

# ピアノ運指データを用いた運指の個人性の解析

中村 栄太<sup>1,a)</sup> 齋藤 康之<sup>2</sup> 吉井 和佳<sup>1</sup>

**概要:** 運指はピアノ演奏における基礎技能であり、演奏解析・演奏支援・自動編曲・自動採譜など多くの問題と関連してピアノ運指の研究が行われている。その一方で、運指情報付きの大規模データで公開されているものではなく、大規模な定量解析や評価が難しかった。我々が収集・公開した「PIG データセット」(<http://beam.kisarazu.ac.jp/research/PianoFingeringDataset/>)には現在、クラシックピアノ曲 150 曲に対して音符ごとに指番号を付記したデータが収められており、学術研究目的であれば誰でも無料で利用できる。一部の曲に対しては、複数の演奏者による運指が収められており、運指の個人性の調査などに用いることができる。本稿では本データの内容および収集方法、また本データを用いた運指の個人性の統計解析の結果について述べる。特に、運指の持つ局所的な任意性と強い系列依存性に関して定量的な測定および特徴付けが得られた。

## 1. はじめに

音楽演奏は非常に複雑な動作を必要とする行為であり、その実現には関連する動作の計画と調整が本質的である [1, 2]。鍵盤楽器と弦楽器の演奏では、適切な運指の習得が基礎的な演奏技能と考えられている [3–8]。これらの楽器における適切な運指を求める問題は、計算論的には複雑な組み合わせ最適化問題と捉えられる。自動運指推定 [9–24] は、音楽情報処理の一つのトピックとして研究されており、演奏支援や習得支援システム [25–31]、また自動音楽編曲 [32, 33] などに応用されている。

運指の研究では個別に収集された小規模のデータを用いることが多く、これまで誰もが使える大規模の公開データはなかった。例えば運指推定の研究では、確率モデルや深層学習などの機械学習手法の応用が考えられるが、その学習や評価には音符列と対応する運指番号が記されたデータが必要になる。そこで我々は、複数のピアノ熟練者による運指を収集・整備し、世界初の大規模なピアノ運指データ「PIG (PIano fingerinG) データセット」を構築した。本稿では、本データを紹介とその解析結果について論じる。

手の大きさや演奏の習熟度の違いなどの要因により、用いられる運指は演奏者により異なる [10, 34]。そこで、運指の個人性を表現するパラメーターを含むモデルに基づく運指推定手法も提案されている [16, 20]。一方でこれまで、

同じ楽曲に対して複数の演奏者による運指の違いをデータに基づいて調べた研究は少なく [10, 19]、運指の個人性についての定量的性質はあまり明らかになっていない。PIG データセットの大きな特徴として、一部の楽曲には 4 人以上の演奏者による運指が書き込まれている。本稿では、本データセットを用いて運指の個人性についての統計解析を行い、その定量的な性質を調べる。

本研究の主な結果は、世界初となる大規模のピアノ運指データセットの構築と運指の個人性についての定量的知見である。一致率で見ると運指の個人性は比較的大きいものの、音符ごとの指の候補は概ね 2 つまでで、音符の組み合わせに対する運指には強い系列依存性があるため、用いられるものはさらに限定されることが分かった。特に運指推定問題に対するこれらの知見の示唆、および今後の課題についても議論する。

## 2. PIG データセット

### 2.1 データセットの概要

ピアノ運指データセット「PIG データセット」は西洋クラシック作曲家のピアノ曲から成り、ピアノ演奏者により付けられた運指が含まれている。現在、150 曲の楽曲が収められており、各楽曲には一つあるいは複数の運指が与えられている。なるべく多様なスタイルの音楽を含めるため、少量の楽曲の全曲に対して運指を付けるのではなく、多くの曲の一部分に対して運指のラベル付けをしてある。運指付けされた部分の典型的な長さは、楽譜 1 ページ程度で、小節数は約 20、音符数は約 300 である。

データ収集に当たっては、有名な作曲家の曲で演奏され

<sup>1</sup> 京都大学  
Kyoto 606-8501, Japan

<sup>2</sup> 木更津工業高等専門学校  
Chiba 292-0041, Japan

<sup>a)</sup> enakamura@sap.ist.i.kyoto-u.ac.jp

表 1 PIG データセットの内容.

サブセット	作曲家	曲 (小節; 音符)	異なる運指の 曲 (小節; 音符)
Bach	1	10 (218; 3,657)	40 (872; 14,628)
Mozart	1	10 (185; 2,546)	60 (1,110; 15,276)
Chopin	1	10 (244; 4,022)	50 (1,220; 20,110)
Miscellaneous	24	120 (2,533; 38,501)	159 (3,355; 50,030)
全体	24	150 (3,180; 48,726)	309 (6,557; 100,044)

る頻度が高いものを含め、音楽スタイルや作曲年代に関してなるべく広い範囲をカバーするように楽曲を選択した。一部の楽曲には、個人性を調べるために最低 4 人の異なるピアノ演奏者による運指が与えられている。これらの楽曲には J. S. Bach と W. A. Mozart と F. Chopin の各 10 曲が含まれており、それぞれ「Bach セット」「Mozart セット」「Chopin セット」と呼ぶことにする。これらに含まれないその他の楽曲は、作曲家 24 人<sup>\*1</sup>による 120 曲であり、「Miscellaneous セット」と呼ぶことにする。Miscellaneous セットにも、Bach と Mozart, Chopin の楽曲は含まれるが、それらは上記の作曲家別サブセットに含まれるものとは異なる曲である。各セットのデータ量は表 1 にまとめられている。データおよび全ての楽曲のリストは Web ページ<sup>\*2</sup>からダウンロード可能である。

PIG データセットの運指は音楽大学ピアノ学科の卒業生あるいは 20 年以上のピアノ演奏経験を持つピアノ熟練者により与えられたものである。演奏者は自身が演奏可能な楽曲を選択して、その楽曲を実際に弾くときに用いる運指を提供するように指示を与えられている。

## 2.2 データ形式

一般に、運指データの形式には 2 種類のものが考えられる。一つは、楽譜上に示された運指番号の情報であり、その楽曲に適した一つあるいは複数の運指の提案として用いられるものである。もう一つは、特定の演奏者が実際の演奏で用いる運指を記録したものである。PIG データセットには後者の運指情報が付与されている。ピアノ演奏は MIDI 信号として表され、各音符は note-on (打鍵) イベントと note-off (離鍵) イベントのペアによって記述される。PIG データセットの運指情報は各音符に対して指番号を付与する形で示されている。

PIG データセットには、楽譜 PDF と運指ファイルと呼ばれる形式のファイルが含まれている。運指ファイルには、発音時刻の順番で各行に各音符の情報が以下の形式で

<sup>\*1</sup> 具体的には, Albeniz, Bach, Bartók, Beethoven, Brahms, Chopin, Debussy, Dvořák, Fauré, Grieg, Joplin, Liszt, Mendelssohn, Mozart, Mussorgsky, Rachmaninoff, Ravel, Saint-Saëns, Satie, Scarlatti, Schubert, Schumann, Scriabin, Tchaikovsky.

<sup>\*2</sup> <http://beam.kisarazu.ac.jp/research/PianoFingeringDataset/>

表 2 PIG データセットの基礎統計解析の結果.

	音符数 割合 (%)			音符数 割合 (%)	
替え指なし	99,720	99.68	—	—	—
右手 1	14,374	14.36	左手 1	14,628	14.62
右手 2	12,926	12.92	左手 2	9,631	9.63
右手 3	10,685	10.68	左手 3	6,573	6.57
右手 4	7,741	7.74	左手 4	4,699	4.70
右手 5	8,277	8.27	左手 5	10,186	10.18
右手合計	54,003	53.97	左手合計	45,717	45.70
替え指あり	324	0.32	—	—	—
合計	100,044	100	—	—	—

記述されている。

$$n \quad t_{\text{on}} \quad t_{\text{off}} \quad p \quad v_{\text{on}} \quad v_{\text{off}} \quad c \quad f$$

ここで、 $n$  はノート ID,  $t_{\text{on}}$  と  $t_{\text{off}}$  は秒単位での打鍵時刻と離鍵時刻,  $p$  は音高 (MIDI ノートナンバー),  $v_{\text{on}}$  と  $v_{\text{off}}$  は note-on と note-off のベロシティー (音強に対応),  $c$  は右手か左手を表す数値 (右手は 0 で, 左手は 1),  $f$  は指番号 (1 = 右親指, 2 = 右人差指, ..., 5 = 右小指, -1 = 左親指, ..., -5 = 左小指) である。替え指 (音符を押さえる指を途中で交換する操作) は 1\_2 (右親指から右人差指への替え指) のように記されている。運指ファイルからは演奏に対応する MIDI 信号を生成できる。ただし、本データに含まれる MIDI 情報は楽譜情報から自動生成されたものであり、実際のピアノ演奏情報を記録したものではない。実際のピアノ演奏の MIDI 録音と対応する運指情報のデータを収集することは今後の課題である。上記のデータ形式は、その際にも適用可能なものになっている。

## 2.3 データ収集と整備

データ収集の際は、電子形式の楽譜が得やすい楽曲を優先的に選択した。各楽曲の運指付けに用いる部分を選択した後、電子形式の楽譜ファイルを作成し、それを基に MIDI ファイルと PDF ファイルを生成した。MIDI ファイルの内容は、運指ファイルを作成するのに使われた。

演奏者による運指は、まず印刷された楽譜上に手書きで記入され、そのあとで打ち込みにより電子形式への変換を行った。打ち込み作業では運指が正しく記入されているか二重チェックを行い、疑わしい運指が見つかった場合は演奏者に対する確認をその都度行った。

## 2.4 運指に関する基礎統計

PIG データセットの運指に関する基礎的な統計解析の結果を表 2 に記す。この解析には PIG データセットの全ての運指データを用いている。まず、替え指の頻度は 0.32% と非常に小さいことがわかる。替え指はいくつかの音符列をテヌートで演奏するために欠かせない技法であるが、単純化のため従来のほとんどの研究では替え指を扱っていな

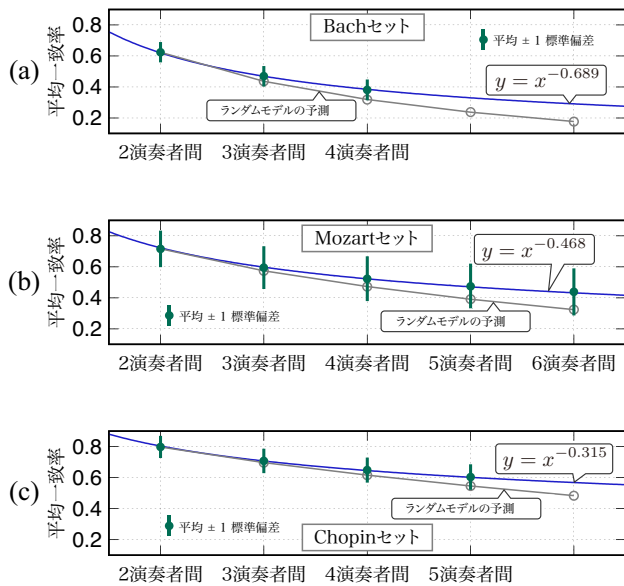


図 1 異なる演奏者の運指の平均一致率。J 人の演奏者の運指がある各サブセットについて、j (2 ≤ j ≤ J) 人全ての組み合わせの演奏者の一致率を計算して平均した。ランダムモデルによる j ≥ 3 の場合の予測値は、運指が各音符に対して独立に確率的に生成されるとの仮定のもと、j = 2 の場合の値から算出した (脚注\*3 を参照)。

い。この結果は、この単純化を頻度の上で正当化するものである。本研究においても、以下では替え指は取り扱わず、替え指がある場合でも最初に鍵盤を押した指のみを考えることで、各音符に一つの指番号が対応するものとする。

替え指なしの音符のうち、右手で弾かれる音符は全体の約 54%、左手で弾かれる音符は全体の約 46% であった。また個々の指番号の相対頻度を比べると、両方の手で親指が一番頻度が高く、薬指が一番頻度が低いことが分かる。その他の指に関しては順序が左右の手で異なり、右手では人差し指が二番目に頻度が高く、左手では小指が二番目に頻度が高いことが分かる。左手の頻度の順序に関しては、このデータセットの曲には左手パートにオクターブを含む和音がしばしば現れることが要因であると考えられる。

### 3. 個人性の統計解析

本章では、ピアノ運指の個人性を定量的に調べるために PIG データセットの作曲家別サブセットを用いた統計解析を行う。なお、前章で議論した通り、簡単のため以下では替え指は扱わないことにする。

#### 3.1 曲全体の運指の一致率の解析

まず、異なる演奏者の間で運指がどれだけ一致するかを調べる。これを測るため、各曲に対する 2 つあるいはそれ以上の運指の集合に対して次のように定義する「一致度」を用いる。一致度  $M$  は、全ての演奏者が同じ指番号を割り当てた音符数  $N_{\text{match}}$  の全体の音符数  $N$  に対する比率  $M = N_{\text{match}}/N$  として定義する。作曲家別サブセットの

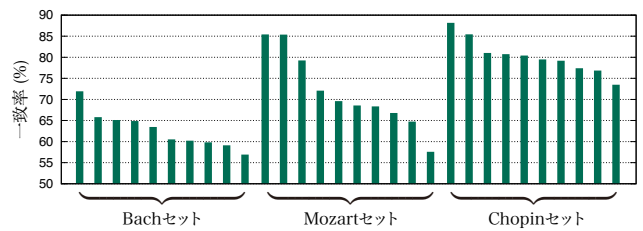


図 2 曲ごとの 2 演奏者間の平均運指一致率。各サブセットに含まれる運指の全てのペアに対して一致率を計算して平均した。各サブセット内で楽曲 (各 10 曲) は一致率の順にソートしてある。

各曲には 4 つ以上の運指があるため、全てのペアに対する一致率の平均、全ての 3 つ組に対する一致率の平均など、可能な全ての組み合わせ数に関する一致率を計算する。図 1 の結果に見るように、2 人の演奏者の運指を比べた場合、平均では約 60% から 80% の一致率であることが分かる。

3 人以上の演奏者による運指を比べた場合には、一致率はより小さくなるものの、演奏者数に対する減少率は小さいことが分かる。図 1 に示す通り、平均一致率は比較した演奏者数に対するべき関数でよくフィットできることが分かる。図中には、参考として、運指が各音符で確率的に独立に生成されるものとした場合の、3 人以上の演奏者に対する一致率の期待値も示している。<sup>\*3</sup>これらの期待値は演奏者数が大きくなるにつれて、漸近的に指数関数的に減少するが、実際の一致率はこれよりも大きい値に留まっていることが見てとれる。このことは、指の選択肢の数は個々の音符により異なり、一部の音符に対してはほぼ唯一の選択肢しかないことを示唆している。

より詳しく、各楽曲についての平均運指一致率を図 2 に示す。これから、楽曲ごとの一致率のばらつきは比較的大きいことが分かる。このばらつきは Mozart サブセットで最も大きく、最大約 30 ポイントであることが分かる。また、各演奏者間での平均一致率を測定した結果を表 3 に示す。この結果から、演奏者間の運指の一致率には最大 10 ポイント程度のばらつきがあることが分かる。以上の結果より、運指の一致率は楽曲によっても有意に異なり、比較する演奏者によっても有意に異なることが分かる。

#### 3.2 各音符における運指の多様度の解析

運指の個人性を局所的な観点から調べるために、各音符あるいは音符ペアに対して使われている指の種類の数 (運指の多様度) の分布を図 3 に示す。例えば、図 3(a) は、Bach セットでの 4 人の演奏者による運指では、39.3% の音符には唯一の指が使われており、49.4% の音符には 2 つの指の選択肢があることを示している。これらの結果は、

<sup>\*3</sup> これらの値は指の選択肢が 2 つしかない場合を仮定して計算している。この場合、2 つの系列の平均的一致率は  $M_2 = \omega^2 + (1-\omega)^2$  で与えられる ( $\omega$  と  $1-\omega$  は 2 つの値の確率)。  $M_2$  の値を固定すると、 $\omega$  について解くことができる。この時、j 個の系列の平均的一致率は  $M_j = \omega^j + (1-\omega)^j$  で与えられる。

表 3 作曲家別サブセットでの演奏者間の運指一致率。10 曲の一致率の平均値が示されている。All others は、ある演奏者に対するその他全ての演奏者の運指との一致率の平均を示している。演奏者は All others の一致率の順にラベル付けしている。

(a) Bach セット

	奏者 1	奏者 2	奏者 3	奏者 4
奏者 1	—	64.76	65.28	61.85
奏者 2	64.76	—	62.36	62.07
奏者 3	65.28	62.36	—	60.39
奏者 4	61.85	62.07	60.39	—
All others	63.96	63.07	62.67	61.44

(b) Mozart セット

	奏者 1	奏者 2	奏者 3	奏者 4	奏者 5	奏者 6
奏者 1	—	73.53	77.93	75.23	72.83	67.98
奏者 2	73.53	—	74.63	72.97	74.53	71.32
奏者 3	77.93	74.63	—	76.68	71.30	66.34
奏者 4	75.23	72.97	76.68	—	70.82	65.93
奏者 5	72.83	74.53	71.30	70.82	—	64.66
奏者 6	67.98	71.32	66.34	65.93	64.66	—
All others	73.50	73.40	73.38	72.33	70.83	67.25

(c) Chopin セット

	奏者 1	奏者 2	奏者 3	奏者 4	奏者 5
奏者 1	—	84.89	85.05	80.27	79.89
奏者 2	84.89	—	85.06	79.89	78.41
奏者 3	85.05	85.06	—	76.90	77.71
奏者 4	80.27	79.89	76.90	—	74.18
奏者 5	79.89	78.41	77.71	74.18	—
All others	82.52	82.06	81.18	77.81	77.55

大部分の音符が 1 つあるいは 2 つの指の選択肢を持っており、ごく少数の音符が 3 つ以上の指の選択肢を持つことを示している。これから、ピアノの鍵盤は原理的にはどの指でも押さえることができるものの、実際に演奏に用いられる指の選択肢は文脈によって著しく限定されることが分かる。例えば、右手でのオクターブ和音の最低音は、ほぼ常に親指で押さえられる。また、単旋律の部分でも頂点音がほぼ唯一の指の選択肢しか持たない場合もある。

同様に、図 3(b) は、(各手において) 連続する音符ペアに対する指の選択肢の数の分布を示している。この結果から、大部分の音符ペアが 3 つ以下の指の選択肢しか持たないことが分かる。もし音符ペアに対する指の割り当てが音符ごとに独立であるならば 4 つ以上の選択肢の割合ははるかに大きいことが期待されるため、これは演奏に用いられる運指には強い系列依存性があることを示している。

3 人の作曲家に対する結果を比較すると、Bach の曲では一致率が最も小さく指の選択の多様性が最も大きく、Chopin の曲では一致率が最も大きく指の選択の多様性が

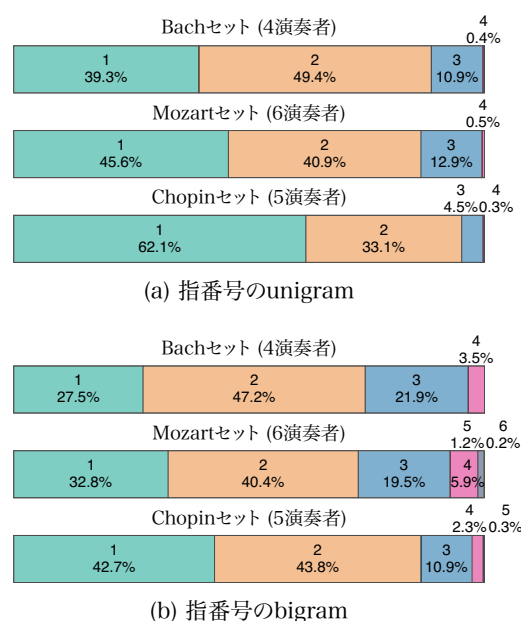


図 3 異なる演奏者間の運指の多様度の分布。各音符あるいは各音符ペアに対する指の選択肢の数の割合を示している。

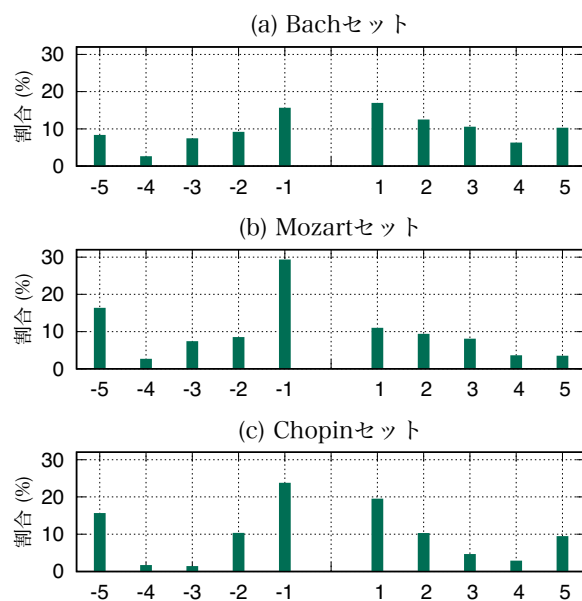


図 4 多様度 = 1 の音符における指番号の分布。

最も小さいことが分かる。これは Chopin の曲には音符数の多い和音がより頻繁に含まれており、それらは運指の選択肢がより少ないためであると考えられる。この結果は、音符の密度が高い曲ほど運指の自由度が低いという一般的な直感を定量的に示していると考えられるが、解析に用いた演奏者数は比較的少なく、作曲家ごとに異なることに注意が必要である。

運指の多様度をより詳細に調べるため、全ての演奏者間で指番号が一致した (多様度 = 1 の) 音符における指番号の分布を図 4 に示す。この図より、複数演奏者間で運指が一致する音符は、親指で弾かれることが一番多いことが分かる。特に Mozart セットと Chopin セットでは、左手の

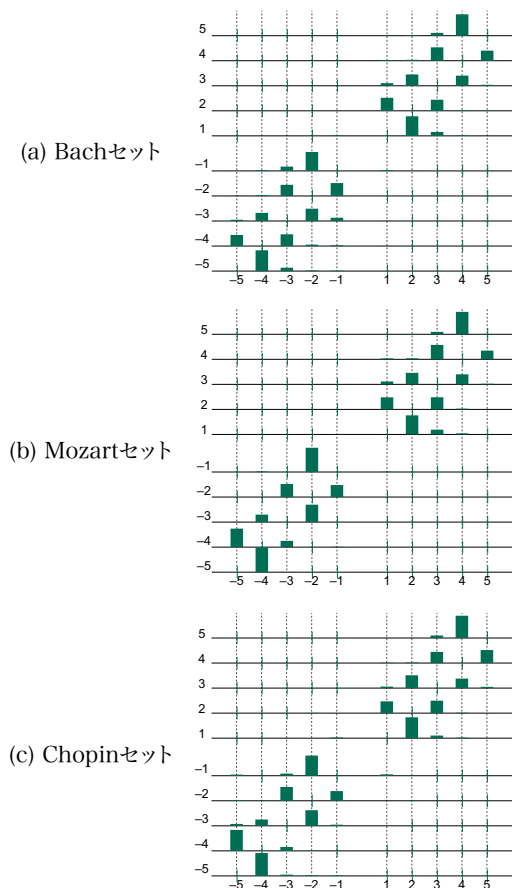


図 5 多様度 = 2 の音符における指番号の共起関係.  $i$  行目  $j$  列目の数値は, 2 つの指の選択肢のうち  $i$  番目の指が含まれる場合に, もう一方が  $j$  番目の指である確率を表している.

親指と小指の頻度が高いが, これは左手パートに含まれるオクターブ和音に起因するものと考えられる.

運指の多様度 = 2 の音符について, 2 つの指の選択肢の共起関係を図 5 に示す. この結果より, 多くの場合には, 運指の多様性は隣り合う指の間で起きることが分かる. つまり, ある音符において演奏者により指番号が異なる場合でも, 多くの場合は手の位置は大きくは変わらないことを示している.

### 3.3 解析結果のまとめ

以上の解析から得られた知見をまとめる.

- 異なる演奏者間の運指の一致率は, およそ 55% から 85% 程度である.
- 一致率の値は, 楽曲によって大きく異なるとともに, 比較する演奏者によっても大きく異なる.
- 音符単位での指の候補は, 概ね 2 個までで, まれに 3 個のこともある.
- 指の候補が 2 個の場合は, 隣り合う指同士が候補になることが多い.
- 運指には強い系列依存性があり, 各音符では複数の指の候補があっても, 音符列に対してそれらの全ての組み合わせが運指の候補になるとは限らない.

以上より, 一致率でみると運指の個人性は比較的大きいものの, 系列の空間でみると用いられる運指の数は少数に限定されることが分かった.

## 4. ピアノ運指推定に対する示唆・今後の課題

3 章の結果から得られる, 今後のピアノ運指研究, 特に自動運指推定に対する示唆について議論する. まず, 運指の個人性は比較的大きいことから, 運指を解析するには個人性を常に気にかける必要がある. 例えば, 運指推定手法の評価を行う際にも, 複数の演奏者による運指データを用いるのが一般的には好ましいであろう. 一方で, 運指が持つ強い系列依存性にも注意する必要がある. 具体的には, 複数の演奏者の運指データと比較して, ある音符では指番号  $f$  がデータに含まれるという意味で自然であり, それに続く音符では指番号  $f'$  が同様に自然であったとしても,  $(f, f')$  という指番号の連続は実際には不自然であることがある. よって, 先行研究 [14, 19] で用いられてきた, 各音符における指番号の一致のみを考慮する一致率は, 運指推定の評価基準としては限界がある. 系列依存性を考慮した適切な評価基準を考案する必要がある.

運指には個人性があることから, 一つの運指推定手法の精度には当然限界がある. しかし, これは様々な演奏者の運指との比較を前提とした場合であり, 演奏者ごとに特化した手法を考えればより高精度な推定を実現できる可能性はある. 運指の個人性の要因としてまず考えられるものは, 手の大きさである. 例えば, 手の大きさに対応するパラメータを持つモデルを考えて, 演奏者ごとにその適切な値を与えることにより, 全ての演奏者に同じ手法を適用するよりも高精度な推定ができると考えられる [16, 20].

今後の課題として, 運指の個人性の要因について詳しく調べる必要がある. まず, 手の大きさや指の長さ, 演奏における音楽性や運指に関する事前知識など, 演奏者の個性に関する要因が考えられる. 多数の演奏者の運指を解析することで, 典型的な運指や運指に関する演奏者のクラスター構造などが理解できる可能性がある. また, 特定の音符列やコードの形など, 楽曲の性質に関する要因が考えられる. 音符の系列内での文脈やフレーズ構造などが関係すると予想される. 楽譜のどの部分で運指の個人性や任意性が現れやすいかが理解できれば, 例えば楽譜上の運指表記法の効率化が可能になるであろう.

もう一つの大きな課題は, 運指と演奏表情の関係性の理解である. 滑らかな演奏には適切な運指が欠かせないことは従来より指摘されているが [3–6], 細かい音楽表情と運指の定量的関係性はまだ理解されていない. これが理解できれば, 目的とする演奏表情に合う運指の選択や, 演奏 MIDI データからの運指情報や手の形の推定などができる可能性がある. そのために必要な, 演奏表情付き MIDI 情報と対応する運指情報のデータ収集も重要な課題といえる.



## 5. 結論

本稿では、新規に収集・整備した世界初公開の大規模なピアノ運指データである PIG データセットについて説明し、それをを用いた運指の個人性の統計解析について論じた。運指の一致度および多様度を用いた解析により、運指の個人性の定量的な測定結果が得られた。特に、運指の個人性は一致率でみると比較的大きいものの、系列の空間でみると用いられる運指の数は少数に限定されるという特徴を明らかにした。また、解析結果から得られた知見をもとに、自動運指推定の評価方法に関する議論を行った。このデータセットを用いた自動運指推定手法の学習および評価について、稿を改めて報告する予定である。

謝辞 有益な議論をして頂いた渡邊健二氏および古屋晋一氏をはじめとするピアノ運指データ収集に御協力くださった皆様に感謝の意を表する。本研究は、科研費 15K16054, 16H02917, 16H01744, 16K00501, 16J05486, 17H00749, 19H04137, 19K20340 と JST ACCEL No. JP-MJAC1602 と柏森情報科学振興財団からの支援を受けた。

## 参考文献

- [1] C. Palmer, “Music performance,” *Annual Review of Psychology*, vol. 48, no. 1, pp. 115–138, 1997.
- [2] S. Furuya et al., “Hand kinematics of piano playing,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 106, no. 6, pp. 2849–2864, 2011.
- [3] F. Couperin (transl. by M. Halford), *The Art of Playing the Harpsichord*. Alfred Pub. Co. (Original work in French published 1717), 1974.
- [4] C. P. E. Bach (transl. by W. J. Mitchell), *Essay on the True Art of Playing Keyboard Instruments*. W. W. Norton and Company, NY, USA (Original work in German published 1753), 1949.
- [5] D. G. Türk, *Klavierschule, oder Anweisung zum Klavierspielen für Lehrer und Lehrende, mit kritischen Anmerkungen*. Bärenreiter, Kassel (Original work published 1789), 1962.
- [6] J. Musafia, *The Art of Fingering in Piano Playing*. MCA Music, 1971.
- [7] L. Mozart (transl. by E. Knocker; 2nd ed.), *A Treatise on the Fundamental Principles of Violin Playing*. Oxford University Press, Oxford (Original work in German published 1756), 1985.
- [8] F. Sor (ed. by F. M. Harrison), *Method for the Guitar*. Robert Cocks and Co., London (Original work in French published 1830), 1896.
- [9] 野口賢治 他, 情処学会全国大会, 6D-7, 1996.
- [10] R. Parncutt et al., “An ergonomic model of keyboard fingering for melodic fragments,” *Music Perception*, vol. 14, no. 4, pp. 341–382, 1997.
- [11] J. P. Jacobs, “Refinements to the ergonomic model for keyboard fingering of Parncutt, Sloboda, Clarke, Raekallio, and Desain,” *Music Perception*, vol. 18, no. 4, pp. 505–511, 2001.
- [12] M. Hart et al., “Finding optimal piano fingerings,” *The UMAP Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 167–177, 2000.
- [13] 林田教裕, 水谷哲也, 情処学会全国大会, 2P-5, 2003.
- [14] Y. Yonebayashi et al., “Automatic decision of piano fingering based on hidden Markov models,” in *Proc. IJCAI*, 2007, pp. 2915–2921.
- [15] 米林裕一郎 他, 手の自然な動きを考慮した隠れ変数付き隠れマルコフモデルに基づくピアノ運指決定, 情処研究報告 MUS-71-29, p. 179, 2007.
- [16] A. Al Kasimi et al., “A simple algorithm for automatic generation of polyphonic piano fingerings,” in *Proc. IS-MIR*, 2007, pp. 355–356.
- [17] 春原雅彦 他, 情処学会全国大会, 3T-3, 2010.
- [18] 若松万紗子, 松井知己, 和音に対するピアノ運指決定法, 数理解析研究所講究録, 第 1773 巻, pp. 87–95, 2012.
- [19] E. Nakamura et al., “Merged-output HMM for piano fingering of both hands,” in *Proc. ISMIR*, 2014, pp. 531–536.
- [20] M. Balliauw et al., “A variable neighborhood search algorithm to generate piano fingerings for polyphonic sheet music,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 24, no. 3, pp. 509–535, 2017.
- [21] M. Miura et al., “Constructing a system for finger-position determination and tablature generation for playing melodies on guitars,” *Systems and Computers in Japan*, vol. 35, no. 6, pp. 10–19, 2004.
- [22] D. R. Tuohy and W. D. Potter, “A genetic algorithm for the automatic generation of playable guitar tablature,” in *Proc. ICMC*, 2005, pp. 499–502.
- [23] R. De Prisco et al., “A differential evolution algorithm assisted by ANFIS for music fingering,” in *Swarm and Evolutionary Computation*. Springer, 2012, pp. 48–56.
- [24] W. Nagata et al., “Violin fingering estimation according to skill level based on hidden Markov model,” in *Proc. ICMC*, 2014, pp. 1233–1238.
- [25] 関口博之, 英保茂, 情処論文誌, **40(6)**, pp. 2827–2837, 1999.
- [26] C.-C. Lin and D. S.-M. Liu, “An intelligent virtual piano tutor,” in *Proc. ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications*, 2006, pp. 353–356.
- [27] Y. Takegawa et al., “Design and implementation of a real-time fingering detection system for piano performance,” in *Proc. ICMC*, 2006, pp. 67–74.
- [28] 竹川佳成 他, 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, 情処論文誌, **52(2)**, pp. 917–927, 2011.
- [29] V. Sébastien et al., “Score analyzer: Automatically determining scores difficulty level for instrumental e-learning,” in *Proc. ISMIR*, 2012, pp. 571–576.
- [30] 岡明也 他, マーカレス運指認識と音列照合によるピアノ演奏スキル評価システムの提案, 情処研究報告, MUS-100-10, 2013.
- [31] Y. Saito et al., “Conversion from standard MIDI files to vertical line notation scores and automatic decision of piano fingering for beginners,” in *Proc. International Conference on Technologies for Music Notation and Representation*, 2016, pp. 200–211.
- [32] G. Hori et al., “Input-output HMM applied to automatic arrangement for guitars,” *J. Info. Processing Soc. Japan*, vol. 21, no. 2, pp. 264–271, 2013.
- [33] E. Nakamura and K. Yoshii, “Statistical piano reduction controlling performance difficulty,” *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol. 7, no. e13, pp. 1–12, 2018.
- [34] J. A. Sloboda et al., “Determinants of finger choice in piano sight-reading,” *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 24, no. 1, pp. 185–203, 1998.