

情報理論的考察に基づく オーケストラ曲のピアノ自動編曲の試み

李 由^{1,a)} 保利 武志^{1,b)} Christoph M. Wilk^{1,c)} 嵯峨山 茂樹^{1,d)}

概要: 本稿では、ピアノ編曲作業を、原曲の情報をできるだけ多く残し、かつ演奏可能なピアノ譜を出力する情報伝送路であると捉え、情報理論の応用を試みる。従来研究で多く使用されているルールベースを用いるアプローチに対し、我々は、ルールの設定やパラメータの調整などの複雑な手作業をできるだけ避けるように、より単純な原理に基づくオーケストラ曲の自動ピアノ編曲方法を検討する。このために、情報理論に基づきオーケストラ曲の各音符の局所のエントロピーを計算する方法と、それを用いた自動編曲手法を議論する。提唱した自動編曲の原理に基づく編曲結果を、ベートーヴェンの交響曲を例として示す。

An Information-Theoretic Approach to Automatic Piano Arrangement of Orchestral Music

YOU LI^{1,a)} TAKESHI HORI^{1,b)} CHRISTOPH M. WILK^{1,c)} SHIGEKI SAGAYAMA^{1,d)}

Abstract: In this paper, we consider the process of piano arrangement as a communication channel which outputs playable piano scores while retaining as much information of the original piece as possible by applying principles of information theory. While previous systems for automatic piano arrangement often rely on heuristic rules, we aim to reduce this process to the application of a single fundamental principle. By doing so we avoid complicated manual work such as defining detailed rules and adjusting parameters. Thus, we propose a method which calculates the local entropy of each note in an orchestral piece based on information theory, and uses this information to arrange the orchestral score for piano. As exemplary results of the proposed automatic arrangement principle, we present piano arrangements of Beethoven's symphonies.

1. はじめに

編曲は、音楽にとって不可欠な部分である。単旋律に他の楽器を加え、より豊かな音楽を作ることと目的とした編曲や、例えばクラシック音楽をポピュラー音楽にアレンジすることで、原曲と異なる雰囲気を作り出すための編曲など、目的によって様々な種類がある。本稿では、オーケストラ曲の原曲をなるべく忠実に、ピアノで演奏するための編曲を目的とする。

音楽専門家に対し、ピアノでオーケストラ曲を演奏する

ことは、作品をよく理解し、分析するために必要な方法であり、音楽の研究において非常に重要な価値を持っている。一方で、音楽愛好者に対し、好きな合奏曲をピアノで演奏することは、音楽を楽しむ方法の一つである。しかし、一般に、オーケストラ曲のピアノアレンジ楽譜が入手困難な場合は少なくない。このような理由で、オーケストラ曲が自動的にピアノ曲に編曲できることが望ましい。

従来、合奏曲をソロ用の自動編曲における研究は多く行われてきた [1], [2], [3]。藤田ら [4] は、芹澤ら [5] の研究に基づいて合奏曲の音楽特徴量に評価値を付け、旋律パートとベースパートをそれぞれ推定し、推定した結果を右手・左手に配置して集約を行い、かつ演奏上の制約によって、ピアノ譜を生成した。田中ら [6] は、クラスタリングによって合奏曲のパート間の役割を区別し、設定したルールによってメロディ、ハーモニー、ベースパートを選択し、電

¹ 明治大学 大学院 先端数理科学研究科
〒164-8525 東京都中野区 4-21-1

a) cs172018@meiji.ac.jp

b) hori@meiji.ac.jp

c) wilk@meiji.ac.jp

d) sagayama@meiji.ac.jp

子オルガン曲へ編曲した。中村ら [7] は、合流 HMM モデルに基づいた両手の運指モデルを構築した上で、合奏曲をピアノ曲へ編曲した。高森ら [8] は、伴奏データベースを構築し、メロディ、コード（後藤ら [9] の研究より）、厚みなどの音楽特徴量によって、メロディの修正と伴奏の選択を行い、左手・右手の編曲譜面をそれぞれ生成し、原曲の雰囲気や反映したピアノアレンジを行った。これらの研究は主としてルールベースを用いるアプローチをとっているため、ルールの設定やパラメータの調整には手作業が必要とされてき、自動化には至らなかった。また、様々の音楽作品に対し、ルールの汎用性が低い。

本研究では、編曲の本質を追求し、複雑なルールの設定やパラメータの調整をできるだけ避けように、よりシンプルな原理に基づいた自動編曲を検討する。

2. 情報理論に基づく音楽編曲の定式化

2.1 ピアノリダクション問題

合奏曲からピアノへの編曲では、違和感を感じるような個所の発生を防ぐため、原則として新たな音符（オクターブ移動によって生成した新たな音符を除く）の付加は非常に少ない [7] と考え、我々は、情報保存としての編曲に着目した。本来は、ピアノ曲への編曲を行う際、オーケストラ曲の全ての音符をピアノ曲で残したいが、同時発音数などの理由で、演奏上の制限で不可能であるため、音符の取捨選択することが必要である。すなわち、本研究では、ピアノ編曲を音符の削除とオクターブ移動のみで行うピアノリダクション問題として扱った。

合奏曲は、それぞれのパートが異なる役割を果たしている。その中で、ピアノ編曲で保存されるべき原曲の重要な部分を考えると、まずは主旋律などの人間が聞く場合に原曲の中で「目立つ」部分であろう。この原因としては、主旋律部分は原曲を特徴づける一番重要な要素である。また、伴奏は楽曲の構造を支える役割を担うので、編曲後も保持されるべきである。以上より、自動ピアノ編曲は、オーケストラ曲の主旋律部分と伴奏部分を抽出し、ピアノ曲で残す作業と考えられる。

仮に、オーケストラ曲の各パートがフレーズ分割されているとすると、主旋律と伴奏としてのフレーズは、一定のパートに固定されるとは限らないので、すべてのパートのすべてのフレーズから取捨選択して組み合わせ、ピアノ譜を構成しなければならない。

本研究は、自動編曲はこのようなピアノリダクション問題と捉えた。

2.2 情報理論の応用の試み

本研究では、ピアノ編曲作業を、原曲での重要な情報をできるだけ多く残し、かつ演奏可能なピアノ譜を出力する情報伝送路であり、オーケストラ曲の各フレーズの中の音

符を、背後に隠れたある様々な情報源から発せられたメッセージであると捉え、情報理論の応用を試みた。

作曲家は作曲する際、主旋律などの目立つ部分を強調するべきである。その手法としては、伴奏部分は予測が容易な平凡な音形であることに對し、主旋律部分には様々な音高やリズムが配置される。すなわち、主旋律部分は情報豊富なフレーズである。オーケストラ曲の主旋律部分と伴奏部分を区別するために、各フレーズ内の音符を生成する背後に隠れたある情報源から発生する情報量を計量しなければならない。

シャノンは、無記憶情報源の発生情報量を定義した [10]。確率変数を $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ とすると、 X の確率分布 $P(X)$ によってエントロピー（平均情報量）は：

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1)$$

である。情報源のエントロピーが大きいほど、様々なイベントが発生する可能性が高くなり、そこに含まれる情報量が多くなる。それに対し、情報源のエントロピーが小さいほど、様々なイベントが発生する可能性が低くなり、そこに含まれる情報量が少なくなる。

要するに、エントロピーの計算によって、各フレーズを持つ情報の豊富さを比較できる。すなわち、主旋律としてのフレーズのエントロピーは大きい、伴奏としてのフレーズのエントロピーは小さいはずである。

2.3 音形のエントロピーの計算方法

2.3.1 音高エントロピー

フレーズを構成する N 個の音符の音高列を、背後に隠れたある音高の情報源からのランダムなサンプリング結果であると見なそう。音高の情報源の確率変数 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ の確率分布を $P(X)$ とすると、その情報源の各音高の確率 $P(x_i)$ は一般に未知であるので、これを N 個の音符を含むフレーズ内に観測した音高 i の出現回数 n_i の比 $\frac{n_i}{N}$ によって推定できるものとする。音高の情報源のエントロピーは、推定した各音高の確率を用い、式 (1) により定義できる。

一般に、主旋律部分には伴奏部分より多くの非和音が含まれる傾向があり、平凡な伴奏に比べると音高の種類が多様であるので、伴奏より複雑で、豊富な情報を持っている。このことは音高エントロピーに反映できる。

また、音高エントロピーを計算する際、計算の便宜上、和音の場合には単音化処理を処理し、最高音のみを扱う。これは人が音楽を聴取する時に、音高が一番高い音に注目することが考えられる [11]。

音高エントロピーの計算例を一つ挙げる。図 1 で表示されるフレーズにおける各パートの音高エントロピーの計算結果を表 1 に示す。結果によると、クラリネットパート (Cl 1-2) の音高エントロピーが一番大きいであること



図 1 ベートーヴェン「交響曲第 5 番 Op.67」第 1 楽章の 67-70 小節
Fig. 1 Beethoven: Symphony No. 5, Op. 67, First Movement, measures 67 to 70

表 1 図 1 で表示されるフレーズにおけるクラリネット (Cl 1-2) および他のパートの音高エントロピーの計算結果. 説明の便宜上, ここではピッチクラスの値のみを示しているが, 音高エントロピーの計算ではオクターブも考慮している.

Table 1 Pitch entropies of clarinet (Cl 1-2) and other instruments calculated in the phrase shown in Fig.1. For convenience of illustration, only the pitch classes are shown here, whereas our algorithm accounts for different octaves.

Part	$P(x_i)$												Entropy
	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	
Cl 1-2	0.25	-	0.125	0.25	-	0.125	-	-	-	-	0.25	-	2.25
Fag 1-2	-	-	-	-	-	0.25	-	0.25	0.25	-	0.25	-	2
Vln 2	-	-	-	-	-	-	-	0.5	0.5	-	-	-	1
Vla	-	-	0.25	0.5	-	0.25	-	-	-	-	-	-	1.5
Vc Cb	-	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-	0.75	-	0.81

が分かる. これは, クラリネットパートはより多くの非和声音が含まれ, 主旋律の役割を担うためである. これに対し, チェロとコントラバスパート (Vc Cb) の音高エントロピーは一番小さいであり, 伴奏の役割を担う. この例は, 音高エントロピーの計算によって, 主旋律部分と伴奏部分を正しく区別できることを示した.

2.3.2 リズムエントロピー

音高と同様, リズムもフレーズの豊富さを評価する要素の一つである. IOI (inter-onset interval) は, 2つの連続した音の始まりの間の時間間隔である. 音価と比べると, IOI は人間の耳にとって, より目立つためであるため, 我々は, IOI エントロピーによって, リズムエントロピーを定義した. 可能な IOI の値を 16 分音符まで量子化し, 音高エントロピーと同じ計算方法を用いることで, リズムのエントロピーが計算できる.

通常, 主旋律部分には伴奏に比べると発音時間間隔の種類が多様である. この原因は, 伴奏部分のリズムパターンは一般に単一の繰り返しに対し, 主旋律のリズムパターンはより多様である. すなわち, フレーズの IOI エントロピーが大きいほど, フレーズは主旋律部分である可能性が高くなり, フレーズの IOI エントロピーが小さいほど, フレーズは伴奏部分である可能性が高くなる.

2.3.3 音形のエントロピー

以上より, m 種類の音高を持つ音高の情報源の確率変数 $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ の確率分布を $P(X)$ とすると, 各音高の確率 $P(x_i)$ より, この音高情報源のエントロピーは:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^m P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (2)$$

であり, n 種類の IOI の値を持つ発音時間間隔の情報源の確率変数 $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ の確率分布を $P(Y)$ とすると, 各発音時間間隔の確率 $P(y_j)$ より, このリズム情報源のエントロピーは:

$$H(Y) = - \sum_{j=1}^n P(y_j) \log_2 P(y_j) \quad (3)$$

である.

音形は, 音高とリズムによって定義される. $P(i, j)$ を, 音高が i , 発音時間間隔が j の結合確率を表すと, この音形の情報源のエントロピーは結合エントロピー:

$$H(X, Y) = - \sum_{ij} P(i, j) \log_2 P(i, j) \quad (4)$$

によって, 定義される.

ここでは, X と Y には確率的独立性があると仮定すると, 音形の情報源のエントロピーは:

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) \quad (5)$$

である. すなわち, 音高エントロピーとリズムエントロピーの総和によって, フレーズに含まれる音形の情報量を定義した.

以上のような音形のエントロピーが最も大きいフレーズと最も小さいフレーズを選択して組み合わせ, ピアノ自動編曲を行う. それは, 人間が原曲を聴く際に主旋律部分と伴奏部分はピアノ編曲結果にも残したいとする編曲法を意味すると考えられる.

2.4 スライディングフレーム分析

以上のエントロピーの算出法に基づき, 本来はフレーズ単位に取捨選択することが望ましい. しかし一般に, 音符列から音楽フレーズ単位を自動抽出するのは容易ではない. この原因としては, 主に二つがあると考えられる. 一つ目は, フレーズの長さは異なることである. また, フレーズ

は弱拍から始まる際、フレーズの開始はバーのような自然なりズミカルなボーダーと一致することは限らない。すなわち、小節や拍などを基本単位としたフレーズの抽出は、フレーズをが途切れうる可能性がある。

以上の原因より、楽曲をフレーズに分割することは困難である。本研究では楽曲をフレーズに直接分割せず、原楽譜中の各音符について、各音符をフレームの中心とし、中心からの距離によって各音符の重み付けした出現回数に基づき、フレームのエントロピーを算出した。すなわち、フレーズというかっちりとしたものを見つけるものではなく、「仮のフレーズ」を設定した上で、局所のエントロピーを計算した。

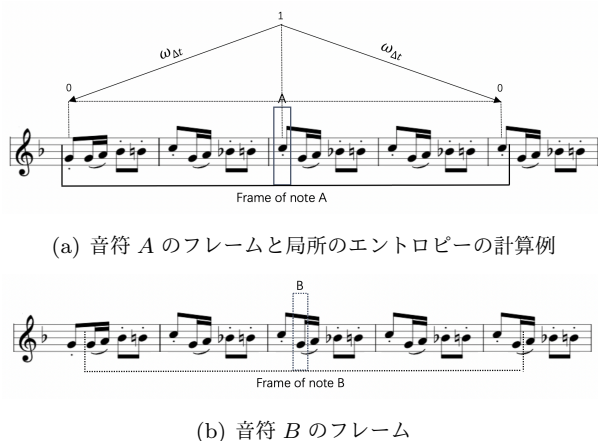


図 2 スライディングフレーム分析の計算例。局所のエントロピーの計算のための各音符の重み $\omega_{\Delta t}$ は、フレームの中心からの距離に基づいて計算される。

Fig. 2 Example of a sliding frame around notes A and B. Each note's weight $\omega_{\Delta t}$ for entropy calculation is computed based on their distance from the frame's center.

例えば、図 2(a) 中の音符 A の局所の音高エントロピーは次のように計算される：

- 音符 A を中心とし、この音符の前後 2 小節の範囲にフレームを掛ける。
- 中心から 16 分音符を単位で各音符の時間距離の絶対値 Δt を計算する。
- 各音符の重み $\omega_{\Delta t}$ は次のように与える：

$$\omega_{\Delta t} = 1 - \Delta t \times \frac{2}{\text{FrameLength} - 1} \quad (6)$$

- 得られた重み $\omega_{\Delta t}$ を用い、着目している音符 i の重み付き出現回数 $\hat{n}_i$ とその確率

$$P(\hat{x}_i) = \frac{\hat{n}_i}{\sum_{j \in \mathcal{J}} \hat{n}_j} \quad (7)$$

を計算し (ただし、 $\mathcal{J}$ はフレーム内に存在する音符集合)、式 (1) によって、音符 A の局所のエントロピーを定義した。

このプロセスを、局所のエントロピーを得るためにオー

ケストラ曲内のすべての音符について繰り返す。例えば、次の音符 (音符 B) のフレームを図 2(b) に示す。

このような手順に従い、スライディングフレーム分析を用い、楽曲の各音符の局所の音形のエントロピーを算出した。

3. 自動編曲の手順

3.1 主旋律部分の抽出

各時刻においては、スライディングフレーム分析を用い、オーケストラ楽譜のすべてのパートの音符の音形のエントロピーを計算し、音形のエントロピーが最も大きい音符はこの時刻を属する主旋律部分として選択される。

3.2 伴奏部分の抽出

主旋律部分の抽出手法と同じように、各時刻において音形のエントロピーが最も小さい音符はこの時刻を属する伴奏部分として選択される。ただし、選択された音符が、伴奏として機能するように、各時刻において主旋律部分と判定された音符の音高より高い音高を持つ音符はオクターブの移動によって、主旋律部分をピアノ曲での最高音になるように調整する。

3.3 和音の抽出

和音は音楽において重要なので、編曲後も保持されるべきである。しかし、和音部分の音形は、種類の数や複雑度における特徴がないため、エントロピーの計算によって抽出できない。

和音の特性に着目すると、頻繁に現れる音や長い時間鳴る音が和音になる可能性が高いことが分かる。古典的な西洋音楽の音楽理論では、三和音を基本として考えることが多いため、本研究では、松原ら [12] が提案した近似的な和音計算法に基づき、スライディングフレーム分析を用い、フレーム内で上位 3 つまでの重み付き音価総和をもつピッチクラスに属する音符が和音構成音として扱った。また、伴奏部分と同じように、主旋律部分をピアノ曲での最高音になるように調整する。

3.4 ピアノ演奏可能に調整

最後には、ピアノでの演奏可能性を考慮するため、前述した方法によって選択された音符を以下の三つの条件を満たすように調整する：

- 音高の範囲は C2 から B6 の間に制限される。
- 片手で演奏される最高音と最低音の音程は、オクターブ以内である。
- 片手で同時に演奏できる音符は最大 4 つまでとする。

4. 評価実験

4.1 実験方法

実験にはベートーヴェンの交響曲第1, 5, 6番の各々第1楽章から抽出されたミュージッククリップを六つ使用した。本研究の評価について、作曲専攻学生は、「原曲への忠実さ」と「演奏モデルの性能」の2点について主観評価を行った。また、「原曲への忠実さ」における評価項目は、主(副)旋律の再現性、フレーズ分割の妥当性、和音の再現性であった。

4.2 結果と考察

オーケストラ曲の抜粋と生成したピアノ曲譜例を図3と図4に示します。

まず、オーケストラ曲の最高音ではない主旋律(図3)と、異なる楽器間を移動する主旋律(図4)を含め、主旋律がエントロピーの計算によって、基本的に抽出されてきた。ただし、主旋律と伴奏パートのみを抽出したため、副旋律などの情報が見逃された指摘もあった。今後の研究は、カルバック・ライブラー情報量を用い、複数の旋律がある合奏曲内の副旋律の抽出は見込まれる。その理由は、原曲の情報をできるだけ多く保存することができるように、抽出された主旋律と可能な限り異なる旋律を選択したい。

また、スライディングフレーム分析は、望ましい効果が得られた。例えば、図4に示すように、この方法は、小節を基本単位としたフレーズの分割手法から生じる問題を解決できた。しかし、スライディングフレーム分析は欠点も存在する。局所のエントロピーが各音符の開始時間において計算されるので、重要度の低い音符もいくつかを抽出され、主旋律がはっきりしない結果になった。

さらに、編曲結果に対し、和音の再現性は特に問題となる箇所は指摘されなかった。これは、近似な和音抽出方法の有用性を提示した。

最後、演奏モデルの性能における評価から見ると、本研究で提案した演奏モデルは、理論的には演奏可能な楽譜が生成されたが、まだ音符間の動きと運指の難しさを考慮していないため、短時間に離れた鍵盤を押下しなければならないような演奏の難しいパターンが生じたことが指摘された。この問題を解決するために、運指モデルの導入が必要である。

5. おわりに

本稿では、オーケストラ曲のピアノ自動編曲問題を情報理論的に考察し、オーケストラ曲の各音符イベントに対する局所のエントロピーを計算する方法と、それを用いた合奏曲のピアノ曲への自動編曲手法を検討した。実験の結果では、エントロピーがオーケストラ曲の主旋律を基本的に



(a) Beethoven: Symphony No. 5, Op. 67, First Movement, measures 97 to 100



(b) 編曲の結果

図3 オーケストラ曲の抜粋と生成したピアノ曲譜例(1)

Fig. 3 Excerpt of the original piece and the corresponding piano reduction (1)

抽出できることを示し、スライディングフレーム分析と近似な和音抽出手法の有効性を提示した。今後は、音符間の移動距離を考慮することで、運指モデルを導入する演奏モデルの構築が必要である。また、副旋律も扱える自動編曲の研究を進めたい。

謝辞 本研究はJSPS 科研費17H00749の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Hori, G. and Sagayama, S.: HMM-based automatic arrangement for guitars with transposition and its implementation, *ICMC* (2014).
- [2] Onuma, S. and Hamanaka, M.: Piano Arrangement System Based On Composers' Arrangement Processes,

(a) Beethoven: Symphony No. 1, Op. 21, First Movement, measure 147
(b) 編曲の結果

図 4 オーケストラ曲の抜粋と生成したピアノ曲譜例 (2)

Fig. 4 Excerpt of the original piece and the corresponding piano reduction (2)

ICMC (2010).

- [3] Chiu, S.-C., Shan, M.-K. and Huang, J.-L.: Automatic system for the arrangement of piano reductions, *Multimedia, 2009. ISM'09. 11th IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 459–464 (2009).
- [4] 藤田顕次, 大野博之, 稲積宏誠ほか: 習熟度を考慮した複数楽譜からのピアノ譜生成手法の提案, 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2008, No. 89 (2008-MUS-077), pp. 47–52 (2008).
- [5] 芹沢裕子, 鈴木伸崇, 佐藤洋一郎, 早瀬道芳ほか: 複数のパートに分散したメロディを抽出するための一手法, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2003, No. 65, pp. 191–192 (2003).
- [6] 田中大貴, 伊藤克亘ほか: 旋律特徴と楽器特徴に基づく総譜の旋律クラスタリング, 第 80 回全国大会講演論文集, Vol. 2018, No. 1, pp. 49–50 (2018).
- [7] 中村栄太, 小野順貴, 嵯峨山茂樹ほか: ピアノの両手連指モデルによる合奏曲のピアノ用自動編曲手法, 研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2013, No. 14, pp. 1–13 (2013).
- [8] 高森啓史, 佐藤晴紀, 中塚貴之, 森島繁生ほか: 原曲スコアの音楽特徴量に基づくピアノアレンジ, 研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2017, No. 16, pp. 1–6 (2017).
- [9] 後藤真孝, 吉井和佳, 藤原弘将, 中野倫靖ほか: Songle: 音楽音響信号理解技術とユーザによる誤り訂正に基づく能動的音楽鑑賞サービス, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1363–1372 (2013).
- [10] Shannon, C. E.: A mathematical theory of communication, *Bell system technical journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379–423 (1948).
- [11] Uitdenbogerd, A. L. and Zobel, J.: Manipulation of music for melody matching, *Proceedings of the sixth ACM international conference on Multimedia*, ACM, pp. 235–240 (1998).
- [12] 松原正樹, 岡本紘幸, 佐野智久, 鈴木宏哉, 延澤志保, 斎藤博昭ほか: ScoreIlluminator: スコア色付けによるオーケストラスコアリーディング支援システム, 情報処理学