


 原著論文
 

遺伝的アルゴリズムを用いた12音技法に基づく 音列自動生成システム[†]

梶原 悠介*・前田 陽一郎*

本研究では、コンピュータによる作曲の手法として現代音楽の作曲技法である12音技法を用いた作曲システムを提案する。12音技法は、段階的に作曲する手法のためコンピュータでの作曲に適しているという利点がある。12音技法での作曲の第1プロセスである12音音列の生成は、曲の主題や雰囲気を決定的に付ける重要なプロセスである。ここでは、一般的な音楽理論である協音程・不協音程の関係を基にした適応度関数を設計し、GAによる響きのよい音列の探索により12音音列の自動生成を行う。12音音列を生成するシミュレータを作成し、シミュレータが生成した12音音列と人が作成した12音音列の比較アンケートを行うことで本システムの有効性検証を行った。

キーワード：12音技法、遺伝的アルゴリズム、サウンド生成、現代音楽、インタラクティブアート

1. はじめに

近年、人工生命分野において、インタラクティブアートの研究が盛んに行われている。インタラクティブアートとは、観客と作品との相互作用により芸術を形成していく、観客参加型の芸術生成形態である。コンピュータを用いたインタラクティブアートは、人間とシステムとのインタラクション、つまりHCI(Human Computer Interaction)を利用した創作支援システムともいえるものである。

これまでも、ソフトコンピューティングを用いた自動作曲や作曲支援に関する研究は数多く提案されている。中でも遺伝的アルゴリズム(GA)[1]を音楽や作曲に適用した研究例は比較的多い。GAを用いた自動作曲システム[2]をはじめ、対話型遺伝的プログラミングを用いたクラシック音楽のための作曲支援システム[3]、システムの適応度関数評価とユーザによる対話的評価を組み合わせてユーザのイメージを反映させた楽曲を生成する研究[4]、人の評価を基に対話型遺伝的アルゴリズム(IGA)を用いてメロディベースのサイン音を生成するシステム[5]などが提案されている。しかしながら、音楽生成にIGAを用いる場合には、被験者に対する負担の増加が問題となることが知られている。

一方、筆者らの研究室では、メロディを決定する上で重要な音高・音長・音量の同期および非同期制御を大域結合写像(GCM)のカオスパラメータを操作してインタラクティブにサウンド生成を支援するシステムの研究[6-8]を行ってきた。また、ファジィ推論による曲調を考慮した伴奏コードの自動生成[9]やカオスニューラルネットワークを用いて雰囲気を徐々に変化させながら新しい楽曲を生成するシステムの研究[10]等、GA以外のソフトコンピューティングを用いた研究も多く行われている。しかしながら、これらの研究では単純な音楽的制約によって音楽性の破綻を防いでいる場合が多いが、必ずしも生成される楽曲が音楽的であるとは言えない。

このように、作曲という行為全体を1つの問題として扱うことはあまりにも複雑であり、音楽生成や自動作曲を実現することは容易なことではない。そこで本研究では、現代音楽における作曲技法の一つである「12音技法」と呼ばれる比較的シンプルな手法を用いることにより、自動作曲という問題を簡略化し、GAによりメロディを自動的に生成させることを考える[11,12]。「12音技法」[13]とは、1音階に存在する12の音を等しく用いることで無調の音楽を作成する技法である。12音技法によって作成される音楽は無調であるため前衛的な、一般的な作曲としてはやや特殊なものとなるが、無調であり12音を順に使用するという特徴によって独特な雰囲気の楽曲となる。本システムは一般的な音楽としての親しみやすさを目指すものではないが、今後12音音楽の特徴を活かしながらも人間の感性を反映させて作曲を行うシステムの構築を目指している。

[†] Automatic Tone Row Generation System Based on Twelve-tone Technique Used Genetic Algorithm
Yusuke KAJIHARA and Yoichiro MAEDA

* 福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻
Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems, Graduate School of Engineering, University of Fukui

また、12音技法の段階的な作曲プロセスはコンピュータでの計算に向いており、自動作曲を計算機上で容易に実現できる。12音技法で作曲するためにはまず、12の音を用いた音列を作成する必要がある、この音列が曲の主題(テーマ)となる。生成された音列にはリズムや伴奏がなく楽曲とはいえないため、音楽的知識を持たない者が評価を行うのは困難である。

そこで、本研究では一般的な音楽理論である協音程・不協音程の関係を基にした適応度関数を作成し、遺伝的アルゴリズムを用いて協音程を多く含む音列の自動生成を行う。提案手法の有効性検証のため、12音技法の作曲プロセスの基本となる12音音列をGAを用いて自動生成し、人間が生成した12音音列との比較を行ったので、この結果についても報告する。

2. 12音技法と協音程について

コンピュータを用いた作曲または作曲支援に関する多くの研究においては、何らかの音楽理論が用いられている。本研究でもシステムを構築するため、音列を生成および評価するためにいくつかの音楽理論を導入した。以下では、本研究で用いた音楽理論として12音技法や協音程、不協音程について簡単に説明する。

2.1 12音技法

本研究では、12音技法という作曲技法を自動作曲のベースに用いている。本節では12音技法およびその作曲手順について概要を述べる。

2.1.1 12音技法とは?

12音技法(Twelve-Tone Technique)[13]とは、1オクターブ内に存在する12の音を均等に使用する現代音楽における作曲技法である。歴史は長く、1921年にArnold Schönbergが創始したとされる。12音技法によって作曲された音楽を一般に12音音楽と呼び、無調の音楽の一つとされているが、一種の調にも似た統一感を感じる。技法の原型はJosef Matthias Hauerが考案したトロペ(Trope)という音列技法である。

12音音楽の作曲の流れとして、まずオクターブ内の12の音を均等に用いるために、最初にそれらの音を1回ずつ使った音列を作る。この音列が曲の主題となる。はじめに作成した音列を基本形とし、それ以降は移高や反行、逆行等の手法で音列を変形させて繋げていく。そして音列にリズムを付け、旋律として作曲を行う。

音列の移高や反行、逆行等、音列を変形する工程は単純な演算で容易に得ることができるため、コンピュータによる作曲システムに向いている。12の音を

使った組み合わせは、 $12! = 479001600$ 通り作成できるが、そのすべてが人間にとって心地良いわけではない。そこで本研究では、12音音楽作曲で一番重要な要素である基本形を響きが美しいと言われている協音程を用いて自動生成することを目的としたシステムの構築を目指す。

2.1.2 12音技法を用いた作曲手順

以下では、12音技法を用いて作曲する手順について簡単に述べる。1オクターブを構成する音を図1に示す。

- Step1: 12音音列の作成

図1に示した12の音を一回ずつ用いた音列を作成する。12音音列の生成例を図2に示す。また、ここで作成した音列を基本形と呼び、これが曲の主題となる。

- Step2: 基本形の変形

Step1で作成した基本形を変形させる。基本形を変形させたものをある程度の長さになるまでいくつも繋げていく。長さは作曲者が決定する。ここでは、音列同士の繋がりが重視される。音列が繋がる部分の滑らかさや曲の最後となる最終音などが重要になる。これにより主旋律の音が決定する。図3に音列を変形する例を示す。この例は基本形を最後の音から使用する「逆行」という変形方法であり、カノンやフーガなどの様式でも用いられている。

- Step3: テンポ・リズム作成

各音に音価(長さ)を設定する。ここで初めて曲と呼べるものになって、主旋律となる。図4に旋律の一例を示す。



図1 12音技法における使用音



図2 音列作成例(基本形)



図3 音列変形例:逆行(基本形の変形)



図4 12音技法作曲の一例

● Step4: 伴奏・対旋律作成

Step3で完成した主旋律を基に、伴奏付けもしくは対旋律を作成する。現在は伴奏付けよりも旋律と同様に12音技法で作曲した対旋律をつけ、カノンのような様式に曲を仕上げるのが主流である。ここでの対旋律の作成で重要なのは主旋律との関係である。

2.2 協音程と不協音程

2つの音の高さの関係を音程(Interval)と呼び、度(degree)で表す。同じ高さの2つの音を1度と呼び、8度で同じ音名に戻る。音程の度は、五線譜の線と間の上の音符の位置によって決まる。2つの音を同時に響かせることによって調和して美しく響くものと調和しないものがあり、これは2つの音の音程が関係している。美しく響き合う音程を協音程(Consonant interval)と呼び、響きが良くない音程を不協音程(Dissonant interval)と呼ぶ。協音程は響きの美しい程度によって2種類に分類されている。完全に調和する音程は完全協音程、多少不安定であるが調和する音程は不完全協音程と呼ばれている。その他の音程は不協音程とされている。

音程の調和については、2音の周波数の比が関係しており、この関係についてはピタゴラスが最初に研究している。ピタゴラスは、2つの音が明白な音程関係である場合、例えばオクターブ音の周波数比は1:2であるなど周波数比が簡単な整数比になっていることを発見した。一般には2音の周波数比を簡単な整数の比に直した時により簡単な整数になる、もしくは簡単な整数に近似できるほど美しく響くとされている。表1に基準音を中央のドにした場合の周波数および周波数比を簡単な整数の比にしたものと協・不協音程の分類の対応を示す。表内の簡単な整数に直した周波数比は音楽理論で一般に用いられているものである[14]。

和音や和声の理論は同時に鳴る音だけでなく旋律上連続してなる音に対しても考えるべきであるといわれており[16]、メロディをつくる上で連続する音の協音程、不協音程の関係は重要な要素であると考えられる。

表1 ドを基準とした周波数比と協・不協音程

| 音名 | 周波数 (Hz) | 周波数比 | 協・不協音程の分類 |
|-----|----------|-------|-------------|
| ド | 261.63 | 1:1 | 完全1度(完全協音程) |
| ド# | 277.18 | 15:16 | 短2度(不協音程) |
| レ | 293.66 | 8:9 | 長2度(不協音程) |
| レ# | 311.3 | 5:6 | 短3度(不完全協音程) |
| ミ | 329.63 | 4:5 | 長3度(不完全協音程) |
| ファ | 349.23 | 3:4 | 完全4度(完全協音程) |
| ファ# | 369.99 | 32:45 | 増4度(不協音程) |
| ソ | 392 | 2:3 | 完全5度(完全協音程) |
| ソ# | 415.3 | 5:8 | 短6度(不完全協音程) |
| ラ | 440 | 3:5 | 長6度(不完全協音程) |
| ラ# | 466.16 | 9:16 | 短7度(不協音程) |
| シ | 493.88 | 8:15 | 長7度(不協音程) |
| ド | 523.25 | 1:2 | 完全8度(完全協音程) |

3. GAを用いた12音音列生成システム

本研究では、12音技法を用いた作曲プロセスの基本となる12音音列の自動生成を行う。この音列は曲の主題となり、曲の雰囲気・曲調を決定付ける大きな要素となる。しかし、この音列は12の音を羅列したものであってリズムや伴奏、バックパートがある訳ではないため、音列を評価するのは困難である。ここでは、基礎的な音楽理論である協音程・不協音程の関係をjijieして適応度関数を構成し、遺伝的アルゴリズムを用いてより響きが良い、つまり聞きやすい音列の探索を行う。

3.1 音列の遺伝子表現

遺伝子の表現は、12音を文字列で表して遺伝子長を12とする。遺伝子表現を0~11として、ドを0、ド#を1、レを2という様にド~シを0~11に割り当てる。12音技法の音列生成過程では、12の音を必ず1回ずつ使った音列を作成しなければならないため、同一の音つまり同じ遺伝子が重複してはならない。本研究では12音音列1つを遺伝子1個体として、集団サイズは親10個体と子10体の20個体とした。図5に使用音と遺伝子表現の対応を、図6にコーディングの一例を示す。

3.2 音列の適応度関数

本システムでは、12音音列を構成する各音の前後の音程関係によって評価を行い、協音程をより多く含むものに高い評価を与えるものとした。ここでは評価のために協音程・不協音程と周波数比の関係を基に不協和の度合いを定義した。

2音の周波数比をより簡単な整数比で表せるほど音が美しく響くことから、音列の*i*番目と(*i*+1)番目の2音の表1で示した周波数比を $\alpha_i : \beta_i$ と置き、その

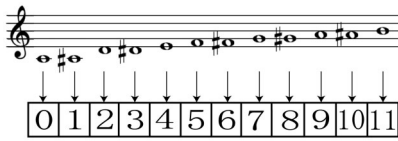


図5 使用音列と遺伝子表現の対応

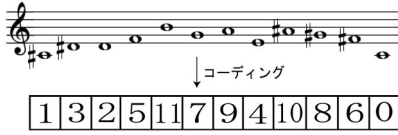


図6 コーディングの一例



図7 音列と h_i および x_i の関係

整数の和を百分率で表したものを $(\alpha_i + \beta_i)/100$ を不協和の度合い A_{x_i} と定義する. そして, 不協和の度合いの逆数を取り, 整数を四捨五入したものを各音高差の協和度 B_{x_i} とする.

これらを基に設計した適応度 f_1 を式(4)に, また図7に音列と h_i および x_i の関係を示す. 図8に各音高差 x_i における不協和の度合い A_{x_i} , 図9に各音高差 x_i における協和度 B_{x_i} の関係をグラフで示した. これを見ると, ある音高差になると極端な不協和となることがわかる. このような音高差をなるべく避けて音列が生成される方が望ましいメロディになることになる. 表2に音高差と周波数の最小整数比, 不協和の度合い, 協和度との対応を示す.

$$x_i = |h_{i+1} - h_i| \quad (1)$$

$$A_{x_i} = \frac{\alpha_i + \beta_i}{100} \quad (2)$$

$$B_{x_i} = \frac{1}{A_{x_i}} \quad (3)$$

$$f_1 = \sum_{i=0}^{11} B_{x_i} \quad (4)$$

但し,

i : 12音音列の音順(0~11)

h_i : i 番目における音高

x_i : i 番目と $(i+1)$ 番目の音高差

A_{x_i} : 音高差 x_i のときの不協和の度合い

B_{x_i} : 音高差 x_i のときの協和度

f_1 : 12音音列の適応度

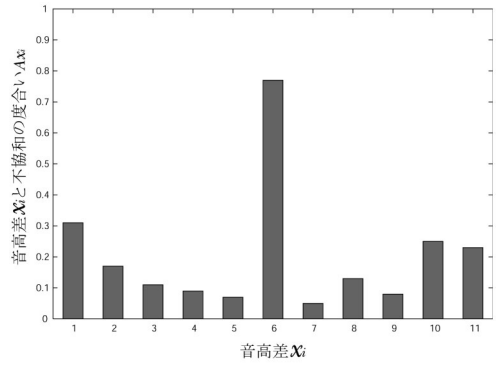


図8 音高差と不協和の度合い

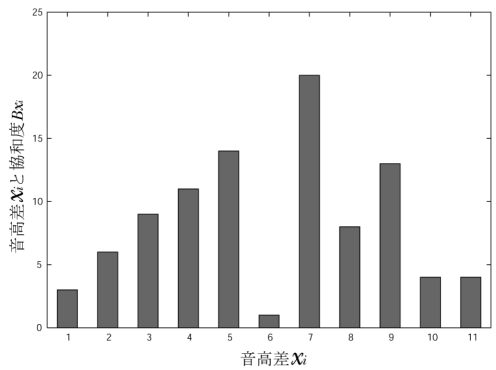


図9 音高差と協和度

表2 音高差と周波数比, 不協和の度合い, 協和度

| 音高差 x_i | 周波数比 $\alpha_i:\beta_i$ | 不協和の度合い A_{x_i} | 協和度 B_{x_i} |
|-----------|-------------------------|-------------------|---------------|
| 1 | 15:16 | 0.31 | 3 |
| 2 | 8:9 | 0.17 | 6 |
| 3 | 5:6 | 0.11 | 9 |
| 4 | 4:5 | 0.09 | 11 |
| 5 | 3:4 | 0.07 | 14 |
| 6 | 32:45 | 0.77 | 1 |
| 7 | 2:3 | 0.05 | 20 |
| 8 | 5:8 | 0.13 | 8 |
| 9 | 3:5 | 0.08 | 13 |
| 10 | 9:16 | 0.25 | 4 |
| 11 | 8:15 | 0.23 | 4 |

3.3 遺伝子操作

本研究における遺伝的アルゴリズムで扱う問題は順序問題に分類できる. そのため, 交叉や突然変異に代表される遺伝子操作は通常の操作と異なる特殊な手法を用いた.

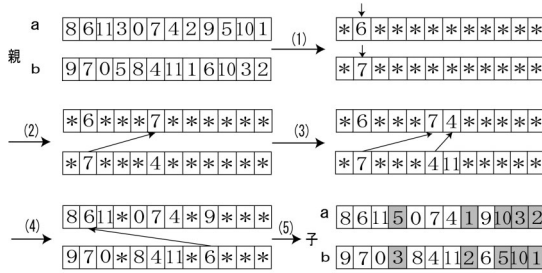


図10 循環交叉の処理の流れ

3.3.1 交叉

本研究における遺伝子には順序列である音列を扱うため、交叉の手法には循環交叉を用いた。これは Oliver らが提案した手法[15]であり、巡回セールスマン問題などの順序最適化問題や実数値問題を遺伝的アルゴリズムで扱う際に用いられている交叉手法の1つである。循環交叉処理の手順を以下に示す。また、図10に循環交叉の処理ごとの様子を示す。例は対立遺伝子を0~11とする遺伝子である。

1. 交叉点の決定

まず交叉する親2個体(a, b)を選択後、ランダムに遺伝子座を1点決定する。そしてその位置にある両親の遺伝子を両子供がそのままそれぞれ継承する。(処理(1))

2. 遺伝子の受け継ぎ

処理(1)で決定した位置の親bの遺伝子が親aの遺伝子のどの遺伝子座にあるかを調べ、その位置の遺伝子を処理(1)と同様に継承する。(処理(2))

3. 処理の繰り返し

処理(2)と同様の操作を処理(1)で決定した親の遺伝子座の値に戻るまで繰り返す。(処理(3),(4))

4. 残った遺伝子の継承

残った遺伝子は親bの遺伝子を子a、親aの遺伝子を子bに継承する。結果、遺伝子を重複させない両遺伝子の特徴を継承した2個体が生成できる。(処理(5))

3.3.2 突然変異

ここでも12音音列の特徴を崩さないようにするため、遺伝子操作後に同一の遺伝子が重複することを避け、突然変異には交換・逆位という突然変異操作を用いる。図11と図12に交換・逆位の突然変異操作の概略を示す。

● 交換

交換とは、遺伝子上の適当な2つの遺伝子座を入れ替える操作である。

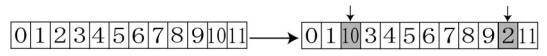


図11 交換

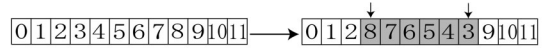


図12 逆位

● 逆位

逆位とは、遺伝子上の適当な2つの遺伝子座の間の配列を逆にする操作である。

4. シミュレーション実験

12音音列を生成し、適応度関数を基に12音技法に基づいた作曲を行うための音列を探索するシミュレータを作成し、音列生成実験を行った。また有効性検証のため、評価実験をアンケート方式で行った。

4.1 12音音列生成シミュレータ

自作したシミュレータの概観を図13に、シミュレーション実験のフローチャートを図14に示す。また、以下に作成したシミュレータが行う処理の流れを示す。

● Step1: 集団の初期化

初期集団として20個体生成し、適応度関数をもとに各個体の評価を行う。エリート保存戦略によって評価結果を基に適応度の高い10個体を次世代の個体として残す。

● Step2: 親の選択

ルーレット選択によって交叉を行う親を選択する。子個体を10個体生成するため、親は5組選ぶ。

● Step3: 交叉

選ばれた2個体を交叉率に基づいた確率で循環交叉を行う。交叉を行わない場合はそのまま子個体としてコピーする。親個体5組に対して行い、子個体を10個体生成する。

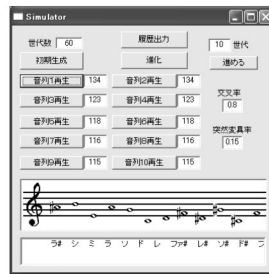


図13 シミュレータ

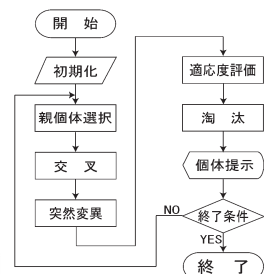


図14 フローチャート

- Step4：突然変異
生成された各子個体に対して、設定されている突然変異率に基づいた確率で突然変異操作を行う。
- Step5：適応度評価
出力された子個体の適応度評価を適応度関数を基に行う。
- Step6：淘汰
親個体と生成された子個体を合わせた20個体から、Step1と同様に適応度の高い10個体を次世代の個体とする。
- Step7：個体提示
親となる個体をインターフェース上に提示する。
- Step8：終了条件
世代交代操作ごとに音列を聞くことが可能なため、ある程度の世代ごとに音列を聞き、満足する音列が生成されていなければStep2～8を繰り返す、満足する音列が生成されれば終了とする。

4.2 音列生成実験

前節で述べたシミュレータを用いて、3.2節で設定した適応度関数により協音程を使用した音列の自動生成を行った。加えて、本研究で提案した適応度関数の比較検討実験として、協音程の関係と真逆の不協音程の関係を用いた適応度関数を用意し、不協音列の生成シミュレーションを行った。

一般の音楽理論として、協音程や協和音は「明るい」や「美しい」、「穏やか」といったイメージを与えるとされ、実際の曲中では不協和から協和に移ることによる緊張解除や弛緩、または興奮などの役割を持つ。逆に、不協和音とは決して不快な和音を意味するのではなく、不快な和音を表す言葉には「カコフォニー」という別の専門用語がある。曲中における乱れたリズムや和音からずれた旋律、不協和音を聴くことで人は「不安」や「緊張」、「恐れ」といったイメージを受ける。

現在一般に普及している音楽の主流は大衆音楽であり、これらの効果を目的とした音楽は極めて少なく、曲を盛り上げるための役割としてのみ一部用いられることが多い。しかし、古典音楽におけるオペラや背景音楽においては劇中の「緊張」や「不安」といったイメージを与える目的で不協和音などを効果的に使用した音楽が作曲される。これらのことから、協和音程による適応度関数を用いることで、「明るい」や「穏やか」、不協音程を用いた適応度関数によって「緊張」、「暗い」といったイメージを与える曲を作曲するための音列が生成されることが期待できる。

ただし、今回の実験で生成される音列は、聞くことによって上記のような具体的なイメージを感じるよう

なものではない。一般的に、音楽とはメロディ、和音、リズムの三要素から成り立ち、12音技法によって作曲される音楽においても同様で音列をもとにして作成するメロディ、リズム、伴奏によって具体的な雰囲気、イメージが表現されていく。しかし、12音技法においてはメロディ作成に制限があるため、和音とリズムの役割が大きくなる。和音とリズムについては今後12音技法に基づいた作曲システムを構築していく上での重要な課題であると考えている。

前節での協和度 Bx_i を基に不協和度 Cx_i を新たに定義して評価を行う。式(5)のように協和度 Bx_i の最大値との差分から12音の総和をとって式(6)のように不協音列の適応度 f_2 とした。ここで、不協和の度合い Ax_i を不協音程の評価値として用いず、新たに不協和度 Cx_i を定義した理由は、図8のように Ax_i では各値の差が非常に大きく、GAで探索するための評価値に向いていないと考えたためである。図15に音高差と新たに定義した不協和度 Cx_i のグラフを示す。

$$Cx_i = B_{max} - Bx_i \tag{5}$$

$$f_2 = \sum_{i=0}^{11} Cx_i \tag{6}$$

本実験では交叉率を0.8、突然変異率を0.15として1000世代までの探索を行った。突然変異率を0.15と高く設定した理由は、高い交叉率を少しでも緩和するための多様性の向上と小さい集団サイズによる局所解への収束を防ぐことが目的である。交叉では親の遺伝子の順を受け継ぐため人間が聴いた場合に似た音列というイメージを強く受けるため、突然変異率を高くすることで多様な種類の音列を得ることができる。今回使用した交叉率と突然変異率は、事前の異なるパラメータ設定による音列生成実験において収束が早く、また同じ最大適応度でも異なるパターンの音列が生成でき

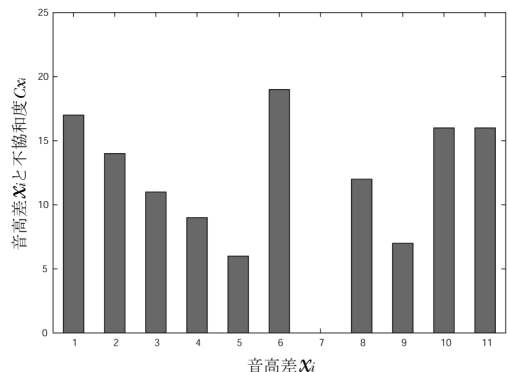


図15 音高差と不協和度

た値である。

また、今回のGAにおいて集団サイズを20と小さく設定したのは、本システムは将来的にインタラクティブな作曲を行えるようなシステムを考えて設計しているためである。さらに今回の場合、集団サイズを大きくすると探索に要する時間が長くなりユーザの待つ時間が増える、出力される音列の内容を確認する作業が増えるなど、被験者の負担が大きくなる。これは、人間が使用するシステムにおいて重要な問題と考えられる。したがって、本システムのGAでは集団サイズを親10個体、子10個体の計20個体と制限して実験を行った。

4.3 実験結果

協音程・不協音程によるそれぞれの適応度関数を用いて1000世代までの探索を10回行った。協音程による適応度関数を用いた10回の実験における探索結果の

平均を図16に、10回の実験で生成された最も適応度の高い協音列10個体を図17に示す。また、不協音程による適応度関数を用いた10回の実験における探索結果の平均を図18に、10回の実験で生成された最も適応度の高い不協音列10個体を図19に示す。グラフは世代毎の集団内における最大適応度と集団の平均適応度を示す。グラフ内の GA_Max はGAで探索した12音音列の世代ごとの最大適応度、GA_Average は平均適応度を示している。

各グラフ内の適応度の値は適応度の最大値(協音列は184、不協音列は199)に対する個体の適応度の割合によって適応度が0~1になるように正規化した値である。これは、不協和度が平均的に協和度よりも高い値であり、不協和度に基づく生成結果の適応度の値が協和音列に比べて高くなるため、適応度の最大値を同じ値にすることを目的として正規化を行った。

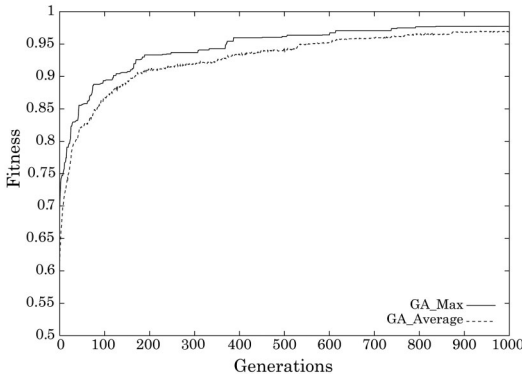


図16 協和音列生成シミュレーション結果

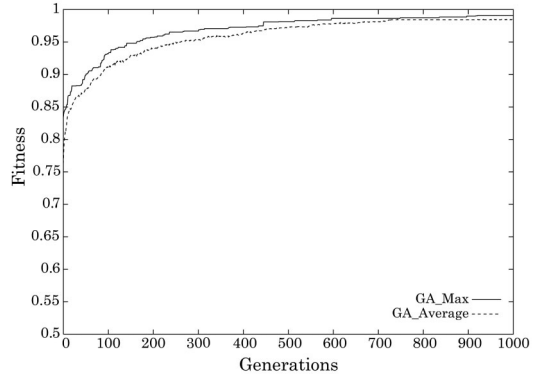


図18 不協音列生成シミュレーション結果



図17 GAによって生成された協和音列

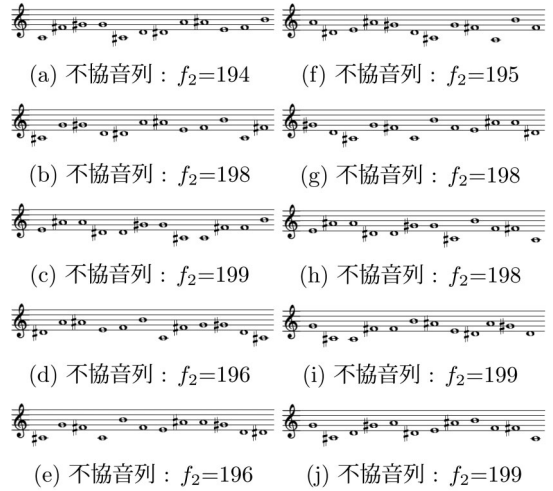


図19 GAによって生成された不協音列

4.4 生成音列比較評価

これまでに提案した協音程・不協音程の関係を基にした適応度関数とそれによって生成された音列の評価のため、アンケートによる比較評価を行った。ここでは、評価の方法とその結果について報告する。

メロディらしさと響きの良い音列を意識した12音音列を著者が作成して本研究で提案した適応度関数を用いて評価を行い、適応度を比較した。図20に比較対象である自作した協和音列10個体を示す。 f_1 は式(4)で提案した適応度関数によって求めた適応度である。

さらに、図17に示したGAによって生成された音列と、図20で示した自作した音列から5個体ずつ選び、20代男性21名にアンケート方式の比較評価を行った。GAによって生成した音列は1000世代探索を行えば適



図 20 作成した協和音列



図 21 作成した不協音列

応度がほぼ等しい値になるため、今回は学習後の個体から無作為に5個体を選び、自作した音列については主観を基に5個体を選んだ。

本研究で提案した協音程による適応度関数を評価するために「どちらの音列がより響きが良いか」、また生成された音列を評価するため「どちらの音列がよりメロディらしく聞こえるか」という質問を用いた。比較には、よりメロディらしく聞こえる音列、より響きが良い音列を選ぶという一対比較法で評価を音列5組計10個体に対して行った。但し、どちらが良いといえない場合にはどちらも選ばないように指示した。同様に、メロディらしさと不協音程を意識した12音音列を著者が作成して4.2節で新たに設定した不協音程による適応度関数を用いて評価し、適応度を比較した。図21に比較対象である自作した不協音列10個体を示す。

提案した不協音程による適応度関数を評価するために「どちらの音列がより響きが悪いか」と協和音列比較評価と同様の「どちらの音列がよりメロディらしく聞こえるか」という質問を用いた。

ひとつの音列は12音あるため、1音を四分音符の長さで鳴らす場合3小節分の長さとなり、音列中にメロディのさらに小さい単位であるフレーズと認識できるような部分音列が存在すればメロディらしさを感じる。今回は4.2節で述べたとおり音列の段階で「明るい」「楽しい」といった感性語での評価はできないため、フレーズレベルでメロディらしさを感じるかという評価を行った。

音列の評価手順は、まず評価対象であるGAによって生成された音列と人間が作成した音列、2組の音列を被験者に提示する。どちらがGA、人間によって作成された音列かは伝えない。被験者は提示されたそれぞれの音列を聞いて評価を行い、これを5組の音列に対して繰り返す。

4.5 比較評価結果

自作した協和音列とGAによって生成された協和音列を協音程による適応度関数で評価した比較結果を図22に、同様に自作した不協音列とGAによる不協音列を不協音程を基にした適応度関数で評価した比較結果を図23に示す。グラフ内の破線 Human_Max, Human_Average はそれぞれ自作した12音音列の最大適応度と平均適応度を示している。表3に協和音列の比較アンケート結果を、表4に不協音列の比較アンケート結果を示す。

各評価項目の「GA音列」の数値はGAで生成された音列を支持した人数、「自作音列」は人間が作成した音列を支持した被験者数を意味している。被験者の人数が

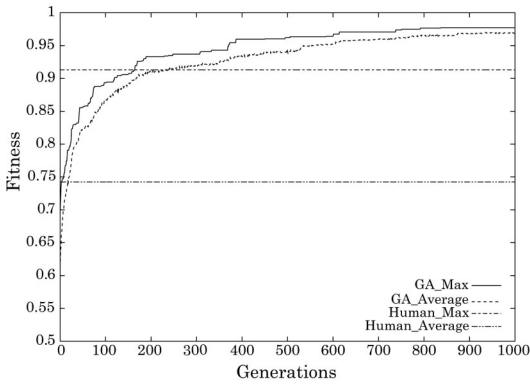


図22 協和音列適応度比較

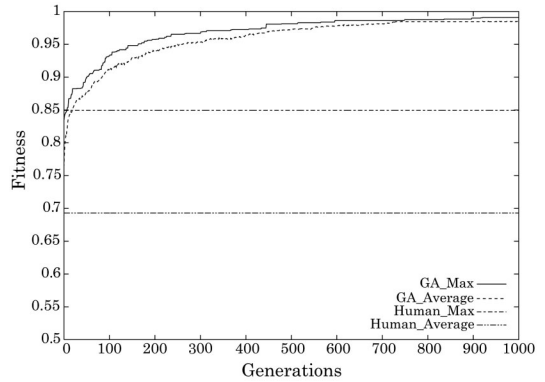


図23 不協音列適応度比較

表3 協和音列比較アンケート結果

| 比較対象音列 | メロディらしい | | 響きが良い | |
|---------------|---------|------|-------|------|
| | GA音列 | 自作音列 | GA音列 | 自作音列 |
| 図17(a)と図20(b) | 11 | 9 | 9 | 10 |
| 図17(j)と図20(h) | 13 | 5 | 14 | 4 |
| 図17(g)と図20(f) | 9 | 7 | 17 | 4 |
| 図17(d)と図20(d) | 10 | 9 | 13 | 8 |
| 図17(b)と図20(g) | 16 | 5 | 12 | 3 |
| 合計 | 59 | 35 | 65 | 29 |

表4 不協音列比較アンケート結果

| 比較対象音列 | メロディらしい | | 響きが悪い | |
|---------------|---------|------|-------|------|
| | GA音列 | 自作音列 | GA音列 | 自作音列 |
| 図19(j)と図21(a) | 10 | 8 | 15 | 6 |
| 図19(a)と図21(f) | 7 | 11 | 12 | 9 |
| 図19(g)と図21(e) | 19 | 2 | 10 | 11 |
| 図19(c)と図21(g) | 21 | 0 | 13 | 8 |
| 図19(e)と図21(j) | 13 | 6 | 4 | 15 |
| 合計 | 70 | 27 | 54 | 39 |

21人のため評価項目の「GA音列」と「自作音列」の評価の合計は最大21である。どちらの音列も評価ができない場合はどちらも選ばないように指示した。

4.6 考察

協音程および不協音程を基にした適応度関数を用いて生成された各音列は、適応度が最大値になっていても内容の異なる音列が生成できており、毎回学習が収束しても違う音列が生成されるため多様性を維持できていると考えられる。

自作した音列とGAによって生成された音列を適応度関数を用いて比較した結果、協和音列の比較結果については図22を見ると初期の世代においては自作した音列の方が平均適応度、最大適応度共にGA音列より高いが、数10世代以降はGA音列の方が自作した音列の平均適応度より高くなっている。最大適応度に関しても200世代以降はGAによる音列の方が高くなっている。また不協音列の比較結果においても図23より、GAによって生成された音列は初期の世代においても平均適応度、最大適応度共に自作した音列より高い。よって、提案システムによる自動生成の方がより協音程・不協音程の音列をうまく生成できていることが確認できた。

比較アンケートの結果を表3、表4に示す。表の数値は各音列を支持した被験者数である。結果としてはGAによって生成された音列の方がメロディの様に聞こえるという意見が多かった。協音程による適応度関数で生成した音列は、「どちらの音列がよりメロディらしいか」「どちらの音列がより響きが良いか」の質問に対して、各音列の比較において自作した音列と同等、もしくは自作した音列より良い音列として選ばれるという結果が得られた。よって、協音程による適応度関数を用いた音列の自動生成手法で人間と同程度もしくはよりメロディらしい音列を生成できることが分かった。不協音列の比較結果は、メロディの様に聞こえるという意見は多かったが、合計では響きが悪いという意見は大差がなかった。音列ごとの比較をみても、音列によってGA音列の方が良いという回答と自作音列の方が良いという回答が混在する結果となり、響きの悪い音列の生成については適応度関数の意図する結果は得られにくいこともわかった。しかし「より響きが悪い音列」における各音列ごとの比較結果を見ると、例外的な図19(e)と図21(j)の評価結果を除くとほぼ同等以上であるため、一概に適応度関数と対応していないとはいえないと考えられる。「よりメロディらしい音列」に関しては自作音列よりGA音列のほうが

メロディらしいという意見が多く得られた。中には被験者全員がメロディらしいと選んだ音列もあり、良好な結果であったと考えられる。

加えて、アンケート評価のそれぞれの評価項目に対して符号検定を行ったところ、P値(有意確率)がそれぞれ協和音程のメロディらしさでは0.0178、響きのよさでは0.0054、不協音程のメロディらしさでは0.0002と3項目において有意差が見られた。しかし、個々の音列においての検定ではばらつきがあり、今後、音形の反復や音階の形などの要素を評価に組み込むなど、適応度関数をさらに改良する余地があると考えている。生成した音列がメロディのように聞こえるということは12音技法における音列生成にとって非常に重要であり、生成された不協音列を12音技法に基づいた作曲に用いることが十分可能であるといえる。

さらに、本研究で用いたGAでは遺伝子が0~11の順序列の組合わせであったため、ビット列(遺伝子長)が通常のGAに比べて非常に少なく、GA探索にかかる時間は1000世代の探索でも1秒程度、複数の音列を生成する場合でも10個体生成するのに1分もかからなかった。しかしながら、人間が音列をメロディらしさや音程などを考慮して音列作成する場合、例えば著者が音列を1個体作成するのに約5分程度かかった。このように、音列の自動生成手法は人間が音列を作成するよりも圧倒的に短い時間で生成できることも有効性の一つである。

5. おわりに

本研究では、12音技法による自動作曲手法の基礎研究として、GAを用いた音列の自動生成手法を提案した。また、適応度関数を作成し、実際に音列の自動生成を行った。さらに有効性検証のため比較アンケートを行い、良好な結果が得られた。これにより本研究で提案した手法で音列の自動生成が可能ことが確認され、今後、12音技法に基づいた自動作曲システムを構築する上での基本システムができたと考えている。

今回提案した協音程の適応度関数で学習した場合であれば、3度、4度、5度、6度の音高差によって構成された音列が生成される。この音高差はI、VI(和音記号)の内音の音高差のため、学習後の音列には部分的に和音の構成音が並びやすくなっている。このため、和音の要素に関しては今回の適応度関数で評価できたと考えている。さらに、音階を構成するような部分音列の評価に関してはメロディ創作における重要な要素であるが今回の適応度関数では評価していないため、後は複数の部分音列の評価を考えていく予定である。

本研究で構築した音列生成システムが行う音列の生成は12音技法に基づく作曲の第1ステップであり、曲として完成させるためにはまだ多くの処理を行わなければならない。今後は、音列の変形と結合、リズム作成、対旋律作成などを行っていく予定であるが、音列の変形と結合に関しては変形アルゴリズムを用意しておき、基本形を変形させた変形音列を複数生成させればよい。コンピュータによる自動計算によってこのような単純な変形を行うことは比較的容易であり、人間による作曲に比べて時間を大幅に短縮できる可能性がある。

しかしながら、結合の際に実際の12音音楽の作曲で重視される要素は、音列同士のつながりの滑らかさや全体の音のまとまり、曲の最後にあたる部分の自然さなどである。これらは人間の感性が無意識のうちに感じ取って評価されるもので、コンピュータによる評価の完全な自動化は極めて困難である。よって人間による評価を少なからず含めることが望ましいと考えている。今後はシステムの統合を行い、12音技法に基づいた作曲支援システムの構築を目指していきたい。

参考文献

- [1] J.H.Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems," University of Michigan Press, MIT Press (1992)
- [2] 今井繁, 長尾智晴, "遺伝的アルゴリズムを用いた自動作曲," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.98, No.58, pp.59-66 (1998)
- [3] 安藤大地, P.Dahlstedt, M.G.Nordahl, 伊庭斎志, "対話型GPを用いたクラシック音楽のための作曲支援システム," 芸術学会論文誌, Vol.4, No.2, pp.77-87 (2002)
- [4] 畦原宗之, 海老原祐, 鬼沢武久, "作り手のイメージを反映させた楽曲生成システムに関する研究," 感性工学研究論文集, Vol.1, No.2, pp.66-72 (2001)
- [5] 三木光範, 廣安知之, 織田博子, "対話型遺伝的アルゴリズムを用いたサイン音の生成," 情報処理学会第67回全国大会講演論文集, 5M-5 (2005)
- [6] 柴田瑞樹, 前田陽一郎, "大規模カオスを用いたカオティックサウンドの生成手法," 第11回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp.1-4 (2001)
- [7] 前田陽一郎, 丹羽俊明, 山本昌幸, "大域結合写像によるインタラクティブカオティックサウンド生成システムおよび音楽的要素の導入," 日本知能情報フェジ学会誌, Vol.18, No.4, pp.507-518 (2006)
- [8] 宮下滋, 前田陽一郎, "インタラクティブGAを用いたカオティックサウンド生成システム," 第23回フェジシステムシンポジウム, pp.196-199 (2007)
- [9] 徳丸正孝, 文室晋一, 村中徳明, 今西茂, "フェジ推論による曲調を考慮した伴奏コードの自動生成," 電子情報通信学会総合大会, pp.342-343 (1997)
- [10] 徳丸正孝, 村中徳明, 今西茂, "[記憶と忘却]を繰り返し発想し続けるシステムー記憶パターン更新型カオスニューラルネットワークと作曲システムへの応用ー,"

- 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.19, No.3, pp.299-312 (2007)
- [11] Y.Kajihara, Y. Maeda, "Automatic Generation of Tone Row Used Genetic Algorithm Based on Twelve-tone Technique," Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2008), pp.469-474 (2008)
- [12] 梶原悠介, 前田陽一郎, "12音技法に基づく遺伝的アルゴリズムによる音列の自動生成," 第24回ファジィシステムシンポジウム, pp.604-609 (2008)
- [13] J.Rufer, 入野義郎, "12音による作曲技法," 音楽之友社 (1957)
- [14] 黒澤隆朝, "音楽講座 楽典," 音楽之友社 (1947)
- [15] I.M.Oliver, D. J.Smith, J.R.C.Holland, "A study of Permutation Crossover Operators on the Traveling Salesman Problem," Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, pp.224-230 (1987)
- [16] J.P.Kirnberger, 東川清一 "純正作曲の技法," 春秋社 (2007)
- (2009年3月5日 受付)
(2009年8月16日 採録)
- [問い合わせ先]
〒910-8507 福井県福井市文京3-9-1
福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻
前田 陽一郎
TEL: 0776-27-8050
FAX: 0776-27-8050
E-mail: maeda@ir.his.u-fukui.ac.jp

 著者紹介



かじはら ゆうすけ
梶原 悠介 [非会員]

2008年福井大学工学部知能システム工学科卒業。同年、同大学大学院工学研究科知能システム工学専攻博士前期課程入学。現在に至る。



まえだ よういちろう
前田 陽一郎 [正会員]

1981年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1983年同大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年、三菱電機(株)入社。中央研究所、応用機器研究所、産業システム研究所を経て、1989年から1992年まで通産省技術研究組合国際ファジィ工学研究所(LIFE)へ出向。1995年より大阪電気通信大学工学部経営工学科を経て、総合情報学部情報工学科助教授、博士(工学)。1999年から2000年までカナダ・ブリティッシュコロンビア大学(UBC)客員研究員。2002年福井大学工学部知能システム工学科助教授、2007年同大学大学院工学研究科知能システム工学専攻教授。現在に至る。主として、ソフトコンピューティング手法による自律ロボットの知能化研究、および人とロボットの双方向インタラクションに関する人間共生システム研究に従事。計測自動制御学会、日本ロボット学会、人工知能学会、日本感性工学会などの会員。

Automatic Tone Row Generation System Based on Twelve-tone Technique Used Genetic Algorithm

by

Yusuke KAJIHARA and Yoichiro MAEDA

Abstract :

In this research we propose a music composition system based on Twelve-tone Technique that is a music composition technique of the contemporary music, as the composition method by the computer. Twelve-tone Technique has the advantage that it is suitable for the composition of computer music because it is a technique to compose the music step by step. Making of the twelve-tone row, which is the first process of the Twelve-tone Technique, is an important process to determine the subject and atmosphere of the music. In this research, we design the fitness function based on the relation between the consonance interval and dissonant interval that are a part of general musical theory, and perform the automatic generation of twelve-tone row by searching the consonance tone row with GA. We constructed the simulator that generates twelve-tone rows and confirmed the effectiveness of this system by executing the comparison questionnaire of twelve-tone rows made by the simulator and human.

Keywords : Twelve-tone Technique, Genetic Algorithm, Sound Generation, Contemporary Music, Interactive Art

Contact Address : **Yoichiro MAEDA**

*Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems, Graduate School of Engineering, University of Fukui
3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507, JAPAN*

TEL : 0776-27-8050

FAX : 0776-27-8050

E-mail : maeda@ir.his.u-fukui.ac.jp