

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

小嵜泰造^{†1}

奈良先端科学技術大学院大学

松田裕貴^{†2}

岡山大学

1. はじめに

そろばんは珠を上下に動かして数値を表現し、計算を補助する伝統的な道具である。珠算学習は現在も習い事として存在するが、電子計算機の普及により使用機会は減少している。しかし、珠算学習には計算力や集中力の向上などの効果があり [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]、日本のみならず海外でも注目されている。

珠算能力の習得には、数値の表現方法と正確な指の動きを身につけることが不可欠であるため、一般的にそろばん教室や学校で指導者主導の学習が行われる。指導者は計算結果の正誤判定やミスの指摘を行うが、人手に依存する点が課題である。また、珠の操作には多様な種類があり、迅速かつ正確な操作が求められるため、学習者は「苦手操作」に直面しやすい。その結果、特定の操作でミスを繰り返し、苦手操作として定着してしまうことがある。苦手操作克服には繰り返し学習が必要だが、苦手操作ばかりの練習は心理的負担が大きく、モチベーションの低下を招く。また、紙の教本では学習者ごとに適した問題が提供されるとは限らない。これを解決するため、機械学習を活用し、苦手な問題を自動生成する手法が提案されている [8, 9] が、学習者自身によるラベル付けの作業が必要であり、学習者にとって負担が大きいといえる。著者らはこれまでに、市販のそろばんに AR マーカを貼り、書画カメラで撮影した映像を分析することで盤面を認識し、リアルタイムに学習支援情報を提示するシステムを提案している [10, 11, 12]。また、ゲーミフィケーションを取り入れた苦手操作克服のための学習支援システムの設計や問題生成手法も提案してきた [13, 14]。

本研究では、これらの手法を統合することで、ゲーミフィケーションを取り入れた繰り返し学習により指導者なしでも苦手操作の克服を可能とするシステム「CalcQuest」を提案する。本論文では、CalcQuest の設計・実装を述べ、そろばん教室の生徒 10 名を対象としたユーザスタディを通じて、有効性やユーザビリティを評価した結果を報告する。

User Study of A Gamified Abacus Learning Support System
“CalcQuest”

^{†1} TAIZO KOZAKI, Nara Institute of Science and Technology

^{†2} Yuki Matsuda, Okayama University

2. 関連研究

2.1. 珠算学習支援システムに関する研究

猪俣ら [15] は、カメラと AR マーカを用いてそろばんの盤面を認識し、HMD 上に学習支援情報を重畳表示するシステムを提案した。これにより、初学者は運指や計算状況に応じた支援を受けながら珠算操作を習得できる。北川ら [16] は、RGB カメラを用いてそろばんの盤面をリアルタイムで推定し、プロジェクションマッピングにより計算支援情報を提示するシステムを開発した。これにより、計算手順や指使いを視覚的に提示し、学習を進めるインターフェースが提供されている。新川ら [17] は、LMS (Learning Management System) を備えた Web 学習支援システムを開発した。フラッシュ暗算の学習機能を搭載し、学習者は進捗管理を行いながら、自宅でも学習できる。齋藤ら [18] は、スマートフォンやタブレット端末を利用した学習支援ツールを提案している。このツールでは、端末画面上にそろばんを再現し、数値や操作手順を視覚的に提示する機能を備え、初心者でも無理なくそろばんの操作を学べるよう工夫されている。Digika 社 [19] は、タブレット上でそろばんに類似した UI を再現し、珠の操作をボタン入力に置き換えた「そろタッチ」を提供している。両手を使ったボタン操作により、そろばんの感覚を保ちつつ学習が可能となっている。

2.2. ゲーミフィケーションを活用した教育支援に関する研究

沼口ら [20] は、英単語の暗記学習を支援するシステムを提案した。作物の成長を通じて復習を促し、視覚的な復習タイミングの提示により学習を支援する。ゲーミフィケーションの導入により、モチベーション維持と学習効果向上が確認された。谷本ら [21] は、C 言語の文法やアルゴリズム学習を対象としたアプリ「Code Quiz」を提案した。レベルやバッジ、ポイントを活用し、ゲーム感覚で学習を進められる設計になっている。5 名の被験者による予備実験では、約 1 週間の利用後にモチベーション維持が確認された。大濱ら [22] は、相対音感向上を目的とした音楽学習アプリ「オトクマ」を提案した。ガチャや図鑑、マスコットの応援

機能を活用し、ゲーミフィケーションを組み込んだ相対音感トレーニングシステムを提案している。22名の被験者による2週間の実験で音感スコアの向上が確認された。鈴木[23]は、SDGsをテーマにしたゲーミフィケーション教材「X（クロス）」をデジタル化し、オンライン環境で利用可能にした。視覚性、操作性、理解性の面で高評価を得ており、紙媒体と同等以上の満足度が確認された。

2.3. 本研究の立ち位置

珠算学習の向上には、計算過程における苦手操作や誤操作の発見と指導が重要だが、従来の方法は指導者に依存している。このため、学習者の珠操作をセンシングし、状況に応じた学習支援を提供することで、学習効率を向上させることが可能と考えた。既存の珠算学習支援システムは、初学者に対する珠の動かし方や計算手順の指導は可能だが、苦手操作の検出や克服のための問題生成機能は備えていない。一方、ゲーミフィケーションを活用した教育支援システムでは、学習のモチベーション向上が確認されている。これらを踏まえ、本研究では、人手を介さずに学習可能で、ゲーミフィケーションを活用した繰り返し学習により苦手操作を克服できるシステムの実現を目指す。著者らはこれまでに、ゲームシナリオの構想[13]や苦手操作の検出方法[14]を提案してきた。本論文では、それらを実際のシステム「CalcQuest」として実装するとともに、システムの有効性、ユーザビリティについて実際の珠算学習者を対象とした実験を通じて評価した結果を報告する。

3. CalcQuest：システムの設計

3.1. アプローチ

従来の珠算学習では、指導者が学習者に指摘を行うことが求められ、人手に依存する点が課題であった。また、苦手操作の克服には繰り返し練習が必要だが、同じ操作の練習がストレスやモチベーション低下を引き起こす可能性がある。そこで、ICTを活用した学習の効率化と、ゲーミフィケーションによるモチベーション向上の知見に基づき、珠算能力の向上を図る。本研究では、書画カメラを用いたARマーカ付きそろばんの盤面認識、苦手操作の検出と克服のための問題生成、ゲーミフィケーションを組み込んだ学習支援システム「CalcQuest」を提案する。

3.2. システム設計

本稿では、著者らがこれまでに提案してきた[10, 11, 13, 14]の手法を元に開発したシステムを提案する。システム構成を図1に示す。システムはARマーカを貼付した市販のそろばん、そろばんの盤面を俯瞰的な視点から撮像する書

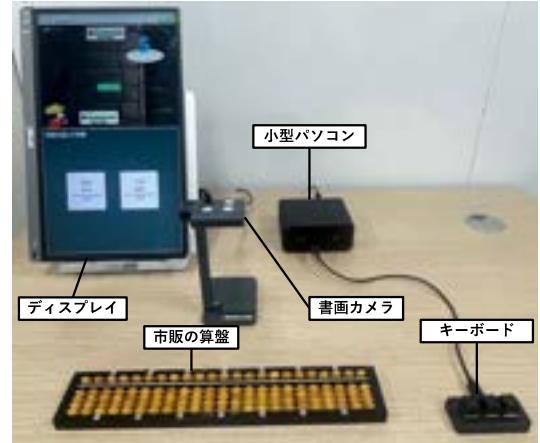


図1 システム構成

画カメラ、そろばんの盤面認識・苦手操作の検出・問題の生成を実行する小型パソコン、ゲームの画面を提示するディスプレイ、盤面認識結果を小型パソコンに送信するためのキーボードから構成される。

3.3. 苦手操作克服機能

珠算学習において、正確な珠操作を習得することが重要であるが、珠操作の種類は多様であり、学習者が苦手操作に直面することが多い。そこで、独自で加算と減算の際の6パターンの苦手操作を定義した[14]。以降ではそれらについて改めて述べた上で、苦手操作の検出および苦手問題を含む問題生成の方法について述べる。

3.3.1 苦手操作の定義

パターン1：加算操作の不足

パターン1は本来足すべき数字を足していない苦手操作である。パターン1の苦手操作の例である図2に示すように「3を足す」という操作が行なわれない場合である。

パターン2：減算操作の不足

パターン2は本来引くべき数字を引いていない苦手操作である。パターン2の苦手操作の例である図3に示すように「5を減ずる」という操作が行なわれない場合である。

パターン3：加算量の誤誤

パターン3は本来足すべき数字より多い数または少ない数を足す苦手操作である。パターン3の苦手操作の例である図4に示すように「1を足す」という操作が「2を足す」という操作になり、本来足すべき数字より多い数を足す場合である。

パターン4：減算量の誤誤

パターン4は本来引くべき数字より多い数または少ない数を引く操作である。パターン4の苦手操作の例である図5に示すように「5を引く」という操作が「6を引く」という操作になり、本来引くべき数字より多い数を引く場合である。

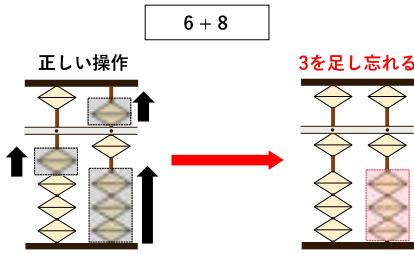


図2 パターン1の加算操作の不足

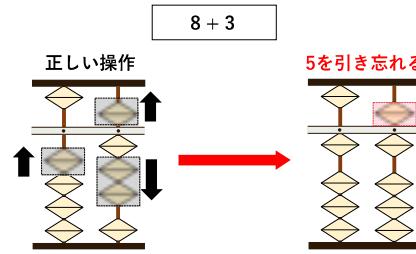


図3 パターン2の減算操作の不足

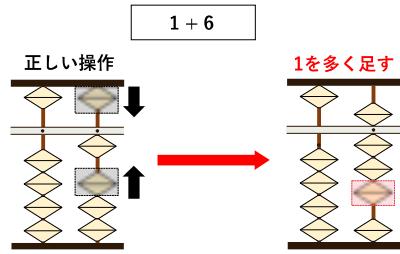


図4 パターン3の加算量の誤錯

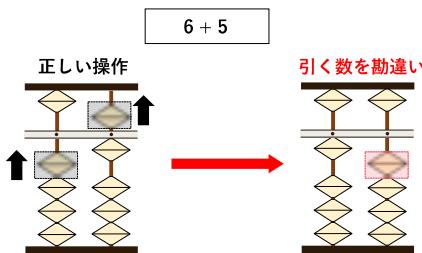


図5 パターン4の減算量の誤錯

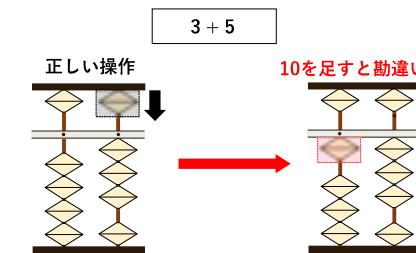


図6 パターン5の五珠・十珠の誤錯

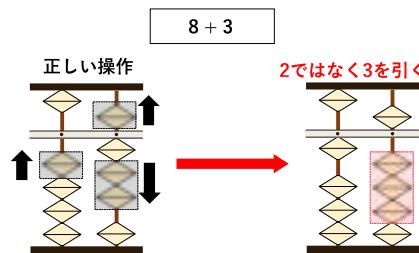


図7 パターン6の加減操作の反転

パターン5：五珠・十珠の誤錯

パターン5は本来足すべき数字を誤って引いてしまうまたは引くべき数字を誤って足してしまう操作である。パターン5の苦手操作の例である図6に示すように「5を足す」という操作が「10を足す」という操作になり、本来5を足す操作を誤って10足してしまう場合である。

パターン6：加減操作の反転

パターン6は本来足すべき数字を誤って引いてしまうまたは引くべき数字を誤って足してしまう操作である。パターン6の苦手操作の例である図7に示すように10の補数を勘違いし、「7を減ずる」操作を「3を減ずる」と操作してしまい、本来足すべき数字を誤って引いてしまう場合である。

3.3.2 苦手操作検出手法

苦手操作は、学習者が同じ誤操作を繰り返す傾向を基に推定される。誤操作が発生する場合、学習者が特定の操作を正確に理解していない、または忘れている可能性を考えられる。本研究では、正誤判定に基づき、認識結果と出題された計算問題の正答の値との間に生じる差分を算出し、それを用いて苦手操作を検出する手法を提案する。具体的には、出題された計算問題の正答の値と、誤操作を含む認識結果を一桁ごとに分解し、それぞれの桁における差分値を計算することで、誤操作を推定する。この推定結果を基に、前述した6つの苦手操作のパターンを検出する。また、一桁の各操作から想定される誤操作の値と正答の値の差分値は提案システム内のデータベースに存在し、差分値を参照することでパターンを検出できる仕組みとなっている。

3.3.3 苦手問題生成手法

苦手操作のパターン検出結果に基づき、苦手操作を含む問題を生成する。具体的には苦手操作のパターン検出が繰り

返されることで特定のパターンの検出回数が増加し、検出回数が5回を超えると苦手操作としてフラグが立つ。このフラグが立った場合、該当する苦手操作を含む問題が優先的に出題される。次に出題される問題では、過去に検出された苦手操作を含む問題が生成され出題される。苦手操作を含む問題を正答すると、苦手操作のパターンの蓄積回数が1回減少する。この減少を繰り返し、苦手操作のパターンの回数が3回以下になった場合、苦手操作を克服したとみなしてフラグが解除される。フラグが解除された場合、その苦手操作を含む問題は出題されなくなる。しかし、再度同じパターンで検出回数が5回を超えると苦手操作としてフラグが立ち、同様の手順で苦手操作を含む問題が優先的に出題される。一方、苦手操作のパターンが一つも検出されない場合は、ランダムな問題が生成される。

3.4. ゲームシナリオとシステムの実装

著者らは、珠算学習支援のためのゲームシナリオとして、通常の珠算学習環境（個人が問題集を解くことで学習を進める形態）を想定し、プレイヤーとコンピュータの敵で交互に攻撃を行い戦うターン制コマンドバトル（PvEゲーム）のシナリオをこれまでに提案してきた[13]。ここでは、前述の苦手操作の検出および問題生成の実装を踏まえて、ゲームシナリオを改訂するとともに実装を行う。改訂したゲームのシステムフローを図8に示す。以降ではそれぞれのフェーズについて改訂した点及び実装内容について述べる。

■ 攻撃フェーズ (P_A)

攻撃フェーズでは、プレイヤーにとって難易度が異なる2つの問題が提示される。一方の問題はプレイヤーの苦手操作を必ず含む問題が提示されるが、苦手操作がまだ検出

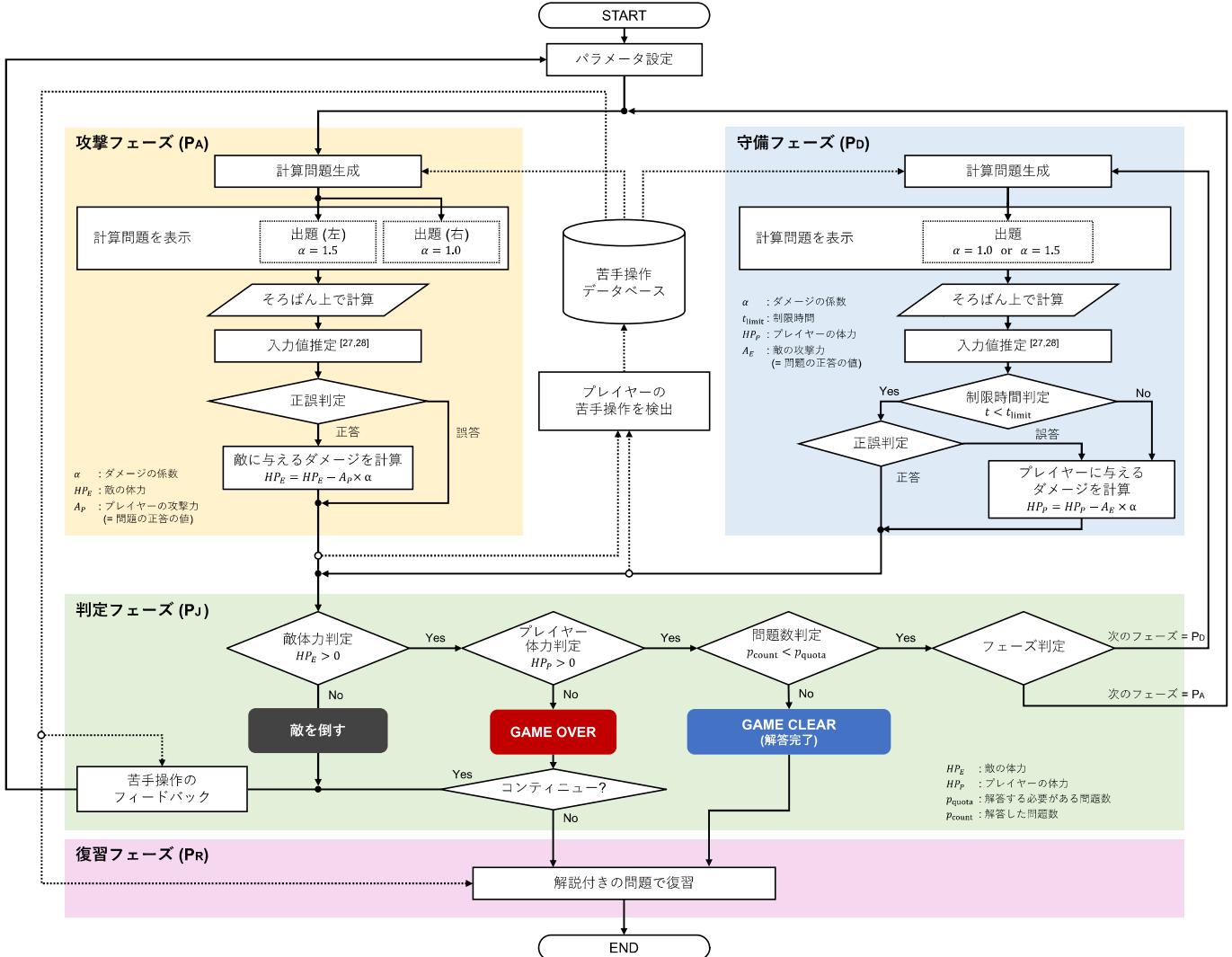


図8 PvE ゲームを用いた珠算学習支援のゲームシナリオ (著者らの構想 [13] をベースに改良)

されていない状態であれば、ランダムな問題が提示される。もう一方の問題はプレイヤーの苦手操作を含まないランダムな問題が提示される。プレイヤーは提示された2つの問題のうち、どちらかひとつを選択してそろばんを用いて計算し、計算結果からどちらの問題を選択したかを判別する。正答であった場合はどちらを選択したかわかるが、誤答であった場合は、認識結果の値と計算問題の正答の値の差分結果から選択した問題を判別する。

■ 守備フェーズ (P_D)

守備フェーズでは、プレイヤーに対し苦手操作を含んだ問題を提示する。ここで、苦手操作がまだ検出されていない状態であれば、ランダムな問題が提示される。出題された計算問題を制限時間内に正答した場合には、敵の攻撃を回避し、制限時間内に計算が終了しなかった場合、あるいは、計算結果が誤答であった場合には、プレイヤーにダメージが与えられる。

■ 判定フェーズ (P_J)

判定フェーズでは、プレイヤーおよび敵の体力 (HP_P , HP_E) の残量の判定、および、次に遷移するフェーズを判定する。敵の体力がなくなった場合 ($HP_E \leq 0$)、新たな敵が出現する。プレイヤーの体力がなくなった場合 ($HP_P \leq 0$) はゲームオーバー状態となり、現在のゲームを終了するフローでゲームを続行するかどうかをプレイヤーに要求する。コンティニューすると選択した場合、更新されたパラメータに基づく新たなゲームが開始される。コンティニューしないと選択した場合、復習フェーズに移行する。なお、プレイヤー・敵の双方について体力が残っている場合、次に遷移するべきフェーズを判定する。現在のフェーズが攻撃フェーズ (P_A) の場合、守備フェーズ (P_D) に入り、そうでなければ攻撃フェーズ (P_A) に入る。さらに、特定の問題数を解答する必要があり、解答数を満たすと復習フェーズに移行する。

■ 復習フェーズ (P_R)

ゲーム終了後に復習フェーズに入る。復習フェーズでは、ゲーム中に不正解となった問題が表示され、プレイヤーはその問題を復習して解く。各復習問題には、対応する苦手操作パターンの解説が画面上部に表示される。

4. 評価実験

本研究では、提案システム CalcQuest の有効性とユーザビリティを評価するため、アンケート調査を実施した。珠算学習にゲーミフィケーションを取り入れることで、学習意欲が向上するか（有効性）と、システムの使いやすさ（ユーザビリティ）を検証する。本研究は奈良先端科学技術大学院大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を受けて実施した（承認番号：2022-I-63-1）。

4.1. 参加者

大阪府枚方市のそろばん教室に通う生徒 10 名を対象とし、1 年以上の経験者 8 名、1 年未満の経験者 2 名が含まれる。参加者の珠算・暗算の検定資格は異なり、全員が CalcQuest を初めて利用した。

4.2. 実験概要

本実験では、そろばん教室において提案システムを使用し、学習後にアンケートを実施した。以下の 3 条件を比較対象とした。

提案システムなし（通常授業）：従来のそろばん教室の授業をベースラインとし、提案システムの有効性およびユーザビリティを評価する。

提案システムのゲームありモード：ゲームシナリオおよびデザインを適用したシステムを使用する。ただし、本実験では苦手操作の検出や問題生成機能は搭載せず、ゲーミフィケーションの有効性とユーザビリティの評価に焦点を当てる。また、本研究では生徒のレベルに問わず、制限時間の秒数を 10 秒とする。

提案システムのゲームなしモード：提案システムを使用するが、ゲームシナリオやデザインは適用しない。

実験は以下の手順で実施した。

- 事前説明：実験の目的とシステムの使用方法を説明する。
- 提案システムの使用：各被験者は、ゲームありモードとゲームなしモードをそれぞれ 10 分間使用し、学習を行う。順序効果を防ぐため、モードの順番は被験者ごとにランダムに決定する。また、各モード終了後に 5 分間の休憩を設けた。本システムでは、計算問題の難易

度（桁数）を選択できるため、事前に難易度に関する質問を行い、被験者の熟練度に応じて適切な問題を出題した（例：3 桁 2 口の計算では 324+420）。

- アンケート調査：システムの有効性とユーザビリティに関するアンケートを実施した。システムの有効性に関するアンケートでは、2 つの形式の質問を行った。一つは、普段の授業、ゲームありモード、ゲームなしモードのそれぞれに対する個別の評価を 5 段階のリッカート尺度を用いたアンケートである。もう一つは、普段の授業、ゲームありモード、ゲームなしモードを比較してもらい順位を回答するランキング形式のアンケートである。ユーザビリティに関するアンケートについては、システムの使い勝手を評価するための質問票である System Usability Scale (SUS) [24] を平易な日本語に訳したもの用いた。さらに、提案システムの利点や欠点に関する自由記述欄を設けた。システムの有効性に関するアンケートの質問は図 9、ランキング形式のアンケートの質問は図 10、図 11、図 12、ユーザビリティに関するアンケートの質問は図 13 に示すとおりである。なお、Q1～Q24 に関しては具体的な選択肢の表現は異なっているが（例えば Q1 は「5. わかりやすい」～「1. わかりにくい」、Q2 は「5. 上手になった」～「1. 上手にならなかった」という選択肢）、いずれも「5」はポジティブ、「1」はネガティブな選択肢となっている。

また、実験にあたっては、安全性・円滑な実験実施のために、以下の条件を設定するとともに被験者に事前に説明を行った。

- 実験中に体調が悪くなったら、中断すること。
- 誤作動があった場合は、挙手して伝えること。
- プレイヤーの HP が 0 になった場合は、挙手して伝えること。
- カメラの画角内にそろばんの位置を収めること。
- そろばんの入力位置に手を覆い被せてはいけないこと。

5. 結果と考察

5.1. システムの有効性に関する結果（5 段階のリッカート尺度）

図 9 に示す、5 段階のリッカート尺度に基づくアンケート結果から、以下の 3 つの観点について分析・考察する。

そろばん教室の授業 (Q1～Q5)

そろばん教室の授業に関する質問では、授業はわかりやすく、そろばんが上手になると感じる回答が多いことがわかる。しかし、Q3、Q4、Q5 に関しては高い評価をしている回答が少ないことがわかる。また、Q1、Q4 では 2 と評

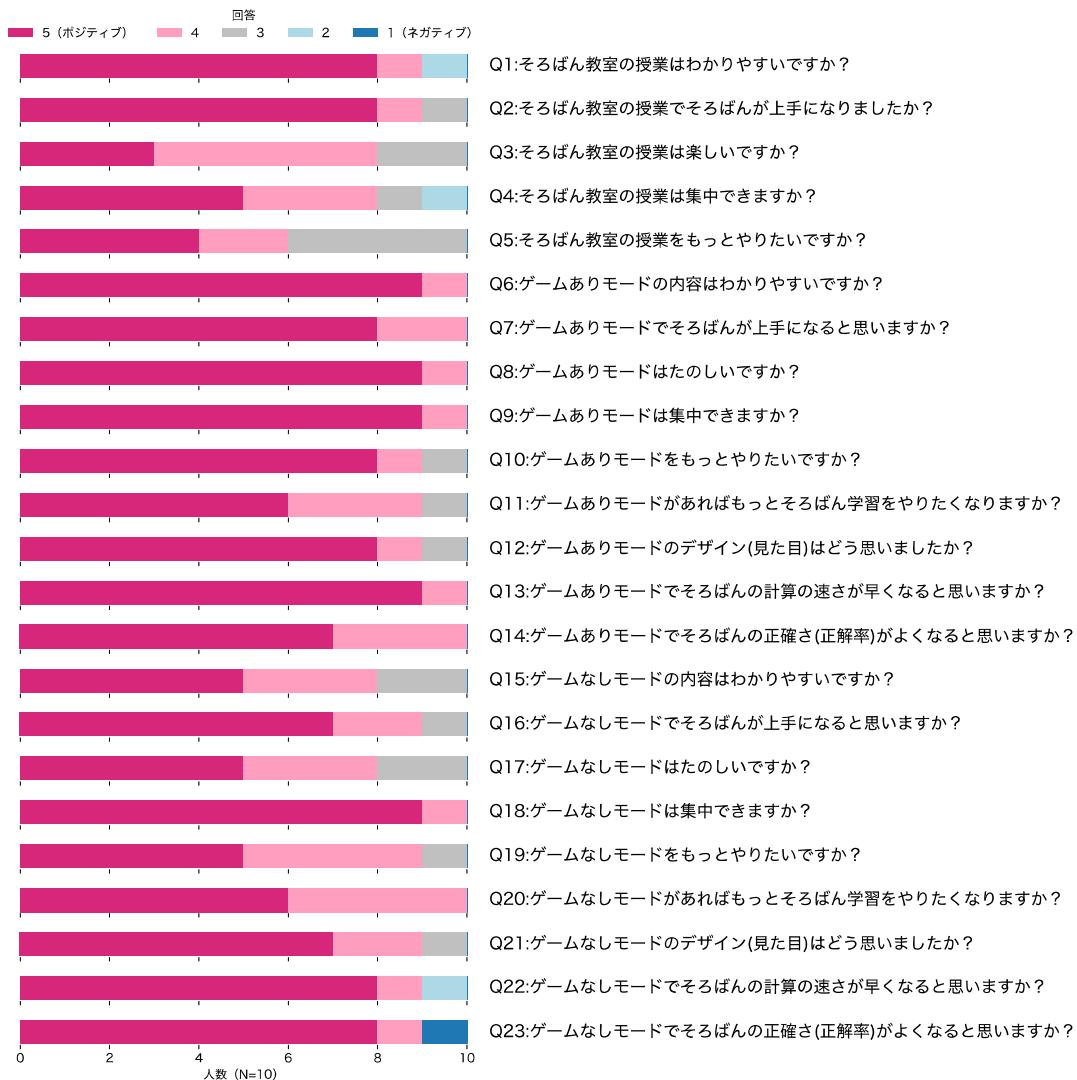


図 9 システムの有効性に関するアンケート結果

価しているネガティブな回答も見受けられる。この結果から、普段の珠算学習に対して、高いモチベーションを持っていない生徒がいることがわかる。

ゲームありモード (Q6～Q14)

ゲームありモードに関する質問では、全ての質問に対して2以下の回答が多く、全体的に高い評価をしている回答が多く見受けられた。特に、Q6, Q8, Q9, Q13の質問では、平均4.9と高い数値になっている。理由として、Q6, Q8に関しては、子どもでもわかりやすいようなゲームシナリオ設計が楽しさやわかりやすさに影響していると考えられる。Q9, Q13に関しては、制限時間機能により、集中力や速さが必要とされていたことが影響していると考えられる。

ゲームなしモード (Q15～Q23)

ゲームなしモードに関する質問では、ゲームありモードと比べて、高い評価をしている回答が少ないことが見受けられる。内容や楽しさ、モチベーションに対する回答が比

較的に高い評価をしている被験者が少ないことが確認できた。また、Q22, Q23に関しては、否定的な回答があることがわかる。この回答をした生徒のゲームありモードについての同様の質問 (Q13, Q14) では、いずれも5の評価をしている回答であることが確認できた。この結果から、制限時間機能が珠算能力の向上を促す可能性があると言える。

5.2. システムの有効性に関する結果 (ランキング形式)

図10, 図11, 図12に示す、ランキング形式のアンケート結果から、提案手法の有効性について分析・考察を行う。

まず、Q24(どれがいちばん上手になるとおもいますか?)という問い合わせについては、そろばん教室の授業が最も高い評価を得ることがわかった。そろばん教室の先生による指導は対人での直接的な指導が可能であるためこのように高い評価が得られたものと考えられる。これに対し、楽しさ (Q25) やモチベーション (Q26) に関する問い合わせに対しては、ゲーム

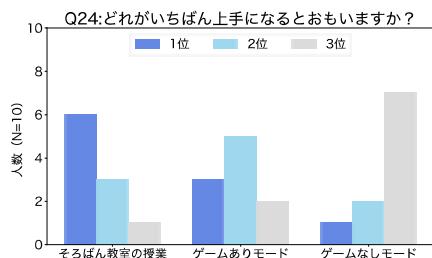


図 10 アンケート結果 (Q24)

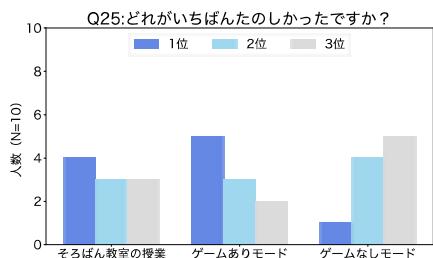


図 11 アンケート結果 (Q25)

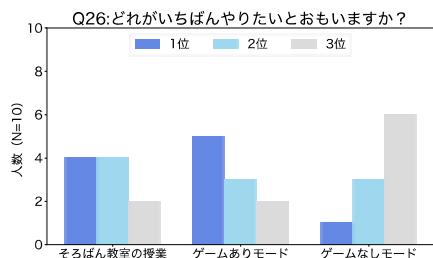


図 12 アンケート結果 (Q26)

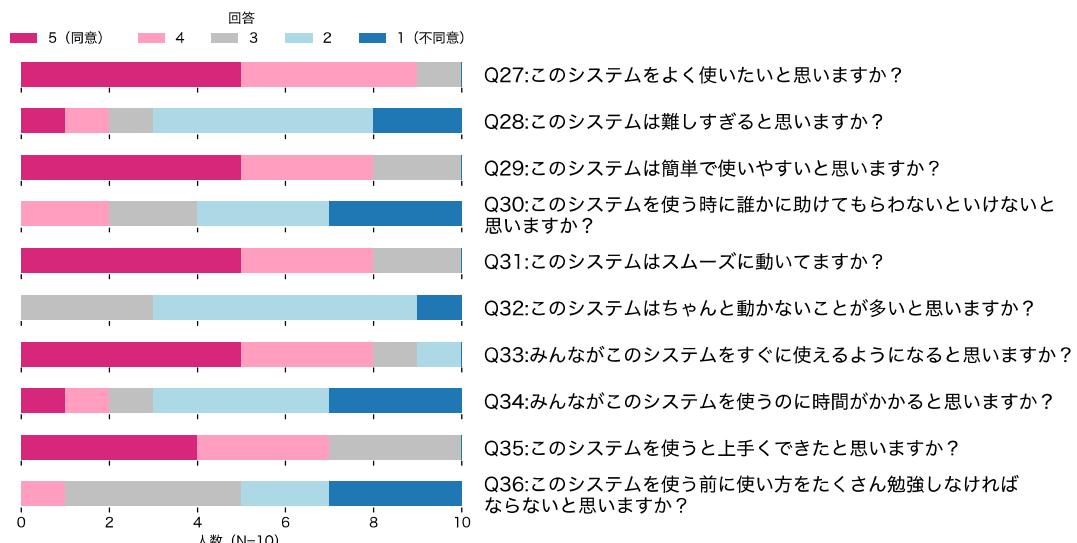


図 13 ユーザビリティに関するアンケート結果

ありモードを1位とした回答が最も多くなることがわかった。また、ゲームなしモードなどの質問でも3位の回答が多い結果となった。この結果から、CalcQuestは、そろばんの先生と比較すると珠算能力を向上するための機能改善の余地があるものの、珠算学習に対するモチベーションの向上に影響を与えることが確認できた。自由記述式の回答では、「ゲームありモードの制限時間により、計算を速く解かれないといけないからプラスで楽しくなる」「ゲームだから楽しく続けられる」「モンスターを倒すところが楽しかった」など好意的な感想が得られた。また、「ゲームなしモードでは計算のみに集中でき、自身のペースで進めれるところがいい」などの意見もあり、ゲーミフィケーションを取り入れないシステムでも肯定的な意見があった。一方、「ゲームありモードの制限時間が速い」などの指摘もあった。現在のシステムでは、事前に学習者の難易度に合わせた制限時間を算出するシステムが組み込まれていないため、今後改善する必要があると考えられる。

5.3. ユーザビリティに関する結果

ユーザビリティに関するアンケート結果を図13に示す。System Usability Scale (SUS)[24]に基づくアンケートの結

果からスコアを算出した結果、74.5となった。SUSの平均的なスコアは68とされており、平均値を超えるとユーザビリティが良いと判断される。このことから、提案システムのSUSは平均値を大幅に超えており、ユーザビリティについて高い評価を得たといえる。しかし、Q28、Q30、Q32、Q34、Q36において、少数はあるが否定的な意見も確認された。これらの原因としては、そろばんの位置をカメラの画角内に収めなければいけない点や、そろばんの入力位置に手を覆い被せてはならないといった、盤面認識を正確に行うためのシステム依存の制約が影響したと考えられる。また、実験中に特定の場所において光の反射などに起因する盤面認識が遅れが生じ、被験者が誤作動と捉える事象が発生していたことも否定的な意見の要因であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、長期の繰り返し学習が必要であった従来の珠算学習をICTによる効率化するとともに、必要な繰り返し学習や苦手操作の克服を楽しみながら行うことを実現するために、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」を提案した。そろばん教室に通う生徒

10名を対象とした提案システムの有効性、ユーザビリティについて評価した結果、珠算学習にゲーミフィケーションを取り入れることで、珠算学習に対するモチベーションの向上に繋がることが確認できた。また、ユーザビリティについても高い評価を得ることができた。一方で、主観的な学習効果という面においては対人での指導が可能なそろばん教室の方が依然として優位であることもわかった。今後は、学習効果の向上およびモチベーション向上を両立するシステムへと改良していくとともに、長期的な実験を通じて、苦手操作の効果的な改善や珠算能力の向上に提案手法がどの程度寄与するかについて詳細に検証する。

参考文献

- [1] Amaiwa, S. and Hatano, G.: Effects of Abacus Learning on 3rd-graders' Performance in Paper-and-Pencil Tests of Calculation, *Japanese Psychological Research*, Vol. 31, pp. 161–168 (online), 10.4992/psycholres1954.31.161 (1989).
- [2] Stigler, J. W.: "Mental abacus": The effect of abacus training on Chinese children's mental calculation, *Cognitive Psychology*, Vol. 16, No. 2, pp. 145–176 (online), 10.1016/0010-0285(84)90006-9 (1984).
- [3] Amaiwa, S.: 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).
- [4] Wang, C., Xu, T., Geng, F., Hu, Y., Wang, Y., Liu, H. and Chen, F.: Training on Abacus-Based Mental Calculation Enhances Visuospatial Working Memory in Children, *Journal of Neuroscience*, Vol. 39, No. 33, pp. 6439–6448 (online), 10.1523/JNEUROSCI.3195-18.2019 (2019).
- [5] Wang, C.: 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 (online), 10.3389/fnins.2020.00913 (2020).
- [6] Lu, Y., Li, M., Cui, Z., Wang, L., Hu, Y. and Zhou, X.: Transfer Effects of Abacus Training on Cognition, *Current Psychology*, Vol. 42, pp. 6271–6286 (online), 10.1007/s12144-021-01968-1 (2023).
- [7] Hu, Y., Geng, F., Tao, L., Hu, N., Du, F., Fu, K. and Chen, F.: Enhanced White Matter Tracts Integrity in Children With Abacus Training, *Human Brain Mapping*, Vol. 32, No. 1, pp. 10–21 (online), 10.1002/hbm.20996 (2011).
- [8] 原子弘務, 井上一磨, 謙訪貴大, 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).
- [9] 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).
- [10] 松田裕貴: 書画カメラを用いた珠算行動センシング, 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. 123, No. 31, pp. 70–75 (2023).
- [11] Matsuda, Y.: 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 (online), 10.60401/ijabc.2 (2024).
- [12] Matsuda, Y.: A Table-top Interface for Real-time Coaching in Abacus Learning, *The 10th International Conference on Smart Computing (SmartComp '24, Demo)*, pp. 243–245 (online), 10.1109/SMArtCOMP61445.2024.00056 (2024).
- [13] 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).
- [14] 小嶋泰造, 松田裕貴: 珠算学習における計算結果の逐次分析による苦手操作検出手法の提案, 社会情報学会関西支部研究会 (SSI), pp. 1–8 (2024).
- [15] 猪俣駿, 阿部亨, 菅沼拓夫: MR 技術を用いた珠算学習支援システムの提案, 情報処理学会第 86 回全国大会, pp. 461–462 (2024).
- [16] 北川珠莉, 鈴木優: 珠の位置認識と操作手順の重畠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).
- [17] 新川晃司, 川崎健志, 澤田一樹, 二石芳裕, 篠宗徳, 渡邊一衛: 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, Vol. 48, No. 1, pp. 75–79 (2011).
- [18] 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, Vol. 8, No. 3, pp. 653–654 (2009).
- [19] 株式会社 Digika: そろタッチ, <https://www.sorotouch.jp/>. (accessed 2023-08-24).
- [20] 沼口天, 松村敦: ゲーミフィケーションを利用した暗記学習支援システム, 情報処理学会研究報告, pp. 1–8 (2022).
- [21] 谷本嵩晃, 崔恩灝, 水野修: ゲーミフィケーションを用いた C 言語の文法やアルゴリズムの学習支援アプリケーション Code Quiz の提案, ソフトウェア工学フォーラム (FOSE2022), pp. 201–202 (2022).
- [22] 大濱慎太郎, 山田雄貴, 梅村祐輝, 小林舞衣, 佐藤史章, 野村悠哉, 橋俊宏: ゲーミフィケーションを活用した音楽学習アプリによる相対音感の向上, 情報処理学会第 86 回全国大会, pp. 899–900 (2024).
- [23] 鈴木健斗: SDGs ゲーミフィケーション教材のアプリケーション開発と操作性向上に関する研究, 日本教育工学会研究報告集, pp. 40–45 (2021).
- [24] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, *Usability Eval. Ind.*, Vol. 189, pp. 1–7 (1995).