

演奏箇所の任意ジャンプを許容するピアノ練習支援の検討

堀 松仁^{1,a)} Christoph M. Wilk^{1,b)} 嵯峨山 茂樹^{1,c)}

概要: 本研究では、ピアノ練習において想定される部分的弾き直しや弾き飛ばし等の演奏位置跳躍を許容した練習支援手法について検討を行う。ピアノ練習の過程を、音符レベル・アーティキュレーションレベル・表現レベル・独創性レベルの4段階に分け、各段階で必要とされる情報の簡潔かつ有用な提示方法を議論する。そして、段階毎に必要と考えられる演奏誤り・演奏跳躍位置・テンポ・音量・音の重なり・模範演奏との比較の表示を行う。また、部分的弾き直しなどの演奏位置の跳躍は、ピアノ練習においてほぼ必ず生じるものであり、演奏支援も演奏位置を随時追跡しながら情報取得する必要がある。ピアノ演奏をHMMでモデル化し、高速化したViterbiアルゴリズムを用いることで、演奏位置の実時間追跡を行いながら、練習支援のための情報を保存するシステムを目指す。本研究では、この支援の際に表示する表示項目と演奏位置の跳躍を許す機能に関して主観評価実験を行った。実験参加者の評価と自由意見から、本研究で議論した方法は有用であるとする結果が得られた。

Toward Piano Practice Support Allowing Arbitrary Intra-Performance Repeats and Skips

Abstract: In this paper, we present a piano practice support method allowing arbitrary jumps during practice performances, such as repeating sections after making mistakes or skipping easy parts. We divide the process of piano practice into the four stages of note correctness, articulation, expressiveness and originality, and discuss which information is useful for practice support at each stage. This information includes performance errors, performance jumps, tempo, dynamics, the overlap of consecutive notes, and comparison with an exemplary performance of a piano teacher. We implemented visualizations to display this information after practice sessions. Since repeats and skips of sections often occur during practice, the capability of a practice support system to follow such jumps in the performance greatly improves its usefulness. Therefore, our performance keeps track of the users performance position by modeling the piano performance with a hidden Markov model and using a high speed Viterbi algorithm for performance position estimation. We conducted an experiment, in which participants used and subjectively evaluated our piano practice support system. The feedback obtained from the experiment confirm that our method is useful.

1. はじめに

ピアノ練習の形態には様々なものがある。例えば、個人レッスンや大学の授業などでのグループレッスン、オンラインスクール等である。これらの練習形態は基本的に指導者がその場で、指導を行いながら練習者は練習を行っている。しかし、ピアノ練習は指導者がいる時間よりも、個人で練習する時間が圧倒的に多くなる。

保育士・幼稚園教諭養成校でのピアノ授業では生徒複数

人に対して、指導者が一人といった集団授業の形を取るケースも見られる。このような場合、授業時間内で全ての生徒にしっかりとした指導を行うことは難しく、基本的に全体的な指導を行った後、個人的に少しずつ対応する形で行われる。一人一人の練習時間が十分では無いケースも多くあり、そのような場合個人練習にも大きな影響が出る。理解度が不十分であると、個人練習の効率が落ちる。

このような環境において、もし練習者が個人練習を行う際に指導者の代わりとなるような支援システムがあれば、個人練習の助けとなり効率化を図れるであろう。

このような支援システムは従来より研究がなされてきた。演奏内容をフィードバックする手法の一つとして演奏見える化ツールがある[1]。これは練習者の演奏データとそ

¹ 明治大学 大学院 先端数理科学研究科
〒164-8525 東京都中野区 4-21-1

a) cs172015@meiji.ac.jp

b) wilk@meiji.ac.jp

c) sagayama@meiji.ac.jp

の練習者の指導者の演奏データのテンポ・リズム・音長・音量を可視化するツールである。そして、このツールを用いてピアノグループレッスンの演奏データを分析し、教師の模範的な演奏データと生徒の練習の演奏データを比較することの有用性を示している [2]。この研究は実技指導の現場において前週のフィードバックを与え、演奏改善を目指す実践 [3] や複数の現場でフィードバックを実践する取り組みも行っている。

この他にも支援システムは様々な背景を基に研究されている。特に、演奏データから得た特徴量を用いて支援するシステムが多くある。例えば、上田らは、MIDI キーボードからの演奏入力から情報を取得し、練習者の演奏誤りおよびテンポの変化を楽譜に提示するシステムを開発した [4]。さらに、福田らは、楽譜上の苦手箇所を単純化する方法を提案した [5]。G.Werner らは、音高や和音等演奏情報の新たな表示方法を提案している [6]。その他、演奏データから取得した特徴量を用いて支援を行うシステムはいくつもある [7][8][9][10]。また、これらの手法に対して、視覚情報等を用いた演奏支援の研究もなされている。竹川らは、運指情報を視覚センサで捉え演奏者にフィードバックを行うシステムを提案した [11]。また、それに対して運指情報ではあるが、視覚情報ではなく触覚情報から情報を得てフィードバックするシステムも近年提案された [12]。

ピアノ練習支援は従来様々な手法によって行われてきた。しかし、その中の演奏データから取得した特徴量を用いて行う手法は、基本的に1曲を通して練習者に弾いてもらい、その後フィードバック等を提示する手法がほとんどである。しかし、ピアノ練習中は、演奏誤りなどの理由での弾き直しや、部分的な集中練習のために同じ箇所を何度も弾き直すといった、演奏位置の跳躍が見られる。従来研究では、そのような跳躍には対応していない。多くの場合、弾き直しを行うと演奏誤りとして捉えている。そこで、本研究ではそのような演奏位置の跳躍を許容し、位置が跳躍した後も継続して情報を取得し、支援することを目的とした。

また、支援方法として演奏終了後に演奏情報の提示を行う。提示内容は、演奏誤り・演奏位置跳躍情報・テンポ・音量・模範演奏との比較、そして従来あまり着目されなかった音の重なりを加えた6項目である。隣接する入力音の重なりは、アーティキュレーションの一部であるレガートやスタッカート等の奏法を評価するために重要な指標となる。

2. ピアノ練習支援

本章では、ピアノ練習における練習段階の段階分けと、それぞれの段階目標を達成するために必要な情報を考察し、支援方法を提案する。

2.1 練習段階

ピアノの練習方法は様々であり、一人一人異なる進度で

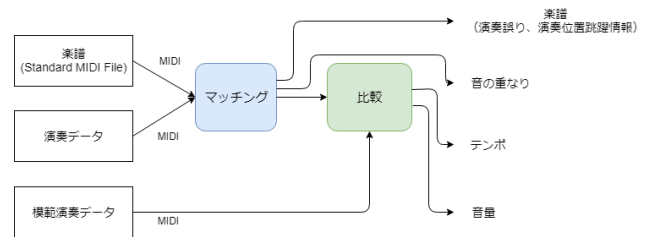


図 1 ピアノ練習支援システム構成

Fig. 1 Structure of the piano practice support system.

練習を行う。その中でも大まかに、練習を段階分け可能と考え、本研究では練習目標を基に、4つの段階に分けることとした。また、この段階目標を達成するためには、各目標の達成度を確認できる情報が必要であると考えた。その段階分けと必要情報を表1に示す。この段階分けは決して、段階ごとの目標を到達してからでない次の段階に進めないといった分割ではなく、練習中は様々な目標が絡み合う。例えば、第1段階の音高を誤らないように意識しながら、正しいアーティキュレーションを目指す事も大いに在り得る。しかし、前段階の目標に十分に到達できていないと、次段階の達成には至らないような指標である。

ピアノ練習時は、誤った箇所を弾き直したり、簡単な部分を飛ばして時間を節約することがある。しかし、従来のピアノ練習支援システムのほとんどは、ユーザが最初から最後まで途切れることなく曲を演奏すると仮定しているため、柔軟な演奏位置の跳躍に対応することはできない。そのため、本論文で提案するピアノ運動支援システムでは、演奏ミスやジャンプが楽譜の上に表示されている。ここで言及されているパフォーマンスジャンプは、その部分の中の異なる場所へのジャンプと同様に、再試行（例えば、フレーズの繰り返し）に応答するシステムの能力を指す。これはまた、例えば、しばらく自由に練習した後に複数の再試行によって示される作品の困難な部分を分析することを可能にする。すべてのパフォーマンスミスやジャンプに関する情報は1回のエクササイズを通して保存されますが、練習中に曲の一部が繰り返された場合、テンポなどのパフォーマンス機能は最新のリトライに更新されます。

演奏ミスやジャンプに関する情報を抽出するために、システムはSMF（標準MIDIファイル）フォーマットの楽譜情報とMIDIキーボードから得られる演奏データとの間のマッチングを実行する。教師のパフォーマンス機能との比較のために、教師と生徒のパフォーマンス機能の違いをグラフで自動的に表示するために、彼のパフォーマンスは事前に記録され、保存されています。図1はシステム構成を示しています。

2.2 演奏位置追跡

演奏位置の追跡は、HMMを用いて演奏中の音符位置から他の全ての音符位置への移動に対し遷移確率を付与す

表 1 各練習段階における目標
Table 1 Goals at each practice level

	段階目標	必要情報
第 1 段階	1 曲を通して誤りの無い演奏	演奏誤り, 演奏跳躍位置, 運指情報
第 2 段階	音の粒が揃っている演奏	テンポ, 音量, アーティキュレーション, 音長
第 3 段階	模範演奏を再現する演奏	模範演奏との比較情報
第 4 段階	高い音楽性の独創的演奏	

ることで実現する。Viterbi アルゴリズムによるマッチングをリアルタイムに行い、情報表示を演奏終了後すぐ行える事が理想であるが、全ての音符位置についての遷移確率の計算量は膨大であり、リアルタイムでの計算は困難である。そこで、我々が開発したピアノ演奏追跡 HMM の高速 Viterbi アルゴリズム [13] を用いることでこの問題を解決した。

楽譜内の現在位置推定は、最尤の音符を探索することで行われる。\$N\$ を楽譜内の音符の総数とすると、打鍵入力ごとの観測値ベクトル \$x_t\$ に対して Viterbi アルゴリズムを進めるには、すべての状態 \$j\$ (\$j = 1, \dots, N\$) ごとに状態出力確率 \$b_j(x_t)\$ に基づいてあらゆる状態 \$i\$ からの遷移を比較して尤度最大の遷移を選択し、状態尤度 \$P_j\$ を更新しなければならないので、

$$P_j = b_j(x_t) \cdot \max_{i \in \text{all}} a_{ij} P_i, \quad j = 1, \dots, N \quad (1)$$

である。しかし、あらゆる \$i, j\$ の組み合わせに関して尤度最大の現在位置 \$j\$ を求めるには、計算量は \$O(N^2)\$ となり、\$N\$ が大きいと計算量が膨大になる可能性がある。

そこで、現在の音符位置から移動先の音符位置の距離に従って以下のような 3 つの遷移タイプを考える。

- \$\alpha\$ 遷移 - 楽譜通り次の音符に進む遷移
- \$\beta\$ 遷移 - 一定距離 \$m\$ 以内の音符に移る遷移
- \$\gamma\$ 遷移 - 遷移以上の距離の遷移

もし全ての \$\gamma\$-遷移の遷移確率を小さい一定値 \$\gamma\$ と仮定すると、次のように計算量を大幅に削減することができる。\$\alpha_{ij}, \beta_{ij}\$ は、\$\alpha\$-, \$\beta\$- 遷移における状態 \$i\$ から状態 \$j\$ までの遷移確率を表し、\$\alpha > \beta > \gamma\$ と仮定すると、

$$P_j = b_j(x_t) \cdot \max \begin{cases} \alpha_{j-1,j} P_{j-1}, \\ \max_{i=j-2, \dots, j-m} \beta_{ij} P_i, \\ \gamma \max_{i=1, \dots, N} P_i \end{cases} \quad (2)$$

となり、\$\max_{i=1, \dots, N} P_i\$ は現在位置の尤度として常に得られているので、計算量は \$O(N)\$ にまで削減できる。

2.3 演奏誤り検出

本研究では、演奏誤りを以下の 3 つに分類する。

- 音高誤り - 楽譜上の音符とは違う音を弾く誤り
- 付加音 - 楽譜上にはない音を演奏する誤り

- 脱落音 - 楽譜上にある音を演奏しない誤り

ここで、これらの誤りの抽出を行うために、楽譜 MIDI と演奏 MIDI 間の 2 段階マッチングを行う。

1 段階目は、和音レベルでのマッチングを行う。このマッチングを行うことにより、和音単位で間違っただけの挿入や脱落が無いかの検出を行う。このマッチングは 2.2 の演奏位置追跡の HMM を用いて行う。

次に和音内のマッチングを行う。演奏譜上の正解和音内音列を \$M = \{m_1, m_2, \dots, m_I\}\$、観測された和音内音列を \$O = \{o_1, o_2, \dots, o_J\}\$ とすると、まず、二つの音列を音高の高さが低い順にソートする。ソート後の正解和音音列は \$M' = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_I\}\$、観測和音音列は \$O' = \{o'_1, o'_2, \dots, o'_J\}\$ となる。ここで \$I\$ と \$J\$ はそれぞれ正解和音と観測和音の和音内の音の数である。マッチングを行う際に次の 3 つのパターンに分割して考える。

- \$I = J\$ (正解和音音列と観測和音音列の長さが同じ)
- \$I > J\$ (正解和音音列に比べ観測和音音列が短い)
- \$I < J\$ (正解和音音列に比べ観測和音音列が長い)

まず、\$I = J\$ について考える。この場合、和音内の音数は同じなので、任意の \$k\$ に対して \$m'_k\$ と \$o'_k\$ それぞれの音高を比較するだけである。音高が違う場合、全て音高誤りとして扱う。

次に、\$I > J\$ について考える。この時は、正解和音内音が多いので、考えられる演奏誤りは音高誤りと脱落音である。\$m'_i\$ と \$o'_j\$ (ここで、\$1 \le i \le I, 1 \le j \le J\$) の音高の差分を全て比較し、マッチングを行う。マッチングしたペアは音高を比較し、異なる場合は音高誤りとして扱う。残りの観測和音内音列とペアにならなかった正解音は全て脱落音として扱う。

最後に、\$I < J\$ を考える。この場合、観測和音音列が多いので、考えられる演奏誤りは音高誤りと付加音である。\$I > J\$ の場合と同様に、各音同士でマッチングを行い、ペアにならなかった 2 つは音高を比較し、音高誤りを検出する。ペアにならなかった残りの観測音は、全て付加音として扱う。演奏誤りと演奏位置跳躍情報の表示例を図 2 に示す。

2.4 演奏特徴量表示

テンポと音量の局所的な、またゆるやかな変化の表示は、演奏表現の確認に大きな役割を果たす。しかし、テンポと



図 2 演奏誤りと演奏跳躍位置表示例

赤：音高誤り（この時、本来弾かれるべき音符は灰色） 青：付加音 黄：脱落音

Fig. 2 Visualization of performance mistakes. Red notes indicate pitch errors, where the missed correct notes are displayed in light grey. Completely missing notes are shown in yellow and extra notes in blue.

音量だけでは表現できない演奏表現もある。例えば、レガート奏法は、演奏時に音を滑らかに重ねる必要がある。テンポと音量のみの情報を使用してのレガート奏法を評価することは困難である。テンポと音量が教師の演奏に似ている場合でも、隣り合う音が綺麗に重なっていない可能性があるからである。したがって、本研究では、レガート奏法等を評価するためにテンポ、音量に音の重なりを加えた3つの演奏特徴量表示を行う。

また、従来研究では音量やテンポは1音毎に表示されてきた。瞬間的な音量やテンポの変化は分かりやすいが、教師の演奏と比較して自分の演奏の抑揚や動きをどのように変化させるべきかは一音毎の単純な提示では分かりにくい。そこで、我々は音量やテンポの加速度を計算し比較することで抑揚や動きを付ける部分を可視化し直観的に理解できるようにした。

2.4.1 テンポ表示

演奏中のテンポはイベントごとに推定される。式3に示すように音価とIOIの比によって計算される値を局所テンポとし、式4のように前4つの局所テンポを平均した値をイベント毎のテンポとする。

$$v_i = \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

$$\hat{v}_M = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K v_k \quad (4)$$

相対的なテンポの変化は人間の感覚で捉えられる[14]ので、対数スケールに変換し最終的なテンポとして扱う。 t 番目のイベントテンポの加速度 a_t の計算は t 番目を含めその後の N 個の局所テンポの値の近似直線を最小二乗法により行い、その近似直線の傾きを加速度 a_t とする。計算式を式5に示す。

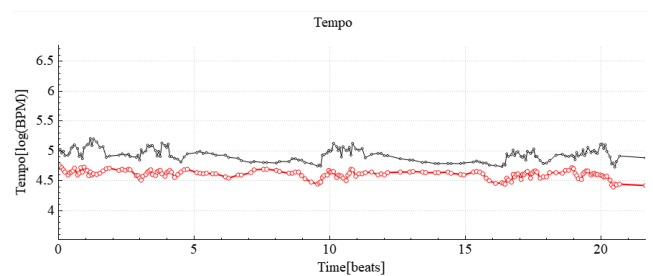


図 3 テンポ表示例 黒：指導者 赤：練習者

Fig. 3 The tempo of the teacher's (black) and student's (red) performances.

$$a_t = \frac{N \sum_{t-N}^t xy - \sum_{t-N}^t x \sum_{t-N}^t y}{N \sum_{t-N}^t x^2 - \left(\sum_{t-N}^t x \right)^2} \quad (5)$$

加速度の差分は、その傾きの差分で計算するため、模範演奏のテンポの傾きを a_{t_E} と練習者の傾きを a_{t_P} とすると以下の式で求まる。

$$\Delta a_t = a_{t_E} - a_{t_P} \quad (6)$$

この加速度の差分の表示例を図4に示す。ここで正の値が表示されている場合、練習者はその箇所演奏の加速度を上げる必要があり、負の値が表示されている場合、反対に加速度を下げる必要がある。横軸はイベント数であり、イベント毎の音価の比により横幅は決定している。

2.4.2 音量表示

各イベントの音量は、各イベントの入力MIDIからMIDI音量の形式で取得する。テンポ加速度の計算と同様に、 N 個の連続したイベントの直線近似線を用いて局所的変化を求める。練習者への表示はテンポと同様に、各イベントの音量の絶対値と模範演奏との音量の変化の差 Δb_t を表示する。

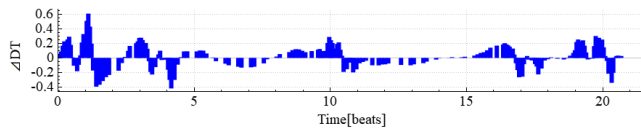


図 4 指導者と練習者のテンポ変化パターンの差分例

Fig. 4 Difference in tempo change patterns between teacher and student.

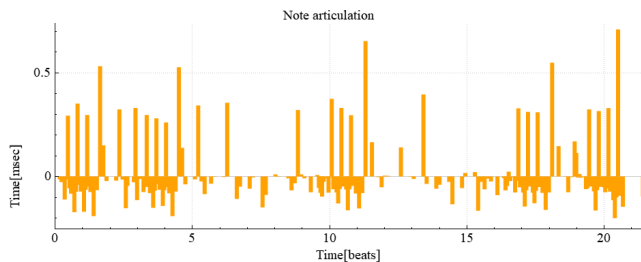


図 5 音の重なり表示例

正：音の間隔 負；音の重なり時間

Fig. 5 The overlap of consecutive notes.

Positive : During staccato Negative : Overlap

2.4.3 音の重なり表示

作曲家は楽譜に様々な調音記号を付けて、演奏者に演奏方法を伝える。頻繁に使用されるアーティキュレーションはレガートで、連続した音をスムーズに重ねて演奏し、逆にスタッカートはある一定間隔で音を切りながら演奏する。演奏者が演奏練習中に楽譜表記をどの程度よく演奏上で表現できているかを評価するために、連続して演奏された音の重なりを表示する。重なり具合を表示する際に、演奏は基本音と音は重ねて演奏されないの、離れている時間を正の方向、重なっている時間を負の方向へ表示する。繋がったレガート演奏の場合、音は重なり合っており、それは例図5のようにグラフの負の方向に現れる。一方、正の方向への表示は、スタッカートが正しく表現されているかどうかを判断するのに役立つ。

3. 評価実験

本研究で提案したピアノ練習支援の各表示と演奏位置跳躍への対応が、有用であるかを主観評価実験にて確かめた。

3.1 主観評価実験概要

主観評価実験にて以下の項目について5段階評価で有用性を確かめる。ここでの評価はシステムの機能性ではなく、表示機能自体が練習効率化に有用であるかどうかの評価である。例えば、システムの操作性に不便性が感じられたとしても、今回の評価対象ではない。そのような意見は自由記載欄に記入してもらうようにした。

- 演奏位置跳躍対応機能
- 楽譜表示機能

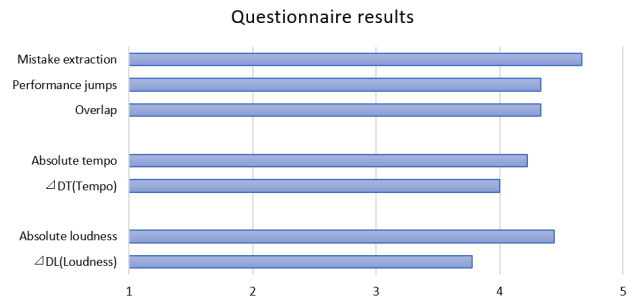


図 6 主観評価平均結果

Fig. 6 Average results of the evaluation questionnaire.

- テンポ絶対値表示
- 模範演奏とのテンポ比較
- 音量絶対値表示
- 模範演奏との音量比較
- 音の重なり表示

評価の段階は「有用である」を5とし、「有用でない」を1とした。実験参加者は20代の男女9名と指導者1人で、ピアノ練習経験の差は様々（初心者から10年以上のピアノ経験者まで）である。まず、模範演奏として事前に、個人でピアノ指導を行っている指導者の方の演奏を録音し、比較用にデータも保存した。実験は参加者1人につき1時間とした。まず、最初15分間で実験の説明、システムの操作方法の説明、模範演奏の試聴を行った。次の25分間で、自由にピアノ練習を行ってもらった。ここで自由な練習とは、1曲を練習するにあたり、どの部分で弾き直したり、弾き飛ばしてもよいという事である。そして、最後の20分間で、評価用のアンケート用紙に記入を行ってもらった。アンケートには上記各項目について5段階評価と、自由記述で記入するようにした。また、模範演奏は練習中でのタイミングで聞き直しても良いこととした。実験での使用楽曲はJ. BurgmüllerのL'arabesque Op.100-2である。

3.2 実験結果

アンケート結果の9人の平均値を図6に示す。最も高い評価は楽譜への演奏誤り表示で評価値4.67であり、逆に、最も低い評価は音量の模範演奏との比較で評価値3.78であった。

まず、主観評価にて演奏誤りの表示が最も評価が高かった理由として、ピアノ経験の幅に関わらず誤りを確認できるのは良いという意見が多数あったことから、全体的に高い評価に繋がったと考えられる。また、練習終了後行ったヒアリング調査の結果、演奏中の誤りを全て思い出せる人は多くなかったことから、有用であると考えられる。

反対に、音量の模範演奏との比較が最も低かった理由は、“そもそも音量を模範演奏に近づける必要は無いのではないか”という意見があったことから、まず音量は演奏時にそれほど意識されない要素である事が大きな要因の一つで

あると考えられる。ただ、他の意見の中に“音量の揺れ等は指導者によって差が大きいので、好きな演奏に近づける時に便利そう”といった意見もあったため、使用用途の検討が今後の課題として挙げられる。また、本実験では音量の変化を直線近似する際に、5点程度の変化でしか近似を行っていないのでその幅を広げ、もっと全体的な音量変化の流れを模範演奏と比較できると、有用性も変化する可能性があるかもしれないので、様々な条件の下でのシステムの評価が今後必要になると考えられる。

本研究の特徴である演奏位置跳躍への対応は、評価値4.3と高評価であった。上でも述べたようにピアノ経験の量に関わらず演奏誤りは生じ、ほとんどの確率で弾き直しを行っている様子が見受けられたため、練習中に起きる弾き直しに対応したシステムは有用であるという評価に繋がったと考えられる。意見の中には“データを取るシステムだと間違えずに通して弾かなければというプレッシャーがあるが、弾き直しに対応しているとそれが無くて良い”というものがあつた。

従来の他の支援システムでは多く扱われていない音の重なるの表示も評価値4.3と評価は高かった。普段は意識的に練習できていないレガートやスタッカート演奏を意識できるようになり、可視化されるので練習にも役立つ等の観点から高評価になったと考えられる。

4. 結論

本稿では、演奏位置跳躍を許容するピアノ練習支援システムの検討を行った。また主観評価実験においてシステムの有用性を評価した。演奏位置跳躍に対応したシステムであること、また、練習者の演奏の誤り、テンポ、音量、及び音の重なりを表示することは、練習の支援を行う上で有用であると示された。

練習支援システムの改善点としては、音長や運指情報など、演奏評価項目の追加が考えられる。

また、本システムの活用場所として集団授業やオンラインスクールを想定しているため、今後、本システムを用いて取得したデータを基に採点を行う機能を付与し、実際の現場で指導者の補助となるシステムであるかどうかの評価を行うことを目指す。この機能があれば、指導者は数多い練習者の達成具合を容易に判断し、指導が必要な練習者から指導することが可能になる。

謝辞 本研究はJSPS科研費17H00749の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 田中功一, 小倉隆一郎, 鈴木泰山, and 辻靖彦, “保育者養成課程のピアノ初心者を対象とした演奏見える化ツールの活用実践,” 電子キーボード音楽研究, vol. 10, pp. 3–12, 2015.
- [2] K. Tanaka, T. Suzuki, Y. Tsuji *et al.*, “The tendency of

- the midi data of a piano student and a teacher —from a piano teacher’s viewpoint—,” *IPSS SIG Technical Report of MUS*, vol. 2014, no. 10, pp. 1–6, 2014.
- [3] 田中功一, 鈴木泰山, and 辻靖彦, “演奏可視化ツールとデジタルノートを活用した保育者養成校の対面ピアノ授業の実践(学習支援環境とデータ分析/一般),” 日本教育工学会研究報告集, vol. 15, no. 1, pp. 113–118, 2015.
 - [4] K. Ueda, Y. Takegawa, and K. Hirata, “Evaluation of a piano learning support system focusing on visualization of keying information and annotation,” in *E-Learn: World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education*. Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2015, pp. 1198–1204.
 - [5] T. Fukuda, Y. Ikemiya, K. Itoyama, and K. Yoshii, “A score-informed piano tutoring system with mistake detection and score simplification,” 2015.
 - [6] W. Goebel and G. Widmer, “Unobtrusive practice tools for pianists,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC9)*, 2006.
 - [7] K. Rogers, A. Röhlig, M. Weing, J. Gugenheimer, B. Könings, M. Klepsch, F. Schaub, E. Rukzio, T. Seufert, and M. Weber, “Piano: Faster piano learning with interactive projection,” in *Proceedings of the Ninth ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ACM, 2014, pp. 149–158.
 - [8] H. Tsutsumi, H. Nishino, and T. Kagawa, “A tactile assistance for improving fingering skill in piano performance,” in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*. IEEE, 2018, pp. 1–2.
 - [9] S. Asahi, S. Tamara, S. Hayamizu, and Y. Sugiyama, “Estimation of tempo, timing, and melody for piano practice support systems,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 140, no. 4, pp. 3429–3429, 2016.
 - [10] R. A. T. dos Santos, C. C. Gerling, and Á. L. de Bortoli, “Implications of time adjustments at micro, macro and meso levels in undergraduate and graduate piano students’ performance,” *Music Education Research*, vol. 19, no. 2, pp. 143–159, 2017.
 - [11] 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦 *et al.*, “運指認識技術を活用したピアノ演奏学習支援システムの構築,” 情報処理学会論文誌, vol. 52, no. 2, pp. 917–927, 2011.
 - [12] H. Tsutsumi, H. Nishino, and T. Kagawa, “A piano performance trainer with tactile guidance,” in *Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), 2017 IEEE International Conference on*. IEEE, 2017, pp. 19–20.
 - [13] E. Nakamura, H. Takeda, R. Yamamoto, Y. Saito, S. Sako, S. Sagayama *et al.*, “Score following handling performances with arbitrary repeats and skips and automatic accompaniment,” *IPSS Journal of Information Processing*, vol. 54, no. 4, pp. 1338–1349, 2013.
 - [14] H. Takeda, T. Nishimoto, S. sagayama *et al.*, “Estimation of tempo and rhythm from midi performance data based on rhythm vocabulary hmms,” *IPSS SIG Technical Report of MUS*, vol. 2004, no. 24 (2003-MUS-054), pp. 51–56, 2004.