

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

吉村 太斗[†] 松田 裕貴[†]

† 岡山大学 〒700-0082 岡山県岡山市北区津島中3丁目1-1

E-mail: †taito.yoshimura@cocolab.jp, yukimat@okayama-u.ac.jp

あらまし 珠算は「珠」の位置関係を理解しつつ複雑な手順で操作する必要があり、習得には長期的な反復学習が求められるが、従来の指導は指導者による目視観察に大きく依存している。本研究では、より手軽なICT支援を実現するため、モバイルデバイス(iPad)のインカメラと反射鏡を用いて学習者の手元を撮影し、画像認識に基づき算盤上の入力値を自動推定する手法を提案する。これにより、個々の学習履歴や誤答パターンを自動記録し、指導者の負担軽減と学習者の自律的な復習支援を実現することを目指す。評価実験の結果、算盤上に入力された7桁の数値を96.5%の正解率で推定できることを確認した。

キーワード 算盤、珠算、画像認識、学習支援

Abacus Operation Sensing using Front-facing Camera of A Mobile Device

Taito YOSHIMURA[†] and Yuki MATSUDA[†]

† Okayama University Tsushima-naka 3-1-1, Kita-ku, Okayama, Okayama 700-0082, Japan

E-mail: †taito.yoshimura@cocolab.jp, yukimat@okayama-u.ac.jp

Abstract Learning with an abacus requires complex manipulation procedures while understanding the positional relationship of “beads”, and mastering it demands long-term repetitive practice. However, conventional instruction relies heavily on visual observation by teachers. In this study, to realize easier ICT support, we propose a method to automatically estimate input values on an abacus based on image recognition by capturing the learner’s hands using the front-facing camera of a mobile device (iPad) and a reflector. This system aims to automatically record individual learning histories and error patterns, thereby reducing the burden on teachers and supporting learners’ autonomous review. Evaluation results confirmed that the system can estimate 7-digit numbers entered on the abacus with an accuracy of 96.5%.

Key words abacus, calculation with abacus, image recognition, learning support

1. はじめに

現代においても、計算能力を養う有効な手段として、算盤（そろばん）を用いた数値計算、すなわち「珠算」が広く活用されている。算盤は、串に通された珠を操作して数値を表現することで、四則演算をはじめとする多様な計算を補助する道具である。物理的な珠の操作と視覚的な数値表現を組み合わせたこの手法は、一般的な筆算等とは異なるアプローチで計算を実現する。実社会での直接的な利用機会は減少しているものの、珠算学習がもたらす計算能力や認知的効果は依然として注目されている[1]～[5]。一方で、その習得には、珠による数値表現の理解に加え、適切な手順での運指操作を身につける必要があり、長期的な反復練習が不可欠である。

従来の珠算指導は、主に学習者の回答の正誤に基づく指導を中心となっている。指導者による実演や、学習者の観察に基づく個別の指導も行われているが、これらは指導者の人力に大き

く依存しているのが現状である。また、学習者が躊躇やすいポイントや誤答のパターンには一定の規則性があると考えられるが、こうした知見は指導者個人の暗黙知として蓄積されがちであり、客観的なデータとして共有・再利用することが困難である。さらに、国内外で珠算学習への需要が高まる一方で、指導者不足も課題となっている。

こうした課題に対し、ICTを用いた学習支援が模索されている。モバイルデバイス上のアプリケーションで学習する手法は手軽であるが、実物の算盤特有の触覚フィードバックが得られず、運指の技能習得において実物を用いた学習とは質的に異なる可能性がある。そのため、実物の算盤を操作しながら、その内容をデジタルに記録・解析できる仕組みが求められている。このアプローチの先行研究として、筆者らは、書画カメラを用いて実物の算盤操作を撮影し、画像認識により算盤の入力値推定、珠算行動に合わせた情報提示を行う「AbaCaaS」を提案し



図 1: AbaCaaS-mini のシステム外観

ている [6]. この手法は実物の算盤を利用する利点があるが、撮影のためにカメラスタンドや PC 等の機材設置が必要であり、家庭での自習や教室での一斉導入においては、設置スペースや機材コストの面で課題が残る。

そこで本研究では、教育現場で普及が進むモバイルデバイス (iPad) 単体で完結する、より軽量な算盤操作センシング手法を提案する (図 1). 提案手法では、端末のインカメラに安価な反射鏡を装着することで、机上の算盤操作を撮影する. 取得した映像から、画像処理および機械学習を用いて算盤の入力値をリアルタイムに推定することで、特別な機材を必要とせず、場所を選ばない学習支援の実現を目指す. 評価実験の結果、算盤上に入力された 7 桁の数値を 96.5% の正解率で推定できることを確認した.

2. 前提知識・関連研究

算盤は、串で刺した珠を移動させその位置で数を表現することで、四則演算を含む様々な計算を補助することが可能なツールである. ここでは、算盤の基本的な知識について概説した上で、本研究に関連する先行研究・サービスを概観し、本研究の位置づけを示す.

2.1 算盤に関する前提知識

算盤は、各桁が 10 進数に対応し、梁 (はり) で隔てられた上段の「五珠 (10 進数の 5)」1 つと下段の「一珠 (10 進数の 1)」4 つの組み合わせにより、0 から 9 までの数値を表現する計算器具である. 珠が梁に向かって移動した状態を「入力 (ON)」とし、その合計値が各桁の数値となる. 例えば、五珠が下がり、一珠が 2 つ上がっている状態は「7」を表す. また、梁には 3 桁ごとに「定位点」と呼ばれる印があり、これを基準に一の位や小数を定める.

珠算による計算は、単なる加減算ではなく、「5 の補数」と

「10 の補数」を組み合わせた操作体系を持つ点が特徴である. 具体的な操作は、以下の 3 種類に大別される.

- (1) 一珠のみ・五珠のみを操作する計算
- (2) 一珠・五珠を操作する計算
- (3) 二桁を操作する計算 (繰り上がり・繰り下がり)

特に (2) や (3) の操作では、複数の珠を連携して動かす必要があり、習熟には反復練習が不可欠である. より詳細な計算方法については、先行研究 [6] で詳述している.

2.2 関連研究・サービス

筆者らの先行研究である AbaCaaS (Abaacus MSensing using Camera as a Sensor) [6], [7] では、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ーフェースを用いた情報提示手法を提案している. 精度と再現性に利点がある一方、機材の準備・設置が運用負担となりうる. 北川ら [8] は、透明な机の裏側 (下部) に RGB カメラと LED ライトを設置し、珠形状による明暗差を利用してオクルージョンの少ない条件で盤面推定を行い、さらに珠の上への映像重畳 (プロジェクションマッピング) で操作ガイダンスを提示する学習支援システムを提案している. 新川ら [9] は、珠算教育向け Learning Management System (LMS) を提案しており、フラッシュ暗算・読上算・見取り算等の学習ソフトウェアを個人成績・進捗と統合して、ソフトウェアを搭載した PC であれば場所を問わず学ぶことを可能とした.

また、スマートフォンやタブレット端末の画面上に算盤を再現することによって、珠算学習支援を実現するアプローチも考案されている. 斎藤ら [10] は、スマートフォン向け学習支援のプラグインとして電子算盤機能を提案し、画面上で基本操作ができる、計算過程を数式として表示可能としている. Digika 社のそろタッチ [11] は、タブレット上に算盤に類似した UI を再現し、珠に対応するボタンを両手で操作して暗算学習を行うサービスである. さらに、学習のモチベーション維持や苦手克服を目的として、ゲーミフィケーションを珠算学習に応用する試みもなされている. 小島ら [12], [13] は、算盤学習における単調な反復練習の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」を提案し、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.

2.3 本研究の立ち位置

先行研究である AbaCaaS [6] や北川ら [8] の手法は、高精度な認識やリッチなフィードバックが可能である反面、カメラスタンドや特殊な机等の設置環境を要するため、家庭や一般的な教室への導入コストが高い. これに対し本研究では、既存手法と比較して、iPad と反射鏡という安価かつ軽量な構成でセンシング・情報提示を可能とする手法の実現を目指している.

また、モバイルデバイス上のアプリケーションで学習する手法 (そろタッチ [11] 等) と比較して、本手法は「実物の操作感」を維持している点が異なる. タッチパネル上の操作では、物理的な珠の感触や反発が得られず、実物の算盤特有の微細な運指技能の習得とは質的に異なる体験となる可能性がある. これに

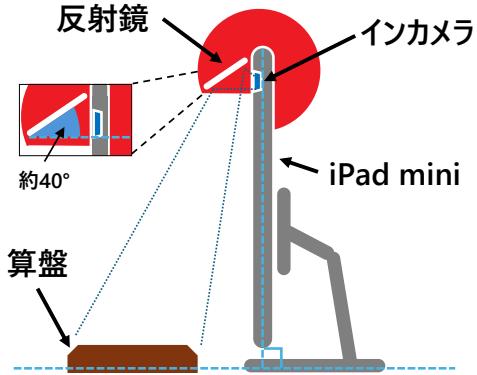


図 2: インカメラと反射鏡を用いて卓上を撮影するシステム構造

対し本研究は、学習者が普段使用している「使い慣れた実物の算盤」をそのままインターフェースとして利用できるため、学習環境を大きく変えることなく、触覚フィードバックを伴う実践的な技能習得と、デジタル技術による学習支援（自動採点や履歴記録）を両立することが可能となる。

以上から、本手法は「機材の最小化」と「実物の操作感の維持」を両立することによって、実物の算盤を用いた学習支援の利点を損なうことなく導入コストを低減し、学習者の自律的な学習支援や、指導者の負担軽減を目指す。

3. 提案システム

本研究では、iPad のインカメラと反射鏡のみを用いて算盤の入力値を推定するシステム「AbaCaaS-mini」を提案する（図 1）。先行研究では書画カメラ等の外部機材を必要としたが、本システムはモバイルデバイス単体で完結するため、場所を選ばず手軽に利用できる。以降では、AbaCaaS-mini のシステム構成と、算盤入力値推定手法について述べる。

3.1 システム構成

AbaCaaS-mini のシステムの構造を図 2 に示す。本システムは、AR マーカを貼付した市販の算盤と、画像処理・算盤行動認識処理と算盤の学習コンテンツを表示するためのモバイルデバイス、モバイルデバイスのインカメラで手元の算盤を撮影するための反射鏡、およびモバイルデバイスを固定するためのスタンドで構成される。

本稿では、算盤はソロマチック USM-103（雲州堂社製、23 衍ツゲ玉）^(注1)を、モバイルデバイスとして iPad mini 第 6 世代（Apple 社製、8.3 インチディスプレイ、iPadOS 18.7）^(注2)を使用する。また、反射鏡には Osmo（Tangible Play 社製）^(注3)に付属する iPad 用クリップ式反射鏡を、デバイスの固定には MagSafe 対応卓上用マグネットスタンド（UGREEN 社製）^(注4)を使用する。

3.2 算盤入力値推定手法

ここでは、iPad のインカメラと反射鏡を用いて得られる映像



図 3: AbaCaaS-mini の入力値推定手法

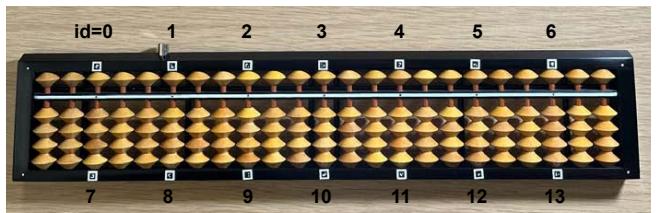


図 4: AR マーカを貼付した算盤の外観

データから、算盤上の入力値を推定する手法について述べる。本手法は著者らの先行研究 [6] で提案している手法に改良を加えたものである。手順の概要を図 3、および以下に示す。

- (1) AR マーカを用いた算盤の位置同定
- (2) 射影変換と画像クロップによる衍画像の取得
- (3) 珠画像の識別と入力値の推定

以降では、各手順について詳細に説明する。

3.2.1 AR マーカを用いた算盤の位置同定

通常、算盤は計算を行う過程で移動することから、書画カメラから得られた映像フレームから算盤領域を検出しなければならない。しかしながら、算盤による計算操作を妨げないようにするために、算盤の加工は最低限に留める必要がある。そこで、算盤の枠に貼付した AR マーカ [14] を映像フレームから検出することで位置同定を行う方法を採用する。AR マーカを貼付した算盤の外観を図 4 に示す。OpenCV の AR マーカ生成・検出モジュールである ArUco [15] を用い生成した ID の異なる AR マーカ（辞書サイズ：3×3、印刷サイズ：5×5 mm）を、算盤の各定位点の上部・下部の枠にそれぞれ 7 枚ずつ貼付した。なお、市販されている一般的な算盤は珠の大きさや形状は概ね同一となっていることから、他の算盤を使用することも可能である。

3.2.2 射影変換と画像クロップによる衍画像の取得

次に、検出された AR マーカから算盤の領域画像を抽出する。算盤を使用する手によるオクルージョンや光の反射等の影響により、必ずしもすべての AR マーカが検出されると限らないため、まず検出された AR マーカの位置関係から欠損している AR マーカの位置を補完する。これらの AR マーカで囲われた

(注1) : <https://ec.unshudo.co.jp/ソロマチック23衍ツゲ玉-7/>

(注2) : <https://support.apple.com/ja-jp/111886>

(注3) : <https://www.playosmo.com>

(注4) : <https://www.amazon.co.jp/UGREEN/dp/B0C22V8WSF>

領域が算盤領域となるが、画像内における角度や位置が異なるため、射影変換を行うことによって正位置からの画像に変換する。得られた画像を分割・クロップすることにより、桁画像を取得する。

3.2.3 珠画像の識別と入力値の推定

最後に、得られた桁画像を認識し、各桁の入力値を推定する。本手法では、算盤の構造的特性に着目し、解くべき課題を単純化することにより高性能な入力値推定を実現する。算盤の1桁は、5つの珠とそれらを移動させるためのスペース（上段・下段に各1つ分）から構成され、珠を動かすスペースはおおよそ珠ひとつの半分の高さとなっている。したがって、1桁の画像は縦方向に7つの領域（小画像）に分割可能である。各領域は必ず「珠」または「軸」のいずれかであり、7つの小画像の順列は入力数値（0～9）ごとに一意に定まる。

そこで本手法では、各小画像を「珠」と「軸」の2クラスに分類する画像認識モデルを構築し、得られた認識結果の順列と、事前に定義した0～9に対応する小画像順列の辞書とのテンプレートマッチングを行うことで、各桁の入力値を推定する。先行研究[6]では「上珠・下珠・軸」の3クラス分類を用いていたが、本研究では斜め上方向からの撮影となるため、上珠と下珠の形状的な区別が困難である。そのため、クラスを「珠」と「軸」の2つに集約することで、撮影角度の変化に対して安定した識別を可能とした。

本システムでは、提案環境で収集した計30524枚の小画像（珠：15312枚、軸：15212枚）を教師データとし、CNNを学習させた。ネットワーク構造は、2層の畳み込み層（フィルタ数32および64、カーネルサイズ 3×3 ）とブーリング層 (2×2) 、および512ユニットの全結合層から構成される。過学習を防ぐため、各層の間にドロップアウト（0.3および0.5）を適用した。本システムはPythonで構築したCNNモデルをCore ML形式に変換し、Swift言語で実装したiOSアプリケーションに組み込んでいる。

4. 評価実験

提案手法の有効性を検証するため、構築したAbaCaaS-miniシステムを用いた評価実験を行った。

4.1 実験設定とデータセット

実際の利用シーンを想定し、ランダムに生成した7桁の数値（0000000～9999999）を算盤に入力し、iPadのインカメラと反射鏡を用いて撮影することで評価用データセットを作成した。なお、このデータセットに含まれる画像は、学習用データセットには一切含まれていない未学習のデータである。評価用データセットの例を図5に示す。本実験では、ARマーカのID4が貼付された桁を一の位とし、そこから7桁の範囲を入力対象とした。評価用データセットの作成にあたっては、この対象領域をカバーするARマーカ（上段：ID2, 3, 4、下段：ID9, 10, 11）が画像内に写っており、かつ上段・下段ともにそれぞれ2つ以上が検出可能であること、および手によるオクルージョンが発生していないことを条件とした。撮影環境として、モバイルデ



図5：評価用データセットの例

表1：入力値推定の精度

項目	値
評価用データセットサンプル数	200
正解サンプル数	193
誤認識サンプル数	7
└ 射影変換の失敗サンプル数	0
└ 小画像認識の失敗サンプル数	7
全サンプルにおける Accuracy（正解率）	96.5%

バイスは机上面に対して垂直（90度）になるよう設置した。一方、算盤の配置や角度については、ユーザが自然に設置する状況を考慮し、特定の厳密な位置固定は行わず、システムが許容する範囲内で任意とした。

4.2 実験結果

評価実験の結果を表1に示す。評価用データセット全200サンプルのうち、193サンプルについて入力値の推定に成功し、正解率（Accuracy）は96.5%となった。

以降では、実験結果および失敗要因について考察する。

4.3 考察と失敗要因の分析

4.3.1 誤認識の要因と設置条件の影響

認識に失敗した7サンプルは、すべて小画像のクラス分類（珠か軸か）の誤りに起因していた。表2に、認識に失敗したサンプルの詳細を示す。表中の「小画像の分類結果」に着目すると、誤認識が発生した全20箇所の小画像のうち、17箇所が「軸」を「珠」と誤認するケースであり、「珠」を「軸」と誤認するケースは3箇所のみであった。すなわち、本システムにおける誤認識の主な要因は、軸（空白部分）に珠が存在すると誤って判定してしまうことがあるといえる。

表 2: 小画像の認識に失敗したサンプル

入力値	正解の数値・順列	小画像の分類結果	推定結果
8059300	8 軸珠 珠珠珠珠珠	珠珠 珠珠珠珠珠	X
	0 珠軸 軸珠珠珠珠	珠珠 珠珠珠珠珠	XXX9300
	5 軸珠 軸珠珠珠珠	珠珠 軸珠珠珠珠	X
4878009	0 珠軸 軸珠珠珠珠	珠軸 珠珠珠珠珠	X
	9 軸珠 珠珠珠珠珠	軸珠 珠珠珠珠珠	48780XX
8104705	8 軸珠 珠珠珠珠珠	珠珠 珠珠珠珠珠	X
	1 珠軸 珠軸珠珠珠	珠珠 珠珠珠珠珠	X
	0 珠軸 軸珠珠珠珠	珠軸 珠珠珠珠珠	XXX4X05
	7 軸珠 珠珠軸珠珠	軸珠 珠珠珠珠珠	X
1355619	1 珠軸 珠軸珠珠珠	珠軸 珠珠珠珠珠	X
	5 軸珠 軸珠珠珠珠	珠珠 珠珠珠珠珠	X
2727073	2 珠軸 珠珠軸珠珠	珠軸 珠珠珠珠珠	X
	7 軸珠 珠珠軸珠珠	珠珠 珠珠軸珠珠	XX27073
7773475	7 軸珠 珠珠軸珠珠	軸軸 珠珠軸珠珠	X
4589208	4 珠軸 珠珠珠珠軸	珠軸 珠珠軸軸	X
			XX589208

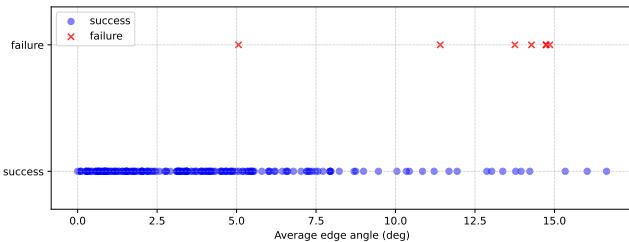


図 6: 算盤の傾きと推定結果の正誤

この要因として、画像内における「算盤の傾き（配置角度）」の影響が考えられる。図 6 に、算盤の設置角度と推定成否の関係を示す。ここで、算盤の設置角度は、検出された算盤の上辺および下辺のマーカ列が画像の水平線となす角度の絶対値をそれぞれ算出し、その平均値として定義した。この結果から、算盤の傾きが大きくなる場合（画面に対して平行でなくなるほど）に失敗が発生する傾向が見られる。先行研究[6]のような真上からの撮影とは異なり、本手法では反射鏡を用いて斜め上方向から撮影を行う。そのため、算盤が傾いて配置されると珠の見え方が変化しやすく、これが認識精度に影響を与えたと考えられる。

一方で、算盤の中心位置（ID 3 と ID 10 の AR マーカの中点）と推定成否の関係（図 7）を確認すると、AbaCaaS-mini では卓上の撮影範囲が狭いことから、先行研究で見られたような算盤の位置による失敗発生の顕著な傾向は確認できなかった。

4.3.2 システムの実用性と限界

まず、システムを構成する各要素の性能について述べる。小画像に対する分類性能という観点からは、9800 枚（200 サンプル \times 7 枠 \times 7 小画像）のうち 9780 枚の認識に成功しており、正解率は 99.8% であった。このように高い認識精度が得られており、かつテンプレートマッチングによって整合する数値が存在しない場合には X という出力を得られていることから、時間的に隣接するフレームを認識し結果を統合することで、入力数値の誤推定を排除することが可能であると考えられる。また、

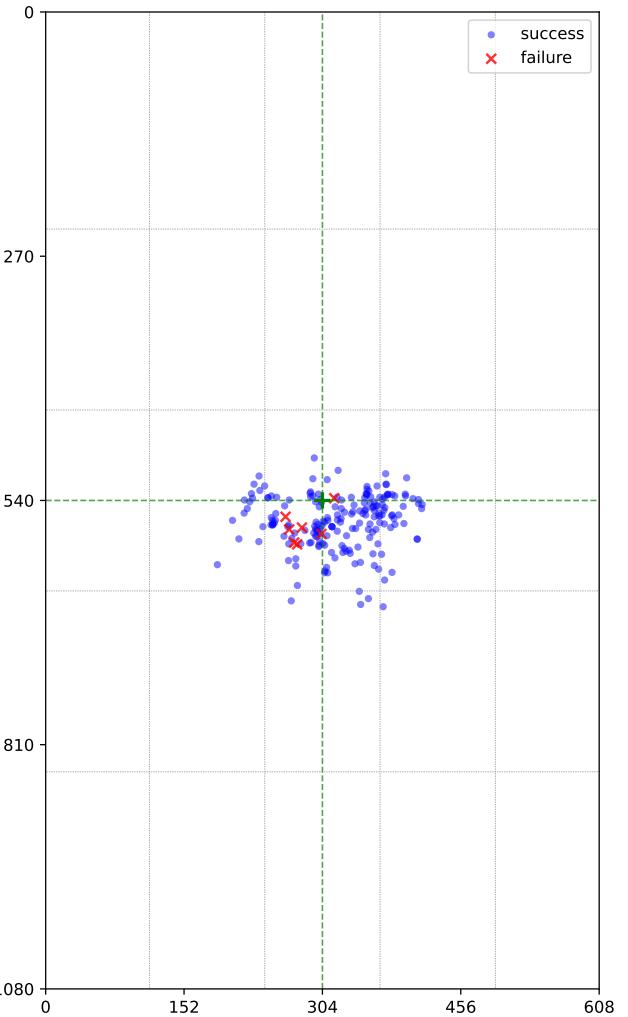


図 7: 算盤の中心位置と推定結果の正誤

連続的な認識を行うための処理速度については、iPad mini 第 6 世代（A15 Bionic チップ搭載）上で検証した結果、1 フレームあたり平均 71.74 ms（約 14 FPS）で動作することを確認した。初級から中級者による珠操作は通常数百ミリ秒以上を要するため、この処理速度はそれらの操作をリアルタイムに検出する上で十分であるといえる。なお、先行研究[6]では射影変換の失敗により入力値推定に失敗するサンプルが観測されたが、本システムでは事前処理の改良により、そのような失敗は観測されなかった。

次に、認識成功率と算盤の設置状態（角度・位置）の関係から、実用的な設置範囲について考察する。算盤の傾き（図 6）に関しては約 10 度以内、中心位置（図 7）に関しては画像の中心から一定の範囲内に収まっているれば、安定して高い精度で認識可能であった。以上の結果から、提案システムは厳密な位置合わせを必要とせず、一般的な学習環境において自然に算盤を配置する範囲であれば、実用的な精度で利用可能であると言える。

一度に推定可能な枠数については、撮影画像（図 5 等）から 10 枠程度までは画角内に収まり、認識可能であると推測される。例えば、日商珠算能力検定試験[16]の 3 級における見取り算は 6 枠程度で構成されている。したがって、約 10 枠という

認識範囲は、初級から中級段階の学習課題を十分にカバーできるといえる。また、上級者向けにより多桁の認識が必要となる場合には、平面鏡の代わりに凸面鏡を用いることや、インカメラに広角カメラを搭載したデバイスを利用する（あるいは外付けの広角レンズを装着する）ことで、より広範囲の撮影を可能にする拡張も検討できる。ただし、その際には広角レンズ特有の歪みへの対応が新たに必要となる。

5. ま と め

珠算学習は、算盤の「珠」を用いた数値表現の理解、操作方法の習得が必要であり、長期に渡る繰り返し学習を要することから、本研究では、一般的な算盤を用いる珠算学習を対象としたICTによる学習支援の実現を目指している。本稿では、場所を選ばず手軽に学習支援を行うため、iPadのインカメラと反射鏡を用いた算盤上の入力値推定手法「AbaCaaS-mini」を提案した。本手法は、学習者には自律的な学習環境を提供し、指導者には観察・記録負担を軽減することで、家庭および教室の双方での珠算学習支援に寄与することが期待される。AR マーカを貼付した算盤を画像から検出するとともに、桁を構成する小画像を「珠」と「軸」に分類し、テンプレートマッチングを行うことによって、算盤上に入力された7桁の数値に対し正解率96.5%での推定が可能であることを確認した。今後は、学習者の苦手検出機能の開発や、学習者への適切なフィードバックを行う情報提示システムの開発を行い、実際の教室環境での評価を行う。

謝 辞

本研究の一部は、KDDI財団調査研究助成（2021年度）の助成を受けて行われたものです。

文 献

- [1] S. Amaiwa and G. Hatano, “Effects of abacus learning on 3rd-graders’ performance in paper-and-pencil tests of calculation,” *Japanese Psychological Research*, vol.31, no.4, pp.161–168, 1989.
- [2] J.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.
- [3] C. Wang, T. Xu, F. Geng, Y. Hu, Y. Wang, H. Liu, and F. Chen, “Training on Abacus-Based Mental Calculation Enhances Visuospatial Working Memory in Children,” *Journal of Neuroscience*, vol.39, no.33, pp.6439–6448, 2019.
- [4] C. Wang, “A Review of the Effects of Abacus Training on Cognitive Functions and Neural Systems in Humans,” *Frontiers in Neuroscience*, vol. Volume 14, pp.1–12, 2020.
- [5] L. Yujie, L. Mengyi, C. Zhijun, W. Li, H. Yuwei, and Z. Xinlin, “Transfer effects of abacus training on cognition,” *Current Psychology*, vol.42, pp.6271–6286, 2023.
- [6] Y. 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. <https://doi.org/10.60401/ijabc.2>
- [7] Y. Matsuda, “A Table-top Interface for Real-time Coaching in Abacus Learning,” *The 10th International Conference on Smart Computing (SmartComp ’24, Demo)*, pp.243–245, 2024. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP61445.2024.00056>
- [8] 北川珠莉、鈴木優, “珠の位置認識と操作手順の重疊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ョン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卷,

- pp.75–79, 2011.
- [10] 斎藤謙太、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.
- [11] 株式会社 Digika, “そろタッチ,” <https://www.sorotouch.jp/>. Accessed on 15/11/2025.
- [12] 小嶋泰造、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.
- [13] 小嶋泰造、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 (BTL-9)*, pp.41–48, 2025.
- [14] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. Madrid-Cuevas, and M. Marín-Jiménez, “Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion,” *Pattern Recognition*, vol.47, no.6, pp.2280–2292, 2014.
- [15] OpenCV, “ArUco markers and boards detection for robust camera pose estimation,” https://docs.opencv.org/4.7.0/de/d67/group__objdetect__aruco.html. (Accessed 2025-12-23).
- [16] 日本珠算連盟, “珠算能力検定試験,” <https://www.shuzan.jp/kentei/mihon/>. (Accessed on 2025-12-23).