

ベイジアンネットワークを用いた四声体和声付け： 音の前後関係を考慮したモデルを用いた検討

鈴木 峻平^{1,a)} 北原 鉄朗^{2,b)}

概要：本論文では、与えられたソプラノに和声付けを行う機械学習モデルを追求する。これまでに機械学習モデルを用いた研究では、和声機能やコードを状態やノードとして既にモデル化されている。このようなモデルは、実際の和声付けを音楽的に取り入れるという観点において適している。しかし、実際の音楽データから基本的な和声の概念を学習するという科学的な観点からはあまり適していない。そこで、我々はコードノードを取り入れたモデルと取り入れないモデルを作成し、基本的な和声の概念を取り入れないモデルでも和声を学習することができるのか調査する。更に、コードを取り入れたモデルとの比較も行う。モデルは、音楽的同時性と音楽的連続性を確率的に、ベイジアンネットワークで実現する。2つのモデルは、讃美歌のコーパスから254曲分学習した。結果、コードノードを用いなくてもベイジアンネットワークは基本的な和声のルールをいくつか学習することができた。

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: Investigation Using Models Considering Context of Notes

SYUNPEI SUZUKI^{1,a)} TETSURO KITAHARA^{2,b)}

Abstract: In this paper, we explore machine learning models that generate four-part harmonies according to the melody of a soprano voice. Although researchers have already tried to produce four-part harmonization through machine learning, the computational models that most studies have proposed already contain nodes or states that represent chords or harmonic functions. Explicitly introducing such nodes or states is suitable from the viewpoint of practically achieving musically acceptable harmonization, but it is unsuitable from the scientific viewpoint of acquiring the fundamental concepts of harmonies from actual music data. Therefore, we developed two kinds of computational models, one that contains chord nodes and another does not, and investigate to what extent the model without chord nodes acquires the fundamental concept of harmonies compared to the model with chord nodes. For our models, we describe musical simultaneity and musical sequentiality are described in Bayesian networks. Both models learned 254 pieces taken from a Hymn corpus, and the results of this experiment show that the Bayesian network without chord nodes acquired some of the basic rules of harmony.

Keywords: Four-part harmony, Harmonization, Bayesian network

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

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

a) syunpei@kthrlab.jp

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

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และ声は西洋音楽において代表的なものであり、教育にも用いられている。その為、今まで様々な手法で四声体และ声の研究が行われてきた [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]。

最も共通のアプローチの一つとして、エキスパートシステム (ルールベースシステム) がある。例えば、Ebcioğlu はプログラミング言語 BSL を用いて和声の知識を実現した [4]。このシステムのルールは多様であり、矛盾を起こさずに統一するのは困難である。その為、和声付けを行うルールベースシステムの開発は困難であると考えられる。例えば、2つの音を選び出す場合は、声部間で協和性、声部内で自然な繋がり の2つを考慮しなければならない。2つのルールはそれぞれ別々の音を選ぶ可能性がある。これを解決する為にメタルールが必要になる。だが、そのようなルールを開発することは容易ではない。いくつかの研究では、制約充足問題や、音の配置のルールを直接与える代わりに遺伝的アルゴリズムを用いて、この問題に取り組んでいる。これら研究では、いくつかの和声付けにおける基本的なルールに従った制約や適合関数を作成した [6], [7]。

近年、機械学習を用いた四声体และ声付けの研究は増えている。彼らの科学的な関心は、人間が必ずしも和声の原則を計算機に与えなくても、実際の音楽から和声の原則を発見することである。例えば、Hild らはいくつかのニューラルネットワークを用いた J.S.Bach スタイルのコラール和声付けシステムを開発した [5]。Allan と Williams は隠れマルコフモデルに基づいた四声体และ声付けの方法を提案した [8]。Yi と Goldsmith はマルコフ決定プロセスに基づいた四声体และ声付けの方法を提案した [9]。Buys らは、重み付き有限状態トランジューサー (WFST) を四声体และ声付けに取り入れた [10]。

四声体และ声付けを行う計算モデルの開発において、2つの問題を解決しなければならない。第1の問題は、和声の音楽的同時性と音楽的連続性を考慮しなければならないということである。音楽的同時性を考慮するということは、不協和音がないように適切な音を選ぶ出すことであり、音楽的連続性を考慮するということは、各声部内で滑らかな旋律になるように音を選ぶことである。第2の問題は、学習データは限られているということである。四声体และ声は非常に複雑な依存関係を声部間及び声部内で持っているため、モデルも同様に依存関係を表さなければならない。しかし、複雑なモデルは必要とする学習データ量が指数的に増加してしまう。その為、モデルに対して可能な限り学習データの量を考慮するべきである。

上記の研究のほとんどは、C や G のようなコード、機能และ声をノードや状態として表している。これと対照的に、

実際の音楽から和声の概念を学習することができる計算モデルを調査できるように、我々は明確に和声の概念を取り入れない計算モデルを提案する。これより、コードノードがあるモデルが学ぶことのできる和声の原則をどの位の範囲でコードのないモデルが学ぶことができるかを調査する。その為、我々はコードノードのあるものとなない計算モデルを生成した。これらのモデルを実現する為に、我々はベイジアンネットワークを採用する。

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และ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และ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。

2.3 ベイジアンネットワークモデルについて

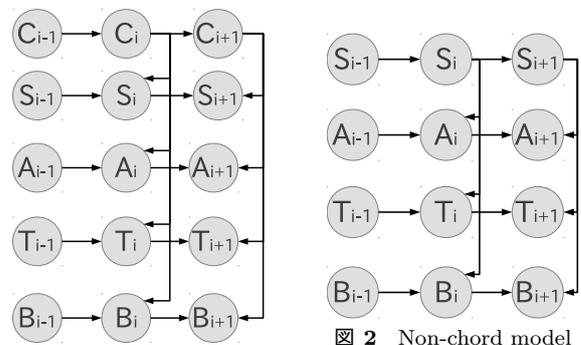


図 1 Chord model

図 2 Non-chord model

我々が設計したベイジアンネットワークモデルを図 1 と図 2 に示す。図 1 がコードノードを含むモデル (コードモ

デル) 図2はコードノードを含まないモデル(非コードモデル)である。 S_i 、 A_i 、 T_i 、 B_i はそれぞれ*i*番目の、ソプラノ、アルト、テノール、バスを表し、それぞれの音域を[60,81]、[55,76]、[48,69]、[41,62]とする。 C_i は*i*番目のコードを表し、 $\{C, C\sharp, \dots, B\} \times \{\text{maj}, \text{min}\}$ の値をとる。

我々は、全てのノードに特別なエレメントである[0]を導入した。これは、コードも音もない状態を表す。最初の音やコードが推論される時、*i*-1番目に音やコードはない。その際に、ノードである S_{i-1} 、 A_{i-1} 、 T_{i-1} 、 B_{i-1} 、 C_{i-1} に"0"がセットされる。同様に、最後の音を推論する際にも、 S_{i+1} 、 A_{i+1} 、 T_{i+1} 、 B_{i+1} 、 C_{i+1} に"0"がセットされる。

これらのベイジアンネットワークの共通の特徴として、*i*+1番目の音やコードを含んでいることである。*i*番目の音を推論すると同時に、*i*+1の音も推論している。前だけでなく、次も考慮した推論により、より連続性が考慮された音を選ばれる。この様に、我々は前後の音から連続性を考慮する。

同時性の考慮は、2つのモデルで異なっている。非コードモデルでは、それぞれの声部がソプラノに依存するように設計した。理想をいうならば、全ての声部は相互関係を持っているので、 S_i 、 A_i 、 T_i 、 B_i は全てアークで関係性を持つべきであるが、多くの学習データが必要となるので、実際に全ての関係を考慮するのは困難である。その為、我々は声部間の関係を単純化した。コードモデルでは、各声部の音はコードに依存するように設計した。理想をいえば、声部間の依存関係は考慮されるべきであるが、これもまた多くの学習データを必要とするので実現は困難である。

条件付確率表(CPT)はコーパスから作成した。このことについては、3.1節で記す。

3. 実験

上記した2モデルを用いて、実験及び比較を行った。

3.1 条件付確率表の作成

我々は、讃美歌集[11]から254曲を選び出し作成したコーパスを用いて、条件付確率表を作成した。選ぶ曲は最も短い音が8分音符である長調の曲のみとする。その際、Band-in-a-Box[13]を用いて、自動的にコード付与を行う。

我々は、4声部のリズムが全て同じ(4声部の発音と消音が全て同時)と仮定したので、8分音符以上の音を全て8分音符に分割した。条件付確率表は、このような修正されたデータを用いて作成された。しかし、修正を行うことにより、同じ音が連続して選ばれる確率が人為的に高くなってしまふ。その為、同じ音が連続して選ばれる確率を下げる為に、その確率に係数としてコードモデルには0.2を、非コードモデルには0.5をかける。

3.2 実験の条件

我々は八長調の32曲のソプラノ[12]を実験に用いる。

非コードモデルとコードモデルでの四声体と声付け後の結果を、我々は以下の基準で比較する。

C1 不協和音を含む和音の総数

不協和音は、短2度、長2度、減5度、短7度、長7度の関係が含まれている和音である。ただし、G7コード(e.g., Soprano: D, Alto: F, Tenor: B, Bass: G)はその関係が含まれているが不協和音からは除外する。コードモデルではコードと音の関係を明確に学習しているので、非コードモデルよりも不協和音が少なくなると考えられる。

C2 ノンダイアトニックノートの総数

我々が用いたメロディーは実際に音楽大学の和声学で用いられているため、オーソドックスなメロディーになっている。それ故に、結果はノンダイアトニックノートを含まないのが望ましい。

C3 最後のコードがCかどうか

ここで用いられているメロディは全てCコードで終わることが望ましい。もし、非コードモデルの結果がこの基準を満たすならば、最後がトニックコードで終わるという和声の重要なルールの一つを適切に学習できたと言える。一方、コードモデルの結果では、コードの連続性において直接学習しているので、容易にこの基準を満たすと考えられる。

C4 3声部以上で同じ音名の音が選ばれている総数

異なる声部で同じ音名が同時に選ばれること(e.g., Soprano: C, Alto: C, Tenor: E, Bass: C)は不協和音の原因にはならないが音楽を単調にしてしまう。それ故に、このような音の割り振りは避けるべきである。

C5 パス内で連続する音の跳躍(完全4度以上)の総数

連続する音の跳躍は、声部内での音の繋がりの滑らかさを減らしてしまう。特に、バスはメロディを和声的に支える役割を持つ為、バス内での連続する跳躍は避けられるべきである。跳躍の連続を避ける為に、コードモデルではコードの転回形を学習しなければならない。そして、与えられた前後の音から適切に転回を行わなければならない。もし、モデルがこれを十分に学ばなければ、バスはそれぞれのコードのルート音を選び、滑らかさは失われてしまう。

C6 各声部内での音名の総数

2つや3つの音名だけが特定の声部内で現れると、音楽は単調になってしまう。それ故に、この数はなるべく低くあるべきである。

3.3 実験結果の考察

上記の基準に基づいた評価結果を表1に示す。

結果から、コードモデルの全ての和音の3%が不協和音であり、非コードモデルでは全体の18%が不協和音となった。コードモデルは、コードと音の関係を直接学習しているので、適切なコードを推論していれば、適切なコードトーンを選ぶ。したがって、コードモデルではほとんど不

表 1 評価結果 (C: コードモデル, N: 非コードモデル; ○: 満たしている, ×: 満たしていない)
 C6 の “Total” は平均であり、合計ではない。

	Total # of Note	C1		C2		C3		C4		C5				C6									
		C	N	C	N	C	N	C	N	C		N		C			N						
								2	3	4	5+	2	3	4	5+	Alto	Tenor	Bass	Alto	Tenor	Bass		
Sample 1	15	1	1	0	0	○	○	8	3	2	1	0	0	0	1	1	0	2	2	3	4	3	6
Sample 2	14	0	4	0	0	○	○	5	4	0	0	0	1	0	1	1	0	2	3	4	5	5	4
Sample 3	14	0	1	0	0	○	○	7	4	1	1	0	0	0	1	0	0	2	2	3	4	6	6
Sample 4	15	1	0	0	0	○	○	5	3	1	0	0	1	1	0	0	0	2	4	3	4	3	4
Sample 5	14	1	3	0	0	○	○	6	3	0	1	0	1	1	0	0	1	2	2	3	4	5	6
Sample 6	14	2	2	0	0	○	○	6	5	2	0	0	1	1	1	0	0	2	2	3	5	3	5
Sample 7	14	1	0	0	0	○	○	4	5	2	1	0	0	0	1	1	0	2	2	2	4	3	5
Sample 8	13	0	2	0	0	○	○	6	2	2	0	1	0	1	0	0	0	2	3	3	4	4	5
Sample 9	13	1	2	0	0	○	○	7	2	1	1	0	1	2	0	0	0	2	1	2	3	5	4
Sample 10	15	0	2	0	0	○	○	7	5	0	0	0	1	1	0	1	0	2	4	3	5	3	5
Sample 11	15	1	3	0	0	○	○	6	2	1	0	0	1	1	1	0	0	2	3	3	5	5	5
Sample 12	13	0	1	0	0	○	○	5	7	0	1	1	1	2	0	0	0	2	2	3	5	3	4
Sample 13	14	0	3	0	1	○	○	4	2	0	1	0	2	0	1	0	0	2	4	3	5	6	4
Sample 14	14	0	5	0	0	○	×	7	3	1	0	2	0	0	2	0	0	2	2	3	4	6	6
Sample 15	14	0	1	0	0	○	×	7	4	1	0	2	0	1	0	1	0	2	2	3	4	5	7
Sample 16	14	2	4	0	0	○	○	2	4	3	0	0	0	2	0	0	0	2	4	3	4	4	5
Sample 17	14	0	6	0	1	○	○	5	2	0	0	0	0	0	1	0	0	2	2	4	4	6	4
Sample 18	13	2	2	0	1	○	○	5	5	1	0	1	0	1	1	0	0	2	2	3	6	6	4
Sample 19	14	0	1	0	0	○	○	3	3	2	1	0	0	0	0	1	0	2	2	4	4	3	4
Sample 20	14	0	1	0	0	○	○	6	6	0	1	1	1	1	0	1	0	2	4	3	5	3	5
Sample 21	14	0	5	0	0	○	○	3	1	0	1	0	1	1	1	0	0	2	4	3	4	4	5
Sample 22	14	0	3	0	0	○	○	4	3	0	0	0	2	2	1	0	0	2	3	3	3	3	4
Sample 23	14	0	5	0	0	○	○	4	5	0	1	0	1	0	1	0	0	2	2	3	4	7	7
Sample 24	14	1	1	0	0	○	○	6	2	2	0	0	1	0	0	0	0	2	3	4	5	4	4
Sample 25	14	1	0	0	0	○	○	3	3	1	1	0	1	0	1	0	0	2	4	3	5	4	5
Sample 26	14	2	1	0	0	○	○	3	4	1	0	0	1	0	1	0	0	2	4	3	6	6	6
Sample 27	14	0	5	0	1	○	○	5	3	0	0	0	1	1	0	0	0	2	4	4	4	7	5
Sample 28	14	0	5	0	1	○	○	5	4	0	0	0	1	0	1	0	0	2	3	4	4	7	4
Sample 29	14	1	1	0	0	○	○	5	4	4	1	0	0	1	1	0	0	2	1	3	3	3	4
Sample 30	14	0	3	0	0	○	○	4	3	1	0	0	1	3	0	0	0	2	4	3	3	3	5
Sample 31	11	0	3	0	1	○	○	4	3	0	0	0	1	1	0	0	0	2	2	4	2	5	4
Sample 32	14	0	3	0	1	○	○	7	2	1	0	0	1	0	0	1	0	2	2	4	3	3	4
Total	445	17	79	0	7	32	30	164	111	30	12	8	21	24	18	8	1	2	2.7	3.1	4.1	4.4	4.8

協和音は現れなかった。一方、非コードモデルの結果では、コードモデルより不協和音が多い結果となった。これは、コードモデルと違い、ソプラノと各声部の関係のみを学習しているからだと考えられる。しかしながら、たとえコードを直接学習していなくとも、不協和音は全体の20%以下となったので、非コードモデルでもある程度の和声の基礎を学習できたと言える。

不協和音のほとんどは、計算コストを抑える為、アークが省略されているアルトとテノール、アルトとバスの間でみられた。理想をいえば、これらは考慮されるべき関係であるが、これを考慮すると計算コストが指数的に上昇してしまう。実際に、通常のPCでは、今回のモデルの推論は1曲あたり数秒で終わるのに対し、アークを数本増やすだけで数秒だったものが40分以上かかってしまった。既に

非コードモデルで関係を持っている声部間で不協和音が出ていないことから、もしアークを増やすことができるのならば不協和音を減らすことができると考えられる。

ノンダイアトニックノートについては、コードモデルは現れなかった。更に、非コードトーンでも僅かだった。これより、両モデルが典型的な八長調の音の使い方を学習できたと言える。非コードモデルでの7つのノンダイアトニックノートのうち、2つがF#であり、前後の関係はE-F#-GやG-F#-Gのようになっていた。これは、経過音や刺繍音と解釈することができる。

最後のコードについては、コードモデルでは全てが、非コードモデルでは97%が最後のコードがCになっている。これより、両モデルが最後にトニックで終わるという基本的なルールを学習できたと考えられる。非コードモデルに

において、Cで終わっていない3曲は全てバスがAで終わっていた。これは、最後のコードがAmになるという技術的な手法でもある。八長調において、最後のコードがAmの代わりにCやG7で終わることは、偽終止と呼ばれており実際の音楽でもしばしば使われている。それ故、これら結果は一概に悪いとは言えない。

同じ音名で構成されている和音の総数については、コードモデルでは、全ての和音の37%がC-G-C-Cのような同じ音名で構成されていた。これに対し、非コードモデルでは、24%となった。これら結果は、コードモデルでは声部間の関係を考慮していないからだと考えられる。これは、声部間にアークを増やすことで改善されると考えられるが、モデルが複雑になってしまい、限られたデータで学習することが難しくなってしまう。

バスでの跳躍の連続については、非コードモデルに比べて、コードモデルの方が多かった。これは、コード C_i とバス B_i との依存関係の方が、バス内 B_{i-1}, B_i, B_{i+1} よりも強く、ほとんどの場合で、前後の音に関わらずコードのルート音が選ばれてしまったからだと考えられる。

各声部の音名の平均は、コードモデルで各声部が取る音名数が2から4なのに対して、コードなしでは全てで平均が4以上となっている。実際、コードモデルではテノールですべての音がGだったり、アルトでBとCの繰り返しが多く、曲の単調さにつながっていた。これに比べコードなしでは、音のつながりがよりなめらかになっている。

3.4 議論

図3 Sample 25(コードモデル)

図4 Sample 25(非コードモデル)

図4に非コードモデルを用いたSample25の結果を示す。この結果は、以下のコード進行を持つ。

|C F F Em |Dm C G7 |C F C/E F |C/E G7 C/E |

このコード進行で非コードトーンがないことから、たとえコードを明示的に学習していなくても頻繁に使われる

表2 非コードモデルの典型的なカデンツ

Samples	Cadences		
Sample 1, 6, 9	F	Bm(-5)/D	C
Sample 2, 7, 10, 18, 28	C	Bm(-5)/D	C
Sample 3	Am	G	C
Sample 4, 16, 19, 29, 31	G7	G7	C
Sample 5, 8, 11, 13, 22	C	G7	C
Sample 20	C	F	C
Sample 23, 27	C	G/D	C
Sample 26	C/G	G7	C

コードの音をうまく学習できたと言える。加えて、下記のように機能和声に沿ったコード進行となった。

C (tonic) → F (subdominant) → Em (tonic counter parallel),

Dm (subdominant parallel) → C (tonic) → G7 (dominant).

特に、C → F → C → G7 → C という典型的なカデンツで終わっている。また、Cの直前のコードがGではなくG7になっており、トライトーンの解決という観点で、望ましい結果となっている。バスについても、基本的には4度進行と順次進行からなっており、音楽的にオーソドックスなものである。ただし、最後のCのコードのバスがEとなっており、これはルート音であるCの方が望ましかった。

他にも、典型的なカデンツで終わっているケースはよく見られる。例えば、表2に示すようなものが見られた。これらは、カデンツとしてよく用いられるものであり、このモデルが主要なカデンツを学習できたと言える。

Sample 25のコードモデルによる結果を図3に示す。推論されたコード進行はすべてC、F、Gのいずれかであり、単調なコード進行となっていた。ただし、テノールの第3音がAの代わりにGに、アルトの第5音がCの代わりにBとなっており、実際のコードとは多少異なっている。また、すべてのバスの音がコードのルート音をとっており、このことも単調さを際立たせている。

図5 Sample 29(コードモデル)

Sample 29の非コードモデルによる結果を図6に示す。2小節めがG7で終わり、4小節めがCで終わるというオーソドックスなコード進行となっている。G7が2つ続く箇所では、ソプラノがBならテノールはD、ソプラノがDならテノールがBというように、異なる音を取ることで単調さを防いでいる。コードモデルの結果(図5)と比べると、3小節めが |C F Bm(-5)/D C| となっているとこ



図 6 Sample 29(非コードモデル)

ろが大きく異なる。コードモデルの結果では、CとGしか出現せず、大変単調なコード進行となっている。また、アルトがすべてCまたはB、テノールがすべてGの音であり、このこともハーモニーが単調である一因である。



図 7 Sample 14(コードモデル)



図 8 Sample 14(非コードモデル)

次に、典型的なカデンツにならなかった例として、Sample 14 を図 8 に示す。この例では、終わりの小節が | C G/B Am7 | となっており、前述した偽終止になっている。また、テノール・バス間で長 2 度または短 2 度の関係になっている箇所がいくつかある為、不協和音が生じている。一方、コードモデルの場合 (図 7) では、不協和音こそ生じていないものの、図 4 と同様に、すべての和音が C、F、または G であり、ほとんどでバスがルート音を取っているため、単調な和声になっている。

このように、非コードモデルでは、たまに不協和音を生じるものの、様々なダイアトニックコードが用いられ、バスの音が順次進行または 4 度進行になることで、比較的滑らかな和声を実現している。また、ほとんどの曲で、適切なカデンツが使われている。コードありモデルでは、ほとんどすべての和音が C、F、または G であり、バスがルート音となっており、そのため単調な和声となっている。

4. 終わりに

本論文では、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を生成結果を報告した。関連研究ではコードや機能 and 声をノードや状態として導入されて

いるが、機械が実際の音楽データから和声の原則を学習することに主をおくならば、コードや機能 and 声を明示的に導入すべきではない。この考えに基づき、我々はコードノードを含まないベイジアンネットワークを用いて四声体 and 声付けを試みた。結果から、非コードモデルはいくつかの基本的な and 声のルールを学習できたことが分かった。

機械が and 声を学習するために 3 ステップが必要だと考えられる。1 つは、不協和音を避けること、2 つ目は禁則を避けること、3 つ目は、より音楽的に美しい解を導き出すことである。実験結果を評価することで、コードノードを含まないモデルが第一段階を達成したことが分かった。次の段階として、並達 5 度などの禁則の考慮するために、非コードモデルは S_{i-1} と B_i 間のような新たな関係を考慮しなければならない。今後の課題は、より大規模なコーパスの作成と、新たな依存関係を追加することである。

謝辞 有益なご意見を下さった寺澤洋子先生 (筑波大学) と松原正樹先生 (筑波大学) に感謝する。

参考文献

- [1] Hu.Jiarui, et al. "A Hierarchical Approach to Simulation of the Melodic Harmonization Process", *Intelligent Computing and Intelligent Systems(ICIS)*, pp.780-784, 2010.
- [2] M.Miura, et al. "Yielding Harmony to Given Melodies", *International Congress on Acoustic(ICA)*, pp.3417-3420, 2004.
- [3] T.Kawakami, et al., "Hidden Markov Model Applied to Automatic Harmonization of Given Melodies", *IPSJ SIG Notes 99-MUS-34*, pp.59-66, 2000.
- [4] K.Ebcioğlu, "An Except System for Harmonizing Chorales in the Style of J.S. Bach", *Understanding Music with AI*, MIT Press, pp.294-333 1992.
- [5] H.Hild, et al. "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] F.Pachet, et al., "Formulating Constraint Satisfaction Problems on Part-Whole Relations: The Case of Automatic Musical Harmonization", *European Conference on Artificial Intelligence(ECAI)*, pp.1-11, 1998.
- [7] S.Phon-Amnuaisuk, et al., "The Four-Part Harmonisation Problem: A comparison between Genetic Algorithms and a Rule-Based System", *AISB'99 Symposium on Musical Creativity*, 1999.
- [8] M.Allan, et al., "Harmonising Chorales by Probabilistic Inference", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2004.
- [9] L.Yi, et al., "Automatic Generation of Four-part Harmony", *Proc. UAI-AW*, 2007.
- [10] J.Buys, et al., "Chorale Harmonization with Weighted Finite-state Transducers", *Twenty-Third Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa(PRASA)*, pp.95-101, 2012.
- [11] 日本基督教団讃美歌委員会, "讃美歌・讃美歌第 2 編 とも にうたおう", 日本キリスト教団出版局, 1982.
- [12] 島岡 謙, et al., "和声 理論と実習 (別巻)", 音楽之社, 1967.
- [13] "Band-in-a-Box", PG music Inc., 2009.