

# 音階と鍵盤の視覚的対応付けによるピアノ学習支援システム

山田 和毅<sup>1,a)</sup> 山本 邦雄<sup>1,b)</sup> 乃万 司<sup>1,c)</sup>

**概要:** ピアノの演奏で難しいことの一つに、読譜しながらの演奏がある。本研究では、音階上の音の順序と鍵盤上の鍵の順序が一致することに着目し、読譜しながらの演奏の学習支援システムを開発する。本システムは、鍵盤をユーザの手とともに撮影し、練習する曲の五線譜と重ね合わせることで、両者の対応を視覚的に示す。また、ユーザがどの程度正しく演奏できたかは点数化され表示される。

## A Piano Learning System with Visual Correspondence Between Musical Scale and Keyboard

KAZUKI YAMADA<sup>1,a)</sup> KUNIO YAMAMOTO<sup>1,b)</sup> TSUKASA NOMA<sup>1,c)</sup>

**Abstract:** One of the difficult things in playing the piano is to play with simultaneously reading music. Paying attention to the similarity of order between pitch and key on a keyboard, we developed a piano learning system for music reading during performance. The system captures the image of keyboard with player's hands, and appropriately shows it with a learned music score to visualize the correspondence between scale and keyboard. The accuracy of a player's performance is evaluated and indicated in points.

### 1. はじめに

楽器の演奏は、古くから代表的なエンタテインメントの一つである。しかし、エンタテインメントとしての楽器の演奏では、楽しめる程度になるまでの練習が大きな障壁となっており、なるべく容易に上達できるよう支援することが望まれている。特に、ピアノは楽器の中でも人気のある楽器であり、ピアノを演奏できるようになりたいと考える人は多い。楽譜を用いてピアノを練習する際は、リズム感、音感、指使いなど、様々な技術が必要であり、その中でも読譜はピアノ演奏の基礎となる重要な技術である [1], [2]。また、単に読譜するだけでなく読譜しながら演奏する技術は、ピアノ演奏の上達には欠かせない [3]。しかし、初心者にとってこれは困難であり、習得には多大な時間や労力を必要とする。Rogers らの研究 [4] のように、視覚的にピアノ演奏を練習させる試みはあるが、読譜とは結びつかない。

これらの問題を解決するために、竹川ら [5], [6] は読譜しながらの演奏の練習を支援するシステムを提案している。このシステムでは、ピアノ上部にプロジェクタを設置し、鍵盤やその周辺に、楽譜や運指番号といった演奏を支援する情報を映し出す。また、楽譜の音符と鍵を線で結ぶことで読譜学習を支援している。しかし、楽譜と鍵盤とが離れているため、単に音符と鍵とを線で結ぶだけでは両者の対応を把握しづらく、読譜学習には不十分である。一方、雨宮ら [7] は音高または音の長さ（音価）の学習を対象としたシステムを提案している。このシステムでは、バーが楽曲に合わせて楽譜上を右方向へ移動し、音符とバーが重なったタイミングで打鍵することでタイミングや音価の学習を進める。また、音符の下に [ド], [レ], [ミ] などの音名を表示する機能があり、表示と非表示を切り替えることで音高の学習を進める。しかし、音名の表示により音符を見ずに弾けるため、初心者は音名だけに集中してしまい、音名と音符との対応を学習することは難しい。また、非表示にした場合の支援がないことも問題であり、演奏を計算機のキーボードで行うため、実際のピアノ演奏への効果は検証されていない。

<sup>1</sup> 九州工業大学  
Kyushu Institute of Technology University  
a) k\_yamada@pluto.ai.kyutech.ac.jp  
b) kunio@ai.kyutech.ac.jp  
c) noma@ai.kyutech.ac.jp

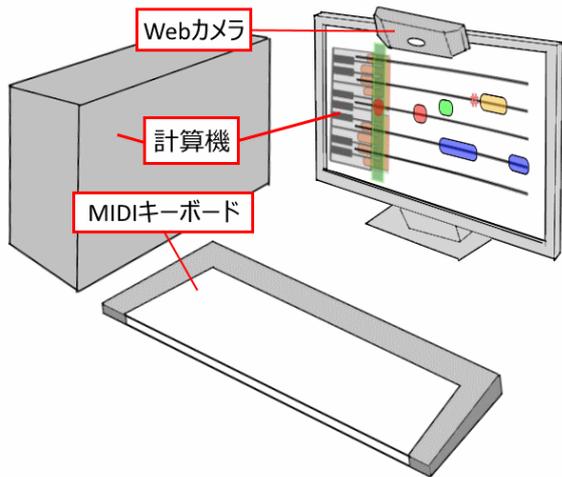


図 1 システムの構成  
Fig. 1 System overview



図 2 鍵盤映像の範囲選択  
Fig. 2 Area selection of the keyboard image

そこで本研究では、音階上の音の順序と鍵盤上の鍵の順序が一致することに着目し、両者の対応付けをより効率的に学習できるシステムを開発する。

## 2. システムの概要

本システムは、MIDI キーボード、Web カメラ、計算機により構成される (図 1)。ユーザは、計算機のディスプレイの前に MIDI キーボードを設置し、演奏に必要な部分の鍵盤が映るように Web カメラを設置する。なお、一般的な Web カメラの解像度は縦幅より横幅のほうが大きいいため、MIDI キーボードが横向きに映るように、計算機のディスプレイの上部に設置する。

また、ユーザは Web カメラで撮影した映像から、システムに指定された鍵盤の範囲を四角形で選択する (図 2)。システムは選択された部分を長方形に補正して鍵盤映像を生成する。

本システムの画面を図 3 に示す。まず、画面には楽譜と同様に五線を表示し、鍵盤映像を五線の音高と鍵盤の音高が対応する位置に、大きさ、向き、位置を調整して表示する (図 4)。ユーザが楽曲を選択すると初心者にとって難しい音符の代わりに音符オブジェクト、音価バー、変化オブジェクトを表示する。練習を開始すると、楽曲に合わせて打鍵バーと鍵盤映像を右方向に移動し、ユーザは音符オブジェクトが打鍵バーに重なったタイミングで打鍵し、システムはその打鍵を評価する。

打鍵すべき音を示す音符オブジェクトは、音価を表現する音価バーが後ろに重なった形で表示される。また、変化記号 (シャープやフラット等) の情報を持つ変化オブジェクトは、音符オブジェクトの左端に表示される。

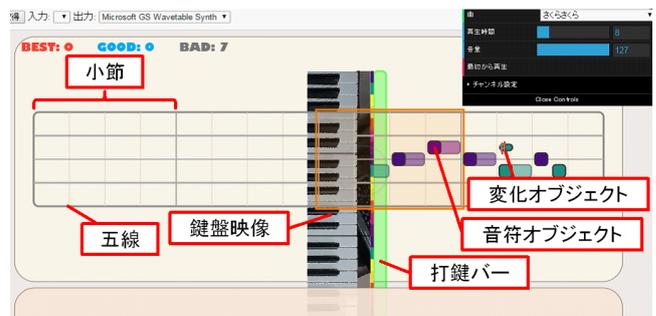


図 3 本システムの画面  
Fig. 3 System screenshot

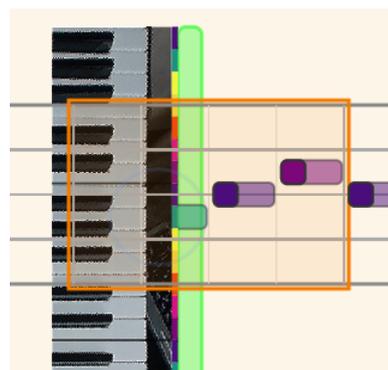


図 4 鍵盤映像の配置  
Fig. 4 Arrangement of the keyboard image

## 3. 手法

### 3.1 演奏データ

演奏データは、MIDI ファイル [8] をもとに練習開始時に作成される。ここで、各情報に対するパラメータを表 1 とする。メタデータとして、楽曲のテンポ  $T_t$  と拍子の情報

表 1 演奏データに用いるパラメータ  
Table 1 Parameters for music data

パラメータ	説明
$T_t$ [ms]	テンポ
$M_d$	拍子の分母
$M_n$	拍子の分子
$D$	任意の音データ
$D_p$	D の音高
$D_t$ [ms]	D の鳴り始めの絶対時間
$D_v$ [ms]	D の音価

$\frac{M_n}{M_d}$  を持つ。また、楽曲データとして、楽曲中のすべての音のデータ  $D$  を持つ。音データ  $D$  は、音高  $D_p$ 、音価  $D_t$ 、タイミング  $D_v$  の情報を持つ。

また、音高の情報として、十二平均律を使用し、音階を [ド], [ド♯], [レ], [レ♯], [ミ], [ファ], [ファ♯], [ソ], [ソ♯], [ラ], [ラ♯], [シ] とする。ここで、1 オクターヴにおける [ド] の音高に対する [ド] から [シ] の音高の差を  $Q$  とすると、 $Q$  は音高  $D_p$  を 12 で割った余りとなる。音高の差  $Q$  と音名との関係を表 2 に示す。

### 3.2 各オブジェクトの描画

本システムは図 5 に示すように、横方向に  $x$  軸を、縦方向に  $y$  軸をとる。描画される譜面は一段につき 4 小節とする。音データ  $D$  から描画される音符オブジェクトを  $N$  とし、 $N$  の座標  $(N_x, N_y)$  を求める。

まず、一段の演奏にかかる時間  $S_t$ [ms] を楽曲のテンポ  $T_t$ 、楽曲の拍子  $\frac{M_n}{M_d}$  を用いて式 (1) より求める。

$$S_t = \frac{16M_n}{M_d} T_t \quad (1)$$

図 5 より、五線全体の幅を  $S_w$ [pixel] の定数とし、システム側で決定する。ここで、音符オブジェクト  $N$  の  $x$  座標  $N_x$ [pixel] を、音のタイミング  $D_t$  を用いて式 (2) より求める。

$$N_x = \frac{D_t \bmod S_t}{S_t} S_w \quad (2)$$

次に、音符オブジェクト  $N$  の  $y$  座標  $N_y$  を求める。図 5 より五線全体の高さを  $S_h$ [pixel] の定数とし、システム側で決定する。ここで、音階の音が隣り合う音符オブジェクト同士における  $y$  座標の差は、五線の隣り合う線同士の幅が  $\frac{S_h}{4}$  であることから、 $\frac{S_h}{8}$  となる。本システムでは、図 6 に示す [ド] の音符オブジェクトの音高を 0 として計算する。図 6 の [ド] の  $y$  座標を  $Y_c$ [pixel] とし、 $Y_c$  を式 (3) より求める。

$$Y_c = \frac{10S_h}{8} \quad (3)$$

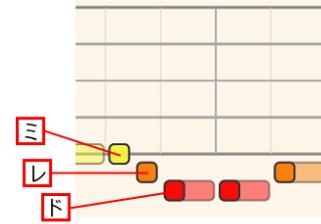


図 6 システム画面の五線と音符オブジェクト  
Fig. 6 Note objects on the staff

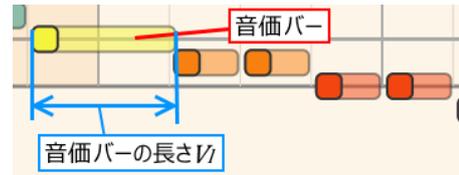


図 7 音価を表現する音価バー  
Fig. 7 Note value bar representing note value

また、音符オブジェクトは変化オブジェクト付きでも位置が変わらないため、白鍵のみを考慮して 1 オクターヴを 7 分割して位置を決定する。[ド] の白鍵を 0 番とした時の [ド] から [シ] の白鍵の相対的な番号を  $R_Q$  とする。ここで、音高の差  $Q$  と  $R_Q$  との関係を表 3 に示す。音符オブジェクト  $N$  の  $y$  座標を  $N_y$ [pixel] とすると、 $N_y$  は音高  $D_p$  を用いて式 (4) より求まる。

$$N_y = Y_c - 7 \left[ \frac{D_p}{12} \right] \frac{S_h}{8} - R_Q \frac{S_h}{8} \quad (4)$$

これらの計算により、音符オブジェクト  $N$  の描画位置  $(N_x, N_y)$  が求まる。

また、図 7 より、音価バーの長さを  $V_l$ [pixel] とすると、 $V_l$  は、五線の幅  $S_w$ 、一段の演奏にかかる時間  $S_t$ 、音の音価  $D_v$  を用いて、式 (5) より求まる。

$$V_l = \frac{D_v}{S_t} S_w \quad (5)$$

なお、音符オブジェクトと音価バーの色は音高の差  $Q$  によって変わる (表 4)。

また、変化オブジェクトは音符オブジェクトの左端に表示される。なお、楽譜と同様に表示するため、変化オブジェクトが付いても音符オブジェクトの位置は変化しない。その代わりに、本システムでは視覚的に判別が容易になるように、変化オブジェクトが付いた音符オブジェクトは高さを通常の半分にして表示している。

### 3.3 鍵盤映像の取得と描画

ユーザは練習を始める前に範囲選択画面 (図 8(a)) から、演奏に必要な部分を選択する。なお、選択する範囲はシステム側で決定しユーザに提示する。システムは、

表 2 音高の差  $Q$  と音名との関係

Table 2 Relationship between difference of pitch  $Q$  and key signature names

音高の差 $Q$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
音名	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ



図 5 座標系の定義と五線の大きさ

Fig. 5 Coordinate system and staff size

表 4 音高の差  $Q$  と音符オブジェクトの色との関係

Table 4 Relationship between difference of pitch  $Q$  and color of the note object

音高の差 $Q$	音符オブジェクトと音価バーの色 (r,g, b)
0	赤 (250, 10, 10)
1	橙赤 (243, 69, 16)
2	橙 (247, 128, 51)
3	黄橙 (244, 211, 61)
4	黄 (244, 244, 61)
5	緑 (19, 143, 50)
6	青緑 (27, 145, 129)
7	青 (28, 12, 129)
8	青紫 (74, 13, 123)
9	紫 (124, 7, 120)
10	紫萼 (167, 20, 136)
11	萼 (215, 18, 133)

ユーザが選択した範囲から射影変換 [9] を用いることで鍵盤映像 (図 8(b)) を得る。

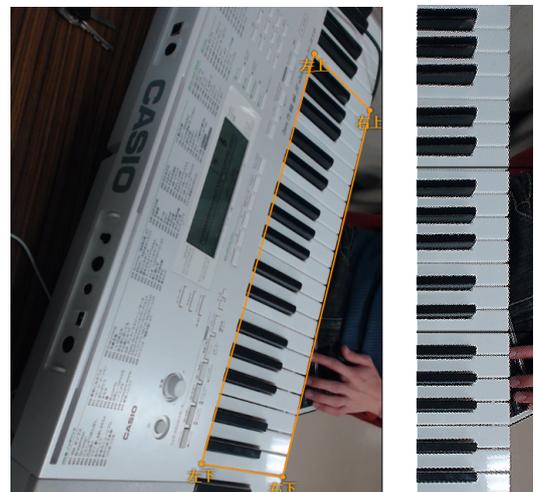
まず、映像の射影変換を行うための射影変換行列  $H$  を式 (6) として定める。

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、任意の 2 点の座標を  $(X, Y)$ ,  $(X', Y')$  としたときの射影変換式は式 (7) となり、各  $h_{i,j}$  を求める。

$$\begin{cases} X' = \frac{h_{11}X + h_{12}Y + h_{13}}{h_{31}X + h_{32}Y + h_{33}} \\ Y' = \frac{h_{21}X + h_{22}Y + h_{23}}{h_{31}X + h_{32}Y + h_{33}} \end{cases} \quad (7)$$

次に、鍵盤映像の画面の幅を  $G_w$  [pixel]、鍵盤映像の出力



(a) 範囲選択画面

(b) 出力画面

図 8 鍵盤映像の範囲選択画面と出力画面

Fig. 8 Selected keyboard image area and its transformed output

画面の高さを  $G_h$  [pixel] とすると、鍵盤映像の各画素は式 (8) で範囲選択画面上のどの画素に対応するかが求まる。

$$\begin{cases} X' = \frac{h_{11}j + h_{12}i + h_{13}}{h_{31}j + h_{32}i + h_{33}} & (i = 0, \dots, G_h - 1) \\ Y' = \frac{h_{21}j + h_{22}i + h_{23}}{h_{31}j + h_{32}i + h_{33}} & (j = 0, \dots, G_w - 1) \end{cases} \quad (8)$$

範囲選択画面の画素値を  $F_v(l, k)$ 、鍵盤映像の画素値を  $G_v(j, i)$  とする。式 (9) より出力画面に描画する。これにより、最近傍法を利用した描画になる。

$$G_v(j, i) = F_v(\lfloor X' + 0.5 \rfloor, \lfloor Y' + 0.5 \rfloor) \quad (9)$$

さらに、出力画面に描画された鍵盤映像を五線上に描画する。五線と鍵盤映像の音高を合わせるために、鍵盤映像

表 3 音高の差  $Q$  と白鍵の位置  $R_Q$  との関係

Table 3 Relationship between difference of pitch  $Q$  and position of white key  $R_Q$

音高の差 $Q$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
白鍵の相対的な番号 $R_Q$	0	0	1	1	2	3	3	4	4	5	5	6

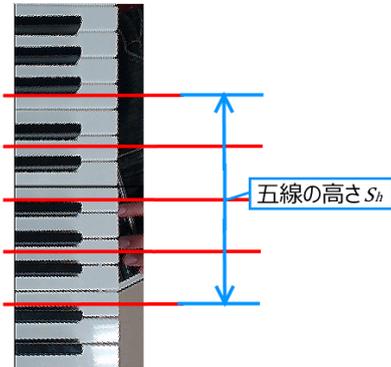


図 9 五線と鍵盤の対応関係

Fig. 9 Correspondence between staff and keyboard

の大きさと五線上の  $y$  座標を求める。図 9 より、五線の高さ  $S_h$ [pixel] は白鍵の 8 鍵分の高さに対応することがわかる。ここで、範囲選択画面で選択された範囲を  $O_k$  オクターヴとし、図 10 より五線上に描画する鍵盤映像の高さを  $K_h$ [pixel] とする。1 オクターヴ分の白鍵は 7 鍵であるので、 $K_h$  は式 (10) より求まる。

$$K_h = \frac{7}{8} S_h O_k \quad (10)$$

図 11 より鍵盤映像の上端の  $y$  座標を  $K_y$ [pixel] とする。ここで、鍵盤映像の鍵盤の音高と五線の音高を調整するために、 $O_c$  オクターヴの差を設ける。なお、 $O_c$  は定数とし、使用する MIDI キーボードの仕様に合わせてシステム側で決定する。 $K_y$  を式 (11) より求める。なお、同式の  $\frac{3.5}{8} S_h$  は、[ド] と [ファ] の差が 3 鍵分であることと、鍵盤と音符のズレの  $\frac{1}{16} S_h$  を考慮したものである。

$$K_y = \frac{3.5}{8} S_h + \frac{7}{8} S_h O_c \quad (11)$$

なお、鍵盤映像の幅  $K_w$  は鍵盤映像の見やすさを考慮して定数としてシステム側で決定する。

最後に、練習開始後の右にスクロールしていく際の描画位置を求める。まず、図 11 より打鍵バーの基準点を  $(B_x, B_y)$  とし、楽曲の再生開始からの時間を  $T_p$ [ms] とする。一段の演奏にかかる時間  $S_t$ 、五線の幅  $S_w$  を用いて、 $T_p$  における  $B_x$  を式 (12) より求める。

$$B_x = \frac{T_p \bmod S_t}{S_t} S_w \quad (12)$$

なお、 $B_y$  は、鍵盤映像の上端の  $y$  座標  $K_y$  と同じである。

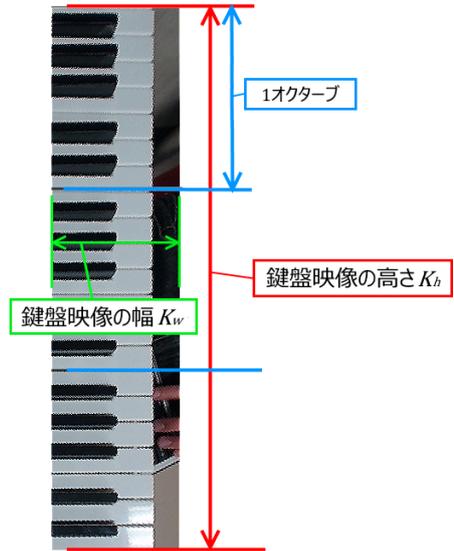


図 10 鍵盤映像の幅と高さ

Fig. 10 Width and height of keyboard image

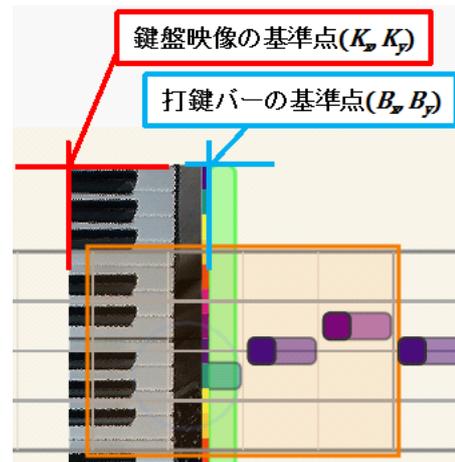


図 11 鍵盤映像及び打鍵バーの位置

Fig. 11 Position of keyboard image and touch timing bar

### 3.4 演奏の評価

打鍵されたタイミングと理想的なタイミングとのずれを照合し、3段階で評価する。再生開始からの時間  $T_p$  と音のタイミング  $D_t$  との差の絶対値を  $T_a$ [ms] とし、表 5 より評価値を決定する。また、現時点までの評価値の合計を得点として表示する。

### 3.5 エフェクトの表示

ユーザがテンポや打鍵のタイミング、また打鍵の評価を視覚的に把握できるように、カウントダウンエフェクト、テンポエフェクト、音符エフェクト、評価エフェクトを表

表 5 評価値と許容時間

Table 5 Evaluation and allowance time

評価値	許容時間 [ms]
BEST	$T_a \leq 100$
GOOD	$100 < T_a \leq 200$
BAD	$200 < T_a$

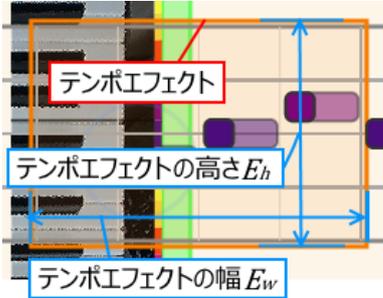


図 12 テンポエフェクト

Fig. 12 Tempo effect

示する。

カウントダウンエフェクトは、楽曲の再生まで時間の余裕を持たせるために、ユーザの練習開始時に表示する。形状は楽曲のテンポ  $T_t$  [ms] 時間ごとに 〈3〉, 〈2〉, 〈1〉, 〈GO〉 の順番に遷移するため、ユーザは事前に楽曲のテンポを知ることが出来る。

テンポエフェクトとして、楽曲の再生中にテンポに合わせて1小節分の大きさの矩形がアニメーションする(図12)。アニメーションの周期は楽曲のテンポ  $T_t$  時間であり、これによりユーザは演奏中に楽曲のテンポを知ることが出来る。図12より、矩形の幅を  $E_w$  [pixel]、矩形の高さを  $E_h$  [pixel] とし、それぞれの最大値を  $E_{w_{max}}$  [pixel]、 $E_{h_{max}}$  [pixel] とする。五線の幅  $S_w$ 、五線の高さ  $S_h$ 、再生開始からの時間  $T_p$  を用いて、 $E_w$ 、 $E_h$  を式(13)より求める。

$$\begin{cases} E_w = \frac{S_w}{4} + (E_{w_{max}} - \frac{S_w}{4}) |\sin(\frac{T_p}{T_t} \pi)| \\ E_h = S_h + (E_{h_{max}} - S_h) |\sin(\frac{T_p}{T_t} \pi)| \end{cases} \quad (13)$$

音符エフェクトは理想の打鍵のタイミングと同時に、音符オブジェクトを中心に円の半径が徐々に大きくなるエフェクトを表示する(図13)。

また、評価エフェクトとして、ユーザの打鍵を評価した時に、評価の対象となった音符オブジェクトの上部に評価を表示する(図14)。

#### 4. 実験と考察

本システムを表6の環境で実装し、評価実験を行った。

##### 4.1 評価実験

ピアノ未経験者である被験者5名に本システムを利用し

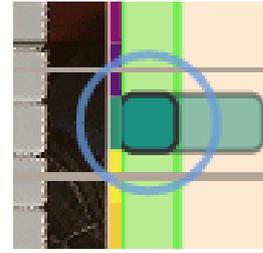


図 13 音符エフェクト

Fig. 13 Note effect

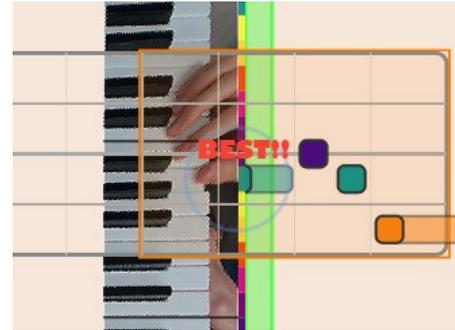


図 14 評価エフェクト

Fig. 14 Evaluation effect

表 6 本システムの実装と実験に利用した計算機環境

Table 6 Computer environment of this system

OS	Microsoft Windows 7 Professional
CPU	Intel(R) Core(TM) i7 CPU 3.33GHz
メモリ	24.0GB
開発言語	JavaScript
ライブラリ	MIDI.js[10]
Web カメラ	Logicool HD Pro Webcam C920
MIDI キーボード	CASIO LK-218

てもらった。被験者には、あらかじめ、本システムの操作方法や演奏方法を説明し、システムの操作に慣れてもらうために、練習曲で10分間自由に練習してもらった。次に、課題曲を演奏してもらい、得点を記録した。その後、再び練習曲で10分間自由に練習をしてもらい、課題曲で得点を記録し、1回目の得点との比較を行った。また、課題曲を実際の楽譜のみを見ながら、本システムの楽曲に合わせて演奏してもらい、得点を記録した。最後に、アンケートを行った。アンケートの内容を表7に示す。なお、アンケートは、4段階評価(1点から4点の点数式で、点数が高いほど高評価であるとする)によるものとした。また、各項目に対する自由記述欄を設け、評価理由を記述してもらった。

なお、本実験では、練習曲として「蛍の光」、「さくらさくら」、「ちょうちょう」、「シャボン玉」、「むすんでひらいて」、「グーチョキパー」、「クラリネットをこわしちゃった」の7曲、課題曲として「きらきら星」を用意した。

表 7 アンケート内容

Table 7 Questionnaire questions

番号	内容
(1)	鍵盤映像の範囲指定の作業は容易であったか
(2)	簡単に操作方法を把握できたか
(3)	音符と鍵の対応は取りやすかったか
(4)	鍵盤映像に手が表示されることで弾きやすく感じたか
(5)	今後、本システムで練習を続けることで上達できそうか
(6)	本システムの総評

## 4.2 実験結果

課題曲で記録した得点を表 8 に示す。なお、得点は BEST, GOOD, BAD の各評価の個数とし、課題曲の場合、すべての合計は 42 となる。また、表 8 の見方として、左から順に BEST, GOOD, BAD の得点とする。表 8 より、システムを利用した 1 回目と 2 回目の比較では、3 名の被験者において BAD の数の減少が見られた。しかし、BEST の数が増加しなかった被験者も 3 名いた。また、実際の楽譜を用いた場合では、3 名の被験者において BAD の数が 0 もしくは 1 だった。

アンケートによる評価結果を表 9 に示す。表 9 より、比較的高い評価を得ることができたが、項目 (1) と項目 (3) に関しては高い評価を得ることができなかった。理由として、項目 (1) に関しては、どの部分を範囲選択するのかを明確に表示して欲しいという意見が得られた。また、項目 (3) に関しては、鍵盤映像に指先しか映っておらず手の位置を把握しづらかったという意見が得られた。その他の意見として、音階と鍵盤の対応が大体把握できたという意見が多く得られた。

## 4.3 得点からの考察

課題曲の得点から、BAD の数の減少が見られることからシステムを利用した練習によって上達したと言える。一方で BEST の数の増加があまり見られなかったのは、BEST の評価の許容時間が短かったことが原因だと考えられる。

## 4.4 考察

アンケートの項目 (1) については、操作は容易であるが細かな調整が難しいという意見が得られたため、解決策として画像処理により鍵盤映像の取得を自動化するなどの仕組みを考えたい。アンケートの項目 (3) 及び項目 (4) については、白鍵と音符オブジェクトの位置がうまく合っており弾きやすかったという意見が得られた。一方で、鍵盤映像には指先しか映っていないため把握しづらかったという意見が得られたため、解決策として手の全体が映るように取得範囲をシステム側で広くするなど挙げられる。アンケートの項目 (5) については、機能を増やせば続けられそうという意見が多く得られた。一方で、運指を考慮していないので上級者を目指すのは困難であるという意見も得ら

れたため、武内の研究 [11] を参考に運指を考慮した各オブジェクトの形状を考えたい。最後に、本システムの総評として、鍵盤映像が見づらかったが音符と鍵の対応は取りやすかったという意見が多く得られ、音階と鍵盤の対応を直観的に把握させるという点に関しては達成できたと言える。鍵盤映像の描画方法に関しては、実験的でもあったため、今後は手法を変えて検証する必要がある。

## 5. まとめと今後の方針

本研究では、鍵盤の映像を五線上の適切な位置に重ねることで、音の高さと鍵の位置との対応を直観的に把握させるシステムを開発した。これにより、ピアノ初心者が読譜しながらの演奏をより容易に習得することを目指した。

評価実験の結果から、おおむね得点の向上が見られ、読譜しながらの演奏の効率的な練習ができることを確認できた。

アンケートから、鍵盤映像により音符と鍵の対応の把握が容易になることが確認できた。一方で、鍵盤映像が見にくい、鍵盤映像を見る余裕がない、変化オブジェクトが判別しづらいなどの意見も得られた。

今後の課題として、鍵盤映像の範囲選択方法や各オブジェクトの描画方法を改善する必要がある。また、鍵盤映像の描画方法の改善により、手の位置をより把握しやすくする必要がある。そして、音符オブジェクトの描画方法にバリエーションをもたせ、難易度によって描画方法を変えるなど、より効率的な読譜学習ができるシステムを目指す。

## 参考文献

- [1] 岩城美緒, 國宗永佳, 新村正明, “初期ピアノ学習の学習項目の整理,” 情報処理学会研究報告 Vol.2011-MUS-90 No.7, pp. 1–5, 2011.
- [2] 石橋史生, “ピアノの演奏における表現のための基礎技術,” 東京学芸大学紀要 芸術・スポーツ科学系 Vol.66, pp. 1–14, 2014.
- [3] 荻田泉, “幼児・初等教育の指導者養成におけるピアノ指導法の研究: 初心者の学習意欲を高める教授法について,” 四天王寺大学紀要 第 53 号, pp. 215–232, 2012.
- [4] Katja Rogers, et al., “P.I.A.N.O.: Faster Piano Learning with Interactive Projection,” 9th ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 149–158, 2014.
- [5] 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦, “リズム学習を考慮したピアノ演奏学習支援システムの構築,” インタラクシオン 2012, pp. 73–80, 2012.
- [6] 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.
- [7] 雨宮聡子, 金子敬一, “音高と音価に着目した読譜学習システムの設計と実現,” 情報処理学会研究報告コンピュータと教育研究会 2006(46), pp. 7–14, 2006.
- [8] 塚本慶一郎, 斉藤潤一, MIDI バイブル I MIDI1.0 規格基礎編, リットーミュージック社, 1997.
- [9] 奥富正敏ほか, デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, 2004.
- [10] MIDI.js - Sequencing in Javascript,

表 8 得点 (BEST|GOOD|BAD)  
Table 8 Scores(BEST|GOOD|BAD)

被験者	A			B			C			D			E		
システム 1 回目	35	2	5	36	5	1	33	5	4	36	6	0	21	12	9
システム 2 回目	28	12	2	36	4	2	33	7	2	42	0	0	28	13	1
楽譜	39	3	0	33	3	6	31	10	1	37	4	1	29	4	9

表 9 評価結果  
Table 9 Evaluation result

被験者	A	B	C	D	E
(1) 鍵盤映像の範囲指定の作業は容易であったか	4	2	2	3	4
(2) 簡単に操作方法を把握できたか	4	4	3	4	4
(3) 音符と鍵の対応は取りやすかったか	3	3	2	1	2
(4) 鍵盤映像に手が表示されることで弾きやすく感じたか	3	3	3	2	3
(5) 今後、本システムで練習を続けることで上達できそうか	3	3	2	3	3
(6) 本システムの総評	4	4	3	3	3

<http://mudcu.be/midi-js/>, mudcube.

- [11] 武内俊之, “ピアノ演奏における運指法についての基本概論,” 福岡教育大学紀要 第 63 号 第 5 分冊, pp. 1-8, 2014.