

# 旋律・和声進行・リズム譜からの 和声的対位法の自動作曲の検討

大森陽<sup>†</sup> 保利武志<sup>†</sup> 嵯峨山茂樹<sup>‡</sup>

明治大学 総合数理学部<sup>‡</sup>

**概要:** 対位法自動作曲の研究において、従来は古典対位法を用いたアプローチが主であり、ヴォイシングに代表される和声学の問題とは異なるものとして扱われることが多かった。本研究の目的はバッハ風の華麗な旋律リズムを含んだ対位法の自動作曲であり、背後にある和声進行を含めた、和声的な対位法というアプローチを用いて、旋律・和声進行・リズム譜の三つの条件入力を与えることで実現できることを検討する。また今後の展望としてそれらの入力の自動生成を目指す。

**キーワード:** 対位法, 自動作曲, 動的計画法(DP), N グラムモデル

## Discussion of Automatic Composition of Harmonic Counterpoint from Melody, Harmony Progression and Rhythm

OHMORI YO<sup>†</sup> HORI TAKESHI<sup>†</sup>  
SAGAYAMA SHIGEKI<sup>‡</sup>

**Abstract:** In previous research on automatic music composition based on counterpoint, algorithms focused on the relationship between different melodies, not considering the development of the underlying harmony progression. The aim of this research is to realize automatic composition of counterpoint generating melodic rhythms in the style of Bach. By using the harmonious counterpoint method, which considers both melodic relationships as well as harmonic development, the presented algorithm processes three types of input conditions: The main melody, the harmony progression, and the melody rhythm. The automatic generation of these inputs is a topic of future research.

**Keywords:** Counterpoint, Automatic Composition, Dynamic Programming, N-gram model

### 1. はじめに

対位法は、旋律線、およびそれらの累積に関する学問であり、音楽を水平方向に考察する。これに対して、音楽を垂直方向に考察するのが和声学であり、これは和声、およびそれらの連結に関する学問である[1]。これらは別々の教程として確立しているため、対位法の自動作曲の研究においては、従来は古典対位法を用いたアプローチが主であり[2,3]、ヴォイシングに代表される和声学の問題とは異なるものとして扱われることが多かった。類する研究としては対旋律、副旋律などを扱った研究が挙げられるが[4,5]、これらにおいても和声学によるアプローチが多かった。

それに対して本研究では、対旋律が背後に隠されている和声構造に従属しつつ生成されると仮定し、対位法と和声学の2つを合わせた『和声的な対位法』のアプローチから対位法の自動作曲を考える。対位法における水平の制約と和声学における垂直の制約によって、探索空間を狭めることができ、より問題が解き易くなることが期待できる。

本来の対位法においては、和声進行や機能และ和声の概念は

存在しないが、このアプローチは決して音楽的に説得力の無い仮定ではなく、例えば J. S. Bach は対位法、和声学の両方向から見ても矛盾の無い精密な作品を残している(Fig. 1)ように、対位法と和声学はお互い補い合えるものである。

本研究の目的はバッハ風の華麗な旋律とリズムを含んだ対位法の自動作曲であり、前述のアプローチを用いて、旋律・和声進行・リズム譜の三つの入力を与えることで実現できることを検討する。また今後はそれらの入力情報の自動生成を視野に入れている。我々は歌詞からの多重唱曲の自動作曲においても、そのようなアプローチをとった[6]。これらは、多声音楽やカノン、フーガ等の自動作曲や、対位法学習者への支援に役立つと期待される。



Figure 1. J.S. Bach: 3 声インヴェンション No.10  
ト長調 BWV 796[7]

\* Discussion of Automatic Composition of Harmonic Counterpoint  
from Melody, Harmony Progression and Rhythm

<sup>†</sup>Yo Ohmori, Takeshi Hori, Shigeki Sagayama

<sup>‡</sup> Meiji University.

## 2. 対位法の確率モデルへの定式化

### 2.1 対位法の作曲における規則

対位法作曲では、与えられた旋律に対して多くの禁則と制約を含む厳密な規則[1,8,9]に従い対旋律を作る。本研究では以下の制約を考慮した。

- 順次進行はできるだけ頻繁に、かつできるだけ持続して使用すべきである
- 半音階的進行、増及び減度進行、8度を除く短6度を超える跳躍進行は禁止
- どの声部においても、同じ音を連続して二回聞かせてはならない
- 連続5度、及び8度の禁止
- バスと他声部間での増減度音程の禁止
- 非和声音(掛留音、経過音、刺繍音)は、すべて順次進行により和声内音に解決しなければならない
- 各声部の音域を守ること
- 反行はできるだけ頻繁に用い、並行はできる限り避けた方が良い
- 声部間の同度及び2度は濫用すべきではない
- 旋律の分散和音的動きは好ましくない

### 2.2 部分問題への分割、近似

本研究の最終的な目標は、フーガ等の旋律主題からの自由対位法の自動作曲問題である。これを部分問題へ分割して、本研究では、旋律・和声進行・リズム譜の三つの入力から目的となるバッハ風の華麗な旋律とリズムを含んだ対位法の自動作曲を行えるのではないかと仮定している。入力旋律のみから対旋律と和声進行列を同時確率最大化で求めることが最も理想的であるが、膨大な探索空間の問題となり解くことが現実的でないため、問題を分割する必要がある。作曲者によって作曲の手順や方法は異なるが、我々は分割にあたり対位法の作曲過程において必要な以下の四つの仮説を置いた。なお、今回は最小音価を四分音符と設定し、四分音符を $t = 1, 2, \dots, T$ と表す。

**仮説 1: 背後に存在する和声進行は定旋律音高から決定できる …(a)**

入力される定旋律音高列 $\mathbf{x}^c = \{x_1^c, x_2^c, \dots, x_T^c\}$ において、それぞれが単一の和音を提起するものとする。背後に存在する和声進行列は、 $\mathbf{H} = \{H_1, H_2, \dots, H_T\}$ と表す。

**仮説 2: 対旋律リズムは定旋律リズムから決定できる …(b)**

今回、定旋律は全て全音符であるとした。その場合、定旋律リズム $\mathbf{R}^c = \{R_1^c, R_2^c, \dots, R_T^c\}$ から $V$ 声部ある対旋律のリズム $\mathbf{R}^{1:V} = \{R_1^{1:V}, R_2^{1:V}, \dots, R_T^{1:V}\}$ を一意に決定することは難しい。しかし、最終的なゴールとなるフーガ等の旋律主題からの自由対位法の自動作曲問題においては、主題の旋律リズムの模倣などにより対旋律リズムが決定されるため説得力のある仮説となる。今回はリズム譜として与えた。

**仮説 3: 対旋律音高は、定旋律音高、背後に存在する和声進行、対旋律リズムに基づき生成される …(c)**

これは、本研究の要となるアプローチそのものであり、旋律・和声進行・リズム譜の三つの入力から対旋律音高 $\mathbf{x}^{1:V} = \{x_1^{1:V}, x_2^{1:V}, \dots, x_T^{1:V}\}$ が作曲できるのではないかという検討と同義である。

**仮説 4: 対旋律リズムと和声進行は独立である …(d)**

対旋律リズムに関しては、定旋律リズム及び定旋律音高の和声内音と刺繍音との関わりが考えられるが、和声進行とは独立と考えられる。

以上の仮説を用いて、旋律を入力とする(旋律音高列 $\mathbf{x}^c$ と旋律リズム列 $\mathbf{R}^c$ が既知である)対位法の自動作曲問題を部分問題として近似、分割すると以下のように表せる。

$$\begin{aligned} & p(\mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{x}^{1:V}, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) \\ &= p(\mathbf{x}^{1:V}, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) p(\mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) \\ &\propto p(\mathbf{x}^{1:V}, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) \\ &\approx p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) p(\mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) \dots (c \text{ による}) \\ &\approx p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) p(\mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) p(\mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) \\ &\propto p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) p(\mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) \\ &\approx p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) p(\mathbf{R}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) p(\mathbf{H} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c) \dots (d) \\ &\approx p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}) p(\mathbf{R}^{1:V} | \mathbf{R}^c) p(\mathbf{H} | \mathbf{x}^c) \dots (a, b) \end{aligned}$$

これにより対位法の自動作曲問題は、対旋律音高列を生成する問題、対旋律リズムを生成する問題、和声進行を推定する問題としてそれぞれ独立した部分問題の積として近似することができる。本研究では、後ろの2因子を既知として与え、第1因子目である $p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H})$ 、つまり旋律・和声進行・リズム譜の三つの条件付き確率最大化問題についてのみを考える。

### 2.3 和声的対位法の定式化

対位法においては、全ての対旋律が等価に扱われなければならないため、音高の組み合わせ(同時確率)で考える必要がある。対旋律リズムが与えられたときに対旋律音高を付加する問題は、時間を横軸、全声部の音の組み合わせ候補を縦軸とした二次元平面上の経路探索問題として捉えることができる。よって、対旋律を作曲することは、全声部の音高の組み合わせ候補間の遷移の経路を定めることとして捉えることができる。便宜上、対旋律の作曲条件列 $\mathbf{x}^c, \mathbf{R}^c, \mathbf{R}^{1:V}, \mathbf{H}$ をまとめて $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_T\}$ と置き換えると、

$$p(\mathbf{x}^{1:V} | \mathbf{C}) = \prod_{t=1}^T p(x_t^{1:V} | x_{t-1}^{1:V}, \dots, x_1^{1:V}, C_t, \dots, C_1) \dots (1)$$

となり、確率最大化を考えた場合、膨大な探索問題になってしまう。対位法は、隣接する二音符間の音高や音程の遷移についての規則が多いため、これを一次マルコフモデルで近似することを考える。

前述の対位法規則に従って作られた楽曲が多くあるとき、楽曲中の音高の現れ方には確率的な偏りが見られると

考えられる。この偏りは対旋律の組み合わせの生起確率として扱うことができる。対旋律の生起確率は、定旋律、対旋律リズム、和声進行、そして音高の組み合わせによって生まれる声部間の音程における規則等の音楽理論の条件の元での条件付き確率として表せる。

ある拍 $t$ における対旋律音高の組み合わせの生起確率は $p(x_t^{1:V} | C_t)$ である。

同様に、前述の対位法規則に従って作られた楽曲において、隣接する音高の遷移は確率的な偏りが見られると考え、前述のように対位法規則が隣接する二音符間の音高や音程の遷移についての規則が多いため、理論に従った局所的な音の遷移の確率的な偏りが現れる。よって、ある拍 $t$ における対旋律音高の組み合わせの遷移確率は $p(x_t^{1:V} | x_{t-1}^{1:V}, C_t, C_{t-1})$ であり、(1)式は以下のように一次マルコフモデルで近似することができる。

$$p(x^{1:V} | C) \propto p(x_1^{1:V} | C_1) \prod_{t=2}^T p(x_t^{1:V} | x_{t-1}^{1:V}, C_t, C_{t-1}) \quad \dots (2)$$

これらの生起確率及び遷移確率は、理論的には十分な対位法楽曲のサンプルがあれば統計的に与えることができるが、現実的には困難なため、音楽理論は人間が経験を体系化したものと考え、それらを反映するようにこれらの確率をヒューリスティックに定めた。

(2)式は、上述の二次元平面上的経路探索における遷移確率までを考慮した確率値最大問題として動的計画法を用いて解くことができる。

### 3. 自動作曲実験と楽曲評価

#### 3.1 実験条件

[8]の譜例を基に、定旋律・和声進行・対旋律リズム譜を入力とし(Fig. 2)、自動作曲を行った。

#### 3.2 実験結果

出力結果例を Fig. 3 に示す。

#### 3.3 生成楽曲の対位法理論による評価

連続5度、連続8度や増減音程等の禁則は見られなかった。

4小節目のテノールのような分散和音的な旋律は好ましくない。本来は、順次進行を基本とし、適宜跳躍進行が含まれるものが望ましいため、ヒューリスティックパラメータの調整によるものと考えられる。

5小節目テノールバス間と6、7小節目ソプラノとアルト間に見られるような同度及び二度の濫用は避ける。和音外音同士が2度で接する状況はあり得るが、いずれにしても、

Figure 2. 入力データ例

Figure 3. 出力結果例

多用されるべきではなく、確率としてはより低い扱いとすべきである。

4小節目から5小節目におけるアルトの掛留音が和声内音的に扱われたことについては、このモデルが対位法において作曲の段階から和声を決定していることによるもので、本来対位法は和声が複数の可能性を持ち旋律によって決まるが、和声進行が旋律の動向を阻害して起こったと考えられる。

3, 5, 6小節目のソプラノに見られるような、旋律の繰り返し、堂々巡りは避けるべきである。これは、一次マルコフモデルを用いることによって生じたと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、旋律・和声進行・リズム譜の三つの条件入力を与えることでバッハ風の華麗な旋律とリズムを含んだ対位法の自動作曲を行う手法を検討した。今後の課題は、分散和音的な旋律や同度二度の濫用などの、好ましくないとされる規則についてのパラメータの調整、旋律の反復の改善など音楽的問題の改善、分割した対旋律リズムを生成する問題と和声進行を推定する問題を扱うことによるさらなる自動化である。

**謝辞** 対位法に関してご教示くださった早稲田大学基幹理工学菅野由弘教授に深謝します。本研究の一部は科研費基盤 A(課題番号 17H00749)の支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] ギャロン/ピッチェ: 対位法, 音楽之友社, 東京, 1965.
- [2] 中瀧昌平, 西本卓也, 嵯峨山茂樹: “動的計画法と音列出現確率を用いた対位法の対旋律の自動生成,” 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), vol. 84 (2004-MUS-056), pp. 65-70, 2004.
- [3] 田中翼, 西本卓也, 小野順貴, 嵯峨山茂樹: “確率モデルを用いた対位法および模倣に基づく自動作曲,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, vol. 2, no. 8, pp. 13-18, 2010.
- [4] 伊藤響, 小澤玲子, 犬塚信博, 伊藤英則: “主旋律の特徴を生かした不干渉な対旋律の生成手法,” 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS) vol. 68 (1999-MUS-031), pp. 13-18, 1999.
- [5] 田村理遊, 池田剛, 小谷義行, 但馬康宏: “隠れマルコフモデルを用いた副旋律推定,” 情報処理学会研究報告, vol.19, pp.17-22, 2006.
- [6] 桐淵大貴, 深山寛, 齋藤大輔, 嵯峨山茂樹: “日本語歌詞からの多重唱の自動作曲,” 研究報告音楽情報科学(MUS), vol. 51, (2013-MUS-99), pp. 1-6, 2013
- [7] ピストン: 対位法, 音楽之友社, 東京, 2009.
- [8] 山口博史: パリ音楽院の方式による厳格対位法, 音楽之友社, 東京, 2012.
- [9] 池内友次郎: 二声対位法, 音楽之友社, 東京, 1965.