



# 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

竹川, 佳成  
寺田, 努  
塚本, 昌彦

---

## (Citation)

情報処理学会論文誌, 54(4):1383-1392

## (Issue Date)

2013-04-15

## (Resource Type)

journal article

## (Version)

Version of Record

## (Rights)

© 2013 情報処理学会

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005156>



推薦論文

# 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

竹川 佳成<sup>1,a)</sup> 寺田 努<sup>2,3,b)</sup> 塚本 昌彦<sup>2,c)</sup>

受付日 2012年6月14日, 採録日 2013年1月11日

**概要:** ピアノ演奏では、正確な打鍵や適切な指使い、リズム（打鍵および離鍵のタイミング）などさまざまな技術が求められる。筆者らの研究グループでは、演奏初期段階における打鍵位置や運指の習熟を高める学習支援システムを構築してきたが、リズムの学習に関しては考慮してこなかった。楽譜にはさまざまな音長の音符や休符が存在するが、譜読みに慣れていない初学者が、五線譜上に書かれた音符および休符の音長をイメージすることは難しい。また、ピアノロール譜のように、打鍵や離鍵のタイミングを明確に提示する楽譜も存在するが五線譜の学習ができない。そこで、本研究ではこれらの問題を解決するために、リズム学習を考慮した五線譜ベースの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、音長を逐次チェックする機能を持ち、リズム情報を直観的に提示する手法について設計し実現している。さらに、ピアノロール譜を比較対象とした評価実験を行い、提案手法の打鍵ミス数やリズムミス数が比較対象よりも少なくなり提案手法の有用性を検証した。

キーワード：ピアノ、リズム、学習支援、プロジェクタ

## Design and Implementation of a Piano Learning Support System Considering Rhythm Learning

YOSHINARI TAKEGAWA<sup>1,a)</sup> TSUTOMU TERADA<sup>2,3,b)</sup> MASAHIKO TSUKAMOTO<sup>2,c)</sup>

Received: June 14, 2012, Accepted: January 11, 2013

**Abstract:** Playing the piano requires various kinds of techniques such as correct keying, fingering and rhythm. Our research group has developed a piano learning system to support correct keying and fingering for beginners. However, the system does not account for the difficulties of learning rhythm. Rhythm consists of various kinds of notes and rests, and it is difficult for beginners, who are not used to reading a score, to understand the different duration of each note and rest. Moreover, there are piano roll scores, which describe timing of keying and releasing clearly, but which do not teach player how to read musical staff. Therefore, the goal of our study is to construct a piano learning support system that has a rhythm check function. We discuss methods to indicate information for piano performance such as rhythm information effectively while teaching how to read musical staffs. We have developed a prototype system, and evaluated its effectiveness by actual use of the system.

**Keywords:** piano, rhythm, learning support, projector

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学  
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655,  
Japan

<sup>2</sup> 神戸大学  
Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

<sup>3</sup> 科学技術振興機構さきがけ  
PRESTO, Japan Science and Technology Agency, Chiyoda,  
Tokyo 102-0076, Japan

a) yoshi@fun.ac.jp

b) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

c) tuka@kobe-u.ac.jp

### 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（打鍵および離鍵のタイミング）、打鍵の強弱、テンポ（楽曲の速さ）など、さ

本論文の内容は2012年3月のインタラクシオン2012にて報告され、同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

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。

筆者らの研究グループでは、これらの問題を解決するために、演奏初期段階における打鍵位置や運指の習熟を高める学習支援システム [1] を構築してきた。提案システムは、ピアノの上部にプロジェクタを設置し演奏を支援する情報を鍵盤や鍵盤の周囲に提示する。また、運指認識技術 [2] 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。最終的に学習者がシステムで補助していない楽曲も演奏できるようになることを念頭におき、一般に広く普及している五線譜を使った学習支援システムを構築してきた。

一方、リズムは演奏において重要な要素であり、誤ったリズムで演奏した場合、たとえ打鍵位置が正確であったとしても不自然な演奏になってしまう。楽譜にはさまざまな音長の音符や休符から表記されているが、譜読みに慣れていない初学者が、五線譜上に書かれた音符および休符から音長をイメージすることは難しい。したがって、各音符や休符の長さを直観的に理解できる仕組みがあれば、効率的に学習できる。また、ピアノ演奏では複数の指や手について打鍵および離鍵のタイミングを同時にコントロールする必要があるため複雑な手および指の制御が求められる。多くの初学者が、片手で十分演奏できるにもかかわらず、両手での演奏ができないという悩みを持っていることから分かるように、初学者にとって指や手を異なるタイミングで動かすことが難しく、たとえば、両手演奏で右手と左手の離鍵のタイミングが異なる場合、どちらかの手の演奏に影響され、正しいタイミングで離鍵できない。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り、リズムにおいても正誤をチェックし、誤って演奏した場合は正しく演奏できるまで次に進まないなどペナルティを課することで学習効果は高まる。誤ったリズムを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リズムを学ぶことが重要である。さらに、リズムはテンポによりリズムを構成する各音符の音長が相対的に変化するためテンポを意識する必要がある。筆者らの研究グループが構築した学習支援システムはリズム学習に関しては考慮しておらず、正確な打鍵位置を把握できる（初心者状態から始めてゆっくりなテンポであれば両手で演奏でき、現在押している鍵だけでなく、次の鍵まで先読みできるようになっているレベル）ようになったとしても、五線譜から各音符の長さを正確にとらえることの難しさや、右手と左手を異なるタイミングで動かすことの難しさから、打鍵時間が適切でなかったり、五線譜に記載されていない停滞が入って

しまったりして、不自然な演奏になっていた。また、ピアノロール譜のように、打鍵や離鍵のタイミングを明確に提示する楽譜も存在するが五線譜の学習ができない。五線譜は広く普及している演奏方法を示すメディアであり、ピアノ演奏初学者にとって五線譜に書かれた音符や休符の長さが理解できなければ、システムが補助しない楽曲を弾けるようにはならない。

そこで、本研究では楽器演奏の敷居を下げ習熟を高めるために、リズム学習を考慮した五線譜ベースの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、打鍵および離鍵のタイミングを示す線を五線譜の音符上に重畳することで学習者は直観的にリズムを学べる。これらの情報は、五線譜上に提示されているため、音符や休符の長さの意味なども同時に学習できる。また、学習者がリズムの誤りを覚悟するために、打鍵および離鍵タイミングをチェックする機能を持つ。さらに、テンポを意識しながら訓練できるようメトロノームを提示する機能を持ち、楽曲中には難易度の異なる箇所が存在するため、足ペダルを用いて容易にテンポを変更できる機能も持つ。

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、Piano Tutor [3] は演奏追従認識による自動譜めくり機能や、ビデオや音声による模範演奏の提示や、演奏者の演奏データを解析し改善点をテキストなどで指示する機能などを持つ。本研究のように楽器の上やその周囲にアノテーションを提示できるプロジェクタは利用しておらず、リズムや打鍵位置などの提示方法が異なる。しかし、Piano Tutor は総合的な独習支援システムであり、Pitno Tutor の取り組みから得られた知見を取り込むことで効果的な学習支援を提供できる可能性がある。

演奏中にリアルタイム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], [4], [5], [6], [7] がある。これらは、リズムに関して誤ったときのペナルティを考慮していない一方、提案システムはリズムミスをしたときに次の情報を提示しないようにし、正しく演奏できるまで先に進まないようにすることで、誤りに気づき正しい演奏を習得できるようにしている。

磁力を用いた触覚フィードバックにより、リズムを学習できるシステム [8], [9] もある。これらは、リズム学習だけに注力しており、譜読み、正確な打鍵や運指の学習は考慮していない。また、適切な操作タイミングの刺激を繰り返すという受動的な学習スタイルである。一方、本研

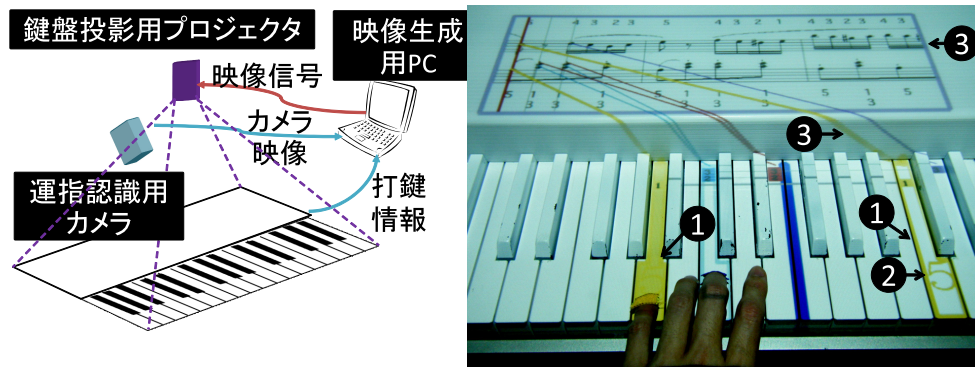


図 1 従来システムのシステム構成 (左図) および提示コンテンツ (右図)

Fig. 1 System structure (left picture) and presented contents (right picture) of the conventional system.

究では、打鍵や離鍵のタイミングを学習者自身が行うという能動的な学習スタイルを採用している。受動的な学習スタイルでは、ユーザは刺激を受ければよいだけであるため学習における精神的な負荷は低いが、習得に時間がかかる。

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 [10], [11], [12], [13], [14] 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 [15] するシステムがある。これらは、打鍵ミス、打鍵の強さなどを主に打鍵情報から評価している。先生と生徒のレッスン支援 [16], [17] 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。本研究で提案するシステムは、演奏中にリアルタイムにフィードバックのある独習支援をめざしており、想定環境や学習方法が異なる。

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-baton [18] やブラボーミュージック [19] 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-AG [20] 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-TP [21] 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、筆者らの研究グループは、最終的に学習者がシステムで補助していない楽曲も演奏できるようになることを念頭におき、五線譜ベースの打鍵位置や運指を学ぶための学習支援システムを構築してきた。しかし、リズム学習の支援を考慮していなかった。そこで、従来システムを改良したリズム学習支援システムの構築をめざす。提案システムでは、打鍵位置や運指情報の提示に加え、リズム情報を直観的に理解できる情報提示手法 (3.3 節

i) や、リズムをチェックしその結果を教示する補正機能 (3.3 節 ii)) を提案する。また、打鍵や離鍵のタイミングはテンポに依存するため、メトロノームの提示機能 (3.3 節 iii)) やメトロノームの利便性を高める機能 (3.3 節 iv) および v)) も提案している。

#### 3.1 従来システム

筆者らの研究グループは、図 1 に示すようにプロジェクタを搭載し、鍵盤やその周辺にアノテーションを提示する学習支援システムを構築してきた [1]。プロジェクタを利用することでカラフルな図や文字といったリッチなコンテンツを演奏時に視線がいきやすい箇所へ提示できるため、直観的に情報を理解でき、効率的な学習を進められる。さらに、提案した学習支援システムは、カメラを使って運指 (指使い) を認識する機能 [2] を持つ。これにより、たとえば、誤った運指を使っている場合に誤りの指摘や正解運指の提示といったことが可能となる。

提案した学習支援システムは、図 1 に示すように、鍵盤や鍵盤付近に演奏に役立つさまざまな情報を提示している。以下、提示している情報や機能について説明する。なお、図中の番号は、以下の箇条書き番号に対応している。

- (1) 打鍵情報を示すために、次に打鍵する鍵の輪郭を囲む。
  - (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。正解運指が次に打鍵する鍵上にある場合、その打鍵鍵全体が塗りつぶされる。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。
  - (3) 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。
- 光る鍵盤 (次に弾く鍵を赤く光らせて提示する CASIO

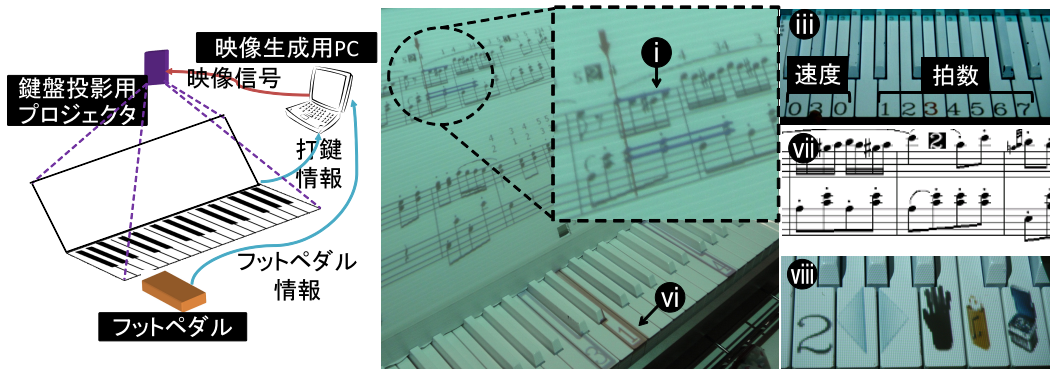


図 2 提案システムのシステム構成 (左図) および提示コンテンツ (右図)

Fig. 2 System structure (left picture) and presented contents (right picture) of the proposed system.

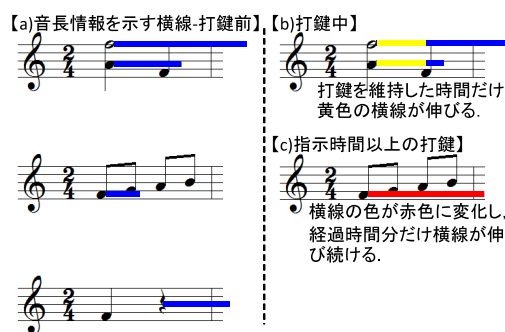


図 3 音長重畳機能の例

Fig. 3 Examples of presented duration for musical notations.

社などから販売されている楽器) [4] の方式を比較対象として使った評価実験では、提案した学習支援システムは光る鍵盤と比較して、打鍵ミス数が約 0.08 倍、運指ミス数が約 0.02 倍に減少して、高い有用性を検証できた。

### 3.2 システム構成

提案システムの構成を図 2 に示す。提案システムは、テンポを制御するために足ペダルを、演奏支援情報を視覚的に提示するために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、ペダル情報、MIDI 情報 (打鍵位置や打鍵強度) を入力とする。

### 3.3 提示コンテンツ

図 2 を用いて提案する演奏支援情報について説明する。システムは正しい鍵を適切なタイミングで打鍵および離鍵したときのみ演奏支援情報を更新する。図中の番号は、以下の箇条書き番号に対応している。

i) 五線譜への音長重畳機能 楽曲は長さの異なるさまざまな音符や休符から構成され、初心者にとって、各音符や休符が持つ時間を理解することは重要である。そこで、提案システムは、図 2 や図 3 に示すように、五

線譜の音符や休符上に、音符や休符の長さに対応する横線を重畳し、各音符の音長を直観的に理解できるようにする (図 3(a))。また、打鍵するにつれ横線の色が青色から黄色に変化し (図 3(b))、学習者は直観的に残りの打鍵維持時間を理解できる。また、指示された時間以上に打鍵した場合は、横線が赤色に変化し (図 3(c))、オーバーした時間だけ赤色の横線が水平方向に伸びるようなインタラクティブ機能を持つ。

- ii) リズムチェック機能 「適切な分だけ打鍵維持したか」「不要な停滞はなかったか」「同時に打鍵できているか」といった打鍵および離鍵タイミングをチェックする機能を持つ。これらの誤りを検出した場合、システムは演奏支援情報を更新せず、現在弾いている箇所に対応する音符の演奏支援情報を再提示することで、学習者に誤りを認識させ、正しい演奏を身につけられるようにする。なお、同時打鍵におけるタイミングのずれなどこれらの許容時間に関しては、テンポ、楽曲、学習者の習熟度によって変化するため、学習者が自由に設定できるようにする。
- iii) メトロノーム テンポにより各音符の音長が相対的に変化するため、テンポの意識は重要である。そこで、提案システムは、メトロノーム機能を持たせテンポを意識しながら学習できるようにする。図 2 に示すように、メトロノームを起動したときに、メトロノームの速度や拍数を設定するアイコンが表示され設定できる。
- iv) 足ペダルによるメトロノーム速度調節機能 楽曲中には、難しい箇所や簡単に演奏できる箇所といったように難易度の異なる箇所が存在する。難しい箇所を訓練する場合、最初はゆっくりなテンポで訓練し少しずつテンポを速めていくといった練習をしたり、逆に、簡単な箇所は、難しい箇所でも弾いていたゆっくりなテンポにわざわざあわせるのではなく、楽曲に指示されているテンポで訓練したりしたいと思う。したがって、テンポ速度を柔軟に制御できればより効率的に訓練で

きる。そこで、本研究ではメトロノームのテンポをコントロールするための足ペダルを用意し、ペダルを踏み込むとテンポが速くなる機能を提供する。

v) 演奏に動的にあわせるメトロノーム機能 訓練中は何度も停滞が生じてしまう。また、メトロノームに慣れていない初学者は、メトロノームのタイミングに合わせる事が難しい。そこで、メトロノームの開始点を演奏に合わせる機能を提案する。これにより、初学者は自分の好きなタイミングで演奏を始めることができ、メトロノームのタイミングに合わせる時間の削減や、精神的な負荷を軽減できる。

vi) 鍵盤上への打鍵位置および運指の提示 打鍵情報は、次に打鍵する鍵の輪郭を囲むことで示す。また、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、鍵盤上に運指番号を提示することで示す。打鍵位置や運指が鍵盤上に直接提示されているため、五線譜から打鍵位置や運指を読み取ることが難しく、打鍵する位置や運指が理解できていない新しい楽曲を練習し始めの段階において、効率的に学習できる。

vii) キューポイント選択機能 楽譜上に表示されている番号付きの黒塗りの四角形（この例では「2」）は、演奏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。

viii) 各種機能 On/Off 切替え 上記で述べた各種機能の On/Off を切り替えるアイコンを、演奏で使用しない鍵の鍵盤上に用意し、ユーザが選択的に利用できるようにする。

## 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。PCはSONY社のVPCSAを使用した。また、MIDI鍵盤としてCASIO社のPrivia PX-110を使用し、メトロノームのテンポを制御するためにRoland社のEV-7を使用した。プロジェクトとしてBenQ社のMP776 STを使用した。なお、プロジェクトの鍵盤投影領域は6オクターブ（72鍵）で、プロジェクト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 7上でMicrosoft社のVisual C++ 2010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、リズム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を用いた際のピアノ演奏に関する習熟の速さを、システム使用後の打鍵ミス数お

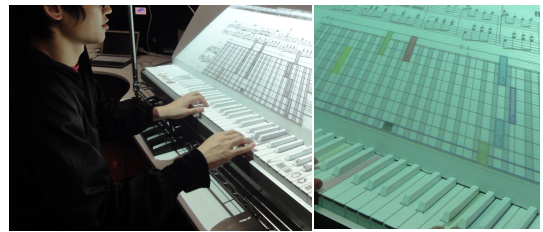


図 4 ピアノロール譜の例

Fig. 4 An example of a piano roll.

表 1 適用した機能

Table 1 The applicable functions.

	提案 手法	ピアノ ロール譜	支援 なし
五線譜への音長重畳機能	○	×	×
リズムチェック機能	○	×	×
メトロノーム	○	○	○
足ペダルによるメトロ ノーム速度調節機能	○	○	×
演奏に動的にあわせる メトロノーム機能	○	○	×
鍵盤上への打鍵位置 および運指の提示	○	○	○
キューポイント選択機能	○	○	○
ピアノロール譜提示機能	×	○	×

よびリズムミス数をもとに評価した。

### 5.1 実験の手順

実験の手順を以下に示す。

比較対象 本研究では、提案するリズム支援機能の有効性を検証するために、ピアノロール譜を用いた場合、提案するリズム支援を利用しない場合について比較した。ピアノロール譜（図 4）は、音長を直観的に理解できる譜面で、キーボードマニア [22] のような表示形態をとっており、演奏する順に画面上部から下部へ向かって矩形が降りてきて、最下部にまで落ちたときに打鍵するタイミングである。また、矩形の長さは音長を、運指に割り当てられた色で矩形が囲まれており、矩形中の番号は運指番号を示す。

表 1 に、各比較対象において適用させた機能を示す。

ピアノロール譜が表示されている場合でも、つねに、ピアノロール譜の上部に五線譜は表示されており、容易にピアノロール譜および五線譜を見られる状態にある。また、リズムチェック機能を使用している提案手法では、正しい打鍵および離鍵タイミングで正しい鍵を弾いたときのみ次の演奏支援情報を提示する。一方、ピアノロール譜およびリズム支援なしにおいては、正しい鍵を打鍵すれば次に遷移する。デフォルトのメトロノームのテンポは、クリックの間隔を 0.6 sec (4分音符=12.5 bpm (Beats Per Minute)) とした。16分音符 1 個分に 2 クリックとした。なお、16

分音符が課題曲において最も音長が短い音符である。

**被験者** 各手法ごとにそれぞれ3名ずつ合計9名に実験してもらった。また、1度実験に参加した被験者は他の比較対象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。被験者は五線譜がほとんど読めない鍵盤経験歴のない大学院生および大学生である。なお、各被験者にはあらかじめ楽譜上に書かれている音符の長さの意味や、各種機能の使い方を説明した。また、ピアノロール譜を利用する被験者は、ピアノロール譜の読み方を十分理解している。

**課題曲** 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小節目まで両手で演奏してもらった。

**評価基準** 実験では、課題曲を30分間、各手法に対応するシステムの機能を使いながら訓練してもらった。30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、実験終了後、各機能の感想を自由記述欄に記入してもらった。通し演奏では五線譜表記の楽譜およびメトロノームのみ提示し、通し演奏における打鍵ミス数やリズムミス数を計測した。メトロノームのテンポは、訓練時に採用したデフォルトのメトロノームのテンポと同じで、クリックの間隔を0.6secとし、16分音符1個

分に2クリックとした。

本研究における打鍵ミスおよびリズムミスのカウント方法を図5および図6をもとに説明する。

打鍵ミスやリズムミスとして表出する現象としては、誤打鍵・未打鍵・余打鍵・停滞・音長ミスがある。誤打鍵は図5(a)に示すように誤った鍵を打鍵したこと、未打鍵は図5(b)に示すように打鍵しなかったこと、余打鍵は図5(c)に示すように本来打鍵する数より余分に打鍵してしまったことをそれぞれ意味する。

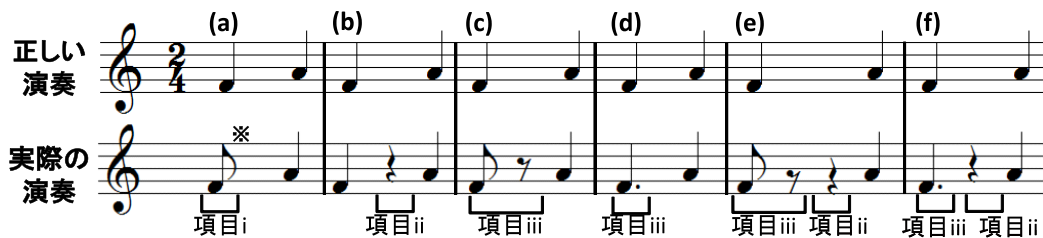
音長ミスは図6(a), (c), (d), (e), (f)に示すように、±0.3secを許容誤差とし本来打鍵維持すべき時間と異なることである。図6(e)に示すように本来離鍵すべきタイミングより早く離鍵した場合、本来離鍵すべきタイミングから次に打鍵する鍵までに0.6sec以上あれば停滞と見なす。あるいは図6(b), (f)に示すように本来離鍵すべきタイミングと同じタイミングでの離鍵やそれよりも遅いタイミングで離鍵した場合、実際の離鍵から次に打鍵するまでに0.6sec以上あれば停滞と見なす。なお、誤打鍵・未打鍵・余打鍵に関する音長ミスや停滞は、正しく弾かれていたと想定して計測する。すなわち、図5(a)の誤打鍵は、誤打鍵を正打鍵と見なし、誤打鍵の打鍵および離鍵タイミングをもとに音長ミスや停滞の判断をする。また、図5(b)の未打鍵は、未打鍵の箇所を正しい音長の正打鍵があったと見なし、図5(c1)および(c2)の余打鍵は、余打鍵を無視して、未打鍵および余打鍵近辺の停滞や音長ミスを判定する。

誤打鍵・未打鍵・余打鍵は打鍵ミス数としてカウントされるが、音長ミスや停滞は、音長理解の誤り(音長を正しく理解していないこと)だけでなく、不明確な打鍵位置(次に打鍵すべき鍵が分からないこと)も要因として考えられる。したがって、「音長理解の誤り」が主たる原因と考えられる誤りはリズムミスとして、「不明確な打鍵位置」が主たる原因と考えられる誤りは打鍵ミスとしてカウントした。音長理解の誤りと不明確な打鍵位置の両方が原因とし



図5 誤打鍵・未打鍵・余打鍵の計測方法

Fig. 5 The measurement of incorrect keying, non-keying, and extra keying.



※8分音符1個の打鍵維持時間は2.4secを想定している。

項目番号	原因	現象	ミスの種類
項目i	音長理解の誤り	音長ミス	リズムミス数
項目ii	不明確な打鍵位置	停滞	打鍵ミス数
項目iii	音長理解の誤りあるいは不明確な打鍵位置	音長ミス	打鍵またはリズムミス数

図6 停滞および音長ミスの計測方法

Fig. 6 The measurement of extra rest and incorrect holding time.

表 2 打鍵ミス数とリズムミス数

Table 2 The number of keying and rhythm errors.

ミスの種類		打鍵ミス数		リズムミス数	打鍵またはリズムミス数
現象		誤打鍵・未打鍵・余打鍵	停滞	音長ミス	
提案手法	平均	6.0	9.0	1.0	2.7
	標準偏差	2.6	3.6	1.7	4.6
ピアノロール譜	平均	31.0	15.0	9.0	12.0
	標準偏差	1.4	1.4	1.4	2.8
リズム支援なし	平均	34.5	28.0	12.5	13.0
	標準偏差	0.7	4.2	3.5	0.0

表 3 打鍵ミス数とリズムミス数から算出した手法間の p 値

Table 3 P value for each method based on the number of keying and rhythm errors.

ミスの種類		打鍵ミス数		リズムミス数	打鍵またはリズムミス数
現象		誤打鍵・未打鍵・余打鍵	停滞	音長ミス	
提案手法とピアノロール譜		0.001 **	0.121	0.006 **	0.089 *
ピアノロール譜とリズム支援なし		0.089 *	0.054 *	0.423	0.667
提案手法とリズム支援なし		0.001 **	0.012 **	0.015 **	0.058 *

\*: 有意水準 10%での有意傾向の観測, \*\*: 有意水準 5%での有意差の観測

て考えられる場合は、「打鍵またはリズムミス」という項目を設けて、リズムミスおよび打鍵ミスどちらにも含めず独立してカウントするようにした。また、打鍵ミスは「誤打鍵・未打鍵・余打鍵」と「不明確な打鍵位置による停滞」とでは性質が異なるため、それぞれのミス数が明確に分かるようにした。具体的には、図 6(a)では、第 1 音の音長は誤っているものの第 1 音の離鍵後に第 2 音を即座に打鍵できているため、「不明確な打鍵位置」ではなく「音長理解の誤り」が主たる原因であると考えられる。図 6(b)の場合は、第 1 音の打鍵維持時間は正しいものの不要な停滞が挿入されているため、「不明確な打鍵位置」が主たる原因であると考えられる。図 6(c)では、第 1 音の音長が誤っている。この場合、「不明確な打鍵位置」と「音長理解の誤り」の両方が考えられ特定できない。図 6(d)も図 6(c)と同様で、「不明確な打鍵位置」と「音長理解の誤り」の両方が考えられる。図 6(e)および図 6(f)は、「不明確な打鍵位置」により四分休符分の停滞が発生したと考えられるが、第 1 音の音長が誤っている原因は、「不明確な打鍵位置」と「音長理解の誤り」の両方が考えられる。

**被験者への指示** 30 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を使って自由に訓練してもらった。

## 5.2 実験結果と考察

前述した評価基準をもとに算出したミス数を表 2 に、手法間ごとに適用した t 検定の結果 (p 値) を表 3 に示す。ピアノロール譜およびリズム支援なしにおいて、それぞれ 1 名の脱落者が存在し、課題曲の 1/4 までしか演奏できなかった。脱落者のデータは表 2 の実験結果に含めてい

ない。すべての項目のミス数において、提案手法はピアノロール譜およびリズム支援なしと比較して少なくなった。「提案手法とピアノロール譜」間の停滞以外は「提案手法とピアノロール譜」および「提案手法とリズム支援なし」間のすべての項目において有意水準 10%で有意傾向が観測され、特に、打鍵ミス数の誤打鍵・未打鍵・余打鍵やリズムミス数は、「提案手法とピアノロール譜」および「提案手法とリズム支援なし」において有意水準 5%で有意差が観測された。ピアノロール譜とリズム支援なし間においては、有意差は観測されないものの全体的にピアノロール譜の方がミス数が少なくなった。したがって、提案手法はピアノロール譜およびリズム支援なしよりも効率良く学習できることが分かった。以下、提案手法の特徴的な機能をもとに実験結果について考察する。なお、以下に示す被験者の行動は実験者が観察したもので、実験終了後に被験者に確認をしている。

**五線譜への音長重畳機能** 提案手法を利用した被験者が効率的に学習できた原因として、リズム理解の促進および読譜力の向上があげられる。

提案手法やピアノロール譜を利用した被験者全員から「明示的な音長提示は各音符のリズムを理解する助けとなった」というコメントが得られており、リズム学習が促進されたといえる。

提案手法を利用した被験者は、音長が音符に重畳されているため、音長情報だけでなく音符も自然に目に入る環境にあった。実験初期段階では正確な打鍵やリズムを意識していたため、鍵盤上の打鍵位置情報やリズム情報を示す楽譜上の横線に集中していたが、演奏に慣れてくるにつれ、楽譜上に示されている音符から打鍵位置を理解する余裕が



生まれ五線譜の学習をしていった。また、楽曲には難易度の異なる箇所があり、難度が低く打鍵位置や音長の提示に頼らなくてよい場合は五線譜の学習に専念し、難度が高いところは正しいリズムや打鍵位置の演奏に専念するといったように柔軟に学習項目を変更していた。

ピアノロール譜を使用した被験者は、実験初期段階では打鍵位置や運指を確認するために手元を見ながら訓練しておりほとんど五線譜を見ていなかった。ある程度、打鍵位置や運指を学んだ後は、基本的にピアノロール譜を見ながら音長の訓練をしており、ピアノロール譜と五線譜は離れた位置にあり視線を移動する必要があるため、提案手法のような簡単な箇所だけ五線譜を見るといったことは難しく、最終的に五線譜だけで訓練をする時間が十分とれなかった。このため、ピアノロール譜が表示されない本番において、不明な箇所や難しい箇所が現れたときに、読譜力がないためミスを頻発していた。

リズム支援なしを利用した被験者も、ピアノロール譜の被験者と同様、実験初期段階では打鍵位置や運指を確認するためにほとんど五線譜を見ていなかった。ある程度、打鍵位置や運指を確認できた後は、五線譜を見ながらリズムの訓練をしていたが、リズムや打鍵位置を覚えきる前に練習時間がなくなってしまい、打鍵ミスやリズムミスが増加したと考えられる。

**リズムチェック機能** 提案手法を利用した被験者は、実験初期段階から、正しい長さだけ打鍵を維持しないと先に進まないリズムチェック機能が適用されていたため、打鍵維持時間を意識し、音長重畳機能により五線譜上に示された残りの打鍵維持時間をつねに確認していた。リズムチェック機能により、被験者は五線譜を自然に見るようになった。したがって、リズムチェック機能は、読譜力の向上に貢献している。

音長ミスに関しては、提案手法を使った被験者はリズムチェック機能により、誤った音長ミスがそのつど修正されていた。全手法についていえることであるが、特に、左右のリズムが異なる箇所は、どちらかの手の動きに無意識につられてしまうため、被験者がよくリズムミスをするポイントである。リズムチェック機能により、右手と左手のリズムの違いを意識でき、何度も訓練させられることで習熟が高まった。リズムチェック機能を利用することで、学習者が気づきにくい音長の誤りを修正できた。

**足ペダルによる速度調整機能** 足ペダルによる速度調整機能は提案手法およびピアノロール譜の手法において利用できる機能であるが、提案手法を使った2名の被験者を除き使用した者はいなかった。ほとんどの被験者は通し演奏のときに使用する速度で訓練していた。2名の被験者はスムーズに演奏できる場所はメトロノームの速度をあげて訓練し、うまく演奏できないところは速度を下げて練習す

るといったように意図どおりの使い方をしていった。残りの被験者は、速度をあげる余裕がなかったため利用しなかったと述べており、機能そのものの使いにくさに関しての指摘はなかった。

**演奏に動的に合わせるメトロノーム機能** 演奏に動的に合わせるメトロノーム機能に関しては「メトロノームのタイミングをそのつど意識する煩わしさがなかった」という肯定的なコメントが得られた。実験者が被験者の行動をもとにした知見であるが、実験開始直後は打鍵位置や運指を確認するため、頻繁に停滞が生じていた。したがって、リズム支援なしの被験者は、メトロノームのクリックのタイミングをとる煩わしさから、メトロノームを無視して学習していた。一方、提案手法やピアノロール譜の被験者は、メトロノームのクリックも意識しつつ学習をしていた。

**鍵盤上への打鍵位置および運指の提示、キューポイント機能** すべての被験者は実験初期段階から「鍵盤上への打鍵位置および運指情報」は利用していた。また、「キューポイント選択機能」を利用し苦手箇所を集中的に訓練していた。これら2つの機能は、すべての被験者から学習において便利な機能であるというコメントが得られ有用性が確認できた。

## 6. まとめ

本研究では、リズム学習を考慮した五線譜ベースのピアノ演奏学習支援システムを構築した。五線譜の音符や休符の上に、音長を示す線を重畳することで、学習者は直観的に音長を理解できる。また、打鍵維持時間に比例して音長の色が変化するインタラクティブな機能を利用することで、どれくらい打鍵し続けるべきか視覚的に確認できる。さらに、リズムチェック機能により、リズムミスに気づき、繰り返し訓練することで複雑なリズムであっても弾けるようになる。評価実験より提案手法を利用した鍵盤初学者は30分の訓練で、打鍵ミスやリズムミスがほとんどなく演奏できるようになっており、ピアノロール譜と比較しても提案手法の方が打鍵およびリズムに関して効果的な学習ができていることが確認できた。

冒頭で述べたように、ピアノ演奏にはさまざまな技術が必要とし、これらの技術の習得には時間がかかる。したがって、旧来のピアノ演奏学習では、各種演奏に必要な技術を個別に学習させており、結果、ある楽曲を演奏できるようになるまでには、多大な時間と労力を必要とし、挫折してしまう学習者が後を絶たなかった。本研究では、マルチメディア技術や情報デザインの活用から人の処理能力を高め、演奏に必要な技術をまとめて学習する総合学習を提案し、実験結果より、提案する学習スタイルの有効性が明らかになった。今後は、運指・強弱・アーティキュレーションなども含めて統合的に学習できる環境を構築し、新

たな楽器演奏の学習メソッドを確立していきたい。また、人の処理能力は年齢や身体スキルに依存するため、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必要がある。

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)、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ)および文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(20240009)によるものである。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- [1] 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 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).
- [2] 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(日本ソフトウェア学会論文誌), Vol.23, No.4, pp.51-59 (2006).
- [3] Dannenberg, R.B., Sanchez, M., Joseph, A., Capell, P., Joseph, R. and Saul, R.: A Computer-Based Multimedia Tutor for Beginning Piano Students, *Journal of New Music Research*, Vol.19, No.2-3, pp.155-173 (1990).
- [4] CASIO: 光ナビゲーションキーボード, 入手先 ([http://casio.jp/emi/key\\_lighting/](http://casio.jp/emi/key_lighting/)).
- [5] ヤマハ株式会社: 光る鍵盤EZ-J210, 入手先 (<http://www.yamaha.co.jp/product/piano-keyboard/ez-j210/index.html>).
- [6] 河合楽器製作所: ピアノマスター, 入手先 (<http://www.kawai.co.jp/cmusic/products/pm/index.htm>).
- [7] 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).
- [8] Lewiston, C.: MaGKeyS: A haptic guidance keyboard system for facilitating sensorimotor training and rehabilitation, Ph.D. Thesis. MIT Media Laboratory (2008).
- [9] Grindlay, G.: Haptic Guidance Benefits Musical Motor Learning, *Proc. 2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp.397-404 (2008).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).

- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] Boulanger, R. and Mathews, M.: The 1997 Mathews Radio-Baton and improvisation modes, *Proc. International Computer Music Conference 1997*, pp.395-398 (1997).
- [19] SCEI: ブラボーミュージック, 入手先 (<http://www.jp.playstation.com/scej/title/bravo/index.html>).
- [20] ヤマハ株式会社: EZ-AG, 入手先 (<http://www.yamaha.co.jp/ez/product/ez-ag/index.php>).
- [21] ヤマハ株式会社: EZ-TP, 入手先 (<http://www.yamaha.co.jp/ez/product/ez-tp/index.php>).
- [22] コナミ: キーボードマニア, 入手先 (<http://www.konami.jp/am/keyboard/>).

### 推薦文

インタラクシオン 2012 では, 87 名から構成されるプログラム委員会によって投稿数 43 件の中から優秀な論文 18 件を一般講演発表として採択し, インタラクティブ発表は 149 件の投稿から 19 件をファイナリストとして選出いたしました。本論文は, これらの 37 件からさらにプログラム委員会による投票によって, 論文誌に推薦すべき論文であるとの評価を得たものであり, 論文誌 編集委員長としてもぜひ推薦したいと考えました。

(インタラクシオン 2012 プログラム委員長 宮下芳明)



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。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。2012 年より公立ほこだて未来大学システム情報科学部助教, 現在に至る。2011 年には MIT Media Lab. にて客員研究員を兼務。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, 教育工学の研究に従事。



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。