

和声学に基づく合唱譜自動作成システム”CMY” —転回系の実装と評価—

エバンズ ベンジャミン ルカ^{†1} 棟方 渚^{†1} 小野 哲雄^{†1}

現代の音楽は多種多様に発展しており、特に自動作曲プログラムなどの進展は顕著である。しかしパターンマッチングや確率モデルに基づいたシステムの動作は、作曲家が楽曲を創作する過程や思考とは大きく異なり、ユーザによる作曲過程の調整が難しい。出力だけでなく、作曲過程にも楽譜データを利用するシステムの方が、従来システムに比べ、音楽の知識を持つユーザにはより使いやすいと考える。

これまで我々は、楽譜データに基づく自動作曲システムの実現に向けて、バス課題を実行するシステム”Creating Music for You (CMY)”を実装してきた。本研究ではCMYに新たに、バス声部の転回系を作曲規則として実装し、入力制限を緩和した。また、プログラム実行時に任意の規則の利用・非利用が設定できるようにし、出力する楽曲の可能性を増大できる仕組みも実装した。

“CMY”: an Automated Music Composing System based on the Harmonic Theory of Classical Music

Benjamin Luke Evans^{†1} Nagisa Munekata^{†1} Tetsuo Ono^{†1}

As modern music is evolving in many ways, the advancement of automated music composing software is particularly noticeable. However, these systems, which generally rely heavily on pattern-matching technology and statistical models, operate using a composition mechanism which is totally different from that of the composer, making the system unrealistic for the user to adjust and control. A system which uses sheet-music-type data not only in the output but also in the composing process itself would offer the musically knowledgeable user an easier programme to work with.

In previous research, we created an automated music composing system “Creating Music for You” (CMY), which composes four part harmony from bass-part music the user inputs. In this research, we have implemented the theory of chord inversions (i.e. chords with non-tonic bass notes), and have also enabled the user to choose which rules to use in the composition process. Both of these modifications allow for a wider variety of harmonic options in the output music.

1. はじめに

コンピュータやインターネット技術の発達により、音楽はより身近なものとして社会に浸透するようになった。ポータブルな音楽プレイヤーの普及により、演奏家のプロによる楽曲の演奏をいつでもどこでも聴けるようになった。また、安価でポータブルなMIDI楽器の普及により、ユーザが気軽に自分の演奏を録音することが容易になり、更に動画投稿サイトの隆盛により、その演奏を世界に発信することもできるようになった。

音楽が身近になり、誰もが制作・演奏・発信できるようになってきた現在、自動で作曲を行うソフトウェアも注目を集めている。自動作曲ソフトには、ボタン一つで楽曲を一から構成するものもあれば、ユーザが入力した楽曲を編集したり、音響効果を加えたり、更に伴奏など新たなパートを付加したりするものもある[1][2][3][4]。これらのシステムには、ユーザが作成した旋律やその他の音楽要素を残しつつ、ユーザの意図をより良く反映する楽曲を構築することが求められる。

本研究では、作曲者はある種のルールベースをもとに作

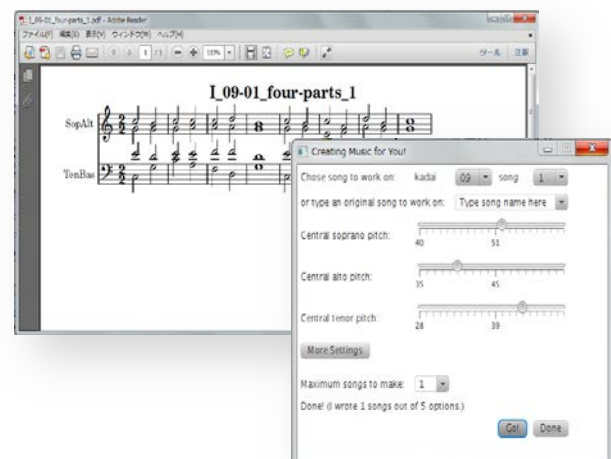


図 1 : CMY 実行画面と、出力結果の例
Figure 1 Example of the CMY control panel and output.

編曲をしていると考えるモデル[5]をもとに、作曲システムにもルールベースを実装することにした。図 1 に我々の実装したシステム”Crating Music for You”(CMY)の実行画面と出力された楽譜の例を示す。ルールベースの実装により、システムの拡張はルールを加えることによって行うことができる。ルールベースの拡張や縮小は、それぞれ作曲者の

^{†1} 北海道大学大学院
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University.

知識の増加や減少，あるいは作曲に利用すると決めた作曲規則の数の変動に似ている．作曲者はある程度の規則に縛られて作曲をするものの，時々それらの規則を破ることで，新たな曲風などを探ることがある．そのため，システム内のルールも，厳密なものではなく，利用できるかどうかの選択可能な規則群として保持することができれば，作曲者が自由に介入することができるため，より「人間らしい」作曲を模倣できると考えた．

2. 関連研究

様々な楽曲データベースが構築され，それを処理するマシンパワーも向上し，既存する楽曲の表層的性質を統計的に抽出して利用するパターンマッチングや機械学習などによる自動作曲技術は成長している．また，多種多様な自動作曲のアプローチがある．例えば，歌詞の韻律を旋律設計に反映した確率最大の最適経路問題としての自動作曲システム *Orpheus* [6]や，ベイジアンネットワークを用いた，コードネームからの自動ヴォイシングシステム[7]，遺伝的アルゴリズムによる自動作曲[8]，既存の楽曲を教師データとして利用する，機械学習による自動作曲システム[9]，演繹オブジェクト指向データベース (DOOD) を利用した創作支援ツール[10]，ヒューリスティックを利用したリアルタイム探索システム[11]などが挙げられる．

しかしこれらシステムが採用している作曲過程は人間の作曲者が作曲する際のものとは異なっており[5]，今まで汎用的に利用されてきた音楽表記での記述や，音楽家による変更・修正が難しいという短所があげられる．特に，出力される楽曲を見たり聴いたりして変更点を音楽的に特定できても，システムの作曲過程がコンピュータに特化した内部表現を持っていると，ユーザがその変更点をシステムに指定することが難しい．

そこで本研究では，作曲における規則を提示するだけでなく，ユーザが作成した旋律やその他の音楽要素を残し，ユーザの意図をより良く反映する楽曲を構築することを目的として，”Composing Music for You”(CMY)の構成を行った．

3. 和声

音楽はメロディー，ハーモニー，リズムなどと言った様々な要素から成り立っている．それぞれの要素を規制する作曲における規則群は，音楽ジャンルや国民文化などによって大きく異なる．本研究では，日本の多くの作曲者が基礎教育の中で共通して学習していることが知られている和声法[5]の中でも，とくに島岡らの「芸大和声」[12]を実装することにした．

和声学とは，楽曲において複数の音を同時に発するときの音の協和・不協和とその連結に関する規則などを体系的に述べたものである．芸大和声はルールベースでその決ま



図 2：バス課題の実施例 ([12]第 I 巻 p.41 課題 9-1)

Figure 2 Example of a Bass input and one of the possible resulting four part harmony outputs. ([12] Vol.1 p.41 problem 9-1)

りを記述し，ルール習得に向けた演習としてバス課題を課している．バス課題とは，与えられたバス譜の上に，ソプラノ・アルト・テナーの 3 パート (上 3 声) を，和声の諸規則に反せず配置する課題である (図 1)．上 3 声を配置することを「課題の実施」と呼ぶ．

初歩のバス課題におけるルールは「禁ぜられる和音配置 (禁則)」・「推奨される和音配置」・「標準的な連結 (標準連結) の原則」の 3 種類に分けられる．後者 2 種のルールは厳守すべきものではないとされている．しかし，過去の楽曲に多用されている和音の配置例などをヒューリスティック的にまとめたものであるため，初学者はそれに十分習熟する必要があるとされている[12]．本研究ではこれら 3 種の規則をシステムに実装し，ユーザが入力するバス譜に上 3 声を配置するシステムを構築した．

4. システム

我々は，ユーザが入力するバス譜に上 3 声を配置するシステム”Composing Music for You”(CMY)を実装した．入出力の楽譜には MusicXML データ形式を利用した．MusicXML は異なるプログラム間で楽譜情報を共有するために開発されたデータ形式であり，ケーデンスの係り受けや大域的な楽曲構造など，音楽の深層構造を解析する他の研究 ([13][14] など) でも用いられている．また現在は finale[14]や Sibelius[16] などメジャーな記譜ソフトウェアをはじめとする，160 以上のシステムが利用していて，汎用性が高い[17] という特徴が挙げられる．

CMY には『芸大和声』1 巻の第 6 章 (p.60) までの全ての規則を実装した．すなわち，バスの第 1 転回位置までを考慮した禁則・推奨則・標準配置の原則を実装している．また，CMY は Java の SE-1.7 を用いて実装し，GUI には JavaFX を利用した．

はじめに，ユーザは入力するバス譜の MusicXML データと，どの規則を作曲に利用するかを選ぶ．それらの情報をもとに，CMY はまず与えられたバス譜について，転回系などを考慮して，設定可能な和音パターンをすべて探索する．続いて各和音パターンについて，標準連結の原則に従い，かつ禁則に反しないように上 3 声を配置していく．こ

の時、複数の配置が可能な場合は、それぞれの配置に対する楽譜の残りの音の探索を続け、それ以降のプロセスで禁則に反しない全ての楽曲を解候補として用意する。

つづいて、システムはユーザに解候補の数を知らせ、ユーザは評価関数に利用する変数や評価値の変域などを指定する。従来のバス課題実施システムは、全ての音に上3声を配置し終えた後、教科書の模範解答との相違点[18]や、専門家の評価に基づいて設計された評価関数[19]に従って、解候補の中から最終的な出力（あるいは各解の評価値）を決定する。この評価方式では、一意的に最適解を見つけることや、解の相対評価を得ることができる。しかし、同じ入力には同じ出力しか与えることができず、柔軟な作曲ができないといった問題がある。本研究では評価関数にユーザの嗜好を反映させることにより、同じ入力に対する複数の異なった出力の生成を実現した。

CMY は最終的にソプラノ・アルト・テナー・バスの4パートが書かれた合唱譜の MusicXML データを出力する。出力にも MusicXML 形式を採用した理由は、楽譜をその後、別な記譜ソフトなどで更に編曲しやすいためである。しかし、その場で出来上がった楽譜を印刷したり聴いてみたりすることができるように、MusicXML ファイルを PDF 形式や MIDI 形式に変換するモジュールを CMY 内に搭載した。ファイル変換モジュールには、フリーウェアの LilyPond [20] を利用した。

5. 評価

四声体和声の楽曲は無数に存在し得る。本研究では、各パートの音域に制限があることを踏まえ、システムが生成しうる楽曲の理論的な数を導出した。なお、各パートの音域は「芸大和声」に記載されているものを利用する(図3)。

一般に、全てのパートが同時に音を発し、各パートの音数 n が等しい時、可能な楽曲の数は(ソプラノの音域×アルトの音域×テナーの音域×バスの音域) n 通り存在する。この式に「芸大和声」の音域を適用すると、 $(22 \times 20 \times 22 \times 22)^n = 212,960^n$ 通りの可能性が存在することになる。これをすべて探索して作曲することは現実的ではないので、一般的な作曲システムはいくつかの制限を設け、その探索を枝刈りしている。本研究では、ユーザがシステムにバス譜を入力しているため、バスの音域は作曲過程で考慮しなくてよい。作曲可能な楽曲数は $(22 \times 20 \times$



図 3：各パートの音域 ([12]第 I 巻 p.18)

Figure 3 Voice range for each part. ([12] Vol.1 p.18)

$22)^n = 9,680^n$ 通りに抑えられる。しかしこれもまだ探索には大きすぎるため、他の制約も考える。

「芸大和声」の内、CMY に現在実装されている範囲では、パート同士の交叉が許されていない。和声という交叉とは、「各声部の正規の高低の順序が入れ替わること」である。すなわち、同時に演奏される各パートの音を見た時に、ソプラノパートの音がアルトパートの音より低くなったり、テナーパートの音がバスパートの音より低くなってしまうことである。交叉を許さない場合のバス課題の解の数は、平均すると $3,637.14^n$ に減る。

「芸大和声」の1巻ではさらに、隣接するパートの音間距離を制限している。現在の実装範囲では、ソプラノ～アルト間、アルト～テナー間では同度からオクターブ、テナー～バス間では同度から12度の距離が許されている。これも考慮すると、可能な楽曲の数は平均約 $2,044.14^n$ に減る。

CMY では探索の領域を更に制限するために、各パートの音は、その時のバス音が指示する三和音の構成音であることとした。すなわち、バス音がCの音であり、その時の和音がCの和音である場合、残り3パートはCの和音の構成音であるC・E・Gのいずれかを取る必要がある。そうした場合、生成しうる楽曲の平均数は、約 49.45^n 通りに限定される。なお、他の条件下で作曲可能な楽曲の数は、表1に示した。

CMY に現時点で入力できる、「芸大和声」に掲載されているバス課題は52題ある。これらをそれぞれ入力として与え、標準配置の原則を全て利用して作曲した結果、CMY は52題すべてに対して、教科書が示す模範回答を得ることができた。

CMY はあるバス譜に対する許容解をすべて探索しているのではない。標準配置の原則や禁則をすべて適用すると、CMY はバスの音数 n に対して、 $0(8^n)$ の計算オーダで最終的な楽曲を出力する。探索の枝刈りに特に効果がある規則として、現時点で以下の3つが確認できている。

	全音			三和音		
	交叉有り	交叉無し	隣接距離制限	交叉有り	交叉無し	隣接距離制限
一般四声体	$212,960^n$	$80,017^n$	$44,971^n$	$3,350^n$	$1,650^n$	$1,088^n$
バス課題	最大	$5,180^n$	$2,711^n$	180^n	109^n	66^n
	最小	952^n	868^n	100^n	36^n	32^n
	平均(分散)	$9,680^n$	$3,637.14^n$	$2,044.14^n$	152.27^n	75.00^n

表 1：各種条件下で生成しうる楽曲の理論数 (n は楽曲内バスパートの音の数)

Table 1 Total number of songs producible under each condition (n being the number of input bass notes)

- ・基本位置 3 和音の上 3 声の標準配置は、3 種の構成音を 1 個ずつ揃えた密集配分または開離配分である。(すなわち、他の禁則に反しない限り、オクターブ配分などは許さない)
- ・先行・後続両和音の上 3 声の間に共通音がある時には、それを同一声部に保留する。共通音が 2 つある場合には、少なくとも一方を保留する
- ・他の禁則や例外的な和音進行でない限り、連続する和音の上 3 声の配分は一致させる

6. まとめと展望

本研究では、作曲者が一種のルールベースを作成し、それに含まれるルールを、ユーザが自由に取捨選択しながら作曲をしているというモデルをもとに、ルールベースで自動作曲するシステムの開発を目標としている。それに向け、「芸大和声」の諸規則を実装し、与えられたバス譜に上 3 声を追記する作曲システム CMY を実装した。CMY は禁則と標準配置の原則を利用して入力に対する許容解を列挙し、ユーザが指定する評価関数や和声学の推奨則をもとに最終的な出力を決定する。全ての規則を作曲過程に利用した場合、CMY は 49.45^n ほどの解をもつバス譜に対して、 $O(8^n)$ の計算オーダで最終的な出力を決定する。

今後、CMY には第 2 転回位置や 4 音以上の和音を扱う体系を実装し、作曲の可能性を広げる必要がある。また実装しているルールの内、絶対的な条件として設定されているものを減らし、和声学の領域を逸脱した楽曲も作成しうるシステムに拡張したいと考えている。

一方で、制約の緩和には、探索領域の拡大という問題も付随する。CMY は現時点で、解候補を列挙した後にそれらを評価し、ユーザの思考に最も似たものを出力している。今後は作曲過程の段階から、ユーザの意図を反映する枝刈り規則を実装し、探索の効率化を図る必要がある。また、出力結果がユーザの意図や意志をどれだけ反映できているかを定量的に評価することも必要となる。

最後に、実世界の作曲では、バス譜に旋律を加えることよりはむしろ、旋律に「ハモリ」としてバスなどの下 3 声を付記することの方が多い。今後は、その作曲スタイルを模倣したソプラノ課題を実装し、より実践的な作曲システムを作成する。

参考文献

- 1) PGMusic: Band in a Box, <http://www.pgmusic.com/index.html>.
- 2) UJAM: <http://www.ujam.com/>.
- 3) Musicshake: <http://eng.musicshake.com/about>.
- 4) MuTech: 自動作曲システム ACS, <http://www.mu-tech.co.jp/Japanese/Product/acs.html>.
- 5) 江村伯夫, 三浦雅展: 情報技術に基づく作曲の現状, 音響学会誌, Vol.67, No.6, pp.233-238 (2011).
- 6) 嵯峨山茂樹, 酒向慎司, 堀玄, 深山寛: 確率的手法による歌唱曲の自動作曲, システム/制御/情報, Vol.56, No.5, pp.219-225 (2012).
- 7) 勝占真規子, 北原鉄朗, 片寄晴弘, 長田典子: ペイジアンネットワークを用いたコード・ヴォイシング推定システム, 情報処理学会研究報告, 2008-MUS-74, Vol.2008, No.29, pp.163-168 (2008).
- 8) Phon-Amnuaisuk, S. and Wiggins, G. A.: The Four-Part Harmonisation Problem: A comparison between Genetic Algorithms and a Rule-Based System, AISB'99 Symposium on Musical Creativity (1999).
- 9) Cope, D.: Emmy, <http://www.theaftermatter.com/2012/03/artificial-intelligence-composers-can.html>.
- 10) 平田圭二, 青柳龍也: パービーブン: ジャズ和音を生成する創作支援ツール, 情報処理学会誌, Vol. 42, No. 3, pp. 633-641 (2001).
- 11) Gifford, T., Brown, A. R.: Anticipating Timing in Algorithmic Rhythm Generation, Australasian Computer Music Conference, 2010
- 12) 池内友次郎, 島岡譲ら: 和声理論と実習 I,II,III, 別巻, 音楽之友社 (1964).
- 13) Hamanaka, M., Hirata, K. and Tojo, S.: Implementing 'A Generative Theory of Tonal Music, Journal of new Music Research, Vol. 35, No. 4, pp. 249-277 (2006).
- 14) 坂本鐘期, 東条敏: Tonal Pitch Space を用いた楽曲の和声解析, 情報処理学会研究報告, 2009-MUS-80, Vol.2009, No.9, pp.1-6 (2009).
- 15) Makemusic, Inc.: finale, <http://www.finalemusic.com/>.
- 16) Avid Technology, Inc.: Sibelius, <http://www.sibelius.com/>.
- 17) Makemusic, Inc.: musicXML, <http://www.musicxml.com/>.
- 18) fourpartharmony 四声体和声作成支援ツール, <http://code.google.com/p/fourpartharmony/>.
- 19) 三浦 雅展, 山田 真司, 柳田 益造: 四声体和声の音楽美を評価するシステム“MAESTRO”, 日本音響学会誌, Vol. 59, No. 3, pp.131-140 (2003).
- 20) LilyPond, <http://www.lilypond.org/>.

付録

図 4 に CMY の出力結果の例を載せる。これは図 2 に示したバス課題に対する別な出力として CMY が作成した楽曲である。

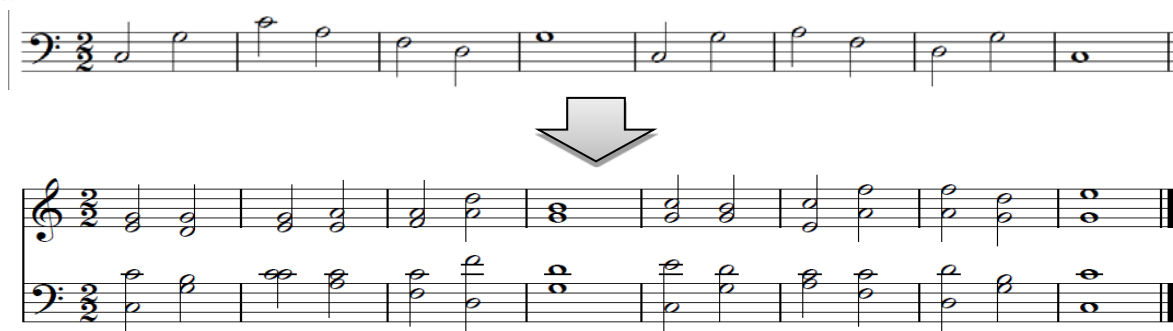


図 4 : CMY の出力例 ([12]第 I 巻 p.41 課題 9-1 に対する出力の一つ)

Figure 4 Example of CMY output.(one possible output four part harmony for example [12] Vol.1 p.41 problem 9-1)