

A3-2 遺伝的アルゴリズムを用いた 12 音技法に基づく 自動作曲手法に関する研究

福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻 進化ロボット研究室
梶原 悠介 (指導教員：前田 陽一郎)

1. 緒言

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。コンピュータを用いたインタラクティブアートは、人間がコンピュータと対話的にコミュニケーションしながら望みの作品を作り上げる人間共生システムの代表的な研究分野である。

本研究室ではコンピュータを用いたインタラクティブアートの研究として、大域結合写像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を生成するシステムの研究 [1] を行っている。またこれまでに提案されている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において、遺伝的アルゴリズム (GA) を適用した研究例は比較的多い。GA を用いた作曲システム [2] や、システムの評価とユーザによる対話的評価を組み合わせ、ユーザのイメージを反映させた楽曲を生成する研究 [3] などが提案されている。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る。そこで本研究では、現代音楽における作曲技法の一つ「12 音技法」[4] を用いて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生成させる手法を提案する [5]。12 音技法とは、Arnold Schönberg により創始され、1 音階に存在する 12 の音を等しく用いることで無調音楽を作成する技法である。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いると考えられる。12 音技法で作曲するためには第 1 プロセスとしてまず、1 音階内すべての 12 の音を用いた音列の作成を行う。12 音技法における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、GA を用いて音列の自動生成を行う手法を提案する。さらに第 2 プロセスとして、生成された音列にリズムを付加するため、GA によるリズム生成手法も提案する。リズムの評価を行う適応度関数は前後の音の音価の関係によって設定し、学習によるリズムの獲得を試みる。

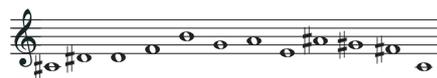
2. 12 音技法

本研究では音列を生成および評価するため、いくつかの音楽理論を用いている。12 音技法とは、1 音階に存在する 12 の音を均等に使用して作曲を行う、無調音楽の作曲技法である。以下では、12 音技法を用いて作曲する手順について述べる。

- Step1 : 12 音音列の作成

1 オクターブに存在する 12 の音を一回ずつ用いた音列を作成する。12 音音列の例を図 1(a) 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 (テーマ) となる。

- Step2 : 基本形の変形・結合
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楽曲としての長さになるまでいくつも繋げていく。これにより主旋律の音が決定する。図 1(b) に音列を変形する例 (逆行型) を示す。
- Step3 : テンポ・リズム作成
各音に音価 (長さ) を設定する。ここでメロディ、主旋律の完成となる。図 1(c) に旋律の一例を示す。
- 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。



(a) 音列作成例 (基本形)



(b) 音列変形例：逆行形 (基本形の変形)



(c) 音列の結合とリズムの作成例

図 1: 12 音技法による作曲例

3. GA を用いた 12 音音列生成手法

本章では、本研究で提案する 12 音技法を用いた作曲システムの第 1 プロセスである 12 音音列の自動生成手法について説明する。ここで生成された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。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言われている。よって、メロディを作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。

3.1 協和度および不協和度の定義

本研究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比率を定義した。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 音の周波数比

を $\alpha_i:\beta_i$ と置き、その整数の和を百分率で表したものを不協和比率 A_{x_i} と定義する (式 (2) 参照)。そして、不協和比率の逆数を取り、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 (式 (3) 参照)。式 (4) のように協和度の 12 音の総和を適応度 f_1 とした。さらに、協和度 B_{x_i} を基に不協和度 C_{x_i} を新たに定義して評価を行う。式 (5) のように協和度 B_{x_i} の最大値との差分から 12 音の総和をとって式 (6) のように不協和度の適応度 f_2 とした。また図 2 に音列と h_i および x_i の関係を示す。表 1 に音高差と周波数の最小整数比、不協和比率、協和度、不協和度との対応を示す。

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

$$A_{x_i} = \frac{i + 1}{100} \quad (2)$$

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

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

$$C_{x_i} = B_{max} - B_{x_i} \quad (5)$$

$$f_2 = \sum_{i=0}^{11} C_{x_i} \quad (6)$$

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 のときの不協和比率

B_{x_i} : 音高差 x_i のときの協和度

C_{x_i} : 音高差 x_i のときの不協和度

f_1 : 12 音音列の適応度

f_2 : 12 音音列の適応度

表 1: 音高差と周波数比、不協和比率、協和度、不協和度

音高差 x_i	周波数比 $\alpha_i:\beta_i$	不協和比率 A_{x_i}	協和度 B_{x_i}	不協和度 C_{x_i}
1	15:16	0.31	3	17
2	8:9	0.17	6	14
3	5:6	0.11	9	11
4	4:5	0.09	11	9
5	3:4	0.07	14	6
6	32:45	0.77	1	19
7	2:3	0.05	20	0
8	5:8	0.13	8	12
9	3:5	0.08	13	13
10	9:16	0.25	4	16
11	8:15	0.23	4	16



図 2: 音列と h_i および x_i の関係

3.2 音列生成実験

3.1 章で定義した適応度関数により協音程、不協音程を使用した音列の自動生成実験を行った。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。協音程による適応度関数を用いた探索結果と自作した協和音列の比較結果を図 4 に、不協音程による適応度関数を用いた探索結果と自作した不協音列の

比較結果を図 5 に示す。実験で生成された最も適応度の高い協和音列、不協音列の楽譜を図 3 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。グラフ内の一点鎖線 Human_Max は人間 (著者) 自作した 12 音音列の最大適応度、二点鎖線 Human_Average は平均適応度をそれぞれ示している。

加えて、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協和音列、不協音列の評価のため、アンケートによる比較評価実験を行った。協音程と不協音程を意識した 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。さらに、GA によって生成された音列と、自作した音列から 5 個体ずつ選び、20 代の被験者 21 名にアンケート方式の比較評価を行った。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」、協和音列の比較については提案した協音程による適応度関数を用いて評価するために「どちらの音列がより響きが良いか」という質問を用いた。また、不協音列の比較実験では不協音程による適応度関数を用いて評価するために「どちらの音列がより響きが悪いか」という質問を用いた。



(a) 協和音列



(b) 不協音列

図 3: GA によって生成された音列例

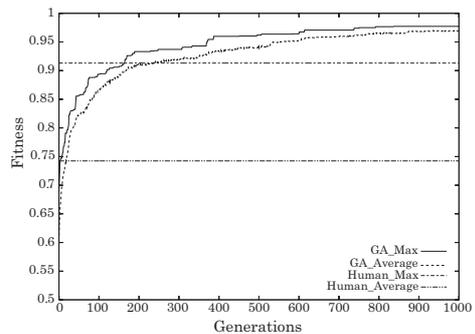


図 4: 協和音列適応度比較

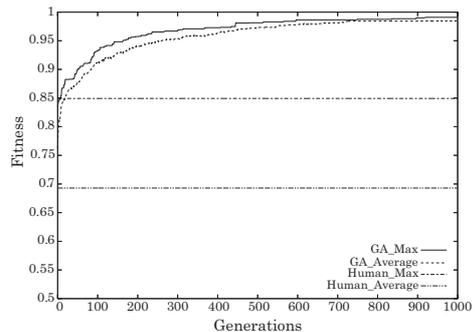


図 5: 不協音列適応度比較

比較アンケートの結果とアンケート結果に対するノンパラメトリック法による符号検定の結果を表 2, 3 に示す。検定の結果、協音程のメロディらしさ、響きのよさ、不協音程のメロディらしさ、と 3 項目において GA によって生成された音列の方が良いという有意差が見られた。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、生成された協和音列、不協和音列を 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。

表 2: 協和音列比較アンケート結果

Pair	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
Pair1	11	9	9	10
Pair2	13	5	14	4
Pair3	9	7	17	4
Pair4	10	9	13	8
Pair5	16	5	12	3
合計	59	35	65	29
P 値	0.0178		0.0003	

表 3: 不協和音列比較アンケート結果

Pair	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
Pair6	10	8	15	6
Pair7	7	11	12	9
Pair8	19	2	10	11
Pair9	21	0	13	8
Pair10	13	6	4	15
合計	70	27	54	39
P 値	0.0002		0.1470	

さらに、本研究における GA 探索にかかる時間は 1000 世代の探索でも 1 秒程度要した。しかしながら、人間が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約 5 分程度要する。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と言える。

4. GA を用いたリズム生成手法

12 音技法を用いた作曲システムの第 2 プロセスであるリズム生成手法について説明する。ここでは本研究におけるリズム表現の定義と、遺伝的アルゴリズムを用いた音楽的リズムの自動生成手法について述べる。

4.1 リズム表現の定義

本研究で提案する手法では、発音時間と次音を鳴らすまでの時間の組によってリズムを構成する。これは、この値の組によって音楽上の休符や和音が表せるためである。図 6 にリズムの概念図を示す。図 6 中の t_d が音価（発音時間）で、 t_o が次音を発音するまでの時間（発音間隔）を表す。本研究で用いた音価を表 4 に示す。2 つの値の関係は以下ようになる。 $t_{di} = t_{oi}$ のとき、音を止めると同時に次の音を鳴らす。 $t_{di} > t_{oi}$ のとき、ある音が発音中に次の音を鳴らす。この状態が続くと、エコーがかかったようになる。このとき、 $t_{oi} = 0$ であれば i 番目の音と $i + 1$ 番目の音で和音が構成される。 $t_{di} < t_{oi}$ のとき、音を止めた後に空白ができる。この定義により、休符を表現することができる。

4.2 リズム生成手法

以上の定義を基に、生成された個体、つまりリズムの評価適応度関数を複数用意し、それぞれリズム生成

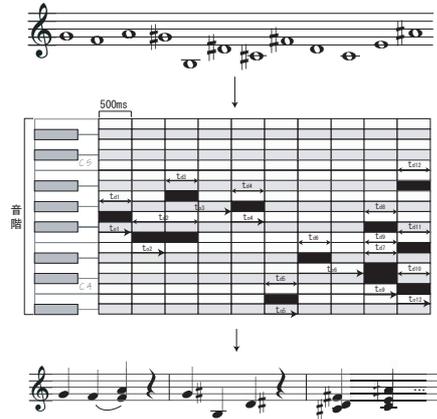


図 6: 本手法におけるリズム表現の概念

表 4: 本システムで使用する音価

音価名 (120BPM)	時間 (msec)
全音符	2000
付点二分音符	1500
二分音符	1000
付点四分音符	750
四分音符	500
八分音符	250
十六分音符	125
鳴らさない	0

シミュレーションを行い、比較評価を行った。今回定義した適応度関数を式 (7)、(8)、(9) に示す。

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{oi} - \bar{t}_o)^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{di} - \bar{t}_d)^2} \quad (7)$$

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{oi} - \bar{t}_d)^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{di} - \bar{t}_d)^2} \quad (8)$$

$$f_3 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{oi} - t_{di})^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{di} - \bar{t}_d)^2} \quad (9)$$

- f_1, f_2, f_3 : 個体の適応度
- N : すべての音符数 (12 音音列を 4 つ結合させるため音符数は 48)
- t_{di} : 音を鳴らす時間 (音価)
- t_{oi} : 次の音を鳴らすまでの時間 (発音間隔)
- \bar{t}_o : t_{oi} の平均値
- \bar{t}_d : t_{di} の平均値

式 (7) の第 1 項は t_{oi} の標準偏差であり、音の鳴る間隔のばらつきが小さくなれば適応度は高くなる。式 (8)、(9) の第 1 項は音を止めると同時に次の音が鳴る割合が高いほど適応度が高くなる。式 (8) の第 1 項は音価平均 \bar{t}_d と次音までの時間 t_{oi} のばらつきを求めている。式 (9) の第 1 項は i 番目の音価 t_{di} と i 番目次音までの時間 t_{oi} のばらつきを示す。これは、休符や余計な和音が増えるとまとまりがなくなり、リズムが感じられなくなることを示している。また、第 2 項は全音価 t_{di} の平均値 \bar{t}_d の標準偏差が小さいほど適応度が高くなる。これは、比較的同じ長さの音価の組み合わせで作られたメロディは聞きやすいという理論に基づいている [6]。

4.3 リズム生成実験

定義した適応度関数を用いてリズム生成実験を行った。本実験における GA パラメータは、交差率 0.4、突

然変異率 0.01 の組み合わせを用いた。学習の終了条件は 5000 世代とした。各適応度関数による実験結果を図 7 に示す。グラフ中の BEST_Fitness が最大適応度、AVERAGE_Fitness が平均適応度を示す。なお、提案した適応度関数は偏差をもとに評価を行っているため、最大適応度はすべて 0 である。図 8 に今回の実験で生成されたリズムを楽譜例として示す。

実験の結果 f_2 が収束速度が、最大適応度、平均適応度において最も良い学習結果を示した。被験者の作成したリズムの適応度を各リズム生成手法において良い結果を得た適応度関数を用いて求めたグラフを図 7 に示す。GA の最大適応度が被験者によって生成された個体の適応度に達した時点での世代数で比較すると、 f_2 が 1500 世代で比較的早く到達していることがわかる。また、5000 世代まで学習を行うのに 30 秒程度要したため、1500 世代までは約 10 秒で学習が行える。ある被験者が 12 音技法に基づいて生成したメロディに対してリズムを作成するには 10 分~20 分要したため、人間よりも短時間でリズム生成を行えることが分かった。

学習によって生成された個体は t_d, t_o の値が比較的良くまとまっており、整然としたリズムをもつ印象の個体が多かった。また、 f_2 によって生成されたリズム中にシンコペーションが比較的多く見られた。通常は強拍と弱拍が規則的に並んでいるが、シンコペーションによって強拍と弱拍の位置が変更され、強拍と弱拍には変化が起らず単調になりがちリズムに効果的な変化を与えることができる。

5. 結 言

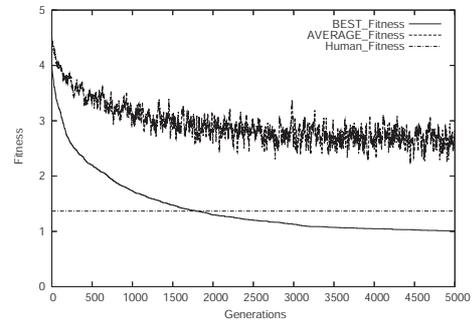
本研究では、12 音技法による自動作曲手法の基礎研究として、GA を用いた音列の自動生成手法を提案した。音程の関係に基づいた適応度関数を作成し、実際に音列の自動生成を行った。さらに有効性検証のため比較アンケートを行い、良好な結果が得られた。加えて、12 音技法による自動作曲手法のための GA を用いたリズム生成を行う手法を提案した。使用音価の分布を基にした適応度関数を定義し、GA によってリズム生成を行う実験を行った。これにより本研究で提案した手法で 12 音技法に基づいたメロディの自動生成が可能ことが確認された。今後は、12 音技法に基づく作曲システムの完成を目指し対旋律の作成を行うシステムの構築を行っていく。

参考文献

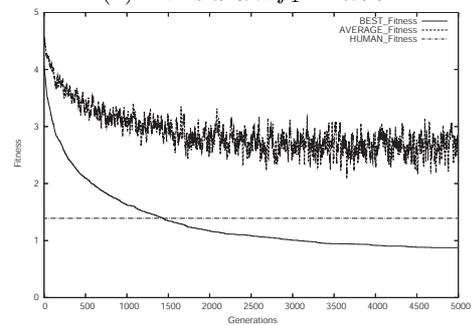
- [1] 前田陽一郎, 宮下滋, “対話型遺伝的アルゴリズムを用いたカオティック・インタラクティブ・サウンド生成システム,” 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.21, No.5, pp.768-781 (2009)
- [2] 今井繁, 長尾智晴, “遺伝的アルゴリズムを用いた自動作曲,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.98, No.58, pp.59-66 (1998)
- [3] 畦原宗之, 海老原祐, 鬼沢武久, “作り手のイメージを反映させた楽曲生成システムに関する研究,” 感性工学研究論文集, Vol.1, No.2, pp.66-72 (2001)
- [4] J.Rufer, 入野義郎, 12 音による作曲技法, 音楽之友社 (1957)
- [5] Yoichiro Maeda and Yusuke Kajihara, “Automatic Tone Row and Rhythm Generation Method

Using Genetic Algorithm Based on Twelve Tone Technique,” International Workshop on Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, P-8 (2009)

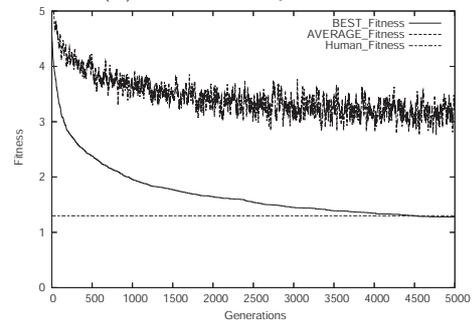
- [6] 草道節男, コードネームで解りやすいメロディ創作基礎的な形式を身につけよう, 音楽之友社 (2001)



(a) 適応度関数 f_1 の場合



(b) 適応度関数 f_2 の場合



(c) 適応度関数 f_3 の場合

図 7: リズム生成実験の学習結果



図 8: リズム生成実験学習後の楽譜例 (適応度関数 f_2)