

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

竹 川 佳 成^{†1,†3} 寺 田 努^{†2,†4} 塚 本 昌 彦^{†2}

ピアノ演奏では、正確な打鍵や適切な指使いなどさまざまな技術が求められる。しかし、ピアノ演奏の支援を目的とし一般に広く普及している光る鍵盤は、運指情報の提示が直観的でない、運指の正誤チェック機能を持たない、打鍵の流れが分からないといった問題がある。そこで、本研究では演奏初期段階における打鍵位置や運指の習熟を高めるピアノ演奏学習支援システムの構築を目的とする。提案システムは運指認識技術を活用し演奏者の運指を逐次チェックする機能を持ち、運指や演奏の正誤、運指情報や打鍵情報といった演奏に必要な情報を直観的に提示する手法について検討している。さらに、光る鍵盤を比較対象とした評価実験を行い提案手法の有用性を検証した。

Construction of a Piano Learning Support System Using a Real-time Fingering Recognition Technique

YOSHINARI TAKEGAWA,^{†1,†3} TSUTOMU TERADA^{†2,†4}
and MASAHICO TSUKAMOTO^{†2}

Piano player needs various kinds of techniques such as correct keying and fingering. However, Lighted keyboards, which are the most commonly used piano learning support, have several problems, such as the difficulty of understanding fingering information and keying sequence, not having fingering check function. To enhance the learning of the keying technique and the fingering technique, the goal of our study is to construct a piano learning support system that has a fingering check function using a real-time fingering recognition technique. We discuss the presentation methods to indicate information for piano performance such as fingering and keying information effectively. We have developed a prototype system, and evaluated its effectiveness by actual use of the system.

1. はじめに

ピアノ演奏では、譜読み、指示されている鍵への正確な打鍵、適切な運指（指使い）、リズム感覚、打鍵の強弱、テンポなど、さまざまな技術が求められ、それらの修得には長期間の基礎的な訓練を必要とする。ピアノ演奏には多大な時間と労力を必要とするため、敷居の高さに利用を断念したり、習熟効率の低さから挫折してしまったりする演奏者が後を絶たない。特に初心者にとって、譜面上の音符および運指を見て、音符から鍵盤上の打鍵位置をイメージし、指示された運指で弾くという一連のプロセスは最初に立ちはだかる難関で、このプロセスに対する労力や精神的負荷の軽減が楽器演奏を楽しめ長続きさせる秘訣であるといえる。演奏初期段階（ピアノ初心者が初見の楽曲に対して運指や打鍵位置を覚えるために練習している段階）における敷居を下げる取り組みとして、次に打鍵すべき鍵など演奏支援情報を光で指示する光る鍵盤^{1),2)} や、ディスプレイに鍵盤や手を表示して打鍵位置や運指をグラフィカルに提示するピアノマスター³⁾ などが楽器メーカーからいくつか販売されている。これらはたとえ音符が読めなくても打鍵箇所を把握でき、打鍵ミスをした場合、次の打鍵箇所を提示しないといったペナルティを課すことで誤った打鍵操作に気づき正しい打鍵を学べる。このように学習において誤りを指摘し気づかせることは重要なポイントであるが、運指に関しては、正解運指を提示するものの、運指の取得が困難であるという技術的な問題から運指誤りに関して指摘やペナルティはなく効率的な運指学習を行えなかった。運指は次の打鍵へのスムーズな演奏や、テンポ、音量、打鍵タイミングなどの自由なコントロールといった音楽表現に影響する重要な技術である。しかし、初心者は、正しい鍵を弾くことや正しい打鍵位置を楽譜から読み取ることに集中するあまり譜面の音符上に運指番号が記載されているものの運指への意識が希薄となってしまうといった理由や、運指の誤りに気付きにくいといった理由から、運指ミスを頻繁に引き起こす。学習者が知っている曲であれば、打鍵ミスは、音としてミスが直接的にフィードバックされるためミスに気付きやすい

^{†1} 神戸大学自然科学系先端融合研究環

Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

^{†2} 神戸大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kobe University

^{†3} 科学技術振興機構 CREST

Japan Science and Technology Agency, CREST

^{†4} 科学技術振興機構さきがけ

Japan Science and Technology Agency, PRESTO



図 1 運指ミスの問題

Fig. 1 A problem of fingering errors.

一方、運指はたとえ誤った運指で弾いたとしても音の高さだけは正しく聴こえるため誤りに気付にくい。音の高さとしては正しく聴こえているものの誤った運指で弾いたために生じる問題として、たとえば、図 1 に示すようにスラー（音と音を滑らかにつなげて演奏する音楽表現）が音符上に付与されている箇所を右手だけで弾く場合、正解運指（運指番号は親指から小指にかけて 1 から 5 の番号がそれぞれ割り当てられている）で演奏すれば、下降する音符に対して薬指を始点とし中指・人差指・親指を順番にそれぞれ使うことで途切れず演奏できるが、図 1 に示す誤った運指で弾いた場合、親指で 4 番目の音符を弾くと途切れた演奏になり、人差指で 4 番目の音符を弾くと不要な指の交差を増やしてしまう。また、指の交差が原因で速く演奏できず指示されたテンポでうまく弾けない場合などがあるため、不要な指の交差はできるだけ避けるべきである。このようにたとえ正しい鍵を弾いていても誤った運指で弾くと音楽表現に悪影響が出てくるため、正しい運指で弾くことは重要である。現状では指導者が逐一学習者の運指を確認して誤りを指摘する以外になく、運指はいったん身につけると修正が難しいためできるだけ早期に正しい指の運びを学ぶことが重要である。したがって、直観的に運指情報を理解でき、打鍵位置の学習と並行して運指の誤りを指摘する機能が求められている。

そこで、本研究では演奏初期段階における打鍵位置や運指の習熟を高めるピアノ演奏学習支援システムの構築を目的とする。提案システムは、筆者らの研究グループが開発した運指認識技術⁴⁾を活用し、逐次、演奏者の運指をチェックする運指補正機能を持つ。また、視線が集中しやすい鍵盤上に運指情報を提示したり、打鍵の流れを把握できるよう鍵盤上に打鍵順序を提示したりするなど、打鍵情報および運指情報を直観的に理解できる提示手法についても検討する。

以下、2 章で関連研究について説明し、3 章で設計について述べる。4 章で実装について説明し、5 章で評価について述べ、最後に 6 章で本研究のまとめを行う。

2. 関連研究

これまでピアノ学習の支援につながる試みはいくつか行われている。たとえば、演奏中にインタラクティブな支援を行う事例として、打鍵すべき鍵、運指、手本映像を表示するキーボードやソフトウェア^{1)–3),5)}がある。これらは、運指に関して誤ったときのペナルティがないなど冒頭で述べた問題がある。

また、蓄積した演奏データから演奏者の苦手な奏法を割り出し集中的にトレーニングするシステム^{6)–10)}や、演奏を自動的に評価しアドバイス文や誤りを譜面上に提示¹¹⁾するシステムがある。これらは、打鍵ミス、打鍵の強さ、タイミングなど主に打鍵情報から評価しており、本研究で注目している運指においては考慮されていない。しかし、これらの知見や方法を取り込むことでより効率的な学習支援システムを構築できるといえる。先生と生徒のレッスン支援^{12),13)}として、音量の変化やテンポ、スタッカートやレガートといったアーティキュレーションの具合などを示すシステムが提案されているが、これらも運指に関しては考慮していない。

さらに、演奏の敷居を下げる試みとして、楽曲の速さや強さを指揮棒を振る感覚でコントロールできる Radio-baton¹⁴⁾やブラボーム्यूジック¹⁵⁾などの指揮システムがある。また、右手をかき鳴らすだけで自動的にコードが変わる機能のついた EZ-AG¹⁶⁾や声の音程や音量を自動的に感知してトランペットの音を実現する EZ-TP¹⁷⁾がある。これらは、あたかも演奏しているように見せることができるが、実演したときのパフォーマンス性が低く、システムの補助なしに演奏したいという要望に応えられない。

3. 設 計

1 章で述べたように、既存の学習支援アプリケーションやキーボードは運指に対してリアルタイムに運指をチェックしその結果を教示するという補正機能がなく効率的な運指学習ができなかった。提案システムではこの運指補正機能を実現すると同時に、補正結果、打鍵位置情報、運指情報や打鍵の流れに関する情報、学習を円滑に進めるために必要と思われる楽譜情報などの提示について統合的に検討し直観的に理解しやすい情報提示手法を提案する。

3.1 運指認識技術

筆者らの研究グループは、これまでに、(1) ユーザの動作をできるだけ妨げずにカメラを用いて運指を取得し、(2) 作業対象の特徴を表すルールを適用することで認識精度を高めると同時にリアルタイムに処理を目指した運指認識システム（図 2）を構築してきた⁴⁾。以下、

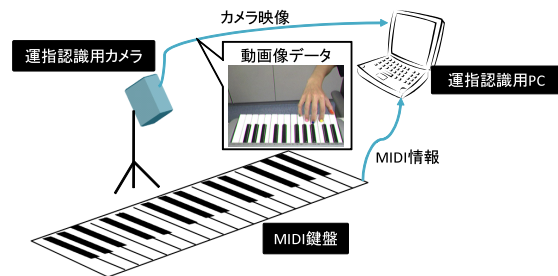


図 2 運指認識システムの構成

Fig. 2 System structure of fingering recognition system.

各項目について説明する。

(1) に関しては、ユーザが作業に集中していても利用できるようにできる限り動作を妨げない、つまり指に余計なデバイスをつけずにシステムを実現することを目指す。提案システムではカメラを用い、各指の爪に貼り付けたカラーマーカの画像処理から運指取得を行う。カラーマーカは薄いシールであり、装着に違和感が少ない。

(2) に関しては、鍵盤や演奏の特性をもとに定義したルールにより運指を補正する。提案する運指認識システムは、実時間処理を実現するためにシンプルな画像処理でマーカ検出を行っているが、マーカ検出率が低く誤認識が生じてしまう。加えて、カメラの位置によって死角が生じたり、ある指が他の指を隠してしまったりするといったオクルージョンが発生する。したがって、画像処理の高度化だけでは、根本的に認識できない状況があったり、認識精度の改善に限界があったりする。そこで、本システムではピアノ演奏の特性をルールとして持つことで運指情報を補正する。ルールの一例として「親指以外の指の交差は生じない」というルールを適用することで、図 3 に示すように、打鍵された「ラの鍵」上のマーカが判別できなかったとき、「ファの鍵」上にある④のマーカから⑤の指で打鍵していると補正できる。

運指認識システムのルール適用時における認識正答率は平均して 95%と高く、指の交差、複数の指の同時判定、高速で複雑な演奏の追従を行えた。さらに、1 フレームの平均処理時間が 20 msec であったことからリアルタイム性についても確認した。

3.2 想定環境

提案システムは筆者らの研究グループが開発した運指認識技術を用いて運指を認識する。そのため、運指認識用のカメラ、爪先に貼り付けるマーカ、打鍵位置情報や打鍵強度情報を

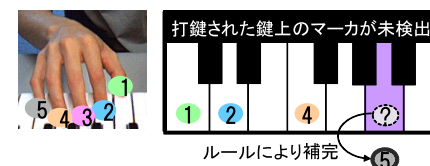


図 3 ルール適用事例

Fig. 3 An example of applying a rule.

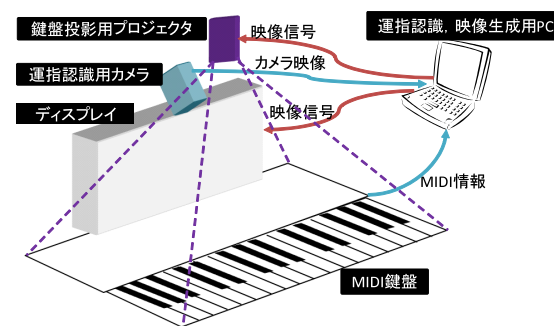


図 4 システム構成

Fig. 4 System structure.

生成する MIDI 鍵盤の使用を前提としている。

運指の補正結果や次の打鍵位置を提示するために、音声、振動、映像などさまざまな提示手段が考えられるが、演奏と競合せず、多彩な情報を表現でき、複数の情報を同時に提示できる映像を用いる。また、一般的に演奏者は正面にある楽譜や鍵盤を見ながら演奏することが多いため、演奏支援情報の提示場所は、演奏者正面や鍵盤付近への提示が有効であると考えられる。

3.3 システム構成

提案システムの構成を図 4 に示す。提案システムは、運指を認識するためにカメラを、演奏支援情報を視覚的に提示するためにディスプレイあるいはプロジェクタを利用する。プロジェクタを利用することで鍵盤上や鍵盤付近に演奏支援情報を投影できる。システムは、カメラ画像、MIDI 情報（打鍵位置や打鍵強度）を入力とし、これらの情報をもとに運指認識を行い、ディスプレイおよびプロジェクタによりコンテンツを表示する。なお、ディスプレイにコンテンツを提示するモードをフロントモード、プロジェクタを利用して鍵盤上や鍵盤



図 5 提示コンテンツの概要

Fig. 5 Overview of the presented contents.

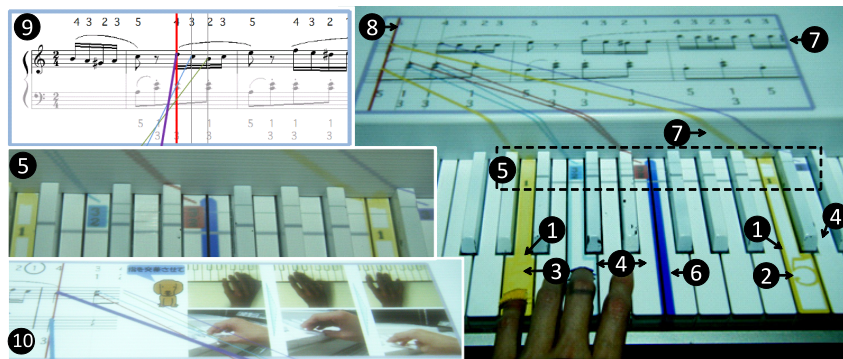


図 6 演奏詳細

Fig. 6 Detailed execution information.

付近にコンテンツを提示するモードをダイレクトモードとする。

3.4 提示コンテンツ

提案システムは、図 5 に示すように、演奏詳細、楽譜、コマンドを前方のディスプレイや鍵盤付近に表示する。以下、これらの機能や役割について説明する。

演奏詳細

スムーズな演奏を支援するために演奏詳細（図 6 の右）は、現在演奏している付近の楽譜や打鍵位置、運指番号を提示している。システムは正しい鍵を正しい運指で打鍵すれば演奏情報を更新する。以下、その詳細を示すが簡条書きの番号や括弧付き番号は、図 6 中の

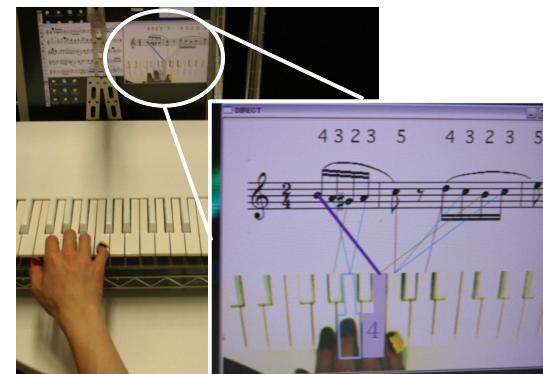


図 7 フロントモードの様子

Fig. 7 Appearance of front mode.

番号と対応している。

1. フロントモードでは、図 7 に示すように、カメラでキャプチャしたライブ映像にコンテンツを重畳させる。一方、ダイレクトモードでは MIDI 鍵盤上にコンテンツを直接投影する。打鍵情報は、映像中の鍵盤あるいは実世界の MIDI 鍵盤の打鍵鍵（次に打鍵する鍵）の輪郭を囲むコンテンツを提示することで示す。
2. 運指情報は、運指番号（親指から小指にかけて 1 から 5 の番号がそれぞれ割り当てられている）ごとに対応している輪郭の色や、鍵上に運指番号を提示することで示す。なお、輪郭の色は、爪先に装着しているマーカの色と同じである。
3. 正解運指が打鍵鍵上にある場合、その打鍵鍵全体が塗りつぶされる。図 6 では (1) の指す鍵が打鍵鍵で、左の打鍵鍵は正しい指が置かれているため打鍵鍵全体が塗りつぶされている。一方、誤運指で打鍵している場合や、誤った鍵を打鍵した場合、矩形を赤色で塗りつぶすことで誤りを視覚的に示す。これにより学習者は容易に打鍵位置や運指を把握できると同時に誤りを補正できる。
4. 打鍵鍵上に正運指がある場合に塗りつぶすだけでなく、候補鍵（打鍵鍵の次に弾く鍵および打鍵鍵から 2 番目に弾く鍵）上に正運指がある場合は、候補鍵上の輪郭を正運指の色で囲む。図 6 では (4) の指す鍵が候補鍵で、最も低い候補鍵上に正運指があるためその鍵の輪郭が囲まれている。これにより、学習者は打鍵鍵より後に弾く鍵と指の組合せを明確に把握できるためスムーズに演奏を行える。

5. 打鍵鍵や候補鍵の先端に打鍵順番を提示する．また，打鍵の順番の背景色は運指に対応する色が割り当てられており，同じタイミングで打鍵する音が複数あれば横線で結び和音演奏であることを提示する．これにより，どの鍵を今後弾いていくのかといった演奏の流れを理解できるため，次以降に弾くべき鍵が不明なため演奏を中断してしまう⁵⁾という光る鍵盤の問題も解決できる．また，広い領域にまたがる同時打鍵に気づくことができる．
6. 右手と左手の各指はそれぞれ同じ色のマーカを装着しており，運指情報を示す色だけでは右手か左手で演奏するか判別できない．そこで，右手と左手の演奏領域の境界線を提示する．
7. 鍵盤上部に現在演奏している付近の楽譜を示す．楽譜の各音符と音符に対応する鍵との間が線で結ばれている．これにより譜面が読めない学習者であっても音符と鍵の関係が理解でき，読譜学習にもつながる．また，打鍵鍵の線は太線で，候補鍵の線は細線で表すことで打鍵鍵を目立たせている．
8. 五線譜内には，現在演奏している位置を示すバーを表示する．これにより左右の手の打鍵タイミングを楽譜から理解できる．
9. 初心者が新規の楽譜に取り組む場合，通常，片手ずつ訓練するため，両手用楽譜や片手用楽譜を用意し，選択的に利用できるようにする．また，片手で訓練している場合も，もう片方の手の演奏との関連を意識することは両手で合わせるときに重要であるため，もう片方の手で演奏する音符も薄く提示する．図 6 (9) は右手訓練用の楽譜である．
10. 鍵盤演奏ではスムーズな演奏を行うために親指を交差する奏法が頻繁に用いられる．初心者は指の交差を行うタイミングや，どのように指の交差を行うか分からないため，タイミングや交差方法を提示する．

楽譜

楽譜の概観を図 8 に示す．楽譜の役割は，既存の紙媒体の楽譜と同等の位置づけで，演奏者は楽譜から音高列や音価（音符の長さ）など演奏に必要な情報を読み取る．また，楽譜上に表示されている番号付きの黒塗りの四角形は，演奏詳細の楽譜（図 6 (7)）の開始点を変更するキューポイントである．これは，学習者が集中的に練習したい場合や，途中から演奏したい場合に有効である．

さらに，楽曲中には，同じフレーズや高さは異なるが同じ動きのフレーズなど似たような箇所や，演奏で間違いやすい箇所，見慣れない演奏記号などがある．そこで，似通ったフレーズを同じ色や線種で囲んだり，注釈を挿入したりするなど注意点を含んだ楽譜も用意

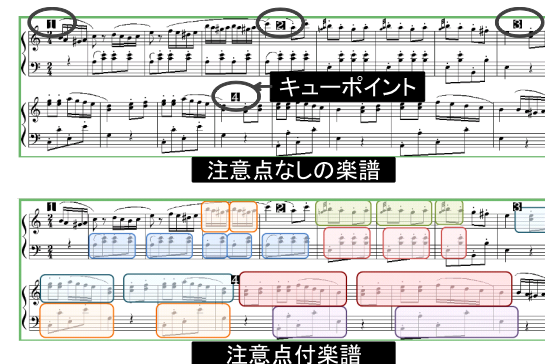


図 8 楽譜

Fig. 8 Score information.

し，選択的に利用できるようにする．楽曲の構造を意識することで，演奏を大局的につかめるようになる．

4. 実 装

3 章で述べた学習支援システムのプロトタイプを実装したダイレクトモードのプロトタイプシステムを図 9 に示す．PC は SONY 社の VGN-S94PS (2.60 GHz の Intel Core2 Duo) を使用した．また，MIDI 鍵盤として CASIO 社の PriviA PX-110 を使用した．爪に貼ってあるマーカがよく見える位置に Basler 社の scA640-70fc (解像度 640 × 480，フレームレート 30 fps) のカメラを 1 台設置し，3 オクターブ 5 度 (45 鍵) の鍵盤領域において両手の運指を認識できる．フロントモードではディスプレイとして Samsung 社の SyncMaster 275T を使用した．また，ダイレクトモードではプロジェクタとして BenQ 社の MP522 を使用した．なお，プロジェクタの鍵盤投影領域は 6 オクターブ (72 鍵) で，プロジェクタの映像がよく見えるように黒鍵を白く塗りスクリーンとして鍵盤上部に白いプラスチックの板を設置した．PC 上のソフトウェアの開発は，Windows XP 上で Microsoft 社の Visual C++ 2005 と Intel 社の OpenCV ライブラリを用いて行った．

5. 評 価

評価実験では，演奏初期段階（ピアノ初心者が初見の楽曲に対して運指や打鍵位置を覚えるために練習している段階）における提案システムの習熟の速さを片手演奏および両手演奏

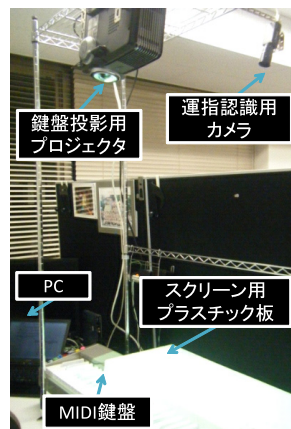


図 9 プロトタイプシステム
Fig. 9 Prototype system.

についてそれぞれ評価した。また、片手演奏においては、提案システムの特徴的な機能である運指に関する機能が習熟に与える影響についても調査した。なお、本実験では、習熟の速さを打鍵ミス数および運指ミス数から評価した。

5.1 片手演奏による全機能を適用させた評価

本実験では、光鍵盤の手法を比較対象として、提案システムの習熟の速さについて評価した。また、本研究で提案した 2 つの提示モード（前面にあるディスプレイに情報を提示するフロントモード、プロジェクタを利用して鍵盤上や鍵盤付近に情報を提示するモードダイレクトモード）を比較評価しどちらの提示方法が速く習熟できるか評価した。

5.1.1 実験の手続き

適用させた機能

フロントモードおよびダイレクトモードでは両手演奏を想定した機能は使用せず、具体的には 3.4 節の演奏詳細における箇条書き番号 1~4 および 7 のみ利用した。また、光る鍵盤モードでは鍵盤上に次に打鍵する鍵を赤枠で提示した。なお、フロントモードおよびダイレクトモードは正しい鍵を正しい指で打鍵しないと次の打鍵鍵の情報を提示しないが、光る鍵盤モードは指示されている鍵を打鍵すれば次の打鍵鍵に遷移する。

楽曲

W.A. Mozart のトルコ行進曲（ソナタ K.331 第 3 楽章）を、最初から 18 小節目まで片

手のみで演奏してもらった。

その他

各手法ごとにそれぞれ 4 名ずつ実験してもらった。また、1 度実験に参加した被験者は他のモードの実験には参加せず、実験はすべて異なる被験者により実施された。被験者は楽譜がほとんど読めない鍵盤経験歴のない電気電子工学を専攻する大学院生および大学生である。さらに、実験開始から終了まで紙媒体の運指付き楽譜を演奏者の前面に提示した。

実験では、15 分間の訓練後、通し演奏（最初から最後までひととおり演奏すること）をしてもらい、そのときの打鍵ミス数および運指ミス数を計測した。15 分間の訓練では「自由に練習してもらってよい」と指示し、被験者に割り当てた演奏モードの機能および紙媒体の運指付楽譜を使って自由に訓練してもらった。なお、いずれのモードにおいても、一般的に被験者は通し演奏を繰り返しやって楽曲を学んでおり、難しすぎて練習を放棄した被験者やシステムの機能をまったく使わずに独自の方法で練習した被験者はおらず、モードごとの被験者間で訓練後の演奏上達度に大きな差異はなかった。また、通し演奏時は、すべてのモードにおいて前面にある運指付楽譜のみ提示した。通し演奏では、被験者に「弾きやすいテンポで、楽譜に指示されている鍵および運指で弾けるよう訓練してほしい」と指示した。また、実験終了後、表 1 に示す演奏に必要とした情報について最大 5 個まで選択し順位付け（小さい数字ほど必要度が高いことを示している）してもらい、自由記述形式のアンケートも合わせて記入してもらった。

打鍵ミスは誤打鍵（間違えて打鍵した場合：図 10(a)）、未打鍵（打鍵しなかった場合：図 10(b)）、余打鍵（余分に打鍵してしまった場合：図 10(c)）をミスと見なしている。また、運指ミスは指示された指で打鍵していなければミスと見なし（図 10(d)）、誤打鍵や余打鍵であっても指示された指で打鍵していれば正解とし（図 10(e)）、未打鍵時も運指ミスとしてカウントしない（図 10(f)）。

5.1.2 結果と考察

表 2 にモードごとのミス数の平均を示す。ダイレクトモードの打鍵ミス数および運指ミス数が最も少なく、光る鍵盤モードの打鍵ミス数および運指ミス数がともに最も多くなった。さらに、フロントモードとダイレクトモードの運指ミス数以外は、有意水準 5% で有意差が確認できた。なお、フロントモードの打鍵ミス数や光る鍵盤モードの運指ミス数で標準偏差が高くなった原因は、被験者の 1 名がフロントモードではミス数が少なく、光る鍵盤モードではミス数が多くなったためである。

光る鍵盤モードでは、被験者全員「演奏が進むにつれて楽譜を追従できなくなり、打鍵位

表 1 演奏に必要な情報
Table 1 Information required the execution.

| 実験初期 | | フロントモード | | | | ダイレクトモード | | | |
|------|-------------|---------|---|---|---|----------|---|---|---|
| 被験者 | | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 物理的 | 鍵盤* | 3 | | | | — | — | — | — |
| | 楽譜（紙媒体）上の音符 | | | | | 5 | | 4 | |
| | 楽譜（紙媒体）上の運指 | | | | | | | 5 | 5 |
| 仮想的 | 鍵盤上の矩形 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| | 鍵盤上の運指番号 | 2 | 2 | 1 | 2 | | 1 | 3 | 1 |
| | 楽譜上の音符 | | | | | 4 | 4 | | 4 |
| | 楽譜上の運指 | | | | | 5 | 1 | 5 | 3 |
| | 音符と鍵を結ぶ線 | | | | | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 実験末期 | | フロントモード | | | | ダイレクトモード | | | |
| 被験者 | | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 物理的 | 鍵盤* | 4 | | | | — | — | — | — |
| | 楽譜（紙媒体）上の音符 | 5 | | | | 5 | | 1 | 2 |
| | 楽譜（紙媒体）上の運指 | | | | | | | 2 | 1 |
| 仮想的 | 鍵盤上の矩形 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| | 鍵盤上の運指番号 | 2 | 1 | 2 | 3 | | 1 | 5 | 3 |
| | 楽譜上の音符 | 4 | | | | 4 | 3 | | |
| | 楽譜上の運指 | | | | | 5 | 1 | 4 | 5 |
| | 音符と鍵を結ぶ線 | 3 | 3 | | 4 | 3 | 5 | 3 | |

*フロントモードの被験者のみ該当

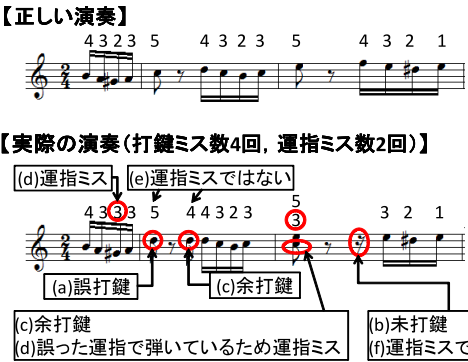


図 10 運指ミスおよび打鍵ミスの計測方法
Fig. 10 The way of measurement of the fingering errors and the keying errors.

表 2 打鍵ミス数および運指ミス数
Table 2 The number of fingering or keying errors.

| | 打鍵ミス数 | | 運指ミス数 | |
|----------|-------|------|-------|------|
| | 平均 | 標準偏差 | 平均 | 標準偏差 |
| フロントモード | 19.5 | 11.4 | 4.0 | 5.4 |
| ダイレクトモード | 2.8 | 2.2 | 0.5 | 1.0 |
| 光る鍵盤モード | 32.0 | 5.4 | 36.8 | 10.2 |

置の記憶に集中した」とコメントしていた。また、各被験者の打鍵ミスを解析すると、特に楽曲の後半に打鍵ミスが頻繁に生じていた。これらより、光る鍵盤モードを利用した被験者は、提示された打鍵位置を追って記憶する単純作業をやっており、打鍵位置が指示されない通し演奏では記憶を頼りに演奏するしかなく、打鍵ミスを頻繁に引き起こしてしまったといえる。また、正確な打鍵に集中するあまり運指まで考慮する余裕がない、楽譜が読めないためどの運指で打鍵すべきかわからない、楽譜から現在の演奏位置を見つけ出し運指を読み取る作業に時間がかかるため運指を体得しきれない、運指ミスに気づかず演奏してしまうなど、さまざまな理由により運指ミスも頻繁に生じた。

一方、ダイレクトモードやフロントモードは、一部、楽譜上の音符と打鍵箇所のマッピングができていなかったり、打鍵箇所を覚えていなかったりして、打鍵ミスや運指ミスが見られたが、全体的に楽譜を理解したうえで演奏できるようになっていた。これは、表 1 に示すように、実験初期段階では、鍵盤上の打鍵位置を示す矩形や運指番号など鍵盤中心の視野

範囲であったが、実験末期段階では、「音符と鍵を結ぶ線」を利用し楽譜上の音符と鍵の位置を関連づけながら学習するなど視野範囲が楽譜や鍵盤に広がっており、楽譜を積極的に理解しようとする姿勢が見られることからいえる。このようにさまざまな情報と関連づけることで、通し演奏においても楽譜から打鍵位置や運指を読み取れるようになり打鍵や運指のミス数が光る鍵盤と比べて減少した。

ダイレクトモードのミス数がフロントモードより少なくなった原因として、ディスプレイを見ながらの演奏よりも物理的な鍵盤を見ながらの演奏の方が直観的であるためだと考えられる。フロントモードのディスプレイ内に提示されている鍵盤は実際の鍵盤の 1/2 サイズで、実験初期段階のフロントモードの被験者はこの縮尺に慣れる必要があった。

しかし、設置の手間に関してはフロントモードの方が手軽である。フロントモードはディスプレイを鍵盤の前に置くだけで実現できる一方、ダイレクトモードはプロジェクタを鍵盤の上に設置するために専用の棚を設けたり天井から吊したりする必要がある。また、鍵盤を

白く塗る必要もある．プロジェクトの設置問題に関しては，ミラー投写方式を利用したプロジェクトを導入することで解決でき，鍵盤の着色に関しては黒い背景に投射可能なプロジェクトを利用することで解決できるが，設置費用がかかってしまう．フロントモードおよびダイレクトモードともに利点欠点があり状況や環境に合わせて選択的に利用することが望ましいと考える．

候補鍵

候補鍵上に正運指がセットされたことを通知する機能に関しては「指を動かさなくてもよいことが分かり打鍵の補助となった」というコメントが得られ有用性が確認できた一方，「打鍵鍵の表示と混乱してしまう」というコメントが得られた．肯定的なコメントおよび否定的なコメントを述べた被験者のミス数を比較したところ，ミス数の差異はほとんどなかったが，使いにくさやとっつきにくさの原因となっているため提示手法について検討する必要がある．

運指補正機能

運指補正機能（リアルタイムに運指をチェックしその結果を教示する補正機能）に関しては，たとえば，薬指や小指による打鍵や，中指と小指の和音演奏は被験者にとって弾きにくく，光る鍵盤モードを利用している被験者は楽譜に指示されていない独自の指で打鍵してしまう傾向がみられたが，提案手法を利用している被験者は逐次運指チェックをうけることで修正されていった．加えて「弾きにくかった和音は，実験が進むにつれ慣れてきて最終的に違和感なく演奏できるようになり，指示されている運指で弾くことで，以降の演奏をスムーズに行えるようになった」というコメントが得られており，運指チェックの効果を確認できた．

演奏詳細の情報

提案手法ではさまざまな情報が提示されていたが，これらの利用は被験者によって異なっていた．たとえば，表 1 に示すように，実験末期段階において演奏詳細内の楽譜より紙の楽譜を利用していた被験者もいれば，演奏詳細内の楽譜しか利用しなかった被験者もいた．また，「音符と鍵を結ぶ線」はほとんどの被験者が利用していたが，まったく利用しなかった被験者もいた．このように被験者や習熟度により情報の要不要が変わってくるため，選択的に利用できるようにしておくことが望ましいといえる．

5.2 片手演奏による運指に関係する機能の評価

本実験では，以下に示す運指に関わる機能を無効にした 2 つのケースにおける習熟の速さを評価した．いずれも 5.1 節と同様，打鍵ミス数および運指ミス数から習熟の速さを評価

する．

- (i) 「正しい鍵を正しい指で打鍵しないと次の打鍵鍵の情報を提示しない」機能を無効にして，そのかわりに「正しい指で打鍵しなくても正しい鍵を打鍵していれば次の打鍵鍵の情報を提示する」機能を適用する．
- (ii) 「鍵盤上の運指情報を提示する」機能を無効にする．具体的には，鍵盤上に運指番号を提示せず，運指情報を表していた鍵盤上の外枠の色や塗りつぶしの色をすべて同じにして，被験者が鍵盤を見ても運指を把握できないようにした．

5.2.1 実験の手続き

適用させた機能

- (i) の実験および (ii) の実験ともに，上記機能の変更以外，5.1 節のダイレクトモードと同じ機能を適用させた．

楽曲

W.A. Mozart のトルコ行進曲（ソナタ K.331 第 3 楽章）を，最初から 18 小節目まで片手のみで演奏してもらった．

その他

本実験の手続きは，適用させた機能以外，5.1 節の片手演奏による評価実験の手続きと同じである．

5.2.2 結果と考察

(i) の評価実験

打鍵ミス数の平均は 3.0（標準偏差 1.8），運指ミス数の平均は 2.8（標準偏差 1.0）となった．打鍵ミス数は，5.1 節のダイレクトモードの結果と比べてほとんど差異がなかった一方，運指ミス数は若干ミス数が増えた結果となり，打鍵ミス数は有意差を確認できなかったが，運指ミス数に関しては，有意水準 5% で有意差を確認できた．また，ミス进行分析すると，4 名中 2 名の被験者が図 11 (a) の箇所運指ミスをしており，4 名中 3 名の被験者が図 11 (b) で運指ミスをしていた．実験終了後，これらの箇所をミスした被験者に「ミスに気付いていたか？」「なぜミスをしたと思うか？」についてヒアリングしたところ，すべての被験者は「ミスに気付いておらず，ミスをした音符と同じ音高の運指と同じだと思い込んでいた」とコメントしていた．具体的には，図 11 (a) においてはミスをした音符（ミの音）と同じ高さで 2 つ後の音符（ミの音）の運指に影響を受け，図 11 (b) においてはミスをした音符（ラの音）と同じ高さで 2 つ前の音符（ラの音）の運指に影響を受けミスをしていた．正しい運指の提示だけでは誤った運指の思い込みを気付かせることは難しく，「正しい指で打鍵



図 11 運指ミスの事例

Fig. 11 Examples of fingering errors.

しないと次の打鍵鍵の情報を提示しない」といったペナルティを課することで、このようなミスを抑止できるといえる。

以上の結果より、「正しい指で打鍵しないと次の打鍵鍵の情報を提示しない」という機能は、誤った運指の思い込みの気付きに有効であるといえる。

(ii) の評価実験

打鍵ミス数の平均は 5.8 (標準偏差 1.7)、運指ミス数の平均は 9.8 (標準偏差 2.9) となり、打鍵ミス数および運指ミス数ともにダイレクトモードの結果と比べて増加しており、打鍵ミス数は有意水準 5% で有意差を確認でき、運指ミス数は有意水準 1% で有意差を確認できた。また、本実験に参加した被験者は「手元と楽譜を何度も見る必要があり、視線移動が煩雑であった」とコメントしていた。被験者は打鍵位置を確認するために手元を見たり、運指番号を確認するために楽譜を見たりする必要があり、特に実験開始直後は何度も楽譜と手元を往復する必要があり、この煩雑な視線移動が結果に影響したといえる。

以上の結果より、鍵盤上への運指情報の提示は、運指の学習に有効であるといえる。

5.3 両手演奏による評価

本実験では、片手演奏で最も評価が高かったダイレクトモードを使って両手演奏における提案システムの習熟の速さについて評価した。

5.3.1 実験の手続き

適用させた機能

3.4 節で説明したすべての機能を適用させた。

楽曲

J.S. Bach の Menuet (BWV Anh.114) の最初から 8 小節までを両手で演奏してもらった。その他

本実験の手続きは、適用させた機能および楽曲以外は、5.1 節の片手演奏による評価実験の手続きと同じである。

5.3.2 結果と考察

打鍵ミス数の平均は 2.3 (標準偏差 1.9) 回、運指ミス数の平均は 0.5 (標準偏差 1.0) 回であり、ほとんどミスなくシステムの補助なしで演奏できるようになっていた。

被験者は、システムの訓練する手の選択機能を利用し、まず右手を訓練し、その後、左手を訓練していた。また、左手で訓練しているときは、両手演奏を想定して、薄く表示されている右手の楽譜を参考に右手のメロディやリズムをとりながら演奏していた。さらに、キューポイント指定機能を利用し苦手箇所を集中的に訓練している被験者もあり、これらの機能は演奏の支援に有用だという意見が得られた。両手で訓練しているときは、「打鍵数が多い右手の方に集中してしまい左手の情報まで見る余裕がない。しかし、打鍵順序からのびている和音演奏であることを示す横線を利用することで、左手で弾く鍵の存在に気付くことができ有用であった」というコメントを述べた被験者が 3 名いた。また、打鍵順序は「打鍵の流れが見え打鍵位置の把握が容易になった」、「提示されている運指の意味が理解できる」というコメントが得られ有用な情報といえる。

演奏支援情報の提示選択機能を利用して、必要最低限の情報だけで訓練を試みる被験者もいたが、楽曲中の一部の苦手箇所だけのために提示する情報を切り替える場面が見受けられた。システムへの過度の依存は学習効率を下げてしまうため、たとえば、苦手な箇所や演奏に詰まっている箇所を検出し、必要な箇所にだけ情報を提示する機能を今後検討していきたい。音符と鍵を結ぶ線に関しては、「楽譜上の音符と鍵の位置を関連づけながら学習に有用であった」というコメントが得られた一方、「ト音譜の音符からのびている線がへ音譜にかかり左手で演奏するときに見えにくい」という指摘があった。肯定的なコメントおよび否定的なコメントを述べた被験者のミス数を比較したところ、ミス数の差異はほとんどなかったが、使いにくさの原因となっているため提示手法について検討する必要がある。さらに、通し演奏のリズムはでたらめであったが、被験者の中には楽譜からリズムを読み取ろうとしており、「リズム情報も提示してほしい」という意見があった。リズムを考慮する余裕があることが分かったと同時に、リズム提示に関する支援も今後検討していきたい。

5.4 実験のまとめ

5.1 ~ 5.3 節の評価実験から得られた結論は以下のとおりである。

- 光る鍵盤より提案システムの方が演奏を早く習熟できる。
- 打鍵情報や運指情報を「映像中の鍵盤に提示するフロントモード」より「鍵盤上に直接提示するダイレクトモード」の方が演奏を早く習熟できる。
- 「運指ミスした場合に次の打鍵鍵を提示しない」機能は、運指ミスの気付きに有効である。

- 楽譜の音符付近に運指を提示するより、鍵盤上に運指を直接提示した方が運指を早く習熟できる。
- 本研究で提案した機能は、いずれも有用な機能であるというコメントが得られた。したがって、提案システムの有効性は示された。

6. ま と め

本研究では、運指認識技術を活用したピアノ演奏学習支援システムを構築した。提案システムは、演奏者の運指を逐次チェックする機能を持ち、打鍵位置や運指など演奏に必要な情報を直観的に理解できる提示手法について検討した。評価実験より提案手法を利用した鍵盤初心者には15分の練習で打鍵ミスや運指ミスがほとんどなく演奏できるようになっており、光る鍵盤と比較しても提案手法の方が打鍵および運指に関して効果的な学習ができていることが確認できた。

今後の課題としては、これまで述べたもの以外に、子供やお年寄りなどさまざまな世代の方を対象とした長期的な評価実験を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手(B)(21700198)および特定領域研究(21013034)、中山隼雄科学技術文化財団研究助成の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) CASIO：光ナビゲーションキーボード．http://casio.jp/emi/key_lighting/
- 2) ヤマハ株式会社：光る鍵盤 EZ-J210．
<http://www.yamaha.co.jp/product/piano-keyboard/ez-j210/index.html>
- 3) 河合楽器製作所：ピアノマスター．
<http://www.kawai.co.jp/cmusc/products/pm/index.htm>
- 4) 竹川佳成，寺田 努，西尾章治郎：鍵盤楽器のための実時間運指取得システムの構築，コンピュータソフトウェア（日本ソフトウェア科学会論文誌），Vol.23, No.4, pp.51-59 (2006).
- 5) 樋川直人，大島千佳，西本一志，苗村昌秀：The Phantom of the Piano：自学自習を妨げないピアノ学習支援システムの提案，情報処理学会シンポジウムシリーズ，Vol.2006, No.4, pp.69-70 (2006).
- 6) 大島千佳，井ノ上直己：不得手要素を克服させるピアノ学習支援システムにむけて，情報処理学会研究報告（音楽情報科学研究会 2007-MUS-71），Vol.2007, No.81, pp.185-190 (2007).
- 7) 吉田勝彦，向井將博，江村伯夫，三浦雅展，柳田益造：ピアノ独習者にとって適切なハ

- ノン風課題曲の生成，日本音響学会音楽音響研究会資料，MA2008-52, pp.51-56 (2008).
- 8) 北村 環，三浦雅展：ピアノ導入教育のための学習支援システムの実現を目指して，日本音楽知覚認知学会平成 18 年度秋季研究発表会資料，pp.115-120 (2006).
 - 9) 森田慎也，江村伯夫，秋永晴子，三浦雅展：ピアノ基礎練習を対象とした奏者への視覚フィードバックの試み，日本音響学会音楽音響研究会資料，MA2007-45, pp.63-66 (2007).
 - 10) 森田慎也，江村伯夫，三浦雅展，秋永晴子，柳田益造：ピアノ音階演奏に関する記述パラメータの操作による模擬演奏の生成，日本音響学会 2008 年春季研究発表会，pp.937-940 (2008).
 - 11) 森田慎也，江村伯夫，三浦雅展，秋永晴子，柳田益造：演奏特徴の強調およびアドバイス文呈示によるピアノ基礎演奏の独習支援，日本音響学会平成 20 年度秋季研究発表会，pp.933-934 (2008).
 - 12) Smoliar, S., Waterworth, J. and Kellock, P.: pianoFORTE: A System for Piano Education Beyond Notation Literacy, *Proc. 3rd ACM International Conference on Multimedia*, pp.457-465 (1995).
 - 13) 大島千佳，西本一志，鈴木雅実：創造的演奏教育支援に向けた生徒の音楽的理解と技術習得の分析，日本創造学会論文誌，Vol.8, pp.21-35 (2004).
 - 14) Boulanger, R. and Mathews, M.: The 1997 Mathews Radio-Baton and improvisation modes, *Proc. International Computer Music Conference 1997*, pp.395-398 (1997).
 - 15) SCEI：ブラボーミュージック．
<http://www.jp.playstation.com/scej/title/bravo/index.html>
 - 16) ヤマハ株式会社：EZ-AG．
<http://www.yamaha.co.jp/ez/product/ez-ag/index.php>
 - 17) ヤマハ株式会社：EZ-TP．
<http://www.yamaha.co.jp/ez/product/ez-tp/index.php>

(平成 22 年 2 月 1 日受付)

(平成 22 年 11 月 5 日採録)



竹川 佳成（正会員）

2003 年三重大学工学部情報工学科卒業．2005 年大阪大学大学院情報科学研究科修士課程修了．2007 年同大学院情報科学研究科博士課程修了．同年より神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部助教．現在に至る．2007 年より神戸大学大学院工学研究科助教，CrestMuse プロジェクト共同研究員を兼任．博士（情報科学）．音楽情報科学，ウェアラブルコンピューティングの研究に従事．



寺田 努（正会員）

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業．1999 年同大学院工学研究科博士前期課程修了．2000 年同大学院工学研究科博士後期課程退学．同年より大阪大学サイバーメディアセンター助手．2005 年より同講師．2007 年神戸大学大学院工学研究科准教授．現在に至る．2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事，2005 年には同機構事務局長を兼務．2004 年には英国ランカスター大学客員研究員を兼務．博士（工学）．アクティブデータベース，ウェアラブルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングの研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，日本データベース学会，ヒューマンインタフェース学会の各会員．



塚本 昌彦（正会員）

1987 年京都大学工学部数理工学科卒業．1989 年同大学院工学研究科修士課程修了．同年シャープ（株）入社．1995 年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻講師，1996 年同専攻助教授，2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助教授，2004 年神戸大学電気電子工学科教授となり，現在に至る．2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事長を兼務．工学博士．ウェアラブルコンピューティングとユビキタスコンピューティングの研究に従事．ACM，IEEE 等，8 学会の会員．