

## 確率文脈自由文法を用いた 和声学規則の表現と楽曲の自動和声解析

諸岡 孟<sup>†1</sup> 西本 卓也<sup>†1</sup> 嵯峨山 茂樹<sup>†1</sup>

我々は、自動作曲に向けた音楽の生成モデルの構築を目的とし、人間が和声学を習得して作曲編曲を行うのと同様に、「コンピュータのための和声学」の確立を目指して、確率文脈自由文法に基づく手法を検討中である。本稿では、前挿入音と後挿入音の組み合わせで非和音を表現した手法の改良の一つとして、非和音を和音と和声内音との関係性によって分類した結果を利用し、より音楽的な非和声音の扱いが可能となるような確率文脈自由文法に基づく音楽生成モデルおよびその解析手法を考案したので、報告する。今回は音楽生成モデルを自動和声解析問題に適用し、音楽生成モデルから和声と楽譜が同時に生成され、楽譜のみが観測される場合に、隠れている和声を求める逆問題を解く。

### Representation of Harmony Rules with Probabilistic Context-Free Grammar and Its Application to Automatic Harmony Analysis

TAKESHI MOROOKA,<sup>†1</sup> TAKUYA NISHIMOTO<sup>†1</sup>  
and SHIGEKI SAGAYAMA<sup>†1</sup>

We are investigating the harmony theory for computers based on PCFG (Probabilistic Context Free Grammar) to model the music generation process toward automatic music composition and arrangement, simulating humans composing and arranging music using knowledge of harmony theory. We pay special attention on non-harmonic notes, and propose a PCFG-based method for musicological treatment of various non-harmonic notes by classifying relations between the chord and non-harmonic notes to improve the former approach to represent non-harmonic notes as inserted notes before and after harmonic tones. We apply the music generation model to automatic harmony analysis by solving the inverse problem to find the hidden chord sequence that has generated the given music score through the music generation model.

#### 1. はじめに

我々は、自動作曲に向けた音楽の生成モデルの構築を目的とし、人間が和声学<sup>1)~3)</sup>を習得して作曲編曲を行うのと同様に、「コンピュータのための和声学」を確立したいと考え、確率文脈自由文法に基づく手法を検討中である。

和声解析や和声付けの研究としては、川上らによるHMM (Hidden Markov Model, 隠れマルコフモデル) による和声の定式化<sup>4)</sup>や、Raphaëlらによる同様のアプローチ<sup>5)</sup>、江村らによるルールベースの手法<sup>6)~8)</sup>が挙げられる。一方、楽曲のフレーズ分割問題などにGTTM<sup>9)</sup>のような文法を用いる研究はある<sup>10)</sup>が、和声解析に文法を適用した例は少ない。その一つとして、主辞駆動句構造文法を用いた自動和声解析の研究<sup>11)</sup>がある。

我々は、和声学を自動和声解析に適用する一つの手法として、非和声音の性質をコンピュータに組み込み可能な形で整理してHMMに導入した手法<sup>12)</sup>を提案した。また、新たな手法として、整理された非和声音の性質<sup>12)</sup>に基づいて、数種の非和声音を二種類の非和声音の組み合わせにより表現し、機能と和声から和音、和声内音、非和声音などの楽曲全体の生成過程の確率文脈自由文法 (Probabilistic Context-Free Grammar, PCFG) によるモデル化を行った手法<sup>13)</sup>を提案した。

本稿では、以前に提案した手法<sup>13)</sup>において、非和声音の分類をより適切に行うことを目指した。我々は非和声音の和音と和声内音との関係性を利用し、一つの和音区間が三つの小区間によって構成されると考え、小区間の性質の違いに非和声音の種類の違いを対応させる。ただし、和音区間とは一つの和音に所属する楽譜上の領域を意味することとする。さらに、解析においても、非和声音を種類別に扱うことが可能な解析手法を用いる。

今回は音楽の生成モデルを自動和声解析問題に適用

<sup>†1</sup> 東京大学 大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
The University of Tokyo.

し、音楽生成モデルから和声と楽譜が同時に生成されて、楽譜のみが観測される場合に、隠れている和声を求める逆問題を解く。

以下に本稿の内容を示す。第2章では、我々が本稿で提案する手法の基盤となる、確率文脈自由文法による音楽生成のモデル化を行った手法<sup>13)</sup>について説明する。第3章では、第2章の手法の問題点を提示し、今回新たに提案する手法について説明する。第4章では、提案手法を実装し、自動和声解析実験を行って性能を評価する。

## 2. 確率文脈自由文法による自動和声解析

### 2.1 確率文脈自由文法による非和声音の表現

非和声音は、該当する和音の他、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(逸音)、(7)持続音の7種類(名称は文献<sup>3)</sup>に準拠)に分類されている。

非和声音の種類を考慮したHMMによる自動和声解析<sup>12)</sup>においては、HMMの各状態において非和声音となる音符がどの種類の非和声音に分類されるのかを明示的に扱った。しかし、実際の楽曲では非和声音が複合的である場合も多く、非和声音の種類特定は例外が多く単純でない。そこで、非和声音の種類を考慮した確率文脈自由文法による自動和声解析<sup>13)</sup>においては、「前挿入音」および「後挿入音」のみでもそれらの再帰的な複合によって多くの非和声音が説明出来ることに注目して、簡単な生成規則を再帰的に適用する文法理論によりモデル化する可能性を検討した。

以下では、その方法を説明する。非和声音を七種のうちの一種に明示的に分類するのではなく、以下に示す単純な生成規則の重ね合わせによって各種の非和声音が生成されると考え、確率文脈自由文法によって音楽生成をモデル化し、自動和声解析を行う。

- 和声内音 → 前挿入音 和声内音
- 和声内音 → 和声内音 後挿入音

ただし、ここで「前挿入音」および「後挿入音」は和声内音との音程が半音または全音である音を意味する。

### 2.2 確率文脈自由文法による自動和声解析

次に、確率文脈自由文法による楽曲全体の生成を考える。

我々は楽曲の生成過程として、まず和声があり、和声に基づいて音符が生成されると考える。生成過程には以下のような階層構造が考えられる。

- (1) 機能と声から I, IV のような和音を生成
- (2) 和音から和声内音を生成
- (3) 和声内音(の並び)から非和声音を生成

これらの各階層においては、定めた生成規則に従って、開始記号から順々に非終端記号である和音や終端記号である音符が生成された結果、楽曲全体が構文木

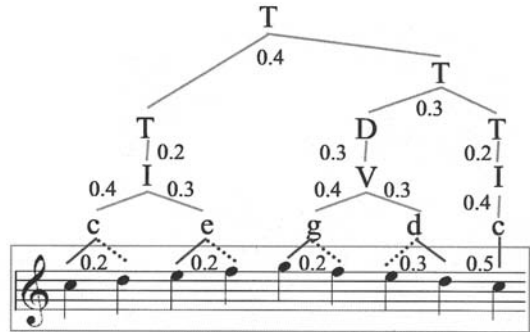


図1 確率文脈自由文法による音楽生成の構文木の例

によって表される。各生成規則に適用確率をあらかじめ設定しておくことで、楽曲を表現可能な全ての構文木に対して、生成尤度を計算することが出来る。

したがって、生成モデルとして確率文脈自由文法を用いることにより、CYK(Cocke-Younger-Kasami)アルゴリズムなどの解析アルゴリズムを用いて楽曲を生成したと考えられる最も尤もらしい木構造を求めることで、自動和声解析を行うことが出来る。

各階層における生成規則の例を以下に示す(C-durの場合)。

- (1) (機能と声 → 和音)  $T \rightarrow DT, T \rightarrow I$
- (2) (和音 → 和声内音)  $I \rightarrow c, I \rightarrow e$
- (3) (和声内音 → 非和声音)  $c \rightarrow dc, e \rightarrow ef$

自動和声解析問題では、解析結果として得られる構文木において中間の階層の節に非終端記号としてラベリングされた I, IV のような和音を求める。

確率文脈自由文法による和声解析の構文木の例を図1に示す。ただし、図1における破線は和声内音からの非和声音の生成を表す。

### 2.3 複数パート楽曲の解析方法

複数パートで構成されている楽曲に対して、確率文脈自由文法を用いて自動和声解析することを考える。同一の楽曲であるため、パートによって終端記号列は異なるが、木構造の途中の節にラベリングされる和音およびその上位階層である機能と声は全パートで一致していなければならない。そのため、図2のように、和音階層から和声内音の階層の生成過程においてパート分岐を行い、パート分岐以降の生成過程においては各パート独立に生成を行うこととする。このような単純化は、声部生成においては声部間での平行五度などの和声学の禁則を犯す可能性があるが、和声解析に用いる場合には問題ないと考えられる。

Jパートで構成される楽曲に対して、CFG規則として

$$Y \rightarrow Y_1 Y_2 \dots Y_J$$

のように、和音 Y が各パートの和音  $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ )

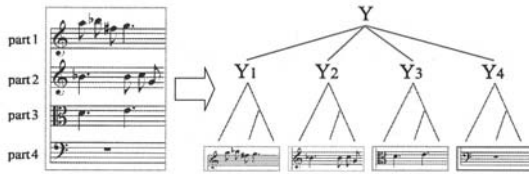


図 2 4 パートの楽曲における木構造のパート分岐

を生成すると考えることができる。各パートの終端記号列  $X_j$  を一定の時間単位で区切った部分終端記号列  $X_j(n)$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) を作成し、パート境界シンボル  $u$ 、および和音区間境界シンボル  $k$  を挿入しながら、

$$k, X_1(1), u, X_2(1), u, \dots, u, X_J(1),$$

$$k, X_1(2), u, X_2(2), u, \dots, u, X_J(2),$$

...

$$k, X_1(n), u, X_2(n), u, \dots, u, X_J(n)$$

のように、 $X_j(n)$  を一列の終端記号列として全パートの終端記号列を順次並べていく。すなわち、パート分岐後の各和音が  $k$  または  $u$  で区切られた各パートの部分終端記号列を生成し、パート分岐前の和音が  $k$  で区切られた和音区間の部分終端記号列を生成したと考える。こうして作成された一列の終端記号列に対しては CYK アルゴリズムを適用することが可能であり、解析結果の各木構造では一つの和音区間の部分終端記号列に対して一つの和音がラベリングされる。したがって、複数パート楽曲の自動和声解析問題を確率文脈自由文法の枠組の中で扱うことが出来る。

### 3. 和音と音符の動きに着目した確率文脈自由文法による自動和声解析

#### 3.1 非和声音の種別の考慮の必要性

第 2 章において、すべての種類の非和声音を前挿入音または後挿入音という二種類の組み合わせとして扱っていると、同一音高であるが本来は異なる種類の非和声音に分類されるはずの二つの音符が、前挿入音生成規則または後挿入音生成規則を用いて生成されることになる。しかし、一般に非和声音の楽譜上における出現頻度は種類によって偏りがあるため、第 2 章の手法は、出現頻度の異なる種類の非和声音をまとめて扱ってしまっていたことに相当する。

我々は、二種類ではなく各種の非和声音生成規則を用意し、各生成規則に異なる生成規則適用確率を付与することで、モデルの精緻化を図る。ある二つの音符が同一音高かつ異種非和声音である場合でも、対応する種類の非和声音生成規則を用いて両音符を生成することで、異なる生成尤度を与えることが可能である、と考えられる。

#### 3.2 和音と和声内音との関係に基づく非和声音の性質の分類

確率文脈自由文法による音楽の生成においては、まず和音から和声内音を生成し、次に和声内音から非和

声音を生成する。それゆえ、各種の非和声音を生成するための生成規則を用意するためには、非和声音の生成の元となる和声内音が各種の非和声音に対応可能となる分だけ必要であり、さらに和声内音の生成の元となる和音も各種の和声内音に対応可能となる分だけ必要である。

非和声音と和声内音と非和声音の関係を明らかにするために、非和声音を和音と和声内音との関係に着目した形に分類すると、非和声音は

- 同一和音区間内に出現するタイプ
- 和音から和音への動きに伴って出現するタイプの二種類に分けられ、以下のように整理できる。
  - 同一和音区間内に出現する非和声音
    - － 和声内単一音に挿入：補助音、倚音、逸音
    - － 和声内音間に挿入：経過音
  - 異なる和音間の動きに伴って出現する非和声音
    - － 和声内単一音に挿入：先行音
    - － 和声内音間に挿入：経過音、掛留音

第 2 章においては、複数パートで構成される楽曲を CYK アルゴリズムを用いて和声解析するために、楽曲をあらかじめ等時間間隔で区分けし、一つの区間に対して一つの和音を推定した。しかし、本来は隣接しているはずの二つの音符が、区分けによって異なる区間に配属された後には、隣接していた音符の情報を保持していない。つまり、木構造の和音階層から音符階層の部分において、木構造は各区間内で閉じており、ある区間の終端記号が他の区間の終端記号と結びつくことは許可されていない。

それゆえ、非和声音生成規則を種類別に用意することを考えると、一つの和音区間内に出現するタイプの種類の非和声音については、生成規則の用意が可能であるが、和音から和音への動きに伴って出現するタイプの種類の非和声音については、生成規則を用意することがこのままでは出来ない。

#### 3.3 非和声音の種別を考慮可能な音楽生成モデル

一つの和音から、一つの和音区間内に出現するタイプの種類の非和声音、および和音から和音への動きに伴って出現するタイプの種類の非和声音、の両方を生成するためには、それぞれのタイプの非和声音に対応するための元となる和声内音を一つの和音がどちらも生成可能であるような構造を考えればよい。

そこで、図 3 のように、楽譜における  $n$  番目の和音  $H_n$  の和音区間は、

- $n - 1$  番目の和音との関係が残っている小区間
- $n$  番目の和音らしさが出ている小区間
- $n + 1$  番目の和音との関係が生じている小区間

の三つの小区間で構成されると考える。

さらに、中心部分の当該和音らしさが出ている小区間、および両端に設定された前後の和音との関係があ



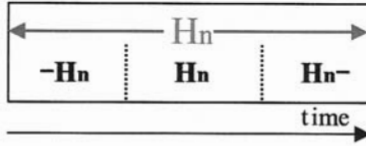


図3 三つの小区間によって構成される和音  $H_n$  の和音区間

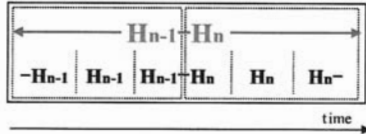


図4 和音  $H_{n-1}$  および  $H_n$  をひとつなぎとする二和音区間

る小区間から、

- 一つの和声内音に挿入される非和声音を生成可能な形の和声内音
- 和声内音から和声内音への動きに伴って挿入される非和声音を生成可能な形の和声内音の動き

のどちらもをそれぞれ生成可能とする。

したがって、和音を図3のように捉えることで、中心部分の当該和音らしさが出現する小区間からは一つの和音区間内に出現するタイプの種類の非和声音を生成し、一方、両端に設定された前後の和音との関係がある小区間からは和音から和音への動きに伴って出現するタイプの種類の非和声音を生成することで、一つの和音からの非和声音生成規則を種類別に用意することが可能になる。

### 3.4 提案する音楽生成モデルの解析可能な実現

第3.3節のような和音のモデル化に基づいた確率文脈自由文法による生成モデルを実際に構築する場合、一つの和音の両端に設定された前後の和音との関係がある小区間に対して、生成規則において前後の和音を具体的に設定したうえで、和声内音や和声内音の動きを定める必要がある。したがって、解析においては当該和音区間だけを解析するのではなく、当該和音区間および隣接する和音区間を同時に解析することになる。

しかし、一度木構造の形成に使用した終端記号列は他の終端記号列と再び木構造を形成することは出来ない。それゆえ、生成の段階において第3.3節のような確率文脈自由文法による生成モデルを考える場合、解析の段階において解析アルゴリズムであるCYKアルゴリズムを適用するための対策が必要となる。

ここで、和声学を習得したひとが和声解析を行うことを考える。その際、ある区間の和音を推定するためには、直近の音符や和音の情報は利用するが、数区間も離れた区間の音符や和音の情報を利用することは多くの場合に行われない。

このような和声解析の知見を踏まえ、本稿では、図4のような解析を行う区間に対して和音推

定済みの直前の一つの区間をひとつなぎとする二区間を、解析の最小単位とする。すなわち、ある区間を和声解析するために直前の区間の音符と和音の情報を利用する。

図4は、図3の二区間分をひとつなぎにしたものであり、 $H_{n-1}$  と  $H_n$  の区間のそれぞれ両端であった  $H_{n-1}-$  と  $-H_n$  がつながって、一つの和音小区間  $H_{n-1} - H_n$  を形成している。

### 3.5 提案する音楽生成モデルの解析方法

第3.4節において、ひとつなぎの二区間を解析するだけでは、二区間に一度は同様に区間境界が生じるため和音から和音への動きに伴って出現する非和声音を考慮することが出来ない。それゆえ、さらに、ある段階の解析においてひとつなぎの終端記号列の後半であった区間を、次段階の解析においてひとつなぎの終端記号列の前半として再び解析する。

一つの区間を重複させながら、一つずつ解析区間をずらして解析をおこなっていくことで、どの区間についても、一つの和音区間内に出現するタイプの種類の非和声音だけでなく、和音から和音への動きに伴って出現するタイプの非和声音をも扱うことが可能となる。

$X_{n-1}$  の  $X_{n-2}$  寄りの部分と、 $X_n$  の  $X_{n+1}$  寄りの部分は、 $X_{n-2,n-1}$  および  $X_{n,n+1}$  を解析する段階では、和声内音から和声内音への動きに伴って挿入される非和声音を考慮可能であるが、 $X_{n-1,n}$  を解析する段階では、隣接区間の情報が無いために、本来とは異なる適切ではない種類の非和声音として扱われることになる。その際に有用となるのが、図4における  $-H_{n-1}, H_{n+1}-$  である。  $-H_{n-1}, H_{n+1}-$  を、連続音声認識のガベージモデルに対応するモデルと考え、分類不能な非和声音に該当する音符を非常に低確率で生成させる能力をもたせる。このガベージモデルにより、生成規則では想定外の終端記号列に対しても解析不能を回避し解析結果を出力することが可能である。解析対象楽曲の冒頭および末尾の区間を除いた全ての区間において終端記号列を一回ずつ重複して解析しているため、第2章の手法とは異なり、和音階層の上層にあたる機能と声の階層について、木構造を形成することは行わない。したがって、楽曲全体の木構造の形成は考えないことになる。

### 3.6 解析アルゴリズムの実際

実際の解析アルゴリズムを以下に示す。ここで、 $X_{n-1,n}$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) は  $n-1, n$  番目の区間をひとつなぎにした終端記号列を、 $H_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) は  $n$  番目の区間の和音を、それぞれ表す。

- (1)  $X_{1,2}$  を解析し、 $H_1$  および  $H_2$  を推定
- (2)  $H_2$  を既知として  $X_{2,3}$  を解析し、 $H_3$  を推定
- (3)  $H_{n-1}$  を既知として  $X_{n-1,n}$  を解析し、 $H_n$  を推定

この解析アルゴリズムによって、CYKアルゴリズム

の複数回の適用で和声解析が可能になる。

### 3.7 提案する生成規則の具体例

本節では、第3.6節までで提案した確率文脈自由文法の生成規則の具体例を示す。ただし、例は全てC-durの場合で、ローマ数字は和音番号を、アルファベットは音名を、'-'でつながれたx-yなどはひとつなぎのシンボルを、それぞれ表す。

- 和音の動きから和音の生成:
  - I-V → -I I I-V V V- | I I-V V | I V
- 和音から和声内音の生成:
  - I → c | e | g
  - V → g | b | d
  - I-V → c-g | e-d
- 和声内音から非和声音\*の生成:
  - 補助音生成: c → c-d\*-c
  - 倚音生成: c → d\*-c
  - 逸音生成: c → c-d\*
  - 先行音生成: d → d\*-d
  - 経過音生成: c-g → c-d\*-e-f\*-g
  - 掛留音生成: e-d → e-e\*-d

## 4. 自動和声解析実験

### 4.1 実験設定

第3章において提案した、非和声音の種類を考慮した確率文脈自由文法に基づく音楽生成モデルを実装し、自動和声解析実験を行った。

転調のない正解調を与えた数〜数十小節の長さのパスセージに対して、1拍または2拍または3拍につき一つの和音を推定した。和声解析対象曲には和声学に則った楽曲としてJ. Haydn: String Quartet, Nos. 25, 41からそれぞれ第1楽章、第4楽章を選んだ。和音の種類としては、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。転回形との区別は行っていない。また、確率文脈自由文法の生成規則適用確率に関しては、J. Haydn: String Quartetのうち、自動和声解析実験には用いていない楽曲を数曲分利用して、一部の生成規則について統計的に適用確率を算出した。和声解析性能の比較対象として、従来手法である第2章で述べた手法を実装し、同一の楽曲に対して自動和声解析を行った。ただし、第2章で述べた手法の確率文脈自由文法の生成規則適用確率に関しては、和声学の知見に基づき人手で与えた。

自動和声解析結果の評価は、音楽大学の楽理科の学生一人による同一楽曲に対する和声解析結果との、推定和音の一致数および一致率によって行った。正解と言わない理由は、和声解析結果には多義性があり、一人の推定結果が唯一の正解とは言えないためであり、一人の推定結果との一致数および一致率とした。

### 4.2 自動和声解析実験結果

図5に解析結果の例を示す。図5の譜例において、

result A F-dur VI IV V  
 result B F-dur I II V<sub>7</sub>  
 result C F-dur VI IV V

図5 和声解析実験結果の例。(A:人手による, B:従来手法, C:提案手法, ただしB,Cともに調既知での推定)

表1 和声解析実験結果

対象楽曲	提案手法		従来手法	
	一致数 (一致率%)	一致数 (一致率%)	一致数 (一致率%)	一致数 (一致率%)
第25番第1楽章	127 (48.8%)	148 (56.9%)	148 (56.9%)	148 (56.9%)
第25番第4楽章	304 (58.0%)	265 (50.1%)	265 (50.1%)	265 (50.1%)
第41番第1楽章	173 (61.3%)	153 (54.3%)	153 (54.3%)	153 (54.3%)
第41番第4楽章	300 (72.1%)	238 (57.2%)	238 (57.2%)	238 (57.2%)
合計	904 (61.0%)	804 (54.3%)	804 (54.3%)	804 (54.3%)

従来手法は、2小節目のVn Iの八分音符のa音を倚音、同小節のVn IIの八分音符のb音を和声内音、とするような和音を推定しているのに対し、人間はどちらの音も掛留音と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、さらに解析結果を分析すると人間の場合と同様の判断をしている。したがって、図5の譜例から、非和声音を種類別に扱う提案手法の有効性が表れている。

次に、表1に自動和声解析実験の全体の結果を示す。従来手法と比較して、提案手法では、音楽大学生による和声解析結果との一致率が全体で約6.75%増加しており、提案手法の有効性が示唆される。非和声音を種類別に扱った点以外の一致率改善の要因として、提案手法では二和音区間をひとつなぎに扱うために、和音 bigram 確率を導入したことが挙げられる。和声学の知見から和音間の遷移には偏りがあり、本実験では実際に統計的な学習を行った結果を生成規則適用確率に反映させた。

四つの楽章で唯一、一致率の低下した第25番第1楽章において、誤推定結果を分析すると、IVとII<sub>7</sub>、IとVI<sub>7</sub>のように、和声内音の類似した和音を推定していることがわかった。現段階においては、和音からの和声内音の生成規則の適用確率は和声学の知見に基づき人手で設定しているため、類似和音間に適切な尤度差が生じていない場合がある。大量の学習データを準備して生成規則適用確率の統計的学習を行えば、類似和音間に関しても適切な尤度差を生じさせることが可能と考えられる。

和音推定結果の不一致の原因としては、主に次の三点が挙げられる。

一つは、休符の存在である。解析対象が4パートで構成される楽曲であっても、一部のパートの音符が休符の場合、和声解析に有効利用の出来る音符が少なくなってしまう。したがって、推定した複数の和音間に尤度差が生じにくく、誤推定を引き起こす原因になると考えられる。

もう一つは、推定する和音一つ当たりの区間の長さである。和音一つ当たりの区間が長ければ、多数の音符について、隣接音符の情報を利用しながら解析を行えるのに対して、和音一つ当たりの区間が短いと、区間の細分化によって、隣接音符の情報の一部が利用出来なくなってしまう。したがって、区間が長い場合と比較して、非和声音を種類別に扱うことが困難になり、誤推定を引き起こす原因になると考えられる。

もう一つは、生成規則数である。提案手法において非和声音を種類別に扱うなど詳細な生成規則を用いた結果、従来手法と比較して生成規則数が大きく増加した。生成規則数が増加すると、人手による生成規則適用確率の詳細な設定は困難であり、一方、統計的学習による生成規則適用確率の設定を行う際には、データスパースネス問題に対処するためのスムージング方法の検討が必要である。本稿においては、提案手法の一部の生成規則について適用確率の統計的学習を行った。しかし、大量の既存の楽曲を学習データとして準備し、和声学を十分に反映したような適用確率を各生成規則に対して設定することが出来れば、提案手法は詳細な生成規則を用いているため、より適切な和声解析を行うことが可能と考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、非和声音の性質に着目し、和音と和声内音との関係性の利用により、非和声音の種類別の扱いが可能な確率文脈自由文法に基づく音楽生成モデルを提案した。また、提案した音楽生成モデルを自動和声解析問題に適用し、音楽大学の楽理科の学生一人による解析結果および我々が以前に提案した先行研究との比較を行い、和声学的な適切さの向上をある程度確認した。今後は、確率文脈自由文法のパラメータの統計的学習における学習データの追加やデータスパースネス問題に対処するためのよりよいスムージング方法、和声学上重要な性質をもつ転調や借用和音や和音の転回形、などについても検討していく予定である。

**謝辞** 和声学的観点から多大な助言や解析結果の評価をして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。また、和声解析結果を作成して下さい下さった東京藝術大学の坂本紘作氏に深謝する。また、和声解析システムの構築に助力して下さい下さった東大院・情報理工の大田郁実氏に深謝する。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) 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修士論文, 2000.
- 5) C. Raphael et al.: "Harmonic Analysis with probabilistic graphical models," *Proc. of IS-MIR 2003*, 2003.
- 6) 江村伯夫 他: "“Dominant Motion” の検出に重点を置いたポピュラーミュージックの和声解析システム," 音講論, 2-6-6, pp. 779-780, 2004.
- 7) 三浦雅展 他: "ポップス系の旋律に対する和声付与システム:AMOR," 情処論, Vol. 46, No. 5, pp. 1176-1187, 2005.
- 8) 三浦雅展 他: "ソプラノ課題の全許容解列挙システムの構築," 音響誌, pp. 105-114, Mar. 2004.
- 9) F. Lerdahl and R. Jackendoff: *A Generative Theory of Tonal Music*, 1983.
- 10) R. Bod: "A General Parsing Model for Music and Language," *Proc. ICMAI 2002*, LNAI 2445, pp. 5-17, 2002.
- 11) 村田 敏之: 楽曲の緊張弛緩構造と主辞駆動句構造文法を用いた和声解析, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文, 2004.
- 12) 諸岡 孟 他: "非和声音を考慮した HMM による自動和声解析," 音講論, 3-7-7, pp. 749-750, Mar. 2007.
- 13) 諸岡 孟 他: "非和声音を考慮した確率文脈自由文法による自動和声解析," 音講論, 2-1-11, pp. 865-866, Sep. 2007.