

# 珠算学習支援システムのための映像分析に基づく 操作完了検知手法の提案

吉村 太斗<sup>1</sup> 松田 裕貴<sup>1,a)</sup>

**概要：**珠算学習者が珠算能力を向上させるためには、学習者の苦手操作や計算ミスの傾向を把握し、それに応じた指導を行うことが重要である。しかし、このような支援は指導者に依存する部分が多く、学習者一人ひとりの状況に応じた継続的な支援を行うことには限界がある。この課題に対し、学習者の算盤操作をセンシングし、個々の状況に応じた学習支援を提供することで、珠算学習の効率向上が期待できる。そのため、計算過程における入力値の把握に加え、学習者が算盤への入力を完了したタイミングを適切に検知することが必要となる。筆者らはこれまでに、市販の AR マーカを算盤に貼り付け、モバイルデバイスのインカメラおよび反射鏡を用いて手元を撮影・分析することで、算盤の入力値を推定するシステム AbaCaaS-mini を提案している。しかし、既存システムでは、学習者が算盤への入力を完了したタイミングを自動的に判定することができず、正誤判定のために明示的な操作を必要としていた。そこで本研究では、AbaCaaS-mini を対象として、学習者が算盤への入力を完了したタイミングを映像から検知する手法を提案する。提案手法では、算盤上に設定した領域内における手の有無に着目し、手が一定時間連続して検出されなくなった場合に操作完了と判定する。さらに、本手法を応用したゲーミフィケーションを用いた珠算学習教材を設計し、算盤操作のみで解答確定まで行える自然なインタラクションへの応用可能性を検討する。

**キーワード：**珠算、算盤、画像認識、学習支援、ゲーミフィケーション

## 1. はじめに

算盤は、珠の位置によって数を表し、四則演算を行うための伝統的な計算用具である。デジタル機器の普及に伴い、日常生活において算盤を直接用いる機会は減少しているものの、珠算学習には計算力の向上や集中力の育成などの教育的効果が期待されており [1–7]、現在でも学習活動の一つとして広く取り入れられている。一方で、珠算の習得には数の表現方法だけでなく、珠を正確に操作するための運指も身につける必要があり、継続的な練習が欠かせない。一般的な珠算学習では、学習者が解いた結果の正誤を確認しながら学習を進め、必要に応じて指導者が操作の誤りや苦手な箇所を見つけて助言を行う。しかし、このような支援は指導者の観察や経験に依存する部分が多く、学習者ごとの状況に応じたきめ細かな支援を常時行うことは容易ではない。また、珠算学習では反復練習が重要である反面、同様の問題に繰り返し取り組む過程が単調になりやすく、学習意欲の維持が課題となる場合もある。このよう

な背景から、学習者の算盤操作をセンシングし、状況に応じた支援を行う学習環境の実現が求められる。

筆者らはこれまでに、AR マーカを貼付した算盤をカメラで撮影し、画像解析によって盤面状態や入力値を推定する珠算センシング手法を提案してきた。さらに、その認識結果を活用することで、学習者への情報提示や、ゲーム要素を取り入れた珠算学習支援システムの設計にも取り組んできた。とくに AbaCaaS-mini では、タブレットデバイスのインカメラと反射鏡を利用することで、可搬性の高い構成で算盤の盤面認識を可能にしている。しかし、既存のシステムでは、学習者がいつ算盤への入力を終えたかを自動的に把握することができない。そのため、正誤判定を行う際には、学習者自身が操作完了ボタンを押して入力終了を明示する必要がある。この追加操作は、算盤による計算とは別の動作を要求するものであり、学習の流れを分断する要因になりうる。とりわけ、ゲーミフィケーションを用いた学習支援では、こうした操作が解答のテンポや没入感に影響し、算盤による計算速度をより直接的に反映したインタラクションを実現しにくい。

そこで本稿では、AbaCaaS-mini を用いた珠算学習支援

<sup>1</sup> 岡山大学, Okayama University

<sup>a)</sup> yukimat@okayama-u.ac.jp

システムを対象として、映像から学習者の操作完了を検知する手法を提案する。本手法では、算盤上に設定した領域内に手が存在するかどうかに着目し、手が一定時間連続して検出されなくなった時点をもって操作完了とみなすアプローチを採用した。加えて、本手法を適用した珠算学習教材を設計し、その活用可能性についても検討する。

## 2. 関連研究

### 2.1 珠算学習支援システムに関する研究

北川ら [8] は、透明な机の下部に RGB カメラと LED ライトを配置し、珠の形状に起因する明暗差を利用することで、オクルージョンの影響が小さい条件下で盤面を推定する手法を提案している。さらに、珠の上に映像を重畳するプロジェクションマッピングを用いて、操作ガイダンスを提示する学習支援システムを実現している。新川ら [9] は、珠算教育を対象とした Learning Management System (LMS) を提案している。このシステムでは、フラッシュ暗算、読上算、見取り算などの学習ソフトウェアを、学習者ごとの成績や進捗情報と統合して管理しており、対応ソフトウェアを備えた PC があれば、場所を問わず学習できる環境を実現している。

珠算学習の効率を向上させるために、原子ら [10] や北村ら [11] は、機械学習による自動的な問題生成手法を提案している。この研究では、被験者にどの問題が苦手かについてのラベル付けを付与してもらう必要があるため、ある学習者に対してどういった問題を作成すべきかの方針策定には人手が必要であることが課題となる。

また、スマートフォンやタブレットデバイスの画面上に算盤を再現することで、珠算学習を支援する研究・サービスも存在する。齋藤ら [12] は、スマートフォン向け学習支援プラグインの一機能として電子算盤を提案しており、画面上で基本的な算盤操作を行えるとともに、計算過程を数式として表示できるようにしている。Digika 社のそろタッチ [13] は、タブレット上に算盤に類似したユーザインタフェースを実装し、珠に対応するボタンを両手で操作することで暗算学習を行うサービスである。Tokuda らはそろタッチを用いた学習データに対して行列分解を利用することにより、そろばん学習者のパフォーマンスを推定する方法を提案している [14]。

### 2.2 これまでの取り組みと本稿の立ち位置

筆者らは、従来の算盤を用いた学習スタイルはそのままに、ICT による学習支援を実現するためのプロジェクト AbaCaaS (Abacus Manipulation Sensing using Camera as a Sensor) に取り組んできた。まず、書画カメラ等の外部機材で手元の算盤操作を撮影し、画像認識により入力値推定や操作系列の推定を行う手法と推定結果に基づくテーブルトップインタフェースを用いた情報提示手法を提案して



図 1: AbaCaaS-mini のシステム外観

いる [15, 16]。また、AbaCaaS システムを用いた学習支援のアプローチとして、ゲーミフィケーションを珠算学習に応用し、学習のモチベーション維持や苦手克服を行う手法を提案している [17–19]。算盤学習における単調な反復練習の心理的負担を軽減するため、PvE (プレイヤー vs 敵) 形式の学習支援システム「CalcQuest」を開発し、短期実験を通じた学習意欲の向上や苦手操作の克服における有効性を検証している。

さらに、AbaCaaS システムをより簡便に利用でき、持ち運びやすい構成を目指し、タブレットデバイスのインカメラと反射鏡を用いて手元の AR マーカ付きの算盤を撮影し、画像認識により盤面の入力状態を推定するシステム AbaCaaS-mini を提案している [20, 21]。図 1 に AbaCaaS-mini のシステム外観を示す。撮像装置、計算装置、映像提示装置をタブレットデバイスに集約することにより、AbaCaaS システムに必要な大掛かりなデバイスを要せずに、学習支援を行うことが可能となった。本稿では、AbaCaaS-mini に前述の CalcQuest などの教材システムを導入するにあたり「計算の終了をどのように自動検知するか」という課題に焦点を当て、映像分析に基づく操作完了検知手法を提案する。

## 3. CalcQuest の概要とシステム要件

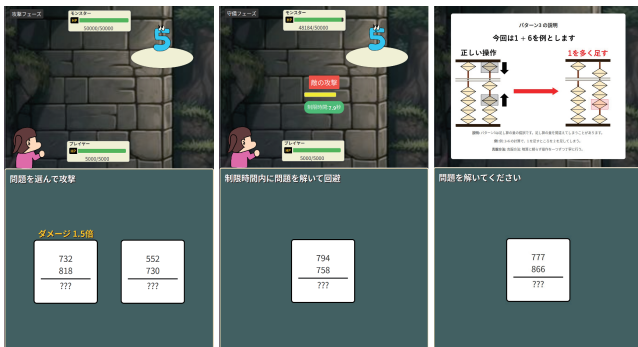
本章では、ゲーミフィケーションを用いた珠算学習支援システム「CalcQuest」について述べ、AbaCaaS-mini システムに CalcQuest を導入するにあたっての課題とシステムの要件を整理する。

### 3.1 CalcQuest の概要

CalcQuest [17–19] は、プレイヤーと敵が交互に攻撃を行うターン制バトル (PvE 形式) のゲーム要素を採用した学習支援システムである。外観およびインタフェースは図 2 に示す通りである。プレイヤーは、提示された計算問題を



(a) システムの外観



(b) 攻撃フェーズ (c) 守備フェーズ (d) 指導フェーズ

図 2: 先行研究 (CalcQuest [17]) の外観とインタフェース

算盤で計算することで敵への攻撃および敵からの攻撃に対する防御を行い、ゲームクリアを目指すというシナリオとなっている。ゲームは図 2(b) の攻撃フェーズと図 2(c) の守備フェーズを交互に繰り返して進行し、1 ゲーム終了ごとに図 2(d) の指導フェーズでフィードバックを行う。

攻撃フェーズ (図 2(b)) では、プレイヤーに 2 問の計算問題が提示され、そのうち 1 問を選択して算盤で計算する。正解した場合には敵にダメージを与え、不正解の場合にはダメージを与えられない。一方の計算問題には学習者の苦手操作が含まれているが、正解時には敵に与えるダメージが大きくなるというゲーム性を有する。守備フェーズ (図 2(c)) では、敵が 1 問の計算問題を提示し、プレイヤーは制限時間内にその問題を解く。正解した場合には敵の攻撃を防ぐことができ、不正解または時間切れの場合にはプレイヤーがダメージを受ける。また、より短い時間で正解できた場合にはカウンター攻撃が発生し、敵に追加ダメージを与えることも可能となっており、より短時間で正確な計算を行うモチベーションを形成する仕組みとなっている。指導フェーズ (図 2(d)) は、一つのゲームが終了するたびに実施され、そのゲームで検出された苦手操作を克服するための指導および復習問題が提示される。

### 3.2 従来システムの課題とシステム要件

現状の CalcQuest システムでは、算盤の操作完了後 (計算終了後) に図 2(a) に示す「操作完了ボタン」を押下することで、計算結果の正誤判定が行われる仕組みとなっている。AbaCaaS-mini への導入を想定すると、追加の入力

装置を接続することや、タブレットの画面上にタッチ可能なボタンインタフェースを実装することが必要となる。

しかし、AbaCaaS-mini のコンセプトは「簡便さ」であることから追加装置は望ましくない。また、珠算学習支援においては学習者が算盤操作に集中できる環境を提供することが望ましく、算盤以外のデバイス操作 (特に画面タッチ操作のように目視が前提となるインタフェース) は学習の流れを妨げる要因となり得る。

以上から、本稿では次のようなシステム要件を設定する。

- ゲーム中の入力インタフェースは「算盤」に限定し、その他の装置は使用しないこと
- 算盤による通常の計算操作以外の特殊な操作を要さずに操作完了を検知すること
- 誤判定を抑えつつ、タブレット単体でリアルタイムに処理可能 (学習者に違和感のない遅延で判定可能) であること

## 4. 提案手法

本研究では、学習者が算盤で計算を行う際の操作完了を、映像から自動的に検知する手法を提案する。珠算学習においては、算盤上で計算結果を確定したのち、解答用紙への記入など、算盤から手を離して次の動作に移ることが一般的である。本手法ではこの学習者の典型的な行動を手掛かりとし、算盤上から手が離れたことをもって入力が完了したものとみなす。

### 4.1 処理フロー

提案手法の処理フローを図 3 に示す。本稿では、検知対象とするイベントを、手が画像全体から消失した瞬間ではなく、算盤の操作領域から離脱した瞬間とする。この定義に基づき、手の有無の判定対象は画像全体ではなく、算盤上の操作領域を覆う ROI (Region of Interest) に限定する。

図 4 に示す内側の枠を入力値の読み取り対象領域とし、操作完了判定に用いる ROI はこの領域を基準とする。右端の桁 (1 の位) を操作する際には、手指が盤面認識領域の外側にはみ出す場合があるため、ROI には右手側に余白を付与する。本稿では、操作完了判定用の手検出 ROI を 7 桁分の盤面認識領域を基準に設定した。この盤面認識領域の幅を  $W$  としたとき、ROI は右側に  $0.18W$  の余白を付与した領域として定義する。この余白は、端の桁を操作する際の手指の動作を十分に含みつつ、不要な周辺領域の混入を抑えることを意図して、予備検討に基づき経験的に設定した。この ROI の適切な設定は個人や状況により異なることが想定されるため、その最適化は今後の課題である。また、AbaCaaS-mini では AR マーカに基づいて各フレームで盤面位置を推定しているため、ROI も同じ座標系に基づいて動的に更新する。これにより、撮影中に算盤や端末の位置関係が多少変動した場合でも、ROI を盤面上の操作

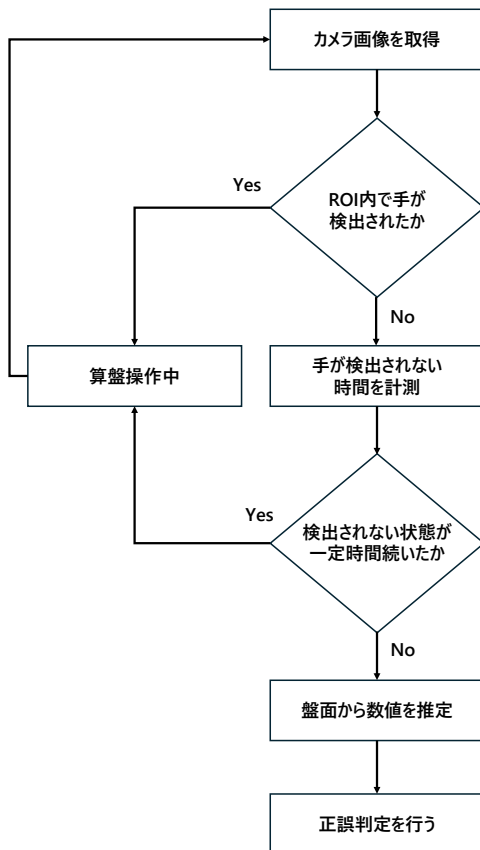


図 3: 操作完了検知のフローチャート

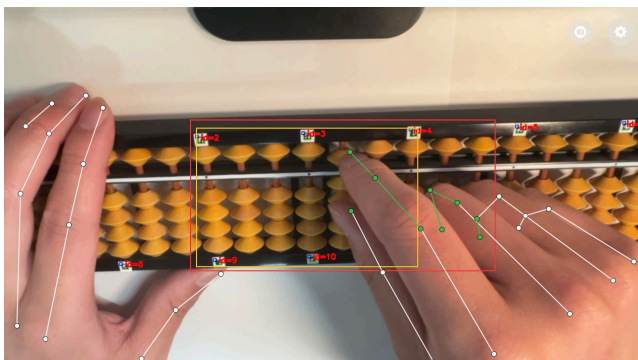


図 4: 算盤操作画像における手指関節点推定と ROI 設定の例  
(赤枠: 操作完了判定 ROI, 橙枠: 入力値読み取り領域)

領域に追従させることができる。

各フレームでは手指関節点を推定し、少なくとも 1 点の関節点が手検出 ROI 内に存在する場合は「手あり」、存在しない場合を「手なし」と判定する。操作中状態において「手なし」が観測された場合には、直ちに操作完了とは判定せず、一時的な検出失敗の可能性を考慮して離脱候補状態に遷移する。その後、「手なし」の状態が 300ms 連続した場合に操作完了と判定する。一方、離脱候補状態で再び「手あり」が観測された場合には、操作中状態に戻る。この閾値は、一時的な検出失敗や短時間の静止による誤判定を抑えつつ、学習者に違和感のない応答性を確保するために経験的に設定した。

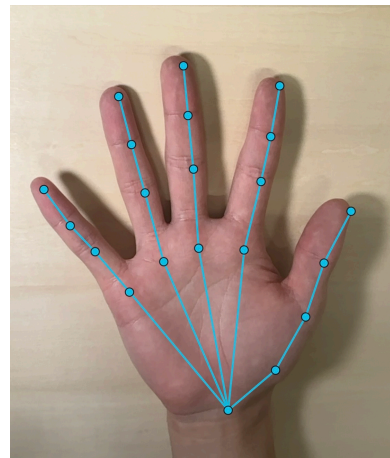


図 5: Hand Pose による関節位置推定の例

## 4.2 手検出の実装

ROI 内の手の有無を判定する手段として、本システムでは Apple Vision Framework の VNDetectHumanHandPoseRequest<sup>\*1</sup>を用いる。本 API は入力画像から手指の関節点を推定するものであり、図 5 に示すように、5 本の指それぞれの先端・第一関節・第二関節・付け根、および手首の計 21 点を取得することができる。図 4 に、本システムで撮影した画像に対して VNDetectHumanHandPoseRequest を適用した例を示す。推定された関節点のうちいずれかが ROI 内に存在する場合に「手あり」と判定する。本 API はオンデバイスで動作し、外部サーバとの通信を要しないため、タブレット単体での処理に適している。

## 4.3 操作完了検知を活用した教材設計

提案手法を応用し、ゲーミフィケーションを活用した珠算学習教材の設計を行った。

### 4.3.1 ターン制バトル式珠算学習教材「CalcQuest 2」

プレイヤーと敵が交互に攻撃を行うターン制バトル (PvE 形式) の CalcQuest 2 を設計した。CalcQuest 2 のゲーム画面を図 6 に示す。先行研究で提案された CalcQuest [17-19] では、攻撃フェーズ、守備フェーズを繰り返すターン制バトルの流れが採用されている。CalcQuest 2 は、この基本的なゲーム進行を踏襲しつつ、AbaCaaS-mini 向けに再構成した教材である。図 6 (a) 攻撃フェーズでは、プレイヤーは提示された複数の計算問題のうち 1 問を選択し計算する。なお、同時に提示する問題は計算結果が重複しないよう問題を生成し、プレイヤーが算盤上に入力した値と一致する問題を選択されたものとみなす。いずれの問題の正解値とも一致しない場合には不正解とみなす。計算結果が正解である場合は敵にダメージが与えられ、不正解の場合は与えられない。図 6 (b) 守備フェーズでは、敵から提示された計算問題を制限時間内に解く。正解すると攻撃を防ぐ

<sup>\*1</sup> <https://developer.apple.com/documentation/vision/vndetecthumanhandposerequest>



図 6: CalcQuest 2 のインターフェース

ことができ、不正解または時間切れの場合はダメージを受ける。特に、先行研究では操作完了ボタンによって解答を確定していたのに対し、CalcQuest 2 では手の離脱に基づく操作完了検知を用いて解答を自動判定する点異なる。

#### 4.3.2 タイムアタック型珠算学習教材「寿司算」

タイムアタック型の珠算学習教材「寿司算」を設計した。タイムアタック型の教材では、学習者の算盤による計算速度そのものを反映することが重要である。しかし、操作完了ごとにボタン押下を必要とする場合、算盤操作とは別の入力時間が介在するため、純粋な計算速度を扱にくい。これに対し、操作完了を自動で検知できれば、学習者は算盤操作に集中したまま連続して問題を解き進めることができ、計算速度をより直接的に反映した教材の実現につながると考えられる。図 7 にゲーム画面を示す。ゲームには、1 プレイあたりの制限時間と 1 問あたりの制限時間を設定する。プレイヤーは画面中央に表示される計算問題を、中央付近を右から左へ流れる寿司皿が左端に到達する前に、算盤を用いて問題の解を正確に計算し、盤面上でその解を表す必要がある。計算結果が正しい場合、スコアが加算されるとともに、寿司皿は回収されて、次の問題が表示される。一方、不正解の場合には、正解するか、寿司皿が左端に到達するまで解答を継続することができる。プレイヤーはゲームの制限時間内にできるだけ多くのスコアを獲得することを旨とする。時間内に正確に多くの問題を解くことを促すモチベーションを形成する設計とした。

## 5. 考察と展望

### 5.1 手検出に基づく操作完了判定

操作完了の判定方法としては、盤面認識結果の値が一定時間安定したことをもって操作完了とみなす方法も考えられる。しかし、珠算学習では、学習者が計算途中に一時的に手を止める場面や、次の操作を考えるために短時間静止する場面があり、値の安定のみでは中間状態を誤って最終



図 7: 寿司算のインターフェース

入力として扱う可能性がある。これに対し、本研究では、算盤上から手が離れるという学習行動に着目することで、一時停止と操作完了をより区別しやすい判定を目指した。特に、ゲーミフィケーションを用いた学習支援システムでは誤ったタイミングで正誤判定が行われると、学習の流れや没入感を損なうため、手の離脱に基づく判定はそのような問題を抑える上で有効であると考えられる。一方、計算途中で学習者が考えるために手を盤面から離す場合や両手の一部が ROI 内に残る場合、一時的な手検出失敗が生じる場合には、判定遅延や誤判定が生じる可能性がある。このため、離脱時間の閾値や ROI の設定は、誤判定抑制と応答性の両立の観点から調整する必要がある。

### 5.2 各行単位の操作完了検知

2 つの数字を対象とする加減算では、提示した問題と最終的な解答から、どのような誤りが生じたかをある程度推定しやすい。一方、見取り算では、最終的な解答の正誤だけでは計算過程を十分に分析できず、どの行で計算が崩れたのかを把握しにくい。各行の行末を検出してその時点の途中値を記録できれば、どの行の加算または減算で値がず

れたかを後から確認できるため、将来的なつまづき分析や苦手検出にもつなげやすい。このため、複数行の見取り算においては、問題全体の入力完了だけでなく、各行の終了を順次検出する仕組みが重要となる。

本研究ではこの課題に対し、各行の操作完了を推定する前段階として、図 8 に示すように各桁ごとに ROI を分割し、手指の移動に基づいて操作桁を推定することで、各行の操作完了検知を行う手法を検討した。具体的には、指先の ROI 内における移動座標の遷移を追跡し、問題から生成した各行ごとの「操作桁系列（計算時に操作対象となる桁の推移を問題内容から近似的に表した系列）」と観測された手指動作との整合性に基づいて操作の進行を評価する。例えば、ある行の操作桁系列が「100 の位→10 の位→1 の位」である場合、観測された手指の移動がこの順に対応していれば、当該行の操作が完了したものとみなす。一方で系列と一致しない遷移が生じた場合には、その時点で誤操作が発生した可能性があると考えられると捉えることができると考えた。この仮定のもと、まずは正解時において、操作桁の推定を通じて各行の終了を検出できるかを予備的に確認した。

その結果、親指の先端の座標を用いることで大まかな操作の流れを把握することは可能であることが示唆されたが、各行の終了位置を高精度に特定することは困難であった。その要因として、まず各桁に対応する ROI が小さいため、HandPose による座標推定にわずかな誤差が生じるだけでも異なる桁として誤認識される可能性がある点が挙げられる。また、珠算操作では、入力する値によっては親指のみ、あるいは人差し指のみで操作が行われる場合があるため、いずれか一方の指先座標のみに依存した推定では、操作桁を正確に特定できないケースが存在する。

以上より、ROI ベースの手法のみで各行の操作完了を高精度に検知することは現時点では容易ではない。一方で、ROI の再設計や複数指の座標情報の統合は、操作桁推定の精度向上に寄与する可能性がある。また、各桁の状態変化やオクルージョンに着目した情報は、操作対象の絞り込みに有効である可能性がある。これらの情報を統合することで、各行単位の操作完了検知の精度向上につながる余地があると考えられる。今後は、これらの改善を段階的に検討し、見取り算における各行単位での操作完了検知と誤り分析への応用を目指す。

## 6. おわりに

本研究では、AbaCaaS-mini を用いた珠算学習支援システムにおいて、学習者が算盤への入力を完了したタイミングを映像から自動的に検知する手法を提案した。提案手法では、算盤上に設定した ROI 内における手の有無を Apple Vision Framework の VNDetectHumanHandPoseRequest により判定し、手が一定時間連続して検出されなくなった場合に操作完了とみなす。これにより、学習者が明示的に操作完了

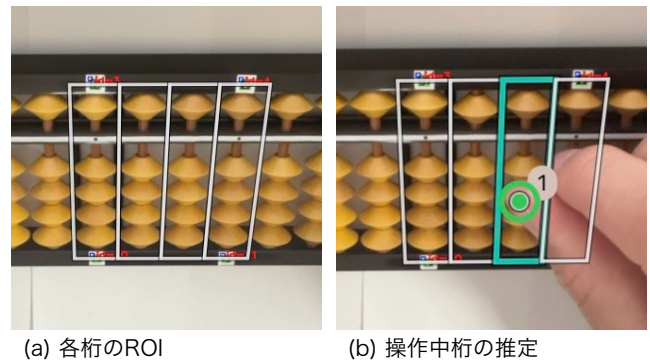


図 8: 各行単位の操作完了検知

ボタンを押さなくても、算盤操作の終了に応じた正誤判定を行うための基盤を提案した。

また、提案手法の応用例として、プレイヤーと敵が交互に攻撃を行うターン制バトル (PvE) 形式の珠算学習教材「CalcQuest 2」、タイムアタック型の珠算学習教材「寿司算」を設計した。操作完了を自動で検知できることで、算盤操作とは別の入力を求めることなく、より円滑な珠算学習教材の設計に活用可能であることを示した。本手法は追加入力装置を用いずに操作完了を検知できる点で、モバイル環境に適した自然な学習インタラクションの実現に資する。

今後は、実際の珠算学習場面において提案手法の操作完了検知精度を評価するとともに、判定遅延時間などのパラメータ設定が操作性や学習体験に与える影響を検証する。また、「CalcQuest 2」や「寿司算」などのゲーミフィケーションを用いた珠算学習教材による長期実験を通じて、学習意欲や継続的な学習に与える効果についても検証していく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (26K21206) の助成を受けて行われたものです。

## 参考文献

- [1] Shizuko Amaiwa. The Effects of Abacus Learning on Solving Arithmetic Problems: A Comparative Study of Elementary / Junior High School Students at Upper Level and Inexperienced Students. *Journal of the Faculty of Education, Shinshu University*, Vol. 96, pp. 145–156, 1999.
- [2] Shizuko Amaiwa and Giyoo Hatano. Effects of abacus learning on 3rd-graders' performance in paper-and-pencil tests of calculation. *Japanese Psychological Research*, Vol. 31, pp. 161–168, 1989.
- [3] Yuzheng Hu, Fengji Geng, Lixia Tao, Nantu Hu, Fenglei Du, Kuang Fu, and Feiyan Chen. Enhanced White Matter Tracts Integrity in Children With Abacus Training. *Human Brain Mapping*, Vol. 32, No. 1, pp. 10–21, 2011.
- [4] Yujie Lu, Mengyi Li, Zhijun Cui, Li Wang, Yuwei Hu, and Xinlin Zhou. Transfer Effects of Abacus Training on Cognition. *Current Psychology*, Vol. 42, pp. 6271–6286, 2023.

- [5] James W. Stigler. “Mental abacus”: The effect of abacus training on Chinese children’s mental calculation. *Cognitive Psychology*, Vol. 16, No. 2, pp. 145–176, 1984.
- [6] Chunjie Wang. A Review of the Effects of Abacus Training on Cognitive Functions and Neural Systems in Humans. *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 14, No. 913, pp. 1–12, 2020.
- [7] Chunjie Wang, Tianyong Xu, Fengji Geng, Yuzheng Hu, Yunqi Wang, Huaifeng Liu, and Feiyan Chen. Training on Abacus-Based Mental Calculation Enhances Visuospatial Working Memory in Children. *Journal of Neuroscience*, Vol. 39, No. 33, pp. 6439–6448, 2019.
- [8] 北川珠莉, 鈴木優. 珠の位置認識と操作手順の重畳表示を用いたそろばん学習支援システム. 情報処理学会インタラクシオン 2022, pp. 759–762, 2022.
- [9] 新川晃司, 川崎健志, 澤田一樹. そろばん教育における Web 学習支援システムの開発. 成蹊大学理工学研究報告, 第 48 巻, pp. 75–79, 2011.
- [10] 原子弘務, 井上一磨, 諏訪貴大, 福岡省伍, 村田遼, 須子統太. 珠算競技における効果的な練習問題の自動生成法について. 第 80 回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 897–898, 2018.
- [11] 北村瑠菜, 原子弘務, 守屋郁宏, 神頭和希, 於勢奈都子, 角田和正, 須子統太. 珠算競技における苦手問題自動作成法について～かけ算に対する検討～. 第 81 回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 731–732, 2019.
- [12] 齋藤謙太, 佐々木整, 水野一徳. 携帯電話を利用した学習支援ツールの開発. 情報科学技術フォーラム講演論文集, 第 8 巻, pp. 653–654, 2009.
- [13] 株式会社 Digika. そろタッチ. <https://www.sorotouch.jp/>. (2026 年 4 月 9 日参照).
- [14] Keita Tokuda, David Kaschub, Takuma Ota, Yasunobu Hashimoto, Naoya Fujiwara, and Akihito Sudo. Prediction of student performance in abacus-based calculation using matrix factorization. In *Adjunct Publication of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization, UMAP ’20 Adjunct*, pp. 114–118, 2020.
- [15] Yuki Matsuda. Abacus Manipulation Understanding by Behavior Sensing Utilizing Document Camera as a Sensor. *International Journal of Activity and Behavior Computing*, Vol. 2024, No. 1, pp. 1–16, 2024.
- [16] Yuki Matsuda. A Table-top Interface for Real-time Coaching in Abacus Learning. In *The 10th International Conference on Smart Computing, SmartComp ’24*, pp. 243–245, 2024.
- [17] Yuki Matsuda and Taizo Kozaki. CalcQuest: A Gamified Abacus Learning Support System for Enhancing Operational Proficiency. In *Persuasive Technology*, Vol. 16476 of *PERSUASIVE ’26*, pp. 148–162, 2026.
- [18] 小嵯泰造, 松田裕貴. 算盤の苦手操作克服のためのゲーム要素を用いた珠算学習支援手法. 第 31 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, DPSWS ’23, pp. 267–272, 2023.
- [19] 小嵯泰造, 松田裕貴. ゲーミフィケーションを活用した珠算学習支援システム「CalcQuest」のユーザスタディ. AIoT 行動変容学会第 9 回研究会, BTI-9, pp. 41–48, 2025.
- [20] 吉村太斗, 松田裕貴. モバイルデバイスのインカメラを用いた算盤行動センシング. 電子情報通信学会技術研究報告, センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI), 第 125 巻, pp. 79–84, 2026.
- [21] 吉村太斗, 松田裕貴. AbaCaaS mini: モバイルデバイスのインカメラを用いた算盤行動センシングのための反射鏡一体型ケースの設計. 情報処理学会インタラクシオン 2026, pp. 183–187, 2026.