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*

田 中　 翼*1　西 本 卓 也*1　小 野 順 貴*1　嵯峨山茂樹*1

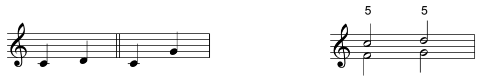
［要旨］　本稿では，独立した旋律を組み合わせて調和させる作曲技法である対位法および，主題を各旋律で反復して旋律同士を関係づける模倣の技法の，両技法に基づく作曲プロセスを，それぞれ拍を単位とした単純マルコフモデルの形で定式化する．そして，両確率モデルの積を最大化する音符列としての楽曲を動的計画法によって探索することで，自動作曲を実現するアルゴリズムを提案する．また，提案手法に基づく楽曲生成実験を行った結果を報告し，提案手法によって，拍の前後関係の中に包含できる対位法の要求と，主題の柔軟な変形を伴った模倣を実現した楽曲が生成できることを示す．

キーワード　対位法, 模倣, 自動作曲, 確率モデル, 動的計画法

1. はじめに

対位法は和声学とともに作編曲の主要原理であり，複数の独立した旋律を調和させる技法である．対位法による作曲では，多数の要求を同時に満たすような旋律を見つけ出す困難な作業を要し，習熟に長い時間がかかるとされる [1]．対位法の要求の例としては，旋律の進行の仕方を規定するものや，旋律間の音程進行を規定するもの (図 1) 等，多数の禁止事項や推奨事項からなる [1, 2]．また主題旋律を他の声部で反復する模倣の技法は，旋律同士を関連付け，楽曲に統一性をもたらし，カノン，フーガ等の対位法による格式高い形式の基礎として必須である．したがって，対位法と模倣の自動化の研究は，作編曲支援や楽曲提供に役立つと期待される．対位法に関連する主な既存研究は，与えられた主旋律に対して対旋律をつけて編曲を行う問題を対象としたものが多く，対位法のルールに基づくもの [3, 4] や，確率モデルに基づくもの [5, 6]，隠れマルコフモデルに基づくもの [7] 等がある．対位法に基づき，曲冒頭に与えられた主題への模倣を行いながら曲全体を作曲する問題については，既存楽曲の事例に基づくもの [8] があるが，まだ研究例は少数である．

そこで本稿では，主題の模倣に基づく対位法的な作曲の問題を扱う．また，対位法においては，旋律の数 (声部数) とリズムの組み合わせで様々な種類が存在し，各種類での要求事項も多少変わってくる．声部数は二声から八声程度の曲が多いが，対位法の基礎はあくまで各二声の関係性にある．そこで本稿では最もシンプルかつ基礎的な二声の場合を対象とする．またリズム



図–1　対位法の要求の例．左図は旋律進行に関する要求．順次進行 (左) は多用し，跳躍 (右) は時々用いるべきである．右図は音程進行に関する要求の例．5 度音程の連続（並行 5 度）は禁止される．

に関しては，リズムが固定された学習者向けの厳格対位法と，リズムが自由に変化する実践向けの自由対位法が存在するが，本稿では，実践的な曲を作ることを目的とし，自由対位法を対象とする．なお，次章以降，対位法というのは自由対位法のこととする．

2. 対位法および模倣への確率的アプローチ

自動作曲アルゴリズムの構築にあたって，作曲プロセスに関する以下の三つの仮定を置き，そこから出発して問題の定式化を行う．

仮定 1 対位法に熟練した作曲家が対位法に基づく曲を書く際には，対位法の知識や経験によって形成された，楽曲 W に関するある確率分布 $\mathrm{Pr}(W)$ に従っており，そこからの試行によって対位法による作曲を実現していると仮定する．

仮定 2 模倣に基づく楽曲の作曲時には，まず主題 T が与えられ，次に模倣の開始位置と，模倣をはじめる音高の指定による楽曲の構造 S を計画した後に作曲を行うものと仮定する．

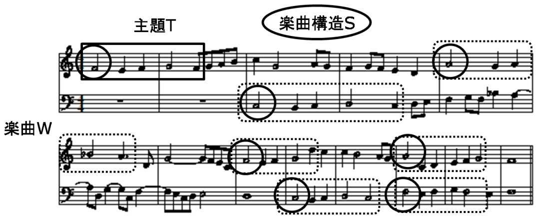
仮定 3 模倣の作曲に熟練した作曲家が模倣を行う際には，仮定 2 における主題 T と構造 S が与えられている状態で作曲を始め，楽曲 W に関するある確率分布 $\mathrm{Im}(W|T, S)$ に従う試行によって，柔軟な変形を伴う模倣を実現していると仮定する．

仮定 1 に関して，現実に存在する対位法的な楽曲は，対位法の確率分布に基づいて，確率の高いものが出力された結果だとみなすことができ，その確率分布は対位法の作曲モデルとして解釈できる．また確率の高い

---

* Automatic Music Composition Based on Counterpoint and Imitation using Stochastic Models,
by Tsubasa Tanaka, Takuya Nishimoto, Nobutaka Ono and Shigeki Sagayama.

*1 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo
（問合先：田中 翼　東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 6 号館 138 号室, Tel/Fax: 03-5841-6902，E-mail: tanaka@hil.t.u-tokyo.ac.jp）



図–2　対位法と模倣に基づく楽曲の例．黒丸は模倣の開始位置と音高を表し，点線が模倣を表す.

楽曲は，対位法の要求を満たす度合いが高いと考えられる．仮定 2 は実際の作曲において必ずしも踏まれる手順とは限らないが，フーガ等の形式において模倣の定型的な構造が存在することを考えれば，自然な仮定だと考えられる．調性音楽以後の時代の対位法においては，楽曲の構造に調性の計画も含まれるが，本稿では調性以前の時代の純粋な古典対位法 [1, 2] を範とするため，調性の計画は含めないこととする．仮定 3 に関して，模倣は基本的に冒頭の主題 T との同一性を志向するものだが，旋法上のシフトに伴う長短音程等の入れ替わりや，禁則を回避するための変形や，調性を反映する場合（調性以後の時代の場合）など，厳密な模倣の不都合を回避するためにある程度自由な変形が必要となる．模倣の確率分布は，そのような模倣の作曲モデルとして解釈できる．

以上の三つの仮定から，主題 T と構造 S による模倣に基づく対位法的な自動作曲の問題は，対位法と模倣の二つの別々の基準を共に満たす楽曲 (図 2)[2] を得る問題として，$\mathrm{Pr}(W)$（W は (T,S) と独立と考える）と $\mathrm{Im}(W|T,S)$ の積を最大化する問題とみなすことができる．そして，最適な楽曲 $\tilde{W}$ は次式で表される．

$$\tilde{W} = \operatorname*{argmax}_{W} \mathrm{Pr}(W)\mathrm{Im}(W|T,S) \tag{1}$$

これにより，柔軟性な模倣と，対位法の諸要求をバランスよく実現した楽曲の生成が期待される．しかし，$\mathrm{Pr}(W)$，$\mathrm{Im}(W|T,S)$ の値を得るために直接統計推定することは困難である．なぜなら，あらゆる楽曲 W の可能性の数よりも，現実に存在する楽曲の数は極めて少ないからである．そこで，$\mathrm{Pr}(W)$ と $\mathrm{Im}(W|T,S)$ の値を左右すると考えられる本質的な情報を抽出し，近似的に表現する確率モデルの定式化が必要となる．そこで次章では，二声の場合の対位法と模倣の両確率モデルの定式化を行う．

3. 対位法および模倣の確率モデルの定式化

3.1 対位法の確率モデルの定式化

$\mathrm{Pr}(W)$ の値と最適な W を計算するには，計算量の爆発や，統計を得る際のデータスパースネスの問題への対処を要するため，楽曲全体を単位とするのは現実的ではなく，より短い単位の存在確率と遷移確率で近似的に表現する必要がある．その際，単位の長さは短い方が一般に有利である．また、作曲や聴取においては，個々の音符以前に拍の推移が存在し，その上に個々の音符が書かれ，聴かれることを考えれば，拍を単位とすることは自然だと考えらるため，これを採用する．そこで $\mathrm{Pr}(W)$ の近似において，楽曲 W の一拍ごとの区間情報（リズムと音高系列の組）を $w_1, w_2, \cdots, w_N$ とすると，次式のように逐次的な展開ができる．

$$\mathrm{Pr}(W) = \prod_{i=2}^{N} \mathrm{Pr}(w_i|w_{i-1}, w_{i-2}, \cdots, w_1) \cdot \mathrm{Pr}(w_1) \tag{2}$$

他方，対位法の要求は，図 1 のように，音高や音程の推移の，楽曲上のある位置での直前から現在への推移の仕方を規制するものが多く，1 拍間の推移の前後関係の中に包含できるものが多い．そこで現拍の 1 拍前への関係以外の依存性は無視できると仮定し，次式のように単純マルコフモデルで近似できる．

$$\mathrm{Pr}(W) \simeq \prod_{i=2}^{N} \mathrm{Pr}(w_i|w_{i-1}) \cdot \mathrm{Pr}(w_1) \tag{3}$$

このような単純マルコフモデルは，第 4 章で述べるように，確率最大の解を効率的に求められる動的計画法が適用できるため，計算量の観点からも好ましいモデルだといえる．

しかし，確率 $\mathrm{Pr}(w_i|w_{i-1})$，$\mathrm{Pr}(w_1)$ は声部数の分だけパラメータ数が多いため，このままで統計的に設定することは難しい．そこで $\mathrm{Pr}(w_i|w_{i-1})$，$\mathrm{Pr}(w_1)$ を左右すると考えられる諸要素についての確率の積で近似的に表現する方策が考えられる．対位法の諸要求から，$\mathrm{Pr}(w_i|w_{i-1})$，$\mathrm{Pr}(w_1)$ を左右する要素としては，各声部の音高遷移とリズムの遷移，声部間の音程の遷移とリズムの共起が挙げられる．音高の遷移は単独の声部での旋律進行の良さに関係し，リズムの遷移は単独の声部でのリズム感や音価の長さの傾向に関係する．声部間の音程の遷移は，旋律間の協和性や不協和音の扱いに関係し，リズムの共起は旋律間の同時的な調和に関係する．そこで，$\mathrm{Pr}(w_i|w_{i-1})$，$\mathrm{Pr}(w_1)$ はそれらの要素ごとの確率の積で表すこと妥当と考えられ，(3) 式から $\mathrm{Pr}(W)$ は次式のように表すことができる．

$$\begin{aligned}\mathrm{Pr}(W) \simeq \prod_{i=2}^{N} \{&\mathrm{Pr}(p_i^1|p_{i-1}^1)\mathrm{Pr}(r_i^1|r_{i-1}^1) \\ &\cdot \mathrm{Pr}(p_i^2|p_{i-1}^2)\mathrm{Pr}(r_i^2|r_{i-1}^2) \\ &\cdot \mathrm{Pr}(a_{i,i-1})\mathrm{Pr}(r_i^1, r_i^2)\ \} \\ \cdot \mathrm{Pr}(p_1^1)\mathrm{Pr}(p_1^2)&\mathrm{Pr}(r_1^1)\mathrm{Pr}(r_1^2)\mathrm{Pr}(a_1)\mathrm{Pr}(r_1^1, r_1^2)\end{aligned} \tag{4}$$

ただし，j をパート名とし，$j = 1$ は上声を，$j = 2$ は下声を表す．また，i 拍目での各声部のリズム型, 音高系列の情報を r_i^j，p_i^j とし，$a_{i,i-1}$ を w_i と w_{i-1} の関係から発生する，w_{i-1} の最終音程から w_{i-1} の最終音程までの音程遷移 (例えば，長三度から完全四度への斜進行など，声部進行の情報も含める) の系列とし，a_1 を w_1 の内部での音程遷移の系列とする．

3.2 模倣の確率モデルの定式化

模倣の確率モデルを定式化するにあたり，まず各回の模倣 (全部で Q 回とする) について，出現の早い順に番号 $n(1 \leq n \leq Q)$ をつけて，T_n を次のように定義する．すなわち，T_n は T を，S によって定まっている n 回目の模倣の開始音から始まるようにシフトしたものとする（音高シフトは半音単位とする）．この T_n は n 回目の模倣の対象となる音符列であるため，これを模倣対象と名づける．また，W の部分としての，n 回目の模倣の領域の旋律全体を M_n と書き，模倣旋律と名づける．ここで T の長さ（したがって T_n，M_n の長さ）を L 拍として，T_n を細分化した，T_n の第 $l(1 \leq l \leq L)$ 拍目の情報 (リズムと音高系列の組) を t_l^n とする．また，M_n を拍単位で細分化した，M_n の第 l 拍目の情報を m_l^n とする．$\mathrm{Im}(W|T,S)$ は，模倣の領域において，楽曲 W の各 M_n が T_n に類似するほど確率が高いと考えられる．逆に，模倣に関係しない領域においては，どのような音符列であっても確率は一定であると考えられ，無視することができる．また，各回の模倣に関して独立性を仮定しても支障はないと考えられる．したがって $\mathrm{Im}(W|T,S)$ は次式のように各回の模倣の確率の積として表せる．

$$\mathrm{Im}(W|T,S) \simeq \prod_{n=1}^{Q} \mathrm{Im}(M_n|T_n) \tag{5}$$

ここで，対位法と模倣の両確率モデルの同時最適化を行うには，(5) 式の各回の模倣の確率 $\mathrm{Im}(M_n|T_n)$ も，対位法の確率モデルと同様に，拍間の単純マルコフモデルで表現できて，動的計画法 (第 4 章参照) が適用できることが望ましい．他方，$\mathrm{Im}(M_n|T_n)$ の値は，模倣対象 T_n と模倣旋律 M_n の類似性の度合いによって決まると考えられる．この類似性を左右する重要な要素としては 4 つのものが考えられる．後述するが，これらの要素は，拍間の推移確率 $\mathrm{Im}(m_l^n|m_{l-1}^n, t_l^n, t_{l-1}^n)$ の中に反映されていると考えることができる．このことから，$\mathrm{Im}(M_n|T_n)$ を (6) 式のように逐次的に展開すると，各確率は現拍の直前の拍との関係以外の依存性を無視しても支障はないと考えられ，(7) 式が得られる．

$$\begin{aligned}&\mathrm{Im}(M_n|T_n)\\ &= \prod_{l=2}^{L} \mathrm{Im}(m_l^n|m_{l-1}^n \cdots m_1^n, T_n) \cdot \mathrm{Im}(m_1^n|T_n) \quad (6)\\ &\simeq \prod_{l=2}^{L} \mathrm{Im}(m_l^n|m_{l-1}^n, t_l^n, t_{l-1}^n) \cdot \mathrm{Im}(m_1^n|t_1^n) \quad (7)\end{aligned}$$

こうして，模倣の確率モデルが単純マルコフモデルと等価となり，対位法の確率モデルと合わせて動的計画法が適用できるような形になる．

ここで先に述べた，模倣対象 T_n と模倣旋律 M_n の類似性の度合いを測る上での重要と考えられる要素を列挙すると，1. 旋律の進行方向（上下の跳躍と順次進行，同音での延長)，2. 相対的な音高遷移幅の近さ，3. 絶対的な音高の近さ，4. リズムの近さ，が挙げられる．旋律の進行方向の近さは，旋律の類似性を考える上で非常に重要であると考えられる．その上で，旋律の進行方向が同じであっても相対的な音高遷移の幅が近いほうが類似性が高いと考えられる．また，相対的な音高遷移の幅が同じであっても，絶対的に音高が近い方が類似性が高いと考えられる．また，リズムの類似性は主題の性格を決定する要素として非常に重要である．これら 4 つの要素がある程度近ければ，模倣が成立すると考えられる．

また，進行方向と，音高遷移の幅の違いは，直前から現在の音への遷移の比較から判断できる．絶対的な音高の違いは現在の音のみの比較で判断できる．リズムの違いは各時刻における発音の有無で比較できる．したがって，これら 4 つの要素は，直近の拍から現在の拍への遷移確率 $\mathrm{Im}(m_l^n|m_{l-1}^n, t_l^n, t_{l-1}^n)$ に反映されていると考えられる．

4. 動的計画法による確率最大解の探索法

本章では (1) 式の確率最大の楽曲 $\tilde{W}$ を求めるために使用する動的計画法のアルゴリズムについて解説する．一般に長さ N の系列を全探索すれば N の指数オーダーの計算量を要するが，動的計画法ではマルコフモデルの局所性を利用することで全探索せずに最適経路を N の多項式オーダーで効率的に求めることができる．

本稿での動的計画法の適用は以下のようになる．対位法と模倣の両確率モデル ((4) 式と (7) 式) の第 $i-1$ 拍目の情報 w_{i-1} から第 i 拍目の情報 w_i への遷移部分の確率の全ての積をとったものを $\mathrm{p}(w_i|w_{i-1})$ とし，$\mathrm{p}(w_i|w_{i-1})$ の最終拍までの累積確率の最大値を $P_{\max}$ とする．また，第 i 拍目で w_i に到達するまでの累積コストの最小値を $P(w_i)$ と表すと，単純マルコフ性によって $P(w_i)$ は次式のように再帰的に表せる．

$$P(w_i) = \max_{w_{i-1}} \{p(w_i|w_{i-1}) \cdot P(w_{i-1})\} \tag{8}$$

したがって，第 $i-1$ 拍目の全ての w_{i-1} について $P(w_{i-1})$ を計算して保存しておけば，(8) 式により第 i 拍目での $P(w_i)$ が逐次的に求められ，最終的に，各 $P(w_N)$ の最大値として $P_{\max}$ が得られる．$P_{\max}$ を実現する最適経路をは，各 w_i に直前からの最適経路を示すバックポインタ $b(w_i)$ を用意しておき，最終拍で $P_{\max}$ を実現する w_N から，第 1 拍目までを逆に辿っていく事で求められる．$b(w_i)$ は次式で表せる．

$$b(w_i) = \operatorname*{argmax}_{w_{i-1}} \{p(w_i|w_{i-1}) \cdot P(w_{i-1})\} \tag{9}$$

5. 楽曲生成実験

5.1 実 験 条 件

冒頭 2 小節下声に主題 T を作成して与え，第 2，8，

13 小節目上声に B 音から模倣が始まり，第 7，12 小節目下声に E 音から模倣が始まる構造 S を与え，楽曲生成実験を行った．対位法は古典対位法 [1, 2] を範とした．各種確率パラメータの設定は，対象とする楽曲の 1 拍内の音数が大きく設定するほど状態数が多くなり，必要な統計データをとることが困難になっていく．そのため一般的には，(4) 式や (7) 式をさらに近似するなどの対処が必要となってくる．そこで本実験では，次節以降で述べるように，容易に統計が採取できるようにさらなる近似を行った．また音楽的知識による確率パラメータの決定も行った．統計を採取する楽曲には，J.J.Fux 作曲 “Invention”を用いた．この曲は，模倣および，調性以前の時代の対位法に基づく楽曲の例として，対位法の教科書 [2] に例示されている曲である．最小音符単位は八分音符，最小休符単位は四分音符として，休符は主題提示の一声の部分以外では使用しなかった．終止形は予め固定した．探索には動的計画法を用いた．

5.2 音高遷移確率の設定

音高遷移確率 $\Pr(p_i^j|p_{i-1}^j)$ 音高遷移確率の設定は，直近の進行が重視される対位法の性質をふまえ，音高遷移のユニグラム確率（データスパースネスに対処するため，長三度進行等，相対的な変化音程のユニグラムで表す）を統計的に求め，p_{i-1}^j の最後の音から p_i^j のすべての音へ，音高に変化のあった回数だけ順次音高遷移のユニグラム確率の積をとることで近似を行った．ただし，この音高遷移の系列を $p_{i,i-1}^j$，その k 番目の音高遷移を $p_{i,i-1,k}^j$，$p_{i,i-1}^j$ の音高遷移の回数を $N(p_{i,i-1}^j)$ として，(10) 式のように，ユニグラム確率の相乗平均を取ることにより，拍内の音符数の多寡の影響を受けないように補正を行った．音高遷移が 0 回の時（二分音符以上の長い音符やタイなど）は，(拍間で音高変化がない回数/拍間で音高変化がある回数) として統計から定めた．この値を P_0 とする．

$$\Pr(p_i^j|p_{i-1}^j) \simeq \begin{cases} \displaystyle\prod_{k=1}^{N(P_{i,i-1}^j)} \Pr(p_{i,i-1,k}^j)^{\frac{1}{N(P_{i,i-1}^j)}} & \text{if } N(p_{i,i-1}^j) \neq 0 \\ P_0 & \text{if } N(p_{i,i-1}^j) = 0 \end{cases} \tag{10}$$

$\Pr(p_1^j)$ に関しては拍内で同様の考え方で近似した．なお，音高遷移のユニグラム確率の統計を採取する際には，上行と下行および長短で度数が同じ場合は同一視し，また音程が増 8 度以上の複音程になる場合はそれを完全 8 度以下の単音程と見なした（例えば短 10 度は短 3 度）．統計用の楽曲には 6 度の音高遷移が偶然出現していないため，5 度と同じ頻度として扱った．何度も登場する模倣部分の音高遷移については 1 回のみカウントした．また，(10) 式で反映できない対位法の要求については確率を低く設定した．表 1 に音高遷移のユニグラム確率の設定値を示す．

表–1 音高遷移のユニグラム確率

音高遷移度数	$\Pr(p_{i,i-1,k}^j)$	音高遷移度数	$\Pr(p_{i,i-1,k}^j)$
1 度	0.000	5 度	0.014
2 度	0.824	6 度	0.014
3 度	0.095	7 度	0.000
4 度	0.054	8 度	0.000

5.3 音程遷移確率の設定

音程遷移確率 $\Pr(a_{i,i-1})$ 設定においては，パラメータ数が多いため，音程度数の遷移と声部進行（並行，反行，斜行）が独立であると仮定して，音程度数遷移確率 $\Pr(b_{i,i-1})$ と声部進行確率 $\Pr(c_{i,i-1})$ の積で近似した (11) 式．ここで $b_{i,i-1}$ と $c_{i,i-1}$ はそれぞれ $a_{i,i-1}$ の音程度数，声部進行を別々にとった系列である．

$$\Pr(a_{i,i-1}) \simeq \Pr(b_{i,i-1})\Pr(c_{i,i-1}) \tag{11}$$

さらに音高遷移確率と同様の近似と，遷移回数の違いの補正を行った．すなわち，系列 $b_{i,i-1}$ の k 番目の音程度数を $b_{i,i-1,k}$，$b_{i,i-1}$ の音程度数の遷移回数を $N(b_{i,i-1})$ として，(12) 式のように近似を行った．音程度数遷移が 0 回の時は (拍間の音程変化がない回数/拍間の音程変化がある回数) として統計的に定めた．この値を B_0 とする．

$$\Pr(b_{i,i-1}) \simeq \begin{cases} \displaystyle\prod_{k=2}^{N(b_{i,i-1})} \Pr(b_{i,i-1,k}|b_{i,i-1,k-1})^{\frac{1}{N(b_{i,i-1})}} & \text{if } N(b_{i,i-1}) \neq 0 \\ B_0 & \text{if } N(b_{i,i-1}) = 0 \end{cases} \tag{12}$$

声部進行に関しては，系列 $c_{i,i-1}$ の k 番目の進行を $c_{i,i-1,k}$，$c_{i,i-1}$ の進行の回数を $N(c_{i,i-1})$ として，音程度数の遷移確率と同様に (13) 式のような近似と遷移回数の補正を行った．声部進行が 0 回の時は (拍間の進行がない回数/拍間の進行がある回数) として統計的に定めた．この値を C_0 とする．

$$\Pr(c_{i,i-1}) \simeq \begin{cases} \displaystyle\prod_{k=1}^{N(c_{i,i-1})} \Pr(c_{i,i-1,k})^{\frac{1}{N(c_{i,i-1})}} & \text{if } N(c_{i,i-1}) \neq 0 \\ C_0 & \text{if } N(c_{i,i-1}) = 0 \end{cases} \tag{13}$$

$\Pr(a_1)$ に関しては拍内で同様の考え方で近似した．音程度数遷移のパラメータ数は多いため，完全協和音程，不完全協和音程，不協和音程をそれぞれ同一視して $3 \times 3 = 9$ のカテゴリーで統計を採取した．また，(12) 式で反映できない対位法の禁則に関しては確率を低く設定した．表 2 に音程度数遷移のバイグラム確率を, 表 3 に声部進行のユニグラム確率の設定値を示す.

5.4 リズム共起確率の設定

対位法においては，拍頭でいずれかの声部が発音することで継続的にリズムを刻むリズム感が働く傾向がある．そこで r_i^1 または r_i^2 のいずれかの声部の拍頭に

表–2　音程度数遷移のバイグラム確率

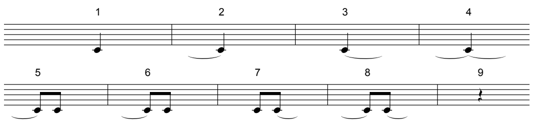
遷移前＼遷移先	完全協和音程	不完全協和音程	不協和音程
完全協和音程	0.10	0.40	0.50
不完全協和音程	0.36	0.36	0.27
不協和音程	0.09	0.91	0.00

表–3　声部進行のユニグラム確率

声部進行	$\mathrm{Pr}(c_{i,i-1,k})$
順進行	0.121
反進行	0.212
斜進行	0.667

表–4　P_0,B_0,C_0 の値

P_0	0.342
B_0	0.050
C_0	0.050



図–3　実験条件のもとで出現しうるリズムパターン

表–5　リズム遷移確率

（リズム番号）遷移前＼遷移先	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.441	—	0.382	—	0.176	—	—	—	—
2	0.591	—	0.182	—	0.091	—	—	—	0.136
3	—	0.767	—	0.033	—	0.200	—	—	—
4	—	0.500	—	0.500	—	—	—	—	—
5	0.267	—	0.267	—	0.467	—	—	—	—
6	—	—	1.000	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	0.500	—	0.500	—	—	—	—	—	—

発音がある場合にはリズム共存確率 $\mathrm{Pr}(r_i^1, r_i^2)$ は高いと考えられる．そこでそのような音楽的知識から推論し, 次式のように確率を設定した．

$$\mathrm{Pr}(r_i^1, r_i^2) \simeq \begin{cases} 0.9 & \text{if} \quad r_i^1 \text{ または } r_i^2 \text{ のいずれかの拍頭で発音される} \\ 0.1 & \text{if} \quad r_i^1 \text{ または } r_i^2 \text{ の拍頭でいずれも発音されない} \end{cases} \quad (14)$$

なお，実験条件のもとで出現しうるリズムパターンを図 3 に示す．

5.5 リズム遷移確率の設定

リズム遷移確率 $\mathrm{Pr}(r_i^j | r_{i-1}^j)$ は上記楽曲からの統計により定めた．出現するリズムは図 3 の九通りであり，その間のリズム遷移確率は表 5 に記す．$\mathrm{Pr}(r_1^j)$ に関しては，前方にタイのあるリズムは確率 0 とし，それ以外はいずれも等確率とした．

5.6 模倣に関する確率の設定

(7) 式の模倣に関する拍間の遷移確率 $\mathrm{Im}(m_l^n | m_{l-1}^n, t_l^n, t_{l-1}^n)$ の値の設定にあたっては，主題によって確率が異なるため，パラメータ数が多く，統計的な設定は困難である．しかし他方で，模倣は主題との同一性を志向するという知識を用いれば，(m_l^n, m_{l-1}^n) と (t_l^n, t_{l-1}^n) との差異が小さい程確率 $\mathrm{Im}(m_l^n | m_{l-1}^n, t_l^n, t_{l-1}^n)$ は大きくなると考えられる．したがって，そのような推論から確率を設定することができる．

そこで主題と模倣との差異の大きさを測るため，第 3 章で述べた 4 つの要素（音高の進行方向，音高遷移の幅，絶対的な音高，リズム）について m_l^n, m_{l-1}^n と t_l^n, t_{l-1}^n とを最小音符長である八分音符の長さにスライスして比較し，次の 4 つの差異 $\Delta_{l,n}^k (k = 1, 2, 3, 4)$ を定義した．すなわち，音高の進行方向の差異 $\Delta_{l,n}^1$ を m_{l-1}^n の最終スライスから m_l^n にかけての各スライス間での音高遷移方向の差の絶対値の合計で定め（ただし音高の遷移方向については，上下の跳躍，順次進行を ± 3，± 2 とし，同音での延長を 0 とした），音高遷移幅の差異 $\Delta_{l,n}^2$ を m_{l-1}^n の最終スライスから m_l^n にかけての各スライス間での音高遷移幅 (半音単位) の差の絶対値の合計で定め，絶対的な音高の差異 $\Delta_{l,n}^3$ を m_l^n と t_l^n の各スライスでの音高差 (半音単位) の絶対値の合計で定め，リズムの差異 $\Delta_{l,n}^4$ を m_l^n と t_l^n との各スライスでの発音の異なる位置の合計数で定めた．ただし，音高と音程の変化が休符で遮られる場合は計算に含めず，リズムの差異 $\Delta_{l,n}^4$ の部分で反映する．これら 4 つの差異に予備的検討で得た適切な重み $\lambda_k (k = 1, 2, 3, 4)$ をかけて用い，(15) 式で近似した．λ_1〜λ_4 の値はそれぞれ $12.0, 5.5, 0.5, 40.0$ とした．

$$\mathrm{Im}(m_l^n | m_{l-1}^n, t_l^n, t_{l-1}^n) \simeq \exp(-\prod_{k=1}^{4} \lambda_k \, \Delta_{l,n}^k) \quad (15)$$

$\mathrm{Im}(m_1^n | t_1^n)$ については現拍内部で同様に近似した．

5.7 実験結果と考察

図 4 に生成した楽曲例を示す．図例から，対位法の規則をかなりの程度満たす楽曲が生成可能であることが確認できた．例えば，対位法の基本的な禁則である並行，並達 5・8 度等，拍の前後関係に包含できる対位法の要求については良く満たした楽曲が生成できており，また 5 小節目，6 小節目，15 小節目に対位法にとって重要な掛留が出現し，そこでの不協和音が適切に解決されていること，両旋律のリズムや声部間の進行方向の面で独立性が保たれている等，対位法らしい楽曲が生成できていることがわかる．

また，模倣に関しても適切に処理できていることがわかる．特に 13 小節目からの模倣部分は両声で重なっているため，もし厳格な模倣を行ったとすれば対位法に対する違反が起こり，曲として成立しなくなる個所であるが，模倣の確率モデルが有効に働くことで，柔軟な模倣が実現し，禁則をうまく避けながら自然な楽曲が実現できている．

ただし，問題点も存在する．3 小節目に 2 拍目から 4 拍目にかけて 8 度音程が 1 拍飛んで連続している．このケースはアクセント 8 度と呼ばれる禁則である．これは 3 拍にまたがっているために, 拍単位の単純マルコフモデルでは表せないケースである．解決策としては,

図–4　生成結果の例 (主題は冒頭二小節下声)

図–5　J.S.Bach のフーガ冒頭 (上), 同主題による生成結果 (下)

動的計画法と同様の設定で N 番目に確率の高い解をもとめることのできる N-best 探索を用いることで，上位の解の中から，2 拍を超える長さにわたって出現する対位法の要求を満たす解を探索することが考えられる．

5.8　J.S.Bach の主題による生成

前節までの実験では著者が作成した主題を用いたが，提案手法に適合した恣意的な主題を用いたのでないことを例証するために、既存の対位法楽曲の主題により楽曲の生成を行った．その結果を図 5 に示す．主題には，対位法の大家である J.S.Bach の「平均律クラヴィーア曲集第一巻」より，第三番のフーガの主題を用いた．この例でも，対位法を満たす楽曲が生成でき，模倣も適切に実現できている．ただしこの主題には，古典対位法の禁則である 7 度の跳躍が出現する．そのため，7 度の音高遷移確率を 0 ではなく 0.001 としてスムージングを行った．この曲のように，禁則に対する違反が逆に効果的に用いられる場合もあるため，禁則が出現する余地もわずかに残すことが有効となる場合がある．

6.　ま　と　め

対位法および模倣を表す二つの確率モデルを統合した定式化を行い，動的計画法による探索によって自動作曲を実現する手法を提案した．また提案手法に基づく楽曲生成実験を行い，拍の前後関係の中に包含できる対位法の要求と，柔軟性のある模倣を実現した楽曲が生成可能であることを示した．また，モデルの単純マルコフ性故に，拍の前後関係を超えた長いスパンでの対位法の要求への違反が出現する場合があることも判明した．

今後の課題としては，A. 拍単位の単純マルコフモデルで対処しきれない対位法の要求への対応，B. 大規模な統計学習による確率パラメータの設定，C. 三声以上の場合へのモデルの拡張，D. より細かい音価を持ったリズムの使用，E. 調性の導入，F. 作曲家や楽器の固有の特長を反映したモデル化, 等が挙げられる．A については N-best 探索によって，高確率の順に，要求を満たす解を探していくことで対処できる可能性がある．B については，大規模な統計学習で，より近似が少なく正確な確率パラメータを得て，より妥当性の高い楽曲が生成できる可能性がある．また学習対象曲の選択を変えることで，傾向の異なる多様な楽曲が生成できる可能性がある．C については，二声のモデルを応用しつつ，より多数の声部が関係するような項を付け加えるモデル化によって，実現できる可能性がある．D については，細かい音価のリズムを扱うと，状態数の増大や，曲全体の統一性が崩れる問題が出現する恐れがある．そこで，自動作曲時に，使用したいリズムパターンを選択し，制限することで，状態数を削減し，統一性を与えられる可能性がある．E については，調性以後の時代の対位法を扱うために，構造 S に調性の計画も含める必要がある．F については，音楽的知識やデータマイニングの手法等によって，作曲家や楽器に固有の特長量を導入することで実現できる可能性がある．

謝辞：本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (A)(課題番号 00303321) および科学技術振興機構 CREST の支援を受けて行われた．

文　　献

[1]　J. J. Fux: *Gradus ad Parnassum*, 1725. (坂本良隆訳: 古典対位法, 音楽之友社, 1950.)

[2]　長谷川良夫: 対位法, 音楽之友社, 1955.

[3]　William Schottstaedt: “Automatic Counterpoint,” in Max V. Mathews and John R. Pierce, editors, *Current Directions in Computer Music Reseatrch*, The MIT Press, 1989.

[4]　吉川響, 中井満, 下平博, 嵯峨山茂樹: “動的計画法を用いた音楽の対旋律の自動生成,” 平成 12 年電気関係学会北陸支部大会講演論文集, F-82, pp. 383, 2000.

[5]　M. Farbood and B. Schoner: “Analysis and synthesis of Palestrina-style counterpoint using Markov chains,” *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pp. 471-474, 2001.

[6]　中潟昌平: “動的計画法に基づく自動対位法の研究,” 修士論文, 東京大学情報理工学系研究科, 2005.

[7]　田村理遊, 但馬康宏, 小谷善行: “音高と音価の隠れマルコフモデルを用いた自動副旋律生成,” 情報処理学会研究報告, 2007-MUS-69, pp. 7-12, 2007.

[8]　David Cope: *Virtual music: computer synthesis of musical style*, The MIT Press. 2000.

[9]　鍋島一郎: 動的計画法, 森北出版, 2005.

[10]　Richard Bellman: *Dynamic Programming*, Dover Publications,Inc., 2003.