

非和声音規則に基づく経路制約を用いた旋律自動生成

深山 覚^{†1} 西本 卓也^{†1}
小野 順貴^{†1} 嵯峨山 茂樹^{†1}

本稿では古典的な作曲法に基づいて適切に非和声音を生成できる旋律生成モデルを提案する。非和声音は和音とメロディの関係を見る上で重要であり、音楽理論でその用法が整理されている。しかし離れた音との関係を考慮して判断する必要があるなどその用法は多様かつ複雑で、計算機で旋律を自動生成する際にどのようにそれらを制約として取り入れるかが問題である。本研究では非和声音の規則を局所的な経路制約として扱うことで、それらの制約条件下で最適なメロディを動的計画法を用いて探索して生成できるアルゴリズムを提案する。

Automatic Melody Composition Using Path Constraints of Nonchord Tone Rules

SATORU FUKAYAMA,^{†1} TAKUYA NISHIMOTO,^{†1}
NOBUTAKA ONO^{†1} and SHIGEKI SAGAYAMA^{†1}

In this paper, we discuss a model that can generate a melody which satisfies non-chord tone rules given by the classical methods of composition. Since non-chord tones are important when musicians analyze the relationship between the melody and the chord, rules of non-chord tones are relatively well-organized in music theories. However there were some difficulties in applying those rules to automatic composition because of the variety and complexity of non-chord tone usages. We show that non-chord tone rules can be represented as local constraints on the melody path and the melodies can be automatically generated by finding the optimal melody paths using dynamic programming under constraints of those local constraints.

^{†1} 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

1. はじめに

作曲は人間の行う行為の中でも感性や創造性に頼る部分の多い行為である。しかし一方では、型にはまった方法でもそれなりの曲が作れてしまうという一面もある。実際多くの作曲家の卵たちは、将来独創的な作風の作曲家になることを志すにしても、はじめは正格な書法（エクリチュール）と呼ばれる古典的な作曲スタイルを勉強して、過去の作曲家達が築いてきた音楽文化のエッセンスを体得し、音楽大学に入学する前にはバッハ風のフーガやフォーレ風の合唱曲などが一応書けるようになる。そしてこれらの習得は学習者の才能に任せられているというより、教師から「これはやってはいけない」「普通はこうする」といった規則や用例によって伝授されるもので、習得にかかる時間を別にすれば、才能とはさほど関係なく習得できるものである。

このような背景を踏まえると、計算機を用いた形式的な処理によって人間が作っているように音楽を作曲できるのではないかという発想は比較的自然なものであるといえよう。実際、音楽理論や作曲法の規則に基づいたアルゴリズム的な処理によって（平凡かもしれないが）理論的に間違いのない音楽を自動生成できる可能性は、計算機を用いた自動作曲研究の初期から示唆されてきた¹⁾。主旋律と対旋律が協和するように厳格な規則が決められている「対位法」に基づいた楽曲生成²⁾や、メロディと和声進行の関係についての理論である「和声法」を用いた自動和声づけシステム³⁾やコラールを生成するシステム⁴⁾、ジャズならばインプロヴィゼーションをするシステム⁵⁾などが提案されている。

しかし問題は作曲法や音楽理論を計算機に実装しようとする際に困難が生じる点である。本稿で扱う非和声音についての規則もそのような問題の一つである。第一に既存の理論を整理して、計算機で扱える数理的な理論として規則を書き直す必要がある。確率自由文脈文法を用いた研究⁸⁾があるが、生成規則が膨大になる、省略が扱えない、など問題がある。第二に自動作曲において、非和声音の制約を満たすメロディを候補の中から探索するとき、メロディの組み合わせ爆発を防ぐ必要がある。この問題に対しては動的計画法を用いて効率的に求めるメロディの探索を行う研究^{12) 13)}があるが、離れた音を考慮する必要がある非和声音規則については扱えていない。これは一般的に動的計画法において2つ以上前の状態を考慮に入れた制約を扱うには、1つ前の状態を場合分けする必要がある、遡って考慮する分の指数のオーダーで計算量が増えてしまうからである。そこで本稿では、局所経路制約を導入した動的計画法によって、計算量を指数的に増やすことなく非和声音規則を満たす旋律生成が行う方法について議論する。

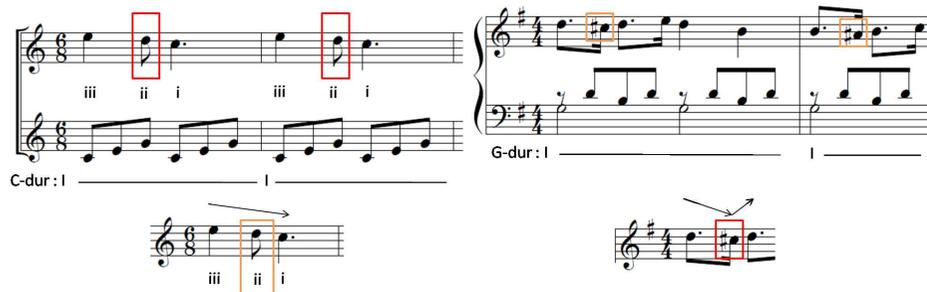


図1 経過音 (passing tone) の例: 枠で囲ってあるものが経過音。2 個の和声音の間を音階的につなぎ合わせる非和声音で、弱拍または拍の弱部に置かれる。
図2 刺繍音 (neighbor tone) の例: 枠で囲ってあるものが刺繍音。2 個の同じ高さの和声音の間にはさまれた隣接音度の非和声音で、弱拍または拍の弱部に置かれる。

2. 準備: 非和声音とその分類^{*1}

メロディ中には一見和音とは関係のないように見える音が現れる。たとえば図1では、第二声部の分散和音を見ても明らかなように、Iの3和音(構成音*i,iii,v*)がこの部分での和音である。しかし第一声部(メロディ)に含まれるiiの音(図中枠で囲った音)は、この和音の構成音ではない。このような音を非和声音と呼ぶ。逆に和音の構成音であるiiとiの音を和声音と呼ぶ。

非和声音は隣接する和声音との相対的な音高関係と拍の強弱によって分類される。たとえば図1の例では、非和声音であるiiの音が、前後のiiiおよびiと音階をなしている。このような「2個の和声音の間を音階的につなぎあわせる非和声音」を経過音 (passing tone) という。経過音は弱拍または拍の弱部で用いられる。図2の例では隣り合う音高に移って戻る形で非和声音が現れている(図中枠で囲った音)。このような「2個の同じ高さの和声音の間にはさまれた隣接音度の非和声音」を刺繍音 (neighbor tone) という。刺繍音も弱拍または拍の弱部で用いられる。これら経過音と刺繍音の他には、これら以外の非和声音の用法をも含めて、分類を図3に示す。倚音 (appoggiatura)、掛留音 (suspension) は経過音と刺繍音の次によく使われる。これらの非和声音は強拍または拍の強部に置かれる。またそれほど多くは使われないが、逸音 (escape tone)、先取音 (anticipation) といった非和声音も

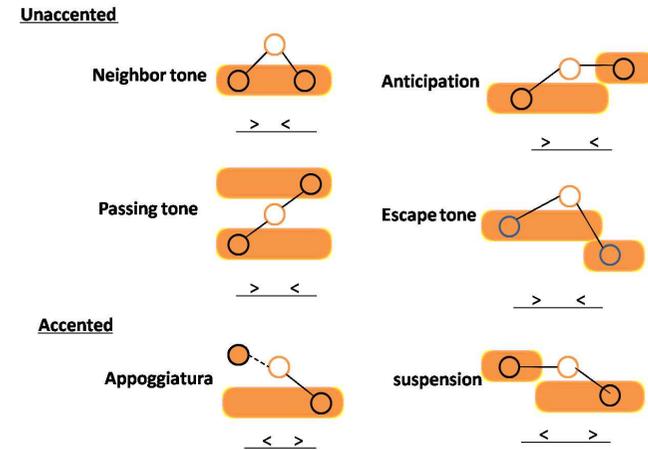


図3 非和声音の分類: 前後の和声音との隣接関係と拍の強弱で分類できる

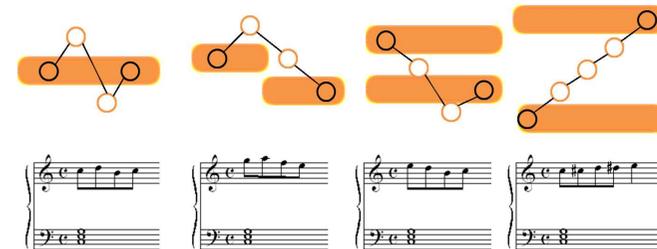


図4 非和声音の連続と非和声音への非和声音の例: 左から2つは刺繍音が倚音に連続する場合、3番めは経過音が倚音に連続する場合、最後は非和声音へと解決する非和声音(半音階進行)。このように非和声音用法の組み合わせが解釈として許される。

ある。これらは弱拍または拍の弱部で用いられる。さらに非和声音は和声音へと進行する前に再び連続して非和声音が挿入されることがある。そのような例を連続非和声音という。刺繍音が連続する、掛留音と倚音が連続する、経過音と倚音が連続する、などといった用法が見られる。また、和声音に対して隣接するのではなく、非和声音に対して隣接関係を持つ非和声音、すなわち非和声音に対する非和声音という用法もありうる。図4に連続非和声音と非和声音への非和声音の例を示す。

*1 非和声音の定義とその分類には幾つか方法があるがここでは島岡譲の文献⁹⁾に従った

3. 非和声音規則を満たす旋律自動生成

前節において述べた非和声音の規則は、歌唱曲のメロディのようにメロディックな音の動きを持つ旋律の作曲で重要視される。そこで本研究では歌唱曲を自動生成する場合において非和声音規則を導入する方法について議論する。

3.1 制約条件に基づいた歌唱旋律生成

1節で述べたように正格な書法に基づいた楽曲を作る際には、多くの禁則や推奨される形による制約がある。特に歌唱曲を生成する場合には、文献⁽¹²⁾⁽¹³⁾における議論に従うと次のような制約がある。

第一に歌詞の意味理解に基づいた曲想による制約である。曲想は、マイナーコードを多用した暗い曲、ギャロップのリズムを含む快活な曲、といったように、用いる和声進行と旋律のリズムにより特徴づけられる。第二に歌詞の韻律に基づく制約である。日本語はピッチアクセントの言語であるため、聴き手の言語理解は、発話される言葉のピッチの高低という韻律情報に大きく依存する。そこでクラシックスタイルの作曲法においては、日本語歌詞に旋律を付ける際に歌詞を読み上げるときの音の高低と旋律の音の上下を一致させることが重要とされている¹⁰⁾。第三に楽曲のスタイルやジャンルの背景には音楽文化があり、その音楽文化の経験則が体系化されたものとしての音楽理論が、意識的にしろ、無意識的にしろ作曲されるメロディへの制約として加わる。

ここで、あるメロディが与えられたときにそのメロディが正格な書法に沿っている度合いを計算することを考える。先に述べた制約によって、メロディの音の現れ方には確率的な偏りが生じている。具体的には、和声進行と歌唱音域の制限による音高の出現確率の偏り、リズムによる音の出現タイミングの偏り、平行8度の禁止など音楽理論に基づく音高の遷移確率の偏りなどである。これらはメロディの部分部分の確率を与えるので、それらの掛け合わせによってメロディ全体が正格な書法に沿っているかどうかを確率値として求めることができる。メロディの音高列 $X = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ が与えられると、メロディの確率 $P(X)$ は以下のようにして計算できる:

$$P(X) = b_{x_0} a_{x_0 x_1} b_{x_1} a_{x_1 x_2} \cdots a_{x_{n-1} x_n} b_{x_n} \quad (1)$$

$$= b_{x_0} \prod_{i=1}^n a_{x_{i-1} x_i} b_{x_i} \quad (2)$$

ここで b_k は音高 k が出現する確率、 a_{jk} は音高 j から音高 k へと遷移する確率である。こ

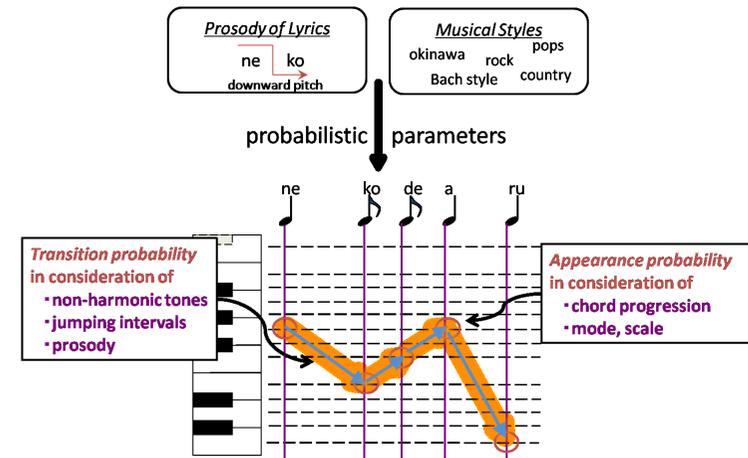


図5 旋律生成のモデル: 制約を最もよく満たし確率が最大となるメロディを探索することで旋律が自動生成できる

これらの出現確率と遷移確率は先に述べた制約条件によって決まる。

逆に歌詞をよく反映する旋律が作曲されたとすれば、その旋律はこれらの制約を同時に一番良く満たしているものと考えられる。すなわち、歌唱曲の旋律生成はこれら制約によって決まる音の出現確率と遷移確率の下で、メロディの確率 $P(X)$ を最大化する音高列 X^* を探索する問題となる (図5):

$$X^* = \operatorname{argmax}_X P(X) \quad (3)$$

このとき i 番目の音高が k であるときの i 番目の音符までのメロディの最大確率 $\delta(i, k)$ が、

$$\delta(i, k) = \max_{X'=\{x_0, \dots, x_{i-1}\}} P(X', x_i = k) \quad (4)$$

$$= \max_j \left[\max_{X''=\{x_0, \dots, x_{i-2}\}} P(X'', x_{i-1} = j) a_{jk} \right] b_k \quad (5)$$

$$= \max_j [\delta(i-1, j) a_{jk}] b_k \quad (6)$$

のように1音符前の確率値 $\delta(i-1, j)$ を用いて書けるので、動的計画法¹¹⁾を用いて $X^* = \{x_0^*, x_1^*, \dots, x_n^*\}$ は効率的に求めることができる。

動的計画法を用いた確率最大となるメロディ X^* の探索

Step.1 初期化

各音高 $j = 0, \dots, M$ について以下の初期化を行う。

$$\delta(0, j) = b_j(0)$$

$$\psi(0, j) = 0$$

Step.2 再帰計算

各音符 $i = 1, \dots, n$ 、各音高 $k = 0, \dots, M$ について以下を計算。

$$\delta(i, k) = \max_j [\delta(i-1, j) a_{jk}(i)] b_k(i)$$

$$\psi(i, k) = \operatorname{argmax}_j [\delta(i-1, j) a_{jk}(i)]$$

Step.3 再帰計算の終了

$$\hat{P} = \max_k \delta(n, k)$$

$$x_n^* = \operatorname{argmax}_k \delta(n, k)$$

Step.4 バックトラック

音符インデックスの $i = n, n-1, \dots, 1$ に対して以下を行い、
 最大確率を与えるメロディ $X^* = \{x_0^*, \dots, x_n^*\}$ を得る。

$$x_{i-1}^* = \psi(i, x_i^*)$$

3.2 非和声音規則に基づく経路制約の導入

前節の定式化ではメロディ生成に課す制約条件は、1つ前の音との遷移確率 a_{jk} と出現確率 b_k によって表されており、考慮する必要のある音は1つ前の音のみであった。非和声音規則を制約として表すとき、刺繍音、経過音、一部の倚音については1つ前の音のみを考慮した制約条件で生成可能である。しかし、逸音や非和声音の連続などの制約条件を実装するためには、2つ以上前の音についての考慮が必要である。

一般に動的計画法で経路探索を行う際に m 個前の状態を考慮する必要のある制約条件があるときには、元の状態数 n に対して $n \times m$ 個の状態数に展開して扱う必要がある。たとえば3つ前の状態を考慮する必要があるとき、(4)式は、

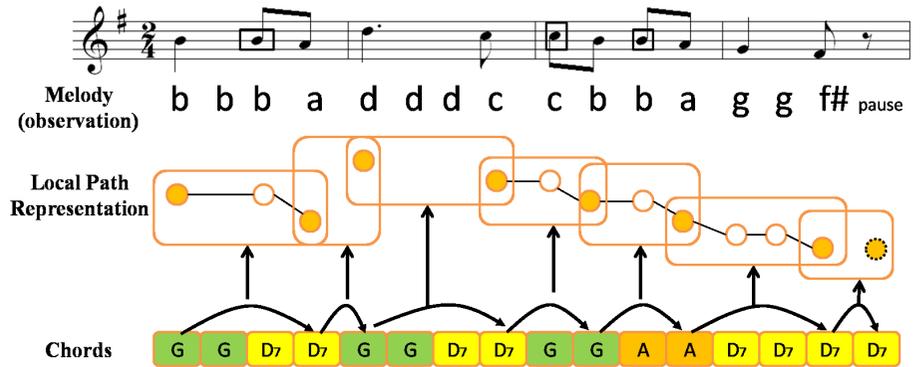


図6 局所的な経路制約を用いた旋律の経路探索: 局所経路同士が両端でのみ重なり合うことで、指数的に状態を増やすことなく、各局所経路を状態とする動的計画法としてメロディを求めることができる

$$\delta(i, k) = \max_{X'=\{x_0, \dots, x_{i-1}\}} [P(x_0, \dots, x_{i-3}) P(x_{i-2}, x_{i-1}, x_i = k)] \quad (7)$$

$$= \max_{(x_{i-3}, x_{i-2}, x_{i-1})} \left[\delta(i-3, x_{i-3}) \prod_{s=3}^1 a_{x_{i-s} x_{i-(s-1)}} b_{x_{i-(s-1)}} \right] \quad (8)$$

となり、各音符について音高の候補が K 個あれば、 $(x_{i-3}, x_{i-2}, x_{i-1})$ の組み合わせだけの数 K^3 個について計算する必要がある。

2節で議論したように非和声音の用法は前後の和声音との隣接関係で表せる。またメロディを構成する音は和声音と非和声音のいずれかであるので、両端が和声音で間が非和声音のみである局所経路の組み合わせとしてメロディを扱うことができる(図6)。

そこで事前に楽曲で用いる非和声音の規則に基づく局所経路を準備しておく。このとき、メロディを構成する各局所経路が両端でのみが重なる、という条件下では、確率最大となるメロディの探索を動的計画法を用いて、指数的な計算量の増加を抑えつつ求めることができる。次節において、このことを示す。

3.3 動的計画法を用いた可変長経路制約の条件下での旋律生成

(8)式でみたように、2つ以上前の音を考慮する必要のある非和声音の制約条件を含む場合は、(6)式のように1状態前の確率値を用いて再帰的に確率が計算できない。まず簡単のため長さ3の局所経路(この経路の名前を l 、経路内の音高を右端を基準にして

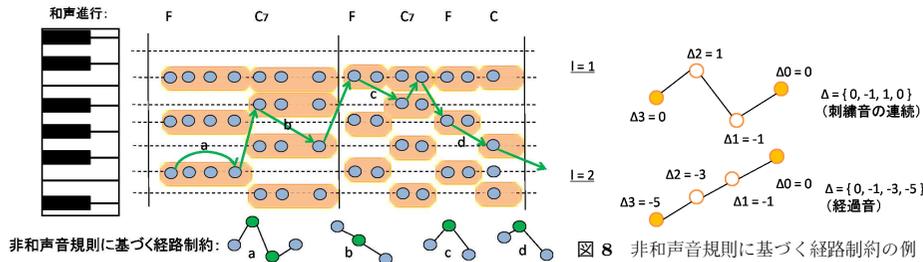


図 7 非和声規則に基づく経路制約を導入した旋律の探索

$(\Delta_0^{(l)} = 0, \Delta_1^{(l)}, \Delta_2^{(l)}, \Delta_3^{(l)})$ 図 8 の $l = 1$ のみ制約として与えられる場合を考える。経路制約 $\Delta^l = \{\Delta_0^{(l)}, \Delta_1^{(l)}, \Delta_2^{(l)}, \Delta_3^{(l)}\}$ を使えば、 $x_{i-3} = k + \Delta_3^{(l)}, x_{i-2} = k + \Delta_2^{(l)}, x_{i-1} = \Delta_1^{(l)}$ と決まるので、(8) 式は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \delta(i, k) &= \max_{(k+\Delta_3^{(l)}, k+\Delta_2^{(l)}, k+\Delta_1^{(l)})} \left[\delta(i-3, k+\Delta_3^{(l)}) \prod_{s=3}^1 a_{k+\Delta_s^{(l)}} b_{k+\Delta_{s-1}^{(l)}} \right] \quad (9) \\ &= \max_l \left[\delta(i-3, k+\Delta_3^{(l)}) \prod_{s=3}^1 a_{k+\Delta_s^{(l)}} b_{k+\Delta_{s-1}^{(l)}} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

このように $\delta(i-3, k+\Delta_3^{(l)})$ を用いて最大確率を計算することができる。

次に経路制約の長さが可変である場合に拡張する。経路制約が $\Delta^{(l)} = \{\Delta_0^{(l)}, \dots, \Delta_n^{(l)}\}$ であるときを考える。経路制約の長さ n は l に依って決まるので $n^{(l)}$ と書くと、

$$\delta(i, k) = \max_l \left[\delta(i-n^{(l)}, k+\Delta_{n^{(l)}}^{(l)}) \prod_{s=n^{(l)}}^1 a_{k+\Delta_s^{(l)}} b_{k+\Delta_{s-1}^{(l)}} \right] \quad (11)$$

よって $\delta(i, k)$ は、局所経路 l の始点における最大確率 $\delta(i-n^{(l)}, k+\Delta_{n^{(l)}}^{(l)})$ を使って再帰的に書けることがわかったので、動的計画法を用いて計算量の指数的増加を防ぎつつ計算することができる。

動的計画法を用いた可変長経路制約の条件下で確率最大となるメロディ X^* の探索

Step.1 初期化

各音高 $j = 0, \dots, M$ について以下の初期化を行う。

$$\delta(0, j) = b_j(0)$$

$$\phi(0, j) = 0$$

Step.2 再帰計算

各音符 $i = 1, \dots, n$ 、各音高 $k = 0, \dots, M$ について以下を計算。

確率が最大となる局所経路のインデックス l を保存する。

$$\begin{aligned} \delta(i, k) &= \max_l \left[\delta(i-n^{(l)}, k+\Delta_{n^{(l)}}^{(l)}) \prod_{s=n^{(l)}}^1 a_{k+\Delta_s^{(l)}} b_{k+\Delta_{s-1}^{(l)}} \right] \\ \phi(i, k) &= \operatorname{argmax}_l \delta(i, k) \end{aligned}$$

但し、局所経路の始点 $i-n^{(l)}$ が 0 未満のとき、

また局所経路が拍の強弱と合致しないときには計算しない。

Step.3 再帰計算の終了

$$\hat{P} = \max_k \delta(n, k)$$

$$x_n^* = \operatorname{argmax}_k \delta(n, k)$$

Step.4 バックトラック

音符インデックスの $i = n$ から $i = 0$ になるまで以下を繰り返す、

最大確率を与えるメロディ $X^* = \{x_0^*, \dots, x_n^*\}$ を得る。

$$\hat{l} = \phi(i, x_i^*)$$

$$x_{i-1}^* = x_i^* + \Delta_{\hat{l}}^{(i)}, \quad x_{i-2}^* = x_i^* + \Delta_{\hat{l}}^{(i)} \quad \dots \quad x_{i-n^{(i)}}^* = x_i^* + \Delta_{\hat{l}}^{(i)}$$

$$i := i - n^{(i)}$$

図 9 非和声規則に基づいた経路制約を用いて生成した楽曲例: 枠で囲まれた音符が非和声音である。経過音、逸音、刺繍音、掛留音や刺繍音が連続する用法が生成できている。

4. 旋律生成実験

4.1 目的

非和声規則に基づく経路制約を用いた歌唱旋律の生成を行ない、これまで生成できなかった非和声音を生成可能であるかについて検証した。

4.2 生成条件

作曲に用いる歌詞は「我輩は猫である。名前はまだない。どこで生まれたかほとんど見当がつかぬ。」を用いた。1種類の歌詞に対して、54種類の経路制約と19種類の和声進行によって、計19曲を生成した。

4.3 結果と考察

生成された旋律の例を図9に示す。1つ前の音符のみ考慮した制約条件では生成できなかった逸音、掛留音や非和声音が連続する用法が生成できた。一方、音の長さによる制約がないため、前後の和声音との位置関係と拍の強弱関係は規則にあっているものの、長い逸音など不自然な非和声音も生じた。

5. 結論

本稿では経路制約を用いて非和声規則を満たす非和声音を含むメロディを自動生成する手法を提案した。非和声規則に基づく制約条件は2音以前の音の状態を考慮する必要があり、動的計画法で解く際に計算量が指数的に増大してしまうが、局所経路の組み合わせでメロディが生成されるというモデルとしたことで、可変長の経路制約を含む場合でも動的計画法でメロディを探索する手法とすることができた。また実際に旋律を生成し、2つ以上前の音の考慮が必要な非和声音を生成できた。今後は非和声音の音価を含めた制約条件や、

経路制約を確率自由文脈文法などを用いて生成する、逆問題として扱ってメロディに対する自動和声づけなどを行う予定である。また非和声音の適用確率の重み付けを行い、特徴ある作風が自動生成できるかについても検討したい。

謝 辞

本研究の一部は科学技術振興機構 CREST の補助を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) L. Hiller, L. Isaacson: Musical Composition with a High-Speed Digital Computer, in *Machines Models of Music*, M. Schwanauer, and D. Levitt Eds, MIT Press pp.9–21, Reprint of original article in *Journal of Audio Engineering Society*, 1958.
- 2) W. Shottstaedt: Automatic counterpoint, In M. Mathews and J. R. Pierce, *Current Directions in Computer Music Research*, pp.225–262, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1989.
- 3) R. Ramirez, J. Peralta: A constraint-based melody harmonizer, *ECAI'98 Workshop on Constraints and Artistic Applications*, Brighton, 1998.
- 4) M. Allan, C. Williams: Harmonizing Chorales by Probabilistic Inference, *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems*, 17, 2005.
- 5) D. Levitt: A melody description system for jazz improvisation, M. S. Thesis, Artificial Intelligence Laboratory, Chambridge, Massachusetts, 1981.
- 6) F. Pachet, P. Roy: Musical harmonization with constraints: A survey, *Constraints Journal*, 6(1):7-19, 2001.
- 7) M. Baroni, R. Brunetti, L. Callegari, and C. Jacobini: A grammar for melody: relationships between melody and harmony, In M. Baroni and L. Callegari, eds. *Musical Grammars and Computer Analysis*, Florence: L. Olshki, pp.201–218, 1984.
- 8) 諸岡孟, 西本卓也, 嵯峨山茂樹: 確率自由文脈文法による和声学規則の表現と楽曲の自動和声解析, 情報処理学会研究報告, 2008-MUS-74, pp.77–82, 2008.
- 9) 島岡謙: 和声と楽式のアナリゼ, pp.8–9, pp.18–20, pp.37–39, 音楽之友社, 1964.
- 10) 長谷川良夫: 作曲法教程 上巻, pp.68–89, 音楽之友社, 1950.
- 11) Bellman, R. E.: *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
- 12) 中妻啓, 酒向慎司, 小野順貴, 嵯峨山茂樹: 歌詞の韻律を用いた自動作曲, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.739-740, 2007.
- 13) 深山寛, 中妻啓, 米林裕一郎, 酒向慎司, 西本卓也, 小野順貴, 嵯峨山茂樹: Orpheus 歌詞の韻律に基づいた自動作曲システム, 情報処理学会研究報告, 2008-MUS-76, pp.179–184, 2008.