



ピアノ演奏者の譜読み能力向上を目指した AR 学習支援手法の設計と実装

Design and Implementation of an AR-based Learning Support System to Improve Piano Sight-Reading Skills

和泉慶乃佑¹⁾, 菅沼拓夫^{1),2)}

Keinosuke Izumi, and Takuo Suganuma

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-3, izumi.keinosuke@dc.tohoku.ac.jp)

2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-3, suganuma@tohoku.ac.jp)

概要: 本研究では, AR 技術を用いたピアノ演奏学習支援システムを提案する. 従来のピアノロール型の演奏支援は, 視覚的に直感的である一方, 演奏者が受動的になりやすく, ピアノ演奏の能力向上にはつながりにくいという課題がある. そこで本研究では, 演奏者の譜読み能力向上に特に着目し, 演奏の習熟度に応じて AR 支援を段階的に減少させる手法を導入する. また, 本手法による学習効率の改善効果を比較実験により検証する. これにより, 演奏者の自立的学習と譜読み能力の向上を目指す. 本稿では, この設計思想に基づくシステムの概要と, その有効性を検証するための実験計画について述べる.

キーワード: 教育, ピアノ演奏技能, 譜読み, AR

1. はじめに

メタバースをはじめとする AR (Augmented Reality) や VR (Virtual Reality) の教育活動への活用が広がり, 様々な分野での技能学習支援への応用が進んでいる. 本研究では, その応用先としてピアノ演奏技能の学習支援に着目する. ピアノ学習の分野においても, AR 技術を用いた支援システムの構築はこれまで数多く試みられてきた [1]. AR による演奏支援は, 従来ディスプレイやプロジェクタによる情報提示が主流であったが, 近年は HMD (Head-Mounted Display) 等の装着型デバイスを活用する手法が研究されている [2].

ピアノ演奏は通常, 演奏者が楽譜から音符や記号を読み取り, それに対応する鍵盤の操作に変換し, 適切なタイミング・長さ・強弱で演奏するという, いわゆる「譜読み」と呼ばれるプロセスを伴う. この過程において, 多くの初級～中級レベルの学習者は, 楽譜上の音符を正しい鍵盤に素早く対応付ける「音符-鍵盤マッピング」でつまづきやすい. このスキルは流暢な演奏の基礎となるため, その定着を支援することは, 学習者が自立的かつ効率的に学習を進める上で重要である.

従来の AR によるピアノ演奏支援の多くは, ピアノロールのような視覚誘導によって, 楽譜を読めない初学者でも容易に演奏が可能となることを目指しているが, 演奏者がシステムに依存し, 譜読み能力などの演奏技能そのものの育成に繋がりにくいという課題があった. これらの支援は, 一時的に演奏を容易にする一方で, 基礎的なスキルの定着, 長期的な演奏能力の向上や, 支援なしでの新しい曲への挑戦意欲を妨げるなど, 教育上のリスクに繋がる.

そこで本研究では, ピアノ演奏技能の学習者の自立的な練習を促すことを目指し, AR を用いて, 特に音符-鍵盤マッピング能力に着目してこれを育成し, 譜読みの能力を中心にピアノ演奏の総合的なスキルを向上させることを目的とする. 具体的には, 学習者の習熟度に応じて AR による支援レベルを段階的に縮小する「フェーズアウト設計」を導入する. この手法により, 支援への依存を低減し, 学習者の自立的なスキル獲得を促す.

本稿では, この設計思想に基づく本システムの概要と, 基本設計・実装について述べる. また, その有効性を検証するための実験計画について述べる.

2. 関連研究と課題

2.1 AR ピアノ学習支援手法

AR を活用したピアノ演奏支援において, 主要な支援対象のうちの 1 つは楽譜から鍵盤への変換プロセスである. 多くの研究では, 楽譜の音符をウォーターフォール式のピアノロールに変換し, 楽譜を読めなくとも鍵盤位置や音の長さが視覚的に分かるように提示するアプローチが採用されている. この手法は, 初心者にとって直感的で分かりやすいという特徴を持ち, ゲーム感覚でピアノ演奏ができるようになるというメリットがある [2, 3].

一方で, ピアノロールのような抽象的な表現を用いず, 五線譜と実際の鍵盤の対応付けを直接的に支援する研究も存在する. Rigby ら [4] や竹川ら [5] は, AR 技術を用いて鍵盤上に音名を表示したり, 演奏された音符を五線譜上でハイライトしたりすることで, 学習者の五線譜への理解を促すシステムを開発している.

そのほか、指導者の手の動きを HMD で再現し、自主練習時や離れた場所でも確認できるようにする手法 [6, 7] や、演奏データを基に楽譜通りに演奏できているかを判定し、フィードバックを与える支援手法 [8, 4] も存在する。これらは主に正しい身体運動や演奏結果の修正を目的とするが、本研究では特に、楽譜から鍵盤への変換プロセスに着目する。

2.2 AR ピアノ学習支援の評価方法

前節で述べた既存研究においては、学習支援手法の効果について評価を行っているが、その評価指標には、演奏テスト、モチベーション維持、ユーザビリティなどがある。演奏テストは鍵盤押下のタイミングやミスタッチ数が評価され、モチベーションやユーザビリティはアンケートによって評価されることが多い。一方で、楽譜を読む力を測定する評価や、2 回以上にわたって長期的な効果を検証している研究は少ない。

2.3 既存研究の課題と本研究の位置づけ

既存研究では、初心者からの短期的な演奏学習の効果を示している一方で、学習者の長期的なピアノ演奏のための能力の獲得という観点からは、いくつかの教育的な課題も指摘されている。

多くの研究で採用されているピアノロール形式の演奏支援には、学習の観点からは根本的な課題があると考えられる。このアプローチは、鍵盤を直接指示するため、学習者自ら楽譜を読むという重要な学習機会を奪っている。その結果、ユーザーは「指示された鍵盤を弾く」ことには習熟しても、自ら楽譜を解釈し演奏に繋げる「音符-鍵盤マッピング能力」が全く育成されず、システムへの依存状態に陥るリスクが高い。Deja らのレビュー論文 [1] でも、専門家へのインタビューを通じて、ピアノロール形式の支援は学習者が答えをなぞるだけになり、「音符を読んで演奏する能力」の獲得にはつながりにくいと指摘されている。

この「支援への依存」という課題は、五線譜ベースの支援においても同様である。楽譜の学習機会は与えられているものの、学習者に常に正解（音名や対応関係）を提示し続ける「恒常的な支援」である点に課題がある。これにより、学習者は結局その視覚的なヒントに頼り続けてしまい、自らの力で音符-鍵盤を変換する能力を定着させることが困難になる。

これらの課題は、学習支援における教育的設計思想の欠如に起因するものと考えられる。学習支援は本来、学習者を助けるための一時的な足場（Scaffolding）として機能し、その能力向上に応じて段階的に縮小（フェーズアウト）されるべきである [9, 10]。この観点では、竹川ら [11] が視線追跡を用いてこの問題に取り組むなど、一部の先進的な試みはあるものの、多くの既存システムではこの「支援からの離脱」という重要な教育設計が十分に考慮されていない。

3. 提案手法

本研究では、楽譜と鍵盤のみを用いる従来の学習方法を補助する AR 支援システムを提案する。既存研究で主流の、

楽譜をピアノロール等に変換するアプローチとは異なり、五線譜そのものを活用する。本研究の最大の特徴は、先行研究にも見られる五線譜と鍵盤の位置関係を視覚的に結びつける手法を基礎としつつ、その支援を学習者の習熟度に応じて段階的に縮小していく「フェーズアウト設計」を取り入れる点にある。このアプローチは、単に答えを提示するのではなく、学習者自身が「音符-鍵盤マッピング能力」を育成・定着させるプロセスを設計するものである。これにより、学習者のシステムへの依存からの脱却を促し、最終的に新しい楽譜にも自力で対応できる汎用的な能力の獲得に貢献する、新たなアプローチとして位置づけられる。

本システムの基本的な支援インターフェースを、図 1 に示す。学習者には AR で楽譜が表示され、演奏すべき音符とそれに対応する鍵盤の位置が同時にハイライトされる。この鍵盤ハイライトにより、学習者は直感的に音符-鍵盤の対応を学習できる。

本提案の核となる「フェーズアウト設計」は、このハイライト表示を、学習者のパフォーマンスに応じて適応的に制御することで実現される。この適応的な制御の前提となる学習者の習熟度を測定するため、本システムでは、支援の提示と能力の測定を動的に切り替える。具体的には、まず各音符に対して、一定回数の練習ごとに一度、意図的にハイライトの提示を一時停止し、学習者が自力で演奏する際の反応時間を計測する。この反応時間を、その音符に対する学習者の習熟度の指標とする。この計測結果に応じて、その後の練習におけるハイライト支援の提示方法を段階的に変化させる。

例えば、計測した反応時間が遅く、まだ習熟度が低いと判定された音符に対しては、引き続き音符の表示と同時に鍵盤ハイライトを提示し、学習者の素早い理解を助ける。一方で、反応時間が閾値を下回り、一定のレベルまで習熟したと判定された音符に対しては、支援レベルを下げ、例えば音符表示の 1 秒後に提示するなど、ハイライトの提示を意図的に遅延させる。この「遅延提示」は、学習者にまず自らの力に対応する鍵盤を考える認知的な努力を促し、その直後に答え合わせとしてヒントを与えることで、より能動的な学習を促進する。このような適応的な支援の縮小プロセスを通じて、学習初期のつまづきを防ぎつつ、AR による



図 1: 鍵盤と楽譜のハイライトの例

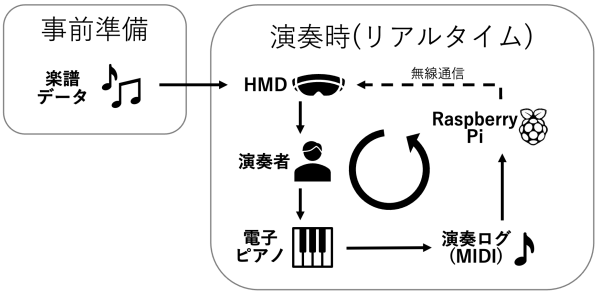


図 2: システム構成図

視覚的な学習支援への依存から脱却し、自立的な「音符・鍵盤マッピング能力」の獲得を促す。

本学習支援手法を実現するシステムの全体構成を、図 2 に示す。電子ピアノから MIDI を介して出力される演奏ログをリアルタイムで取得、解析し、上記の反応時間に基づいた習熟度判定を行う。その結果に応じて、HMD で支援表示を制御する。

本手法の最終的な目標は学習者の自立支援であり、新しい楽譜に取り組む際にも自力で効果的に練習を進められる能力の獲得に貢献することである。このような音符・鍵盤のマッピング能力の向上は、結果的に練習効率を高め、総合的な演奏能力の向上にも繋がると期待される。

4. 実装

3 章で提案した学習支援手法を実現するため、プロトタイプシステムの実装を進めている。本システムは、HMD として Apple Vision Pro、電子ピアノとして YAMAHA P-515B、そして両者間の通信を中継する小型 PC として Raspberry Pi を採用している(図 3)。

まず、練習に用いる楽譜の MIDI ファイルを、楽譜作成ソフトウェアの MuseScore や楽譜表示ライブラリの Verovio を用いて事前に処理し、AR 表示用の SVG 形式の楽譜データと、演奏情報を含む MusicXML 形式のデータを生成する。両データ間で音符 ID を対応付けることで、演奏と AR 表示の正確な同期を可能にする。

実際の演奏時には、まず Vision Pro がピアノに設置された AR マーカーを認識し、現実空間と AR 空間の座標系を一致させる(キャリブレーション、図 4)。これにより、AR



図 3: 主な使用機器: 電子ピアノ, HMD, 小型 PC

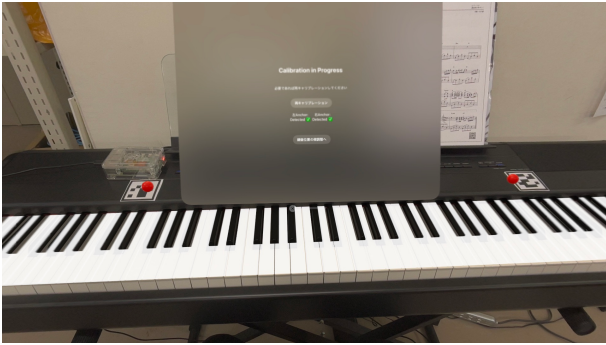


図 4: AR マーカーによるキャリブレーション

による仮想的なオブジェクトとして表示される五線譜や鍵盤のハイライトが、物理的なピアノ上の正しい位置に安定して表示される。演奏が始まると、電子ピアノから出力された MIDI 信号は、USB 接続された小型 PC に送られる。小型 PC は受信した MIDI 情報を UDP ソケット通信を介して HMD へリアルタイムに無線送信する。

「フェーズアウト設計」のロジックは、HMD 上で実行される。転送された MIDI 信号のタイムスタンプを基に、各音符の演奏反応時間をリアルタイムで計測し、学習者の習熟度を判定する。この判定結果に応じて、AR で表示されるハイライト支援のレベルを適応的に制御する。このように、本実装では、外部の MIDI 機器と連携し、リアルタイムのパフォーマンスデータに基づいて AR 表示を動的に変化させることで、提案手法を実現している。

5. 実験・評価

2 章で述べたように、本研究が目指す「音符・鍵盤マッピング能力」の向上や、それに伴う学習の自立は、単純なスキル獲得に留まらない複合的なプロセスである。そのため、その効果は短期間の成績変化のみでは測ることが困難である。

そこで本研究では、提案手法の有効性を多角的に検証するため、2 段階の実験を計画する。実験 1 では、提案手法の核心である段階的支援の短期的な学習効果を検証する。続く実験 2 では、より重要な目的として、数日間にわたる継続的な練習を通じて、提案手法が学習者の「自立した学習能力」をいかに促進するかを評価する。

5.1 実験 1: 段階的支援の短期的効果検証

5.1.1 目的と実験計画

本実験の目的は、短時間の反復練習において、提案手法の核心である「段階的支援」が音符・鍵盤マッピングスキルの獲得を効率的に促進するかを検証することである。被験者を以下の 3 群に分ける被験者間比較を行う。

- 提案群 (段階的支援群) : 学習の進行に応じて AR 支援を段階的に縮小する。
- 比較群 1 (恒常支援群) : 練習中、常に AR 支援を表示する。
- 比較群 2 (支援なし群) : AR 支援を一切表示しない。

教材にはランダムな五線譜単音列を用いる。プレテスト、各条件下での練習、ポストテストを実施する。

5.1.2 評価方法

学習効果は、プレテストからポストテストへの成績改善量として評価する。客観的指標として、MIDI データから算出される正答率 (Accuracy) と反応時間 (Reaction Time) の改善幅を用いる。また、主観的指標として、Intrinsic Motivation Inventory (IMI), System Usability Scale (SUS), NASA-Task Load Index (NASA-TLX) を測定する。

5.2 実験 2: 自立した学習能力の向上検証

5.2.1 目的と実験計画

本実験の目的は、提案手法が、支援のない環境での「自立した練習効率」をいかに高めるかを検証することである。実験は 3~5 日間にわたり、被験者を以下の 2 群で比較する。

- **提案群 (段階的支援群)**: 練習曲 A を、段階的に縮小される AR 支援を用いて練習する。
- **比較群 (恒常支援群)**: 練習曲 A を、常に表示される AR 支援を用いて練習する。

評価は最終日に行う。まず、両群とも支援なしの条件で新曲 B の冒頭部分 (例: 1~2 小節) を演奏するプレテストを実施する。次に、支援なしで新曲 B を一定時間自由に練習してもらい、その後、再度支援なしで新曲 B 全体を演奏するポストテストを実施する。

5.2.2 評価方法

本実験では、学習の自立を測るため、プレテストとポストテストの成績を比較する。プレテストからポストテストへの成績改善量 (ポストテストの Accuracy - プレテストの Accuracy) を評価する。これは、支援がない環境で自力で練習し、どの程度までその曲を弾けるようになったかを示す指標となる。

この指標において提案群が比較群を有意に上回る結果が得られた場合、本手法が学習者の自立的な学習能力の育成に有効であることを示唆する。また、実験終了後には実験 1 で述べた各種主観評価アンケートも併せて実施する。

6. むすび

本稿では、ピアノ学習者の自立的なスキル獲得を最終目標とし、従来の AR 支援におけるシステム依存の課題を解決するため、習熟度に応じて支援を段階的に縮小する「フェーズアウト設計」を導入したピアノ練習支援システムを提案した。また、その設計思想を反映したプロトタイプシステムの実装方針と、提案手法の有効性を多角的に検証するための 2 段階の実験計画・評価について述べた。

今後は、プロトタイプの実装を完了し、計画した実験を実施して、提案手法が、単なる一時的な演奏補助に留まらず、学習者の長期的な能力向上や自立的な学習能力の育成に貢献することを実証するとともに、より効果的な支援の縮小方法についても検討を進める。

参考文献

- [1] Jordan Aiko Deja, Sven Mayer, Klen Čopić Pucihar, and Matjaž Kljun. A survey of augmented piano prototypes: Has augmentation improved learning experiences? *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 6, No. ISS, November 2022.
- [2] Jonathan Chow, Haoyang Feng, Robert Amor, and Burkhard C. Wünsche. Music education using augmented reality with a head mounted display. In *Proceedings of the Fourteenth Australasian User Interface Conference - Volume 139*, AUIC '13, p. 73–79, AUS, 2013. Australian Computer Society, Inc.
- [3] Dominik Lange-Nawka, Burkhard C. Wünsche, and Samuel E. R. Thompson. Auditory temporal hints in ar piano tutoring. In *2023 38th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, pp. 1–6, 2023.
- [4] Liam Rigby, Burkhard C Wünsche, and Alex Shaw. piano-an augmented reality piano tutor. In *Proceedings of the 32nd Australian Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 481–491, 2020.
- [5] 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦ほか. リズム学習を考慮したピアノ演奏学習支援システムの設計と実装. *情報処理学会論文誌*, Vol. 54, No. 4, pp. 1383–1392, 2013.
- [6] Ruofan Liu and et al. Pianosyncar: Enhancing piano learning through visualizing synchronized hand pose discrepancies in augmented reality. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 859–868. IEEE, 2023.
- [7] Katerina Labrou, Cagri Hakan Zaman, Arda Turkyasar, and Randall Davis. Following the master's hands: Capturing piano performances for mixed reality piano learning applications. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [8] 上田健太郎, 竹川佳成, 平田圭二. ピアノ練習状況の可視化および気づきのアノテーション機能を持つ学習支援システムの設計と実装. *情報処理学会論文誌*, Vol. 57, No. 12, pp. 2617–2625, 12 2016.
- [9] David Wood, Jerome S Bruner, and Gail Ross. The role of tutoring in problem solving. *Journal of child psychology and psychiatry*, Vol. 17, No. 2, pp. 89–100, 1976.
- [10] Slava Kalyuga, Paul Ayres, Paul Chandler, and John Sweller. The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, Vol. 38, No. 1, pp. 23–31, 2003.
- [11] 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦. ピアノ演奏補助情報からの独立を促す学習支援システムの構築. *研究報告音楽情報科学 (MUS)*, Vol. 2012, No. 15, pp. 1–6, 8 2012.