

ピアノの両手運指モデルによる 合奏曲のピアノ用自動編曲手法

中村栄太^{1,a)} 小野順貴¹ 嵯峨山茂樹¹

概要：合奏曲をピアノ演奏用に自動で編曲する手法の開発を目標とし、ピアノの両手運指モデルの考案およびそれをういたピアノ用編曲手法の議論を行う。本研究では、合奏曲のピアノ用編曲を、演奏難易度を制約とした原曲に対する忠実さの最適化と捉え、この原理による自動編曲手法を提案する。まず演奏難易度を扱うためにピアノの両手運指に着目し、運指モデルおよびこれに基づく運指決定を議論する。この際、片手の運指モデルを両手運指モデルに拡張し、従来扱うことが難しかった両手同時の運指決定および両手部分離問題を論ずる。次に、原曲の楽譜の音符がどのように編曲されやすいかを表した編集確率を導入し、両手運指モデルとこれを合わせて編曲のための確率モデルを考案し、ピアノ用自動編曲手法を構築する。この手法による編曲結果を人間による編曲と比較および評価し、今後の課題などを議論する。

1. はじめに

オーケストラや室内楽などの合奏曲や合唱曲など多様な楽器編成の楽曲をピアノ演奏用に編曲することは、古くから多くなされてきた。これは、ピアノ演奏のレパートリー開拓や原曲の鑑賞や普及のため、オペラや協奏曲などのオーケストラ部やその他楽曲の一部合奏パートをピアノで代替し他の楽器を演奏補助するため、また楽曲解析や作曲の練習などの目的がある。また、ポピュラー音楽においても、レパートリー開拓や鑑賞、弾き語り演奏のためにバンド音楽のピアノ用編曲が広く行われている。このような合奏曲のピアノ用編曲を自動化することは、大きな需要が見込まれ工学的に興味深い。また、自動化を通して解析やモデル化を行うことは、人間の作曲編曲過程や演奏を知る上で有効な手段となり得る。計算機の性能や情報処理技術が発展している中、このような問題を考えることは有益であろう。

一つの合奏曲に対してもピアノ編曲の仕方は多様であり、編曲者の音楽性や編曲技術、編曲後の演奏難易度などが影響すると考えられる。自動化を前提とする場合、はじめから高度な音楽性などを扱うことは容易でないため、最初の試みとして、原曲になるべく忠実かつ演奏可能であるような編曲を前提として以下議論する。このような編曲は、実際の編曲でも見られ、直接応用出来る可能性がある他、よ

り高度な編曲をする上での基礎となり得る。

合奏曲のピアノ用編曲の自動化手法は、文献 [1], [2] で提案されてる。また、関連した研究として文献 [3] がある。これらの研究では、演奏可能性について片手の最大同時打鍵数や最大同時音程などに関する簡単なルールによる制約が述べられており、特に [1] では、習熟度に応じた難易度の違いも議論されている。これらの研究の中で扱われている比較的テンポの遅い楽曲では、このような簡単なルールでも有効な場合が多いが、実際の編曲ではテンポに応じた難易度調整などが必要な場合も多く、より詳細な議論が必要である。また、編曲に必要な編集の度合いが大きい状況では、ルール間の競合など複雑な問題を扱う必要がある。

このような問題を包括的に議論するため、本研究では上記編曲の問題を演奏難易度を制約とした原曲に対する忠実度の最適化問題と捉え議論する。具体的には、演奏難易度をピアノの運指モデルに基づき定量的に扱う方法を提案する。そして、その際導入する運指の確率モデルと編曲における編集確率を合わせることにより、確率に基づく編曲手法を提案する。確率に基づく方法によるギター編曲は、文献 [4] で議論されている。本稿では、同文献で記述されている編曲のためのモデルを拡張し、原曲の和音の削除などより一般の編曲を扱える定式化を行う。また、ピアノ用編曲のためには両手の運指モデルが必要であるが、文献 [5] で提案された隠れ Markov モデル (HMM) を用いた片手の運指モデルを、緩く依存した並行現象を効率的に記述可能なモデル [6] を用いて拡張した両手の運指モデルを考案し、運指決定とともに議論する。ピアノの運指は、それ自体興

¹ 国立情報学研究所
101-8430 東京都千代田区一ツ橋

^{a)} enakamura@nii.ac.jp

味深い問題であり、演奏学習や演奏支援への応用も研究されている [7]。一方、両手同時の運指モデルおよび運指決定はこれまで扱うことが難しかった問題である。これらに関しては、3 節で詳しく論ずる。

2. 演奏難易度を制約とした原曲への忠実度の最適化としての編曲問題

実際に見られる合奏曲のピアノ用編曲は多様である。例えば Liszt によるピアノ用編曲のように高度な演奏技術や音楽性を持つものもある一方で [8]、オペラのヴォーカルスコアやオーケストラ伴奏のピアノ編曲では、大部分が原曲に忠実なことも多い（例えば、[9] の序曲と上記 [8] の中にあるものとを比較されたい）。合奏譜の中の全ての音符をピアノ譜に移すことにより、原曲に最も忠実である楽譜が出来るが、そのままではピアノでの演奏が困難、あるいは不可能な場合が多く、音符を削除するなどの編曲が行われている。このようにある演奏難易度の範囲で、なるべく原曲に忠実なピアノ用編曲を行うことは、実際のピアノ用編曲でも行われており、またより複雑な編曲を行う上での基礎となり得る。ピアノ用編曲の自動化においても、より単純な原理による編曲から考えることは有効であろう。本研究では、このような「極小編曲」の自動化を議論する*1。

一般的に、音符を削除するなどの編曲により演奏の難易度を低くすることが出来るが、その際原曲に対する忠実度はより低くなる。よって、極小編曲はある演奏難易度の範囲でいかに原曲への忠実度を保つかという問題であると言える。演奏難易度および原曲への忠実度を適切に定量化出来れば、極小編曲の問題は、演奏難易度を制約とした原曲に対する忠実度の最適化問題と捉えられる。

演奏難易度は、初見時の演奏や十分練習した後の演奏での間違えの頻度や、練習に必要な時間などに基づくいくつかの捉え方がある [10], [11]、またその要因も、演奏動作の難しさだけでなく、楽譜表記の仕方なども考えられる。以下では簡単のため、その中で最も重要であろうものの一つである演奏動作の難しさ、特にピアノ演奏での運指の難しさを扱い、その他は今後の研究に委ねたい。運指の難しさは、運指決定と関わりの深い問題であり、運指コストに基づく運指決定も研究されている [12], [13]。しかし、次節で述べる様に、運指の難しさを原理的に求める手法は確立していない。このような状況においては、統計的な考えに基づき実際の運指データから運指の自然さを確率的に求める方法が有効だと考えられる。確率的な運指モデルを用いることにより、与えられた楽譜に対して、最も自然な運指が決定出来ると同時に、どのくらい自然かを基に運指の難しさを定量化出来る。これに関しては、次節で詳しく述べる。

*1 ここで言う極小編曲は、ピアノ編曲で一般的にピアノ縮小 (piano reduction) と呼ばれるものと類似しているが、慣習による誤解を避けるため及びこの考えはピアノ編曲に限らないため、ここでは極小編曲という言葉を用いることにする

表 1 複数の演奏家による運指の一致度。Bach の楽曲には、2 声の Invention から Nos. 1,2,3,8 [14]、Beethoven の楽曲には、Piano sonata No. 8 c-moll の第 1 楽章より導入と提示部を用いた [15]。楽譜中に運指記述がない音符に対しては、著者の 1 人が運指を補間した。

楽曲	演奏家	音符数	一致度
Bach	Czerny vs. Busoni	2279	78.1%
Beethoven	Bülow vs. Pauer	2061	80.7%
Beethoven	Bülow vs. Schenker	2061	84.7%
Beethoven	Schenker vs. Pauer	2061	84.8%

一方、編曲譜の原曲への忠実度も汎用的な定義は難しく、一般には、記号的な楽譜情報のほか実現される音響なども影響を与えるであろう*2。問題を明確にするため、以下では特に音高・音価などの楽譜情報の一致度を忠実度とし、その他の要因の取り扱いは今後の研究に委ねる。4 節で述べる様に、極小編曲に近い実際の編曲では、合奏譜の音符の削除やオクターブ移行などの編集が行われる。編曲過程は、合奏譜に対してこれらの編集を施す過程と見なせ、編集が少ないものがより原曲に忠実であるといえる。最適な極小編曲を求める際には、複数の編曲の可能性を比較する必要があるが、一般にこれはどのような編集を許すかを定量的に表す編集コストを導入することにより行える。編集コストは、編曲者が設定することも考えられ、また大量の編曲結果のデータから編集確率を得ることにより設定することも考えられる。後者の確率による定式化は、演奏難易度と合わせて考える上で扱いやすく、また編曲者によるパラメータ設定は確率パラメータにおいても可能である。本研究ではこの後者による定式化を行う。

以上の演奏難易度と原曲への忠実度の定量化に基づき、上記原理に基づく自動編曲手法を作ることが出来る。詳しくは 4 節に記述するが、演奏（運指）モデルと編集確率を合わせることにより、確率に基づく編曲のためのモデルが得られる。これを用いて演奏難易度の制約の下で最適化することにより編曲アルゴリズムを構築出来る。以下、個々の詳細について述べる。

3. ピアノの両手運指モデルと運指決定

3.1 運指決定問題

ピアノの運指決定問題は、与えられたピアノ用の楽譜あるいは MIDI 情報をもとにそれぞれの音符がどの指で弾かれたかを推定したり、あるいはどの指で弾くと良いかを決定する問題である。実際のピアノの運指は、慣習や個性が反映されている。例えば、17 世紀から 18 世紀にかけて起きた鍵盤楽器の運指の大きな変化は、これを示している [16]。また、運指は演奏者の楽譜解釈や表現により変化

*2 例えば、オーケストラ譜のピアノ編曲において和音を tremolo にすることはしばしば行われるが、これは楽譜情報の一致よりも減衰してしまうピアノ音の音響を補うことが目的の一つである。

し得るため、これを完全に一意的な問題と捉えるのは難しいであろう。その一方で、表 1 に示す様に、時代や地域の異なる演奏者による運指にも共通点は多く見られ、運指決定はある程度の普遍性を持った問題とすることが出来る。

一つの魅力的な考えは、運指決定を演奏コストの最小化と捉え、最も演奏が効率的であるような運指を求めるというものである。この方向の研究としては、文献 [12], [13] などがあり、ある程度の有効性は示されている。しかし、結果は少ない例でのみ議論されており、汎用性はまだ十分に調べられておらず、コスト関数設定の原理も確立していない。また、経験や文献に基づくルールをもとに運指決定則を構築する試みもあり [17]、少ない例を再現するにも複雑なルールが必要であることが示唆されているが、汎用性は十分に調べられていない。文献 [13] では和音を扱っているが、その他の文献は全て右手の単旋律の運指を対象としている。

この他に、実際の運指データの統計的な性質に基づき運指決定する手法が提案されている [5], [18], [19]。特に、文献 [19] は左手や和音を扱っており、これらを含む楽曲について約 74% の正解率を上げている。一方、文献 [5] では正解率が約 52% と低いが、これは強すぎるモデルの制約や学習の仕方が原因だと考えられる（後述参照）。上に挙げたコストや確率を用いる手法では、局所的な制約に基づいたモデルが主に考えられている。この他、運指ではフレーズ構造などより大局的な要素も影響すると考えられるが、その影響は定量的には調べられていない。

コスト関数の原理的な導出が難しいことを鑑み、本稿では、比較的高い推定精度が得られる統計的方法に基づく運指決定について述べる。後述するピアノ用編曲への応用においては、予めどちらの手で弾くか定まっていない楽譜に対する両手同時の運指決定が必要であるが、これはこれまで扱うことが難しかった問題である。以下では、文献 [6] で提案された合流モデルの方法を用いて文献 [5] と同様の HMM を用いた方法を拡張し、和音を含む両手の演奏、また両手どちらで弾くかの選択を含む運指決定手法を提案する。

3.2 片手の運指決定

両手の運指決定の準備として、まず片手の運指決定について述べる。片手の運指決定は、楽譜上の音符 p_m ($m = 1, \dots, M$) に対してこの音符を押さえる指 $f_m = 1, \dots, 5$ ($1 =$ 親指, $2 =$ 人差し指, 等とする) を当てはめる問題である*3。ここで、 M は楽譜上の音符の数を表す。また、 p_m は音高を表すものとする。確率を用いた方法では、楽譜 $p_{1:M} = (p_m)_{m=1}^M$ が与えられた時に、運指列 $f_{1:M} = (f_m)_{m=1}^M$ が出現する確率 $P(f_{1:M}|p_{1:M})$ を考える。推定される運指列 $\hat{f}_{1:M}$ は、この確率を最大化する

*3 替え指 (finger substitution) においては一つの音符に複数の指が当てられるが、簡単のためここではこれは考えないことにする。

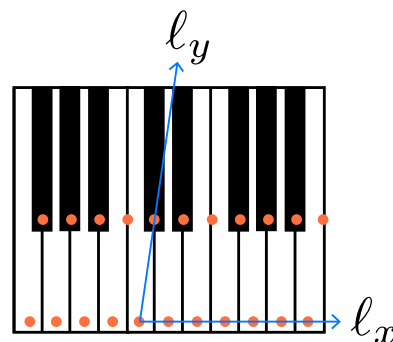


図 1 鍵盤格子。鍵盤の位置は 2 次元格子上の点として記述出来る。

ものとして与えられる: $\hat{f}_{1:M} = \underset{f_{1:M}}{\operatorname{argmax}} P(f_{1:M}|p_{1:M})$.

上記確率を与えるものとして、確率的な運指モデルを考える。ある音符に対する運指に関して、遠く離れた音符は近くの音符に比べて大きくは影響しないと考えられる。近くの音符の依存性は、最も簡単には、隣り合う音符からの依存性により記述されるが、これは Markov モデルを用いて記述出来る。これはまた、確率最大化やパラメータフィッティングが計算量の上で効率的に行えるという利点がある。また、一般に運指の確率は音符間の発音時間間隔に依存すると考えられるが、ここでは簡単のため、時間依存性は考えないこととする。以下、文献 [5] と同様に HMM を用いた運指モデルについて述べる。音符列が、指の動きとその結果による音符の出現により生成されると考えると、この確率は、ある指の次にどの指が使われやすいかを表す確率 $P(f_m|f_{m-1})$ と、隣り合う 2 つの運指からどの音高が出現しやすいかを表す確率を用いて表される。以下、前者を遷移確率、後者を出力確率と呼ぶ。音高の出現確率は、対応する指の他に一つ前の指と音高に依存するが、これは条件確率 $P(p_m|p_{m-1}, f_{m-1}, f_m)$ により記述出来る。これらを用いて、音符列と運指列の出現確率は、

$$P(p_{1:M}, f_{1:M}) = P(p_{1:M}|f_{1:M})P(f_{1:M}) \quad (1)$$

$$= \prod_{m=1}^M P(p_m|p_{m-1}, f_{m-1}, f_m)P(f_m|f_{m-1}) \quad (2)$$

と表される。ここで、 $P(f_1|f_0) \equiv P(f_1)$ と $P(p_1|p_0, f_0, f_1) \equiv P(p_1|f_1)$ は、初期確率を表すものとする。これが与えられれば、運指決定は $\underset{f_{1:M}}{\operatorname{argmax}} P(f_{1:M}|p_{1:M}) = \underset{f_{1:M}}{\operatorname{argmax}} P(f_{1:M}, p_{1:M})$ により求まる。

上記確率の値は、実際の運指のデータをもとに設定されるが、出力確率はそのままではパラメータ数が大きく、確率値を得るには膨大なデータが必要となる。この問題を緩和するために、以下いくつかの現実的と考えられる仮定をおく。まず、運指の確率は鍵盤上の幾何学的な指の配位のみ依存すると仮定する。この際、各鍵盤の位置を 1 点で表し、黒鍵と白鍵は 2 次元格子上有るとする(図 1 参照)。また、鍵盤の横方向に対する平行移動対称性 [5]、両手に関する左右のバ

リティ対称性 [19], また時間反転対称性を仮定する. 鍵盤の格子点の座標を $(\ell_x(p), \ell_y(p))$ と表わし, 左右の手の出力確率を $P_\eta(p'|p, f, f') = F_\eta(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f')$ ($\eta = L, R$) と表すと, これらは, $F_L(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') = F_R(\ell_x(p) - \ell_x(p'), \ell_y(p) - \ell_y(p'); f, f')$ および $F_\eta(\ell_x(p') - \ell_x(p), \ell_y(p') - \ell_y(p); f, f') = F_\eta(\ell_x(p) - \ell_x(p'), \ell_y(p) - \ell_y(p'); f, f')$ と表される. 実際の運指では, これらの対称性は完全には保たれておらず^{*4}, これは運指の問題としては興味深い, ここではこれ以上は立ち入らないことにする. 文献 [5] では, 主にパラメータフィッティングの都合上出力確率を Gauss 分布で近似しているが, ここではこの仮定は置かないことにする. また, 同文献では手の動きを隠れ変数で導入すると精度が上がるということが報告されているが, 次節以降に述べる両手の運指モデルの推定および編曲アルゴリズムにおける計算量の増大を避けるため, 本研究では導入を見送る.

上記モデルの和音への拡張は, 和音を仮想的にアルペジオ化して単旋律に置き換えることにより行える文献 [13], [19]. これは, 和音とそのアルペジオあるいは分散和音の運指が多くの場合同一であることからある程度の正当性が得られる. また, 和音内の音符が演奏される順序は演奏者や演奏ごとに異なり得るが, これを仮想的に順序化することにより, モデルのエントロピーを抑えより精度の高い推定が可能であると考えられる. 運指データからのパラメータフィッティング時あるいは運指推定の際には, 和音内の音高を低い方から高い方に順に並べた. 演奏 MIDI などのデータを用いる場合, 発音時間間隔が例えば 30 ms 以下 [20] のものは同一和音に属すると見なすことにより同様の順序化が行える.

以上の運指モデルを用いて評価を行った. 対象楽曲は表 1 に記したものを, 各楽曲に対して leave-one-out cross-validation の方法によりパラメータフィッティングを行い正解率を評価した. その際, ゼロ頻度を避けるため, 各頻度ビンに一律に 0.1 を足す加算スムージングを行った. 結果は, 右手に関して平均正解率が 56.0% (総音符数 5202), 左手に関して 55.4% (総音符数 5539) であった. 平均正解率が文献 [5] に比べ高いのは, 出力分布に関するモデルの制約を緩めていることが原因として考えられる. 文献 [19] に対して正解率が低い, 今回パラメータフィッティングに用いたデータが少ないことが原因として考えられる. クローズドデータでの正解率は 70% を超えていたことから, 十分なデータ数があればさらに高い正解率が得られると期待される. さらに多いデータを用いた評価は, 今

^{*4} 平行移動対称性は, よく知られた C major 上行スケールの運指 (CDEFGABC'D'E'F'...) \leftrightarrow (12312341231...) において既に破れている. 左手右手の対称性と時間反転対称性を合わせたものが破れている例は, Czerny による Bach: Invention No. 1 C-dur の校訂版 [14], 第 6 小節頭の右手の運指と第 14 小節頭の左手の運指に見られる. これらは, 拍構造やフレーズングと関連付けて議論されるべきであろう.

後の課題とする. また, 推定結果や誤りの傾向は文献 [5] と同様であり, 詳しい誤り解析は同文献を参照されたい.

3.3 両手の運指決定と両手部分離

前節の結果を踏まえ, 次に両手の運指決定について述べる. 両手 (同時) の運指決定とは, 予め両手のために分けられていない楽譜に対して, どちらの手で弾くかも含めた運指決定である. 前節の記法に従えば, 楽譜 $p_{1:M}$ に対して運指情報 $(\eta_m, f_m)_{m=1}^M$ を当てはめる問題と言える. ここで, $\eta_m = L, R$ は, どちらの手で弾くかを表す変数である. これは, どちらの手で弾くかの選択問題 (以下, 両手部分離問題という), 即ち $p_{1:M}$ に $\eta_{1:M}$ を当てはめる問題と片手の運指決定を合わせた問題とも捉えられる. 通常のピアノ用楽譜は大譜表で書かれ, 基本的には上段が右手用, 下段が左手用と分かれているので, 両手部分離は必要ないことが多いが, 次節で述べる合奏曲のピアノ用編曲においては, 予め両手部の情報が与えられておらず, これが本質的に重要である.

両手部分離問題は文献 [6] で論じられており, 個々の指の運指まで考えない簡潔なモデルを用いても比較的高い精度が得られている. 両手の運指決定は, この方法に片手の運指決定を合わせることも行えるが, 両手部分離をする際にも個々の運指を考える方が, より自然な運指決定が行えると予想される.

両手の運指モデルとして, まず, 片手の運指モデルを単純に拡張して (η_m, f_m) を隠れ状態とするような HMM が考えられる. しかし, 1 次の Markov モデルでは, 例えば隣り合う右手の音符の間に左手の音符が入ると, 右手の音符間の運指に関して確率的な制約が直接入れられないという欠点がある. 高次の Markov モデルを考えることは出来るが, パラメータ数が大きくなりフィッティングが難しくなる上, 推定に必要な計算量も度数に関して指数的に増加する. 実際には, 直接隣り合う両手間の運指の依存性よりも, 反対の手の音符に隔てられても片手内で隣り合う音符間の運指の依存性の方が大きいと考えられるが, これをうまくモデルに組み込めていないことが問題である. この問題の解決法として, 左右 2 つの片手の運指モデルを並行に扱い, これらを合流させる方法が提案されている [6]. この方法によると, まず片手の運指モデルを作り, これらを緩く依存させることにより両手の運指モデルを作ることが可能であり, モデルのパラメータ数の増大や推定時の計算量の増大を抑えた効率的なモデルが得られる. この合流モデルは, 具体的には両手部の情報 $\eta = L, R$ と両手の指の情報 f_L, f_R を合わせた $k = (\eta, f_L, f_R)$ を状態とする HMM (以下, 合流 HMM と呼ぶ) として記述される. 左右の片手の運指モデルの遷移・出力確率を $a_{ff'}^\eta = P_\eta(f'|f)$, $b_{ff'}^\eta(\ell) = F_\eta(\ell; f, f')$, $\eta = L, R$ とすると, 合流 HMM の遷移確率と出力確率は,

$$a_{kk'} = \begin{cases} \alpha_L a_{f_L f_L'}^L \delta_{f_R f_R'}, & \eta' = L; \\ \alpha_R a_{f_R f_R'}^R \delta_{f_L f_L'}, & \eta' = R, \end{cases} \quad (3)$$

$$b_{kk'}(\ell) = \begin{cases} b_{f_L f_L'}^L(\ell), & \eta' = L; \\ b_{f_R f_R'}^R(\ell), & \eta' = R, \end{cases} \quad (4)$$

で与えられる．ここで， $\alpha_{L,R}$ は，音符が左右のどちらの手で弾かれるかの確率を表し，実際の演奏では $\alpha_L \sim \alpha_R \sim 1/2$ に近い値をとる [6]．式 (3) と (4) では，簡単のため左手と右手の運指は互いに独立であると仮定しているが，いくつかの依存性を導入することも出来る [6]．ピアノ運指における両手間の依存性に関する議論として，例えば文献 [21] を参照されたい．合流 HMM により最尤推定列 $\hat{k}_{1:M}$ を求めると，両手部分離と左右の運指決定の結果が同時に得られる．最尤推定アルゴリズムなどの詳細については，文献 [6] を参照されたい．

3.4 運指モデルによる演奏難易度基準

ピアノの演奏可能性は，文献 [1], [2] などで自動編曲などと合わせて論じられている．これらの文献では，片手での最大同時打鍵数（例えば，5）や最大音程（例えば，10 度）や，同音連打の最小時間間隔などが演奏可能であることの制約として用いられている．これらは，単純な規則としては有効であると考えられるが，テンポによって演奏可能性は変化することや，同時に弾けない和音はアルペジオとして弾かれるなど，実際の演奏の演奏可能性には，より複雑な要因がある．また，文献 [1] で指摘されている様に，演奏者の技術レベルにより演奏可能であるかは変化する．これらの問題は，ある範囲に値をとる演奏難易度を考えることにより適切に扱えるであろう．

確率を用いた運指モデルにより運指の自然さを基にした演奏難易度の基準が得られる．一般には，楽譜の大局的な構造（例えば，曲の長さや全体の音符数）も難易度に影響を与え得るが，ここでは簡単のため局所的な楽譜情報に関する難易度を考える．直観的には，演奏難易度は音符（群）に対して加法的でありテンポに関して増加関数と仮定するのが自然である．これを満たすものとして，運指の確率コストの時間変化率がある．これは，ある時刻 t の周り $[t - \Delta t/2, t + \Delta t/2]$ に弾かれる音符の列を $p(t)$ とする時，

$$\mathcal{D}(t) = -\ln P(p(t), f(t))/\Delta t \quad (5)$$

で与えられる．ここで $f(t)$ は $p(t)$ に対する運指列， Δt は時間変化率を定義するための時間範囲の大きさである．隣り合う音符間の最小発音時間間隔が数 10 ms であり [20]，数 10 s 以上離れた音符間で局所的な演奏難易度の関連があるとは考えにくいことから， Δt はこの間に値をとるのが適切であると考えられる．運指モデルとして上記の様に HMM を用いる場合，右辺は式 (1) により与えられる．また，運指列 $f(t)$ に上述の方法で推定した値 $\hat{f}(t)$ を用いれ

表 2 Tchaikovsky のオーケストラ曲の作曲家自身によるピアノ用編曲に見られる音符の編集とその確率．

音符数	原音のまま	上下 8 度移動	その他（削除など）
3705	47.4%	1.6%	51.0%

ば，運指が与えられていない楽譜に対しても $\mathcal{D}(t)$ が計算可能である．両手を合わせた難易度の他に，片手ずつの難易度 $\mathcal{D}_L(t)$, $\mathcal{D}_R(t)$ も同様に定義される．

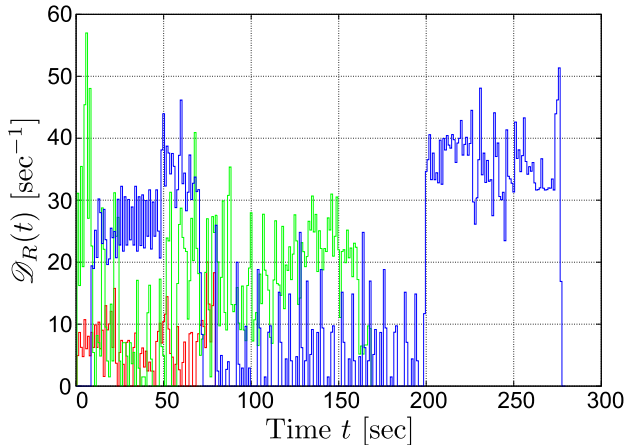
図 2 にいくつかの楽曲について上記方法によって計算した $\mathcal{D}_{L,R}(t)$ の結果を示す．但し， $\Delta t = 1 \text{ sec}$ とした．結果より，大まかに通常の演奏の難易度が \mathcal{D} の値に反映されていることが確認出来る．厳密な基準をこの結果から得ることは難しいが，ピアノ演奏の初級者でも演奏可能な Bach の Invention では $\mathcal{D}_{L,R}$ はおおよそ 10 以下，中級者向けの Beethoven のソナタでは $\mathcal{D}_{L,R}$ はおおよそ 20 から 30，また速く運指も難しい箇所を含む Chopin の幻想即興曲では $\mathcal{D}_{L,R}$ が 40 近くに達する箇所があることが分かる．また，Beethoven のソナタの導入部での右手の速い半音階や，Chopin の曲の緩徐部分の右手での装飾音などでは局所的に演奏が難しくなるが，この傾向も \mathcal{D}_R の分布に現れている．

4. 合奏曲のピアノ用編曲アルゴリズム

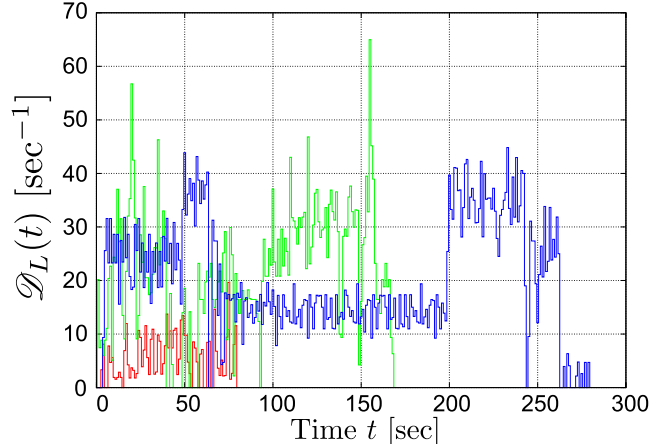
4.1 ピアノ編曲の編集確率

2 節で述べた様に，極小編曲における原曲への忠実度は編曲での音符の編集の量により定義出来る．どのような編集が行われるかには，音楽の様式や楽曲の構造，旋律・和声に影響する他，個人性も大きいであろう．また，多くの場合編集の可能性は一意ではないと考えられるが，これは確率を用いて記述出来る．原曲への忠実度は，この編集確率により暗に表される．表 2 は，Tchaikovsky のくるみ割り人形組曲の第 7 曲 “Danse des Mirlitons” の作曲家自身によるピアノ 2 手用編曲（一部は図 4 に掲載）における原曲の音符と編曲後の音符との対応を表している [22]．このピアノ編曲は極小編曲に近い実際の例と見なせるが，表 2 より音符削除やオクターブ移動などが主な編集であることが分かる．また，逆にピアノ用編曲譜の中の音符 1505 個の内，オーケストラ譜に対応する音符あるいはオクターブ移動させた音符がないものの割合は 1.7% であり，編曲において新しく付け加えられた音符は少ないことが分かる．

原理的には，一つの合奏譜に対する多くの編曲結果が与えられれば，その編集確率を得ることが出来るが，実際にはデータは限られているため，現実的な仮定に基づき問題を単純化する必要がある．また，これは次節で述べる様に計算量を削減するという目的のためにも必要である．上記結果に基づき，以下では，編集として主に音符の削除とオクターブ移行を考えることとする．



(a) 右手に関する \mathcal{D}_R .



(b) 左手に関する \mathcal{D}_L .

図 2 ピアノ曲における \mathcal{D}_R および \mathcal{D}_L の例 . 左手右手それぞれにおいて, 赤は Bach の Invention No. 1 C-dur, 緑は Beethoven の Piano sonata No. 8 c-moll 第 1 楽章の導入および提示部, 青は Chopin の幻想即興曲に対する結果を示している . $\mathcal{D}_{L,R}$ の計算において $\Delta t = 1 \text{ sec}$ とした .

4.2 編曲の演奏モデル

極小編曲の問題は, 言い換えると, 演奏しやすくかつ原曲になるべく忠実になる様な演奏を求める問題と捉えられる. これは, 少し把握しにくい, 前節で述べた演奏 (運指) モデルを拡張した次の「編曲の演奏モデル」の逆問題として扱える [4]. まず, 運指モデルによりどのような演奏がされやすいかが確率的に与えられるが, これをある編曲結果の演奏生成過程と解釈する. 次に, この演奏結果から合奏譜の対応する音符が生成されると考える. この際, 演奏した音符と合奏譜は必ずしも同じでなく, 例えば音高がオクターブ違うものもある確率で生成されるとすればオクターブ編集を記述出来る. 上述の通り, 合奏譜の音符の編集確率は声部の情報や旋律・和声の関係などによって変化すると考えられ, 一般には周辺の音符やその編集結果に依存するであろう. しかし, 一般的に遠く離れた音符間の依存性を考慮することは, 計算量増大の問題を伴う. 以下では, 計算量増大の問題を避け, 簡単のため編集確率は個々の音符で独立であると仮定して話を進める. 運指モデルが前節で述べた様に, (隠れ) Markov モデルで記述されるとすると, この編曲の演奏モデルは HMM で表される [4]. 編曲結果は, 合奏譜が与えられたときにこれを生成する最も確からしい編曲の演奏を求めることにより得られる.

文献 [4] では, 和音 (同時多重音) を状態遷移の単位として扱っているが, 実際の編曲では和音自体の削除編集も行われる. この和音 (今の場合は音符) の削除は, 上記編曲の演奏モデルにおける演奏の前段階として演奏するかしないかを選択する過程を設けることで記述出来る. 演奏しない場合, 指は一つ前の演奏音の位置に留まり, (実際には演奏しないが) そこから合奏譜中の音符が生成されると考える. 以上をまとめると, 編曲の演奏モデルの状態は,

演奏しないあるいは左右のどちらの手で演奏するかを表す確率変数 $\xi = N, L, R$ (N (not play) は「演奏しない」を表す) と運指モデルの状態 (f_L, p_L, f_R, p_R) を合わせた状態 $r = (\xi, f_L, p_L, f_R, p_R)$ で表され, その遷移確率および出力確率は,

$$a_{rr'} = \begin{cases} \beta_N \delta_{f_L f'_L} \delta_{f_R f'_R} \delta_{p_L p'_L} \delta_{p_R p'_R}, & \xi' = N; \\ \beta_L a_{f_L f'_L}^L b_{f_L f'_L}^L (\ell(p'_L) - \ell(p_L)), & \xi' = L; \\ \beta_R a_{f_R f'_R}^R b_{f_R f'_R}^R (\ell(p'_R) - \ell(p_R)), & \xi' = R; \end{cases} \quad (6)$$

$$b_{rr'}(o) = \begin{cases} b_{\text{uniform}}(o), & \xi' = N; \\ b_{p'_L}^L(o), & \xi' = L; \\ b_{p'_R}^R(o), & \xi' = R; \end{cases} \quad (7)$$

と書かれる. ここで, β_N は合奏譜の対応する音符が削除される確率を表し, $\beta_{L,R}$ はそれが左手又は右手で演奏される確率を表す ($\beta_N + \beta_L + \beta_R = 1$). 出力される記号 o は, 合奏譜上の音符を表す. $b_{\text{uniform}}(o)$ は音高の集合における一様分布であり, 編曲で削除され演奏されない音符の音高は等確率で起こることを表す. また, $b_{p'_\eta}^\eta(o)$ ($\eta = L, R$) は, 編曲譜の音符の音高と合奏譜の音高の対応を表す編集確率である. この確率モデルは合流 HMM となっている [6].

β_N や $b_{p'_\eta}^\eta(o)$ は, 合奏譜の対応する音符によって変わり得り, 合奏譜のままでは演奏難易度が高いところの音符に関しては, 削除などの編集確率が大きくなることなどの他, 例えばメロディーやバスの音符は削除されにくいといった傾向や個々の音符がどのように編集されやすいかも記述出来る.

4.3 編曲アルゴリズム

前節に述べたモデルを用いた編曲アルゴリズムの詳細について述べる．まず，与えられた合奏譜において同じ旋律を持つ複数の声部を一つにまとめた縮小譜を作る．この縮小譜を出力と見なし，前節で述べたモデルの最尤推定列を求めることにより編曲結果が得られるが，これは Viterbi アルゴリズムにより求まる．上記モデルの状態空間は広いいため，単純な Viterbi アルゴリズムでは計算量が大きい，このモデルは合流 HMM であるため文献 [6] に述べられている方法により効率的な推定が可能である．

モデルパラメータである β_N や $b_{p_n}^n(o)$ を適切に設定することにより，前節に述べた様に難易度の調整や特定の音符を編曲に残すなどの設定が可能である．難易度の調整に関しては，例えば 3.4 節に述べた難易度基準により調整可能であるが，得られる編曲結果の難易度を直接調整出来ないため，反復法などにより順次最適化を行うことが考えられる．また後者に関しては，文献 [2] や [1] で述べられているメロディーやバスパートの抽出などを応用し楽譜情報を基に推定して与えることが考えられる他，編曲者の好みなどを反映して人手により与えることも考えられる．

4.4 評価

Tchaikovsky くるみ割り人形組曲の第 7 曲 “Danse des Mirlitons” の一部 (最後の 16 小節) を用いて実際にピアノ用編曲を行い評価した．合奏譜からの縮小譜の作成は，同じ発音時刻において音高と音価が等しい音符を全て一つにまとめることにより行った．編曲の難易度の調整は，計算時間の理由により反復法による最適化が難しかったため，予め設定した難易度 $\bar{\mathcal{D}}_{L,R}$ が平均的に得られるよう各音符に対してその近傍の縮小譜で求めた難易度 $\mathcal{D}_{L,R}^{\text{condense}}(t)$ を用いて $\beta_N = \bar{\mathcal{D}}_{L,R} / \mathcal{D}_{L,R}^{\text{condense}}(t)$ と設定した．ここで， $\mathcal{D}(t)$ の時間幅は $\Delta t = 1 \text{ sec}$ とし，左右どちらの値を用いるかは，縮小譜に対して予め両手部分離をした結果に基づいて決定した．また，今回はメロディーパート (第 1フルート) とバスパート (コントラバス) の情報は人手で与えることにし，これらのパートの音符に関しては $\beta_N = 0.0001$ とした．音高の編集確率 $b_{p_n}^n(o)$ は，原音のままを 0.8，上下 8 度移動の確率をそれぞれ 0.1，その他は 0 とした．運指モデルのパラメータは 3 節で得られたものを用いた．

図 5 から図 7 に編曲結果を示す．それぞれ $(\bar{\mathcal{D}}_L, \bar{\mathcal{D}}_R) = (5, 10), (20, 30), (30, 40)$ とした場合の結果を示している．図中，片手で同時に 12 度以上音程がある和音に関しては，それを示すためにアルペジオを付加した．また参考のため，オーケストラ譜を単純に縮小したもの (図 3) と作曲家自身によるピアノ用編曲の結果 (図 4) を示す [22]．結果により，設定した $\bar{\mathcal{D}}_{L,R}$ の値に応じて編曲結果の難易度が変化していることが確認出来る．また，速い箇所では編曲結果の和音の音数が少なくなるなど，局所的な難易度の調整が行われていることが分かる．全体的には，演奏難易度に

表 3 合奏曲のピアノ用編曲結果の評価結果．評価基準については本文を参照．

図	$(\bar{\mathcal{D}}_L, \bar{\mathcal{D}}_R)$	演奏難易度	原曲への忠実度
5	(5, 10)	8	4
6	(20, 30)	8	4
7	(30, 40)	10	8
4	(作曲家による編曲)	6	8

応じて原曲への忠実度も変化していることが多いが，例えば解決しない和声や装飾音など音符が増えることにより逆に不自然となる箇所も複数見られた．また，全ての曲の大部分は上級者であれば演奏可能であるが，編曲結果で演奏不可能あるいは困難な箇所 (例えば第 8 小節の右手の和音下降など) がいくつか含まれている．図 5 の第 14 小節右手の F#3 や図 6, 7 の第 8 小節左手で 16 分音符の G4 と同時に鳴る A4 様に不自然な両手部分離箇所も数カ所見られた．後者は右手のメロディーのつながりよりも G6 への跳躍の運指の確率が優先された結果であると考えられる．

編曲結果をピアニスト 1 名に評価して貰った．評価基準は，演奏難易度 (0: 「大変容易」から 10: 「大変難しい」) と原曲への忠実さ (0: 「原曲とはかけ離れている」から 10: 「大変忠実」) としたが，強弱やアーティキュレーションは評価の対象外とした．結果は，表 3 に記した通りであるが，全ての結果で演奏不可能あるいは困難な箇所があると指摘された．図 5 の編曲の難易度評価が高い理由は，第 8 小節の右手の和音下降が演奏不可能であることによる．一般的に，右手の 32 分音符における和音の連打は演奏不可能と判断されることが多かったが，1 つ音符を削除するだけで演奏が可能になると指摘されたところもあった．また，アルペジオで示した箇所の多くは演奏が容易でなく，また音楽的に特に効果的でないという意見を貰った．上記編曲結果と同時に作曲家自身による編曲結果も評価したが，演奏不可能箇所はなく，一般的に音楽的にも問題ないと同時に，第 5 小節第 2 拍で右手に B4 がある方が適切であることや第 8 小節第 2 拍の右手のメロディーは原曲通り 1 オクターブ高い方が良いなどの指摘もあった．

4.5 議論

前節の結果より，提案したピアノ用自動編曲手法により演奏難易度と原曲への忠実度を両立させた編曲がある程度実現されたことが確認された．結果では，演奏不可能な箇所が残っているが，これは提案した難易度基準を用いても確認出来る．例えば，図 6 の譜例の第 8, 10, 15 小節の 32 分音符では $\mathcal{D}_R(t)$ が 50 を超えており，特に第 15 小節では 80 近くになっていた．これらの箇所は，反復法などを用いてより最適な解を求めることにより減らすことが出来ると期待される．このようなアルゴリズムの設計および，それに必要な計算量の削減は今後の課題である．また，両手部分離がうまく出来ていない箇所については，より多くのデータ

を用いてパラメータフィッティングをした運指モデルによりある程度の改善は見込まれる。しかし、声部誘導の自然さなどは現段階ではモデルに入っておらず、原理的には拡張は可能であるが、計算量などの問題を解決していく必要がある。

今回はメロディーパートとバスパートの情報を人手で与えたが、これを自動推定する方法や、編曲結果をもとに編曲者が対応する確率値を調整するのを補助するシステムの構築などが今後の課題である。また、より人間に近い編曲結果を得るためには、和声学などの音楽の知識を組み込む必要があるであろう。

本研究では、ピアノ用編曲の自動化を議論しているが、同じ手法を編曲支援に応用することも可能である。例えば、演奏不可能であった箇所については、専門家の指摘にもある様に、音符をいくつか削除すれば演奏可能になる箇所も多く、編曲の支援目的ではこの編集を編曲者に任せることも考えられる。また、両手部分離がうまく来ていないところも、同様に編曲者あるいは演奏者が編集することは難しくないであろう。

5. まとめ

本稿では、合奏曲のピアノ用編曲問題の簡単化として極小編曲を議論した。これを演奏難易度を制約とした原曲への忠実度の最適化として問題を定式化し、ピアノの運指モデルと編曲における編集確率を合わせた確率モデルによる自動編曲手法を提案した。その際必要となる、ピアノの両手の運指モデルとして合流 HMM を用いた効率的な確率モデルを考案した。このモデルを基に演奏難易度の基準を考案し、演奏難易度を定量的に扱う方法を議論した。

編曲のためのモデルとして、従来提案された編曲の演奏モデルを合奏譜中の和音の削除編集を含むものに拡張し、これにピアノの両手運指モデルを合わせたものを構築した。このモデルにより得られる自動編曲アルゴリズムを用いて実際の合奏曲に対する編曲を行い、結果を評価および人間の編曲結果と比較した。簡単な規則に基づく方法では難しい演奏難易度の調整を含む、編曲結果が得られた一方、演奏不可能な箇所など改善が必要である結果も得られた。今後更なるアルゴリズムの改良などにより、編曲結果の改善の可能性を確認し、また自動編曲における今後の課題について議論した。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省/学術振興会科学研究補助費 課題番号 (23240021) および課題番号 (25880029) から補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] 藤田顕次他, 情処研究報告, MUS-77, p. 47, 2008.
- [2] S.-C. Chiu *et al.*, *Proc. AdMIRe*, 2009.

- [3] 遠山紀子他, 情処研究報告, MUS-69, p. 41, 2007.
S. Onuma and M. Hamanaka, *Proc. ICMC*, p. 191, 2010.
飯島崇裕, 齋藤康之, 映像情報メディア学会技術報告, **37(7)**, p. 19, 2013.
- [4] G. Hori *et al.*, *IPSSJ Journal*, **54(4)**, 2013-04-15, 2013.
- [5] Y. Yonebayashi *et al.*, *IJCAI*, p. 2915, 2007.
米林裕一郎他, 情処研究報告 MUS-71-29, p. 179, 2007.
- [6] 中村栄太他, 情処研究報告, 2013-EC-27, 15, 2013.
- [7] 竹川佳成他, 日本ソフトウェア科学会論文誌, **23(4)**, p. 51, 2006.
竹川佳成他, 情処学論, **52(2)**, p. 917, 2011.
岡明也他, 情処研究報告, MUS-100, No. 10, 2013.
- [8] F. Liszt, *Musikalische Werke*, Serie IV, Breitkopf & Härtel, 1922.
- [9] K. Klindworth (piano red.), *R. Wagner: Tannhäuser Vocal Score*, G. Schirmer, 1895.
- [10] C. Palmer, *Ann. Rev. Psychol.*, p. 115, 1997.
- [11] S.-C. Chiu and M.-S. Chen, *Proc. AdMIRe*, 2012.
V. Sébastien *et al.*, *Proc. ISMIR*, 2012.
- [12] 関口博之, 英保茂, 情処論文誌, **40(6)**, pp. 167–177, 1999.
M. Hart and E. Tsai, *The UMAP Journal*, **21(1)**, pp. 167–177, 2000.
- [13] A. Al Kasimi *et al.*, *ISMIR*, pp. 355–356, 2007.
- [14] C. Czerny (ed.), *Klavierwerke von J. S. Bach*, C. F. Peters, ca. 1840.
F. Busoni (ed.), *Bach: Two and three part inventions*, Breitkopf & Härtel, 1892/1917.
- [15] H. von Bülow *et al.* (ed.), *Beethoven's sonatas*, J. G. Cotta, ca. 1875.
M. Pauer (ed.), *Sonaten für Klavier zu zwei Händen*, C. F. Peters, ca. 1920.
H. Schenker (ed.), *Beethoven: Klaviersonaten*, Universal Edition, 1918–21.
- [16] J. Musafia, *The Art of Fingering in Piano Playing*, MCA Music, 1971.
- [17] R. Parncutt *et al.*, *Music Perception*, **14(4)**, pp. 341–382, 1997.
林田教裕, 水谷哲也, 情処学会全国大会講演論文集, **2**, pp. 203–204, 2003.
- [18] 野口賢治他, 情処学会全国大会講演論文集, 2-101, 1996.
- [19] 春原雅彦他, 情処学会全国大会講演論文集, 2-147, 2010.
- [20] R. A. Rasch, *Acustica*, **43**, p. 121, 1979.
中村栄太他, 情処学論, **54(4)**, p. 1338, 2013.
- [21] R. Parncutt *et al.*, *Australian J. of Psychology*, **51(3)**, pp. 204–210, 1999.
- [22] P. Tchaikovsky, *The nutcracker suite*, P. Jurgenson, 1892.
P. Tchaikovsky, *The nutcracker suite. Arrangement for solo piano*, P. Jurgenson, 1892.

The image displays a piano score in 2/4 time, consisting of four systems of three staves each. The key signature is one sharp (F#). The score is annotated with blue and red dots. Blue dots are placed above notes in the upper staves, representing the melody part. Red dots are placed below notes in the lower staves, representing the bass part. The notation includes chords, single notes, and rests. Measure numbers 5, 9, and 13 are indicated at the beginning of their respective systems.

図 3 Tchaikovsky のオーケストラ曲に対する単純な縮小譜．メロディーパート（第 1 フルート）は青の音符，バスパート（コントラバス）は赤の音符で示されている．

The image displays four systems of piano score, each consisting of a treble and bass staff. The music is written in 2/4 time and the key signature of D major (two sharps). The first system shows a rhythmic accompaniment in the bass and a melodic line in the treble. The second system features more complex chordal textures in the treble. The third system is similar to the first, with a steady bass line and a melodic treble line. The fourth system concludes with a final cadence, marked by a double bar line and repeat dots.

図 4 Tchaikovsky のオーケストラ曲に対する作曲家自身のピアノ用編曲結果 [22].

図 5 Tchaikovsky のオーケストラ曲に対するピアノ用編曲結果 . $(\mathcal{P}_L, \mathcal{P}_R) = (5, 10)$ とした場合の結果を示す .

図 6 Tchaikovsky のオーケストラ曲に対するピアノ用編曲結果 . $(\mathcal{D}_L, \mathcal{D}_R) = (20, 30)$ とした
た場合の結果を示す .

The image displays a piano score for a piece by Tchaikovsky, arranged in four systems. Each system consists of a treble clef staff and a bass clef staff. The key signature is D major (two sharps) and the time signature is 2/4. The first system shows the initial chords and melodic lines. The second system begins at measure 5, featuring more complex chordal textures and arpeggiated figures. The third system starts at measure 9, continuing the harmonic development. The fourth system begins at measure 13, showing further melodic and harmonic progression. The score includes various musical notations such as chords, arpeggios, and dynamics.

図 7 Tchaikovsky のオーケストラ曲に対するピアノ用編曲結果 . $(\bar{\mathcal{D}}_L, \bar{\mathcal{D}}_R) = (30, 40)$ とした
た場合の結果を示す .