

EEG と生体アルゴリズムを組み合わせた 情動フィードバック手法の提案

ZHANG NINGYUE^{1,a)} 塚田 浩二¹

概要：

近年、ウェアラブル脳波計（EEG）の発展により、日常環境での連続的な脳波計測が容易になり、長期的な情動観察とセルフレギュレーションへの活用可能性が広がっている。しかし、脳波計の生データは一般ユーザにとって解釈が難しいため、長期的な情動の変化を直感的に理解できる表現が必要である。本研究は、ウェアラブル脳波計 MUSE 2 で脳波をリアルタイム計測し、覚醒度と感情価に基づく情動状態を推定した上で、その結果をスクリーン上の電子生命体の形態変化として表現する情動フィードバックシステムを提案する。生命体の形態や色彩がダイナミックに変化し、時系列での感情の蓄積/習慣/トレンドを体現することで、ユーザの感情認識とセルフレギュレーションを支援する。また、局所規則で複雑さを創り出す自己組織化的な生体集団アルゴリズムによって、人間の脳活動や情動変化の複雑さと生命らしさを表現することで、美的価値と長期的に利用する動機づけの促進を図る。

1. 背景

脳波芸術は 1960 年代以降、EEG を用いた物理インスタレーションや映像/音響作品、インタラクティブ・パフォーマンスなど、多様な形態で展開されてきた。Alvin Lucier の「Music for Solo Performer」[1]、Nina Sobell の「BRAIN WAVE DRAWINGS」[2]、Lisa Park の「Eunoia」[3]などは、脳波によって物理素材やイメージ/サウンドを変化させ、メディア表現の境界を探っている。近年は Fractal-Brain[4] のように、瞑想/マインドフルネス支援を目的とした作品も現れ、脳波をインタラクティブに可視化する表現の有効性が検討されている。しかし、これらの多くは短時間の没入体験に焦点を当て、注意/集中度など認知指標を主に扱っている。一方で、日常生活における情動の長期的変化に注目して、喜び/不安/緊張/倦怠感といった多様な情動を区別してフィードバックする枠組みは十分に議論されていない。

そこで本研究では、長期的に情動を観察するのに適した組織化された表現手法として、人工生命表現を導入する。人工生命は、Conway の Game of Life[5] に代表されるセルオートマトンや進化計算に基づくインタラクティブアートの系譜において、自己組織化と進化的変化を特徴とするモデルとして扱われてきた。本研究では、感情は離散的な感

情ラベルとしてサンプリングされるのではなく、時間とともに連続的な 2 次元座標空間上を移動している。そこに、人工生命の自己組織化と進化的変化の特性を活用し、情動状態を群知能アルゴリズムにより変換することで、細やかな感情の変化や、長期的傾向（蓄積、変動、回復など）の把握を支援できる可能性があると考えた。

また、日常生活での情動観察とセルフレギュレーションへの活用を目的として、システムの使いやすさや美的な価値にも配慮することで、長期的な利用する動機づけの提供を図る。

2. 関連研究

これまで、脳波計測を用いたインタラクティブシステムや可視化表現の分野では、ユーザの瞑想や集中を支援するために、多くの研究が行われた。

Visual Meditation[6] は、EEG に基づき初心者を瞑想状態へ導くシステムを提案した。非侵襲型脳波計で取得した $\alpha/\beta/\theta$ 帯域から瞑想/非瞑想を判定し、その出力を画像生成モデルに入力して、雨や光などが脳波に応じて乱雑から静穏へ変化する映像表現を生成する。音声ガイドのみの条件と比較した実験では、可視化を用いた方が初回の瞑想到達時間を有意に短縮することが示された。

FractalBrain[4] は、EEG と VR を組み合わせた没入型の瞑想支援システムであり、ユーザの脳波をリアルタイムに解析し、一定の指標に応じて 3D マンデルプロベースの

¹ 公立はこだて未来大学

^{a)} g2125052@fun.ac.jp

映像とサウンドを変化させることで、マインドフルネス中の注意力や没入感を高めることを目的としている。これらの研究に対して、本研究では、瞑想場面や VR 環境に限定せず日常生活の中での長期的な情動フィードバックに焦点を当てる点が特徴である。

次に、人工生命を取り入れた表現手法について紹介する。

Sensitive Floral[7] は、オジギソウの反応特性を模倣するインタラクティブ生成アートである。フラクタルツリー構造とセルオートマトンを組み合わせ、タッチスクリーン上で枝に触れると局所刺激が木全体に伝播し、分岐角度や線の太さなど複数のパラメータを変化させながら、花卉状の形態がリアルタイムに変形する。この手法により、植物の閉じる運動を想起させる生体模倣的なフォルムと、触覚的なインタラクションを両立している。本研究では、ウェアラブル脳波計に基づく Passive BCI を用いて、内的な情動状態を電子生命体の自己組織化的な形態変化として可視化する点の特徴である。

3. 提案

本研究は、ウェアラブル脳波計 MUSE 2 で脳波をリアルタイム計測し、覚醒度と感情価に基づく情動状態を推定した上で、その結果をスクリーン上の電子生命体の形態変化として表現する情動フィードバックシステムを提案する。生命体の形態と色彩がダイナミックに変化し、時系列での情緒の蓄積/習慣/トレンドを体現することで、ユーザの感情認識とセルフレギュレーションを支援する。

本研究で提案するシステムは、MUSE 2 EEG ヘッドセットとスマートフォンアプリ Mind Monitor および Processing で実装した可視化プログラムから構成される (図 1)。ユーザは MUSE 2 ヘッドセット*1 を装着し、Bluetooth 経由で Mind Monitor アプリケーション*2 に送信する。Mind Monitor を介して、頭部前方と側頭部に配置された 4 電極 (TP9, TP10, AF7, AF8) から計測した脳波データを各周波数帯 (δ , θ , α , β , γ) に分解し、OSC プロトコルにより PC 上の Processing 環境*3 へ送信される。Processing では、受信した EEG データをラッセルの感情円環モデル [8] に基づき覚醒度と感情価にマッピングする情動指標を算出し、電子生命体の形態変化に反映する。生成された電子生命体はディスプレイまたはプロジェクタに出力され、ユーザは脳波計を装着したまま画面を観察することで情動フィードバックを受けられる。

覚醒度 Arousal は、既存研究に基づき β 帯域の信号強度を α および θ の合計で割った比として定義する [9]。これは、高周波 (β) による活動性と低周波 (α/θ) によるリ

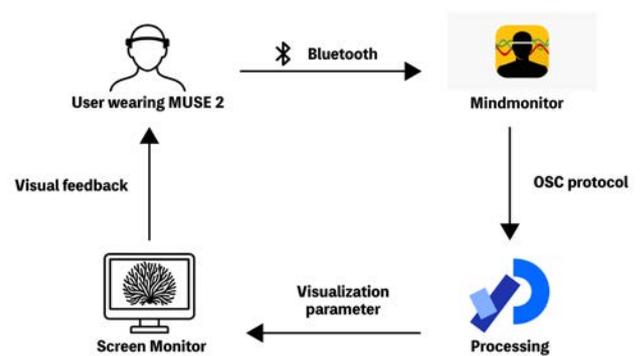


図 1 システム構成

ラックスのバランスを表す指標であり、生理的覚醒水準を反映する。感情価 Valence は、前頭部における α 波の左右非対称性に着目し、右前頭部と左前頭部の α 差から算出され [10]、ポジティブ感情や接近動機を表すのに使われる。算出された覚醒度および感情価は、電子生命体の運動状態と形態変化にマッピングされる。

本研究は、Boids アルゴリズム [11] を用いて情動状態を人工生命体として表現する。Boids とは、鳥や魚などの群れ運動を、分離/整列/結合の 3 つのルールに従ってシミュレーションする粒子系モデルである。Boids アルゴリズムを選定した理由は、運動パターンが感情価における接近/回避動機を効果的に表現でき、群体の活性度を通じて覚醒度の変化を直感的に反映できるためである。

4. 実装

4.1 脳波計測と情動推定

生の EEG 信号は、低周波ドリフトと高周波ノイズを除去する前処理を行った後、Mind Monitor で δ (0.5–4 Hz) / θ (4–8 Hz) / α (8–13 Hz) / β (13–30 Hz) / γ (30–45 Hz) の 5 帯域に分割される*4。

本研究では、ラッセルの感情円環モデルを理論的枠組みとし、EEG 周波数帯を覚醒度 Arousal と感情価 Valence から成る 2 次元情動空間にマッピングする。先行研究より、 β パワーは覚醒度や課題への関与と正に相関し、 α および θ パワーは弛緩や関与度の低下に関連することが示されている [9][10]。そこで覚醒度を次のように定義する。

$$\text{Arousal} = \frac{\beta}{\alpha + \theta} \quad (1)$$

感情価については、前頭部 α 波の左右非対称性が指標であり、左前頭部 α の低下はポジティブ/接近感情、増加はネガティブ/回避感情に対応することが報告されている [13]。本研究では MUSE 2 の前頭電極 AF7, AF8 を用いて、以下のように定義する。

$$\text{Valence} = \alpha_{AF8} - \alpha_{AF7} \quad (2)$$

*1 Muse. 2025. Brainwave Powerbands https://choosemuse.my.site.com/s/article/Brainwave-Powerbands?language=en_US.

*2 Mind Monitor. <https://mind-monitor.com>

*3 Processing. <https://processing.org>

*4 Muse. 2025. Brainwave Powerbands https://choosemuse.my.site.com/s/article/Brainwave-Powerbands?language=en_US.

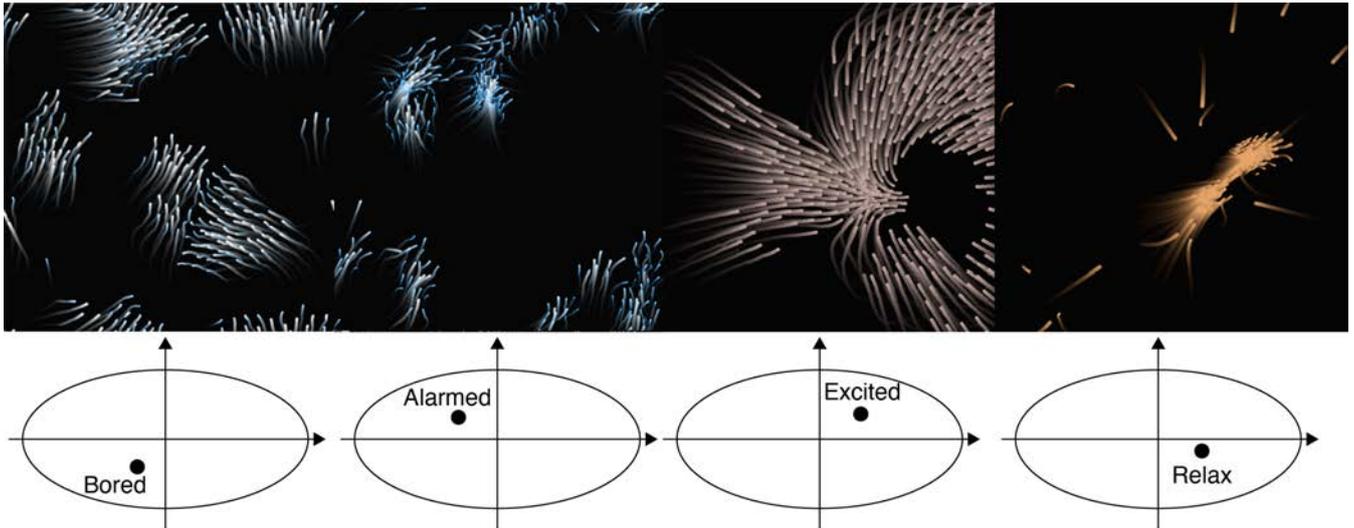


図 2 異なる感情状態で生成されたパターン。縦軸は覚醒度と対応し、横軸は快適度と対応する。

ここで $\alpha_{AF7}, \alpha_{AF8}$ は、それぞれ AF7, AF8 電極における α 帯域平均信号強度である。

ラッセルの感情円環モデルに基づく、低覚醒/低感情価は「疲労/退屈/悲しみ」に、高覚醒/低感情価は「恐怖/警戒/不安」に対応する。一方、高覚醒/高感情価は「興奮/喜び」に、低覚醒/高感情価は「リラックス/落ち着く」等の感情に対応する [8]。現在のシステムでは、ユーザーの認知コストを下げる配慮として、各象限のラベルを「疲労」「警戒」「興奮」「リラックス」という四つの名称にした。

4.2 情動パラメータと電子生命体のマッピング

本システムでは、覚醒度/感情価における情動指標を Boids アルゴリズムとマンデルブロ集合に基づく電子生命体へ写像する。個々のエージェントは分離/整列/結合の局所ルールに従いながら、画面内のグローバルアトラクタへ引き寄せられる。

図 2 に異なる感情状態に基づいて生成されたパターンを示す。

具体的には、覚醒度はアトラクタへの吸引強度と移動速度に対応付けることで、高い覚醒度ではエージェントの移動が高速/乱雑となり、低い覚醒度ではゆっくりと泳ぐような運動になる。感情価 Valence は、粒子間距離と繁殖率および色の変化に反映され、正の感情価時には粒子群が互いに接近しながら増殖/暖色に変色し、負の感情価時には粒子数が減少し、群れが分散/寒色に変色するような挙動を示す。

覚醒度及び感情価が閾値以上に高まった場合には、高い認知状態を表現するために、Boids ベースの群れ行動はマンデルブロ集合 [12] に基づくフラクタルアトラクタモードに遷移する。このときグローバルアトラクタの位置はマンデルブロ反復式に従って更新され、群れ全体がアトラクタ

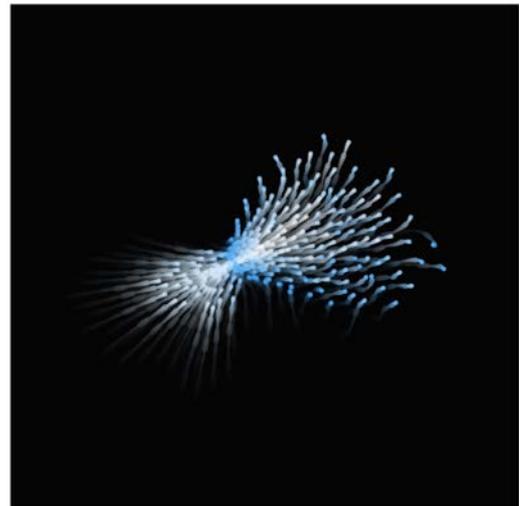


図 3 マンデルブロ集合に基づくフラクタルアトラクタモード

に引き寄せられる軌跡を描く (図 3)。

4.3 使用シナリオとインタラクション

本システムは日常生活で手軽に使える Passive BCI として設計されており、ユーザは利用の際に特別な準備を必要としない。ユーザが日常生活中に MUSE 2 を装着し、自動的に計測される脳活動に基づいて、覚醒度/感情価の推定結果がディスプレイ上の電子生命体の振る舞いとして反映される。

ユーザは脳波計をつけた状態で生活して、好きなタイミングでディスプレイ上の電子生命体の変化を確認することで、自身の情動状態とその推移を群れの動きや形態の変化として観察できる。こうして自分の感情状態を認識した際の脳波変化が再びリアルタイムで記録/反映され、このループを通じてユーザが自らの感情状態を調整していくことを

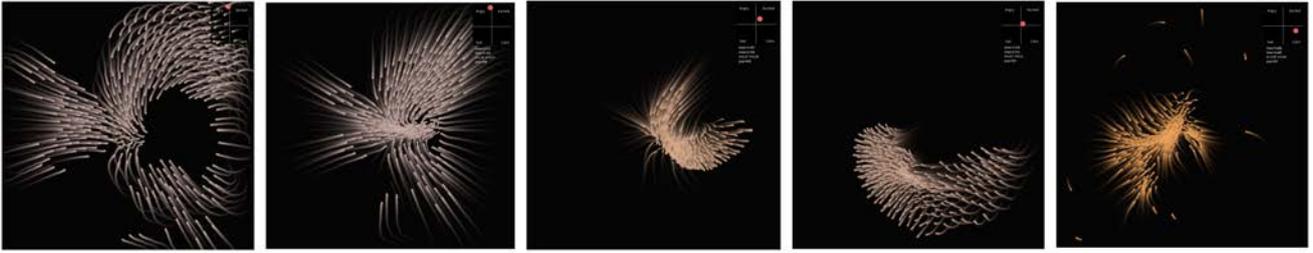


図 4 興奮状態からリラックス状態までの変化

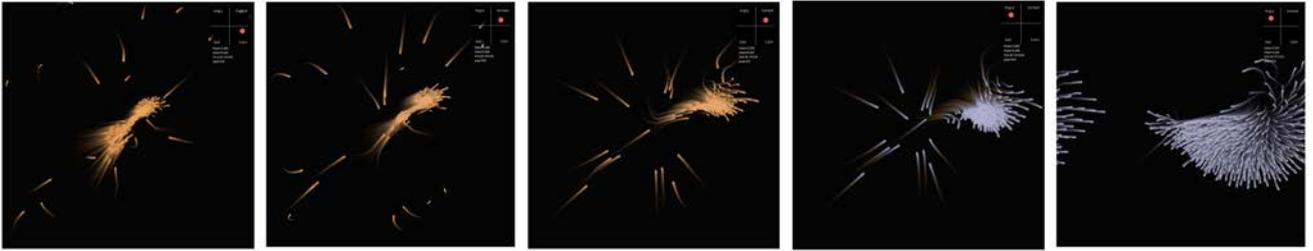


図 5 リラックス状態から警戒状態までの変化

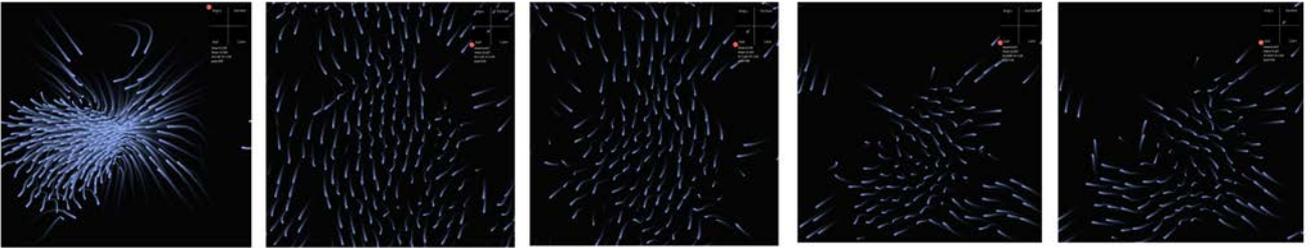


図 6 警戒状態から疲労状態までの変化

目指す。

4.4 実際の生成例

図 4 は、高感情価と高覚醒度（興奮）状態から高感情価と低覚醒度（リラックス）状態までの変化を示す。

図 5 は、高感情価と低覚醒度（リラックス）状態から低感情価と高覚醒度（警戒）状態までの変化を示す。

図 6 は、低感情価と高覚醒度（警戒）状態から低感情価と低覚醒度（疲労）状態までの変化を示す。

5. まとめと今後の展望

本研究は、ウェアラブル脳波計 MUSE 2 で脳波をリアルタイム計測し、覚醒度と感情価に基づいて情動状態を推定した結果をスクリーン上の電子生命体の形態変化として表現する情動フィードバックシステムを提案した。今後の課題として、まず、ユーザの情動履歴や脳波の時系列変化をより強調するために、遺伝アルゴリズムや進化計算を導入することを検討していく。次に、マルチユーザの脳波相互作用機能を加えて、ユーザ間のコミュニケーションや感情認識を向上させることも考えている。

参考文献

- [1] Alvin Lucier Film. Solo Performer. http://www.alvin-lucier-film.com/solo_performer.html, (参照 2025-12-15).
- [2] Nina Sobell. HISTORY: BRAIN WAVE DRAWINGS. https://www.ninasobell.com/ninasobell/history_brainwavedrawings.html, (参照 2025-12-15).
- [3] Lisa Park. Eunoia II. <https://www.thelisapark.com/work/eunoia2>, (参照 2025-12-15).
- [4] Jamie Ngoc Dinh, You-Jin Kim, and Myungin Lee. Fractalbrain: A neuro-interactive virtual reality experience using electroencephalogram (EEG) for mindfulness. In Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-4, 2024.
- [5] John Conway et al. The game of life. Scientific American, 223(4): 4, 1970.
- [6] Lai, Xingyu, et al. Seeing And Communicating With Your Mind: A Novel EEG Signal Based Interactive Visual Meditation System. Proceedings of the Eleventh International Symposium of Chinese CHI. 2023.
- [7] Huang, Scottie Chih-Chieh. "Sensitive Floral." ACM SIGGRAPH Asia 2023 Art Gallery. 2023. 1-2.
- [8] James A. Russell. A circumplex model of affect. Journal of Personality and Social Psychology, 39(6): 1161, 1980.
- [9] Rafael Ramirez and Zacharias Vamvakousis. Detecting emotion from EEG signals using the Emotive EPOC de-

- vice. In International Conference on Brain Informatics, pp. 175–184. Springer, 2012.
- [10] Jeffrey B. Henriques and Richard J. Davidson. Left frontal hypoactivation in depression. *Journal of Abnormal Psychology*, 100(4) : 535, 1991.
 - [11] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 25–34, 1987.
 - [12] B. B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. NY : Freeman, 1982.
 - [13] Guozhen Zhao, Yulin Zhang, and Yan Ge. Frontal EEG asymmetry and middle line power difference in discrete emotions. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 12 : 225, 2018.