DP 法に基づく対位法における複数の対旋律候補の自動生成*

◎中潟昌平　西本卓也　嵯峨山茂樹　（東大・情報理工)

1　はじめに

本報告では，与えられた定旋律に適合する対旋律を，対位法 [1, 2, 3] により自動生成するアルゴリズムを検討する．対位法は和声学とともに作編曲の主要原理であり，その数理定式化は自動編曲ソフトや，対位法修得支援等に有用と考えられる．

対位法は，用いられる旋律数や旋律間の音数の関係によって二声，三声，一対一，一対二の対位法等に分類されて論じられる．我々は，二声の一対一対位法における対旋律の自動生成を DP(Dynamic Programming, 動的計画法) により定式化した [5]．本稿では，一対一対位法において，DP 法に N-best アルゴリズム [6] を併用する事で対位法の規則により適した対旋律が得られる事を示す．また，一対二対位法の対旋律を DP 法を用いて生成する試みを行う．

2　一対一対位法の対旋律生成

2.1　一対一対位法の数理的定式化

対位法の対旋律生成は，基本的に音の並びのあらゆる組合せから適切なものを決定する組合せ問題として捉えることができる．まず，最も基本になるのは二声の一対一対位法で，定旋律一音に対旋律一音を割り当てるものである．これに関する規則 (おもに [2] に準拠) を順次数理的定式化する．

規則 1 使用音程は不完全協和音 (長短 3，6 度) と完全協和音 (完全 5 度) のみ．ただし，不完全協和音を多く用いるようにする．

この規則は，音程に対してコスト関数を定義することにより扱える．

規則 2 同一の完全協和音を続けて用いてはならない．
規則 3 完全協和音を用いる際，必ずその前の二旋律は反進行しなければならない．
規則 4 旋律の音高が留まる事は少ない．

これらの規則では，対旋律の各音は対応する定旋律の音と直前の二旋律の音により決定され，現在と直前の音以外には全く影響を受けないという共通の性質がある．

規則 1〜4 を数理的に扱うために，隣接音の間に規則を反映したコストを導入する．具体的には，対旋律の二音間で規則の適合性が高い程，コストを小さくする．したがって，対旋律決定問題を最初の音から最後の音までの累積コスト最小の経路を探索する問題として考える場合，得られた対旋律では隣接音間の局所コストも最小となり (図 1)，DP の問題に帰着できる．

2.2　DP による対旋律生成

DP 法に基づいてコスト最小の対旋律を求めるアルゴリズムは次の通りである．

k 音からなる対旋律の i 番目の音 n_i と $i+1$ 番目の音 n_{i+1} の局所コストを $c(n_i, n_{i+1})$ とする．最初の音 n_1 と最後の音 n_k を固定する時，累積コストの最小値 $C_{\min}$ は次式で表せる．

$$C_{\min} = \min_{n_2,\cdots,n_{k-1}} \left\{ \sum_{i=1}^{k-1} c(n_i, n_{i+1}) \right\}$$

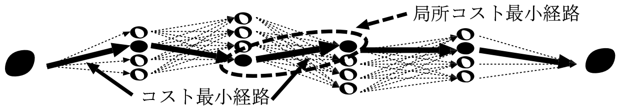

図 1: 最適性の原理

$$= \min_{n_{k-1}} \left[c(n_{k-1}, n_k) + \min_{n_2,\cdots,n_{k-2}} \left\{ \sum_{i=1}^{k-1} c(n_i, n_{i+1}) \right\} \right] \quad (1)$$

式 (1) は，$C_{\min}$ が一つ前の音 n_{k-1} までの累積最小コストと，n_{k-1}，n_k の局所コストを独立に求められる事を意味しており，途中の音 n_i にも同様の事が言える．したがって，n_i までの累積最小コスト $C(n_i)$ は次式のように再帰的に表せる．

$$C(n_i) = \min_{n_{i-1}} \{ c(n_{i-1}, n_i) + C(n_{i-1}) \} \quad (2)$$

$C(n_1) = 0$ とすれば，$C(n_i)$ は式 (2) により逐次的に求められ，最終的に $C_{\min}$ が得られる．累積コストが最小となる対旋律は，各 n_i に一つ前からの最適経路を示すバックポインタ $b(n_i)$ を用意して，$C(n_i)$ を求めた後に n_k から n_1 までを逆に辿る事で求められる．$b(n_i)$ は次のように表せる．

$$b(n_i) = \operatorname*{argmin}_{n_{i-1}} \{ c(n_{i-1}, n_i) + C(n_{i-1}) \} \quad (3)$$

2.3　N-best アルゴリズムによる規則拡張

一対一対位法には以下のような規則もある．

規則 5 同一の不完全協和音は四回以上続かない．
規則 6 旋律が何回も同じ方向に動いてはならない．

規則 5 を満たすには，各音は三つ前までの対旋律に影響を受け，規則 6 を適用するにはさらに前の音にも依存するため，直前の音のみでは決定できないので，DP 法の枠組みだけでは扱えない．そこで，N-best アルゴリズムを用いて，コスト最小の経路に加えて上位複数の経路を求め，それらのうち規則 5，6 に適合しないものを除外することにする．

2.4　実験

2.1 節で述べた一対一対位法の性質に基づき，与えられた定旋律から対旋律を生成する実験を行った．対旋律生成にあたって，対旋律の最初と最後の音は定旋律と完全 8 度になるように設定し，規則 1〜4 を反映するように隣接二音間のコストを定め，DP 法に N-best アルゴリズムを併用して，複数の旋律候補を得た．さらに，それらから規則 5 に反するものを除外して，最終的な旋律候補を選択した．規則 6 については，これに類する規則が多く煩雑で統一的でないため，今回は適用しなかった．

図 2 に実験結果の一例を示す．同図において，下側四つの楽譜に記された旋律が生成された対旋律を表す．対旋律の各音に割り当てられた数字は定旋律との音程を表し，完全協和音の場合は〇印をつけている．また，各旋律に対応する左側の数字は，順に対旋律候補の順位，N-best アルゴリズムで得られた順位を意味する．この例で，対旋律の第 1 候補の N-best 順位が第 4 位となっているのは，N-best アルゴリズムで求められた第 1 位から第 3 位までの旋律が規則 5 を満たさなかったためである．

生成された対旋律は全て規則 1〜5 を満たし，また上位のものほど緩やかな音高変化が多く安定している傾向にあった．但し，大きな跳躍進行がほどんどなく退屈な旋律になってしまうという問題も見られた．

*“Automatic Generation of Multiple Candidates of Counterpoint Based on Dynamic Programming” by Shōhei Nakagata,Takuya Nishimoto and Shigeki Sagayama (Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo).

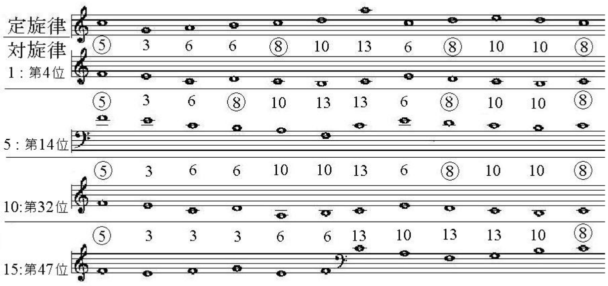

図 2: 一対一対位法での対旋律探索結果例

3 一対二対位法の対旋律生成

3.1 DP アルゴリズムへの帰着

定旋律一音に対旋律二音を対応させる対位法を一対二対位法という．二音の対旋律は，定旋律と同時に発音される強拍と一拍遅れる弱拍とに分けられ，各々性質が異なる．また，一対一対位法で禁止されている不協和音の使用が許される．不協和音は，協和音に属さない音程で，2，4，7 度音程等がある．音程に関する規則は教科書により若干異なるが，例えば次のようである．

規則 7 完全協和音は強拍に用いてはならず，弱拍にのみ使用してよい．[2]

規則 8 不協和音は強拍，弱拍いずれに用いてもよいが，必ず協和音に適切に解決しなければならない．したがって，不協和音の連続使用等は許されない．[1, 2, 3]

規則 9 弱拍に同一の完全協和音を連続して用いてはならない．[2]

規則 7，8 は対旋律の音が直前の音のみに依存して決まり，規則 1〜4 と同じ性質を持つ．しかし，規則 9 は弱拍同士の関係を表しており，弱拍の音は二つ前の音にも影響を受けるため，2 節で設定した問題での DP 法に反映できない．

そこで，2 節の探索空間で一音に対応していた状態を，図 3 のように強拍と弱拍の二音一状態に拡張する．この条件下では，規則 9 は直前の状態のみに依存する性質を満たし，DP 法に反映できる．また，一オクターブ以上の極端な跳躍や不協和音の連続等，規則に適合しない状態を予め除外して枝刈りを行う事で，一音一状態の場合よりも効率良く探索できる．

3.2 コスト決定法

二音一状態の探索空間において，規則 7〜9 を反映したコストを設定する．その際，各状態自体の出現コストと状態間の遷移コストの二つを導入する．前者は，強弱二音間の音高変化と音程関係に依存し，跳躍が大きい状態程大きくする等と設定する．後者は隣接状態のつながりの良さに関係し，弱拍と強拍で規則 8 を満たせば小さくし，状態間で規則 9 に違反すれば大きくする等の設定を行う．

これら二種類のコストの和を隣接状態間の局所的コストとし，対旋律生成コストは局所的コストの和で表されるものとする．

3.3 実験

以上の設定の下で，一対一対位法と同様の手順で対旋律を生成する実験を行った．図 4 に実験結果の一例を示す．図中の数字等の意味は図 2 に同じで，△印の音程は不協和音を表す．

二旋律の音程に関して，3，6 度の不完全協和音が最も多く現れた．また，完全協和音や不協和音も生成され，それらが全て規則 7〜9 を満たしている事が確認された．図 4 でタイで繋がれた不協和音は繋留音と呼ばれ，今回主に参考にした [2] では繋留音の上行解決が許されているが，古典対位法ではまれであり，また，対旋律の四度の不自然な跳躍等の問題も見られるなど，常識的な対位法の解とはまだ隔たりがあり，もっと現実的に規則を精緻化するなどが必要と思われる．今後は，制約条件をさらに精密にしてこの枠組の可能性を追求したい．

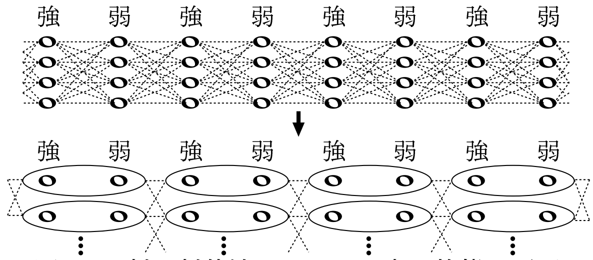

図 3: 一対二対位法における二音一状態の原理

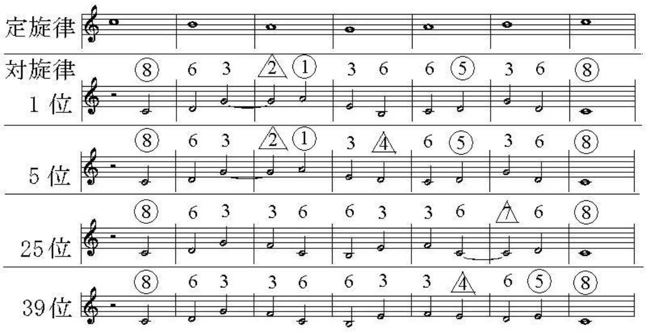

図 4: 一対二対位法での対旋律探索結果例

4 まとめと今後の課題

本報告では，対位法を数理的問題として扱う第一歩として，DP 法に N-best アルゴリズムを併用して一対一対位法の対旋律を得る手法を試み，実験を行った．また，一対二対位法に関して，二音一状態の探索空間に DP 法を適用する事で，音程の規則に合う対旋律が得られる可能性を示した．

今後は，多声自由対位法に向けて，今回一対二対位法で用いた二音一状態の概念を複数音一状態に拡張し，一般に m 声対位法が m 次元 DP アルゴリズムにより扱えるかを詳細に検討したい．また，より尤もらしい対旋律を生成するためにコストを学習によって決定する手法，対旋律自体の良さの評価関数，模倣旋律の生成の定式化，DP 法では扱えない問題への対処などを検討したい．さらに，応用として，自動和声付けにおける低音の決定に対位法を活用することも考えたい．

参考文献

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

[2] 下総皖一: 対位法, 音楽之友社, 東京, 1951.

[3] 長谷川良夫: 対位法, 音楽之友社, 東京，1955.

[4] 川上隆: “隠れマルコフモデル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情報科学系研究科情報処理学専攻, 修士論文, 2000.

[5] 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.

[6] Frank K. Soong, Eng-Fong Huang: A Tree-Trellis Based Fast Search for Finding the N-Best Sentence Hypotheses in Continuous Speech Recognition, Proc. ICASSP 91, Vol. 1, pp. 705-708, 1991.