

# ベイジアンネットワークを用いた四声体和声付け

鈴木 峻平<sup>1,a)</sup> 竹内 俊雄<sup>2,b)</sup> 佐藤 挂亮<sup>2,c)</sup> 北原 鉄朗<sup>2,d)</sup>

**概要:** 本研究では、ベイジアンネットワークを用いて与えられたソプラノから四声体和声の和声付けを行うシステムを開発した。四声体和声の和声付けの重要な課題の一つに、音楽的同時性と音楽的連続性の両立があげられる。音楽的同時性とは、声部間の縦の繋がりであり、不協和音を出さないようにすることである。音楽的連続性とは、声部内の横の繋がりであり、自然な音の流れにすることである。本論文ではこの課題をベイジアンネットワークを用いて解決する。我々は、ベイジアンネットワークモデルをコードノードを用いたモデルと用いないモデルの2種類作成し実験を行った。結果から、コードノードの有無の違いが明らかになった。

**キーワード:** 四声体和声, 和声付け, ベイジアンネットワーク

## Four-part Harmonization Using A Bayesian Network

SYUNPEI SUZUKI<sup>1,a)</sup> TOSHIO TAKEUCHI<sup>2,b)</sup> KEISUKE SATO<sup>2,c)</sup> TETSURO KITAHARA<sup>2,d)</sup>

**Abstract:** We developed a system that, given a soprano voice, generated the remaining voices of a four-part harmony using a Bayesian network. The important issue in four-part harmonization is to select notes that satisfy both simultaneity and sequentiality at once, where simultaneity means appropriate (e.g., non-dissonant) combinations of simultaneously played notes, and sequentiality means the smoothness of the lines of notes within each voice. In this paper, we resolve this issue using a Bayesian network. We describe the simultaneity and sequentiality as probabilistic dependencies between nodes and design two Bayesian network models: one includes chord name nodes and the other does not include chord name nodes. The results of the experiments on four-part harmonization show the differences of the generated harmonies between the Bayesian network models with and without the chord name nodes.

**Keywords:** Four-part hamony, Harmonization, Bayesian network

### 1. はじめに

計算機による和声付けは自動編曲の分野において一つの重要な課題である。一般的に、計算機による和声付けは2つのタイプに分けられる。一つは、与えられたメロディーに対してC-F-G7-Cのようなコード付けを行うものであ

る[1], [2], [3]。もう一つは、メロディー以外の声部に音を付与するものである。その中でソプラノ、アルト、テノール、バスから成る四声体和声は西洋音楽において代表的なものの一つである。今まで様々な手法で四声体和声の研究が行われてきた。EbcioğluはJ.S.Bachのコラールの和声付けを行うエキスパートシステムを開発した[4]。Hildはいくつかのニューラルネットワークを用いてJ.S.Bachのコラールの和声付けシステムを開発した[5]。Intyreは与えられた旋律から遺伝的アルゴリズムを用いた四声体和声の生成を試みた[6]。PachetとRoyは制約充足問題として四声体和声声を定式化した[7]。Phon-AmnuaisukとWigginsはルールベースとGAベースの2つの観点から四声体和声付

<sup>1</sup> 日本大学院総合基礎科学研究科  
Graduate School of Integrated Basic Sciences, Nihon University

<sup>2</sup> 日本大学文理学部  
College of Humanities and Sciences, Nihon University

a) syunpei@kthrlab.jp

b) toshio@kthrlab.jp

c) sato@kthrlab.jp

d) kitahara@chs.nihon-u.ac.jp

けの結果を比較した [8]。Allan と Williams は HMM による四声体和声付けの手法を提案した [9]。

四声体和声付けにおいて重要な問題は同時性と連続性が同時に考慮された音を選ぶことである。同時性とは声部間の縦軸関係であり不協和な和音を避けること、連続性においては声部内の横軸関係であり、自然なメロディラインにすることである。

本論文では、この問題を解決するためにベイジアンネットワークを使用する。ベイジアンネットワークは複雑な依存関係を表すことのできるグラフの一種であり、様々な事象を同時に考慮することが可能である。その為、同時性と連続性を同時に考慮することが可能なベイジアンネットワークが適切であると考えられる。しかし、複雑な依存関係を表すベイジアンネットワークには計算機の負荷や膨大な量のデータを収集しなければならないなどの問題がある。よって、本研究ではできるだけ単純なベイジアンネットワークのモデルを用いて研究を行う。その中で、コードノードを用いたモデルと用いないモデルの 2 種類のモデルで研究を行う。

## 2. 課題と方針

本章では、ベイジアンネットワークを用いた四声体和声付けの手法について説明する。

### 2.1 課題

本システムはユーザがソプラノ声部の旋律を MIDI 形式で入力すると、四声体和声における残りの声部（アルト、テノール、バス）の旋律を生成し、MIDI 形式で出力する。通常のソプラノ課題と同様に、旋律のリズムは各声部で共通とする。すなわち、各声部の音符数および各音符における発音時刻・消音時刻はすべて等しいものとする。また、調は既知（現在の実装では八長調を前提）とし、簡単のため、ダイアトニックスケールの音のみを用いることとする。

### 2.2 処理の概要

ユーザがソプラノ声部の旋律を MIDI ファイルとして入力する。ソプラノ声部の音高（ノートナンバー）を  $S_1, S_2, \dots, S_N$  で表すこととする。すると、システムは残りの声部の旋律を時系列順に沿って決定する。アルト、テノール、バスの各声部における  $i$  番目の音高をそれぞれ  $A_i, T_i, B_i$  とすると、システムは、まず与えられた  $S_1$  を元に  $A_1, T_1, B_1$  を決定する。その後、決定済みの  $A_1, T_1, B_1$  と与えられた  $S_2$  を元に  $A_2, T_2, B_2$  を決定する。これを順次繰り返して  $A_N, T_N, B_N$  まですべての音符の音高が決定し、生成された旋律を MIDI 形式で出力して処理を終了する。

## 3. ベイジアンネットワークモデルについて

本章では、ベイジアンネットワークのコードノードを取り入れたものと取り入れないものの 2 種類のモデルについて述べる。本来ならば、連続性においてできる限り広範囲の音の流れを考慮すべきである。同時性においても、可能な限り考慮されるべきである。しかし、そのようなモデルにすると膨大な量の学習データが必要になり、さらに確率計算時にかかる計算機の負荷も高くなってしまふ。更に、ネットワークがループを含む場合、確率計算が収束がしない可能性がある。この考えに基づき、我々は単純なベイジアンネットワークモデルを提案する。その中で、本研究では音同士の直接の関係のみを表したモデルと、音同士ではなくコードノードから音を決定するモデルの 2 種類のモデルを作成した。2 つのモデルの結果を比較し、音同士の繋がり、又は、コードノードの必要性を確かめる。具体的なモデルの説明は以下のとおりである。

### 3.1 コードノードを用いないモデル

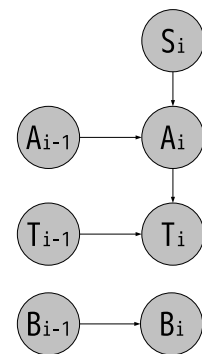


図 1 コードノード無しモデル

図 1 はコードノードを用いないモデルである。このベイジアンネットワークモデルは与えられた  $i$  番目のソプラノである  $S_i$  や過去の音の流れ、声部間の関係から尤もらしい音符を選ぶように  $i$  番目の  $A_i, T_i, B_i$  を推論する。要素の前後関係においては、 $A_{i-1}, T_{i-1}, B_{i-1}$  のみ考慮する。加えて、和声学ではソプラノとバスを外声といい、この 2 パートが適切な関係を維持することが重要であると言われている。また、ソプラノ、アルト、テノールは上 3 声としてひとまとめにして扱われることが少なくない。そこで、バスがソプラノに依存して決まり、アルトがソプラノに、テノールがアルトに依存して決まるというようにモデル化する。

### 3.2 コードノードを用いるモデル

図 2 はコードノードを用いたモデルである。このベイジアンネットワークモデルはコードである  $C_i$  からコードの

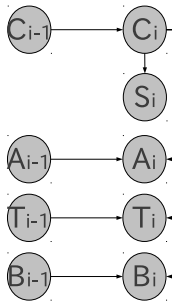


図2 コードノード有りのモデル

流れと過去の音の流れから尤もらしい  $i$  番目の  $A_i, T_i, B_i$  を推論する。まず  $S_i$  と  $C_{i-1}$  から  $C_i$  を推論する。その後、推論されたコード  $C_i$  に基づいた残りのパートの音が推論される。なお、連続性を考慮する為に本来ならば広域的に音の流れを評価しなければいけないが、モデル単純化のため上記のモデル同様に  $A_{i-1}, T_{i-1}, B_{i-1}$  のみ考慮する。実際の和声付けにおいて、ソプラノだけでなくコードも同時に考慮した和声付けを行う場合が少なくない。コードノードを用いる本モデルでは、声部間の関係である同時性をソプラノとコードから考慮することにする。これにより各声部が音同士の繋がりではなく、コードから考慮されるため声部間の関係がより考慮され不協和音や音の流れの評価の質の向上に繋がると考えられる。

### 3.3 データの収集

本研究では、プロの作曲家による既存の四声体和声に、コードの情報を付与したデータを用いて条件付確率表を学習する。使用する四声体和声は4声部が同じリズムでなければならない。つまり、4声部間のすべての音は発音と消音が同時でなければならないので、我々はこの条件を満たすように四声体和声を修正した。修正内容は以下の通りである。

- (1) 8分音符より長い音符はすべて8分音符の連続とみなす。
- (2) 8分音符よりも短い音符は発音・消音が同時になるように音を伸ばす、又は、削除する。

この手順を用いて、8分音符からなる曲に変換する。このまま条件付確率として学習させてしまうと、同じノートナンバーの連続する確率が本来よりも高くなってしまふ。その為、前の音との関係性で同じ音が連続する場合の確率を0.4倍することとする。コードも同様に同じコードが連続する確率を0.1倍することとする。

## 4. 実験

実験では八長調のいくつかの曲を用いて2つの条件付確率表から四声体和声を生成し、その結果の比較を行う。

### 4.1 実験の条件

実験で使う曲はすべて4小節からなる八長調のものとする。条件付確率表を作成するにあたり、J.S.Bachのコラールを使用した。本研究では、jsbchorales.net(<http://www.jsbchorales.net/>)にあるデータから長調の楽曲を計53曲抽出し、八長調に移調して使用した。ただし、このデータにはコードの情報が付与されていないので、「Band in a Box」のコード推定機能で推定した結果を付与した。

### 4.2 実験結果

本節では、4つの曲から生成された四声体和声を、同時性と連続性の観点から比較、考察を行う。和声付けにおいて、大事なことは

- (1) 不協和音を避ける
- (2) 各声部の動きをなめらかにする
- (3) 各声部の動きを他の声部とうまく連動させる

である。(1)は音楽的同時性に関する事項であり、音楽として不自然に聞こえなくするには必須の条件である。これら3つの中で最も重要であると考えられる。しかし、単に不協和音がないだけでは、音楽的に単調になりかねない。そこで、(2)が重要となる。(2)は音楽的連続性に関する事項であり、(1)に加えて(2)を満たすことで、音楽的に豊かな響きと音の流れを得ることができる。(2)を満たしているかは、各声部に適切に経過音や刺繍音が挿入されているかで判断できると考えられている。(3)は、さらに高度な四声体和声を作るときに考慮すべきものであり、例えば、「平行5度の禁止」のように、同時性と連続性の両方に関連した事項である。今回のベイジアンネットワークでは、学習データの少なさを考慮してできるだけ単純なモデルにしているため、ここでは評価対象に入れない。そこで、

- (1) 明らかな不協和音がないかどうか
- (2) 経過音や刺繍音が適切に挿入されて、なめらかな声部になっているかどうか

という、この2つの観点から結果の考察を行うこととする。

#### 4.2.1 歓喜の歌

図3、図4は「歓喜の歌」を用いた結果を楽譜にしたものである。コードノードを用いない結果では、不協和音が楽譜の3、5、10、12、13、15の箇所に現れ、全体として音楽的に不適切な響きとなった。ただし、声部ごとに見ていくと、経過音や刺繍音と解釈できる音が数多く挿入されており、自然でなめらかな旋律となっている。また、ソプラノとバスのみを演奏した場合には、音楽的同時性、音楽的連続性の両方に関して申し分のない結果となっている。これは、今回我々が用いたモデルでは、ソプラノとバスに直接依存性を表すアークが設定されているからであると考えられる。このことから、全パートにアークを設定すれば

図 3 歓喜の歌 コードノード無し

C C F G C F C G C C G C C G G

図 4 歓喜の歌 コードノード有り

結果が改善されることが予想されるが、そうすると、パラメータ数が大幅に増加し、学習に必要なデータ数が劇的に増加してしまうため、事実上不可能である。

一方、コードノードを用いた結果では、明らかな不協和音は出力されなかった。さらに、例えば 10 の箇所のバスパートに経過音が現れるなど、特にバスパートにおいてなめらかな旋律が出力された。アルトとテノールは、比較的単調な旋律であったが、内声部であり、外声部に比べて聴感上目立たないので、問題ないと考えられる。

#### 4.2.2 大きな栗の木の下で

図 5 大きな栗の木の下で コードノード無し

Am Am G C C G C C G G C

図 6 大きな栗の木の下で コードノード有り

図 5、図 6 は「大きな栗の木の下で」を用いた結果を楽

譜にしたものである。この例では、コードノードを用いない結果と用いた結果の両方で、明らかな不協和音は出力されなかった。しかし、コードノードを用いない結果では、個々には不協和音はないものの、和声としては、あまりまとまりのないものとなってしまった。一方、コードノードを用いた結果では、最初のコードが  $A_m$  から始まっていることを除けば、無難なコード進行となっている。これは、コードノード  $C_{i-1}, C_1$  が連結されていることにより、コードレベルでの連続性が考慮されているからであると考えられる。コードノードを用いた結果では、各声部の音のほとんどが和声音として選ばれているが、図中の 9 の箇所のバスが、コードが  $G$  にも関わらず  $F$  音を取っており、アクセントとなっている。

この曲の場合、コードノードを用いない結果と用いる結果の両方において、 $A_m$  から始まる結果となった。学習データを用意する際に、長調なのか短調なのかがあいまいな曲についても、データ数確保のために含めることにしたが、このことが原因であると考えられる。

#### 4.2.3 ちょうちょ

図 7 ちょうちょ コードノード無し

G C C F G G C G C F G C G

図 8 ちょうちょ コードノード有り

図 7、図 8 は「ちょうちょ」を用いた結果を楽譜にしたものである。コードノードを用いない結果では楽譜の 1、2、3、4、6、7、10 の箇所に不協和音が現れている。特に、第 1 小節ではソプラノ・テノール又はテノール・バスの間で不協和音が多く生まれている。これに関しては、モデル上での直接的な依存関係がない声部同士なので、音楽的同時性が十分に考慮されずこのように不協和音が多く出てしまったと考えられる。一方、コードノードを用いた結果では、明らかな不協和音は出力されなかった。この結果では、最初のコードがドミナントである  $G$  から始まっている。通常、トニックである  $C$  などからコード進行を始める場合が

多く、ドミナントである G からコード進行が始まることは珍しい。このような結果が出てしまう理由として、今回のモデルには、曲の始まりがどうかを区別する要素が含まれていないこと、1音1音にコードが付与されており、大局的なコード進行は考慮していないことが考えられる。

#### 4.2.4 タヤけ

図 9 タヤけ コードノード無し  
G C Am G C G C C C G C G

図 10 タヤけ コードノード有り

図 9、図 10 はタヤけを用いた結果を楽譜にしたものである。コードノードを用いない結果では、楽譜の 1、5、8、9 の箇所に不協和音が現れている。しかし、4.2.1 と同様に声部ごとに見ると経過音や刺繍音がいくつか挿入されているため自然でなめらかな旋律になっている。また、直接の依存関係を設定しているソプラノとバスに着目すると音楽的同時性、音楽的連続性を満たしている結果となっている。

コードノードを用いた結果では、明らかな不協和音は出力されなかった。さらに、経過音、刺繍音の挿入によりバスパートは比較的なめらかな旋律になっている。しかし、この結果も、多く同音連打がアルト、テノールで出力されている。これらは内声部であり外声部と比べ目立たないので、問題ないと考えられる。

#### 4.3 考察

全結果を通して、少なからず不協和音は出てしまうがベイジアンネットワークを用いて四声体和声を生成することができた。さらに、コードノードの有無による四声体和声の結果の違いをいくつか見つけることができた。

コードノードを用いない結果では、同音連続はあまり見られず、比較的音の移動はなめらかであるといえる。限定した声部関係では良い関係の声部もあった。しかし、不協和音が多く出てしまっている。更に、稀に極端な音の移動

や声部間の音の重なりも起こってしまっている。これは、パート間の関係を省略したからだと考えられる。本来考慮しなければならないソプラノ・テノール間やテノール・バス間の関係がこのモデルではモデル単純化の為に省略されている。この理由により、不協和音が出やすくなっていると考えられる。

コードノードを用いた結果では、不協和音が少なくなっており、大きな音の移動、声部間の音の重なりもなく、刺繍音や経過音も含む結果もあったため、聞こえはよくなっている。しかし、声部内での同音連続がどの結果においても非常に多く、各声部での動きの滑らかさは失われている。

これらの考察から、結果から分かるように明らかに不協和音が少なくなっているため、コードノードを入れることは必要であると考えられる。これにより、同時性の維持に多に貢献している。しかし、連続性の観点においては、ごく一部の狭い範囲でしか曲の流れを考慮していなかったり、声部間の関係性も本来の関係しているべき関係も省略されている。更に、今回学習に用いたサンプルも非常に少ないため思わしい結果を得られなかったと考えられる。今後の発展として、学習方法の改善によって学習データを増やすことは当然のこと、小節ごとの流れの考慮や、曲の始まりや終わりを考慮することのできる大局的なモデルを作成していく必要がある。

#### 5. 終わりに

今まで四声体和声付けについて様々な手法で研究されてきた。しかし、ベイジアンネットワークを用いた手法は研究されていない。様々な要素の複雑な依存関係を表すことが可能なベイジアンネットワークは、音楽的同時性と連続性を同時に考慮することが可能である。この考えに基づき、我々はベイジアンネットワークを用いた四声体和声付けの手法を提案した。ベイジアンネットワークを用いる際に気をつけなければいけないことは、ベイジアンネットワークのモデルを単純にしなければいけないことである。ネットワークを複雑にすると、学習に膨大なデータ量が必要となる。そのため、本研究では単純なモデルで作成した。音同士の繋がりやコードノードの必要性を考察する為に 2 種類のコードノードを用いたものと用いないもののモデルを作成した。実験を行い、2 種類の結果から違いを見つけた。音同士の繋がりだけを考慮すると、各声部内での音の移動はなめらかになるものの、不協和音が多く出てしまうことが多かった。コードノードを用いることによって不協和音が少なくなることが確認された。しかし、同音連続が起こりやすくなるというデメリットも確認された。今後の発展として、現状のモデルの改善による大局的な曲の流れの考慮、さらにデータの学習方法の改善などが上げられる。

謝辞 有益なご意見を下さった松原正樹氏 (筑波大学) に感謝する。

## 参考文献

- [1] 川上 隆, 中井 満, 下平 博, 嵯峨山 茂樹, “隠れマルコフモデルを用いた旋律への自動和声付け”, 情報処理学会研究報告 99-MUS-34, pp.59–66, 2000.
- [2] Masanobu Miura, Seiji Kurokawa, Akihiro Aoi, Masezo Yanagida, “Yielding Harmony to Given Melodies”, *International Congress on Acoustic (ICA)*, pp.3417–3420, 2004.
- [3] Hu. Jiarui, Guan Yin, Zhou Changle, “A Hierarchical Approach to Simulation of the Melodic Harmonization Process”, *Intelligent Computing and Intelligent Systems(ICIS)*, pp.780–784, 2010.
- [4] Kemal Ebcioglu, “An Except System for Harmonizing Chorales in the Style of J.S. Bach”, *Understanding Music with AI*, MIT Press, pp.294–333 1992.
- [5] Hermann Hild, Johannes Feulner, Wolfram Menzel, “HARMONET: A Neural Net for Harmonizing Chorales in the Style of J.S.Bach”, *Neural Information Processing Systems Foundation (NIPS)*, pp.267–274, 1991.
- [6] Ryan A. Mc Intyre, “Bach in a box: The Evolution of Four Part Baroque Harmony Using the Genetic Algorithm”, *Proc of Evolutionary Computation*, pp.852–857, 1994.
- [7] Francois Pachet, Pierre Roy, “Formulating Constraint Satisfaction Problems on Part-Whole Relations: The Case of Automatic Musical Harmonization”, *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, pp.1–11, 1998.
- [8] S.Phon-Amnuaisuk, G.A.Wiggins, “The Four-Part Harmonisation Problem: A comparison between Genetic Algorithms and a Rule-Based System”, *AISB'99 Symposium on Musical Creativity*, 1999.
- [9] M. Allan, C. K. I.Williams, “Harmonising Chorales by Probabilistic Inference”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2004.