

タテ線譜と初心者向けピアノ運指のSMFからの自動生成

佐藤 陸^{1,†1} 中村 栄太² 齋藤 康之^{1,a)} 阿方 俊³ 五十嵐 優³ 嵯峨山 茂樹⁴

概要: 現在の楽譜の主流は、ピアノに限らず五線譜である。五線譜は多数の楽器の楽譜に採用されているものであり、情報量も多い。しかし、五線譜に慣れていない人にとってはその複雑さによって読むことが難しい。一方、阿方によって考案されたタテ線譜は、ピアノ演奏初心者が読譜し易い新しい楽譜であり、五線譜とは異なり簡素で直感的である。従来、タテ線譜は手動で作成されているが、本研究ではこれをSMFからピアノ運指を含めて自動生成する方法について検討する。さらに、SMFの内容に合わせて表示する音階の上限と下限を変えられるようにした。

キーワード: タテ線譜, 自動運指決定, SMF

Automatic creation of score in vertical line notation and piano fingering for beginner player from SMF

SATO RIKU^{1,†1} NAKAMURA EITA² SAITO YASUYUKI^{1,a)} AGATA SUGURU³ YUU IGARASHI³
SAGAYAMA SHIGEKI⁴

Abstract: The current mainstream of music score employs staff notation. Not limited within piano, staff notation is used for many types of instruments as it can contain a large amount of information. It is, however, often hard to read staff notation for novice players who are not familiar with it because of its complexity. On the other hand, Agata proposed vertical line notation (VLN) which is a new type of notation. It is simple, intuitively designed and thus easy to understand. In this study, we examined a method of creating music scores on VLN including piano fingering for beginner player automatically from standard MIDI files (SMF), furthermore, a method of regulating upper and lower limits of displaying scale.

Keywords: Vertical line notation, Automatic piano fingering, SMF

1. はじめに

子供、保育士を目指す学生、定年を迎えた方などがピアノ演奏の練習を始めることがある。その際、楽譜を読む必

要があるが、ピアノ演奏の初心者の多くは通常の五線譜を読むことは難しい。これは初心者がピアノ演奏の練習をするにあたって大きな障害となる。タテ線譜は主にこのようなピアノ演奏の初心者が使用するために阿方によって1985年に考案され、2010年から昭和音楽大学でその効果について実証実験を重ねている [1], [2]。

現在、タテ線譜は表計算ソフトウェアなどを使用して手動で作成されている。そのため、作成にかかる手間と時間が大きい。これを改善するため、本研究では、既存のSMF (standard MIDI file) からタテ線譜およびピアノ初心者向けの運指を自動的に生成するソフトウェアを構築する。

¹ 木更津工業高等専門学校 情報工学科
NIT, Kisarazu College, Kisarazu, Chiba 2921-0041, Japan
² 京都大学 大学院情報学専攻 知能情報学専攻
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
³ 昭和音楽大学
Showa University of Music, Kawasaki, Kanagawa 215-8558, Japan
⁴ 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科
Meiji University, Nakano-ku, Tokyo 164-8525, Japan
^{†1} 現在、豊橋技術科学大学
Presently with Toyohashi University of Technology
^{a)} saito@j.kisarazu.ac.jp

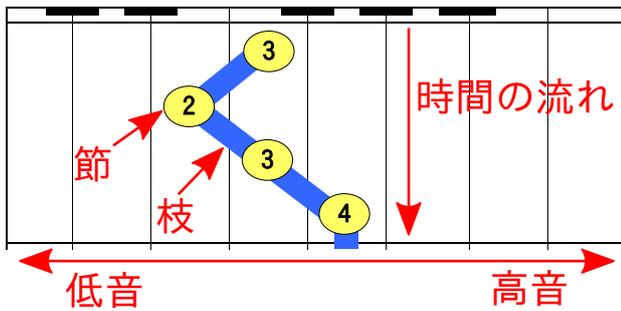


図 1 タテ線譜の形式

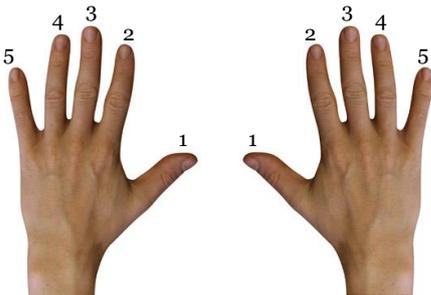


図 2 各指に割り当てられる運指番号

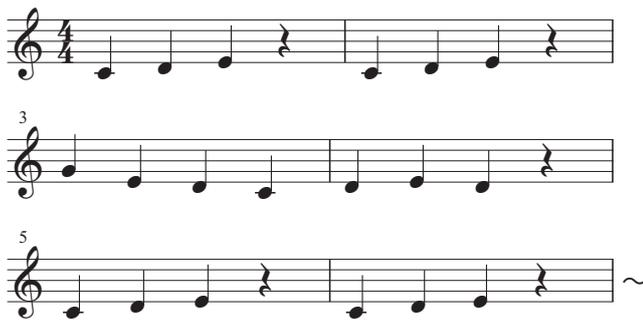


図 3 五線譜による「チューリップ」

2. タテ線譜

タテ線譜は、主にピアノ演奏の初心者が読むために考案された。図 1 にタテ線譜の形式を示す。縦方向が時間の進行を、横方向が音の高さを示す。タテ線譜には音階を表す「節」と、音の長さを表す「枝」の 2 つの要素が音符を表している。また、節の内部には運指番号(図 2 参照)が示されている。そのため、節の位置の鍵を運指番号の通りに打鍵していくと、正しい運指でピアノを演奏できる。例として、図 3 に「チューリップ」の五線譜を、図 4 にタテ線譜によるものを示す。

たとえば、図 5 のような五線譜は、ひとつの小節(楽譜を区切る単位)あたりの情報量が多く、音符の記号も直観的でなく、読み方を知らない人が読むのは難しい。一方、図 6 では、節は実際の音高に位置しているため、読み間違えることは少ない(たとえば、C と F を間違える場合があるが、これについては 7 章で言及する)。

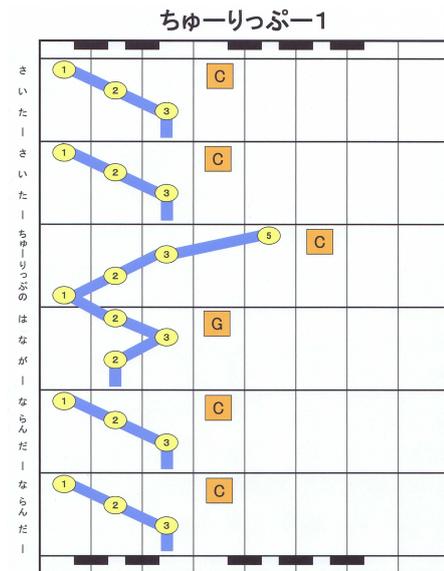


図 4 タテ線譜による「チューリップ」(手動作成版)



図 5 臨時記号を含む五線譜(音名の括弧書きは異名同音)。

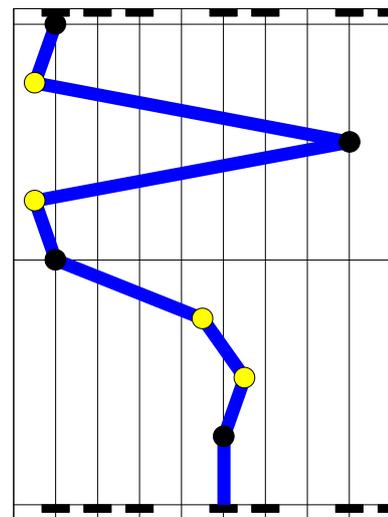


図 6 図 5 と等価なタテ線譜(黒鍵に対応する節は黒地で表現)

ある音符とその次の音符の間に休符が挟まれていない場合は、その音符の枝と次の音符の節がつながる。ピアノの鍵盤が記載されており、音符の音の高さとピアノの鍵盤の位置は一致している。また、印刷時に拡大、縮小を調整することでタテ線譜上の鍵盤の幅とピアノの鍵盤の幅が一致するので、そのようなタテ線譜をピアノの鍵盤の奥に配置すれば、節の真下に打鍵すべき鍵を配置できるので、さらに演奏しやすくなる。このことにより、ピアノ演奏および楽譜を読む初心者でも、楽譜を見ながら演奏でき、楽譜上に難しい記号が無い場合、必要となる知識も少なくて済む。



図 7 八分音符を含んだ楽譜の例

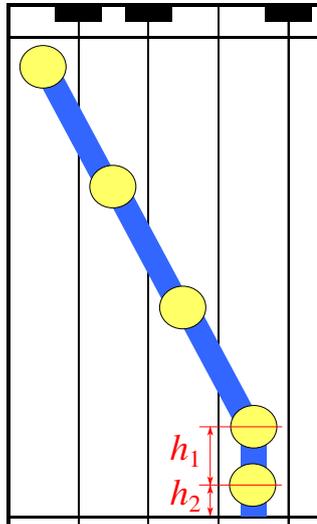


図 8 図 7 のタテ線譜表記 (手動作成版).

3. 節の位置

ソフトウェアによって自動で節を配置する場合、図 4 のような節の配置方法には問題がある。図 4 の配置方法は、節が小節区切り線と重ならないように、小節区切り線とその次の小節区切り線の間の内側に節を配置している。このような節の配置方法では、小節内の最後の枝は本来の長さよりも短くなる。楽譜の例を図 7 に、図 7 の楽譜を従来のタテ線譜で表記したものを図 8 に示す。図 7 の楽譜での 8 分音符は、従来のタテ線譜で表記すると h_1 と h_2 の長さが異なっている。この問題を解決するため、節の新たな配置方法を提案する。

図 7 の楽譜を、節の新たな配置方法を使用したタテ線譜で表記したものを図 9 に示す。図 9 の配置方法では、小節区切り線に節を重ねるものとし、ある小節区切り線からその次の小節区切り線までをちょうど 1 小節の描画範囲とした。この方法であれば、小節最後の音符の枝の長さが通常より異なるという問題を解決できる。

SMF では、ノートオンとノートオフの時刻情報が含まれているが、小節や拍の情報は直接的には含まれていない。そのため、SMF からタテ線譜を作成するには、それらの情報を求める必要がある。楽曲は $\frac{4}{4}$ 拍子で、弱起はないものとする、これらの条件において、 S をノートオンの時刻、 E をノートオフの時刻とし、 D をタイムベースとすると、音符長 l は式 (1) で求まる。

$$l = (E - S) / (D \times 4) \quad (1)$$

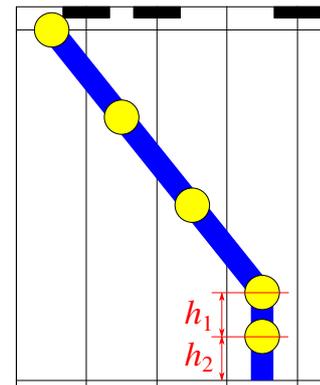


図 9 節の新たな配置方法.

ここで、 $D \times 4$ は 1 小節の長さに等しい。

小節の始まりからの音符の位置 P は、式 (2) で求まり、小節番号 M は式 (3) で求まる。

$$P = S \bmod (D \times 4) \quad (2)$$

$$M = [S / (D \times 4)] + 1 \quad (3)$$

ここで、“ \bmod ” は剰余計算を表し、“ $[]$ ” は床関数を表す。図 10 に l, P, M を示す。これらのパラメータは、タテ線譜での節の中央の y 座標 y_{node} の算出に用いられる。

$$y_{node} = h_m + h_p + h_b M + h_n \quad (4)$$

ここで、 h_m, h_p, h_b はタテ線譜の上余白、ピアノ領域、小節の高さを示し、 h_n は小節線から節までの距離を示し、

$$h_n = h_b P \quad (5)$$

で求まる (図 11)。なお、 P は分数である。 h_l はタテ線譜上での音符長を表し、式 (6) で求まる。

$$h_l = l h_b. \quad (6)$$

SMF は音符の音高情報そのものを含んでいるので、節の横方向の座標は容易に求まる。 n_{lowest} をタテ線譜上での最低音の音高とすると、そのノート番号 v_{lowest} は表 1 の最低音に対応する。節の中央の x 座標 x_{node} は、 n_{node} を節のノート番号とすると、式 (7) で求まる。

$$x_{node} = w_m + \frac{w_{key}}{2} + (n_{node} - n_{lowest}) \frac{w_{key}}{2} \quad (7)$$

ここで、 w_m はタテ線譜での左余白を示し、 w_{key} はタテ線譜上の鍵の幅を示す。なお、 x_{node} は半音単位なので、 w_{key} を 2 で割った値を用いている。

タテ線譜上での最高音は、表 2 から求める。たとえば、図 11 の場合、最低音の C4 が v_{lowest} に対応付けられる。したがって、 n_{lowest} には C4 のノート番号の 64 が代入される。また、この楽曲内の最高音は、最低音の C4 から 1 オクターブ以内なので、 $v_{highest}$ には C5 が代入される。

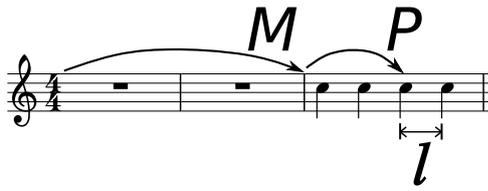


図 10 小節番号 M , 音符位置 P , 音符長 l

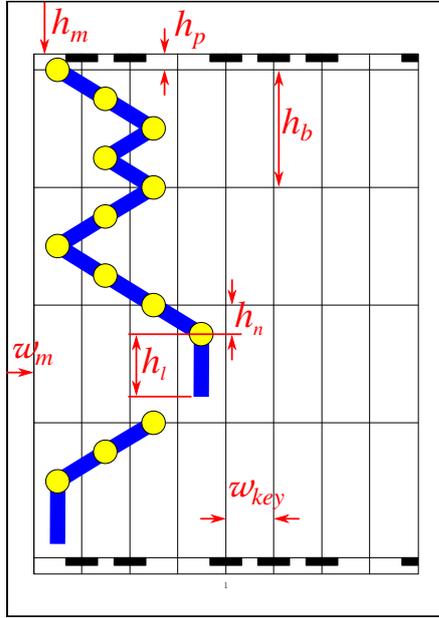


図 11 節の x および y 座標を求める上で用いる各種パラメータ

表 1 タテ線譜内の最低音。楽曲内の最低音の音名が p_{lowest} のとき、タテ線譜の表記における最低音の鍵に v_{lowest} が割り当てられる。

p_{lowest}	v_{lowest}
C, D, E	C
F, G, A, H	F

表 2 タテ線譜内の最高音。楽曲内の最低音と最高音の差が p_{range} のとき、タテ線譜の表記における最高音の鍵に $v_{highest}$ が割り当てられる。

p_{range}	$v_{highest}$
1 オクターブ以内	楽曲内の最低音の 1 オクターブ上の音高
1 オクターブ超	楽曲内の最高音

4. ピアノ初心者のための自動運指決定方法

前章に示したように、タテ線譜は SMF から自動的に生成できるが、各節にピアノ運指番号を付与する必要がある。運指番号はピアノ演奏者にとって重要であるが、その決定は容易ではない。本章では、自動ピアノ運指決定について述べる。

自動ピアノ運指決定に取り組んでいる先行研究（たとえば、文献 [3], [4], [5], [6]）があるが、我々は hidden Markov model (HMM) に基づいた方法を検討している [7]。

楽譜上の n 個目の音符 p_n に運指番号を振ることを考え

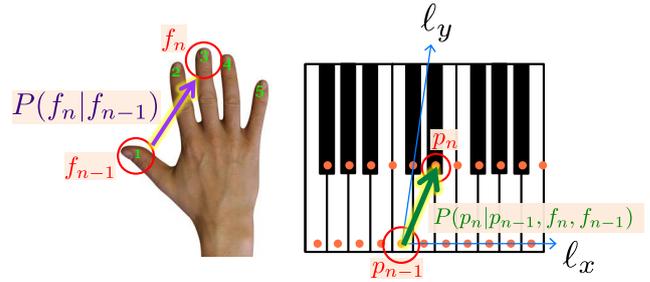


図 12 HMM に基づいたピアノ運指モデル

る。ここで、 $n = 1, \dots, N$ で、 N は音符の総数に等しい。ただし、ここでは、長い音を演奏するときの指の入れ替え（打鍵した後に、別の指でそれを押さえる）は考慮しない。まず、音高の列 $p_{1:N} = (p_n)_{n=1}^N$ が与えられたときに運指の順序 $f_{1:N} = (f_n)_{n=1}^N$ となる確率を $P(f_{1:N} | p_{1:N})$ と表すことにする。以下で述べるように、運指決定のためのアルゴリズムは、最尤推定の問題に帰着する。

$$\hat{f}_{1:N} = \operatorname{argmax}_{f_{1:N}} P(f_{1:N} | p_{1:N}) \quad (8)$$

個々の音符の運指は、楽譜上で遠方の音符よりも近傍の音符に影響され、隣接する音符間の依存性が最も重要である。すなわち、この枠組みは、マルコフモデルとして扱うことができる。これは、確率の最大化およびモデルパラメータの設定の効率の面で優れている。なお、運指の確率は音符間のオンセット間隔 (inter-onset interval) に依存するが、ここではその依存性は考慮せずに問題を簡略化する。

楽譜の音符の音は、指の移動と打鍵によって生成されると仮定すると、それらの確率は、ある指 f_{n-1} を用いた後に別の指 f_n が使われる確率 $P(f_n | f_{n-1})$ と、それら 2 本の指によってある音高 p_{n-1} および p_n が連続して演奏される確率 $P(p_n | p_{n-1}, f_{n-1}, f_n)$ によって求まる (図 12)。前者は状態遷移確率、後者は出力確率と呼ばれる。これらの確率の見地から、音符と指の確率は、式 (9) で表される。

$$P(p_{1:N}, f_{1:N}) = \prod_{n=1}^N P(p_n | p_{n-1}, f_{n-1}, f_n) P(f_n | f_{n-1}) \quad (9)$$

ここで、初期確率は $P(f_1 | f_0) \equiv P(f_1)$ および $P(p_1 | p_0, f_0, f_1) \equiv P(p_1 | f_1)$ と表され、それに応じて $P(f_{1:N} | p_{1:N})$ が与えられる。

効率よくモデルを構築するため、パラメータに設定に際していくつかの制約を設けることにする。まず、確率は、鍵盤を 2 次元格子として表現したときに、打鍵される鍵の幾何学的位置のみに依存すると仮定する。また、 x 方向における並進対称性と、出力確率の時間反転対称性も仮定する。鍵盤上の座標を $\ell(p) = (\ell_x(p), \ell_y(p))$ で表すとすると、前述の仮定より、出力確率は

$$P(p' | p, f, f') = F(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') \quad (10)$$

であり、これは

$$\begin{aligned} F(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') = \\ F(\ell_x(p) - \ell_x(p'), \ell_y(p) - \ell_y(p'); f', f) \end{aligned} \quad (11)$$

を満たす。これより、手の各々のモデルは、

$$F_\eta(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') \quad (12)$$

と表される。ここで、 η は左右の手 (L または R) を示す。さらに、これらの確率が x 方向について対称の関係にあると仮定すれば、

$$\begin{aligned} F_L(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') = \\ F_R(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') \end{aligned} \quad (13)$$

が得られる。現状のモデルは、和音をアルペジオのように扱い、すなわち、多声のパスセージを単旋律に変換することで、和音を含むパスセージに適応するように拡張されている [5]。このとき、和音の音符は低い音高から高い音高の順に並べられる。

このモデルを用いて与えられたピアノ譜に対する最適な運指を得るためには、 $P(f_{1:N} | p_{1:N})$ を最大化する必要がある。この問題は、動的計画法の一種であるピタビアルゴリズムによって効率よく解ける [8]。また、上記のモデルの両手への拡張は、文献 [9] で検討されおり、SMF 内の左右の手のパートを明示的に分け隔てることなしに、最適な運指を左右の手の各々について同時に推定できる。

状態遷移確率と出力確率のパラメータ値は先行研究 [9] で得られているものの、そのデータセットはピアノ上級者向けの指使いであり、必ずしも初心者向けではない。たとえば、同音連打において、ピアノ上級者は円滑に演奏したり響きを良くしたりするために指を変えて打鍵するが、それはピアノ初心者にとっては容易ではない。本研究では、この問題を解決するため、自己遷移確率を高く設定することで、同音連打において同じ指を用いるようにモデルパラメータを調節した。

5. ソフトウェアの仕様

本研究では、現在、入力ファイルは SMF のみに対応している。SMF は広く普及しており、また、SMF を編集可能なソフトウェアが多数存在し、プログラミング用のライブラリも充実している。SMF を作成するソフトウェアによっては、音符と音符の間に微小な休符が挟まれていることがある。この場合、枝と節を繋げるべきかの判定の妨げになる。その影響をなくすため、16 分音符以下の微小な休符は無視することにする。閾値を 16 分音符としたのは、ピアノ楽譜 (特に初心者向け) に 16 分音符より短い音符が現れることはほとんど無いためである。

SMF の読み込みには C++ 用ライブラリの Midifile [10]

を用いた。また、Boost [11] を導入し、音符長と、小節内での音符の位置の表現に使用した。たとえば、音符の長さが 4 分音符ならば分数の $\frac{1}{4}$ 、全音符ならば 1 で表現できる。

タテ線譜の描画および PDF 出力には Qt [12] を用いた。Qt は GUI を作成するためのフレームワークであり、1 つのソースツリーだけで Windows, OS X, Linux, Android などに対応したアプリケーションを作成できる。本研究では、Qt の機能の 1 つである QGraphicsScene クラスを用いて描画した。また、QPrinter クラスを使用して QGraphicsScene に描画した図形データを PDF に出力できる。なお、指番号を記すファイルのフォーマットは、指番号を記すごとに改行するものとした。

6. 実験結果

作成したソフトウェアは、SMF および運指番号の情報を読み込んで、タテ線譜を生成できることを確認した。

また、木更津高専のピアノ初心者の学生 10 名を対象とし、タテ線譜を用いて実験を行った。まず、図 4 の「チューリップ」を練習し、タテ線譜の読み方とピアノ演奏に慣れてもらった。次に、チャイコフスキー作曲「くるみ割り人形」より「行進曲」の冒頭の 2 小節 (図 13) のタテ線譜を作成し、初心者向けの運指 (図 14) と上級者向けの運指 (図 15) を用いて、この 2 小節を最初から最後まで運指を含めて間違えずに演奏できるまで、反復演奏してもらった。そのアンケート結果を表 3 に示す。いずれの被験者も五線譜が読めず、ピアノの本格的なレッスンは受けていないが、タテ線譜はすらすら、ないし、何とか読めたという回答を得た。また、初心者向けの運指のタテ線譜は、上級者向けのものよりも容易に演奏できている。

7. まとめ

従来のタテ線譜は表計算ソフトを使用して手動で作成されているが、本研究では、これを容易に作成できるようにすることを目的に、タテ線譜を自動で生成するソフトウェアを作成した。SMF を読み込み、ピアノ初心者向けの運指番号を自動的に決定し、タテ線譜を形成でき、また、PDF として出力できる。ピアノ初心者を対象に実験したところ、初心者向けの運指によるタテ線譜は上級者向けの運指に比べて容易に演奏できることが確認できた。

今後は、GUI 上で手動による運指番号の設定や、タテ線譜にタイトルの付加などの機能を追加することのほか、C や F の鍵への異なる色の付与、音符長のより明確な表現など、タテ線譜そのものの改良も検討する。さらに、初心者向けのピアノ練習支援ソフトウェアとして、演奏時の運指の正しさを自動的に評価するシステムや技量に応じた運指の生成 (たとえば「指くぐり」の有無)、若年層向けの導入教育としてのゲームを構築する予定である。また、「誰でも読める」というタテ線譜の特長を活かし、リハビリテー



図 13 チャイコフスキー作曲「くるみ割り人形」より「行進曲」の冒頭の五線譜

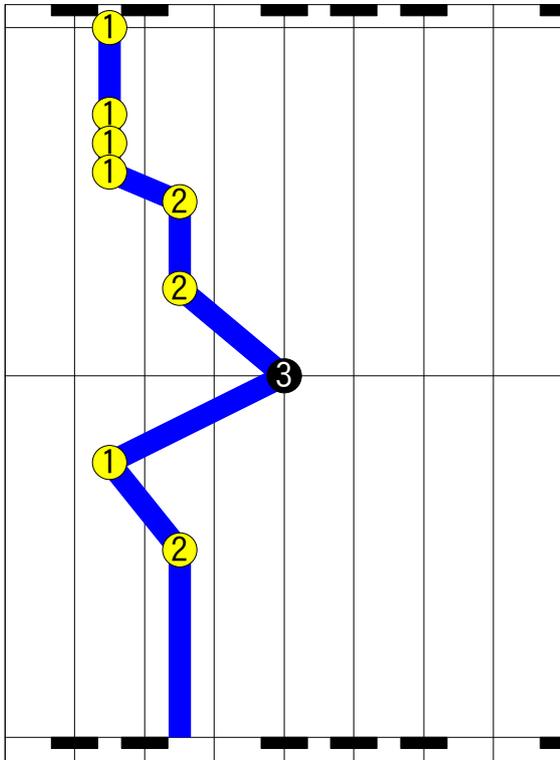


図 14 「行進曲」の初心者向けのタテ線譜

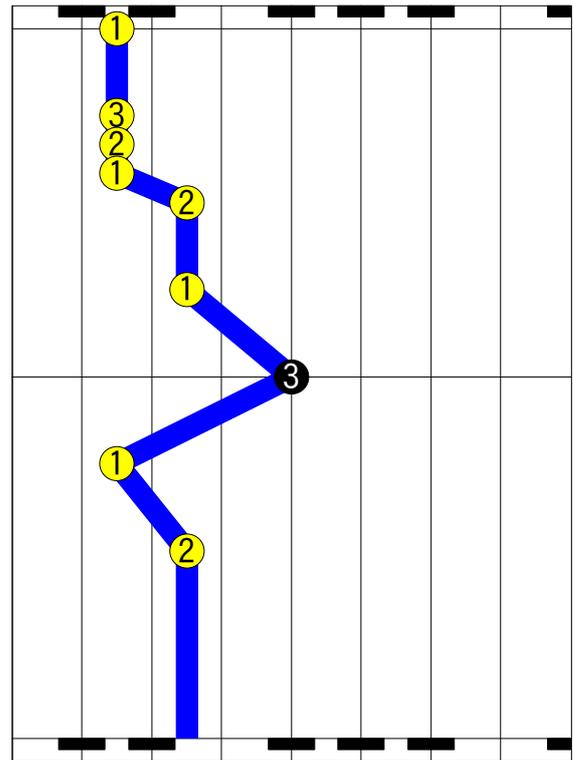


図 15 「行進曲」の上級者向けのタテ線譜

ションや音楽療法での適用が期待され、一部すでに取り組んでいるが [13], これをさらに発展・拡張していく。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究補助金 26240025, 15K16054, 16K00501 による。

参考文献

[1] 阿方 俊, 友永 和恵: タテ線譜による鍵盤楽器導入—平成音楽大学こども学科での試み—, 日本電子キーボード音楽学会 第 10 回全国大会 要項, p.17 (2014).
 [2] 阿方 俊, 五十嵐 優: M.L. 教室を利用したタテ線譜による鍵盤楽器導入—シニア対象の実践を通して—, 電子キーボード音楽研究, Vol.9, p.89 (2014).
 [3] Parncutt, R., Sloboda, J.A., Clarke, E.F., Raekallio, M. and Desain, P.: An ergonomic model of keyboard fingering for melodic fragments, *Music Perception*, Vol.14, No.4, pp.341–382 (1997).
 [4] Hart, M. and Tsai, E.: Finding optimal piano fingerings, *The UMAP Journal*, Vol.21, No.1, pp.167–177 (2000).
 [5] Kasimi, A.A., Nichols, E. and Raphael, C.: A simple algorithm for automatic generation of polyphonic piano fingerings, *Proc. ISMIR*, pp.355–356 (2007).
 [6] Balliauw, M., Herremans, D., Cuervo, D.P. and Sørensen, K.: Generating fingerings for polyphonic piano music with a tabu search algorithm, *Proc. MCM*, pp.149–160 (2015).
 [7] Yonebayashi, Y., Kameoka, H. and Sagayama, S.: Automatic decision of piano fingering based on hidden Markov

表 3 タテ線譜を用いた演奏のアンケート結果 (A: excellent, B: good, C: poor). T, M_{bgn}, M_{adv} は, チューリップ, 行進曲 (初心者向け), 行進曲 (上級者向け) を示す. 各被験者とも本格的なピアノレッスンは受けておらず, 五線譜を読めない.

被験者 番号	タテ線譜 の読譜	タテ線譜を用いた演奏		
		T	M _{bgn}	M _{adv}
1	B	B	B	C
2	B	A	A	B
3	B	A	B	B
4	B	B	A	B
5	B	B	B	C
6	B	B	C	C
7	B	B	B	C
8	A	A	A	C
9	A	A	A	C
10	B	B	A	C

models, *Proc. IJCAI*, pp.2915–2921 (2007).
 [8] Rabiner, L.R.: A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition, *Proc. IEEE*, Vol.77, No.2, pp.257–286 (1989).
 [9] Nakamura, E., Ono, N. and Sagayama, S.: Merged-output HMM for piano fingering of both hands, *Proc. ISMIR*, pp.531–536 (2014).
 [10] Midifile 公式ページ, 入手先 <<http://midifile.sapp.org/>>
 [11] Boost 公式ページ, 入手先 <<http://www.boost.org/>>
 [12] Qt 公式ページ, 入手先 <<http://www.qt.io/>>
 [13] 阿方 俊, 五十嵐 優, 佐藤 陸, 中村 栄太, 齋藤 康之, 嵯峨山 茂樹: タテ線譜を用いたピアノ教室の効果とスタンダード MIDI ファイルからのタテ線譜の自動生成, 日本福祉工学会 第 19 回学術講演会, 303, pp.31-32 (2015).