



生理情報による学習環境の知的活動種類の分析

張, 帆

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7234号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007234>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

生理情報による学習環境の知的活動種類
の分析

平成 30 年 1 月

神戸大学大学院国際文化学研究科

[張帆]

目次

1	はじめに.....	5
1.1	知的生産性.....	5
1.2	知的生産階層モデル.....	5
1.3	教育環境における知的生産性.....	7
1.4	バイオフィードバック効果と知的活動種類.....	7
1.5	研究目的.....	9
2	知的活動の分析方法.....	10
2.1	本章の目的.....	10
2.2	知的活動の評価指標.....	10
2.2.1	実作業成績.....	10
2.2.2	タスク成績.....	10
2.2.3	主観報告.....	11
2.3	生理情報による評価指標.....	11
2.3.1	脳波 (EEG).....	11
2.3.2	近赤外分光法 (NIRS).....	11
2.3.3	心拍.....	11
2.3.4	脈拍.....	12
2.3.5	心拍・脈拍変動 (HRV).....	12
2.3.6	皮膚抵抗.....	12
2.3.7	唾液アミラーゼ.....	13
2.3.8	その他.....	13
2.4	集中度フィードバック.....	14
3	生理情報による収束的思考と拡散的思考活動の分析及び識別.....	15
3.1	研究方法.....	15

3.2	実験 1	15
3.2.1	実験装置	16
3.2.2	実験課題	17
3.2.3	集中度フィードバック	18
3.2.4	実験手順	19
3.2.5	フィードバック効果	19
3.2.6	脳波による実験課題の自動認識	21
3.2.6.1	時間域データを用いた分類	21
3.2.6.2	分類結果	22
3.2.6.3	周波数領域データを用いた分類	22
3.2.6.4	分類結果	23
3.2.7	脈拍による実験課題の推定	23
3.2.7.1	データの前処理	24
3.2.7.2	LF/HF データを用いた分類	26
3.3	結果及び考査	26
4	読書活動中の生理情報による知的活動種類の分析	28
4.1	研究方法	28
4.2	実験 2	29
4.2.1	実験装置	29
4.2.2	実験課題	29
4.3	読書時の生理情報と集中度の関係	31
4.3.1	データ前処理	32
4.3.2	考査	32
4.4	読書中の生理情報変化における集中状態の類似と差異の抽出	35
4.4.1	複数生理情報の特徴抽出手法	35
4.4.2	類似の抽出の検証	36
4.4.3	差異の検証	37

4.5	まとめ	40
5	読書活動中の生理情報による状態認識	42
5.1	研究方法	42
5.2	複数被験者の生理情報による書籍種類に対する自動認識	42
5.2.1	データ前処理	42
5.2.2	識別結果	43
5.2.3	同一被験者の生理情報による書籍種類に対する自動認識	43
5.2.4	識別結果	43
5.2.5	考察	45
5.3	生理情報による書籍に対するイメージの自動認識	46
5.3.1	実験 3	46
5.3.1.1	実験装置	46
5.3.1.2	実験課題	46
5.3.2	生理情報による書籍のイメージ分析	47
5.3.2.1	データ前処理	47
5.3.2.2	分類できる書籍のイメージの種類	48
5.3.3	認識結果	51
5.4	考察	52
6	おわりに	54
7	研究業績	56
8	参考文献	58

1 はじめに

本章では、先ず本研究に深く関係する知的生産性と知的生産階層モデルを紹介する。次に、知的生産性に関する研究の一環である知的活動分類の関連研究を紹介する。その後、知的活動分類の問題点について述べ、本研究の目的を紹介する。

1.1 知的生産性

知的生産性は、オフィスや教室など知的活動を行う空間の中で知的成果を生み出す効率のことを指す。知的生産性の向上は現代社会に非常に重要な課題といえる。特に知識社会である現代においては、人的資源の投入に対する生産性の最大化が重視されるようになった。その中でも知的生産性の向上が特に求められている。知的生産性は、オフィス空間や学習環境という知的活動空間において、今や、安全や防災、衛生などと同等に重要な達成目標と考えられている。そのニーズを受け、日本では2007年8月、国土交通省が主導して「知的生産研究委員会」を設立し、知的生産性能向上を新たな課題として積極的に検討を進めている。

1.2 知的生産階層モデル

「知的生産研究委員会」は平成20年から知的生産性評価の方法とツールを収集、整理して、標準的な方法を示した[1]。委員会は2010年に知的活動の階層モデルを提出し、知的活動には第一階層「情報処理」、第二階層「知識処理」、第三階層「知識創造」という3つの知的活動階層があると定義する。知的活動の階層モデルと環境性能の関係を図1に示す。右の環境性能は対応する人間の生体反応（生理・心理）に影響を与える。また、これらの生理、心理の反応が人間の意識・行動に働き、最後に左の知的活動に影響する。

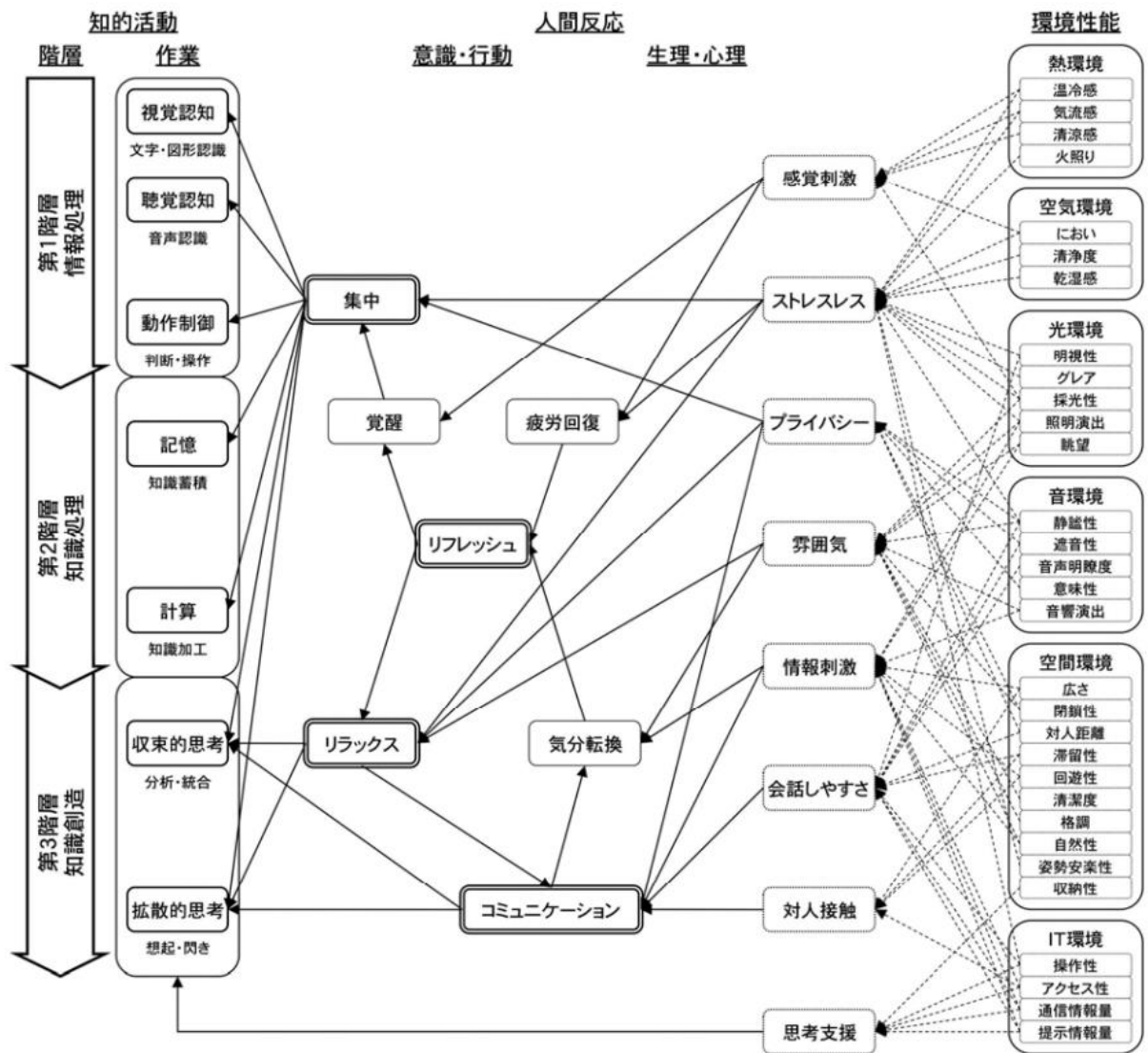


図 1 知的活動の階層モデルと環境性能の因果ネットワーク。知的生産性研究委員会報告書- 国土交通省より転載[2]

第一階層「情報処理」は知識情報の定型処理や事務処理に対応する。この階層における作業は人の感知による情報認識、簡単な文字、図形の記憶と計算などである。その効率の測定は容易であり、総合環境性能評価ツール CASBEE などに組み込まれている。

第二階層「知識処理」は知識情報の調査や加工処理に対応する、この階層における作業はより高次の記憶と計算である。定量評価は、主に単位時間内の文書や数的処理の作業効率で行い、第一階層より難しいものである。

第三階層「知識創造」は価値創造、イノベーションを行う階層である。集中やリラックス、コミュニケーションを可能にする空間を人の知識創造を刺激すると考えられている。知

識創造に関わる思考活動には、拡散的思考と収束的思考という二種類の思考活動があると考えられている。知識創造について評価する方法はいまだに模索の段階であり、多くの課題が残っている。

1.3 教育環境における知的生産性

教育施設における学習環境、特に教室も知的活動を行う環境であり、その環境における知的生産性もよく研究されている[3]。学習環境は、知的生産性を知的産出と知的吸収に分ける場合、知的吸収の効率、すなわち学習効率を対象とする環境と定義されている[2]。

学習環境は学習効率に大きく繋がるため、教室環境と学習効率の関係、特に教室における温度や音、空気環境について以前から検討されている。例えば室温上昇や室温低下に伴い学習意欲及び効率が大きく低下することが確認されている[4]。年齢層が低くなるに伴い、室温と学習効率の関係は曖昧になるが、それでも室温が低下した場合は学習効率低下の恐れがあるという結果が得られている[5]。学習効率を最適化するためには、年齢層に応じた適切な室内環境設計、温度制御の必要性があると考えられる。

学習効率を測る目的で、実作業成績を求める場合、従来の研究では暗算や記憶、読書など簡単な課題を中心に実施したが、最近では複合的な課題も使用するようになった[5]。また、生理情報を学習効率の評価指標として使う研究もある[6]。本研究の実験は、すべて学習環境を対象にしている。

1.4 バイオフィードバック効果と知的活動種類

環境要素の知的活動性への影響は、知的活動の階層及び知的活動の種類によって異なることがすでに判明している。これらの研究の知見は、バイオフィードバックに関する研究にも役立つ。

筆者が行った先行研究では、被験者の学習パフォーマンスを向上させるためにバイオフィードバック手法、すなわち、被験者自身の脳波から計測した集中度を、音声でフィードバックする方法を提案した[7]。バイオフィードバックとは、身体内部の情報を工学的手法により検出し、体外からの適切な手法により感覚にフィードバックにすることで、自己学習を促し、新たな制御能力を獲得させる手法の総称である[8]。バイオフィードバックは医学、工

学、心理学、教育学など広い領域に関わっている。当初は医療目的が中心であったが、最近では医療以外の分野にも応用が広がっている。中でも、教育分野では注意欠陥・多動性障害、自閉症の治療に始まり、セルフコントロール能力や単語の認知処理など健常児に対する応用も数多く研究されている[9]。さらに音楽パフォーマンス向上など高次の知的活動にも適用できることが示されている[10]。

筆者は、バイオフィードバックにおける音声の種類による効果の違いを検討するために、ピアノノート、音楽レート、音楽ボリューム、環境ノイズボリュームといった4種類の音声フィードバックを用いて、授業レポート課題を行った時の学習者の集中度変化を比較した。それぞれの音声のフィードバック方法としては次のような方法を採用した。ピアノノートについては、集中度に合わせて音階を変え、音楽レートについては、集中度に合わせて音楽の再生速度を変更した。音楽ボリュームについては集中度の上昇時に音楽の音量を下げ、環境ノイズについては集中度の上昇時に環境ノイズの音量を下げた。環境ノイズを用いた場合、被験者はフィードバックなしの場合と比べて集中度の平均値が高くなり、さらに課題継続時間とともに集中度が下降する傾向が顕著に減少した。音楽ボリュームを用いた場合、集中度の平均値は高くなるが、集中度継続の効果は見られなかった。続いて、フィードバック用の音楽ジャンルや課題を変更して同様の実験を行ったところ、フィードバックの効果が異なることが確認された。これにより、集中度フィードバックの効果は、フィードバックの種類のみならず、知的活動の種類にも関係があることが推測された。

大場義夫(1980)の研究[11]では、音楽と学習効率の関連性について考察を行っている。その結果、知能検査の場合と違い、作業課題が創造性検査の場合、BGMは覚醒効果を有すること、また、リズムを中心とした音楽は、2桁の掛け算作業に対する阻害性が弱いこと、そしてその阻害性は加齢とともに消失することが示された。一方、メロディを中心としたBGMは、負荷直後から顕著な阻害効果が見られ、その効果は時間継続とともに徐々に消えていく。さらに、その効果は作業の量より質に依存することが示された。また、辻村壮平

(2010)の研究[12]では環境音に言語情報が含まれているかどうか学習効率と深くかわるとされた。研究結果からみると、メロディを中心としたBGMは言語情報に含まれている環境音に近い効果があるように見える。

知的活動の分類に関してはまだ課題が残っている。先に述べた集中度フィードバック実験では、課題の種類が変わると効果も大きく異なり、また同じ種類の課題でもフィードバックの効果が変わる場合がある。これに関して、高階層の活動は同じ課題にも複数の活動種類が含まれている意見がある。上猶(2009)[13]らは、同じの作文課題を前半は「アイデアの発

想」、後半は「アイデアのまとめ」という二つの作業に分けるように指示し、それぞれ前半を拡散的思考、後半を収束的思考と想定したうえで、音環境がそれらの作業に与える影響を考察した。その結果、音環境がそれぞれのタスクに与える影響が異なることが分かった。特に BGM 環境は拡散的思考にポジティブの影響を与え、電話会話は収束的思考にネガティブ効果があることが示された。

以上のように、知的生産性に関する研究の結果、知的活動の種類と環境要素の間には複雑な関連性があることが分かる。特に高階層の知的活動において、作業を細かく細分化する必要があると考えられるが、分類の基準に問題が残る。関連研究では、常に理論や研究者の主観判断で活動種類を分類しているが、その妥当性にも疑問が残る。例えば、上猶らは作文の前半を拡散的思考、後半を収束的思考と分類したが、実際に何をもって前半と後半を区別するのは明確ではない。また、前半であってもアイデアをまとめながら収束的思考をしている可能性がある。逆に、後半で文書を書きながらもアイデアを出している可能性もある。これに応じて、上猶らは、さらに思考の分離を細分化させる意見が挙げられている。

1.5 研究目的

以上のように、知的活動の分類と検出が重要であることを述べた。既存の分類方法、特に高階層の知的活動と階層モデルの対応関係は曖昧であり、知的活動の分類や細分化は、ある基準に従っているものの、研究者の主観に依存している部分も多く、基本的に研究によっても異なるため、客観性に欠ける。また、その分類手法と検出手法を、異なる作業種類や環境要素に対しても利用できるかどうかは疑問である。

そこで本研究では、知的活動、特に高階層である第3階層の知的活動を、生理情報の変化に基づいて分類し、自動的に認識する手法を提案する。

2 知的活動の分析方法

2.1 本章の目的

本章では、知的活動分析方法や評価指標について紹介する。独居高齢者介護などを目的とした人の室内活動認識は以前から注目されている[14]。今までの活動認識は主に室内状況を魚眼カメラで撮り、人の肌色など人の動作を表す特徴量を抽出し、HMM (hidden markov model) などを用いて学習、認識を行う。しかし、学習活動は殆ど机もしくはパソコンに向かう作業で、画像だけでは見分けられないと考えられる。知的生産性の向上を研究するため、知的活動をどのように客観的に評価するかは非常に重要である。近年では、知的生産性を評価する際、主観報告だけでなく、脳波や心拍、心拍変動などの生理指標を利用した評価法が提案されている[15]。以下には代表的な方法について紹介する。

2.2 知的活動の評価指標

2.2.1 実作業成績

実作業成績は、その作業空間にいる人の実際作業効率のことである。コールセンターなどの実作業が定量評価しやすい空間によく使われる。教育環境を評価する場合、授業小テストの点数、課題では採点などが利用される。客観性と信頼性が高いのが特徴である。しかし、使える場所は限られていて、短時間で計測するのは困難であり、また、高次の知的活動にも適用できない。

2.2.2 タスク成績

実作業成績以外では、タスク成績が知的生産性の指標としてしばしば使用されている。よく使われるのは乗算、加算、または記憶などの簡単な認知タスクである。注意や衝動性を測定する TOVA (Test of Variables of Attention) や知能検査 WISC-I、衝動性測定 Go/Nogo 課題などなども使用される。

2.2.3 主観報告

高階層な知的活動に関する研究では、主観報告がしばしば使用される。自己記入の質問アンケート或いはヒアリングを通して評価を行う。内容はおおむね環境の評価、または客観的採点が難しい課題に対する自己採点二つに分けられる。アンケートの記入方法には主にリッカート尺度と visual analog scale (VAS) の二種類が利用される。主観報告による評価は、計測器具を必要とせず、質問紙への回答により、容易に評価を得ることができる。

2.3 生理情報による評価指標

2.3.1 脳波 (EEG)

EEG を用いて、頭皮上の電極から得られる脳波信号は精神状態によって変化するため、脳波から精神状態を推定することが出来る。脳波は、特定の周波数帯域がいくつかの精神状態と関係していることが知られている。その中でも代表的なものとして、リラックス状態を表す α 帯域 (8-13Hz)、集中、または強度の集中を表す β 帯域 (13-30Hz)、眠気と関係がある θ 帯域 (3-7Hz) が知られている。注意、集中、ストレス、不安などの心理状態と脳波の関連についても数多く研究されている。EEG は、空間分解能が限られているが、高い時間分解能を持つという利点がある。

2.3.2 近赤外分光法 (NIRS)

脳機能解析手法として局所的な脳血流の変化を測定する近赤外分光法 (Near-infrared spectroscopy: NIRS) は、近赤外光を頭皮上から脳へ向けて照射し、脳からの散乱光を検出、脳血流変化を測定する。先行研究では、課題集中にたいして血流量の増加、リラックス課題では血流量の減少が観察されている [16]。NIRS は EEG と比べて、時間分解能が低く (1 秒以下) 空間分解能が比較的に高い方法である。

2.3.3 心拍

心拍は一定の時間内に心臓が拍動する回数で、自律神経系や内分泌系による調整を受けて、姿勢、運動、精神活動の状態に応じて変化する。交感神経が優位になる時は心拍数が増加する傾向があるため、安静時と運動時の最大心拍数の差を、運動強度の指標にする場合

もある[2]。しかし、心拍数は数多くの心身状態と関連するため、そのまま知的活動の評価指標として使うことは難しい。

2.3.4 脈拍

皮膚血管の膨張・収縮を皮膚表面から波形として電氣的・機械的にとらえたものを容積脈波と呼ぶ。皮膚血管は交感神経性血管収縮繊維の神経支配を受け、交感神経の緊張興奮時は毛細管径を細め、毛細管の血流が減少することになる。これに基づき、指先の血管の血流量を評価することで交感神経の興奮状態に関する指標を得ることができる。実際、交換神経系の賦活は末梢血管の収縮を生じ、脈拍の振幅が減少するという報告もある。[17]

2.3.5 心拍・脈拍変動 (HRV)

心臓拍動の間隔は一定ではなく、その平均値を中心として揺れ続けている。その間隔は心拍変動 (Heart rate variability: HRV) と呼ばれる。従来の研究では心拍変動に対するスペクトル解析が試みられ、心拍変動は幾つかの変動成分があることが分かった[18]。心拍変動成分が自律神経機能をはじめとするさまざまな生理機能の指標となる可能性が示された。精神活動について検討する場合は、LF/HF 比 (LF: 0.04-0.15Hz、HF: 0.15-0.4Hz) がしばしば注目されている。LF/HF は交感神経と副交感神経のいずれが優位かを表す指標であり、値が大きくなると交感神経が優位であり、逆の場合は副交感神経が優位になることを表す。最近では光電素子型脈波センサーがよく使われており、脈拍変動も同時に測定できる。測定場所は指尖や耳朶のどちらになるため、被験者に対する負担が少ないという利点がある。

2.3.6 皮膚抵抗

皮膚抵抗水準 (SRL: skin resistance level) は、視床下部への覚醒系作用による自律神経系の活動の高低を表すとされている。優れた評価方法として、生体の情動亢奮水準、あるいは覚醒水準の評価に使用される[19]。高い時間分解能を持つため、近年では、エンターテインメント分野でも応用されている。例えば、2015年ソニー・コンピュータエンタテインメント発売のホラーゲーム『UNTIL DAWN -惨劇の山荘-』の開発時、開発者はゲームをよりプレイヤーに恐怖感を与えるシーンを作り出すため、テスト段階においてプレイヤーがプレイ中の皮膚抵抗水準を測定し、ホラーシーンの恐怖度を評価している。

2.3.7 唾液アミラーゼ

人体に与えられた様々な刺激は、末梢神経を介して脳に伝達される。脳はそれらの刺激を認知し、それに対応するために交感神経系や内分泌系を介して全身に指令を伝達、各器官にはそれに応じて亢奮、抑制などの反応が現れる。精神内分泌学におけるストレス研究から、ストレス反応のメカニズムが明らかにされた。それによると、ストレスマーカーの一つとして、アミラーゼは非侵襲に採取できる方法として注目されている[20]。直接的な神経作用により唾液アミラーゼ分泌が亢進されるとき、応答時間は数分以内とかなり短い。不快感を感じた時、唾液アミラーゼ活性が上昇し、快適な刺激下では低下する現象が観測された。したがって、ストレスだけでなく、唾液アミラーゼによって快適と不快を判別できる可能性もある[21]。

2.3.8 その他

その他に、眼球運動[22]、瞳孔径[23]、瞬き回数[24]、坐位重心変化[25]などについての研究もよく見られる、いずれも測定方法は比較的簡便なのが特徴である。

以上の各指標の中から、本研究では信頼性と反応速度、便利性を考慮して、脳波、脈拍、脈拍変動、皮膚抵抗のいずれかあるいは複数を同時に使用する。

脳波の測定は以前の研究で使用経験のある非侵襲性ワイヤレス EEG センサー：Emotiv EPOC を使用する。Emotiv EPOC は電極部のスポンジに電解液をつけて計測する。これまでの実験から、電解液が乾燥するに従って精度も悪くなることが分かっている。一般的な日で 30 分弱、冬の乾燥した日には 15 分程度しか十分な検出精度を維持できない。電解液を補充すると実験を中断することになるため、長く実験できない点は問題である。

脈拍と脈拍変動については小型光電素子型脈波センサー PulseSensor SFE-SEN-11574 を使用する。採取したデータは Arduino で Bluetooth 或いは USB を経由してパソコンに送信する。小型のため耳朶への設置が可能であり、被験者の手作業を妨害しないという利点がある。

心拍変動は PulseSensor で測定した心拍のピークの間隔 (P-P 間隔) から直接計算する。LF/HF はパソコン側で変換する形にする。今回実験で使用する LF/HF としては、パワー

スペクトルの 0.05Hz から 0.15Hz までの低周波域を LF 成分、0.15Hz から 0.40Hz までの高周波域を HF 成分とし、その両方の強度を合計した値を用いる。

皮膚抵抗の計測には、Grove-GSR を使用する。Grove-GSR は、指に装着する二つの電極によって手掌部の皮膚抵抗を測定し、心拍センサーPulseSensor と併用することができるという利点がある。

その他の生理情報も、以上のセンサーで計測することが出来る、例えば、被験者の顔の筋電、特に表情、瞬きは脳波センサーでも捉えることが可能である。

2.4 集中度フィードバック

バイオフィードバックとは、身体内部の情報を工学的手段により検出し、体外から適切な手法により感覚にフィードバックにすることで、自己学習を促し、新たな制御能力を獲得させる手法の総称である。教育分野では注意欠陥・多動性障害の治療に始まり、セルフコントロール能力や音楽のパフォーマンス向上、単語の認知処理能力の向上など健常児に関する研究も数多く報告されている [26]。

本研究の実験に使うバイオフィードバック装置は、修士段階の研究で有効であった方法に沿って開発する。集中度フィードバックに使う音声はボリューム、再生スピードが変化するため、被験者に与える影響は普通より大きいと見られる。また、人は意味があると認識された情報に意識を傾ける傾向があるため、フィードバックを行う時、被験者が音環境に対する意識は、普段より高いと見られる。音楽環境についての研究もその音楽効果は「慣れ」が原因で時間と共に徐々に消えていくことが示されている [6]。もし仮説が成立すれば、音を用いた集中度フィードバックは、人が音に対する意識を高めるため、その音が人に対する影響は普段より大きい可能性もある。

3 生理情報による収束的思考と拡散的思考活動の分析及び識別

本章では、脳波と心拍変動を利用して、知的活動状態を第3階層の知的活動種類である「拡散的思考」と「収束的思考」に分類する手法を提案し、実験でその有効性を検証した。結果、周波数領域の集中度データを入力し、2種類の知的活動を教師として、サポートベクターマシン (SVM) により学習し、分類する手法は有効があると示した。

3.1 研究方法

Guilford [27]は人間の創造性は収束的思考と拡散的思考の二種類の思考によって構成されるとした。収束的思考は、問題に対して論理的に一つの答えを導き出す思考である。これに対して、拡散的思考は与えられた情報から様々な答えを創造する思考である。

本章では、これら既存の知的活動種類を自動的に認識する方法を検討する。知的作業の種類は多数存在しているが、本章では、高階層知的活動である二種類のパズルゲームを課題にして実験を行った。実験中の脳波と心拍データを記録し、時間域または周波数領域に変換したデータからランダムに選んだ70%を入力信号、これらのデータを記録した際にプレイしていたゲームを教師信号として、機械学習モデルを学習する。その後、学習後のモデルに残りの未学習データを入力し、機械学習モデルからの出力と、正解を比較することで提案手法の有効性を評価する。また、分類の精度が集中度フィードバックの有無に影響を受けるかどうかを検討する。

生理情報による自動分類、推定は知的作業の生産性に関する研究の参考になる。また、知的作業の種類が変化する場所で作業する人の生理情報を観測し、作業環境の制御デバイスと連動して動的に適切な環境を整えることが期待される。

3.2 実験1

本章は、実験装置と実験手順について述べる。

3.2.1 実験装置

脳波データの収集にはヘッドセット型脳波センサーEmotiv EPOC を利用した。Emotiv SDK を利用することで利用者の集中度を 0~1 の値 (Engagement/Boredom Score : ES) で評価することかできる。また、短期亢奮、長期亢奮、挫折感など他の感情評価も測定できる。それに加えて被験者にかかる負担が比較的少ない、振動に強いという利点があり、最近では BCI に関する多くの研究で使用されている [28, 29, 30]。

心拍データの収集には LED 脈拍センサーPulseSensor を利用する。PulseSensor は光電式容積脈拍記録法 (Photo Plethysmography: PPG) により脈拍を計測する。この記録法では、LED 光を皮膚内の血管に照射し、血中のヘモグロビンが光を吸収するという性質を利用して、ヘモグロビンが吸収せずに皮膚内部から戻ってきた光を受光素子で測定し、入る光量の多寡により脈拍を計測する。本章では、脈拍より心拍変動に注目する。先行研究では、容積脈拍記録法によって計算された心拍変動は心電図 (electrocardiography: ECG) による計算された心拍変動と高い相関を持つため、心拍数及び心拍変動を求める際、光電式容積脈拍記録法は心電図に代わる軽量化デバイスとして使用することが出来ると指摘されている [31]。また、LED 脈拍センサーは耳たぶと指先という二つの装着方法がある。同じ先行研究では、被験者の動きや振動から受けるノイズが強いため、指先での計測は現実ではないと指摘されているが、本実験では、被験者の活動は机の前に制限され、利き手と逆の手は殆ど動かす必要がないため、脈拍を指先で計測することにした (図 2)。

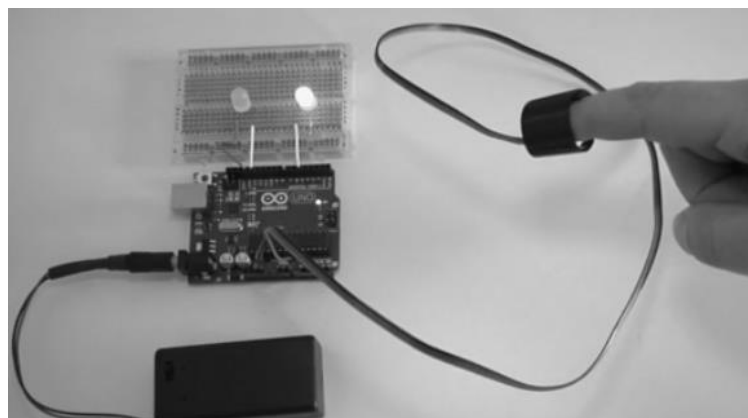


図 2 本実験の心拍センサーPULSE SENSOR の装着方法

図 3 に実験装置を示す。使用者は脳波センサー、心拍センサーとイヤホン装着して実験課題を遂行する。イヤホンにはカフェの環境音を流す。言語情報が含まれている環境音は作業に影響する恐れがあるため [13]、人声をカットした環境音を使用した。音のボリュームは

被験者自身で設定した適切音量の 50% に設定する。実験は室温 27 度に設定した 6x4m の個室で行う。

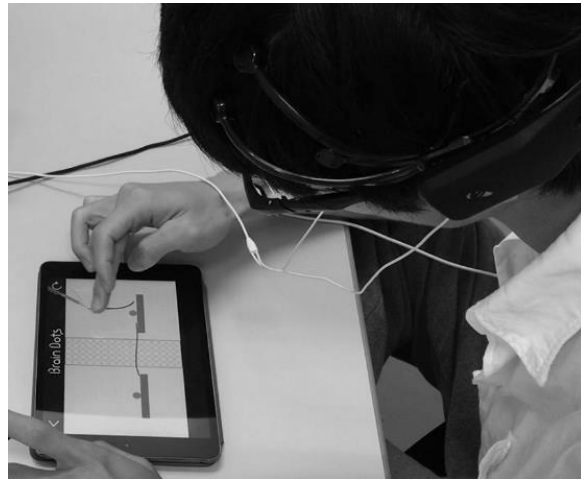


図 3 実験風景

3.2.2 実験課題

実験課題はペンシルパズルゲーム「数独」とフィジカルパズル「Brain Dots」を使用する。

数独は、図 4 に示すように 9x9 のマスに、一定のルールを満たすように空欄に 1-9 の数値を埋めていくパズルゲームである。初級数独の一般的な解法は、数値の配置を把握し、先ず一つの数値に注目し、他の同じ行列及びブロックに割り当てられた数値を候補から一つずつ排除していく。このような作業方法は収束的思考作業と見られ、知的活動と環境に関する研究でしばしば収束的思考作業の実験課題として使われている [32, 33]。

	6	7	2		4	1		
8				6				2
	5			7		3	4	
		1		3	2			
4	7	2			1	5		
5		6	7					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	4							

図 4 数独パズル

フィジカルパズルは近年流行している種類のゲームである。ゲームは図5に示すように、物理的な法則を利用してボールを運び、ステージをクリアしていくというものである。唯一解がある数独とは違い、フィジカルパズルゲームは、設計された解法はあるものの、同一ステージには多数の解が存在する。それをもって本研究ではフィジカルパズルを発散的思考作業の実験課題として使用する。

なお、数独問題は www.sudokugame.org に提供された初級数独を使い、Brain Dots はゲームステージ1から始めさせる。

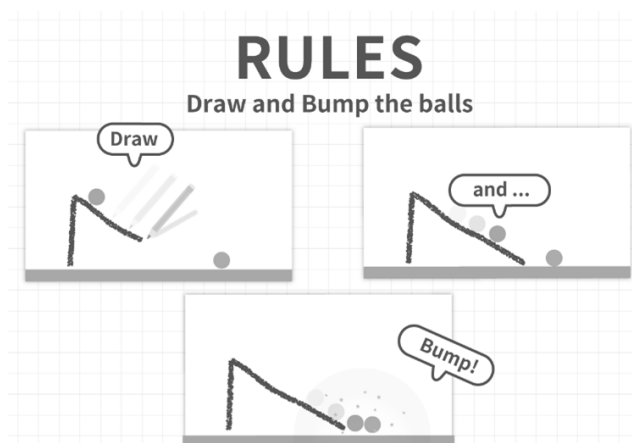


図5 フィジカルパズル

3.2.3 集中度フィードバック

集中度フィードバックが異なる作業種類に対する効果を検討するため、表1に示したように2、3回目の実験は被験者に集中度フィードバックを行った。フィードバックの手順は次の通りである。まず Emotiv EPOC を用いて被験者の脳波を計測し、Bluetooth 経由で PC に送信する。PC 側では、Emotiv SDK で受信したデータから興奮度 (ExcitementTermScore) や集中度 (EngagementBoredomScore) などの推定値を計算する。推測された値に応じて出力信号を生成し、最後にイヤホンで被験者にフィードバックする。フィードバック方法は先行研究[7]で有効であった方法で、すなわち、被験者の集中度が下がった時にボリュームを上げ、集中した時に下げる。

3.2.4 実験手順

実験は、大学院生 5 名を被験者として、一人週一回の頻度で実験を行った。また、数独とフィジカルパズル実験は一回ずつ交代で行った。最初の環境音ボリュームは被験者に調節を任せて、その後、環境音はこのボリュームをベースとして変化させる。実験の計画を表 1 に示す。

表 1 実験計画

	1分	5分	5分	15分
一回目	実験指示	安静閉眼	環境音を 50% に設定	
二回目	実験指示	安静閉眼	集中度フィードバック	
三回目	実験指示	安静閉眼	集中度フィードバック	
四回目	実験指示	安静閉眼	集中度フィードバック	環境音を 50% に設定

一回目の実験では、最初に被験者に「出来るだけ集中して課題を完成してください」と指示し、被験者が 5 分間の安静閉眼をした後課題を開始する。その際環境音は 50% に設定する。また、バイオフィードバックの実験に対する影響を調べるため、二回目からは実験指示の際に集中度フィードバックについての説明を加え、実験中に集中度フィードバックを行う。四回目の実験では実験指示を二、三回目の時と同じようにし、まず 5 分間の集中度フィードバックを行い、その後被験者に教えずにフィードバックを中止し、環境音を 50% に固定する。

3.2.5 フィードバック効果

実験課題を行っている被験者の集中度推移は図 6 のように記録した。

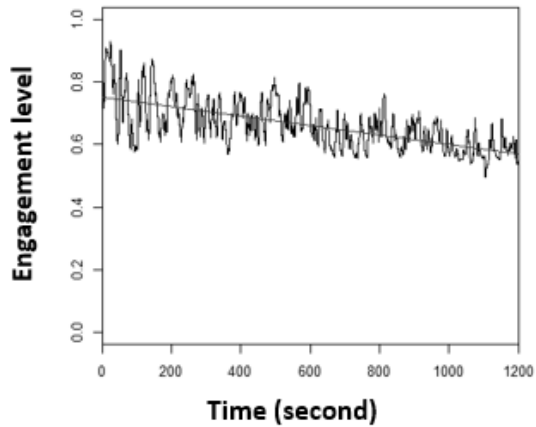


図 6 実験中の ES 変化の一例、中心の直線は回帰直線

安静時の集中度推定値 (ES) には被験者それぞれに個人差があるため、本研究は ES の値より実験中の ES 変化に注目する、ES 回帰直線の回帰係数によって ES 変化率を定義し、高いほど被験者が課題に集中していることを表す。

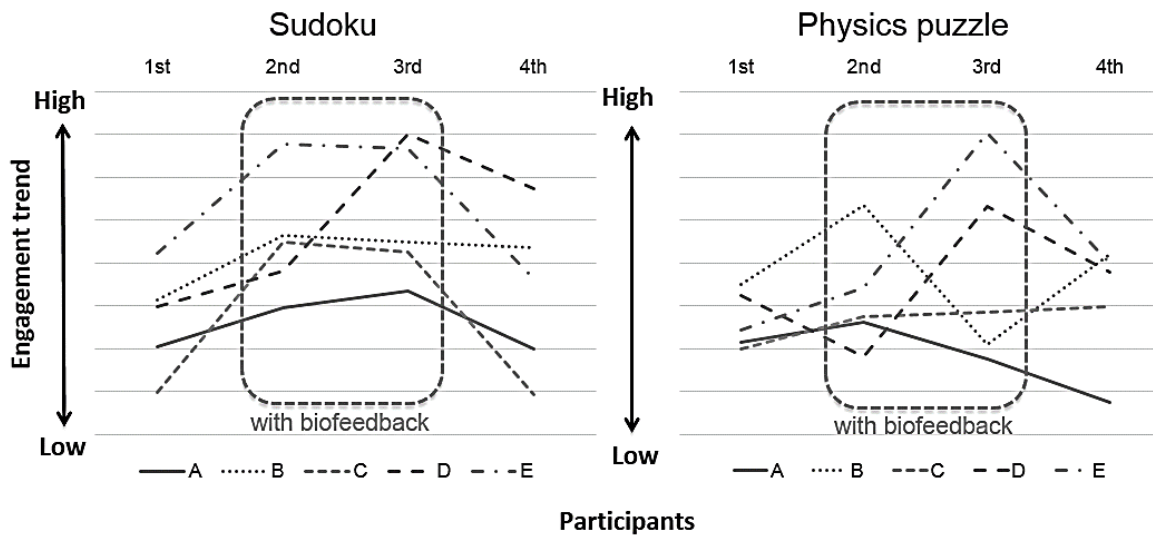


図 7 数独とフィジカルパズルゲームプレイ中の各被験者の ES 変化率

図 7 に、4 回の実験における、被験者 A、B、C、D、E の ES 変化率を示す。左に示した数独実験では集中度フィードバックが行われた 2、3 回目実験はフィードバックが行われていない 1 回目より高くなる。また、4 回目実験の時、ES 変化率はまた低くなる傾向が見られる。被験者 D は 1、2 回目の実験の際、数独のルールを正確に知らなかったため、解答が非常に困難となり、集中するのが難しくなったと思われる。図 7 の右にフィジカルパズル実験

の結果からは中各被験者の ES 変化率を示す。フィジカルパズルの結果からは数独実験のように 2, 3 回実験時 ES 変化率が上昇する傾向が確認できない。被験者の実験後のレポートに、「フィジカルパズルゲームをやる時フィードバックに気付きにくい」という報告がある。実験ビデオを見ると、ゲーム進行時の表現が激しいため感情に影響し、そしてその影響はセンサーに検出され、集中度フィードバックを通じて被験者に帰って (図 8)。その結果、被験者はボリュームの変化に鈍くなってしまふ。これを除いても、図 7 の左右から、フィードバック効果が作業種類に依存することを改めて確認できた。

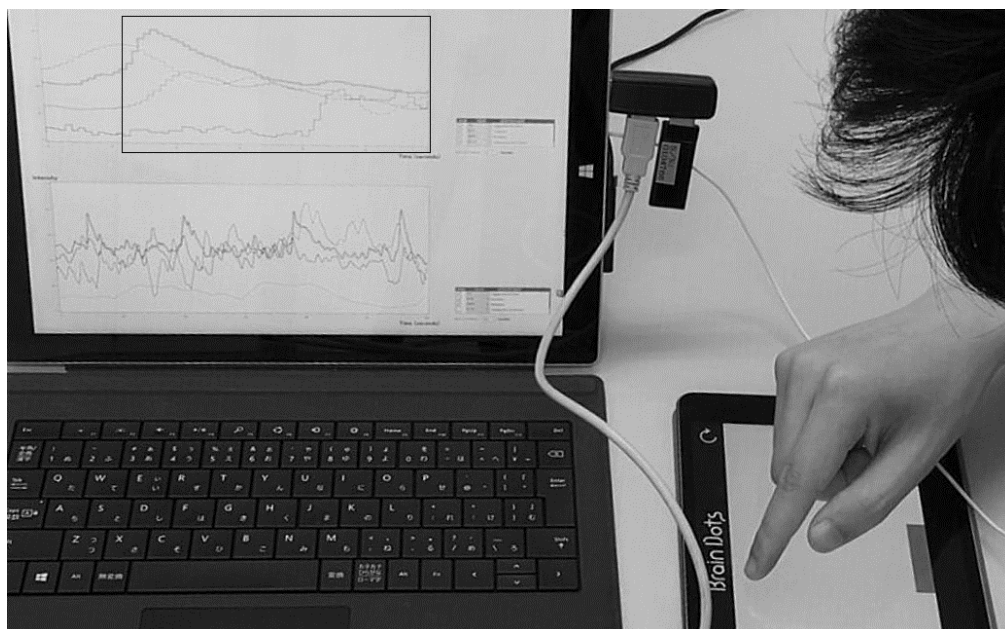


図 8 フィジカルパズルプレイ中ステージクリア時の集中度低下

3.2.6 脳波による実験課題の自動認識

まず、課題遂行中における集中度は思考状態の異なる課題に応じて異なるパターンがあると仮定する。実験中の集中度推定値 (ES) と課題種類を教師信号として、機械学習モデルに学習させ、未学習データで検証を行う。

3.2.6.1 時間域データを用いた分類

20 分実験中の ES データ (図 9、右) を 1 分単位に区切り、分節されたデータの平均を左のように長さ 20 の系列として生成する。また、教師信号として利用するため、サンプルデータにフィジカルパズル=TRUE、数独=FALSE とタグをつける。

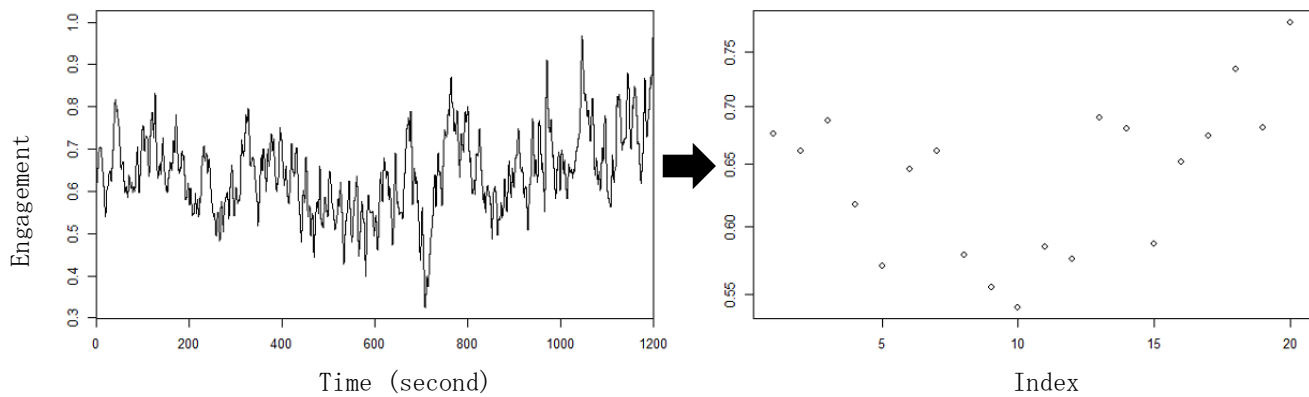


図 9 時間域の ES を教師データに変換する例

40 個のデータからランダムに 70%にあたる 28 個を抽出し、**多層フィードフォワードニューラルネットワーク (NN)** に学習させる。その後、残り 30%の未学習データで学習後のモデルで分類する。さらに、正解率を向上するため、**パラメータ最適化**を行う。学習率は 0.1 ~0.9 の範囲、中間層ノード数 50~450 の範囲、学習回数を 50~450 の範囲に設定し、ランダムにその組み合わせを試し、正解率が最も高いパラメータの組み合わせを探す。以下におけるすべての学習後モデルはパラメータ最適化した結果。

3.2.6.2 分類結果

機械学習モデルとして 3 層フィードフォワード・ニューラルネットワークを用い、100 試行の結果、中間層ノード数 154, 学習率 0.133, 学習回数 368 の時に、最も良い値を得た。この時の正解率は 66.7%、適合率は同じく 66.7%であり、分類の結果は良いとはいえない。

3.2.6.3 周波数領域データを用いた分類

思考種類が異なる活動の場合に集中度変化に周期的な特徴が表れる可能性を考慮し、周波数領域の集中度データを利用し学習を行う。まず実験中の ES をファーストフーリエ変換 (FFT) を施してピリオドグラムを求める。図 10 に示したように頻度 0~0.5 を 20 区切りしサンプル系列を生成する。また、教師信号として利用するため、サンプルデータにフィジカルパズル=TRUE、数独=FALSE とタグをつける。

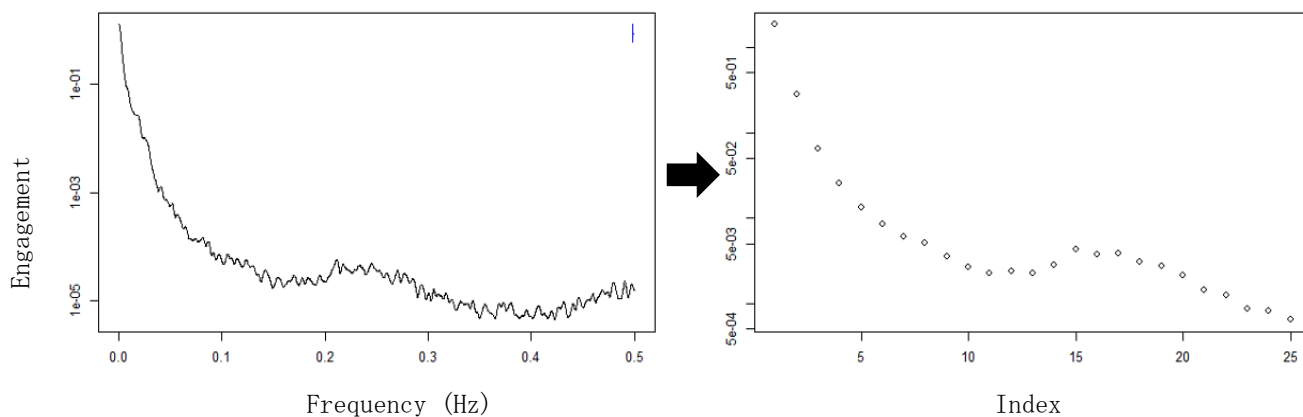


図 10 周波数領域 ES を教師データに変換する例

データは同じくランダムで 70% を抽出し、機械学習モデルで学習する。その後、残り 30% の未学習データを学習後のモデルで分類し、正解率と適合率を求める。

3.2.6.4 分類結果

機械学習モデルとして 3 層フィードフォワード・ニューラルネットワークを用い、正解率優先で 100 試行の結果、中間層ノード数 100、学習率 0.085、学習回数 287 の時に、最も良い値を得た。この時の正解率は 75.0%、適合率は 66.5% であった。

また、同じデータセットをサポートベクターマシン (SVM) で学習した。パラメータは $\Lambda=0.445$ 、繰り返し数 438 の場合、正解率 83.3%、適合率 87.5% にであった。

3.2.7 脈拍による実験課題の推定

脈拍は、数多くの心身状態と関連があるため、そのまま知的活動の評価指標として使うことは難しい。本研究では自律神経機能と関連性が高い脈拍変動の LF/HF 比に注目する。副交感神経が優位になる場合には HF 成分が現れるため、HF 成分の数値を副交感神経の活性度または緊張度とする場合がある。また、交感神経が優位と副交感神経が優位の場合共に LF 成分が現れるため、その比率である LF/HF はストレス指標、または交感神経の活性度とされる。

3.2.7.1 データの前処理

被験者の LF/HF を求めるため、先ず、脈拍のピーク間の時間間隔「R-R 間隔」(図 11) を計算する。

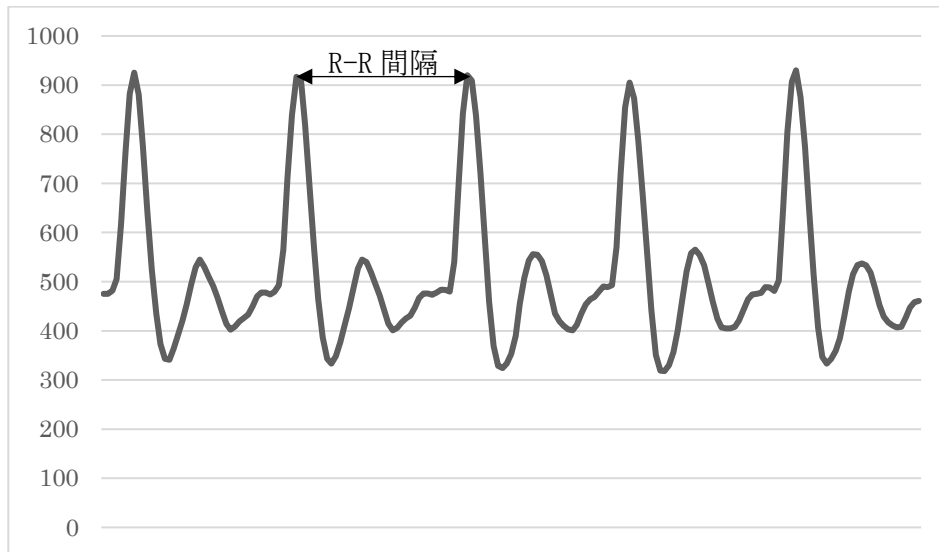


図 11 R-R 間隔

実験中、被験者が手を動かすことによるとノイズを避けるため、脈拍センサーは利き手と逆の手に装着し、被験者にできるだけ動かさないように求めたが、実際に測定してみるとノイズは相変わらず発生している。ノイズは被験者の課題操作に応じて発生している。本実験に注目すると低周波領域と高周波領域への影響が強い。それを取り除くため、前処理として 2 秒以上と 0.2 秒以下の間隔をノイズと判断し、補間を行う。ウィンドウサイズは 200 拍に設定した。このとき、実験最後の約 3 分のデータがウィンドウフーリエ変換できないことを避けるため、最後のデータを折り返し処理する。前処理の一例を図 12 に示す。

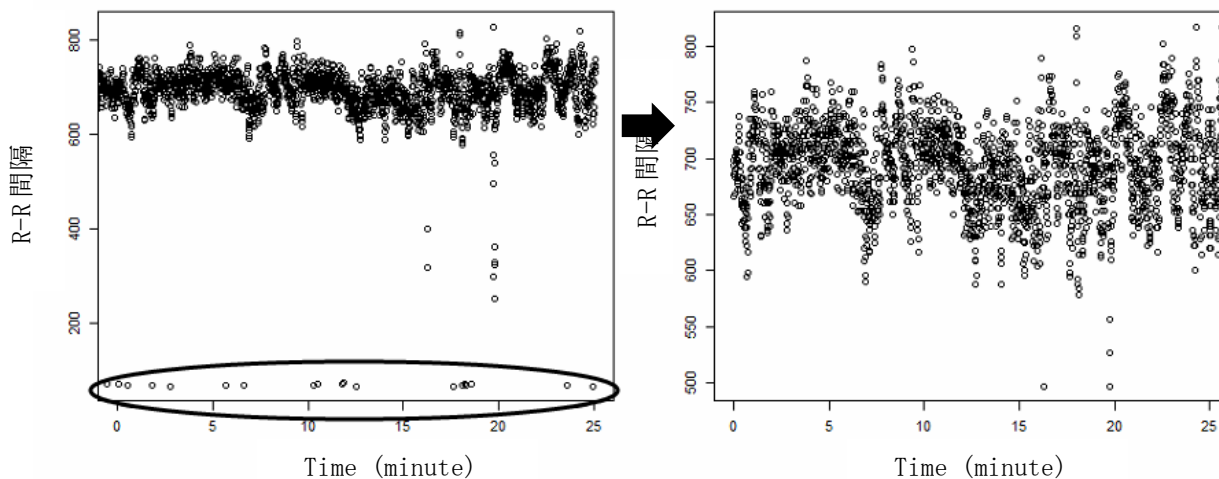


図 12 左図は処理前、右図は処理後のデータ。下部の異常な R-R 間隔はノイズとして取り除いた。また、25 分後のデータは折り返し処理をした

続いて R-R 間隔のデータをウインドウファーストフーリエ変換し、低領域 (LF: 0.04-0.15Hz) と高領域 (HF: 0.15-0.4Hz) の積分比 LF/HF を求める。

得られたデータは図 13 のようになる。データと実験ビデオを比較すると、数独実験では、問題を解答する前に LF/HF が著しく低下していることが確認できた。これは数独問題を解き始める直前に被験者の交感神経系が賦活され、解ける約 1~2 分前で問題解決の道が明らかになるため、空きマスがまだ全部埋まっていないにもかかわらず交感神経系の賦活度が減少しているためと考えられる。一方、脳波による集中度データからは 20 分間の間に集中度が平均的に落ちていることが分かるが、問題が解けた時にはこのような傾向は確認できない。また、フィジカルパズル実験ではステージクリアの間に LF/HF が著しく低下する現象も見られない。

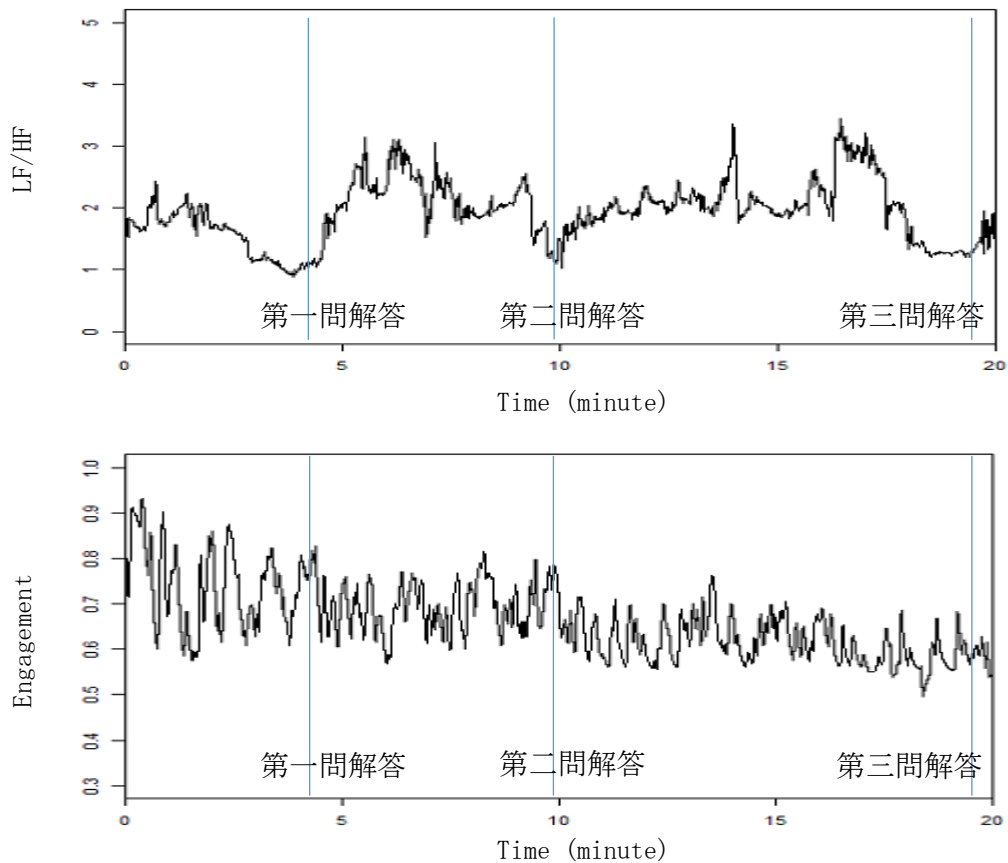


図 13 数独実験の 20 分間のデータの一例、上図は実験中の LF/HF 変化、下図は脳波により集中度の変化、青い縦線は数独問題を解けた時刻である

3.2.7.2 LF/HF データを用いた分類

LF/HF データを 5 分毎に区切り、各実験毎に 5 個、40 回の実験で計 200 個のデータを得る。70%の 140 個を学習信号として利用し、正解率優先で SVM に学習する。100 試行中最も良い結果は正解率 50%、適合率 50%になる。NN の場合は正解率 58.3%、適合率 54.5%になり、LF/HF データで作業種類を分類することは難しいと考えられる。

3.3 結果及び考査

各手法での分類結果を表 2 にまとめる。SVM で被験者の ES の周波数領域データを学習し、正解率 83%、適合率 87%という結果を得た。周波数領域の集中度データを利用することで活動種類を分類できる可能性があると言える。また、周波数領域の ES と LF/HF データ同時に利用して学習した結果は正解率 75%、適合率 73%であり、ES のみを使う場合に比べて精度は低いといえる。

表 2 生理情報による実験課題の分類結果

	ES (時間域)		ES (周波数域)		LF/HF		ES (周波数域) & LF/HF	
	再現率	適合率	再現率	適合率	再現率	適合率	再現率	適合率
NN	66%	66%	75%	66%	58%	54%		
SVM			83%	87%	50%	50%	75%	73%

一方、LED 脈拍センサーを用いて LF/HF を抽出すると、数独課題の進行状況を強い関係があると見える。LF/HF の変化から、数独課題を前半と後半に分けることが出来る。これは一つの側面から、LF/HF が知的活動中に潜在する状態を分別する可能性があるを示している。

本研究では数独を収束的思考作業の実験課題として使用した。しかし、このことに関する統一した見解があるわけではない。先行研究では、数独とマインドマップを比較し、数独は収束的思考作業の実験課題、マインドマップは発散的思考作業の実験課題として使用されたが [32, 33]、加算作業と数独を比較する研究では、逆に数独が発散的思考作業の実験課題として使われている [34]。さらに、加算作業、数独、生産力タスクの三つのタスクを使用する研究では、加算作業を収束的思考、生産力タスクを拡散的思考、数独をダミータスクとしている [35]。以上から考えると、タスク間の関係は発散性：加算作業 < 数独 < マインドマップと思われる。分類基準として曖昧であり、この先の研究にはやはり客観的な分類方法が必要と考えられる。

4 読書活動中の生理情報による知的活動種類の分析

本章では、収束的思考に分類される読書活動における知的活動種類の細分化について検討する。三種類の書籍を対象に実験を行い、読書中の心拍変動、皮膚抵抗、脳波による集中度（ES）とVASによる主観集中度評価を収集し、分析を行う。結果、読書活動には、異なる知的活動種類が複数存在することが確認できた。

4.1 研究方法

3章では、収束的思考作業の実験課題として数独パズルを発散的思考作業の実験課題としてフィジカルパズルをとりあげ、それぞれをプレイ中の生理情報は機械学習で分類可能であることを示した。しかし、実際の知的活動は複雑であり、同じ思考種類の作業中にも、複数の思考状態が存在すると考えられる。森敏昭[36]は「収束的思考と拡散的思考は別々に生ずる思考過程ではなく、殆どの認知活動においてその両方が必要となる。創造的な思考においても、拡散的思考に加えて、その思考結果が良いアイデアかどうかを判断するために収束的思考を必要とする」と述べている。また、Singer[37]は収束的思考と拡散的思考の分類を更に発展し、「拡張的生産性」と「統合技能」という二つの精神的技能に基づく分類方法を挙げた。思考の際、拡張的な思考を発揮しながら、それらを統合する能力も必要であるということである。統合技能は、拡張的生産性と対立するものではなく、ともに働く互いに不可欠な一部であると主張している。

本章では収束的思考との関連性が強いとされている読書活動[38, 39]において、複数の知的活動が混在していると仮定し、生理情報によって知的活動の種類を分析し、特徴を抽出することを目的とする。読書の対象としては、和文の理系一般書、英文の科学書籍、和文の漫画という3種類の書籍を用いた。複数の被験者にそれぞれの書籍を読んでもらい、読書中の心拍変動と皮膚抵抗の変化情報を収集した。これによって読書活動中の生理情報変化と知的活動を確認する。また、書籍の違いによる生理情報の特徴を可視化するため、生理情報を特異値分解する手法を提案する。

4.2 実験2

4.2.1 実験装置

脳波データの収集には3章と同じくヘッドセット型脳波センサーEmotiv EPOCを利用した。心拍データの収集にはLED脈拍センサーPULSE SENSORを、皮膚抵抗の収集にはGrove-GSRをともに利き手と逆の手の指に装着する。Grove-GSRは、指に装着した二つの電極で手掌部の皮膚抵抗を計測し、そこから皮膚の発汗状況を検出するセンサーであり、光センサーを利用したPULSE SENSORとは殆ど干渉がないと考えられる。



図 14 脈拍センサーと GSR センサーを同時装着する風景

図 14 に実験装置を示す。被験者は脳波センサーと心拍センサー、GSR センサーを同時に装着して実験課題を遂行する。実験中は、カメラを被験者の前方に設置し、実験中の被験者の様子を正面から録画する。実験は 6x4m の個室で行い、部屋の室温は 26 度に設定した。

4.2.2 実験課題

実験課題は特定の書籍を読むことである。書籍は 3 種類で、書籍 1 は和文の理系一般書「統計学は最強の学問である」(西内 啓 (著)、ISBN-10: 4478022216、出版社: ダイアモンド社 (2013))、書籍 2 は漫画「銀魂」(1、2、3 巻、空知 英秋 (著)、ISBN-10: 4088736230、408873632X、4088736532、出版社: 集英社 (2004))、書籍 3 は英語科学普及本「Climbing Mount Improbable」(Richard Dawkins(著)、ISBN-10: 0670850187、出版社: Viking (1996)) にした。

実験の手順は次の通りである。まず被験者に実験の内容を説明し、被験者は特定の書籍を30分読んでもらう。動機付けため、実験後に本の内容を5分でまとめるようにと指示する。実験中のメモの採取は許可した。この後、被験者に実験中に録画したビデオを見せ、各時刻においてどの程度集中していたと思うかをアンケートに回答してもらう。予備実験では、アンケートに5点法もしくは10点法を使用したか、アンケートに記入する際、被験者は小さい変化を記入しないか、もしくは変化の大きさに関わらず全て1点にしてしまう傾向があり。細かい集中度変化を表現できないという問題があった。そこで、本実験のアンケートでは視覚的評価スケール（VAS）を使用する。VASは、水平線の両端に対照的な言葉を配置したもので、被験者は水平線上の適当な位置にマークすることで主観的な状態を評価する方法である、VASには計測が簡単で、徐々に変化する状態を表現できるという利点がある。もともとは医療環境で患者の痛みを数値化するために用いられる評価指標であるが[40]、最近では、食事に対する満足度[41]やスキルの自己評価[42]、課題の難易度、集中度の自己評価[43]など広く利用されている。

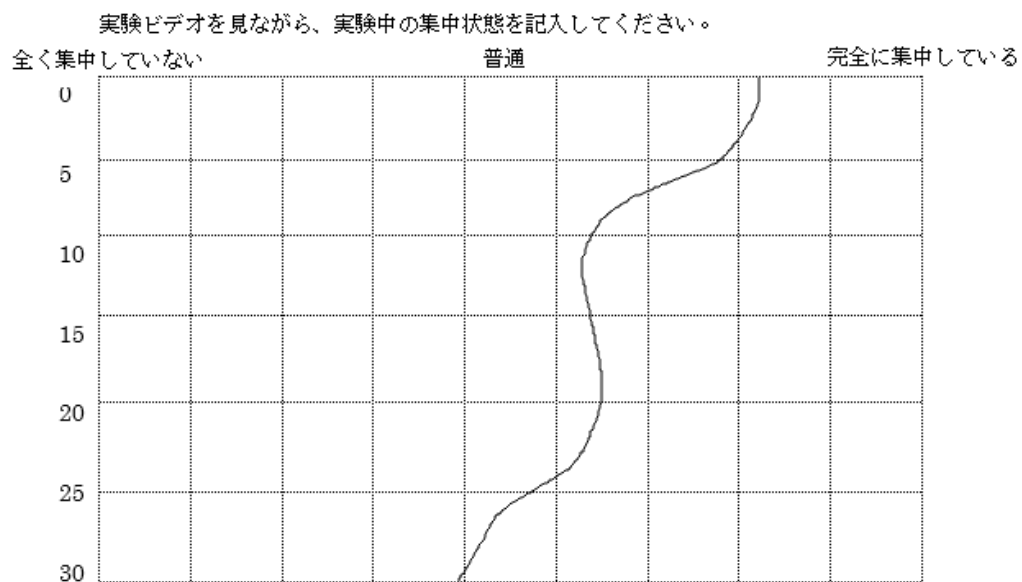


図 15 VAS 集中度自己評価表の記入例

本実験で利用した VAS 集中度自己評価表の記入例を図 15 に示す。右端は完全に集中している状態を表し、左端は完全に集中していない状態を表している。被験者は実験中の自身の様子をビデオで見ながら、実験中の状況を回想し、集中度評価を曲線で記入する。その線と両端の距離を 2.5 分間隔で記録し、[0, 1]区間に規格化した結果を主観集中度とする。な

お、時間の節約、また、被験者の負担軽減のために、ビデオの再生スピードは四倍速に設定した。

表 3 実験計画

実験回数	課題書籍
1～4回	書籍 1
5～6回	書籍 2
7～10回	書籍 3

実験計画を表 3 に示す。被験者一人につき、書籍 1 四回、書籍 2 二回、書籍 3 四回の全十回実験を行った。

表 4 被験者情報

被験者	A	B	C	D	E
学級	D1	M1	M1	M1	D2
日本語能力	9	4	3	8	10
英語能力	9	7	7	3	9

被験者は大学院生五名、それぞれの言語能力を表 4 に示す。言語能力は 0（なし）から 10（ネイティブ）で示している。なお、言語能力は自己評価に日本語能力試験と TOEIC の結果を考慮して、筆者が評価したものであるが、必ずしも本当の言語能力を表しているとは言えない。したがって、実際の分析の時、読むページ数も言語能力の表現として考慮する。

4.3 読書時の生理情報と集中度の関係

本章では、脳波センサーによる集中度（ES）、自律神経機能と関連性が高い脈拍変動 LF/HF、同じく覚醒度と関連性が高い皮膚伝導水準（skin conductance level : SCL）と集中度主観集中度の関係を分析する。

4.3.1 データ前処理

データを平滑化するため、データ分析する前に前処理を行う。ES と LF/HF は 3 章と同じく、非合理的な変化を示すデータを取り除き、補間する。SCL データは性質上ほぼ連続しているため、不連続なデータを補間する。SCL データには手の動きによるノイズが含まれるが、そのノイズは視認できるので、データ分析時に手動で削除し、補間する。

長時間変化の傾向を見るため、生理情報の高周波成分を取り除く必要がある。その目的で全ての生理情報について、実験ごとに図 16 のようにフィッティングを行う。1 分以上の生理情報変化は被験者自身の心身状態、作業状態に関係があり、非線形であると考えられる。そのため、フィッティングはニューラルネットワークで行う。フィッティングは、生理情報の時系列データ教師信号として入力し、イテレーション（学習）で、学習を止める閾値 0.005、中間層ノード数 20、学習率 0.01 のニューラルネットワークに学習を行う。学習したモデルに 0~30*（分）の時間を入力し、フィッティング後データを得られる。

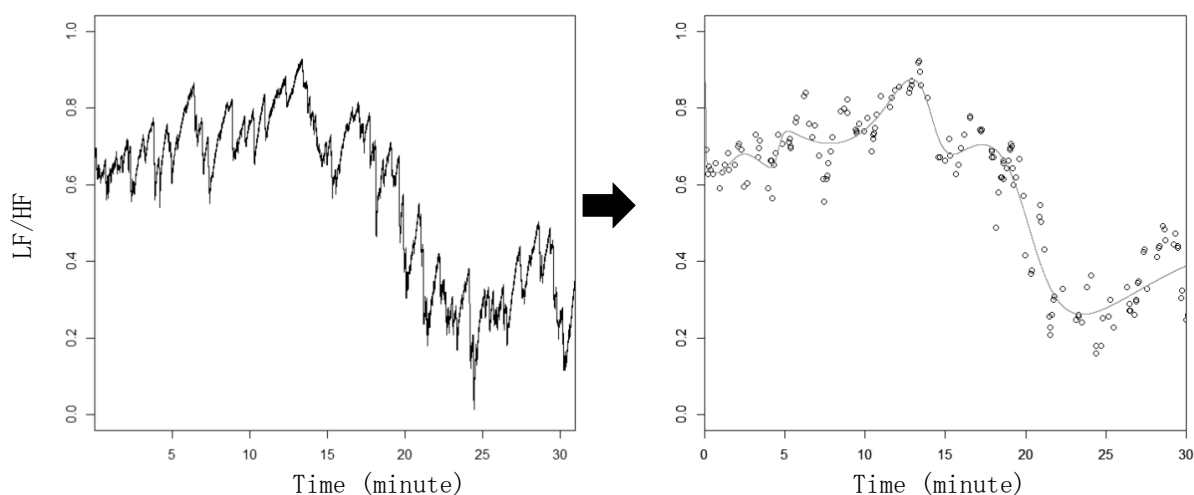


図 16 生理情報をニューラルネットワークでフィッティングの一例。左は元データ、右図の丸はサンプリングデータ、曲線はフィッティングの結果

4.3.2 考査

実験データのフィッティングの結果の一例を図 17 に示す。多くのデータにおいて、多少ズレがあるが主観集中度と SCL の間に強い正の相関が確認できる。また、ES と LF/HF の間にも若干の位相差が存在するが、負の相関が確認できる。

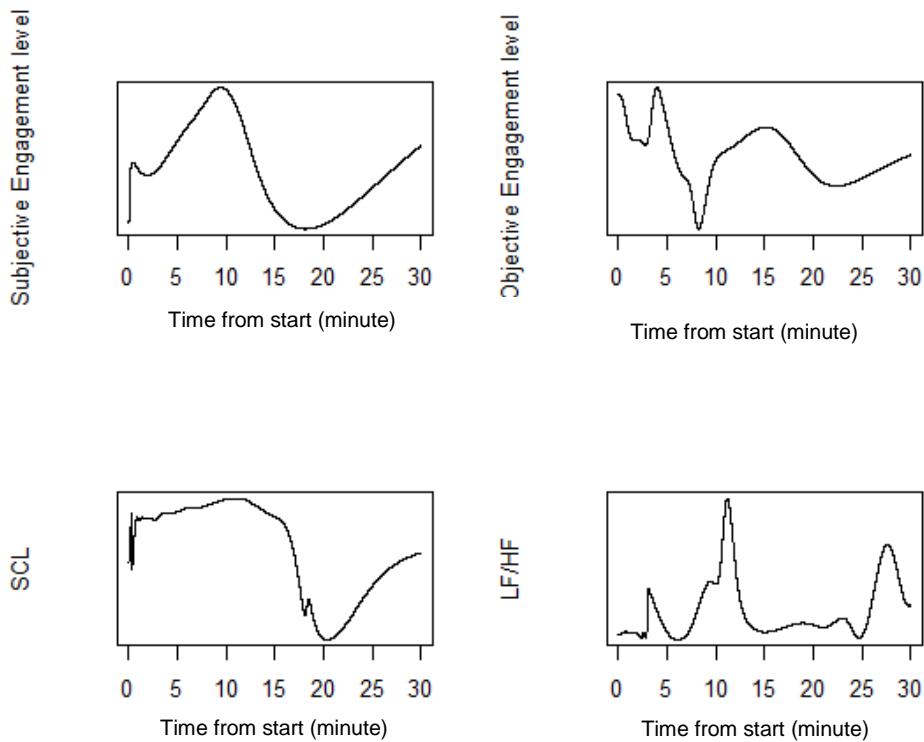


図 17 同じ実験中の主観集中度、ES、SCL、LF/HF のフィッティング結果。

位相差を確認するため、両方のデータを前後 4 分の時間ずらして相関を取った。結果を図 18 に示す。LF/HF と ES の相関は ES の方が -2.5 分の時に最小になる。他の実験データについて調べたところ、同様の結果が得られた。LF/HF の計算方法は時間 t からの R-R 間隔 R_t 前の 200 拍のデータ列 (R_t-200 , R_t-199 , R_t-198 …… R_t) から計算する。成人の平均心拍数は 80 拍/分の場合、LF/HF 成分の変化を現れるまでちょうど 2.5 分かかると考えると、このような時間ズレは合理的な範囲と言える。

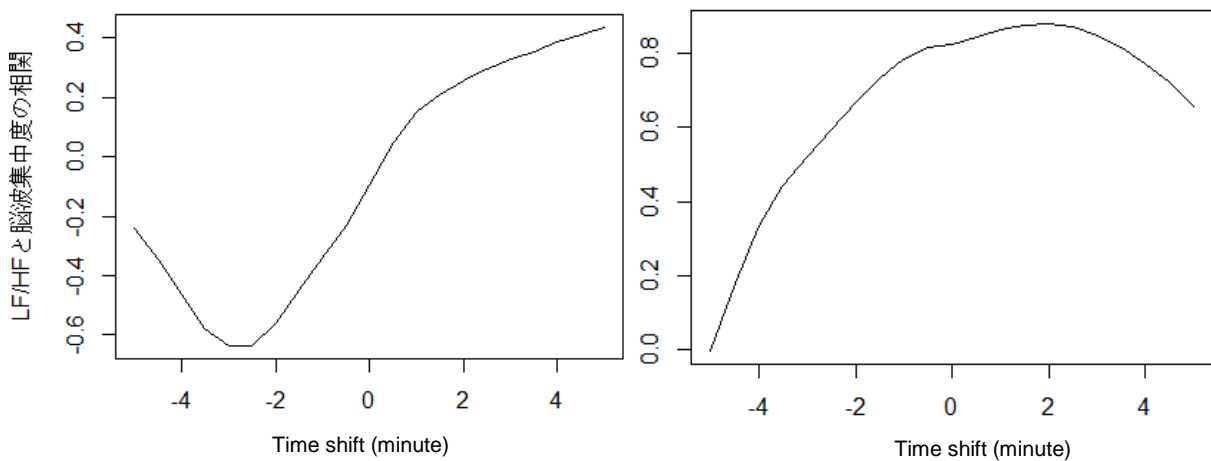


図 18 位相差と相関係数

主観集中度と SCL の場合、この例では主観集中度が 2 分ほど遅れる時の相関係数が最も大きいことが確認できる。他の実験データでは時間差は-3 から 4 分とバラついている。SCL のデータには時間的な遅延は少ないが、主観集中度は手で記入しているため、時に誤差が生じると考えられる。被験者は録画を見ながら記入しているが、録画の時間軸と記入する時刻は正確には揃っていない可能性もある。

各被験者の SCL と主観集中度の相関係数分布を図 19 に示す。被験者 A と D は高い相関を示している。他の三人の相関は実験ごとのばらつきが大きい。

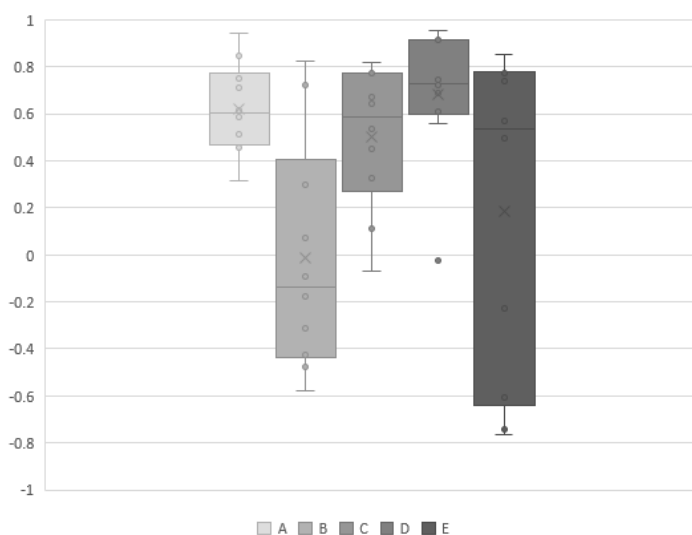


図 19 各被験者の SCL と主観集中度の相関係数分布

殆どの場合、作業中の人にとって、集中度が上がる時、外からの刺激が遮断され、皮膚発汗反応の頻度が下がり、皮膚は乾燥になり、SCL は上昇する [6]。しかし、実験結果から見ると、SCL、主観集中度は常に相関が高いわけではない。さらに、一部の被験者では本の面白い部分を読む時、SCL と主観集中度の間に負の相関が確認できる。実際、被験者 A、D、E の SCL と主観集中度の相関係数はアンケートに記入した本の面白さとは負の相関がある ($r = -0.4$, -0.73 , -0.82)。特に被験者 E の場合は、本の内容がかなり面白いと報告した時の SCL と主観集中度の間には強い負の相関が見られる。

その原因について、村井らは [6]、集中している時は皮膚抵抗反応が小さくなるのに対して、集中していない時は皮膚抵抗反応が大きくなるが、新奇性刺激がある時は、皮膚抵抗反応は大きく反応するという現象を発見した。本実験の場合でも、集中している時は SCL が上がるが、被験者にとって興味がある部分、或いは面白い部分が来ると、SCL が激しく落ち込

む傾向が見られる。その原因は新規性刺激がある時の現象と同じと考えられる。一方、こういう時、被験者は常に主観集中度報告表に「集中度は上昇している」と記録する。

その現象が発生するかは被験者によるのだが、原因は不明である。被験者とヒアリングを行った結果、これは該当書籍に関する言語能力、或いは読書習慣とも関係があると考えられた。被験者 E は日本語能力がネイティブレベル、そして英語能力も高いため、読書活動から受ける負担が少なく、新奇性刺激の影響を受けやすい。また、言語能力が低い人は文章を理解する負担が大きいため、新奇性刺激の影響を受けにくいと考えられる。

4.4 読書中の生理情報変化における集中状態の類似と差異の抽出

前章より、連続している読書活動中であっても異なる集中状態が存在することが分かった。本章では読書中の生理情報からの集中状態、特に新奇状態などとの類似および差異の抽出方法を提案する。

4.4.1 複数生理情報の特徴抽出手法

知的活動の生産性分析や分類のための生理情報の特徴抽出手法は多数提案されている[2]。しかし、複数の生理情報の間の関係を明らかにすることはできない。相関があることが確認できるが、共通点と差異を可視化することは困難であり、分析には向かないと考えられる。

本章は、複数生理情報の特徴を特異値分解によって抽出する手法を提案する。まず、高周波に含まれるノイズなどを取り除くため、ES、LF/HF、SCL の時系列データそれぞれについて1分間移動平均を取る。この時系列データを並べ行とする。これを実験毎に縦に並べ、行列 D を作成する。実験ごとの共通成分と差異を求めるため、 D の特異値分解を行う。 D の特異値分解を下式で表す。

$$D = U\Sigma V^T$$

式 1

対角行列 Σ の対角要素である特異値を σ_i とする。また、 σ_i を降順とする。 U の各列ベクトルは左特異ベクトル U_i 、 V の各列ベクトルは右特異ベクトル V_i である。右特異ベクトルの

第 i 番目要素を第 i モードとする。各実験間の共通成分が低モードに現れ、高モードに差異が現れる。

4.4.2 類似の抽出の検証

図 20 は、各モードの特異値 σ_i を示す。第 1 モードの特異値は第 2 モード以降の特異値より高いことが分かる。第 1 モードは各実験の間の共通の要素である類似成分を表す。第 2 モード以降は差異成分を表す。

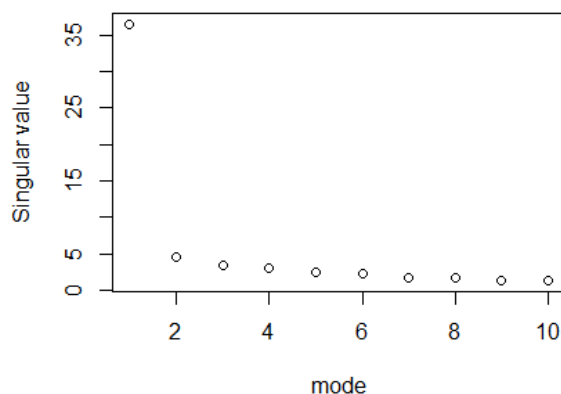


図 20 各モードの特異値の値

図 21 の左上は各実験への各モードの寄与を表す。左図の縦軸は各実験、横軸は各モード、各座標の画素の色は寄与率を表す。その値が大きいほど淡く表示した。また、第 i モードがどのように生理情報に寄与するかを分析するため、式 2 により実験 m における第 i モードの特徴を再現する時系列データを求められる。

$$a_{im} = \sigma_i V_{im} U_i$$

式 2

モード 1 を再構成したデータを図 21 の下に示す。ES と SCL は実験実感の経過とともに低下していることが確認できる。30 分の実験中、すべての実験において被験者によらず ES と SCL は低下するという共通点があることが分かる。また、LF/HF は時間の経過との関係が弱いことが分かる。

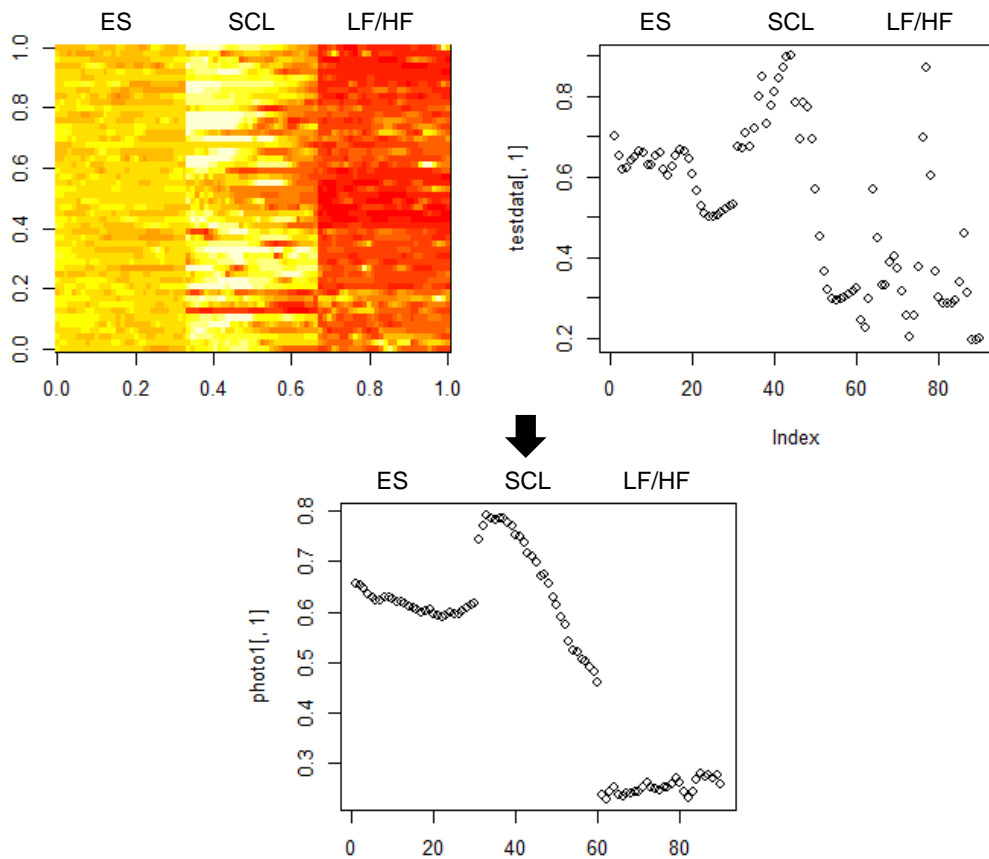


図 21 上は各モードの寄与と時系列データの一例、下は第 1 モードを再現した時系列データ

4.4.3 差異の検証

被験者ごとの各実験における各モードの寄与 V_{im} を表 5 に示す。表の縦を各実験、横を各モードとしてそれぞれに対応する値を示す。セルにはそれぞれ対応する V_{im} の値は正で絶対値が大きくなるほど赤く、負で絶対値が大きくなるほど緑色で表す。

表 5 m 回目実験においてモード1からモード5の寄与 V_{im} 。

被験者	書籍	第iモード				
		1	2	3	4	5
A	A	-0.14	0.121	0.135	-0.13	-0.14
		-0.16	0.171	0.326	-0	0.11
		-0.16	0.028	0.237	-0.02	0.053
		-0.14	0.111	-0.01	-0.1	0.093
	B	-0.15	0.036	-0.04	-0.08	0.103
		-0.16	-0.08	0.128	0.012	0.075
	C	-0.09	0.414	0.045	0.331	-0.03
		-0.13	0.267	0.013	-0.03	-0.14
		-0.16	0.237	0.245	-0.14	-0.14
		-0.12	0.296	0.067	0.16	-0.05
B	A	-0.16	-0.16	-0.01	-0.03	0.052
		-0.16	-0.09	0.114	-0.05	0.091
		-0.15	-0.15	0.135	0.215	0.108
		-0.15	-0.12	0.171	0.181	0.14
	B	-0.16	-0.13	0.087	0.111	0.085
		-0.15	-0.13	0.055	0.067	0.259
	C	-0.17	-0.24	0.151	0.022	0.141
		-0.14	0.11	0.014	-0.17	0.227
		-0.14	-0.14	0.153	0.236	-0.07
		-0.13	-0.09	0.256	0.14	0.012
C	A	-0.14	8E-04	-0.2	-0.09	0.01
		-0.14	-0.13	-0.21	0.159	-0.07
		-0.13	-0.12	-0.18	0.055	0.118
		-0.12	0.068	-0.22	0.096	0.132
	B	-0.13	0.043	-0.18	0.131	-0.14
		-0.12	0.098	-0.27	0.142	0.061
	C	-0.12	0.156	-0.14	0.195	0.011
		-0.13	-0.11	-0.05	0.233	-0.35
		-0.13	0.006	-0.21	0.129	-0.09
		-0.12	0.139	-0.29	0.06	0.084
D	A	-0.15	0.022	0.102	0.042	-0.41
		-0.15	-0.03	-0.06	-0.14	-0.05
		-0.14	0.081	0.049	-0.16	0.199
		-0.14	0.017	-0.06	0.115	-0.19
	B	-0.16	-0.07	0.094	-0.14	-0.21
		-0.13	0.247	0.078	0.089	0.033
	C	-0.15	0.099	-0.05	-0.18	0.166
		-0.14	0.134	-0.07	-0.33	-0.04
		-0.15	-0.05	-0.01	-0.23	-0.18
		-0.13	0.181	-0.08	-0.06	0.216
E	A	-0.14	-0.07	-0.02	-0.12	-0.17
		-0.14	-0.12	-0.06	-0.01	0.1
		-0.14	-0.08	0.017	-0.13	-0.11
		-0.16	-0.17	-0.05	-0.08	-0.13
	B	-0.15	-0.16	-0.03	0.1	0.087
		-0.14	-0.03	-0.17	-0.18	-0.02
	C	-0.14	-0.09	-0.12	-0.11	-0.02
		-0.13	-0.02	-0.17	0.045	0.115
		-0.12	0.032	-0.02	0.111	0.009
		-0.15	-0.12	-0.06	-0.14	-0.15

~-0.2
-0.2~-0.1
-0.1~-0.1
0.1~-0.2
0.2~

表5の被験者Aの部分に示すように、被験者Aの第2モードの寄与は、同一書籍の場合ほぼ同じであった。すなわち被験者Aの場合、同じ書籍の実験では共通に表れる特徴があるこ

とが分る。第2モードの生理情報変化特徴を図22に示す。寄与が正である時、SCLが継続的低下し、20から25分の時最低点に達する。一方、ESとLF/HFは、前半増加傾向にある。寄与が負である時の変化特徴は逆となり、第1モードと合わせるとSCLの低下が緩やかになる。被験者Aの場合、書籍Bに対する第2モードの寄与が非常に低く、ESとSCLの低下速度は共通項と変わらない。また、書籍Aに対する寄与が書籍Bと比べて大きくなり、書籍Cの場合はもっと高い寄与となる。被験者Aが書籍Cの結果からは、LF/HF増加、ES増加、SCL低下という特徴があると考えられる。しかし、他の被験者では、このような傾向はみられなかった。また、第3モード以降は書籍の種類より、むしろ被験者ごとに揃う傾向がある。同じ被験者で書籍によらず共通に現れる生理情報の特徴であると考えられる。

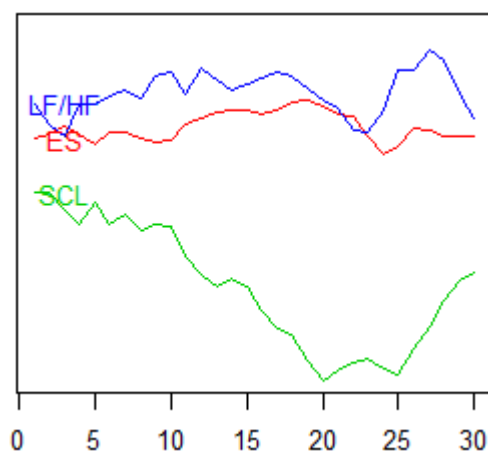


図 22 第2モードの寄与が正である時の生理情報特徴、横軸は実験時間（分）。

続いて、書籍ごとに特異値分解を行った。各書籍の第1モードは図23に示す。書籍B（漫画）においてSCLの低下傾向が比較的弱い以外、変化のパターンはほぼ同じであることが確認できた。

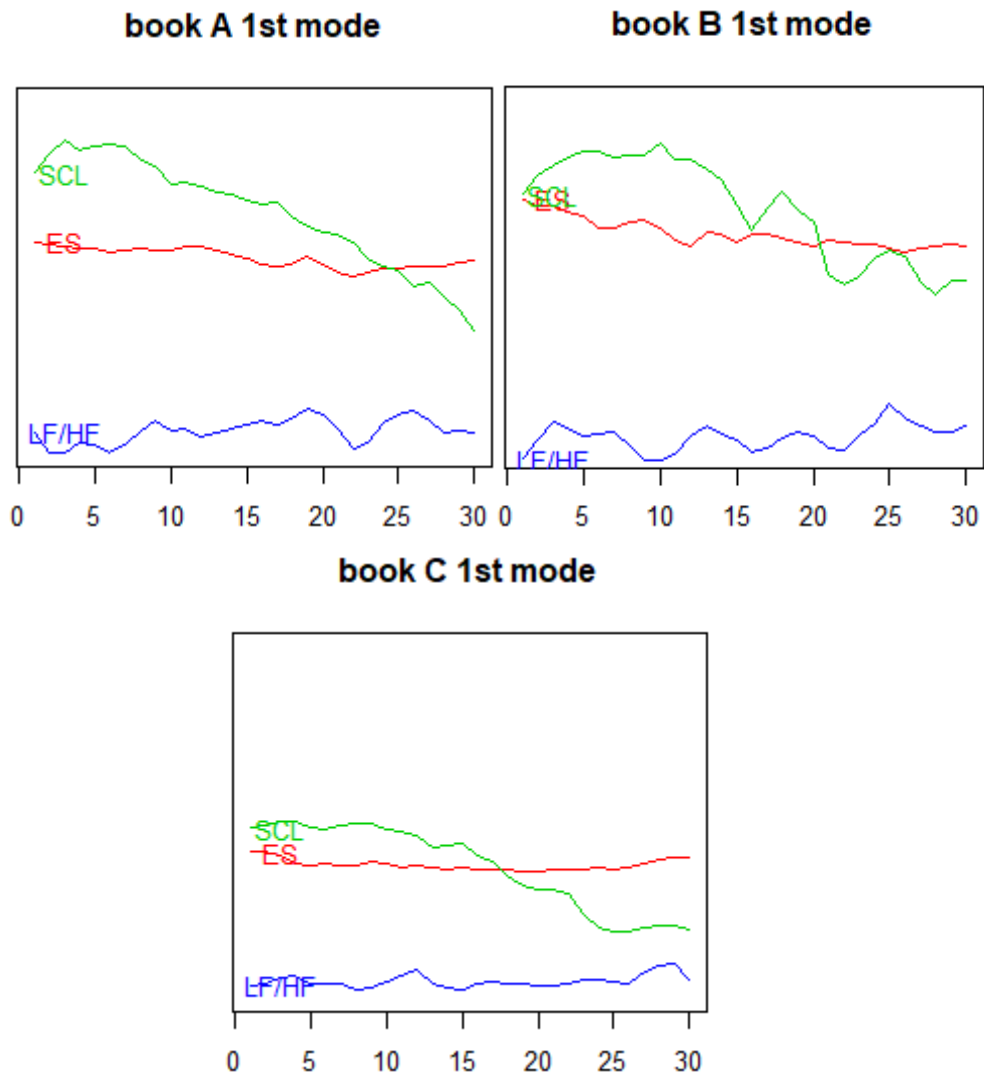


図 23 各書籍において第 1 モードの生理情報特徴、横軸は実験時間（分）。

以上より、各書籍の間にそれぞれ特徴的な共通点は明確ではなく、これを認識するのは困難であると考えられる。なお、書籍種類を、読書活動に潜在する知的活動種類を分類する際の参考にするという考え方が妥当ではない可能性がある。

4.5 まとめ

収束的思考に分類される読書活動における知的活動種類の細分化について検討を行った。実験は、和文の統計学一般書、英文の科学書籍、和文の漫画という 3 種類の書籍を用いて行った。5 人の被験者に対して、実験中の心拍変動と皮膚抵抗の変化情報を収集した。

実験によって、皮膚抵抗が主観集中度と強い相関を持つことが確認できた、ただし、被験者にとって新奇な内容に集中する時、皮膚抵抗が逆に低下する。また被験者の該当書籍に対する意欲、スキル、読書習慣によって、読書状態にはいくつかの種類が存在し、それによってSCLと主観集中度の関係が変わることが分かる。その結果、読書活動には、異なる知的活動種類が複数存在することが確認できた。

続いて、各実験間の生理情報の共通成分と差異成分を特異値分解を用いて抽出する手法を提案した。実験間の共通成分を第1モードとして、実験間の差異成分を第2モード以降のモードとして抽出出来ることを確認した。殆どの被験者において差異成分の寄与は書籍種類に関係なくばらばらである。さらに、書籍ごとに特異値分解を行い、各書籍の第1モードを抽出して確認したが、各書籍の間にそれぞれ特徴的な共通点が明確ではないことが分かった。

以上のように、読書活動中の皮膚抵抗反応と心拍変動の変化は本の種類によって変化することが分かったが、その生理情報から書籍の種類を推定することは困難であると判明した。次章から、続いて読書の活動種類は書籍の種類と関係があることを仮定し、分類を試みる。

5 読書活動中の生理情報による状態認識

5.1 研究方法

前章では、読書活動中の皮膚抵抗反応と心拍変動の変動は本の種類によって異なることが分かった。本章では、先ず第4章の実験データを基にして生理情報から本の種類を分類する可能性について考査する。次に、読書時間を5分に限定し、被験者の心拍、皮膚抵抗と読んだ箇所に対する評価キーワード収集すし、比較的短い時間単位で生理情報から本に対するイメージを分類する可能性について考察する。

5.2 複数被験者の生理情報による書籍種類に対する自動認識

5.2.1 データ前処理

ここでは、機械学習モデルに第4章実験時の生理情報と書籍種類のデータの一部を学習データとして入力し、識別結果を確認する。まず、実験の各回で得られた30分間のES, SCL, LF/HFデータを $[0, 1]$ 区間に正規化したのち、それぞれ1分間の移動平均を取ることで30個の時系列データを得る。この時系列データを、サンプル1が1分~5分間の5個のデータ、サンプル2が2分~6分間の5個のデータ、..., サンプル m が m 分~ $m+4$ 分間の5個のデータとなるように分割する。これにより、30個の時系列データから、25個のサンプルを得る。なお、各サンプルにはES, SCL, LF/HFそれぞれについて、時間的に連続する5個のデータ、計15個のデータが含まれている。このサンプルを後にニューラルネットワークへの入力データとする。各サンプルに対して、実験で用いた書籍によって、和文の統計学一般書を1, 英文の科学書籍を2, 和文の漫画を3のようにタグを付す。このタグは当該のサンプルを入力とした時の教師データとなる。50回行った全ての実験について同様に処理することで、各回で25個、合計1250個のサンプルを得る。センサーの脱落や被験の動作による欠損したデータがある実験はマトリックスに含めない。それによって各実験のサンプル行の数に差が生じるが、サンプル数が少ない実験ではランダムにサンプル行を選び、各要素にノイズを加えた行をマトリックスに追加し、サンプル数を統一する操作を行った。

5.2.2 識別結果

サンプルのうち、ランダムで70%の生理情報を入力信号、書籍種類のタグを教師信号として、3層の全結合ニューラルネットワークを学習する。その後、残り30%の未学習データを学習後のモデルに入力し認識を行った。なお、ニューラルネットワークの学習率と学習回数は精度優先で最適化を行った。結果は図24に示す。縦軸は実際の書籍種類、横軸は予測した書籍種類を表す。マスの中の値はこの種類を予測する

		Predicted Class		
		A	B	C
Actual Class	A	55.0%	24.2%	20.8%
	B	20.0%	61.6%	18.4%
	C	23.8%	26.9%	49.2%

図 24 全サンプルデータの70%を入力として学習した認識結果

また、全体の正答率 (Overall accuracy) を求める。認識結果は、全体の精度は55.2%、この値は高くない。

5.2.3 同一被験者の生理情報による書籍種類に対する自動認識

被験者が異なると同じ書籍書類に対しても生理情報の変化が大きく異なる可能性があり、これは認識精度に影響を及ぼす。被験者間の差を取り除くため、4章の実験データを被験者ごとに分けて、学習データとして別々ニューラルネットワークで学習し、識別結果を検証する。

5.2.4 識別結果

実験データを被験者ごとに分け、データ値とサンプル数を正規化し、5.2.1と同様の手順でサンプルマトリックスを作成する。学習は各被験者ごとに、サンプルデータのうち70%

でニューラルネットワークを学習し、残り 30%を学習後のニューラルネットワークに入力し、認識を行う。結果を表 6 に示す。

ここでは、被験者 A、B の推定精度が上がったことを確認できた。また、認識結果に個人差があることが分かった。各被験者の推定精度は、被験者が同じ本を読む時報告した面白さの評価と理解度評価の分散と関連があると考えられる（表 6）。すなわち同じ本に対する 10 段階の面白さ評価の分散が小さいほど、被験者のこの本に対するイメージが安定しており、したがって推定精度が向上すると考えられる。

表 6 各被験者が同じ本に対する評価の平均分散と認識結果の比較

被験者	書籍に対する評価の分散	Overall accuracy
A	1.145	77.3%
B	1.419	61.3%
C	1.907	46.6%
D	1.475	57.3%
E	2.870	56.0%

例えば被験者 A と E は、日本語と英語能力はともに高く（表 4）、三種類の書籍に必要とされた知識を備えている。被験者 E は同じ本を用いた実験の間、内容が変わると、イメージと評価も大きく変わるのに対して、被験者 A は異なる実験であっても、同じ書籍に対するイメージと評価がほぼ同じである。さらに、被験者 A は書籍 A と C に対するイメージも似ている。図 25 に示すように、書籍 A と C の認識精度が高くないが、B に対する精度は非常に高い。ここで筆者は、被験者 A が書籍 A と C に対するイメージが似ていることが原因になっているのではないかと考えた。



図 25 被験者 A の認識結果

これを確認するため、書籍 C と A のラベルをポジティブに変更し、B をネガティブに変更し、両方のサンプル数をさらに標準化して 2 クラスとして同じ手順でニューラルネットワークに学習した。認識結果を表 7 に示す。

表 7 2 クラスのサンプルデータを被験者ごとに学習した認識結果

被験者	正解率	適合率
A	92.0%	86.2%
B	73.3%	50.0%
C	54.0%	55.6%
D	77.3%	50.0%
E	70.0%	70.8%

被験者 A の認識正解率が 90% までに上がったことを確認した。被験者 C と D の正解率も前より向上したが、適合率は高くない。

5.2.5 考察

認識結果により、被験者の個人差を考えせずに書籍種類の認識は難しいと確認できた。特に、本に対するイメージの変化が強い場合、認識が困難となる。

また、書籍の種類が変わった場合でも、イメージが似ている場合は、これらの書籍を同じ種類と扱って認識を行うほうが効果が良いと思われた。すなわち、読書中の思考状態は、必ず書籍の種類と一致するとは限らない。むしろ書籍の種類より、被験者の書籍に対するイメージに依存すると考えられる。

5.3 生理情報による書籍に対するイメージの自動認識

本章では、前章の仮説を確認するために検証を行う。読書中の思考状態は本の種類にマッピングすることはできない。また、同じ本を読んでいる時、思考状態が変わる可能性もある。4章の実験データのインタビューは30分ごとにとり、頻度が足りないため、検証には使えない。そのため、本章ではまず実験3を行う。

5.3.1 実験3

5.3.1.1 実験装置

本実験では、4章の実験と同じく、被験者の手にLED脈拍センサーPULSE SENSORと皮膚抵抗センサーGrove-GSRを装着する。また、4章で、脳波による集中度変化は心拍変動変化と強い相関を持つことが明らかとなり。両方のどちらかを省いても識別精度に対する影響は弱いと考えられたため、今回の実験では脳波センサーを省略する。

被験者は心拍センサーとGSRセンサーを装着して実験課題を遂行する。実験中の状況を把握するため、カメラを被験者の前方に設置し、被験者の実験中の様子を正面から録画する。実験は6x4mの個室で行い、部屋の室温は26度に設定した。

5.3.1.2 実験課題

実験課題は、順番に特定の書籍を読むこととする。書籍の種類は、教科書、一般書、小説、推理小説、英語一般書からランダムで選ぶ。長時間閲覧による集中度低下を防ぐため、1セットの読書時間は5分間とし、セットの間に約5分の休憩をとる。10セットを1回の実験として実施する。

実験後、被験者には実験中に読んだ内容を回想し、読んだ内容をキーワードで評価してもらう。キーワードはサンプルデータの Tag 付けのために使用した。

3人の被験者（男性1名、女性2名）に各5回の実験を行い、合計150セットの実験データを得た。

5.3.2 生理情報による書籍のイメージ分析

本節では、実験3のインタビューと生理情報を用いて書籍のイメージ種類を分析する。続いて、機械学習モデルに生理情報データを入力信号として入力し、識別結果を検証する。

5.3.2.1 データ前処理

識別用サンプルデータとして、5.2.1と同様の手順でサンプルマトリックスを作成する。4章の実験の際、皮膚抵抗データ中の手の動きによるノイズは手動で確認、削除したが、今回実験ではリアルタイムでの認識を目指すため、GSRを動きによるノイズの影響を受けにくい次のような方法で変換する。皮膚抵抗（SCL）の変化はGSR反応（一過性の低下）の数と強度、動きによるノイズ（同じ幅の低下と上昇）、そして空気の湿度による緩やかな回復から構成される。故に、空気の湿度が一定であれば、GSR反応と反応強度はSCLと基本的に同じ意味を持つことが分かる。今回の実験は、図26のように、SCLが一過性の低下を発生する時、低下した量算出し、GSR反応強度にする。

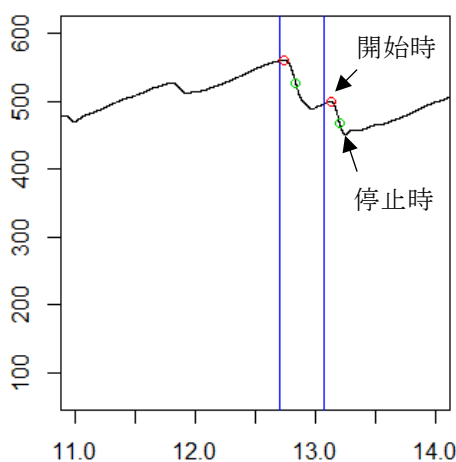


図 26 GSR データの変換例。その中 X 軸は時間軸、Y 軸は SCL。青い縦線は GSR 反応が起こったと判定する時間、相隣の赤と緑マークは検出された GSR 反応の開始時刻と停止時刻を表し、二つマークの差を GSR 反応強度にする

5.3.2.2 分類できる書籍のイメージの種類

前処理後のデータは図 27 のようになる。

各回実験の開始時刻と終了時刻は目視で確認できる。また、インタビューから得られたキーワードのうち、意味が類似するキーワード表 8 に従って合併する。

表 8 キーワード合併表

合併後キーワード	もとキーワード
集中	集中、集中した
じっくり読む	じっくり、読みがいがある、二回読んだ、戻って読んだ
面白い	面白い、かなり面白い、新鮮
高度な集中	かなり集中した、すごく集中、時間が早い
賛成	賛成する、役に立てる、はっとする
クライマックス	ストーリーが盛り上がっている、盛り上がった、
ミステリー	まだ読みたい、気になる、続きを読みたい、何があったが知りたい
恐怖	怖い、緊張する
速読	パッとみる、読みやすい、すぐ読める
笑わせる	笑う、笑わせる
理解しやすい	理解しやすい、分かりやすい
精読できない	読みにくい、読めない、我慢する
理解しにくい	理解しにくい、わからない、苦手、
つまらない	つまらない、面白くない、単調、興味がない

合併後のキーワードを GSR 反応の変化勾配と LF/HF の変化勾配にマッピングした。その結果、四つのパターンを確認できた。確認できた 4 つのパターンを表 9 に示す。表に示すように、「集中」、「じっくり」といったキーワードは第 1 から第 3 象限に分布していた。「速読」は第 2、第 4 象限に分布していた。

パターン3は、GSR反応とLF/HF共に低下する状態で、「集中」、「じっくり読める」、「面白い」という集中を表すキーワードが分布している。4章では、読書中の殆どの場合、ESはLF/HFと負の相関を持ち、主観集中度とSCLが正相関を持つ。すなわち、集中時はLF/HFが低下し、GSR反応が減少することが確認できた。パターン3の状況はその結果と一致している。

パターン4は、LF/HFが低下、GSR反応が増加する状態で、「速読」、「読み辛い」、「理解しにくい」、「つまらない」、「面白い」という主にマイナスな印象を表すキーワードが分布している。本実験において、パターン4は英語スキルが低い被験者が英文書を読む時、または被験者にとって専門分野が異なる専門書を読むとき現れる。これは本に対するスキル不足によって、ストレスを感じ、精神性発汗が増加するからと思われる。

パターン2は、GSR反応とLF/HF共に上昇する状態で、キーワードは「速読」、「面白い」、「笑う」、「分かりやすい」、「読みやすい」がある。パターン2は、主に漫画、小説を読む時に出現する。さらに、被験者が興味を持つ一般書にも出現する。自律神経活動及び交感神経系の賦活に伴うGSR反応とLF/HFの上昇は、4章に述べた新奇性刺激による反応と一致する。また、パターン2は第4章で行った特異値分解による分析における第2モードと一致する可能性がある。

パターン1は、LF/HFが増加で、GSR反応が減少する状態で、「すごく集中」、「賛成」、「クライマックス」、「ミステリー」、「恐怖」というキーワードが分布している。このパターンが出現する場面について、一般書の場合は被験者にとってかなり興味がある部分、或いは著者の観点到賛成する時、小説の場合はストーリーの盛り上がった部分、あるいはミステリーやホラーの部分に出現する。高度な集中はGSR反応を抑制しているが、LF/HFを抑制することはできないと考えられる。

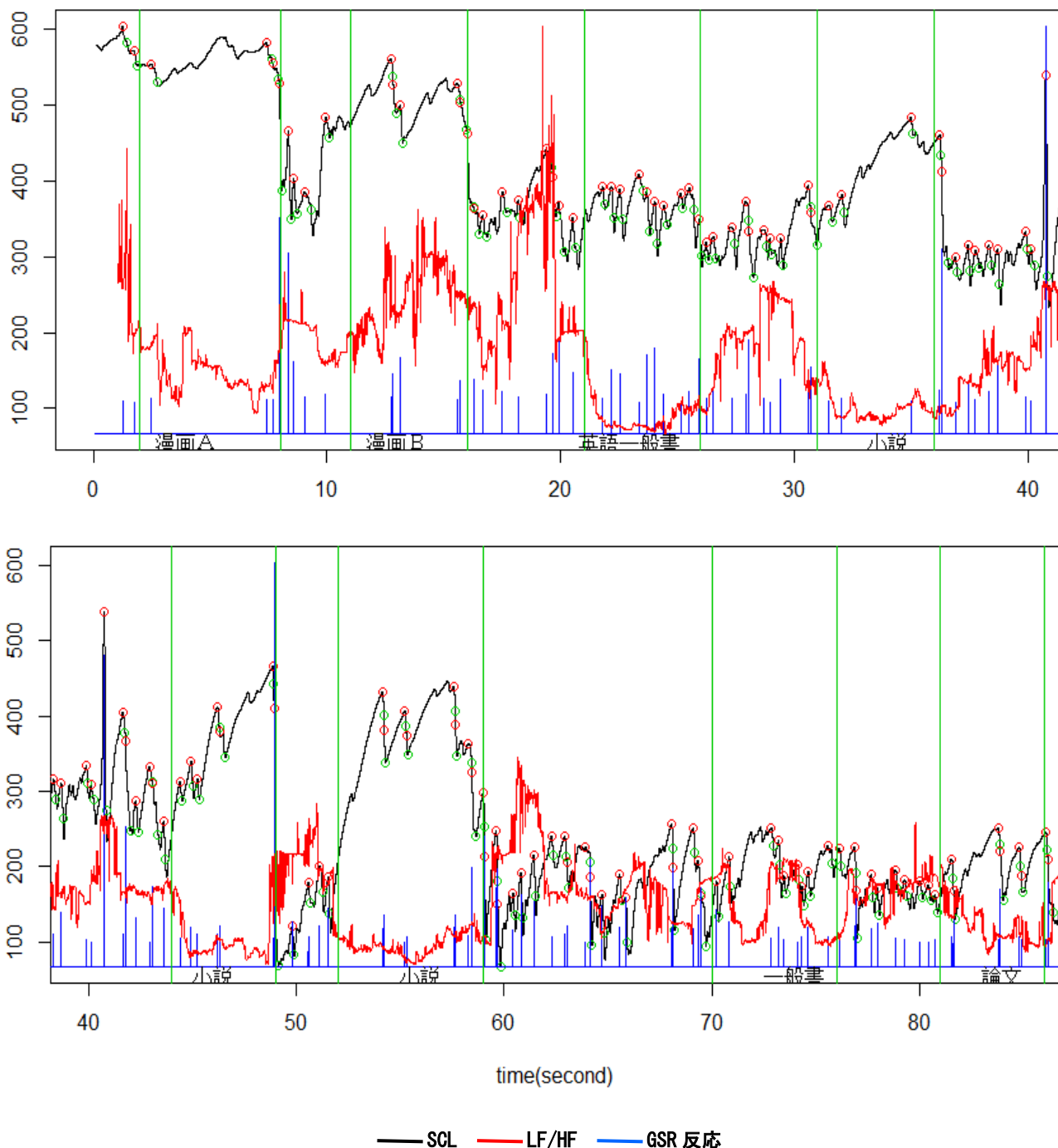


図 27 実験データの一例、黒い線は SCL、赤は LF/HF。青い縦線位置は GSR 反応の発生時刻、線の長さは GSR 反応の強度を表す。

GSR 反応と LF/HF が共に交感神経系に関わる指標として、人が活動するとともに上昇すると考えられているが [18, 19]、それらは必ずしも一致しない。自律神経の活動性を表す指標としては、交感神経系と副交感神経系のバランスを反映する LF/HF は自律神経活動の異なる

側面を表し、同時に測定すれば、自律神経活動に関するより詳しい情報を得られるという知見もある[44]。

表 9 イメージパタン表

パタン0 休憩	GSR 反応 -	GSR 反応 +
LF/HF +	パタン 1 キーワード：高度な集中、賛成、クライマックス、ミステリー、恐怖	パタン 2 キーワード：速読、面白い、笑わせる、理解しやすい
LF/HF -	パタン 3 キーワード：集中、じっくり読む、面白い	パタン 4 キーワード：速読、精読できない、理解しにくい、つまらない、面白い

5.3.3 認識結果

実験データを被験者ごとに分け、データ値とサンプル数を正規化し、5.2.1と同様の手順でサンプルマトリックスを作成する。被験者の主観申告に基づいて、休憩時間をパタン0として加えた5つのパタンに分け、このパタン番号をタグとしてつける。学習は各被験者を分け、70%のサンプルデータをニューラルネットワークに学習させ、残り30%のデータを学習後のモデルに入力し、認識を行う。結果を図28に示す。

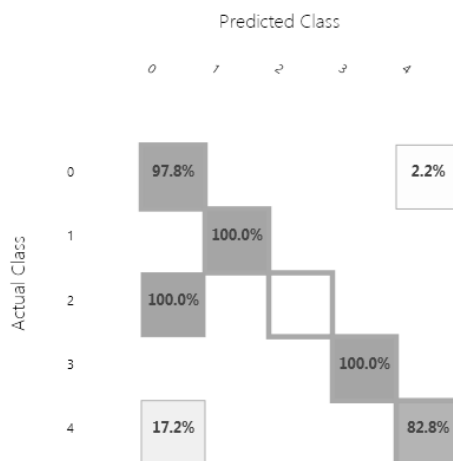


図 28 5パタンのサンプルデータを被験者ごとに学習した結果認識結果

ここでは、被験者三人ともに高い平均正解率が得られた。誤判定が存在したが、ほとんどはパターン0（休憩）とパターン2の誤判定であった。休憩時間内の生理情報変化にも複数のパターンが存在する可能性があると思われるが、本研究ではそれを検討しない。なお、パターン0をサンプルマトリックスから取り除き、学習をやり直すと結果は図29に示す。

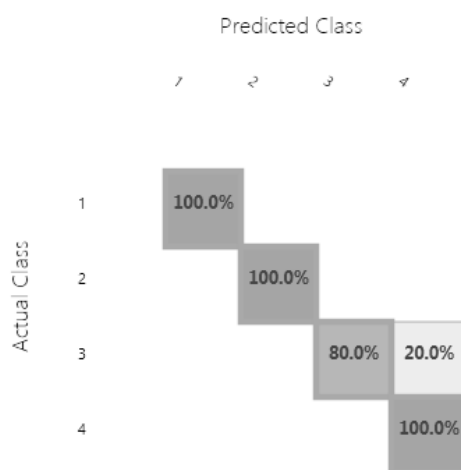


図 29 4パタンのサンプルデータを被験者ごとに学習した結果認識結果

パターン0を除いた場合、全体に90%以上の平均正解率を得た。この結果は、提案手法で読書中の精神状態パターンを判別できる可能性を示唆するものである。

5.4 考察

本章では、第4章の実験データに基づいて本の種類を分類する可能性について考察した。結果、全被験者データを学習データとして入力した場合、認識の精度は低いことが確認できた。また、被験者ごとに学習データを入力し、認識した場合は精度が上がった。この時、被験者が実験後に報告した書籍に対する評価の分散と認識精度の間には負の相関があることを発見した。第4章では、読書活動中における生理情報の変化は本の種類によって異なることが判明したが、その変化パターンは被験者の言語スキルと関連知識及び読書習慣にも関連があり、被験者が持つ関連スキル、知識の有無により、同じ書籍に対するイメージも変わる。また、同じ書籍の異なる部分に対するイメージも変わる。そのため、本章は書籍に対するイメージに注目して、実験を行った。結果、生理情報から書籍に対するイメージは4つのパターン

に分けることができ、さらに、GSR 反応と LF/HF データを利用して、それらのパターンを認識することができた。

なお、本実験では、連続作業による集中度の低下は考慮していない。集中度の低下は、脳波や皮膚抵抗などで検出することができるが、各イメージの特徴は集中している時としていない時で一致しない可能性があると思われる。これについては今後の課題としたい。また、賛成、恐怖といった相反するキーワードが同一象限に分布している。この両者を区別する方法はまだ不明確であり、本章で提案した手法で認識することもできない。使用した書籍の種類がさらに増えると、また新しいパターンが現れる可能性もある。

6 おわりに

本研究では、高階層の知的活動に着目し、特に、学習環境において、知的作業中に現れる知的活動について、次のような点を明らかにする目的で研究を行った。

① 生理情報に基づいて、収束的思考と発散的思考という異なる知的活動を分類することができるか。

② 収束的思考や発散的思考といった、大きな枠組みでは同一の知的活動に属する作業中であっても、短期的にはより細分化された様々な知的活動が行われていると考えられるが、それらはどのような知的活動であるか。

③ それらを生理情報に基づいて分類することができるか。

これらに関して、本研究で得られた知見について総括する。

①について：

収束的思考と発散的思考のそれぞれに対応する2種類のゲームを被験者にプレイさせ、その間の脳波と心拍を計測した。脳波から計算される集中度（ES）の時系列データにフーリエ変換を施して得られるピクトグラムを入力として機械学習モデルSVMを用いることで、再現率、適合率ともに80%を超える精度で、プレイしているゲーム、すなわち、知的活動の種類を分別することができた（第3章）。ESの時系列データや、心拍のLF/HFを用いた場合は、再現率、適合率ともに低く、ESの時間変化が収束的思考と発散的思考の区別に大きな役割を持つことが示唆された。

②について：

読書をしている被験者の脳波と心拍、皮膚抵抗を計測し、同時に、アンケートにより、被験者の主観的集中度の時間的変化を取得した。なお、読書は、従来研究では、収束的思考に分類される知的作業と扱われている。実験中、ESは比較的平坦であったにも関わらず、皮膚抵抗とLF/HFは大きな変化を見せており、ESのみでは検出できないような感情の動きについて、これらの生理情報を組み合わせることで検知できると考えられた。実際、生理情報の時系列データと主観的集中度の時間変化には相関が見られた（第4章）。

続いて、読書を5分という短時間に限定し、その間、被験者の心拍と皮膚抵抗を計測する。さらに読書直後にインタビューを実施し、読んだ箇所をキーワードで評価してもらう。これを繰り返すことで生理情報の時系列データと、書籍に対するイメージを表すキーワード

を収集した。この結果、LF/HF（心拍）の上昇/下降とGSR（皮膚抵抗の急激な変化）の増加/減少の組み合わせからなる4パターンとキーワードすなわち書籍に対するイメージ間に明らかな関連を見いだすことができた。

すなわち、パターン1：LF/HFが上昇し、GSRが減少する場合は「高度な集中」や「クライマックス」、「恐怖」、パターン2：LF/HFが上昇し、GSRが増加する場合は「面白い」や「笑わせる」、「理解しやすい」、パターン3：LF/HFが下降し、GSRが減少する場合は「集中」や「じっくり読む」、「面白い」、パターン4：LF/HFが下降し、GSRが増加する場合は「精読できない」、「理解しにくい」、「つまらない」など。

これらより、収束的思考に分類される読書中であっても、比較的短い時間の単位で、主に集中度や興味の維持などの思考活動を変化させていることが分かった（第5章）。

③について：

LF/HFおよび皮膚抵抗の時系列データを入力、②で得られた4パターンを教師信号として3層フィードフォワードニューラルネットワークを学習し、未学習のデータでテストを行ったところ、80%を超える高い精度で分類することができた。すなわち、LF/HFおよび皮膚抵抗の時系列データを入力することで、脳波では検出できない集中度や興味の変化を検出することができると考えられる（第5章）。

本論文は、生理情報に基づき、知的活動を分類する客観的な手法について論じたものであり、バイオフィードバックの研究や、例えばスマートハウスのように、環境要素を変化させることで人の活動を支援するシステムへの応用に役立つと期待できる。

7 研究業績

論文

1. Fan Zhang and Hajime Murao. Brain-computer interface (BCI) based learning support system providing the feedback on learner's emotions and its effect. ICIC Express Letters, 10(2):331-338, 2 2016. [査読有り]
2. Fan Zhang and Hajime Murao. Advantages and disadvantages of biofeedback on playing puzzle games. ICIC Express Letters, 8(2):263-267, 2 2017. [査読有り]
3. A preliminary study to develop a lightweight biofeedback device for reading activity. IEEE explore EI (掲載予定)

口頭発表

国内学会

4. 張帆、村尾 元. 脳波信号を利用した音声フィードバックの集中力への影響. バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会 2015年11月
5. 張帆、村尾 元. パズルゲームプレイ中の生理指標計測による集中度フィードバック. バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会 2016年11月
6. 張帆、村尾 元. 音声を用いたバイオフィードバックの集中度への影響に関する研究. 第61回システム制御情報学会研究発表講演会 2017年5月

国際学会

7. 張帆、村尾 元. Brain-computer interface (BCI) based learning support system providing the feedback on learner's emotions and its effect. 10th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2015). 2015年8月
8. 張帆、村尾 元. Advantages and disadvantages of biofeedback on playing puzzle games. 11th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2016). 2016年8月

-
9. 張帆、村尾 元. A preliminary study to develop a lightweight biofeedback device for reading activity. International Conference on Information, Communication and Engineering (IEEE ICICE 2017) 2017年11月

8 参考文献

- 1 杉浦敏浩, 村上周三, 高井啓明, 等. 40010 知的生産性に関する研究 (その 1): 知的活動と建築空間の階層モデル (知的生産性 (2), 環境工学 I) [J]. 学術講演梗概集. D-1, 環境工学 I, 室内音響・音環境, 騒音・固体音, 環境振動, 光・色, 給排水・水環境, 都市設備・環境管理, 環境心理生理, 環境設計, 電磁環境, 2010, 2010: 25-26.
- 2 国土交通省. 知的生産性研究委員会報告書[J]. 2009: 19.
- 3 建築環境・省エネルギー機構, IBEC, 164, 特集 知的生産性, 2008(1): 38-43.
- 4 亀田健一, 村上周三, 伊藤一秀. 室内環境質が学習意欲ならびに学習効率に与える影響 [J]. 日本建築学会環境系論文集, 2009, 74(642): 943-949.
- 5 後藤伴延, 伊藤一秀. 若年層 (16~ 22 歳) を対象とした温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討[J]. 日本建築学会環境系論文集, 2010, 75(655): 767-774.
- 6 MURAI Moriyasu. The possibilities of Evaluation of the Teaching-Learning Process through the Skin Resistance Responce. The bulletin of Japanese curriculum research and development, 1990, 14(3): 145-151.
- 7 Fan Zhang and Hajime Murao. Brain-computer interface (BCI) based learning support system providing the feedback on learner's emotions and its effect. ICIC Express Letters, 2016 2, 10(2): 331-338.
- 8 南雲仁一, 西村千秋. バイオフィードバック [J]. 電気學會雑誌, 1981, 101(6): 543-546.
- 9 Barnea A, Rassis A, Zaidel E. Effect of neurofeedback on hemispheric word recognition[J]. Brain and Cognition, 2005, 59(3): 314-321.
- 10 Egner T, Gruzelier J H. EEG biofeedback of low beta band components: frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials[J]. Clinical neurophysiology, 2004, 115(1): 131-139.

-
- 11 大場義夫, 川畑徹朗, 丹公雄. 騒音と BGM が知的作業に及ぼす影響に関する実験的研究 (第 4 報)[J]. 東京大学教育学部紀要, 1980(19): 101-113.
- 12 辻村壮平, 上野佳奈子. 教室内音環境が学習効率に及ぼす影響[J]. 日本建築学会環境系論文集, 2010, 75(653): 561-568.
- 13 上猶優美. 室内音環境が知的生産性に与える影響-拡散的 収束的思考と音環境の関係性について[J]. 日本音響学会講演論文集 (春季), 2009: 1037-1038.
- 14 青木茂樹, 大西正輝, 小島篤博, 等. 人感センサによる独居高齢者の行動パターンの認識[J]. 電子情報通信学会技術研究報告. WIT, 福祉情報工学, 2002, 101(703): 43-48.
- 15 広瀬通孝, 石井威望. 知的作業の客観的評価の手法[J]. 日本機械学会論文集 C 編, 1985, 51(471): 3153-3158.
- 16 尾形元, 八木透, 石井良和, 等. 精神集中課題時の各種生理学的指標に関する研究: 近赤外分光法 (NIRS), 脳波, 脈波の比較[J]. 電気学会研究会資料. MBE, 医用・生体工学研究会, 2008, 2008(49): 57-62.
- 17 Malik M: "Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use" European Heart Journal, Vol17, 1996: 354-381
- 18 早野, 順一郎, 山田, 等. 心拍変動と自律神経機能[J]. 生物物理, 1988, 28(4): 198-202.
- 19 高野研一, 長坂彰彦, 吉野賢治. 覚醒水準の指標としての皮膚抵抗値に関する実験的研究[J]. 産業医学, 1993, 35(4): 257-268.
- 20 織田弥生, 中村実, 龍田周, 等. 就労者の唾液中・尿中コルチゾール標準値作成の試みとその有用性の検討 高速液体クロマトグラフィーを用いて[J]. 人間工学, 2000, 36(6): 287-297.
- 21 山口昌樹, 金森貴裕, 金丸正史, 等. 唾液アミラーゼ活性はストレス推定の指標になり得るか[J]. 医用電子と生体工学, 2001, 39(3): 234-239.
- 22 坂上美香, 明石行生, 梅野千絵, 等. 作業者の集中度と照明環境との関係について[J]. 照明学会誌, 1997, 81(5): 385-390.

-
- 23 水科晴樹, 村田直史, 阪本清美, 等. 若年者及び高齢者における課題遂行時の作業負荷による瞳孔径変動と心理的ストレスの対応[J]. 電子情報通信学会論文誌 A, 2009, 92(10): 677-689.
- 24 田多英興. 内因性瞬目研究における作業仮説について[J]. 東北学院大学人間情報学研究, 1997(2): 73-78.
- 25 大久保雅史, 藤村安耶. 加速度センサーを利用した集中度合い推定システムの提案[J]. WISS2008, 2008, 2(08).
- 26 大村一史. 教育分野におけるニューロフィードバックの可能性[J]. 山形大学紀要 (教育科学), 2010, 15(1): 67-84.
- 27 Guilford J P. Three faces of intellect[J]. American psychologist, 1959, 14(8): 469.
- 28 Andujar M, Gilbert J E. Let's learn!: enhancing user's engagement levels through passive brain-computer interfaces[C]//CHI'13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2013: 703-708.
- 29 Goldberg B S, Sottolare R A, Brawner K W, et al. Predicting learner engagement during well-defined and ill-defined computer-based intercultural interactions[C]//International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 538-547.
- 30 Aspinall P, Mavros P, Coyne R, et al. The urban brain: analysing outdoor physical activity with mobile EEG[J]. Br J Sports Med, 2015, 49(4): 272-276.
- 31 Lu G, Yang F, Taylor J A, et al. A comparison of photoplethysmography and ECG recording to analyse heart rate variability in healthy subjects[J]. Journal of medical engineering & technology, 2009, 33(8): 634-641.
- 32 松浦美樹, 伊香賀俊治, 篠塚貴志, 等. D-53 自然利用を用いた本社オフィスビルにおける知的生産性の調査及び実験:(第 2 報) 自然採光, 自然換気が知的生産性へ与える影響のアンケート調査と被験者実験[J]. 学術講演会論文集, 2012, 24(3): 2477-2480.
- 33 佐藤奈央. チームにおける知識創造活動のための効果的な室内照明デザイン[J]. 2014.

34 高橋祐樹, 加藤信介, 永野秀明. F-1 室内環境が反応性うつ病・創造性に与える影響評価[J]. 学術講演会論文集, 2008, 20(1): 425-428.

35 黒木友裕, 山中俊夫, 甲谷寿史, 等. 分散型ワークスペースの知的生産性及び快適性に関する研究 (その 3) 執務空間の環境特性と知的生産性の関係[C]//空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 平成 26 年度大会 (秋田) 学術講演論文集 第 8 巻 性能検証・実態調査 編. 公益社団法人 空気調和・衛生工学会, 2016: 53-56.

36 森敏昭, 心理学概論 (心理学のポイント・シリーズ), 学文社, 2008.

37 Singer J L. The inner world of daydreaming[M]. Harper & Row, 1975.

38 Guilford J P. Frontiers in thinking that teachers should know about[J]. The Reading Teacher, 1960, 13(3): 176-182.

39 Sullivan J. The relationship of creative and convergent thinking to literal and critical reading ability of children in the upper grades[J]. The Journal of Educational Research, 1973, 66(8): 374-377.

40 堤文夫. Visual Analog Scale (VAS): 視覚的アナログ目盛り法[J]. 臨床評価指標入門 適用と解釈のポイント, 2008: 75-80.

41 池田雅子, 住田実, 菰島未来, 等. 視覚と味覚から学ぶ食教育プログラムの展開[J]. 栄養学雑誌, 2010, 68(1): 51-58.

42 渡邊志, 松本有二. 情報スキルの定量的解析における Visual Analog Scale の活用[J]. バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, 2011, 13(1): 57-62.

43 日沖求, 野澤昭雄, 水野統太, 等. 時間的圧迫状況下におけるメンタルワークロードの生理心理評価[J]. 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), 2007, 127(7): 1000-1006.

44 高田晴子, 高田幹夫, 金山愛. 心拍変動周波数解析の LF 成分・HF 成分と心拍変動係数の意義—加速度脈波測定システムによる自律神経機能評価—[J]. 総合健診, 2005, 32(6): 504-512.