

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設計と実装

Design and Implementation of a Piano Learning System using a Real-Time Fingering Recognition

竹川 佳成 寺田 努 塚本 昌彦*

Summary. 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、光る鍵盤をはじめとする既存の学習支援機能は運指に関する正誤チェック機能をもたず、演奏者は適切な運指学習ができなかった。そこで、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の構築を目的とする。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もち、運指だけでなく演奏に必要な打鍵情報などを考慮した提示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する。

1 はじめに

ピアノ演奏では、読譜、指示されている鍵への正確な打鍵やリズム感覚、適切な運指(指使い)、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う演奏者が後を絶たない。特に初級者にとって、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] 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ニスター [2] 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、初級者は正確な打鍵に集中するあまり運指への意識は薄く、コントロールしにくい薬指と小指の利用を拒む傾向がある。これは、悪質な手癖を身につけるきっかけとなり、手癖は一端身に着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。

そこで、本研究ではこれらの問題を解決するために、筆者らの研究グループが開発した運指認識技術 [3] を用いた演奏支援システムの構築を目的とする。提案する演奏支援システムは、逐次、演奏者の運指をチェックする運指補正機能をもつ。また、効率的な学習には運指だけでなく打鍵位置や楽譜の提示なども重要で、これらの情報を直観的に理解できる提示方法を提案する。

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。例えば、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, 2, 4] 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 [5] 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 [6] 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

Copyright is held by the author(s).

* Yoshinari Takegawa, 神戸大学自然科学系先端融合研究環/JST CREST CrestMuse プロジェクト, Tsutomu Terada and Masahiko Tsukamoto, 神戸大学大学院工学研究科

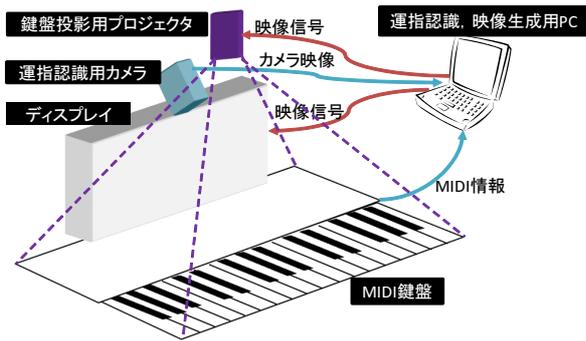


図 1. システム構成

援 [7] 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等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。

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。したがって、本研究では、運指補正機能をもつピアノ学習支援システムの構築が目的となる。また、効率的な学習には、補正結果をどのように提示するかといったことは重要なポイントであるが、打鍵位置情報や楽譜情報は円滑に学習を行うための有用な情報であるため、これらを含めた情報提示方法について検討する必要がある。

3.1 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連指認識技術 [3] を用いて運指を認識する。そのため、連指認識用のカメラ、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含む MIDI 鍵盤の使用を前提としている。

運指の補正結果の教示や次の打鍵位置の提示方法として、音声、振動、ディスプレイ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ディスプレイを用いる。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。

3.2 システム構成

提案システムの構成を図 1 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上部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連指認識やシステム操作解析を行い、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、ディスプレイを利用する支援をフロントモード、プロジェクタを利用する支援をダイレクトモードとする。

3.3 提示コンテンツ

提案システムは、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は、図 2 の右に示すように演奏している付近の楽譜や打鍵位置、運指番号を一緒に示す。通常、これらは演奏と同期して更新されていく。以下、その詳細を示すが箇条書きの番号や括弧付き番号は、図 2 中の番号と対応している。

1. フロントモードではカメラでキャプチャしている鍵盤演奏映像中の打鍵鍵 (次に打鍵する鍵) の輪郭を囲む。また、ダイレクトモードでは打鍵鍵上に直接投影する。
2. 運指情報は、運指番号ごとに対応している輪郭の色や、鍵上に運指番号を表示することで示す。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 2 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 (打鍵鍵より後に打鍵する鍵) 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 2 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

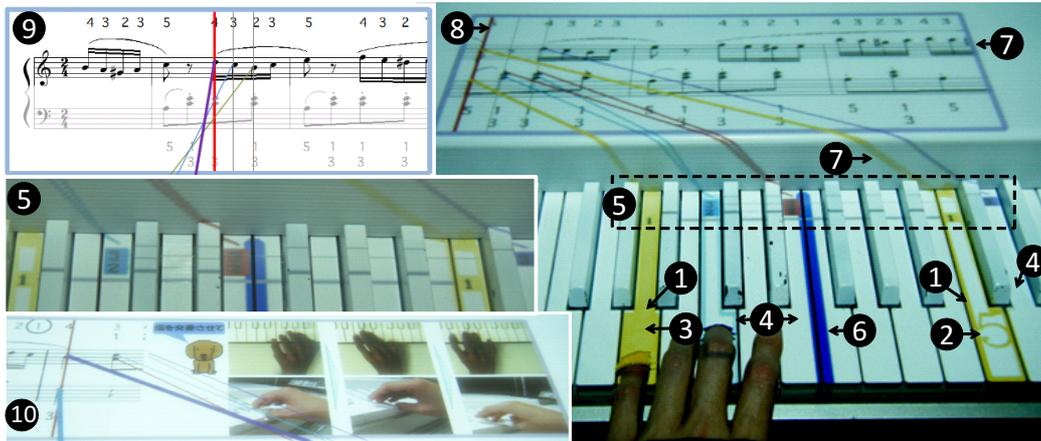


図 2. 演奏詳細

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 [4] 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ユーザ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. 初級者が新規の楽譜に取り組む場合、片手ずつ訓練する。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 2-(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。初級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わからないため、タイミングや交差方法を提示する。

楽譜

楽譜の概観を図 3 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

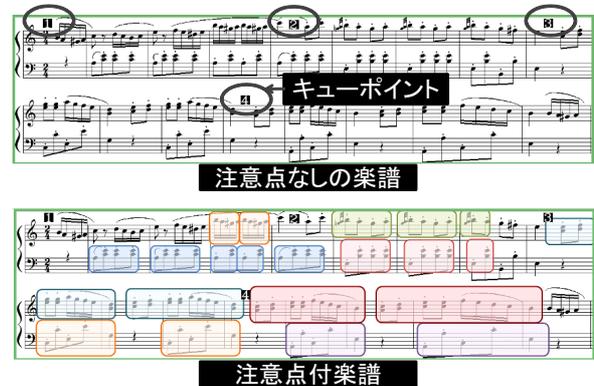


図 3. 楽譜

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。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。そこで、似通ったフレーズを同じ色や線種で囲んだり、注釈を挿入するなど注意点を含んだ楽譜も用意し、選択的に利用できるようにする。

コマンド

提案システムは演奏に役立つさまざまな情報を提示している。これらは、学習者の習熟レベルにより要不要が異なり、同時に、提案システムは最終的にシステムの補助なしで演奏できるようになることを

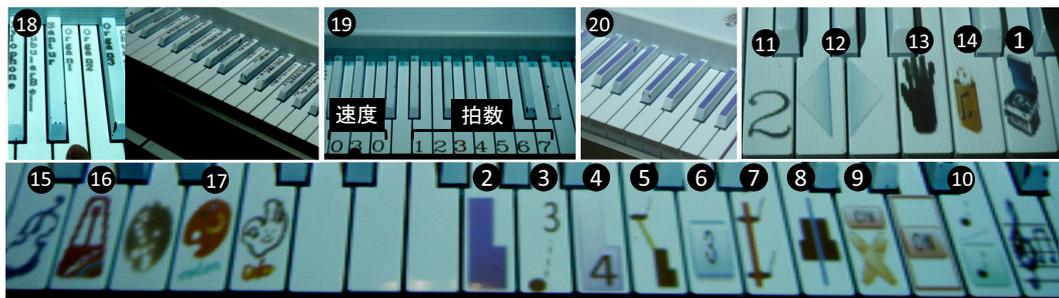


図 4. コマンド

目指しているため、演奏支援情報を選択できるようにする。鍵盤は楽器としての利用だけでなく、入力インタフェースとしても有用であるため、提案システムでは各鍵にシステム操作のためのコマンドを割り当て、コマンドの意味を直観的に理解できるアイコンを鍵上に表示し、打鍵により操作する。また、これらの操作と通常の演奏が混合しないように、楽曲中で使用しない鍵盤上にコマンドを提示したり、フットペダルなどで切替えを行えるようにする。

以下、図 4 をもとに各鍵に割り当てられたコマンドおよびその操作方法について説明する。なお、括弧中の数字は図 4 の数字と対応している。

- ・演奏詳細設定アイコン (1) 下の鍵を打鍵すると、打鍵鍵および候補鍵の矩形 (2)・演奏詳細中の楽譜の運指 (3)・鍵上の運指 (4)・音符と鍵を結ぶ線 (5)・打鍵順序 (6)・演奏位置を示すバー (7)・左右領域の境界線 (8)・指の交差 (9)・楽譜の注意点の有無 (10) に関して提示を選択するアイコンが現れ、これらを打鍵することで ON/OFF を切り替える。

- ・キューアイコン (11) の打鍵操作により楽譜の項にて説明したキューを操作する。

- ・譜めくりアイコン (12) の打鍵操作により楽譜の譜めくりを行う。

- ・訓練アイコン (13) の打鍵操作により訓練する手について右手、左手、両手から選択する。

- ・サンプルアイコン (14) の操作により、訓練アイコンにて選択された訓練モードに合わせて、模範演奏を再生/停止する。

- ・音色アイコン (15) を操作すると、音色リストが鍵上に表示 (19) され、所望する音色が表示されている鍵を打鍵することで音色を指定できる。

- ・メトロノームアイコン (16) の操作により、メトロノームの使用を選択する。また、メトロノームの速度や拍数を設定するアイコン (19) が表示され設定できる。

- ・提案するシステムの鍵盤はプロジェクタの映像が映

るよう黒鍵が白く塗られている。黒鍵アイコン (17) を操作すると、各黒鍵上に異なる色を投影し、所望する色の黒鍵を打鍵することで、黒鍵の色を指定できる (20)。

4 実装

4 章で述べた運指取得システムのプロトタイプを実装した。プロトタイプシステムを図 5 に示す。PC は SONY 社の VGN-S94PS (CPU: Intel Core2 Duo 2.60GHz, RAM: 2.50GB) を使用し、プロジェクタは BenQ 社の MP522 を使用した。また、MIDI 鍵盤として CASIO 社の PriviA PX-110 を使用し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。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 30fps) のカメラを 1 台設置した。今回のプロトタイプでは 1 台のカメラによる認識範囲を 3 オクターブ 5 度 (45 鍵) とし、プロジェクタの鍵盤投影領域は 6 オクターブ (72 鍵) で、両手の運指を認識している。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

提案手法の有用性を示すために鍵盤初級者を対象とした評価実験を行った。実験では片手演奏と両手演奏による評価をそれぞれ行った。

5.1 片手演奏による評価

本実験では、光る鍵盤の手法を比較対象として、運指ミスや打鍵ミスから提案システムの学習効率性について調査した。

5.1.1 実験の手続き

実験では、フロントモード、ダイレクトモード、光る鍵盤モード (鍵盤上に次に打鍵する鍵を赤枠で提示) の 3 手法を比較した。また、全モードにおいて

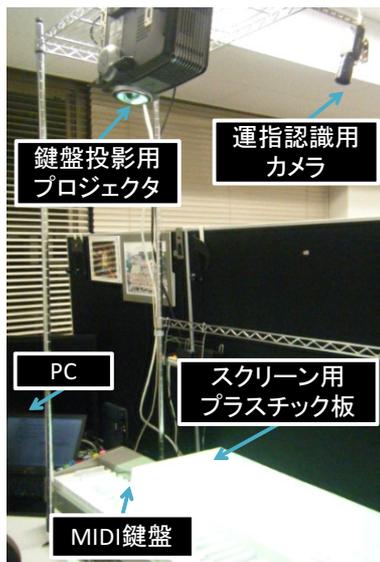


図 5. プロトタイプシステム

運指付楽譜も演奏者の前面に合わせて提示した。提案手法では両手演奏を想定した機能は使用せず、3.3節の演奏詳細における箇条書き番号1~4のみ利用した。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。

各手法ごとにそれぞれ4名ずつ実験してもらい、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。また、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。

実験では、15分間の訓練後、通し演奏(最初から最後まで一通り演奏すること)をしてもらい、そのときの打鍵ミス数、運指ミス数を計測した。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。打鍵ミスは誤打鍵(間違えて打鍵した場合)、未打鍵(打鍵しなかった場合)、余打鍵(余分に打鍵してしまった場合)をミスとみなしている。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みなし、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、未打鍵時も運指ミスとしてカウントしない。

被験者には訓練前に通し演奏があることを告げ、「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、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。

表 1. 打鍵ミス数および運指ミス数

	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	19.5	11.4	4.0	5.4
ダイレクト	2.8	2.2	0.5	1.0
光る鍵盤	32.0	5.4	36.8	10.2

5.1.2 結果と考察

表1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および運指ミスは少なく、フロントモードでは打鍵ミスが多く運指ミスは少なくなった。また、光る鍵盤モードでは打鍵ミスや運指ミスともに多い。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。

光る鍵盤モードにおいて打鍵ミスや運指ミスが増えた理由として、前面にある楽譜から現在の演奏箇所を把握しにくかったためである。このため、提示された打鍵位置を追う単純作業となり、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が頻繁に生じた。また、正確な打鍵に集中する余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、打鍵箇所を覚えておらず、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上で演奏できるようになっていた。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。フロントモードは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なれる必要があった。

運指補正機能に関しては、例えば、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することで修正されていた。加えて「弾きにくかった和音も実験が進むにつれ

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。

5.2 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有用性について調査した。

5.2.1 実験の手続き

楽譜が読めない鍵盤初級者 4 名を被験者とし、J. S. Bach の Menuet (BWV Anh.114) の最初から 8 小節までを 15 分間訓練し、その後、通し演奏における打鍵ミス数および運指ミス数を計測した。訓練中は 3.3 節にて説明した全ての機能を使ってもらい、通し演奏では運指付楽譜のみ用いて演奏してもらった。また、被験者には訓練前に通し演奏があることを告げ、片手演奏の実験と同様の指示をした。

5.2.2 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左手を見る余裕がないため、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が有用であった」という被験者の意見が多かった。

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情報を提示している場面も見受けられた。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、例えば、苦手な箇所や演奏に詰まっている箇所を検出し、必要な箇所にだけ提示する機能を今後検討していきたい。また、音符と鍵を結ぶ線に関して被験者から「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みえにくい」という指摘がありデザイン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わかったと同時に、リズム提

示に関する支援も今後検討していきたい。

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もち、打鍵位置情報と運指情報を考慮した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級者は 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たことが確認できた。

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] 河合楽器製作所 : ピアノマスター : <http://www.kawai.co.jp/cmusic/products/pm/index.htm>.
- [3] 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 年).
- [4] 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 年).
- [5] 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 年).
- [6] 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 年).
- [7] 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 年).