

## HMMと音符連鎖確率を用いた旋律への自動和声付け

菅原 啓太          西本卓也          嵯峨山茂樹

東京大学大学院情報理工学系研究科

{sugawara,nishi,sagayama}@hil.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本稿では、与えられた旋律に対して楽曲として適切な和声進行を自動的に付与する、自動和声付けについて述べる。実用に満足のいくレベルでの自動和声付けは現在でも困難であり、従来取られてきた一般的なアプローチは和声進行に関する規則を与える AI 的なものであった。これに対し、我々は音声認識と自動和声付けを同型の問題と考へて、音声認識で使用されている確率モデルを利用した確率的な推定問題として自動和声付けに取り組んでいる。本稿では、旋律に含まれる各音の音高の遷移や小節内での拍位置に注目し、各和声に対する旋律の関係を確率モデルによって表現する。さらに、和声進行を和声常套句(短い和声進行列)の  $n$ -gram モデルとして表現する。これらのモデルは HMM(隠れマルコフモデル、Hidden Markov Model)として統合され、モデルのパラメータは既存の楽曲の統計から適切な値を定めることができる。和声付けは、与えられた旋律に対して HMM の状態遷移系列を求める事後確率最大化問題 (MAP, *Maximum A Posteriori* estimation) として定式化される。提案手法を実装し、和声外音の多い旋律への対応や常套句の自然な接続を確認した。

キーワード HMM(隠れマルコフモデル)、自動和声付け、音符連鎖確率、和声常套句、事後確率最大化問題

## Automatic Harmonization for Melodies based on HMMs Including Note-chain Probability

Keita SUGAWARA Takuya NISHIMOTO Shigeki SAGAYAMA

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

**Abstract** This paper describes a method of automatic harmonization for given melodies. To achieve a practical level of automatic harmonization is a difficult problem, in which rule-based approaches have been conventionally taken. This problem, however, can be solved as a probabilistic estimation problem based on analogy of speech recognition and automatic harmonization. We have been engaged in this problem using probabilistic models whose parameters can be estimated through statistical training. In this paper we represent the relation between melody and harmony as a probabilistic model in which note transitions and beat positions in measures are considered. Moreover, we express harmonic movement as  $n$ -gram models of common sequences of chords. These models are integrated as a HMM. Automatic harmonization are formulated in the framework of MAP(*Maximum A Posteriori*) estimation that obtains state transition. Experimental results showed improvement especially for melodies which include many ornaments, and for connections of common sequences of chords.

**keyword** automatic harmonization, HMMs (hidden Markov models), MAP estimation

### 1 まえがき

本報告では、与えられた任意の旋律に対する自動和声付けの問題を扱う。ここで扱う自動和声付けとは任意の旋律を入力としたときにその旋律に適合する和声を自動的に出力することを目標とする。自動和声付けの応用分野としては、専門的な知識や経験がない人のための作曲・編曲ツール、さらには自動伴奏、作曲家や時代やジャンル別の和声付けの数理的モデル化などが考えられる [1]。過去に報告されている、発見的な原理や規則に基づいた和声付け手法は、楽曲のスタイルごとに規則を変えなければならなかった [1]。また、和声学の規則を満たしていても素晴らしい和声付けとは一概にいえないという報告

もある [2]。和声付けの良し悪しには作曲家の経験的な部分や好みなども多々関係すると考えられる。そこで近年ではコネクションリストモデル [3][4] やニューラルネットワーク [5] などの学習が可能なモデル化により、和声学の知識だけでなく作曲家の経験的な部分まで統一的に扱う和声付け手法が提案されている [6]。学習に基づく手法では、学習データを替えるだけで様々なスタイルの楽曲に適した和声付けが行え、また、作曲家の経験を反映した和声付けも行えると考えられる。

われわれはこのような展望のもとに、HMM(Hidden Markov Model, 隠れマルコフモデル)を用いた和声付け手法を提案した [7]。本報告では特に和声と複数の音符

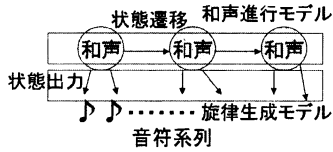


図 1: 和声進行から旋律を生成する HMM の概念図

表 1: 音声認識と自動和声付けとの対応表

	連続音声認識	自動和声付け
入力単位	文音声	楽曲
語彙	単語	和声常套句
認識単位	音素	和声
観測値	スペクトル系列	音符系列

の連鎖の関係を考慮し、経過音や刺繍音などの使用が許される和声外音を区別することによってより旋律に適合する和声付けを目指す [8][9]。また、和声進行のモデルを改良することでより自然な和声進行の和声付けを試みる。本稿では第 2 章で HMM を用いた和声付け問題の定式化、第 3 章で和声進行モデルの説明、第 4 章で旋律生成モデルの説明、第 5 章で和声付け実験の結果と考察、第 6 章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2 HMM を用いた和声付け

### 2.1 着眼点

われわれは与えられた旋律への和声付けの問題を HMM により定式化する。HMM は音声認識の分野で広く使われており、統計的に学習が可能で、効率的な確率最大経路探索アルゴリズムが知られている。さらに音声認識と和声付けは同型の問題と考えることができ、表 1 のように両者を対応付けることが可能である。

以下われわれは次のような仮定を立て、それに基づいた自動和声付けの手法を導く。

1. 作曲者が想定する和声進行は確率的にモデル化できる
2. 旋律は想定された和声進行から確率的に生成されるとモデル化できる
3. 旋律への和声付け問題は与えられた旋律を生成した最も尤もらしい和声進行を推定する逆問題として解ける
4. 実際には和声進行が想定されていない旋律に対してもこの逆問題は適用できる

上記の仮定 (1)(2) は数理モデルとしての仮説であり、作曲の実際がその通りに行われる確証はないが、たとえば A. Schönberg の教科書 [10] には楽曲の作曲のための和声の設計などが述べられており、和声を設計してその中で旋律を作曲する過程が示唆されている。ある和声進行から旋律の生成される過程を、和声進行モデルと旋律生成モデルと呼ぶ 2 種類の確率モデルを統合した HMM で表現し (図 1)、和声付け問題を HMM における探索問題として解く。

### 2.2 和声進行モデル

和声進行 (和声系列)  $H = (h(1), \dots, h(L))$  が生成される確率  $P(H)$  を、これらすべてが生起する同時確率として

$$P(H) = P(h(1), \dots, h(L)) = \prod_{i=1}^L P(h(i) | h(1), \dots, h(i-1)) \quad (1)$$

と表現する。ここで  $h(i)$  は和声進行  $H$  の  $i$  番目の和声 (chord) を表す。われわれは条件付き確率  $P(h(i) | h(1), \dots, h(i-1))$  の値を、有限長の  $n$ -gram モデル (多重マルコフ過程) でモデル化する。これにより、既存の楽曲の和声進行の統計から学習推定することができる。

### 2.3 旋律生成モデル

和声進行  $H = (h(1), \dots, h(L))$  から、旋律  $M = (n(1), \dots, n(K))$  が生成される確率  $P(M|H)$  を条件付き確率

$$P(M|H) = P(n(1), \dots, n(K)|H) \quad (2)$$

により表現する。ここで、 $n(i)$  は旋律  $M$  の  $i$  番目の音 (音高や音長などの情報を含む) を表す。旋律は各区間ごとに対応する和声があると考えられる。われわれは、旋律はその背後の和声の影響のみを受けて確率的に生成されると仮定する。つまり、ある和声進行  $H$  から旋律  $M$  が生成される確率を、旋律の断片が、対応する和声進行の断片から生成される確率の積でモデル化する。

### 2.4 和声進行から旋律を生成する HMM

上記の二つのモデルは HMM として一つのモデルに統合することができる。旋律のみが与えられたとき、旋律の背後にある和声は直接には観測できず、マルコフ過程に従って遷移する。これが HMM の状態遷移に対応する。また、旋律は背後の和声から確率的に生成される。これが HMM の状態出力に対応する。これらより、ある和声進行  $H = (h(1), \dots, h(L))$  から旋律  $M = (n(1), \dots, n(K))$  が生成される確率  $P(M|H)P(H)$  を HMM によって与えることができる。

### 2.5 MAP 推定としての和声付け

与えられた旋律  $M$  に対する適切な和声  $H$  を推定する問題を、われわれは旋律  $M$  を観測したときの事後確率を最大化する (maximum a posteriori) 和声  $\hat{H}$  を求める問題とする。即ち、

$$\hat{H} = \operatorname{argmax}_M P(H|M) \quad (3)$$

と定式化する。ここで Bayes の定理

$$P(H|M) = \frac{P(M|H)P(H)}{P(M)} \quad (4)$$

より、式 (3) は

$$\hat{H} = \operatorname{argmax}_H P(M|H)P(H) \quad (5)$$

と表される (図 2)。 $P(M|H)P(H)$  は、HMM によって与えられる。最も尤もらしい和声進行  $\hat{H}$  は HMM の状態ネットワークの最適な状態遷移系列として、Viterbi 探索を用いて効率的に求めることができる。

このようにして、旋律を生成する確率モデルを用いて、和声付け問題を旋律  $M$  を生成したと考えられる和声進行  $H$  を推定する逆問題として考える。

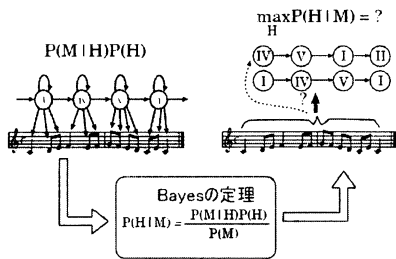


図 2: 旋律生成モデルと和声付け問題の対応 [7]

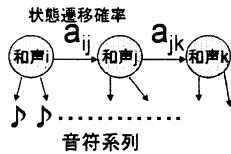


図 3: 2 和声間遷移モデル

### 3 和声進行モデル

#### 3.1 従来法

われわれはこれまで 2 つの方法で和声進行の近似を行ってきた [7]。第 1 の方法は bigram 確率による近似である。これは 2 つの隣りあう和声間の連鎖確率を用いる方法で、和声に対応付けられた状態  $i$  から他の任意の状態  $j$  に確率  $a_{ij}$  で進行すると仮定したモデルである (図 3)。この方法ではある和声進行  $H(h(1), h(2), \dots, h(L))$  が出現する確率  $P(H)$  を

$$P(H) = P(h(1), \dots, h(L)) \approx \prod_{i=1}^L P(h(i) | h(i-1)) \quad (6)$$

として近似できる。

第 2 の方法は和声常套句とよぶ楽曲中に頻出する短い和声進行の出現確率を用いる方法で、和声進行の常套句によって楽曲が成立していると仮定したモデルである (図 4)。ある和声進行  $H$  は  $H = (h(1), \dots, h(L))$  における  $L$  を一定とした和声常套句  $H'_i$  の連鎖であると仮定する。即ち、和声進行  $H$  を  $H'_i$  を用いて  $H = (H'_1, \dots, H'_T)$  と表す。ここで  $T$  は和声進行  $H$  を構成する常套句の数を表す。ある和声進行  $H = (H'_1, \dots, H'_T)$  が出現する確率  $P(H)$  は  $P(H'_i)$  を用いて

$$P(H) = P(H'_1, \dots, H'_T) \approx \prod_{i=1}^T P(H'_i) \quad (7)$$

として近似できる。

式 (6) の近似を用いると、旋律に適合する和声付けは可能であるが、楽曲らしい和声進行とはならない。一方で、式 (7) の近似を用いると、局所的には自然な和声進行が得られるが、常套句間での不自然な和声進行や常套句数の不足による旋律との不適合が見られる [7]。

#### 3.2 常套句接続モデルの改良

本稿では楽曲の和声は短い和声常套句の連鎖であると考え、和声進行モデルを採用する。ここでは常套句とし

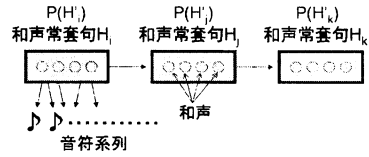


図 4: 常套句接続モデル

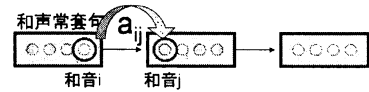


図 5: bigram 確率の近似

て、一つの和声が 2 拍に対応した 2 小節長のもを扱う。常套句を用いることで、局所的には楽曲らしい自然な和声進行が実現できると考えられる。しかし、従来の常套句接続モデルでは常套句間に遷移則を与えていないため、常套句の不自然な接続が現れることもあった。そこで本稿では常套句間に遷移確率を与えるを試みる。また、常套句数の不足を補うために常套句の出現確率を近似することで常套句数を増やす。これについては第 5 章で述べる。

#### 3.3 和声常套句間の bigram 確率の近似

常套句間の bigram 確率を統計学習して用いるためには多量の学習サンプルを必要とする。そこで本稿では常套句間の bigram 確率を近似するために、先行する常套句の最後の和声と後続する常套句の最初の和声との 2 和声間遷移確率を用いる (図 5)。われわれはある和声進行  $H = (H'_1, \dots, H'_T)$  が出現する確率  $P(H)$  をある和声常套句  $H'_i$  が出現する確率  $P(H'_i)$  と常套句間の遷移確率  $a_{H'_i, H'_{i+1}}$  を用いて次のように近似する。

$$P(H) = P(H'_1, \dots, H'_T) \approx \prod_{i=1}^T P(H'_i) a_{H'_i, H'_{i+1}} \quad (8)$$

これにより、常套句間での不自然な和声進行を回避する効果が期待される。

### 4 旋律生成モデル

#### 4.1 従来法

われわれは旋律の各音符は独立に和声から生成されるとし、和声進行  $H = (h(1), h(2), \dots, h(L))$  から旋律  $M = (n(1), n(2), \dots, n(K))$  が生成される確率  $P(M|H)$  を、和声  $h(j)$  から単音  $n(i)$  が生成される確率  $P(n(i)|h(j))$  の積で近似し、その音の和声に対する役割 (根音・和声内音・和声外音) によって確率値を与える [7]。また、音符の長さについては 8 分音符を基準長とし、音符の長さ  $l_i$  だけ単音の生成確率を乗算する。

$$P(M|H) \approx \prod_{i=1}^K P(n(i) | h(j))^{l_i} \quad (9)$$

ここで  $l_i$  は 8 分音符を基準長とした  $n(i)$  の音符長、 $h(j)$  は  $n(i)$  を生成した和声とする。

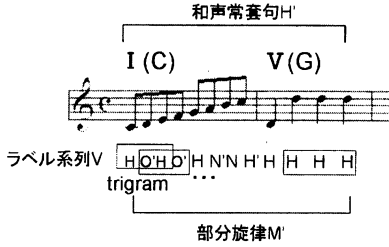


図 6: 音種連鎖モデルでのラベル付け例

## 4.2 音種連鎖モデル

本稿では和声と単音の関係ではなく、複数の音符の連鎖との関係をモデル化する。ここで用いる和声常套句は2小節長とし、2拍に1和声が付与されるとする。本手法は旋律を和声に対する音符の役割で分類し、それらのtrigram 確率を用いて旋律生成確率を定義する。従来法で和声外音として扱っていた音符のうち、経過音・刺繍音・倚音・掛留音などの和声学的に使用が許されている音符に関しては区別して扱う。この手法は音声認識における言語モデルにおいて品詞 trigram を用いることに対応する。また、拍の強弱と音符の種類の関係も考慮するために、同じ役割の音符であっても表拍と裏拍では区別して扱う。

旋律生成確率の学習は以下のような手順で行う。

1. 学習したい和声を与えられた旋律の各音符に対して、和声との対応に応じてラベルを付与する。ここでは和声内音 (H)、経過音・刺繍音・倚音・掛留音などの使用が許されている和声外音 (O) (以降装飾音と呼ぶ)、それ以外の和声外音 (N) の3種類のラベルを用いる。
2. 基本音符長の表拍・裏拍を区別する情報を付加する。(今回は表拍=強拍、裏拍=弱拍とする)
3. このようにして得られた6種類のラベル(音種ラベル)からなる系列のtrigram 確率を学習する。

このようにして得られた trigram 確率を用いて以下のように旋律生成確率を求める。

1. 与えられた旋律に対して候補となる和声常套句を当てはめ、旋律の各音符をその拍の和声に対してラベル付けする。図6に例を示す。図中'が付されていないラベルは強拍を表し、付されているラベルは弱拍を表す。
2. 求めたラベル系列の trigram 確率の積をその常套句からの旋律生成確率とする。

われわれは和声進行  $H$  を2小節長の和声常套句  $H'_i$  の連鎖 ( $H = (H'_1, \dots, H'_T)$ ) とし、また、旋律に関しても、旋律  $M = (n(1), \dots, n(K))$  は常套句に対応する2小節長の部分旋律  $M'_i = (n_i(1), \dots, n_i(K_i))$  の連鎖 ( $M = (M'_1, \dots, M'_T)$ ) とする。ただし、部分旋律  $M'_i$  と和声常套句  $H'_i$  が対応している。部分旋律  $M'_i = (n_i(1), \dots, n_i(K_i))$  に対する音種ラベル系列を  $V_i = (v_i(1), \dots, v_i(K_i))$  とすると、ある和声常套句  $H'_i = (h_i(1), \dots, h_i(L_i))$  から部分旋律  $M'_i = (n_i(1), \dots, n_i(K_i))$  が生成される確率  $P(M'_i|H'_i)$  は前述の trigram 確率を用いて次式のように近似できる。

$$\begin{aligned} P(M'_i|H'_i) &\approx P(V_i|H'_i) \\ &= P(v_i(1), \dots, v_i(K_i)|H'_i) \end{aligned}$$

$$\approx \prod_{j=1}^{K_i} P(v_i(j)|v_i(j-2), v_i(j-1)) \quad (10)$$

これを用い、われわれはある和声列  $H = (H'_1, \dots, H'_T)$  から旋律  $M = (M'_1, \dots, M'_T)$  が生成される確率  $P(M|H)$  を次式のように近似する。

$$\begin{aligned} P(M|H) &\approx \prod_{i=1}^T P(M'_i|H'_i) \\ &= \prod_{i=1}^T \left[ \prod_{j=1}^{K_i} P(v_i(j)|v_i(j-2), v_i(j-1)) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

これにより、装飾音を考慮し、かつ音符の種類と並びから得られる情報を反映した和声付けが可能である。

式(8)と式(11)を用いると、ある和声  $H$  からある旋律  $M$  が生成される確率  $P(M|H)P(H)$  は式(12)のように表せる。つまり、HMMにおけるViterbiアルゴリズムを用いて効率的に事後確率最大の状態遷移系列を得ることができる。

$$P(M|H)P(H) = \prod_{i=1}^T P(H'_i) a_{H_i, H_{i+1}} \cdot \prod_{j=1}^{k_i} P(l_i(j)|l_i(j-2), l_i(j-1)) \quad (12)$$

よって、式(5)より、 $P(M|H)P(H)$  を最大にする  $\hat{H}$  は次式のようになり、Viterbi探索によって効率的に確率最大の和声列を求めることができる。

$$\hat{H} = \underset{H'_1, H'_2, \dots, H'_T}{\operatorname{argmax}} \left[ \prod_{i=1}^T \left[ \prod_{j=1}^{K_i} P(H'_i) a_{H_i, H_{i+1}} \cdot P(v_i(j)|l_i(j-2), l_i(j-1)) \right] \right] \quad (13)$$

## 4.3 音高連鎖モデル

本手法では、旋律の音符と和声の根音との音程を用いて旋律を分類し、それらのtrigram 確率を用いて旋律生成確率を定義する。ここでも拍の強弱と音符の種類の関係も考慮するために、同じ役割の音符であっても表拍と裏拍では区別して扱う。本手法では音種連鎖モデルに比べ、音符の並びについてより細分化した情報を学習できる。ただし、今回は学習の簡略化のために、和声の変化部分では現在の和声が続くものとしてtrigram 確率を学習する。つまり、極めて強い仮定を置くことに相当する。

旋律生成確率の学習は次の手順で行う。和声の種類(長三和音・短三和音・増三和音・減三和音)ごとに別のtrigram 確率を得るために、学習も別に行う。

1. 学習したい和声を与えられた旋律を、和声の根音との音程でラベル付ける。
2. 基本音符長の表拍・裏拍を区別する情報を付加する。(今回は表拍=強拍、裏拍=弱拍とする)
3. このようにして得られた24種類のラベル(音高ラベル)からなる系列のtrigram 確率を学習する。

上述の手順で学習された3-gram の出現頻度の一部を表2に示す。ここで用いられている数字は和声の根音からの音程(全音階)を表している。'が付されていない音高ラベルが強拍の音に、付されている音高ラベルが弱拍

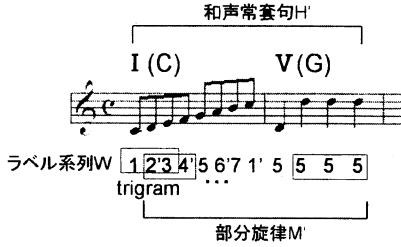


図 7: 音高連鎖モデルでのラベル付け例

の音に対応する。音程が1度・3度・5度の和声内音の出現頻度が高く、2度・4度の和声外音の出現頻度が低いこと、また、和声外音のなかでも刺繍音・経過音などの装飾音の出現頻度が高くなっていることが確認できる。

こうして得られた trigram 確率を用いて以下のように旋律生成確率を求める。

1. 与えられた旋律に対して候補となる和声常套句を当てるため、旋律の各音符をその拍の和声の根音との音程でラベル付けする。図7に示す。図中'が付されていないラベルは強拍を表し、付されているラベルは弱拍を表す。
2. 求めた音高ラベル系列の trigram 確率の積をその常套句からの旋律生成確率とする。

音種連鎖モデルと同様に考え、部分旋律  $M'_i = (n_i(1), \dots, n_i(K_i))$  に対する音高ラベル系列を  $W_i = (w_i(1), \dots, w_i(K_i))$  とすると、ある和声常套句  $H'_i = (h_i(1), \dots, h_i(L_i))$  から部分旋律  $M'_i = (n_i(1), \dots, n_i(K_i))$  が生成される確率  $P(M'_i|H'_i)$  は前述の trigram 確率を用いて以下のように近似できる。

$$\begin{aligned} P(M'_i|H'_i) &\approx P(W_i|H'_i) \\ &= P(w_i(1), \dots, w_i(K_i)|H'_i) \\ &\approx \prod_{j=1}^{K_i} P(w_i(j)|w_i(j-2), w_i(j-1)) \end{aligned} \quad (14)$$

となる。これを用い、われわれはある和声列  $H = (H'_1, \dots, H'_T)$  から旋律  $M = (M'_1, \dots, M'_T)$  が生成される確率  $P(M|H)$  を次式のように近似する。

$$\begin{aligned} P(M|H) &\approx \prod_{i=1}^T P(M'_i|H'_i) \\ &= \prod_{i=1}^T \left[ \prod_{j=1}^{K_i} P(w_i(j)|w_i(j-2), w_i(j-1)) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

この手法を用いれば、装飾音の多い旋律に対しての適切な和声付けや拍の強さと音の関係を反映した和声付けが期待される。

式(8)と式(15)を用いると、ある和声  $H$  からある旋律  $M$  が生成される確率  $P(M|H)P(H)$  は次式のように表せ、HMM の Viterbi アルゴリズムを用いて効率的に事後確率最大の状態遷移系列を得ることができる。

$$P(M|H)P(H) = \prod_{i=1}^T P(H'_i) a_{H_i, H_{i-1}} \cdot \prod_{j=1}^{K_i} P(w_i(j)|w_i(j-2), w_i(j-1)) \quad (16)$$

よって、式(5)より、 $P(M|H)P(H)$  を最大にする  $\hat{H}$  は次式のようになり、Viterbi 探索することで効率的に確率最大の和声列を求めることができる。

$$\hat{H} = \operatorname{argmax}_{H'_1, H'_2, \dots, H'_T} \left[ \prod_{i=1}^T \left[ \prod_{j=1}^{K_i} P(H'_i) a_{H_i, H_{i-1}} \cdot P(w_i(j)|w_i(j-2), w_i(j-1)) \right] \right] \quad (17)$$

## 5 実験

ここでは前述の和声進行モデルと2種類の旋律生成モデルを用いて行った和声付け実験の結果と考察を述べる。比較対象として従来法(常套句接続モデル)[7]でも和声付けを行う。

### 5.1 和声常套句の出現確率値の補間

和声常套句には4つの和声からなる和声進行を用いる。使用した和声は12音階それぞれを主音とする3音和音(長三和音・短三和音・増三和音・減三和音)48(12×4)種類とし、今回は七の和音や変化和音は除外する。豊富な和声常套句を得るために、バッハの四声のコラール(BWV 1-438に含まれるカンタータ、モテット、受難曲、オラトリオ、およびC.Ph.E.Bach編纂のコラール集などに含まれる)のうち、4分の4拍子で冒頭に弱起をもたない楽曲94曲から608種類の常套句を得た。

これだけでは常套句数が不十分であるため、和声常套句  $H'(h(1), h(2), h(3), h(4))$  の出現確率を以下のように線形和で近似し、常套句数を増やした。

$$\begin{aligned} P(h(1), h(2), h(3), h(4)) &\approx \alpha P(h(1), h(2), h(3), h(4)) \\ &\quad + \beta P(h(1), h(2), h(3)) + \gamma P(h(2), h(3), h(4)) \end{aligned} \quad (18)$$

ただし補間係数は  $\alpha : \beta : \gamma = 48 : 1 : 1$  の条件の下で確率値を正規化して求めた。これにより、学習時には出現しなかった常套句に対しても出現確率値を与えることができた。補間により得られた和声常套句3013種類とその出現確率値を用いて和声進行確率を求めた。

### 5.2 実験条件

本稿では以下のような実験条件において、和声付け実験を行った。

- 使用和声としては3音和音48種類を用いる。
- 使用した和声常套句は前述のように得た3013種類を用い、2拍で1和声とする。
- 和声常套句間の遷移確率に用いた2和声間遷移確率も常套句と同様にバッハのコラールより学習する。
- 旋律生成確率は童謡・唱歌・民謡など60曲から学習する。

また、次の3種類の手法の結果を比較した。

1. 川上らの常套句接続モデル(式(7)式(9))
2. 音種連鎖モデル(式(13))
3. 音高連鎖モデル(式(17))

### 5.3 実験結果

和声付け結果例を図8に示す。楽譜の上に2拍ごとに記した和声は、上段から、従来法・音種連鎖モデル・音高連鎖モデルの結果を示す。3小節目の1、2拍目の和声

表 2: 音高 trigram の出現頻度

	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	5	5'	6	6'	7	7'
1 → 1	51	22	14	14	30	14	2	0	16	3	1	3	8	13
1 → 2	5	5	0	0	15	8	0	0	4	0	0	0	0	0
1 → 2'	4	1	4	2	6	2	1	1	16	0	1	0	0	0
2 → 4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
2 → 6'	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 → 3'	7	0	7	4	9	5	3	1	13	1	3	0	0	0
5 → 4'	5	0	0	0	12	0	0	0	9	0	0	2	0	0

図 8: 和声付け結果の例 (旋律:H.C.Work 作曲 “Sequel to Grandfather’s Clock” より 第9～16小節)

では、従来法では第2音と第4音を和声内音とする和声付けがなされているが、提案手法では第1音と第3音を和声内音とする和声付けがなされている。これは第2音と第4音を経過音と捉え、和声付けがされたものであると考えられる。

次に4小節目の3、4拍目の和声と5小節目の1、2拍目の和声では、従来法ではこの2和声間に遷移確率を与えていないため、不自然な和声進行になっているが、提案手法では自然な和声進行になっていることが確かめられた。これらの結果より、期待されていた装飾音への対応と和声常套句間の自然な接続が確かめられた。しかし、和声付け結果はまだ十分とはいえず、次のような課題も確認された。

1. 本手法では音符の並びのみに着目し、音符長については考慮していないので、音長の長い音符が多く、常套句内に存在する音符数が少ない部分などでは不適切な和声付けがなされることも確認された。今後、音符長の情報も含めるモデルを構築していくことが必要である。
2. 和声常套句間に2和声間遷移確率を用いることで意図しない和声進行になる部分が見られた。常套句間の遷移確率は単純に2和声間の遷移確率で近似し難く、常套句間の接続文法のようなものも考慮する必要がある。
3. 常套句間の遷移確率の影響を大きく受け、その前後で旋律との適合が低下する部分が見られた。常套句の出現確率・常套句間の遷移確率・旋律生成確率の比率の最適化も必要である。
4. 今回は常套句の学習において長調と短調を区別しなかったために、長調の旋律に対して和声付けをする際にも長調では現れにくい和声が付られる傾向も見られた。今後学習データを区別することも必要である。

## 6 おわりに

本報告では、音符連鎖確率と常套句間の bigram 確率の近似を用いて和声付けを行った。音符連鎖確率を用い

ることによって、装飾音と他の和声外音の区別、拍の強さと現れやすい音符との関係、音符の並びと和声の関係を反映した和声付けが可能となり、装飾音の多い楽曲へも適切な和声付けができることが確認された。また、和声常套句間に遷移確率を与えたことにより常套句間での不自然な和声進行を回避することができることが確かめられた。しかしながら和声付け結果はまだ十分とはいえない。今後の課題としては、旋律への適合性という点では和声の変化部分での強い仮定の解消や今回は考慮していなかった音符長の情報を回避することができるといえる。今後の課題としては、旋律への適合性という点では和声の変化部分での強い仮定の解消や今回は考慮していなかった音符長の情報を回避することができるといえる。今後の課題としては、旋律への適合性という点では和声の変化部分での強い仮定の解消や今回は考慮していなかった音符長の情報を回避することができるといえる。

## 参考文献

- [1] 長嶋洋一他: “コンピュータと音楽の世界”, bit 別冊, 共立出版株式会社, 1998.
- [2] 三浦雅展, 山田真司, 柳田益造: “和声学の学習は禁則の習得だけでよいのか?”, 日本音楽知覚認知学会平成12年度秋季研究発表会, pp.93-100, 2000-11.
- [3] Dan Gang, Daniel Lehmann, Naftali Wagner: “Harmonizing Melodies in Real-Time: the Connectionist Approach,” International Computer Music Conference, Thessaloniki, September 1997.
- [4] Dominik Hornel, Thomas Ragg: “A Connectionist Model for the Evolution of Styles of Harmonization,” International Computer Music Conference, 1993.
- [5] Dan Gang, Daniel Lehmann, Naftali Wagner: “Tuning a Neural Network for Harmonizing Melodies in Real-Time,” International Computer Music Conference, 1998.
- [6] 吉原一期: “作曲支援のための多様な音楽データからの知識獲得,” 修士論文, 東京大学大学院新領域創成科学研究科, 2003.
- [7] 川上隆: “HMM を用いた旋律への自動和声付けの研究,” 修士論文, 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 2000.
- [8] 三浦雅展, 久保雅彦, 黒川誠司, 青井昭博, 尾花充, 柳田益造: “ポップス系の旋律に対する最適な和音付与の実現の可能性,” 日本音響学会講演論文集, pp. 655-656, 2003.
- [9] 久保雅彦, 三浦雅展, 黒川誠司, 青井昭博, 尾花充, 柳田益造: “和声付与システム AMOR の構築-アプローチノートを考慮した和音付与-,” 日本音響学会講演論文集, pp. 657-658, 2003.
- [10] A. Schönberg 著, 中村太郎訳: “作曲法入門”, カワイ楽譜株式会社, 1966.