

自動伴奏生成による作曲支援方法の提案

中央大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻 井口 貝 (Kai INOKUCHI)
Department of Computer Science
Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

1 はじめに

1.1 背景

伴奏とは音楽用語の 1 つであり、主体となる旋律に対して副次的に演奏されるパートである。ポピュラー音楽において楽曲の伴奏は、主旋律の印象を決定づける非常に重要な役割を持つ。そのため、作曲作業において伴奏の付与は大きな部分を占める。

伴奏の多くは複数の和音の組合せから成り、一般に 1 つの主旋律に対して適用されうる伴奏は複数存在する。そのため、主旋律に対して効果的な伴奏を付与するには、多くの場合、和音同士の性質や組合せ等に関する音楽的な知識や経験が必要となる。

1.1.1 和音とは

和音とは、同時に鳴らされる複数の音程 (図 1) の集合である。また、複数の和音の組合せを和音進行と呼ぶ。また、一般的に各和音を表すためには「C」、「Am」等のアルファベットの記号が用いられ、この記号をコードネームと呼ぶ。

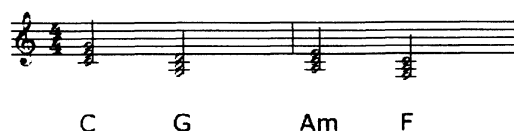


図 1: 和音の例

1.2 研究目的

前述したように、音楽的な専門知識や経験が無い者にとって、主旋律に対する効果的な伴奏を付与することは困難である。本研究の目的は、ポピュラー音楽の作曲作業の一部である伴奏の付与を自動化することにより、音楽的な専門知識を持たない者の作曲作業を支援する手法を提案することである。

1.3 提案手法について

本研究の提案手法は、図 2 に示す通り、入力として与えられた旋律に対して適切な伴奏を出力するものである。出力に際して、ある旋律に対してすでに得られている適切な和音進行を教師和音進行として用いる。

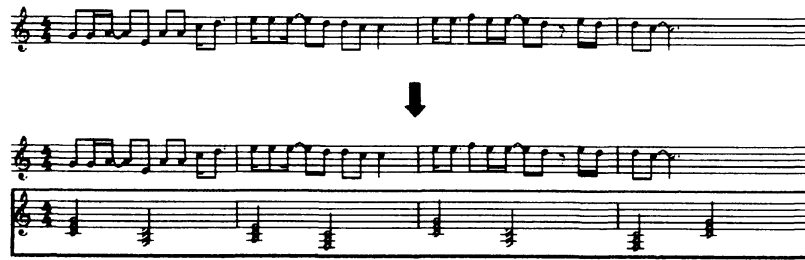


図 2: 提案手法の概念図

2 提案手法

2.1 概要

提案手法では、次の3段階から成る。第1段階では、入力された旋律を一定の長さごとに分割する。第2段階では、分割された旋律からグラフを生成する。そして、第3段階では生成されたグラフの重みに関する最短路を求め、出力とする。

グラフに対する重みは、すでに適切な伴奏が付与されている旋律から、逆最適化を用いて導出したパラメータを用いて決定される。次節から、提案手法の各段階と、重みの決定方法について述べる。

2.2 旋律の分割

入力された旋律は、一定の長さ (Block) ごとに分割される。図3に示す通り、提案手法では Block ごとに1つの和音を決定し、各 Block に対応する和音の組合せを出力とする。本研究では、Block の長さを2拍とした。

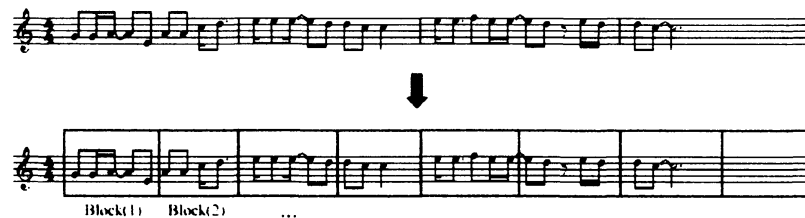


図 3: 旋律の分割

2.3 グラフの生成

分割された旋律の各 Block に対して、適用候補となる和音を列挙する。図4に示す通り、各 Block において、出力として選択される和音は、Block 中の候補の和音から1つのみである。

次に、図5に示す通り、列挙された各和音をノードとするグラフ $G = (V, A)$ を作成する。ここで V は始点、終点、および候補和音に対応する頂点の集合であり、 A は、連続する2つの Block 対間の完全2部グラフの全ての枝の集合である。

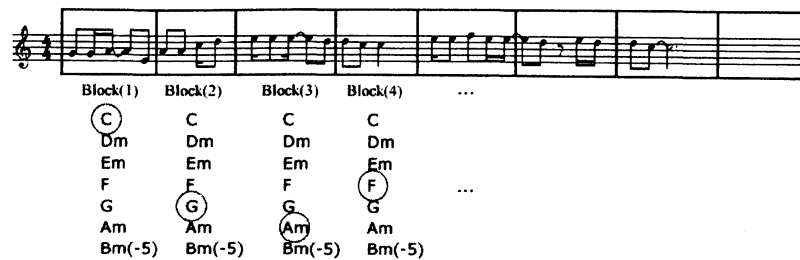


図 4: 候補和音の選択

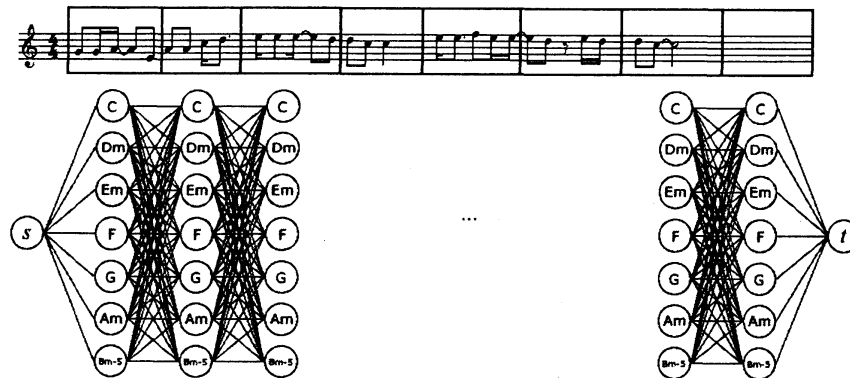


図 5: グラフの生成

2.4 最短路の導出

Block 内の旋律に対して選択されるそれぞれの和音や、2つの Block 対間で選択される和音の組合せには音楽理論や視聴上の感性に基づく「善し悪し」が存在する。この「善し悪し」を後述する指標で評価し、辺 $a \in A$ の重みとして表現する。辺 a の重みは小さいほど、 a が繋ぐ2つの和音の選択が良いことを示す。

そこで、各辺に「善し悪し」に応じた重みを与え G の始点から終点までの最短路問題を解き、最短路に含まれるノードに対応する和音の組を出力とする。

2.4.1 和音の評価指標

本研究では、枝 $a = (u, v) \in A$ の端点ノードに対応する和音のペアを、以下の4つの指標で評価する。枝 a に対する各指標は、 a が繋ぐ2つの和音の選択の良さに対する5段階の順序尺度とする。尺度の値は良いものから順に $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ の5つとする。

- 指標 1: $n_1(u, v) \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

ポピュラー音楽において、旋律と和音は密接な関係にあり、多くの場合お互いの音程を共有している。本指標は、和音 v を成す音程（構成音）と適用される Block 内の旋律がどの程度合致するかを評価するものである。

指標 1 の尺度値が 1, 2, 3, 4, 5 のとき、枝 (u, v) の指標 1 に関する重みをそれぞれ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ とする。

- 指標 2: $n_2(u, v) \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

和音の構成音によっては、適用対象となる旋律と不快な響き（不協和音）を生じる場合がある。本指標は、和音 v の構成音と適用される Block 内の旋律が不協和音を構成しないかを評価するものである。

指標 2 の尺度値が 1, 2, 3, 4, 5 のとき, 枝 (u, v) の指標 2 に関する重みをそれぞれ $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ とする.

- 指標 3: $n_3(u, v) \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

和音同士のリズムには幾つかの種類 (ケージン) があり, ポピュラー音楽で使われるケージンの種類は慣例的にある程度決まっている. 本指標は和音のペア (u, v) 間のケージンの良さを評価するものである.

指標 3 の尺度値が 1, 2, 3, 4, 5 のとき, 枝 (u, v) の指標 3 に関する重みをそれぞれ $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ とする.

- 指標 4: $n_4(u, v) \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

連続する和音間の構成音が隔たりが少ない場合, 聴覚上の展開が少なく, 対象となる旋律の印象を強く残すことが出来ない場合が多い. 本指標は, 和音のペア (u, v) 間の構成音の差がどの程度かを評価するものである.

指標 4 の尺度値が 1, 2, 3, 4, 5 のとき, 枝 (u, v) の指標 4 に関する重みをそれぞれ $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$ とする.

2.4.2 枝重みの定義

前節で導入した評価指標の値を用い, 前述の 4 つの指標 $n_1, \dots, n_4$ に関する重みの総和とする. すなわち, 辺 a の重み $\omega(a)$ は以下ようになる.

$$\omega(a) = \alpha_{n_1(u,v)} + \beta_{n_2(u,v)} + \gamma_{n_3(u,v)} + \delta_{n_4(u,v)}, \forall a = (u, v) \in A.$$

2.5 逆最適化によるパラメータの推定

係数 $\omega(a)$ を定めるには, 前節で述べた, 指標に関する重み, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) を定める必要がある. そこで, 本研究では, ある旋律に対してあらかじめ得られている適切な和音進行を教師和音進行として, その旋律に対して教師和音進行が出力されるように $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) を定める問題を逆最適化問題として定式化する.

2.5.1 逆最適化問題の定式化

教師和音進行が得られている旋律から生成されるグラフ $G = (V, A)$ とすると, G 上の最短路問題 (P) は以下のように記述することが出来る.

$$\begin{aligned} \text{P:} \quad & \min. \quad \sum_{a \in A} \omega(a)x(a) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{a \in \text{OUT}(v)} x(a) - \sum_{a \in \text{IN}(v)} x(a) = \begin{cases} 1 & (v = s), \\ 0 & (\forall v \in V \setminus \{s, t\}), \\ -1 & (v = t), \end{cases} \\ & x(a) \geq 0 \quad (\forall a \in A). \end{aligned}$$

ここで s, t はそれぞれグラフの始点, 終点である. 係数 $\omega(a)$ は辺 a の重みであり, $\text{OUT}(v), \text{IN}(v)$ はそれぞれ, 頂点 v から出る枝と, v へ入る枝の集合である. また, $x(a)$ は最短路において辺 a を通る場合は 1, そうでない場合は 0 をとる (0-1) 変数である. ここで, 非巡回的な有向グラフの最短路問題において, $x(a)$ を上記のように非負変数で置き換えても整数最適解を持つことが知られている.

この問題の双対問題 (D) は以下のように記述することが出来る.

$$D: \quad \max. \quad \pi(t) - \pi(s)$$

$$\text{s. t.} \quad \pi(u) - \pi(v) \leq \omega(a), \forall a = (u, v) \in A.$$

相補スラック定理から、与えられたパス P^* がグラフ $G = (V, A)$ の最短路である必要十分条件は、(D) の許容解 π が存在して、

- $\pi(u) - \pi(v) \leq \omega(a), \forall a \in A,$
- $\pi(u) - \pi(v) = \omega(a), \forall a \in P^*,$

であることが導かれる。また提案手法における逆最適化問題の目的関数は、各指標に関する重みの内最大のもの $\alpha_5, \beta_5, \gamma_5, \delta_5$ の総和を最小化するものとした。

これらより、提案手法における逆最適化問題は以下ようになる。

$$\min. \quad \alpha_5 + \beta_5 + \gamma_5 + \delta_5$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \omega(a) = \alpha_{n_1(u,v)} + \beta_{n_2(u,v)} + \gamma_{n_3(u,v)} + \delta_{n_4(u,v)}, \forall a = (u, v) \in A, \\ & \omega(a) \geq \pi(u) - \pi(v) \quad (\forall a \in A), \\ & \omega(a) = \pi(u) - \pi(v) \quad (\forall a \in P^*), \\ & \alpha_1 \geq 0, \alpha_i \geq \alpha_{i-1} + 1 \quad (i = 2, \dots, 5), \\ & \beta_1 \geq 0, \beta_i \geq \beta_{i-1} + 1 \quad (i = 2, \dots, 5), \\ & \gamma_1 \geq 0, \gamma_i \geq \gamma_{i-1} + 1 \quad (i = 2, \dots, 5), \\ & \delta_1 \geq 0, \delta_i \geq \delta_{i-1} + 1 \quad (i = 2, \dots, 5). \end{aligned}$$

3 結果

本章では、逆最適化問題を解くことで得られた重みをいくつかの旋律に適用して、提案手法により得られた出力と本来適用されるべき和音進行とを比較した結果を述べる。

ここでは、教師和音進行として、The Beatles の “Let It Be” を使用した。当楽曲は、ポピュラー音楽において典型的な旋律と和音進行を持った楽曲である。図 6 に、“Let It Be” の旋律と付与される適切な和音進行を示す。

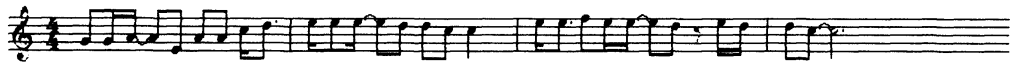


図 6: “Let It Be” by The Beatles, 1970

また Let It Be を教師和音進行として用いた得られた $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) の値を表 1 に示す。

i	1	2	3	4	5
α_i	0. 0000	2. 0000	3. 0000	4. 8759	5. 8759
β_i	0. 0000	1. 0228	2. 0717	3. 1241	4. 1241
γ_i	0. 0000	1. 0000	2. 0000	3. 0000	4. 0000
δ_i	0. 0000	1. 0000	3. 0000	4. 0000	5. 0000

表 1: 得られた重みの値

3.1 結果例 1

対象となる旋律と、提案手法により求められた和音進行を図 7、表 2 にそれぞれ示す。また、対象となる旋律に本来付与されるべきである和音進行を表 3 に示す。



図 7: “Pachelbel’s Canon” by Johann Pachelbel, 1680

Block 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
和音進行	C	G	Am	G	F	C	F	G

表 2: 得られた和音進行

Block 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
和音進行	C	G	Am	Em	F	C	F	G

表 3: 本来付与されるべき和声進行

本旋律に対しては、本来適用されるべき和音進行と非常に近い結果が提案手法により得られていることが分かる。この結果に関する要因として、本旋律の多くが本来適用されるべき和音の構成音から構成されていることや、本来適用されるべき和音進行が教師和音進行と非常に似通っている事などが考えられる。

3.2 結果例 2

対象となる旋律と、提案手法により求められた和音進行を図 8、表 4 にそれぞれ示す。また、対象となる旋律に本来付与されるべきである和音進行を表 5 に示す。



図 8: “Over the Rainbow” by Harold Arlen, 1939

ここで、空白の枠は、適用される和音が前 Block と同様であることを示している。以下の表に関しても同様である。

本旋律に対しては、提案手法では適切な和音進行を得ることが出来ていないことが分かる。この結果に関する要因として、本旋律に本来適用されるべき和音進行が教師和音進行と大きくかけ離れていることが考えられる。これは、教師和音進行として 1 つの楽曲のみを使用していることに起因していると考えられる。

Block 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
和音進行	Em	F	Em	F	C	Dm	G	C
Block 番号	9	10	11	12	13	14	15	16
和音進行	Dm	C	G	Dm	G	C	F	C

表 4: 得られた和音進行

Block 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
和音進行	C	Am	Em		F		C	
Block 番号	9	10	11	12	13	14	15	16
和音進行	F		C	A7	Dm	G7	C	

表 5: 本来付与されるべき和声進行

3.3 結果例 3

対象となる旋律と、提案手法により求められた和音進行を図 9、表 6 にそれぞれ示す。また、対象となる旋律に本来付与されるべきである和音進行を表 7 に示す。



図 9: “Fly Me to the Moon” by Bart Howard, 1954

Block 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
和音進行	C	G	C	G	C	Bm(-5)	C	F
Block 番号	9	10	11	12	13	14	15	16
和音進行	C	G	F	Am	G	F	C	Dm
Block 番号	17	18	19	20	21	22	23	24
和音進行	C	F	C	Em	F	C	F	C
Block 番号	25	26	27	28	29	30	-	-
和音進行	F	C	G	F	C	F	-	-

表 6: 得られた和音進行

本旋律に対しても同様に、提案手法では適切な出力を得られていないことが分かる。この結果に関する要因も結果例 2 で述べたものと同様のものと考えられる。本旋律に対する出力結果の特徴として、本来 1 小節に対して 1 つだけ和音を適用すべきところを 2 つ適用してしまっている点が挙げられる。これは、

Block 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
和音進行	Am		Dm		G		C	
Block 番号	9	10	11	12	13	14	15	16
和音進行	F		Bm(-5)		E7		Am	
Block 番号	17	18	19	20	21	22	23	24
和音進行	Dm		G		Em		A7	
Block 番号	25	26	27	28	29	30	-	-
和音進行	Dm		G		C		-	-

表 7: 本来付与されるべき和声進行

Block 長を 2 拍で固定しているのにもかかわらず、同一の和音が連続する組合せを低く評価する指標が存在することが原因だと考えられる。

4 おわりに

本研究では、旋律に対して伴奏を自動的に出力する手法の提案を行った。提案手法として、旋律に対する伴奏の生成を、旋律に対する和音の組合せの「善し悪し」を重みとして定めることで最短路問題に帰着する方法を提案した。また、重みを決定するパラメータを、逆最適化問題を用いて推定した。

本項執筆段階では、満足のいく結果が得られたとは言い難い。しかし、提案手法における、多項式時間で計算可能な線形計画問題を 1 回解くことにより最短路問題の重みのパラメータを得ることが出来る点は計算時間の観点からは非常に有意義なものであると考える。また、第 k 最短路を求める解法を用いて第 2, 第 3 の代替和音進行を得ることが出来ることも、不確実な問題に対する手法における強みであると考えている。

提案手法における現状の課題としては、

- 1つの教師和音進行のみでは、適切な出力を得られない旋律が存在する、
- 現状の評価指標のみでは、一定の条件を満たした旋律以外への対応が難しい、

という点が挙げられる。より良い出力結果を得るためには、

- 様々なスタイルの楽曲を教師和音進行として用いる、
- 多くの旋律を考慮して指標を改善する、
- 本書で述べた以外の新たな指標を考案する、

等の改善案を検証する必要があると考えている。また、本提案手法を、実際に作曲を行う際に使用するアプリケーションの 1 つとして実装し、多くの作曲者の意見を募りたいと考えている。

参考文献

- [1] 澤井賢一, 黒木裕介, 松井知己, フルートの連指最適化と逆最適化を用いたパラメータチューニング, オペレーションズ・リサーチ, 53 (1), pp. 39–46, 2008.