

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

吉村 太斗^{1,a)} 松田 裕貴^{1,b)}

概要：珠算の習得には長期的な反復学習が必要であり、ICTによる自律的な学習支援が求められている。筆者らは先行研究において、モバイルデバイスのインカメラと反射鏡を用いて手元の算盤操作を撮影し、画像認識により入力値を推定するシステム「AbaCaaS mini」を提案した。このシステムは特別な外部機材を必要とせず、タブレット端末単体で完結する利点がある一方で、市販の反射鏡を別途持ち運び、都度装着する必要があるという運用上の課題があった。そこで本研究では、AbaCaaS mini の利便性をさらに向上させるため、反射鏡を内蔵した iPad 用保護ケースを設計・開発する。提案するケースは、使用時に反射鏡を適切な角度で展開できる機構を備えつつ、未使用時には通常の保護ケースとして機能し、持ち運びや設置の手間を大幅に削減する。本稿では、反射鏡一体型ケースの設計指針と実装について述べ、実機を用いた予備的な評価によりその有用性を議論する。

1. はじめに

算盤（そろばん）は、串に通された珠を操作して数値を表現することで計算を補助する道具であり、珠算学習がもたらす計算能力・暗算能力や認知的な効果が注目されている[1], [2], [3], [4], [5]。しかしながら、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、能力習得には長期的な反復練習が必要であることが知られている。さらに、現在は対人指導に基づく学習方法が主流であるが、指導者不足や個別の学習履歴管理の難しさという課題を抱えている。ICTを用いた学習支援アプリも普及しているものの実物の算盤を用いた触覚的な操作学習とは質的に異なるため、実物を操作しながらデジタルな支援を受けられる環境が求められている。

そこで筆者らは、iPad のインカメラと反射鏡を用いて手元の算盤操作を認識する「AbaCaaS mini」[6] を提案している。これにより大きい機材を要さない珠算学習支援が可能となったが、市販の反射鏡を別途持ち運び、撮影に適した位置に設置・調整する手間があること、安定した撮影のためには iPad を垂直に近い角度で保持する必要があるが、一般的なタブレットスタンドと反射鏡を組み合わせる構成では難しいことが課題となっている。



図 1 反射鏡一体型ケースを搭載する AbaCaaS mini

そこで本研究ではこれらの課題を解決するため、反射鏡とスタンド機能を一体化した iPad 用保護ケース（図 1）を提案する。本デバイスは、通常時は保護ケースとして機能し、学習時には展開することで iPad を垂直に保持する「スタンド」、インカメラで卓上を撮影するための「反射鏡」という二つの機能を提供する。これにより、機材の持ち忘れを防ぎ、場所を選ばず即座に学習を開始できる環境を実現する。本稿では、提案ケースの設計指針と実装について述べるとともに、反射鏡一体化ケースを珠算学習に用いることが可能かどうかについての予備的評価を行った。その結果、提案ケースは市販の反射鏡を用いる場合よりもコンパクトな形状でありつつも、正確な入力値推定が可能であることを確認した。

¹ 岡山大学, Okayama University

a) taito.yoshimura@cocolab.jp

b) yukimat@okayama-u.ac.jp

2. 関連研究

2.1 珠算学習支援システム

北川ら [7] 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）で操作ガイドを提示する学習支援システムを提案している。

筆者らは書画カメラ等の外部撮像装置で卓上の算盤操作を撮影し、画像認識により盤面状態や操作系列の推定を行う手法、加えて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からなる ICT 珠算学習支援システム AbaCaaS (Abaacus Manipulation Sensing using Camera as a Sensor) [8], [9] を提案している。さらに、その後継システムとして、モバイルデバイスのインカメラと反射鏡を用いて、机上の AR マーカ付き算盤を操作する様子を撮影し、画像認識により入力値を推定することで、タブレット端末単体で完結する算盤入力値推定システム AbaCaaS mini[6] を提案している。推定処理は、AbaCaaS と同様に AR マーカ検出による位置特定と射影変換による桁画像の切り出し、CNN を用いた小画像（珠・軸）の分類と辞書照合による入力値推定の順で行われ、インカメラと反射鏡を用いた場合においても高い推定性能を示すことを確認している。

2.2 ケース・外付け構造を用いた入力拡張

スマートフォンやタブレットのケースや外付け構造をインタラクション拡張の基盤として捉える研究は、近年の HCI 分野において重要な潮流となっている。

Laput らは Acoustuments [10] を提案し、スマートフォンに取り付け可能な受動・非電源の 3D プリント機構を用いて、ノブやスライダ、スイッチといった物理的入力を実現できることを示した。Acoustuments では、スマートフォンのスピーカーとマイクを用いた音響センシングにより、3D プリントされた構造物の状態を高精度に認識している。この研究は、ケースやドッキング構造を単なる保持具ではなく、インタラクション拡張のための構造的基盤として位置づけている点で、本研究と方向性を共有している。

これに対し、ClipWidgets [11] は、3D プリントされたスマートフォンケースを土台として、物理的ウィジェットを着脱可能に拡張する設計手法を提案している。ボタンやダイヤルなどの受動的な物理モジュールをケース周囲に追加し、スマートフォンのカメラを用いてその状態を認識することで、周辺入力を実現している。ClipWidgets は、ケースを「機能拡張のプラットフォーム」として明示的に扱い、モジュール性・再構成性を重視した設計論を提示している点で、本研究の立場に極めて近い先行研究である。

また、ケースの形状そのものを通じてユーザの操作を誘

導・制約する研究も報告されている。Yeo らは、レーダーセンシングを用いたタンジブルインタラクションの研究 [12]において、「ガイドケース (guide case)」という概念を導入し、手触り、拘束、位置決めといった物理的特性を設計変数として扱うことで、操作性や体験の質を議論している。この研究は、ケースを単なる外装ではなく、ユーザの身体動作とデバイス操作を媒介する情報的構造として捉えている点で、本研究の立場と強く共鳴する。

受動的な物理構造を入力インターフェースとして活用する研究として、MoiréWidgets [13] が挙げられる。MoiréWidgets は、3D プリントされたメカニズムと視覚パターンを組み合わせることで、電子部品を用いずに高精度な物理入力を実現する手法を示している。この研究は、ユーザ入力を物理構造の変化として表現し、それをデバイス側で解釈するという点で、物理構造を情報として設計するアプローチを体系化している。

以上の研究に対し、本研究は、タブレットケースを一体型の可変構造として設計し、その構造変形自体を機能状態およびインタラクションの媒体として利用する点に特徴がある。既存研究が、外付けモジュールやセンシング手法の拡張によって入力自由度を高めてきたのに対し、本研究は、ケースという日常的・必然的な外装をハックすることで、新たな機能とインタラクションを付加することを目指している。

3. 反射鏡一体型ケースの設計と実装

本稿では、筆者らが先行研究で提案した算盤入力値推定システム「AbaCaaS mini」[6] の利用を想定する。このシステムは、書画カメラ等の外部機材を必要とせず、タブレット端末単体で完結するため、場所を選ばず手軽に利用できるという利点を持つ。しかしながら、Osmo (Tangible Play 社製)^{*1} に付属する iPad 用クリップ式反射鏡や、タブレット端末を自立させるためのスタンドなどが必要であり、携帯性などの面において改善の余地がある。そこで、以降では AbaCaaS mini の機能を搭載した「反射鏡一体型ケース」の設計・実装について述べる。

まず、提案ケースに求められる要件を定義し、その要件に基づいた具体的な設計とプロトタイプの実装について説明する。

3.1 要件定義

先行研究の課題および実用性の観点から、提案ケースが満たすべき要件を以下の通り定義した。

- (1) **携帯性 (Portability)** : iPad と一体化して持ち運べること。別途機材を持ち運ぶ必要がない形状であること。

^{*1} <https://www.playosmo.com>

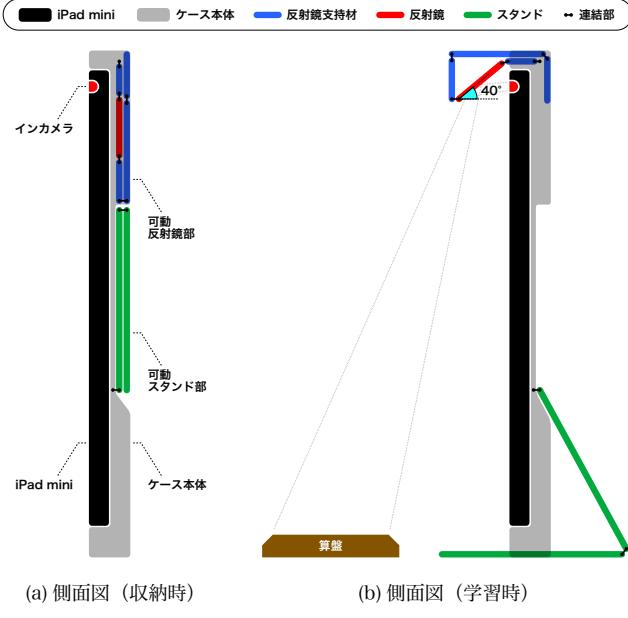


図 2 反射鏡一体型ケースの構造

- (2) 即時利用性 (Instant Usability) : 複雑な組み立てや調整を必要とせず、短時間で学習を開始できること。
- (3) スタンド機能 (Stand Function) : 算盤操作を撮影するために、iPad を机上面に対して垂直に近い角度で自立させられること。
- (4) 撮影範囲の確保 (Field of View) : インカメラと反射鏡を用いて、手元の算盤（少なくとも計算に必要な桁数）を画角に収められること。
- (5) 通常利用への配慮 (Dual Use) : 学習時以外は、通常の iPad 保護ケースとして機能し、画面操作や持ち運びを阻害しないこと。

3.2 設計と実装

3.2.1 基本コンセプト

提案ケースの設計にあたり、市販のタブレット用保護ケース（いわゆる風呂蓋式のスマートカバー等）の構造に着想を得た。これらの既存製品は、板状パーツを折り畳むことで簡易的なスタンドとして機能する。本研究ではこの「折り畳みによる機能変容」というコンセプトを拡張し、ケース背面に「スタンド」と「反射鏡」という2つの独立した可動機構を配置した。それぞれが風呂蓋のようにパタパタと折り返して展開されることで、iPad を自立させる機能と、インカメラ上部に反射鏡を配置する機能を個別に、かつ直感的に利用可能とする。

3.2.2 構造デザイン

提案ケースは、iPad 本体を装着する「ケース本体」と、その背面に配置された「可動スタンド部（下部）」および「可動反射鏡部（上部）」から構成される（図 2）。両可動部は、複数の板状パーツが柔軟な素材（本プロトタイプではテープを使用）で連結された構造となっており、通常時は

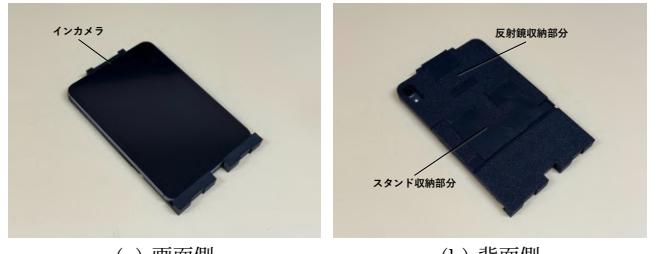


図 3 製作したプロトタイプの収納時の形状

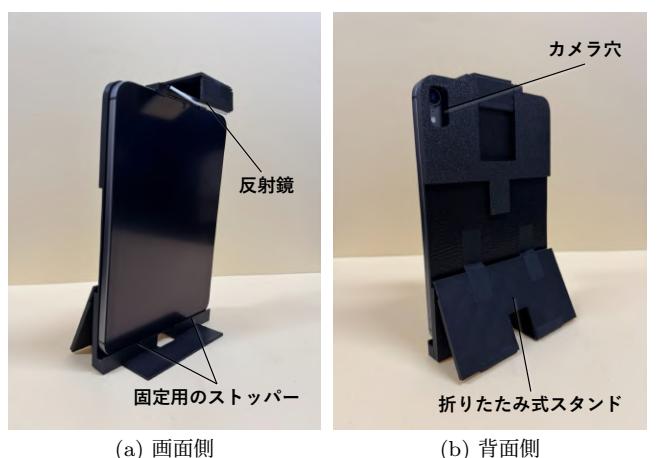


図 4 製作したプロトタイプの学習時の形状

ケース本体の背面にフラットに収納される。

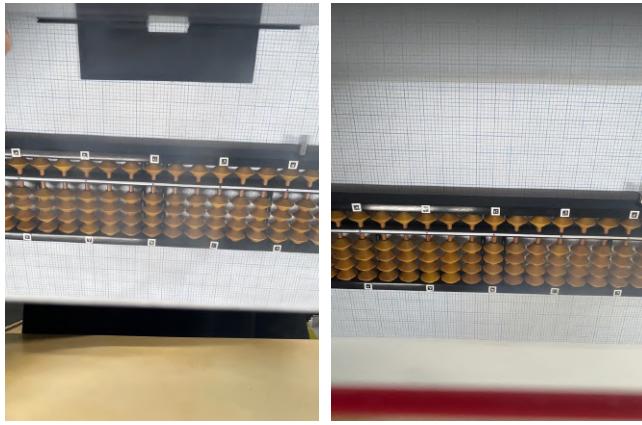
学習時（使用時）には、まず下部の可動スタンド部を展開し、三角形を形成するように組み立て、スタンド底面部に設けられた開口部をケース本体の底面にはめ込むことで、iPad を自立させる。次に、上部の可動ミラー部を展開し、同様に組み立ててインカメラ前方に固定することで、手元の撮影環境を構築する。

3.2.3 プロトタイプ実装

上述の設計に基づき、iPad mini（第6世代）を対象としたプロトタイプを製作した。設計には3D CADを用い、筐体パーツはFDM方式の3DプリンタにてPLA樹脂を用いて出力した。反射鏡には、軽量かつ割れにくいアクリル製ミラーを採用し、ミラー部に埋め込む形で固定した。完成したプロトタイプを図3、図4に示す。収納時にはフラットなケースの形状でありつつも、学習時の形状はスタンドと反射鏡へとスムーズな変形動作を行うことができ、またデバイスが自立するのに十分な安定性を実現した。

4. 予備的評価と考察

試作した反射鏡一体型ケースの珠算学習における有用性を確認するため、実機を用いた予備的評価を行った。具体的には、設計したケースが（1）算盤学習に必要な撮影範囲を確保できているか、（2）既存のAbaCaaS miniシステムによる入力値推定が正常に動作するか、の2点について検証した。



(a) 提案ケース

(b) 既存手法 [6]

図 5 インカメラで取得できる画像例

実験には、Apple 社製 iPad mini（第 6 世代）を使用し、試作したケースを装着した。算盤は一般的な 23 桁のものを利用し、AbaCaaS mini システムで用いる AR マーカを枠に取り付けた。ケースのスタンドを展開し平らな机上に設置した状態で、iPad のインカメラを用いて撮影した。

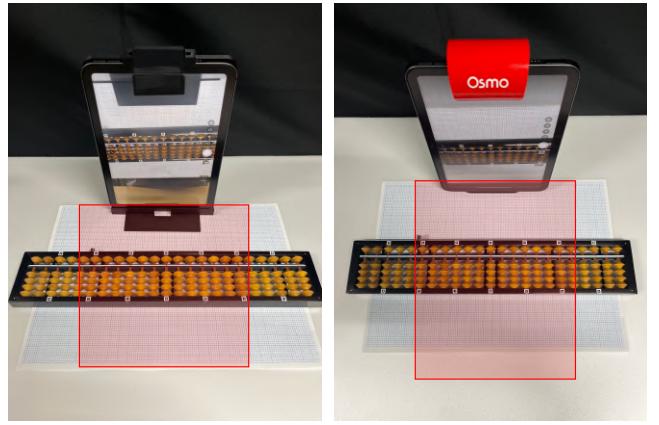
4.1 撮影範囲の検証

まず、提案ケースのミラーおよびスタンド機構によって、適切な画角が確保されているかを確認した。算盤を iPad の手前に配置し、インカメラで取得された映像を確認したところ、算盤の盤面中央部を中心に、一般的な珠算学習に十分な範囲（約 13 桁）が鮮明に撮影されていることが確認できた（図 5(a)）。これにより、要件 4「撮影範囲の確保」が満たされているといえる。

さらに、本提案ケースの有効性を検証するため、先行研究 [6] で採用されていた市販の反射鏡とスタンドを用いた場合の撮影範囲との比較を行った。図 5(b) および図 6(b) に、先行研究における取得画像と撮影範囲を示す。これらと提案ケースによる結果（図 5(a)、図 6(a)）を比較すると、両者の撮影範囲に大きな差異は見られず、提案ケースにおいても十分な画角が確保されていることがわかる。

4.2 入力値推定の検証

次に、撮影された映像を用いて、AbaCaaS mini のアルゴリズムによる入力値推定が可能か検証した。本評価では、算盤上にランダムな数値を入力し、システムによる認識を 100 回試行した。その結果、全ての試行において AR マーカが正常に検出され、盤面領域の切り出しおよび各桁の珠の分類が正確に行われた。入力値の推定成功率は 100% (100/100 回) であり、提案ケースを用いた状態でも、AbaCaaS mini の認識アルゴリズムが十分に機能することが示された。これは、ケースの保持安定性が十分であることを示唆している。



(a) 提案ケース

(b) 既存手法 [6]

図 6 撮影範囲（俯瞰図）

4.3 汎用性と拡張性

本研究では、iPad mini（第 6 世代）を対象としてケースを設計した。しかし、提案した「反射鏡とスタンドを一体化する」という設計指針は、特定の機種に依存するものではない。カメラ位置や筐体サイズに合わせてパラメータを調整することで、他の iPad シリーズや Android タブレット向けのケースも同様に製作可能である。また、本ケースの 3D モデルデータをオープンソースハードウェアとして公開することで、教育機関や個人が所有するデバイスに合わせてカスタマイズし、安価に学習環境を構築できるようになると期待される。このように、提案手法は特定のハードウェアに縛られない高い汎用性と拡張性を有している。

5. おわりに

本稿では、筆者らが先行研究で提案した、iPad のインカメラと反射鏡を用いて手元の算盤操作を認識する「AbaCaaS mini」の実用性を高めるため、反射鏡とスタンド機能を一体化したタブレットケースを提案・試作した。提案ケースは、通常時はタブレットケースとして機能し、展開することで即座に学習環境を構築可能とする。iPad mini を用いたプロトタイプの実装と予備的評価により、提案ケースが算盤操作の撮影に必要な画角を確保し、既存の認識アルゴリズムによる入力値推定が正確に動作することを確認した。これにより、外部機材の持ち運びや設置の手間という課題を解決し、より手軽な珠算学習支援環境を実現する。

今後の課題として、実際の珠算学習者を対象としたユーザスタディの実施が挙げられる。本稿では撮影範囲や認識精度といった技術的な検証に留まっているが、提案ケースが学習効率に与える影響や、日常的な学習場面における使いやすさ（ユーザビリティ）、さらには長期利用における満足度などについても評価を行い、実用性を多角的に検証する必要がある。

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。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Chunjie Wang, Tianyong Xu, Fengji Geng, Yuzheng Hu, Yunqi Wang, Huafeng 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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) , Vol. 125, No. 325, pp. 79–84, 2026.
- [7] 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ョン 2022, pp. 759–762, 2022.
- [8] 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.
- [9] Yuki Matsuda. A Table-top Interface for Real-time Coaching in Abacus Learning. In *The 10th International Conference on Smart Computing (SmartComp '24, Demo)*, pp. 243–245, 2024.
- [10] Gierad Laput, Eric Brockmeyer, Scott E. Hudson, and Chris Harrison. Acoustruments: Passive, Acoustically-Driven, Interactive Controls for Handheld Devices. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2161–2170, 2015.
- [11] Aaron Visschedijk, Hyunyoung Kim, Carlos Tejada, and Daniel Ashbrook. ClipWidgets: 3D-printed Modular Tangible UI Extensions for Smartphones. In *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '22, pp. 1–11, 2022.
- [12] Hui-Shyong Yeo, Ryosuke Minami, Kirill Rodriguez, George Shaker, and Aaron Quigley. Exploring Tangible Interactions with Radar Sensing. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, Vol. 2, No. 4, pp. 1–25, 2018.
- [13] Daniel Campos Zamora, Mustafa Doga Dogan, Alexa F Siu, Eunyee Koh, and Chang Xiao. MoiréWidgets: High-Precision, Passive Tangible Interfaces via Moiré Effect. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, pp. 1–10, 2024.