

# 非和声音を考慮した HMM による自動和声解析\*

諸岡孟, 西本卓也, 嵯峨山茂樹 (東大・情報理工)

## 1 はじめに

和声解析や和声付けの自動化においては, 和声学の知識や理論 [1–3] をコンピュータに組み込みたい. 和声学を和声解析や和声付けに適用する手法としては, 従来ルールベースの手法 [4] や確率統計的手法 [5–7] などが用いられて来た. しかし, 和声学において重要な役割を果たす非和声音の扱いについてはさらに考慮の余地がある. 本稿では, 旋律への自動和声付けを目指して, その前段階として楽曲の自動和声解析を目的とし, 計算処理に適用可能な形に非和声音の性質を整理して, HMM (Hidden Markov Models, 隠れマルコフモデル) に 5 種類の非和声音の性質を導入する手法について検討したので報告する.

## 2 自動和声解析と非和声音

### 2.1 和声解析と非和声音

一般に, 同一対象への和声解析の結果は一意には定まらず, 間違いではない複数の解釈があることが多い. 複数の解釈に対して優劣をつけることは一般人には容易でないが, 和声学を習得した音楽大学卒業生などであれば可能である. その理由の一つとして, 仮定された和声構造に対する非和声音の和声学的解釈が考えられる.

非和声音は 7 種類に分類され [3], (現代曲を除く) クラシック音楽の多くの楽曲の和声解析では, 和声が適切に仮定されていれば, おおのこの非和声音をそのうちのどれかに分類し, 適切な和声学的解釈を与えることができる. 逆に, 和声の仮定が適切でない場合, 非和声音が 7 種類のいずれにも解釈し得ない事態がありうる. このように, 和声解析においては非和声音の解釈を考慮することは重要な要素であると考えられる.

### 2.2 計算処理の観点からの非和声音の性質の整理

非和声音は, 該当する和音のほか, 前後の音高や和音, 拍などとの関係から, 和声学的に (1) 経過音, (2) 補助音 (刺繍音), (3) 倚音, (4) 掛留音, (5) 先行音, (6) 挿入転換音, (7) 持続音の 7 種類 (名称は [3] に準拠) に分類されている. 各種の非和声音のもつ性質 (定義) を, 計算処理に適した形式に整理して表 1 に示す. ただし,  $x_j$  は  $n$  番目のパートの  $j$  番目の音符の音高 (半音を 1 とする),  $h(x_j)$  は  $x_j$  の和音,  $m(x_j)$  は  $x_j$  が和声内音ならば 1, 非和声音ならば 0 を返す関数である. なお, 上記の複合や, (6) 挿入転換音および (7) 持続音に関しては, 非和声音としての和声学的性質が複雑であるため, 本稿ではまだ扱わない.

また, 非和声音の解釈にはそのパートの旋律線が必要であり, ピアノのような多重楽器の場合は旋律への分解が必要になるため, 今回は弦楽四重奏スコ

Table 1 非和声音の整理

非和声音の種類	音高		和音		和声内 or 外	
	$x_{j-1}$	$x_{j+1}$	$h(x_{j-1})$	$h(x_{j+1})$	$m(x_{j-1})$	$m(x_{j+1})$
経過音	$x_j \pm 1, 2$	$x_j \pm 1, 2$	-	-	-	-
補助音	$x_j \pm 1, 2$	$= x_{j-1}$	-	$= h(x_j)$	1	1
倚音	-	$x_j \pm 1, 2$	-	$= h(x_j)$	-	1
掛留音	$= x_j$	$x_j \pm 1, 2$	$\neq h(x_j)$	-	1	1
先行音	-	$= x_j$	-	$\neq h(x_j)$	-	1

アのように単音楽器のパート別になっているスコアを対象とする.

表 1 に示された性質に基づけば, ある非和声音  $x_j$  の種類を分類するために必要なパラメータは,  $\{x_{j-1}, x_{j+1}, h(x_j), h(x_{j-1}), h(x_{j+1})\}$  である, と仮定できる. この仮定により, 各パラメータを用いた非和声音の種類を分類するルールを記述し, 与えられた条件から非和声音の種類を特定することができる.

### 2.3 非和声音の種類を考慮した HMM による和声解析

#### 2.3.1 HMM と和声解析

本研究が扱う和声解析自動化の将来的な目的は, 確率統計的手法に基づく自動和声付けである. 自動和声付け問題を確率統計的に扱うことの利点としては,

- 想定外のメロディにも対応
- 十分な量の学習データ収集による性能向上
- 作曲家の個性を考慮した和声付け

などが挙げられる. したがって, 自動和声解析システムによって大量の楽曲を解析することは, 自動和声付けシステムの学習データ作成をおこなうことに相当する. この前段階としての有効性を十分に活用するために, 和声解析を HMM によって確率統計的に扱う.

HMM による和声解析の定式化 [5, 6] は以下の通りである. 各和音を状態ととらえると, 和声  $H$  は複数の状態間の偏りをもった遷移であり, 直接には音符列にあらわれない. また, 音符は和音から生成されるととらえると, 各和音からの異なる音符出力傾向にしたがって音符列  $X$  が生成されることになる. 状態遷移および状態からの音符生成の傾向をそれぞれ確率  $P(H), P(X|H)$  によってモデル化すると, これらの各確率モデルを統合したモデルは HMM ととらえることができる. この HMM により, 和声  $H$  にしたがって音符列  $X$  が生成される確率は  $P(X|H)P(H)$  で与えられる.

観測音符列  $X$  に対して HMM の中で事後確率最大の和声  $\hat{H}$  を求める問題は, Bayes の定理を用いて以下のようにあらわされる.

$$\hat{H} = \operatorname{argmax}_H P(H|X) = \operatorname{argmax}_H P(X|H)P(H) \quad (1)$$

\* “Automatic harmonic analysis using HMM with consideration of nonharmonic tones” by Morooka Takeshi, Nishimoto Takuya and Sagayama Shigeki (The University of Tokyo).

したがって、和声解析問題は観測音列を生成した最も尤もらしい状態遷移系列を推定する確率的逆問題となり、事後確率最大解  $\hat{H}$  を Viterbi 探索により求めることができる。

### 2.3.2 非和声音の種類を考慮した HMM の出力確率の導出

従来の HMM による自動和声解析 [5, 6] では、和音からの音符生成過程に関して、生成される音符が和声内音であれば確率を大きく、非和声音であれば確率を小さく、というようなモデル化をおこなっていた。本稿では、さらに非和声音の種類も考慮した HMM の出力確率の導出をおこなう。

HMM の状態遷移を一定の時間間隔ごとに発生させるために、パート別になった音符列を一定の時間単位によって分割する。このとき、 $h_t$  を  $t(t = 1, \dots, T)$  番目エリアの和音、 $X_{tn}$  をエリア  $t$  の第  $n(n = 1, \dots, N)$  パートの音符列とする。音符列  $X$  全体が生成される同時確率  $P(X|H)$  を、各部分音符列  $X_{tn}$  が生成される同時確率の積で近似すると、

$$P(X|H) = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N P(X_{tn}|h_t) \quad (2)$$

さらに、非和声音の種類分類に必要なパラメータに出力確率を依存させるために、次式のように各部分音符列  $X_{tn}$  を各音符  $x_j$  の出力確率の積で近似する。

$$P(X_{tn}|h_t) = \sum_{j=1}^J P(x_j|x_{j-1}, x_{j+1}, h_t) \quad (3)$$

したがって、各音符  $x_j$  の和声内音も含めた種類  $u_j$  が決定し、 $x_j$  の出力確率は次式で表される。

$$P(x_j|x_{j-1}, x_{j+1}, h_t) = P(x_j|h_t, u_j)P(u_j|h_t) \quad (4)$$

## 3 自動和声解析実験

### 3.1 実験条件

提案した非和声音の種類を考慮した HMM を用いて和声解析実験をおこなった。HMM の状態遷移確率、出力確率、初期状態確率については今回は和声学の知見に基づいて人手で設定した。調は未知とし、転調のない 2 小節について、4 分音符 1 拍につき 1 個の和音を推定した。HMM の状態としては、三和音 7 種 (I-VII) と七の和音 7 種 (I<sub>7</sub>-VII<sub>7</sub>) の合計 14 種を考慮した。和声解析対象曲には、非和声音を十分に含むようにわれわれが作成した楽曲を用いた。推定結果比較対象には、人手による解析結果および従来手法と同様に非和声音の種類を考慮しない HMM を用いた。

### 3.2 実験結果

和声解析の実験結果を図 1 に示す。図 1 において 1 小節目 2 拍目の和音が従来手法と人手および提案手法とで異なっている。従来手法が和声内音を多く含むような和音を推定しているのに対し、人間の場合は第一声部の C 音を掛留音、第三声部の 16 分音符の C

A:	Cdur	I	V	I	V <sub>7</sub>	VI	Ψ	V
B:	Cdur	I	I <sub>7</sub>	I <sub>7</sub>	V <sub>7</sub>	VI	II	V
C:	Cdur	I	V	I <sub>7</sub>	V <sub>7</sub>	VI	II	V

Fig. 1 和声解析実験結果. (A:人手による, B:従来手法, C:非和声音を考慮した提案手法)

音を先行音とそれぞれ判断して和音を推定しており、またそれが和声学的に適切である。提案手法の推定は人手と同じであり、さらに非和声音の分類結果を出力させると人間の場合と同様の判断をしている。このように、非和声音の種類を考慮することが有効である場合の動作確認ができた。また、未知としていた調に関する推定が同時に行われることがわかる。

## 4 おわりに

本稿では、自動和声解析問題において非和声音の解釈に着目し、計算処理の観点から性質を整理した。さらに、整理した各種非和声音の性質を HMM の出力確率に組み込んだ和声解析手法を提案し、人手による解析結果および非和声音の性質を考慮しない HMM による解析結果と比較して、和声学的な適切さの向上を確認した。今後は、機能と声理論の導入、和声単位分割、HMM パラメータの統計的学習、和声学上重要な性質をもつ転調や和音の転回形、分類ルールの確率的な取扱いなどについても検討していく予定である。

和声学的観点から多大な助言や問題例と解析例を下さった桐朋学園大学音楽学部金子仁美講師に深謝する。なお、本研究の一部は、科学技術振興機構 CREST 研究課題「時系列メディアのデザイン転写技術の開発」として行われた。

## 参考文献

- [1] 島岡譲 他: 和声 理論と実習 I, II, III, 音楽之友社, 1964, 1965, 1967.
- [2] 島岡譲: 音楽の理論と実習 I, II, III, 音楽之友社, 1982, 1983, 1984.
- [3] 門馬直美: 新版 音楽の理論, 音楽之友社, 1992.
- [4] 三浦雅展 他: “ソプラノ課題回答確認システム “SDS” の構築とその評価,” 日本音響学会 2001 年秋季研究発表会.
- [5] 川上 隆 他, “隠れマルコフモデルを用いた旋律への自動和声付け,” 情報処理学会研究報告, 99-MUS-34, pp.59-66, Feb, 2000.
- [6] 川上 隆: HMM を用いた旋律への和声付けに関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学 2000 年修士論文.
- [7] Christopher Raphael et al.: “Harmonic Analysis with probabilistic graphical models,” Proc. of ISMIR 2003.