

瞑想トレーニングのための閉眼時脳波測定システムの提案

Proposal of eyes-closed EEG analysis system for meditation training

橋口航^{*1} 森田純哉^{*2} 平山高嗣^{*3} 間瀬健二^{*3} 山田和範^{*4}
 Wataru HASHIGUCHI Junya MORITA Takatugu HIRAYAMA Kenji MASE Kazunori YAMADA
 横矢真悠^{*4}
 Mayu YOKOYA

^{*1}名古屋大学工学部電気電子情報工学科

Dept. of Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University

^{*3}名古屋大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nagoya University

^{*2}名古屋大学未来社会創造機構

Institute of Innovation for Future Society

^{*4}パナソニック株式会社

Panasonic Corporation

We have focused on applying neurofeedback to the meditation. In order to apply the neurofeedback to meditation, we believe it is necessary to analyze the eyes-closed EEG. The purposes of this study were realization of real-time analysis of eyes-closed EEG and meditation in the natural situation with neurofeedback in the spontaneous opening and closing eyes. For these purposes, we constructed the EEG analysis system equipped with a detection device of the opening and closing eyes, and prototyped neurofeedback system. In the preliminary experiment, the proposed system could detect failures of participant's meditation by analyzed EEG and verbalization of them.

1. はじめに

近年、低コストで装着も簡単で、ユーザへの負担が小さい簡易脳波計が登場し、脳波の応用研究が盛んに行われている。脳波の応用例として、認知機能の改善や ADHD、てんかんといった疾患の治療を目的としたニューロフィードバックを挙げることができる。ニューロフィードバックでは、ユーザはディスプレイによる視覚提示や音提示によって、脳波をリアルタイムに提示される。

このニューロフィードバックの応用として、とくにマインドフルネス瞑想に注目している。マインドフルネス瞑想(以降、マインドフルネス瞑想は瞑想と表す)とは、注意を集中する方法を身につけることで、自己の精神状態の統制を目指す活動である [Kabat-Zinn 90]。瞑想にはストレス低減や認知機能の向上などの効果があるとされている [Kabat-Zinn 90][Zeidan 10]。近年、神経科学分野においても、瞑想と脳の関係に注目が集まっており、瞑想による脳への影響を明らかにする多くの研究がなされている [Fan 14][Tan 14][Cahn 06]。

瞑想により行われる自己の精神状態の統制は、脳の活動の統制であると捉えることができる。そのため我々は、ニューロフィードバックにより自身の脳波を統制することで、瞑想を行うことが可能であると考えている。実際に近年、瞑想にニューロフィードバックを用いる研究が行われ始めている [Lutterveld in-press]。先行研究では、高解像度の多チャンネル脳波計を使用し、瞑想により活動が変化するとされている DMN(Default Mode Network) の活動を、ソース推定によりフィードバックしている。

しかし、コストや機器の複雑さを考えれば、このようなフィードバック環境を実利用の場に導入することは困難である。よって、本研究ではより簡易なフィードバック環境を提供する。具

体的には、安価な簡易脳波計を使用して、後頭部 α 波という大きな信号を扱う。 α 波は瞑想によって変化することが、従来の神経科学研究において確認されている [Fan 14][Cahn 06]。ただしフィードバックする指標として後頭部 α 波を利用するには、開閉眼のモダリティを区別した計測を実現する必要がある。なぜなら、開眼時の脳波には様々なノイズが混入するからである。たとえば、視覚野において処理される刺激の影響により後頭部で α 波の脱同期 (α ブロッキング: 閉眼時に 8-12Hz の脳波が強くなる現象) が生じる。また、瞬きなどの眼球運動に付随する眼電位によるノイズもある。

さらに、開閉眼のモダリティを区別した計測を実現する必要性は、瞑想トレーニングの観点からも指摘できる。通常、瞑想は注意を集中させやすくするため、閉眼した状態で行われる。そして、瞑想という行為の持続は、従事者自身によって決定される。瞑想は、自己の内面の自発的な観察である。他者に強制されて行うものでも、事前に決められた時間の中で行うものでもない。瞑想の提唱者であるカバットジンは、瞑想の初心者には短時間の瞑想も行えないのに対し、瞑想熟練者は長時間の瞑想を行えるようになることを指摘する [Kabat-Zinn 90]。このことは、瞑想の持続時間そのものが、瞑想の質に影響を及ぼすことを示唆する。そのため、瞑想従事者の自発的な開眼と閉眼を検出できれば、そういった瞑想の従事時間を強制することなく抽出し、その間の脳波をユーザにフィードバックすることができる。

以上の理由から、本研究では自発的な開閉眼における、閉眼時脳波の計測の実現および脳波フィードバックを用いた自然な状況での瞑想の実現を目的とする。この目的のために、開閉眼の検出装置を備えた脳波計測システムの構築およびニューロフィードバックシステムの試作を行う。

連絡先: 橋口航, 名古屋大学工学部電気電子情報工学科,
 hashiguchi@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp

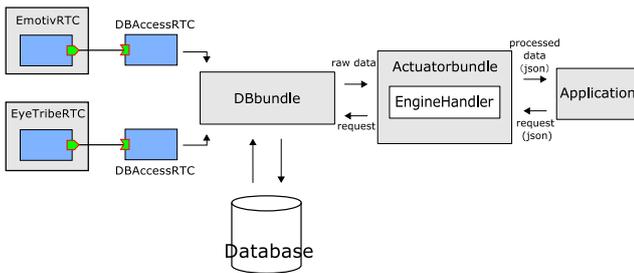
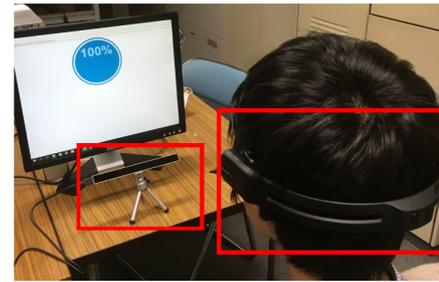


図 1: システムの概要



The Eye Tribe Tracker Emotiv EPOC+

図 3: 視線, 脳波センサ使用例

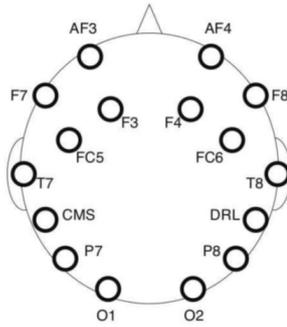


図 2: Emotiv EPOC+ のチャンネル配置図

2. 閉眼時脳波フィードバックシステム

2.1 システムの要件と概要

本研究で構築した脳波フィードバックシステムの概要を図 1 に示す。名古屋大学 COI が開発しているプラットフォームを利用した。このプラットフォームは産総研 (産業技術開発機構) が開発した RT ミドルウェアをベースに開発されている。このことにより、リアルタイム性、同期処理および負荷分散を実現している。

各モジュールの概要を記す。EmotivRTC, EyeTribeRTC は各センサデータの取得を行い、タイムスタンプといったデータを付与し、データベースで標準化されているデータ形式に変換し送信する。DBAccessRTC はセンサのデータを受け取り、DBbundle に渡している。DBbundle でデータベースの管理を行う。ActuatorBundle 内で脳波処理と開閉眼の判定を行う。Application でユーザーに脳波のフィードバックを行う。

2.2 使用センサ

本研究では簡易な脳波センサ、視線センサを利用した。Emotiv EPOC+ は既存の研究で使われてきた脳波計と比べ、10 万円以下と非常に安価である。また装着も容易で、使用時は電解液を利用するため、ジェルによる電極の固定が必要なく、ユーザーへの負担は小さく実用性が大きい。開閉眼の検出に利用した視線センサの Eye Tribe も非常に安価であり、実用性は大きい。

Emotiv 社製の Emotiv EPOC+ のサンプリング周波数は 128Hz, チャンネルは 10-20 法に基づく 14 個 (図 2) である (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4)。

The Eye Tribe 社製の The Eye Tribe Tracker のサンプリング周波数は 30Hz または 60Hz であり、本研究では 60Hz を使用している。Eye Tribe ではキャリブレーションを行うことで、モニタ左上を (0,0) 座標として視線座標を取得することができる。

Eye Tribe は赤外線による視線検出デバイスをモニタの前に置くだけでよいため、Emotiv EPOC+ と同時に使用することができる (図 3)。

ただし、使用したセンサはサンプリング周波数が異なっており、データを利用する場合には同期処理を行う必要がある。同期処理について次節で説明する。

2.3 データベースによる統合

データベースを利用することで、異なるサンプリング周波数のセンサデータのバッファリングを行っている。データベースの管理は図 1 の DBbundle が行っている。データベース内のデータは、リレーショナルデータベース (SQLite) として構造化され、以下のカラムから構成される。

- `_id`: データ一つにつけられるユニークな id
- `data_id`: データの種類を表す id
- `user_id`: ユーザを表す id
- `timestamp`: データを取得した時間
- `data`: 実際のセンサデータ

視線、脳波それぞれのセンサの RT コンポーネント内では、この形式のデータを作成し、DBAccessRTC に送っている。上記のようにタイムスタンプをデータに付与し、センサデータを利用する際にそのタイムスタンプを参照することで、同期を行っている。

2.4 閉眼時脳波フィードバック

以下ではフィードバックする脳波の処理、閉眼時の脳波測定、脳波フィードバックアプリケーションの実装を示す。

脳波データには Emotiv EPOC+ の後頭部に位置する電極 O1, O2 を使用した。フィードバックする α 波のパワースペクトルの算出には、1 秒のハミング窓を用いた後、FFT を使用している。この窓関数のオーバーラップを 75% とするため、0.25 秒の周期で α 波を算出および表示している。

開閉眼の判定には、EyeTribe によって取得された視線データを利用している。EyeTribe では視線が検出されないとき、視線座標を (0,0) として返す。これを利用して、視線座標が (0,0) であるときを閉眼、その他を開眼として判定を行っている。以上の判定は、データベースから最新の視線座標を取り出して行っている。

脳波フィードバックは web ブラウザ経由で行う。図 4 に示すように、閉眼中はその閉眼での脳波の平均値に逐次更新され、開眼中はその前の閉眼時の平均値が表示され続ける。アプリケーションでは、ユーザーの自然な状態での 10 秒間の脳波の値を基準値として設定し、その値を 50%, 基準値の 2 倍の値を 100% となるように表示している。% 表記を使用している理由

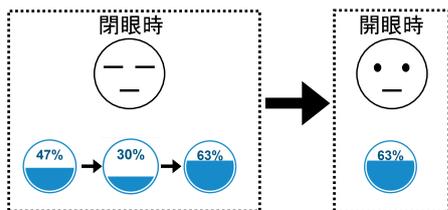


図 4: フィードバックアプリケーションの実際の挙動

は、実際の脳波の値を表示すると、ユーザが自身の α 波のパワーの状況を判断しにくくなるためである。このアプリケーションは、JavaScript のライブラリである D3.js^{*1} (D3:Data-Driven Documents) を利用して作成されたアプリケーション^{*2} を使用した。

3. 実験

3.1 目的

本実験では、提案システムを使用している瞑想トレーニングの効果の検証および提案システムの改善点の調査を目的とする。

3.2 実験参加者

参加者は男子大学生 2 名 (平均 22.5 才) と男子大学院生 2 名 (平均 23 才) の計 4 名である。参加者は実験前の段階で、脳波を計測し、使用することまた瞑想を行う実験であることを知っていた。ただし、全参加者は瞑想についての知識を有してはいなかった。

3.3 実験手続き

実験は静かで移動物体のない部屋で行った。はじめに実験に関する教示を行った。教示の内容は以下の通りである。

- 閉眼時の脳波を計測する。その中の α 波と呼ばれる脳波がディスプレイに表示される
- 瞑想により α 波は強くなるとされている
- 瞑想とは、何かに注意を集中させることで、その他にわきあがる感情を見つめ自身の統制を行うことである
- 自由に閉眼を繰り返してもらおう。その際、開眼時にディスプレイを確認しながら、閉眼時に脳波をコントロールし強くすることが課題である
- 開眼時には自身の感じたことを発話する

教示後、Emotiv EPOC⁺ の装着、EyeTribe のキャリブレーションおよび発話を記録するためのビデオカメラの設置を行った。次に、脳波フィードバックアプリケーションの基準値を取得するために、合図をするまで閉眼し続けることだけを参加者に伝え、参加者の自然な状態での閉眼時の脳波を 10 秒間測定した。次に、教示で説明した課題を少なくとも 20 分行わせた。その後 20 分経過したことを参加者に伝え、終了したくなったらその旨を伝えるよう指示した。終了後、実験を通して感じたこと、システムの良かった点、改善点などを聞いた。

4. 結果

図 5 に、参加者ごとに得られた、閉眼試行ごとの α 波のパワーの平均 (以降 α 波のパワーとする) と閉眼時間 (瞑想の持続時間) をまとめた。また、図 6 は、閉眼時間と α 波のパワーの散布図である。

*1 <http://d3js.org/>

*2 <http://bl.ocks.org/brattonc/5e5ce9beee483220e2f6>

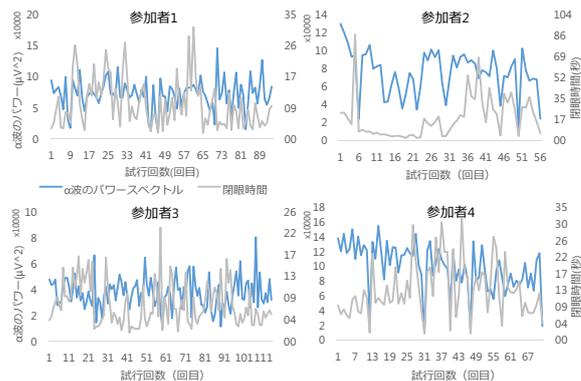


図 5: 試行回数ごとの α 波のパワーと閉眼時間の推移

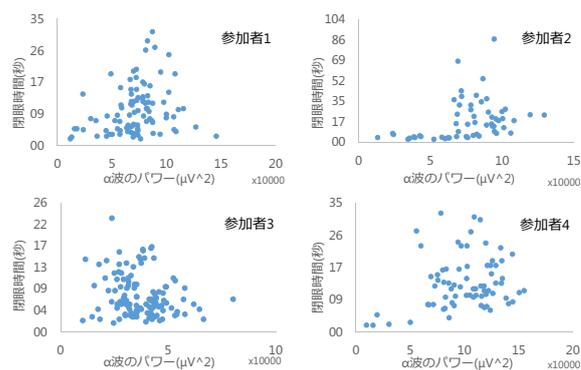


図 6: α 波のパワーと閉眼時間の関係

4.1 α 波と閉眼時間および試行回数との関係

図 5 から、閉眼時間が落ち込んでいるときに、 α 波のパワーも落ちて込んでいることが観察される (参加者 2 における 5 回目、参加者 4 における 12 回目など)。さらに、参加者 2 と 4 については、試行回数の増加に従い、 α 波のパワーが低下していく傾向にあるようにもみえる。参加者 1 と 3 については、試行回数の増加に伴う、 α 波のパワーの変動の傾向はみえない。また、図 6 からは、参加者 1 と 2 および 4 については、閉眼時間が増加するにしたがって、 α 波も増加しているようにみえる。

これらを確かめるため、 α 波のパワー、閉眼時間および閉眼の試行回数の相関係数を計算した (表 1)。試行回数と α 波のパワーの相関について、参加者 4 からは負の相関が確認できたものの、参加者 2 からは試行回数と α 波のパワーに相関が確認できなかった。また、参加者 1 と 3 も同様に相関が確認できなかった。そこで、閉眼時間の α 波のパワーへの影響を取り除くために、 α 波のパワーと閉眼時間から、回帰式を利用し推定された、閉眼時間による α 波のパワーを求め、元の α 波のパワーから差し引いた。この操作を行い、相関係数を計算した結果が、表 1 の「試行・閉眼補正後の α 波」の項目である。閉眼時間の影響を取り除いたところ、参加者 2 の試行回数と α 波のパワーに負の相関が確認できた。また参加者 4 に関しても、負の相関が強くなった。これらのことは、閉眼時間の長さが瞑想に影響があることを示唆している。

閉眼時間と α 波のパワーの相関について、参加者 2 と 4 からは正の相関が確認出来たものの、参加者 1 からは確認できなかった。参加者 1 について、図 6 を観察したところ、1 度だけ閉眼時間が 60 秒以上であった。そこで、この 60 秒以上の閉眼時間を外れ値とし、除いて相関を求めたところ、 $0.245(p < .05)$ と正の相関が確認出来た。参加者 3 だけ負の相関が確認出来た

表 1: 閉眼時間, 試行回数, α 波それぞれの相関

	閉眼時間・試行	閉眼時間・ α 波	試行・ α 波	試行・閉眼補正後 α 波
参加者 1	-0.164	0.191	0.004	0.037
参加者 2	0.285*	0.344**	-0.226	-0.344**
参加者 3	-0.187*	-0.202*	-0.039	-0.078
参加者 4	0.103	0.243*	-0.520**	-0.563**

*: $p < .05$, **: $p < .01$

表 2: 参加者 2 と 4 の発話例

試行回数	発話内容
2 38 回目	・集中がつかなくなってきた
42 回目	・集中できない
49 回目	・動きたくなくなってきた
実験後	・集中できたと感じてても 上がらないときもある
実験後	・集中できていないときは 低くなっていた
実験後	・値が高くなったときは 集中できたときであった
4 36 回目	・落ち着こうとしても 姿勢の問題もあってそわそわする
39 回目	・頭の圧迫感や足が寒いことが気になる
53 回目	・いらいらしてくる

ことについて考察する。提案システムでは、脳波に混入するノイズの除去は行っていないため、ノイズの影響を受けやすい。閉眼時間が十分である場合、加算平均によってノイズが低減される。しかし参加者 3 の閉眼時間の平均が 7.338 秒と短く、ノイズの低減がされなかった場合が多かったと考えられる。

4.2 フィードバックされる α 波のパワーと発話内容

参加者 2 は実験中に、自身の集中度と α 波のパワーとを比較する発話をしている (表 2)。その中には、自身の集中度と数値が一致していることを示す発話の一方で、一致していないことを示す発話も存在した。これらの発言から、ユーザにフィードバックされる α 波のパワーは、必ずしもユーザが主観的に感じる集中度と一致しないことが示された。

一方で、得られた α 波のパワーと発話を統合的に解釈すれば、参加者の精神的な状態と α 波のパワーとの関係が示唆される。参加者 2 と 4 は後半になるにつれて、瞑想を上手く行えていないことが読みとれる発話をしていった (表 2)。これは、試行回数と α 波のパワーの負の相関と一致している。したがって、提案システムが瞑想を上手く行えていないことの判定機能を有する可能性が示された。

5. おわりに

本研究では、自発的な開閉眼における、閉眼時の脳波計測の実現および脳波フィードバックを用いた自然な状況での瞑想の実現を目的とし、開閉眼の検出装置を備えた脳波計測システムの構築および脳波フィードバックシステムの試作を行った。

次に 4 名に対して、提案システムの試用実験を行った。実験で得られた、発話から推定される被験者の瞑想に対する姿勢と、 α 波のパワーを分析したところ、提案システムが瞑想を上手く行えていないことの判定機能を持つことが示された。

また、今回行ったユーザ実験では、参加者は瞑想についての知識を有していなかった。その結果、脳波フィードバックの瞑想トレーニングへの効果を読みとることが困難であった。今後の課題として、瞑想トレーニングの指標としての脳波フィードバックの効果の検証、アーチファクトの除去、およびフィードバックの表示方法を検討していく必要がある。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション (COI) プログラム」の支援によって行われた。

参考文献

- [Cahn 06] Cahn, B. R. and Polich, J.: Meditation states and traits: EEG, ERP, and neuroimaging studies., *Psychological bulletin*, Vol. 132, No. 2, p. 180 (2006)
- [Fan 14] Fan, Y., Tang, Y.-Y., Tang, R., and Posner, M. I.: Short Term Integrative Meditation Improves Resting Alpha Activity and Stroop Performance, *Applied psychophysiology and biofeedback*, Vol. 39, No. 3-4, pp. 213-217 (2014)
- [Kabat-Zinn 90] Kabat-Zinn, J.: *Full Catastrophe Living: Using the Wisdom of Your Body and Mind to Face Stress, Pain, and Illness*, Delta Trade Paperbacks (1990)
- [Lutterveld in-press] Lutterveld, van R., Houlihan, S. D., Pal, P., Sacchet, M. D., McFarlane-Blake, C., Patel, P. R., Sullivan, J. S., Ossadtchi, A., Druker, S., Bauer, C., et al.: Source-space EEG neurofeedback links subjective experience with brain activity during effortless awareness meditation, *NeuroImage* (in-press)
- [Tan 14] Tan, L.-F., Dienes, Z., Jansari, A., and Goh, S.-Y.: Effect of mindfulness meditation on brain-computer interface performance, *Consciousness and cognition*, Vol. 23, pp. 12-21 (2014)
- [Zeidan 10] Zeidan, F., Johnson, S. K., Diamond, B. J., David, Z., and Goolkasian, P.: Mindfulness meditation improves cognition: Evidence of brief mental training, *Consciousness and cognition*, Vol. 19, No. 2, pp. 597-605 (2010)