

対話型進化計算に基づく「脳波ブックマーク」の提案

原田慎也 鈴木麗璽 有田隆也 (名古屋大学)

'Brainwave Bookmark' based on an interactive evolutionary computation.

*S. Harada, R. Suzuki and T. Arita (Nagoya University)

Abstract— Applications of a brainwave are currently attracting much attention in a wide range of engineering fields. We propose a novel application of a brainwave based on an interactive evolutionary computation termed *brainwave bookmark*. This system allows a user to memorize her EEG spectrum as a bookmark of her favorable emotional state. Then, that emotional state can be reconstructed in her mind automatically through an evolutionary search of an artistic work that evokes her the similar EEG spectrum as the bookmark. In order to consider the feasibility of this system using a simplified brainwave measurement device, we analyze the correlation between some subjects' subjective evaluation of feeling relaxed and a level of brainwave spectrum. Then, we implement and evaluate a prototype of the proposed system based on an interactive genetic programming of graphical works with EEG-based fitness evaluations using a simple brainwave measurement device.

Key Words: 脳波ブックマーク, BCI, 対話型進化計算, 進化的アート, 人工生命

1 はじめに

対話型進化計算は、進化計算のうち、人間とシステムとの相互作用によって適応度評価を行い、主観的評価に基づく最適化を行う手法である¹⁾。これは、機械的な評価の難しい対象、たとえば、創造的な芸術作品などを進化的に探索するのに有効である。対話型進化計算の流れは、Dawkins が考案した線画に関する人為選択ソフトウェアであるバイオモルフ²⁾に端を発し、Sims らの画像に関する先駆的研究³⁾を皮切りに、音楽⁴⁾等の幅広い芸術領域への応用が進められている。しかし、これらの手法の課題は、評価をシステムのユーザ自身が行うために、時間的制約や疲労といった様々なコストが生じ、一般的な進化計算と比べて個体数を少なくする等の配慮が必要なことである。また、本来主観的であり外化しにくい評価を、適応度として用いられる数値や次世代をつくる親個体の選択などの方法でユーザが表現せねばならないという問題も存在する。

一方、近年、脳波を日常の様々な場面へ応用するための研究活動が進められている。脳波とは、脳が活動しているときの電氣的活動の推移 (Electroencephalogram, EEG) を捉えたものである⁵⁾。その周波数によって大まかに 6 つの帯域に分類され、それぞれに生理学的意義があることが知られている (Table 1)。Murugappan らは、これまでの脳波に基づく感情認識の研究を概観したうえで、様々な感情に対応する視覚・聴覚刺激を提示した時の脳波を多点の電極を持つ計測機器を用いて特徴抽出し、クラスタリングが可能であることを示している⁶⁾。

同時に、近年、インターフェイスの一つとしてゲームデバイスへの応用などを目指した、ブレイン・コンピュータ・インターフェイス (BCI) の研究⁷⁾⁸⁾が進んでおり、簡易な脳波計測デバイスを安価に利用可能になってきている。例えば、Neurosky 社の簡易型脳波計測ヘッドセットである Mindset¹⁾は、一般的なオーバーヘッド型ヘッドホンに乾式の電極を加えたものである。10-20 電極位置法における左前頭極部 (Fp1) に電極を

Table 1: 脳波の帯域の名称と、それぞれの生理的意義

波	0.5 ~ 4Hz 未満	深い睡眠時
波	4 ~ 8Hz 未満	浅い睡眠時
波	8 ~ 13Hz 未満	覚醒時, リラックス
波	13 ~ 31Hz 未満	覚醒時, 集中
波	31Hz ~	覚醒時, 緊張や不安

配置し、基準導出法によって脳波を測定する。脳波のサンプリング周波数は 512Hz である。付属のソフトウェアを使うことで、脳波に加えて同社が独自に定義した集中度とリラクセス度を脳波の活動から計測可能である。以上の研究動向は、将来的に、脳波の計測に基づく作品の評価を進化計算に組み込むことにより、ユーザの意識によらない直接的・自動的な作品の評価が可能になり、新たな展開の可能性を示唆しているといえる。

本研究の目的は、対話型進化計算において脳波計測を活用した新しい手法として「脳波ブックマーク」を提案し、その簡易型脳波計測デバイスによる実現可能性について検討することである。本手法では、ユーザが望む心理状態を反映する脳波スペクトルを「ブックマーク」として保存する。想起する際は、ユーザがそのブックマークに近いスペクトル反応を示す芸術作品等を対話型進化計算で自動探索し、提示することで心理状態を再現する。本稿では、画像に対する印象と脳波スペクトルの相関を分析した上で、簡易型脳波測定デバイスを利用した、遺伝的プログラミングによる画像の対話型進化計算に基づくプロトタイプシステムを試作し、リラクセス画像に関する脳波の再現性を評価した。

2 脳波ブックマーク

提案手法は、1) 脳波の記憶 (「ブックマーク」) による心理状態の保存と、2) 「ブックマーク」した脳波の想起による心理状態の再現の 2 つからなる。Fig. 1 に概念図を示す。

ユーザは簡易型脳波計測デバイスなどを装着し、日常の場面で想起する様々な心理状態を、そのときの脳波スペクトルの形で保存することができる。これを脳

¹⁾Mindset 製品 web ページ
<http://www.neurosky.com/mindset/mindset.html>

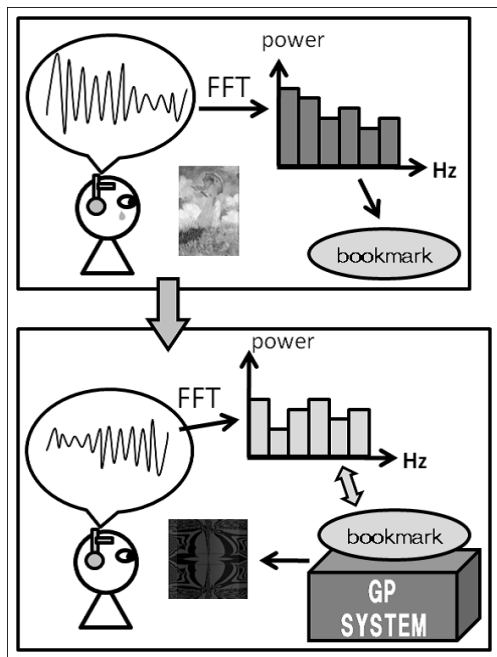


Fig. 1: 脳波ブックマークシステムの概念図

波の「ブックマーク」と呼ぶ。

ユーザはブックマークした脳波スペクトルを再度想起することで、望む心理状態を再現することができる。具体的には、画像や音楽といった芸術作品等の、ブックマークした脳波のスペクトルと同様のスペクトル反応をユーザが示す対象を、脳波の自動計測に基づく対話型進化計算によって探索し、提示する事によって再現する。このとき、ユーザは進化計算の評価に介入しているが、評価自体は脳波の自動計測を用いるため、ユーザ自身が意識することなく評価と進化が自動的に行われる。

3 画像に対する印象と脳波スペクトルとの関連の分析

本研究では、特に画像がユーザの心理状態に与える影響に注目して提案手法の実現可能性について検討する。はじめに、さまざまな画像を見たときにユーザが持つ主観的印象と、その際に想起される脳波のスペクトルとの関連について、前述の Neurosky 社の簡易型脳波計測ヘッドセットである Mindset を用いて調査し、それを元にブックマークを作成した。以下、詳細について述べる。

3.1 調査手順

9名（男性7名、女性2名の大学生）の協力者それぞれに対し、次の手順で調査を行った。まず、各協力者に対し、主観的に非常にリラックスする画像と、非常に恐怖を感じる画像をそれぞれ3枚ずつ提出することを依頼した。収集した54枚の画像の中から調査に使用する画像を無作為に24枚選択した。このとき、写真が多いなど、画像の種類に偏りが確認されたため、その傾向を緩和する画像6枚を加え、合計30枚の画像を測定調査に利用した。

脳波測定には次の環境を用いた。2メートルの立方体の空間に椅子を設置し、正面にスクリーン（白幕）を、側面、天井面には黒幕を張った。正面のスクリーンには、プロジェクターによって、協力者の頭上から画像

閉眼(30秒)	閉眼(20秒)	閉眼(20秒)	閉眼(20秒)	閉眼(20秒)	...	閉眼(20秒)	閉眼(20秒)	画像の	1分
開始前	画像1	黒画面	画像2	黒画面	...	画像10	黒画面	印象調査	休憩

Fig. 2: 予備調査の脳波測定のタイムテーブル

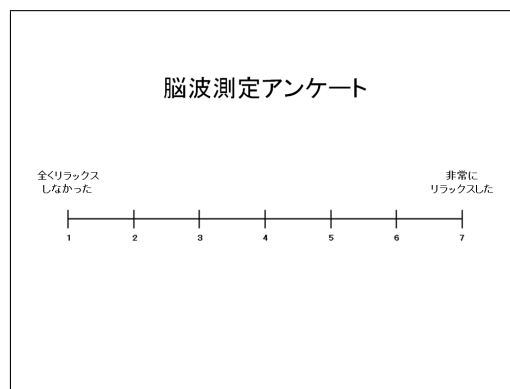


Fig. 3: 画像の印象に関するアンケート調査用紙

が投影される。協力者の目からスクリーンまでの距離は2メートルとした。

協力者には、事前に十分な睡眠をとるよう指示し、疲労や体調不良時の測定は避けた。測定の直前には、測定中は体を動かさないこと、リラックスした姿勢で画像を鑑賞すること、瞬きは少ないほうが良いことを指示した。脳波測定のタイムテーブルを Fig. 2 に示す。測定開始前は30秒の閉眼時間を設けた。測定開始後は、20秒ごとに開眼・閉眼を繰り返し、開眼する度に異なる画像が提示され、その間の脳波が計測される。閉眼を促す合図は、windows 警告音を使用した。画像を10枚鑑賞し終えるごとに測定を一時停止し、直前に提示した画像10枚について、主観的リラックスの度合いをアンケート調査した。

3.2 結果の分析

今回は、協力者それぞれについて次の計算を行い、スペクトルの各周波数と主観的リラックス度との関連の傾向を調査した。スペクトルは、1Hzごとの振幅スペクトルを1~45Hzについて抽出した、要素数45の一次元ベクトルである。まず、協力者が同じ主観的リラックス度の値を付けた全ての画像のスペクトルについて、各周波数の振幅の平均をとり、そのベクトルを、波の各周波数帯の振幅に分類した。波等の振幅は、Table 1 に示す周波数帯の和とした。次に、各周波数帯について、その振幅とリラックス度の値の間の相関係数を計算した。

調査結果を Fig. 4 に示す。同図より、全体としてはスペクトルの各周波数と主観的リラックスの度合い正

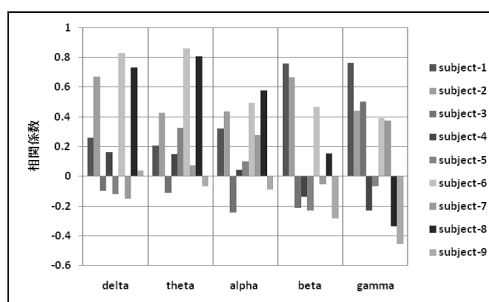


Fig. 4: 主観的リラックスの度合いと波等に分類された各帯域の振幅スペクトルの相関係数

の相関の傾向が強いことがわかる．波より低い周波数帯域（1Hz～12Hz）では，多くの協力者で強い正の相関が確認でき，波帯域では9名中7名で正の相関が確認できた．波以上の高周波数帯域（13Hz～45Hz）では，低周波数帯域と比較して負の相関を示した協力者の割合が高くなり，波帯域では5名，波帯域では4名が負の相関を示した．これらの傾向は，リラックス時に見られる脳波の一般的な傾向に沿うものである．一般的に，リラックス時は波帯域の増幅，波帯域の減衰が見られる．このことから，簡易型デバイスによっても概ねリラックスを感知できることが示された．

3.3 ブックマークの作成

以上の調査で得られた各画像に対する脳波のスペクトルとその主観的リラックス度をもとに，各協力者にとってリラックスした心理状態に対応するスペクトル，即ち，ブックマークを作成した．今回は，前節の結果から脳波のスペクトルにはノイズが多く含まれていることを踏まえ，アンケート調査で中性の印象を示す4点よりも大きい点数を得た画像のスペクトルに対し，得点に応じて重み付けした上で平均したベクトルをブックマークとした．具体的には，ある協力者について， j 点の主観リラックス度を得た n_j 枚の画像のスペクトルの i Hzの振幅の平均を $a_{i,j}$ とすると，ブックマークの i Hzの振幅 B_i は次の式で表される．

$$B_i = \frac{\sum_{j=5}^7 (j-4) \times n_j \times a_{i,j}}{\sum_{j=5}^7 (j-4) \times n_j} \quad (1)$$

式1によって得られた，協力者のブックマークの一部を Fig. 5 に示す．

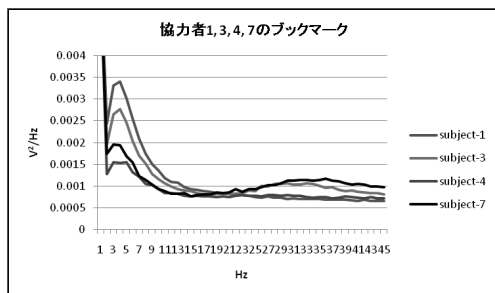


Fig. 5: 協力者 1, 3, 4, 7 のブックマーク

同図から，全体的には類似した傾向がある．1Hzにおいて振幅が極端に大きいのはフーリエ変換時の影響によるものであると推測される．また，概ね4, 5Hz付近に大きなピークが存在し，それ以上の周波数帯にかけて緩やかに減衰していることがわかる．また，高周波帯域でも協力者間で異なる傾向が見られ，波帯域でほぼ一定の値を記録した協力者と，再び小さいピークが生じた協力者がいた．大きなピークは，目の活動（瞬きなど），顔の筋肉や血管の活動によるノイズの影響があることが推測される．小さいピークの場合は協力者によって様々であったが，概ね29～37Hzの間であった．例えば，協力者7は，波帯域が波帯域よりも振幅が大きく，36Hz付近に2つ目のピークがあった．これらは計測時のユーザの状態や主観的なリラックス状態に関する個性を反映していることが示唆される．

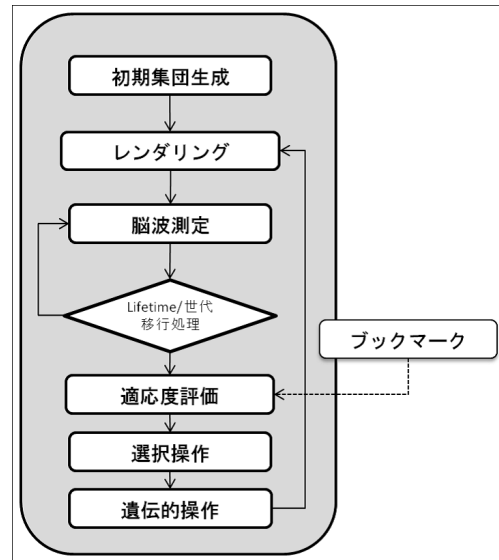


Fig. 6: 本システムのフローチャート

4 脳波を用いた対話型画像進化システムのプロトタイプ設計

前節で作成したブックマークを想起可能な対話型進化計算のプロトタイプシステムを設計した．本システムは，遺伝的プログラミング（GP）に基づく画像進化システムの適応度評価系に脳波測定機構を用いたものであり，§3で作成したブックマークを元に，脳波計測を用いてユーザが鑑賞する画像の適応度評価を自動で行い，集団を進化させる．

本システムのフローチャートを Fig. 6 に示す．本システムは，遺伝子に基づく画像の生成，ユーザへの画像の提示に基づく脳波の計測，ブックマークと脳波の比較による適応度評価，選択と遺伝子操作からなる．システム実行前に，§3.3で作成した協力者固有のブックマークを入力する．システムは初期集団として既定個体数の関数木（遺伝子）を生成し，それぞれに対応する画像を生成する．それらの画像を1枚ずつ協力者にランダムな順番で提示し，鑑賞時の脳波を測定する．ノイズなどによる評価誤差を避けるため，画像の提示は1世代につき既定LIFETIME回数行う．その脳波情報と入力したブックマークを基に画像の印象評価を行い，それによって計算した評価値をもとに次の世代に残る遺伝子を確率的に選択し，遺伝的操作を施す．それによって生成された新たな個体の遺伝子を基に，同様の処理を繰り返す．以上の処理を既定世代繰り返す．

4.1 遺伝子表現と画像生成

GPにおいて個体を持つ遺伝子の表現として以下を用いた．各個体は3つの関数木を独立に持つ．各関数木には，終端ノードとして，変数 x, y ，定数（定義域 $[0.0, 10.0]$ ）を用いた．非終端ノードとして，三角関数（ \sin, \cos, \tan ），四則演算子（ $+, -, *, /$ ），絶対値，平方根を用いた．関数木の最大深さは25とした．

それぞれの関数木は，変数 x, y を生成画像におけるあるピクセルの x, y 座標としたとき，そのピクセルの赤，緑，青成分の値を出力する関数として利用した．具体的には， x, y の定義域をそれぞれ $[-2.0, 2.0]$ として関数木の出力値を計算し， 250×250 ピクセルの画像を作成した．

4.2 脳波の測定と適応度評価

本システムでは集団の各個体が生成する画像をユーザに順番に提示し、鑑賞時の脳波を Mindset を用いて計測する。脳波測定の手順は §3.1 と同様である。ただし、10 秒ごとに開眼・閉眼を繰り返すものとし、休憩は 3 世代の画像を鑑賞し終えるごとにとった。

画像から想起された印象を反映するスペクトルは、鑑賞フェイズで測定した脳波を 1 秒ごとに区分し、それぞれの振幅スペクトルを 1~45Hz について、フーリエ変換によって 1Hz ごとに算出し、それらのスペクトルデータを時間平均して作成する。ただし、開眼動作によるノイズを強く含むと考えられる初めの 1 秒は処理対象外とする。全ての画像について、その印象を反映するスペクトルを計算した後、ブックマークの i Hz の振幅を B_i 、ある個体に関して測定された脳波のスペクトルの i Hz の振幅 S_i としたとき、その個体の適応度 F を以下のように計算する。

$$F = \frac{1}{1+f} \quad (2)$$

$$f = \sum_{i=1}^{45} e_i |B_i - S_i| \quad (3)$$

なお、 e_i は、変動が小さい傾向にある周波数の振幅の差ほどより適応度に反映されるために導入した係数であり、当該協力者の全 30 画像についてのスペクトルの、 i Hz の振幅の分散の逆数である。同式は、各周波数において両スペクトルの値の差が小さいほど適応度が高いことを示している。

4.3 選択操作

全ての個体の評価後、世代交代のための選択操作を行う。前述の各個体の適応度に次のスケールを加えた後、ルーレット選択によって行うものとした。まず、スケール後の最小値を 1.0、最大値を 5.0 とし、各個体の適応度 F を線形にスケールし、 F' に変換する。その後、各個体の F' に指数スケールを行い、 F'' に変換する。変換式は、式 4 で定義する。 e は自然対数の底である。スケールのパラメータである α は、ランダムからほぼ決定論的な選択操作を、パラメータ一つで切り替えられるようにするために導入したものである。

$$F'' = e^{\alpha \cdot F'} \quad (4)$$

4.4 遺伝的操作

選択された個体の遺伝子に、交叉、突然変異の順で遺伝子操作を施し、子個体を作成する。交叉は、選択された個体のみ適用される。選択時に、 i 番目に選択された個体と $i+1$ 番目に選択された個体をペアとし、交叉率 C_p にもとづき確率的に交叉を発生させる。その後、全子個体の各ノードに対して、突然変異率 M_p にもとづき確率的に突然変異させる。突然変異操作には、次のような 5 種類の設定を用いた。これは、GP の遺伝子から画像を生成する Machado らの研究⁹⁾ の設定に準じたものである。

置換 対象ノード以下の部分木を新たに生成した木と入れ替える。本システムでは、生成する木の最大深さは 9 とした。

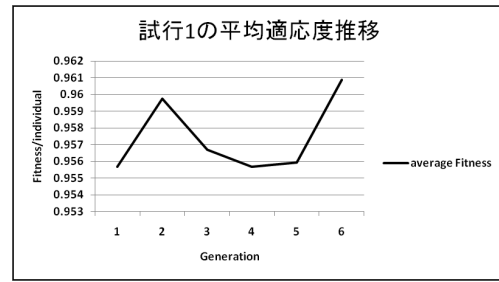


Fig. 7: 試行1の集団の平均適応度の推移

逆位 対象ノードを二つ選択し、以下の部分木をそれぞれを交換する。

削除 対象ノードをランダムに生成した終端ノードに置き換える。

挿入 対象ノードとその親ノードの間に、終端ノードでないノードを挿入する。

変更 対象ノードを、終端ノードでないノードにランダムに変更する。

5 プロトタイプシステムの試行と評価

本システムの性能を評価するため、§3.3 で作成したブックマークを使用して試行した。試行したのは §3 の協力者 9 である。協力者 9 のリラックスに関するブックマークを用いて、システムを 2 度試行した。また、各パラメータを以下のように設定した。

Table 2: 本試行におけるパラメータ設定

世代数 (試行 1, 試行 2)	6, 9
LIFETIME 数	2
個体数	4
開眼時間	10
閉眼時間	10
指数スケール係数 α	2.0
交叉率 C_p	0.7
突然変異率 M_p	0.075

6 結果・考察

本試行結果に関して、それぞれの試行における各世代の平均適応度の推移を Fig. 7, Fig. 8 に示す。試行 1 では、適応度が初期世代から次世代でぐくわずかに増加したものの、つづいて微減増するなど明確な適応度増加の傾向は見られなかった。試行 2 でも適応度は増減を繰り返しており、明確な増加は見られないが、世代後半 (7, 8 世代目) では初期世代より高い傾向があることから、さらに多い世代進化を行えばより高い適応度が得られる可能性を示唆しているといえる。

試行 1 において生成された全個体の画像を Fig. 9 に示す。これらは、行ごとに 1 つの世代の 4 個体の表現型を示している。初期集団から、赤地に横に黒いストライプのある画像が選択され、その後も類似した画像が多く存在していることから、集団は早い段階で収束傾向にあったことがわかる。一方、試行 2 (Fig. 10) では、比較的多様性を保ったまま集団が進化し、7 世代付近で黄緑と水色が全体を占める絵柄を持つ画像が集団内に広がったことが確認できる。

次に、試行 1 について、システムに入力したブックマークと、初期世代の画像から得られたスペクトル、集

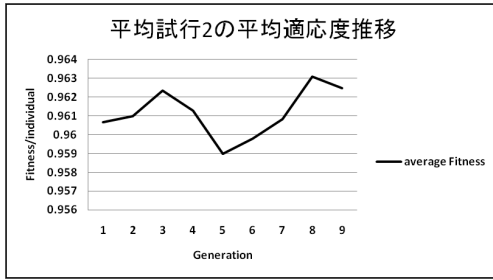


Fig. 8: 試行 2 の集団の平均適応度の推移

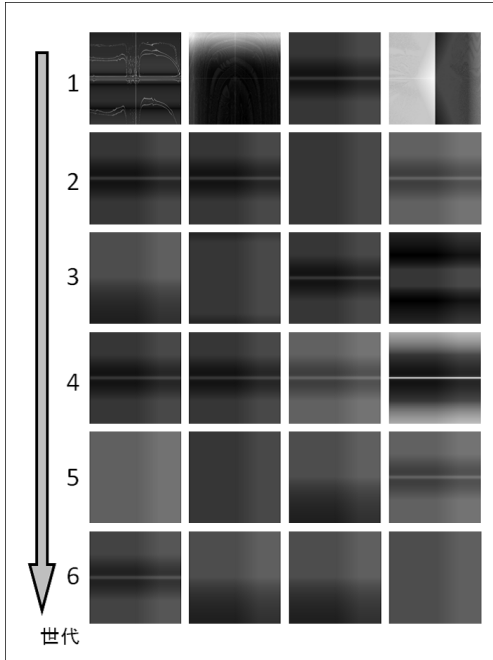


Fig. 9: 試行 1 の全個体

団の平均適応度が最大を示した世代の画像から得られたスペクトルをそれぞれ比較したグラフを Fig. 11, Fig. 12 に示す．また，試行 2 について，同様の比較を行ったグラフを Fig. 13, Fig. 14 に示す．これらの図から，わずかであるものの，平均適応度が最大の個体のスペクトルの方が，ブックマークの低周波数域のピークにおいて値が高く，ブックマークに近いことがわかる．

画像の傾向と適応度の対応について考察する．Fig. 7, 9 より，試行 1 では，初期収束していたことが確認されることから，収束による適応度の頭打ちと，ノイズや協力者の疲労，飽きなどの生理的な要素によって，適応度がその山の頂点付近で振動したと考えられる．Fig. 8, 10 より，試行 2 では，適応度が大幅に減少した世代 4 において，画像はオレンジ色の絵柄の個体が集団を占めたことが確認されることから，その色彩傾向が原因で適応度が下がったと考えられる．しかし，それ以降の世代で緑色の絵柄の個体が出現し集団を占めるようになって，適応度が再度上昇傾向を示した．このことから，世代 3 に生成された，オレンジ色の絵柄をもつ個体が，ノイズなどによる評価誤差の影響でたまたまた次の世代の集団に広がり，それによって進化が一時的に妨げられたのではないかと考えられる．

以上から，今回の試行では，一部で適応度増加の傾向が見られたものの，全体として明確な適応度の増加傾向を確認するのは難しかった．要因としては次のことが考えられ，それぞれについてシステムの改良や調

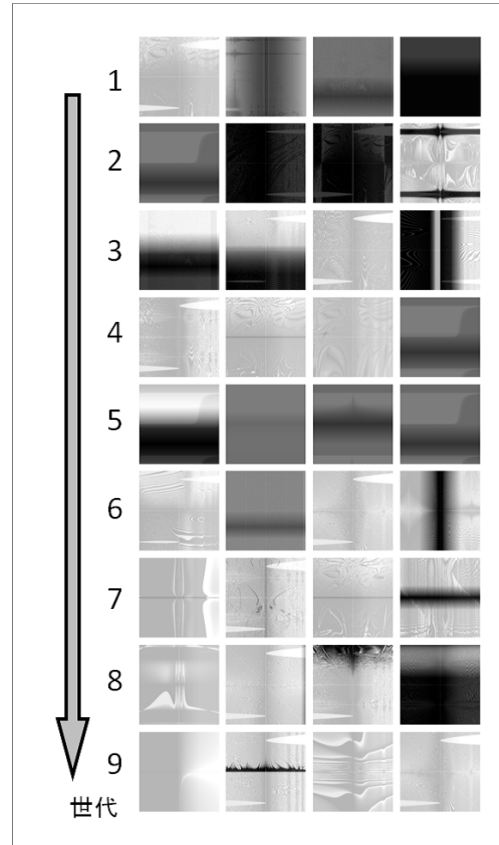


Fig. 10: 試行 2 の全個体

整することで，探索性能が改善される可能性があるといえる．一つは，脳波に基づく画像の自動評価に特有な適応度への影響である．特に，今回は簡易型の測定デバイスを用いたため，情報量も少なく，排除しきれないノイズも多かったと考えられる．特に，ブックマークに見られた低周波数のピークはノイズが特に含まれている可能性が高く今後は，瞬きなどの影響を除去するフィルターなどを導入することで脳波に特有のノイズを軽減できる可能性があるといえる．また，ユーザの疲労や飽きなどの身体的・心理的要因によって，個々の画像の評価結果が揺らぎうることも進化的探索が容易でなかった要因であると考えられる．もう一つは，適応度の定義である．ブックマークと各画像のスペクトルには大きな差があるにもかかわらず，適応度の値は 0.96 付近の高い値がほとんどあり，個体間でも極めて近い値をとっていた．スペクトルの違いをより反映するものに適応度の定義を改良し，探索過程を効率化できる可能性がある．最後は，集団の進化が早く収束する傾向にあったことである．今回の評価手法では，画像の安定した評価に重点を置いたため，各個体の評価にかかる時間が長くなり，個体数・世代数を少なくせざるを得なかったことが要因の一つであると考えられる．システム実行時のパラメータや探索手法の改善などによって早期の収束を回避できることが期待できる．

7 おわりに

本稿では，脳波の対話型進化計算への新しい応用として「脳波ブックマーク」を提案し，簡易型脳波測定デバイスを用いたシステムの実現可能性を検証するため

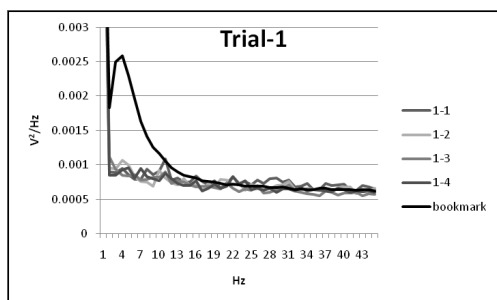


Fig. 11: ブックマークと初期世代の画像から得られたスペクトルの比較

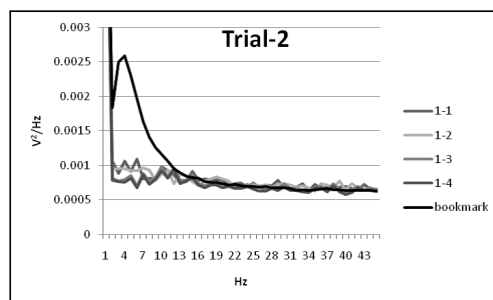


Fig. 13: ブックマークと初期世代の画像から得られたスペクトルの比較

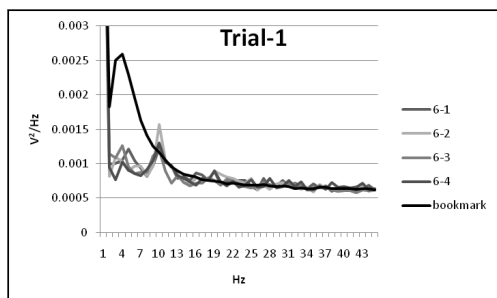


Fig. 12: ブックマークと6世代の画像から得られたスペクトルの比較

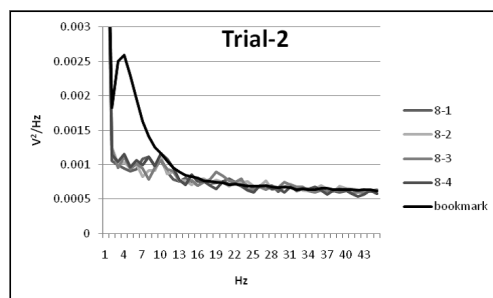


Fig. 14: ブックマークと8世代の画像から得られたスペクトルの比較

プロトタイプを試作し、評価した。試行のために、まず画像に対する印象と脳波のスペクトルの相関に関する調査を行った。その結果、主観的なリラックスの度合いと脳波スペクトルのレベルに相関の傾向が確認され、簡易型脳波測定デバイスでリラックスな心理状態を検知することが可能であることが示唆された。次に、協力者が主観的にリラックスする心理状態を反映した脳波スペクトル情報である「ブックマーク」を作成し、画像の対話型進化計算に脳波による画像の自動評価を導入したプロトタイプを作成し、評価した。その結果、現段階では明確な進化傾向は見られなかったものの、ノイズや評価自体の揺らぎなど脳波計測に特有の問題や、適応度の定義や進化システムの改良等に関する知見が得られた。得られた知見に基づくシステムの改良が当面の課題である。

参考文献

- 1) 高木 英行, 畝見達夫, 寺野 隆雄, "対話型進化計算法の研究動向", 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 692-703 (1998).
- 2) Dawkins R., The Blind Watchmaker, Penguin Books (1986).
- 3) Sims, K., "Artificial Evolution for Computer Graphics", ACM Computer Graphics, Vol. 25, No. 4, pp. 319-328 (1991).
- 4) Suzuki, R., Yamaguchi, S., Cody, M. L., Taylor, C. E. and Arita, T.: "iSoundScape: Adaptive Walk on a Fitness Soundscape", Proceedings of the 9th European event on Evolutionary and Biologically Inspired Music, Sound, Art and Design (in press).
- 5) 市川忠彦: 新版 脳波の旅への誘い (第2版), 星和書店 (2006).
- 6) Murugappan, M., Rizon, M., Nagarajan, R., and Yacob, S., "Inferring of Human Emotional States using Multichannel EEG", European Journal of Scientific Research, Vol. 48, No. 2, pp. 281-229 (2010).
- 7) Gary, M., Tsvetomira, T. and Anton, N.: "Emotional Brain-Computer Interface", Affective Comput-

ing and Intelligent Interaction and Workshops 2009 (ACII 2009), pp. 1-9 (2009).

- 8) Wolpaw, J., Birbaumer, N., McFarland, D., Pfurtscheller, G. and Vaughan, T.: Brain-computer interfaces for communication and control, Clinical Neurophysiology, 113:767-791 (2002).
- 9) Machado, P. and Cardoso, A., "All the Truth about NEvAr", Bentley, P. Corne, D. (eds), Applied Intelligence, Special Issue on Creative Systems, Vol. 16, No. 2, pp. 101-119 (2002).