了までにヒントを複数回表示したときに、学習者が振り返られるよう「ヒント選択パネル」にヒントをスタックするようにし、学習者がヒントを選択するとヒント画面に表示されるようにした。本システムのユーザインタフェースを図 9 に、フローチャートを図 10 に示す。

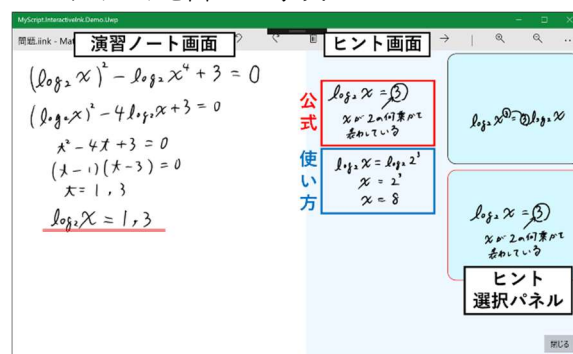


図 9：システムのユーザインタフェース

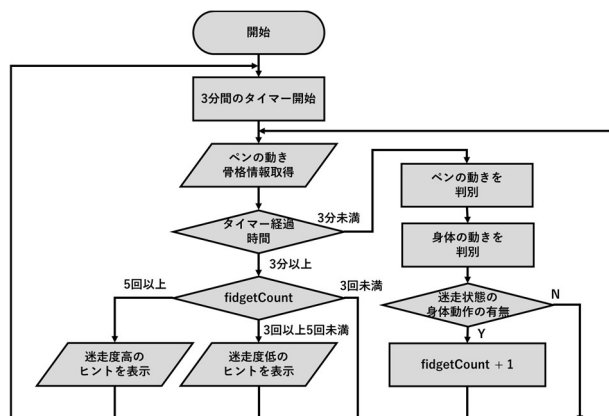


図 10：システムのフローチャート

7. 迷走度推定の精度検証

本節では、6 節で述べた、ペンの動きの検出手法 (7.1 節) および身体の動きの検出手法 (7.2 節) の精度検証を行う。被験者 1 人 (筆者本人) が、迷走状態を表す身体動作をそれぞれ 50 回ずつ試行した。

7.1 ペンの動きの検出精度

迷走状態を表す身体動作のうち、ペンの動きの検出精度検証を 6.1 節で紹介した手法で行った。

表 7 の結果より、本システムではペンの動きを概ね検出することができた。

ペンの動き	精度
ペンをトントンする	90% (45/50)
ペンを振る	92% (46/50)
ペンを置く	100% (50/50)

表 7：ペンの動きの検出精度

7.2 身体の動きの検出精度

迷走状態を表す身体動作のうち、身体の動きの検出精度検証を 6.2 節で紹介した手法で行った。またタブレット内臓のカメラの視野角では、身体が画面に近い場合に腕等の検出が正しくできない可能性があるため、タブレット内臓のカメラより広い視野角（120 度）をもつカメラをタブレット上部に取り付けて行った。

表 8 の結果より、ほとんどの動作を高い割合で検出できたが、「腕組をする」動作で少し低い結果が見られた。「腕組をする」動作の判別では、カメラの下部に映る右手首と左手首の座標（図 6 の 4,7）を使用するため、身体が画面に近いと手首が認識されないことがあり、精度が下がってしまったと考えられる。これは、視野角の広いカメラを使う、もしくは OpenPose の精度の向上により解決できるのではないかと考えられる。

身体の動き	精度
頭部を触る	96% (48/50)
頬杖をつく	96% (48/50)
腕組をする	76% (38/50)
顎を触る	92% (46/50)
首を傾げる	94% (47/50)
斜め上を見る	86% (43/50)
下を向く/問題を見る	94% (47/50)
上体をそらす	90% (45/50)

表 8：身体の動きの検出精度

8. 利用シナリオ

システムの利用シナリオを表 9、図 11 に示す。本利用シナリオでは、高校生が学校の宿題で対数関数の問題を 1 人で解いている場面を想定する。

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ① 学習者が二次方程式の解法がわからず、迷走状態の身体動作を 3 回行う ② システムが迷走度低のヒントを提示する ③ 学習者が迷走度低のヒントを見て解き進める ④ 学習者が対数の定義の公式がわからず、迷走状態の身体動作を 5 回行う ⑤ システムが迷走度高のヒントを提示する ⑥ 学習者が迷走度高のヒントを見て答えまで求める |
|--|

表 9：利用シナリオの流れ

9. パイロットスタディ

9.1 実験目的

表 1 のシステム要件に即したシステムになっているかを評価するために、実験を行った。

9.2 実験方法

2 名の被験者（いずれも 22 歳男性）を対象に、本研究で実装したシステムを用いて対数関数の問題を解いてもらった。迷走状態の身体動作がしやすいように学習者の周りに人がいない状態で解いてもらい、実験後に自由記述のアンケートに回答してもらった。

9.3 実験結果

被験者 A は、途中で間違った解き方のまま進み答えまで求めたため、振り返り支援をすることができなかった。

被験者 B は、最初の式変形がわからず、3 分間で迷走状態の身体動作が 5 回以上検出されたため、迷走度高のヒントが表示された。その後、ヒントを参考にして答えまでたどり着くことができた。実験後、被験者 B に自由記述のアンケートを取ったところ表 10 のように回答した。

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ① ヒントの情報量はちょうどよかった ② この公式であっているかをヒントで確認できた ③ ヒント提示のタイミングは遅く感じた |
|--|

表 10：被験者 B のアンケート結果

9.4 実験考察

9.4.1 被験者 A の考察

被験者 A の結果より、学習者が途中で間違った公式で解き進め、それに気づくことなく答えまで求めた場合に、本システムでは全く振り返り支援をすることができない。そこで、問題に対して解法の一連の流れを生成しておき（Microsoft Math Solver[14]など）、それと学習者が書いている数式を照らし合わせ、間違っている箇所を強調表示および、ヒントの提示をすると良いと考えられる。

9.4.2 被験者 B の考察

表 8 の被験者 B のアンケート結果より、表 1 のシステム要件①と②は概ね満たしていると示唆される。しかし、表 8 の③「ヒントの提示のタイミングは遅く感じた」という回答から新たな問題が上がった。これは、被験者 B はヒントが提示されるまでずっと問題に手が付けられない状態が続いたことによるものと考えられる。そこで、迷走状態の身体動作が 5 回検出された時点で迷走度高のヒントを提示すると良いと考えられる。

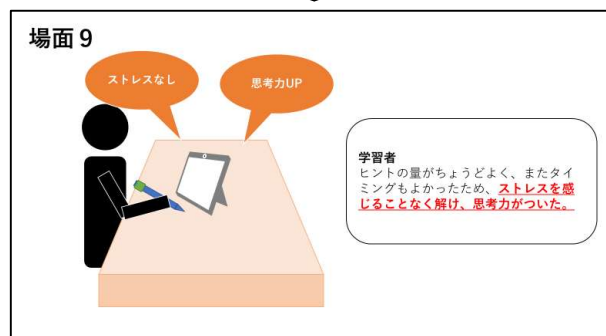
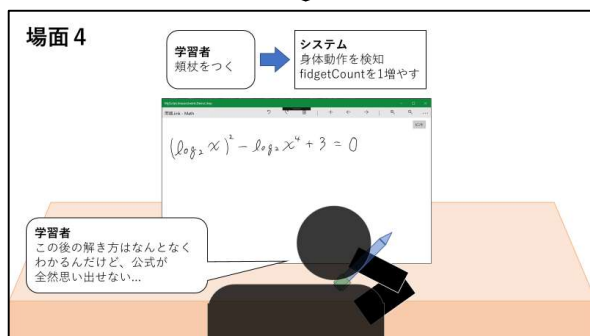
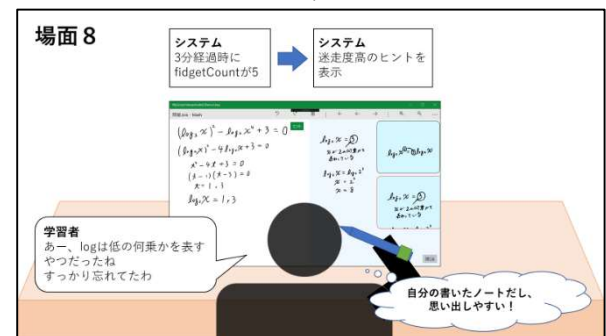
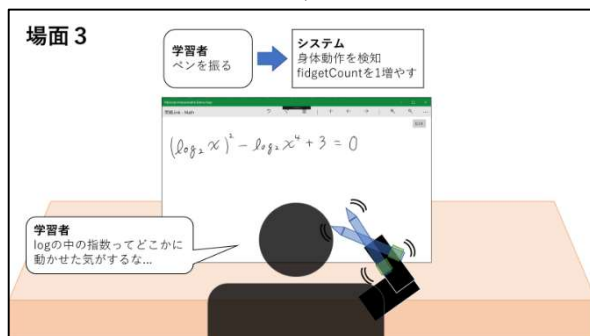
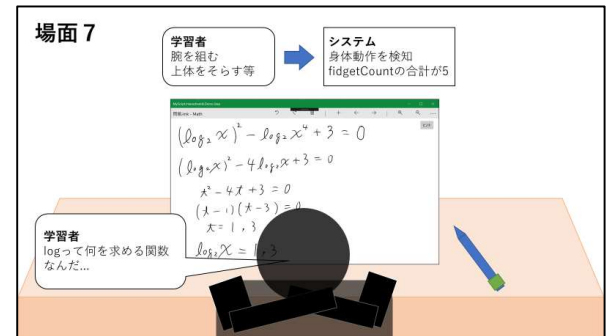
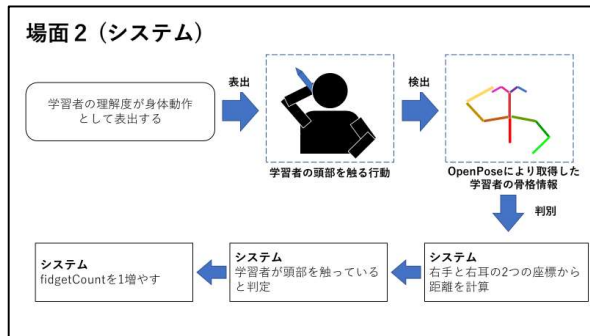
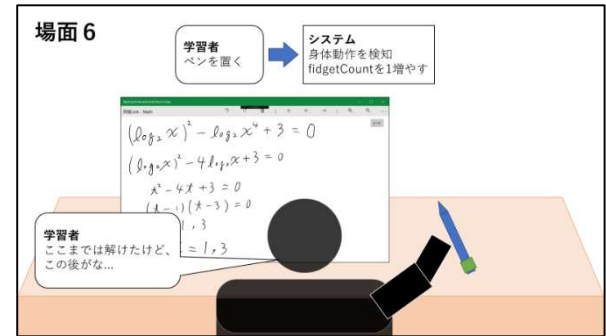
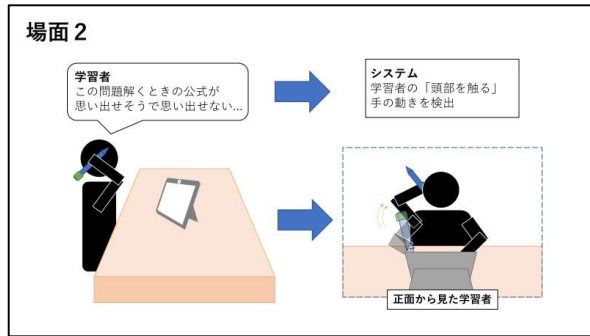
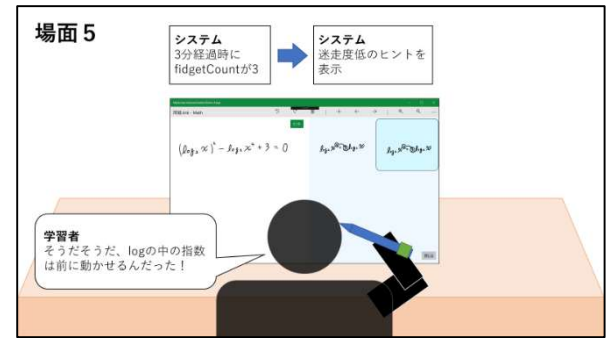
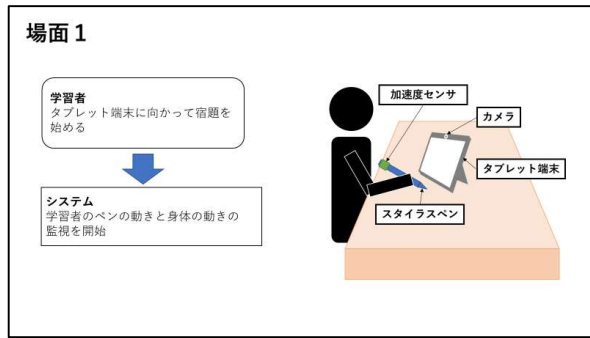


図 11：利用シナリオ

10. まとめ

本研究では、学習者が自習や宿題等で数学の問題を1人で解いている場面において、学習者の身体動作を検出して迷走状態の推定を行い、ヒントを提示するシステムを提案した。このシステムは、ペンの動きと身体の動きから迷走状態を迷走度低と高の2つで判別し、学習者に適切な量のヒントを適切なタイミングで提示する。また、本研究ではこれらのシステムを実装し、身体動作の検出精度の検証およびパイロットスタディを行った。

精度検証の結果、一部の動作を除き概ね判別することができた。また、検出精度の低かった「腕組をする」動作は、検出に用いる手首の骨格がカメラに映らないことが原因であると考えられる。

パイロットスタディでは、2名という少ない被験者で行ったが、1人の被験者では本システムの有効性が示唆される結果となった。しかし、もう1人の被験者ではシステムの改善が求められる結果となった。

11. 今後の課題

本研究で行ったのは、簡易的なシステムの実装であるため、今後以下の事項の機能追加と課題解決が必要である。

・迷走状態の身体動作の検出精度の向上

本研究では、ペンの動き3つ、身体の動き8つを簡単な数式で判別しているため、より詳細な分類をする場合に、身体動作の特徴を精査し、改善する必要がある。

・ヒント提示の条件の改善

本研究では、3分間での迷走状態の身体動作を検出し、ヒントを提示するようにしたが、9節の被験者Aや被験者Bの結果より、多大な課題が残った。「全く筆記をしていない」や「間違った解き方をしている」などの学習者の状況に合わせ、ヒント提示の条件やヒント提示までの時間の検討が必要である。

・支援する数学の単元の拡張

本研究は対数関数および対数関数に関連する単元のみでシステムを実装したため、今後支援できる単元を増やしていく必要がある。

・多くの中高生を対象とした評価実験

本研究では簡単な評価実験は行ったが、本研究の対象は中高生である。中高生にとって実用なシステムであるかを明らかにするためには、実際に中高生を対象とした評価実験を行い、実験結果に応じたシステムの改善が必要である。

Three Dimensions. ACM CHI EA '19

- [2] Seokbin Kang et al. 2020. ARMath: Augmenting Everyday Life with Math Learning. ACM CHI '20
- [3] Jianlong Zhou et al. 2014. Combining empirical and machine learning techniques to predict math expertise using pen signal features. ACM MLA '14
- [4] Hyunjin Shin et al. 2020. Guessing or Solving?: Exploring the Use of Motion Features from Educational Game Logs. ACM CHI EA'20
- [5] Yi Ren et al. 2014. InkAnchor: enhancing informal ink-based note taking on touchscreen mobile phones, Proc. ACM CHI '14.
- [6] Eugene M. Taranta et al. 2016. A Dynamic Pen-Based Interface for Writing and Editing Complex Mathematical Expressions With Math Boxes. ACM Trans. '16
- [7] Dmytro Zhelezniakov et al. Evaluating new requirements to pen-centric intelligent user interface based on end-to-end mathematical expressions recognition. IUI '20
- [8] 岡健作編, 2017, 逆転合格を実現する医学部受験×パーソナルトレーナー, 幻冬舎
- [9] ELAN 6.0, <https://archive.mpi.nl/tla/elan>
- [10] 啓林館, 新学習指導要領における算数・数学内容系統一覧表
- [11] MonoWireless
<https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-Lite-2525A/howtouse-graph.html>
- [12] OpenPose, <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose>
- [13] MyScript Windows UWP
<https://developer.myscript.com/docs/apis>
- [14] Microsoft Math Solver
<https://mathsolver.microsoft.com>
- [15] Robert Zeleznik et al. Hands-on math: a page-based multi-touch and pen desktop for technical work and problem solving. UIST '10
- [16] Anne-Marie Mann et al. Facilitator, Functionary, Friend or Foe?: Studying the Role of iPads within Learning Activities Across a School Year. CHI '16

参考文献

- [1] Harrison Pearl et al. 2019. Coordi: A Virtual Reality Application for Reasoning about Mathematics in