



卒業研究報告書

平成30年度

研究題目

事象関連電位と視線計測による
バグ発見時の計測

指導教員 上野秀剛 准教授

氏名 村井溪介

平成31年2月13日 提出

奈良工業高等専門学校 情報工学科

事象関連電位と視線計測による

バグ発見時の計測

上野研究室 村井 溪介

プログラム開発の熟練者と非熟練者では、開発効率に最大で42倍の能力差があることが明らかにされている。ソフトウェア開発の全体の効率を上げるためには、熟練者と非熟練者にどのような差があり、熟練者がどのような思考をしているのか知見を得る必要がある。しかし、第三者がソースコードを読んでいるときの頭の中の活動を理解することは難しい。そこで、本研究では人の認知活動であるプログラム理解を定量的に計測する方法として、バグ発見時の脳波と視線の同時計測を行うための環境を構築する。脳波と視線を同時に計測することで開発者がソースコードのどこを見たときにバグと判断したか分析が可能になる。本研究では脳波の特徴の1つであるERP（事象関連電位）に着目する。ERPは不自然な画像や特異なものを見た時に発生する電位である。開発者はソースコード中のバグを動作が仕様と異なる、不自然なものと認識していると考えられる。本研究では、視線と脳波を同時計測し、ERPの計測が可能な実験環境、実験設定を制作する。また、構築した実験環境で試験的に脳波と視線を計測し、正しく同期を行えるか、また、脳波からERPを得ることができるか確認する。結果として、ERPと視線が同時に計測できる環境は構築できた。ERPに近似した波形が得られ、各装置から出力されるCSV形式ファイルに、トリガーが記録されていたため同期は適切に取れていたことが確認できた。

目次

1	はじめに	2
2	関連研究	4
2.1	脳波	4
2.2	視線	4
3	脳波と視線	6
3.1	脳波 [12]	6
3.1.1	計測方法 [12]	6
3.1.2	事象関連電位 [12]	7
3.2	視線 [12]	9
4	プログラミングにおける脳波	10
4.1	プログラミングにおける脳活動	10
4.2	脳機能マッピング	12
5	実験環境構築	13
5.1	環境構築における留意点	13
5.2	実験環境	14
5.2.1	ハードウェア	14
5.2.2	ソフトウェア	17
5.3	タスク	19
5.4	手順	21
5.5	分析方法	21
6	試験運用	22
6.1	試験運用中の脳波	22
6.2	脳波と視線の同期	28
6.3	実験環境の改善	29
7	おわりに	30
	謝辞	31
	参考文献	32

1 はじめに

現代社会ではあらゆる場面でソフトウェアが使用されており，ソフトウェアが日常に不可欠となっている．ソフトウェア開発にはプログラマによる効率的で正確なプログラミングが必須であるが，開発者の仕様の認識ミスや，タイピングミスによってバグが混入されることがある．このバグを発見するためのデバッグ作業はプログラム開発において多大な時間を有し，開発効率に大きく影響する．

バグ発見の効率はプログラマによって大きく異なると考えられ，エラー情報からバグを特定し即座に発見するプログラマもいれば，なかなかバグを発見できないプログラマも存在する．バグを素早く発見できるプログラマがどのような考えに基づきソースコードを読み，バグを発見しているのか把握できれば，効率の良いバグ発見手法の開発に有用とされる．

本研究では，バグ発見時のプログラマの思考を把握するための方法として，バグ発見時に脳波 (EEG:Electroencephalogram) の特徴の1つである事象関連電位 (ERP: Event-Related Potential) が発生するの検証する．ERPは不自然なことや特異なことに気づいたときや，目的のものを発見した際に現れる脳波の変化である [1]. 人が不自然な写真や絵を見たときにERPが発生することが認知科学や脳科学の分野で明らかにされている [2].

プログラマによるバグ発見は，プログラマがソースコード中の文法や論理的なエラー，仕様との不一致に気づくことである．そのため，コードを読みバグを探すという行為にも脳の認知機能が関係しており，バグ発見時にもERPが現れると考えられる．バグを特定する際にERPが現れることが分かれば，バグを発見した際のプログラマの行動をより把握しやすくなると考えられる．また本研究では，バグ探索時の被験者の脳波を計測すると同時に，視線計測装置を用いて，バグ探索時の視線移動情報も計測する．バグ探索時は，コード全体を上から下に眺め，その後バグのありそうな箇所を集中して読むという視線移動をすることが明らかになっている [3]. したがって，バグ発見時にはバグのある行（または被験者がバグだと推測する行）を見ていると考えられる．視線移動情報を脳波情報に重ねることで，バグのある行を読んでいるときの脳波を特定することが可能と考えられる．

脳波と視線を同時に計測すると，デバッグ中のプログラマがソースコードのどこを見たときの脳波であるか特定することが可能である．また，バグを発見するまでの過程を追跡することが可能になり，プログラマがどのような思考・判断をしたかを観察する一助となる．しかし脳波と視線を同時に計測するには，脳波計測装置と視線計測装置の同期をとる必要があり，どのように同期をとるかが重要である．ERPを得る上で，刺激の提示時刻が50~100msずれると，ERPの発生時刻（刺激が提示されてからERPの反応が出現する時刻）もずれてしまうため，ERP

の発生時刻を揃えることが重要である。このような懸念は他にも存在し、解決することは大変である。本研究では、同時計測をする上での問題点に配慮して、ERPと視線移動情報を計測できる環境を構築することを目的とする。

以下、2章では関連研究について説明し、3章では、脳波と視線について、4章ではプログラム理解における脳波について紹介する。5章ではERPを得るための実験設定および環境構築について述べ、6章では結果に対する考察をして、適切な実験設定ができたかを検証する。

2 関連研究

2.1 脳波

人の脳を非侵略的でかつ簡単に測定する手法として、脳波が様々な研究分野で用いられている。水野らは、計算を伴う精神作業時の脳波と脈波を計算し作業時の聴覚刺激の違いによる作業効率の変化を脳機能及び自律神経機能に基づいて調べ、クラシック音楽が精神作業時の脳活動効率を増大させることを確認している[4]。プログラム理解に関する研究においても、脳波を用いた研究が多数行われている。山本は、プログラムの解法の見当がついたときに α 波が増大し、検討がつかなかったときは、 α 波と β 波の比が増大したことを確かめ、プログラムの解法の見当がついているか否かを脳波によって判読できることを検証している[5]。

上野らは、ソフトウェアのユーザビリティ評価の際に、人間の心理状態を定量的・客観的に評価する手法として脳波の有用性を確かめている[6]。

脳波の特徴の1つであるERPに関する研究も数多く行われている。奥村[7]は、被験者に普段使用しない言語で書かれたコードやエラーを含むコードを提示し、その際に脳波を測定することで、被験者がソースコードに感じる違和感がERPに現れるかを調べた。実験の結果、異なるプログラミング言語や文法エラーに対してもERPが現れることが確認できた。また、普段使用しない言語のコードや、文法エラーを含むコードに対するERPはピーク値が大きくなったと述べている。

上記のように、人間の認知活動に関する研究では、脳波やERPにその影響が現れることが分かる。特に、ソフトウェア工学の分野においては、プログラムの理解を脳波や脳血流などの生体情報から認識しようとする試みが複数存在する。しかし、ソフトウェア開発の効率に大きく関係するバグ発見の過程を、生体情報を用いて明らかにしようとする試みはあまり行われていない。そこで本研究では、人間が不自然なことや特異なことに気づいたときや、目的のものを発見した時に出現するERPが、バグ発見時に発生するのかどうかを検証する。脳波を用いる利点は、認知活動の研究に用いられる他の脳の計測方法と比べて手軽で、低コストであることがあげられる。他の計測方法としてfMRIが存在するが、装置自体が巨大で高価であり、被験者を長時間拘束する必要があるため容易に使用することが難しい[8]。

2.2 視線

人間が文章を読むときや目的のものを探し出す際の視線移動について複数の研究が報告されている。高木は、日本語から英語への翻訳作業時の被験者の視線情報から、ユーザが「迷いの状況」に陥ったことを示す規則的な視線移動パターンを発見し、このパターンが検出されるときはユーザが確かに迷っていることを明らかにした[9]。

プログラムのバグ発見やレビューの様子を視線を用いて観測する研究も複数報告されている。上野[3]は、被験者がレビュー対象物を精読する際の視線を計測し、コードレビュー時の視線とレビュー効率の関係性について実験を行った。実験の結果、被験者の視線移動は3種類に分類でき、そのうち、レビュー開始時にコード全体を上から下に向かって眺める視線移動を十分に行っていない被験者は、誤り検出までの時間が長くなる傾向にあると分かった。

上記のように、視線情報は人間の文章理解に関する様々な研究で用いられている。ソフトウェア工学の分野では、効率的なプログラムレビュー・デバッグ方法を明らかにするために用いられることが多い[10][11]。本研究でもデバッグを対象に視線を計測する。

3 脳波と視線

本章では、本研究が計測対象とする脳波と視線について説明する。以降、本章は宮本の論文を引用する。

3.1 脳波 [12]

人間の頭部に2つの電極を貼り付けると、その間にわずかな電位差が生じる。その大きさは数十マイクロボルトであるが、数万倍に増幅するとリズムを持った波が観測できる [1]。これが脳波 (EEG:Electroencephalogram) であり、人の脳活動を非侵襲で測定できるため、様々な分野で用いられている。

脳波には様々な周波数帯域があり、国際脳波学会によって分類及び名称が定められている。各帯域の名称と周波数は以下の通りである。

- δ 波 (0.5~8Hz)
- θ 波 (4~8Hz)
- α 波 (8~13Hz)
- β 波 (13~20Hz)
- γ 波 (30Hz 以上)

α 波は、静かな暗室で目を閉じ、何も考えないようにしたときに見られる。覚醒が低下すると α 波の振幅が低下し、不連続になる。考えごとをしたり、精神的に興奮すると α 波は減少して、 β 波が出現する。睡眠状態に移行すると δ 波や θ 波や出現し、これらは周波数が低いため徐波と呼ばれる [1][13][14]。

以上のように、脳波は心理状態の変化、活動状態によって発生する周波数が異なるため、意識や感情・学習などといった心理学に関連する分野で用いられている。また、病的状態の場合には、目覚めている状態でも徐波が観測されたり、周期では分類しにくいような特異な波形が現れることがあり、臨床的にも応用されている [15]。

3.1.1 計測方法 [12]

脳波は、頭皮上に装着した電極から計測される。電極をそのまま頭皮に接触させると分極が起こり、電位を導出できないので、頭皮と電極の間には電解質を含んだ電解糊を介在させる必要がある。したがって、電極を装着する際は予め装着する部位をよく脱脂した上で、電解糊をつけた電極を圧着する。電極の配置は1958年の国際脳波学会で標準化された図1に示す国際式10-20電極配置法 [1] が広く使用されている [13]。国際式10-20電極配置法では、耳のアースを除き19箇所の装

着位置が指定されているが，実際には，検査や研究の目的によって使用する電極の数が決まる [5][15].

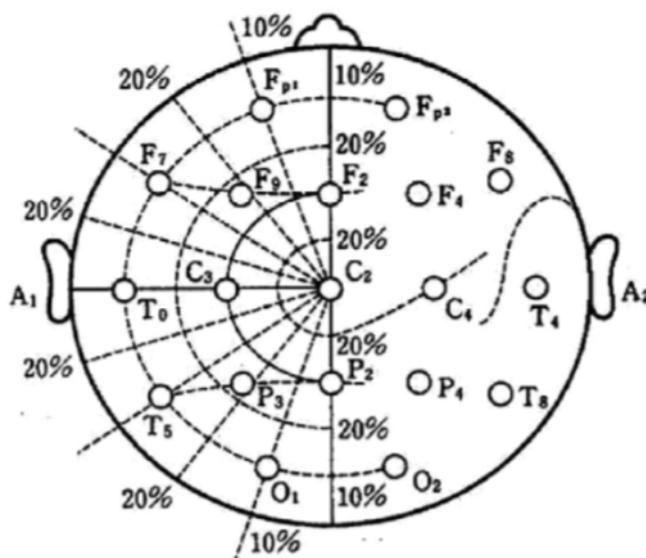


図1 国際式10-20電極配置法

脳波の導出法には主に基準電極導出法と双極導出法の2種類がある．基準電極導出法では，脳電位の電場内に装着した計測用電極と，電場外に装着した基準電極の2つの電極の電位差として脳電位を測定する．双極導出法は，基準電極を用いず，2つの計測用電極を脳電位の電場内に置いてその電位差を脳電位として測定する．一般に脳波には，脳の限局した領域に発生するものと，比較的広い範囲から同じように記録されるものとがある．双極導出の2つの計測用電極の電極間隔が狭い場合には，脳の広い範囲から同じように記録される要素は，両方の電極にほぼ同じように記録されるため，相殺されてほとんど記録されない．したがって，計測用電極の電極間隔が狭い場合に電位差を計測する際は基準電極導出法を，優勢な背景成分を除去して，部位差を強調する目的で計測する際には双極導出法を選択する [5][14].

3.1.2 事象関連電位 [12]

不自然なことや特異な事象などの外部からの刺激を認識した際の脳波の変動を事象関連電位 (ERP:Event-Related Potential) という．図2にERPの例を示す [4][1]. 高さの異なる二つの音をランダムに提示し，より高い音が提示された数を数えるように指示したときのERP波形である．横軸は音を提示してからの時間，縦軸は電圧（上が負，下が正）を表し，太線が高い音が提示されたときの波形，細線は低い音が提示されたときの波形である．高い音を提示してから約300ms後に正に電位が振れていることがわかり，ERPが観測されていることが確認できる．

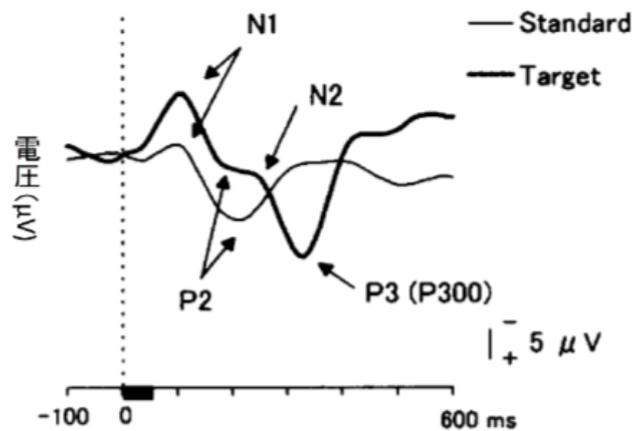


図2 事象関連電位 ([1] をもとに宮本が加筆)

ERPの計測では、多数の刺激提示と計測から得られた脳波データを刺激の提示時点にそろえて加算平均する方法がよく用いられる。ERPは微小な電位変動であるため、通常の脳波成分に埋没しており、1回の刺激提示によって得られるデータからERPを抽出することは難しい。しかし、脳波全体の振幅はゼロマイクロボルトを中心とした正規分布であるため、複数回計測し、刺激提示時点を統一して加算平均をとることで、ERPが発生している部分以外の振幅は抑えることができる。一方、ERPは刺激の提示時点から一定の反応時間で生じるため、加算を重ねるごとにその振幅は増大していく。以上のように、加算平均法によって事象とは時間的に無関係に生じる脳波を相殺することで、ERP成分のみを得ることができる [14][15]。

以上のように、脳波やERPに人間の認知活動の影響が現れることがわかっている。プログラムの難易度や理解時の負荷を定量化するために、脳波から認識しようという試みが多数行われている [5][6][16]。特に、気づきを伴う認知活動の研究にはERPが用いられている。大石の研究では、日本語の構文解析器の研究においてERPを用いており、被験者実験において、表示された文章が文法的な誤りを含むときにERPが検出されている [17]。奥村は、エラーを含んだソースコードに感じる違和感がERPに現れることを検証している [7]。プログラムのバグ発見も、バグを発見したという気づきが活動中に含まれているため、ERPが発生すると予想される。バグ発見時にERPが発生すると確認できれば、バグ発見時を特定するのにERPが利用できることになり、バグを発見した際のプログラムの行動をより把握しやすくなると考えられる。

3.2 視線 [12]

人間はものをよく見るために、眼球を動かしてその対象の方へ向ける。眼球の運動には様々なタイプがあり、大きく分けて自分の意志で動かすことのできる随意運動と、意志とは関係なく動く不随意運動とに分けられる。また、ソフトウェア開発工程における効率的なプログラムレビュー・デバッグ方法を明らかにするためにも用いられている [10][11]。

ERPの検出には加算平均を行うため、計測した脳波からバグ発見時刻を特定する必要がある。プログラム中のバグを発見する際は、バグのある箇所を見ていると考えられる。視線計測装置で計測した視線移動から読解箇所を特定することが可能であるため、バグ発見時刻を特定しやすくするために視線移動が利用できると考えられる。また、被験者が発見したバグが予め混入したバグであるのかそうでないのかも、バグ発見時の読解箇所から判断できると考えられる。以上のように、視線情報もバグ発見時のプログラムの行動を把握するのに重要な役割を果たすと考えられる。また脳波を分析する際に補助的な役割を果たすと予想できるため、本研究で計測する。

4 プログラミングにおける脳波

4.1 プログラミングにおける脳活動

ERPを計測するためには、多数のサンプルが必要である。現実的な時間内に実験を終えるためには、短時間で完了するタスクを完了する必要がある、判断に長時間必要なものは実施が難しい。そこで、本研究ではif文などに利用される条件分岐式を対象に調査をする。被験者に与えるタスクとして、条件式が真であるか偽であるか判断する作業を選択する。

条件分岐式は数値比較と論理演算の2種類に大別される。

論理演算とは”TRUE&&FALSE”, ”TRUE||FALSE”のような、論理演算子を挟んで、左辺と右辺の成立や関係が正しい（真である）か正しくない（偽である）かを判断するタスクであり、数値演算は”3>4”, ”1<= 1”, ”5==6”のような、式が成立するのか不成立なのかを問うタスクである。

論理演算をタスクとして使用すると、3つの要素（左辺、演算子、右辺）を見てから成立の真偽を判断する条件式と、3つの要素のうち2つの要素を見るだけで判断できる条件式の2種類の条件式が混在することになる。2種類の条件式によって、判断・思考を省略できる（3要素を全て見ずに、2要素だけを見て判断時間の短縮・攻略が可能）条件式とできない条件式があり、タスクの条件式の成立を判断するまでの時間にばらつきが生じる。ERPは、発生時刻を揃えて加算平均処理をして初めて得られるため、ERPの発生時刻がずれることは致命的である。また、視線計測の上でも、2種の条件式が混在することは避けたい。条件式上の3つの要素をそれぞれ1回以上見て認知した後に条件式の成立の判断をするため、ERPの発生区間は3つの要素を認知した時刻以降であると限定できる。3つの要素をすべて見る必要があるタスクと、2つの要素だけを見ればよいタスクが混在すると、視線からERPの発生区間を限定する上で精度が低くなるため、利用できない。

数的タスクは左辺と右辺の数値について、大小比較や同値かどうか判断する数値演算のタスクである。使用される演算子は”==”, ”<”, ”>”, ”<=”, ”>=”である。論理演算を有する論理タスクと比較して、条件式の一部を見ただけで条件式全体の真偽を判断できない。ただし一部、このような”9<x”, ”0>x”(x=0~9の数値)は省略が可能であるが、各要素から生成される条件式のパターンは全部で405通りのうち、攻略できるタスクは微小である。前提として、本研究のタスクとしてERPを得るためには、タスクが簡単であること、たくさんのデータを得るためにタスク時間が数秒と短いタスクであることが条件である。論理演算も数値演算も上記の条件は適している。しかし論理演算は判断・思考を省略できるタスクが存在してしまうため、本研究では同様の省略がほぼ不可能な数値演算タスクを実験タスクとして採用する。また、数値演算タスクを使用することによって、論理演算より

もタスクのバリエーションが多いことも利点である。

数的タスクを採用する上で、変数を定義して使用すると被験者に提示するタスクに変数定義の行数が増えてしまい、変数を頭の中で記憶する思考を伴い、真偽の判定に時間を要するため、変数を使用する数的タスクは、今回は除外する。よって左辺と右辺には、変数を定義して、使用しない。また、提示するタスクの文字列長を可能な限り揃えるために、左辺と右辺には0~9の整数の10種類を使用する。

今回の実験環境構築では、デバッグの中でのif文内の条件式の判断に限定し、さらに分析データ数を稼ぐために、タスクの難易度を下げ、被験者がプログラミング思考を用いて条件式の成立の真偽を判断するときに、ERPが出現するのか否かを検証することに重点を置いた。

4.2 脳機能マッピング

本研究が対象とするデバッグ作業には、変数記憶や、論理的判断、数的判断、数値比較、選択判断等の認知活動が必要である。各認知活動はデバッグ中に行われるさまざまな活動の種類で必要とされる度合いが異なるため、実験で採取する脳波は、タスクに対して活発に機能する脳部位の脳波である必要がある。

MANUELら[18]は、様々な数式をタスクとして用意し、それぞれの数式中の文字を1文字ずつ一定時間で区切って、被験者に提示したときに、それぞれの文字に対応した脳波を計測した。実験は、被験者が表示される数式がどの文字を認知した時に、正しいか誤っているか(成立か不成立か)に気づくかを検証した。正答なタスクの脳波と誤答なタスクの脳波を比較すると、C3,C4,P3,P4には特徴的な結果が得られた。数的判断を有するタスクに対して、活発になる箇所はC, P付近(頭部の中央から後頭部付近)であることが確認できた。

したがって本研究では、装置の都合上脳波を2チャンネルしか採取できないことも考慮して、C3・C4, P3・P4それぞれの中間部位となるCz,Pzを計測対象とする。図3¹に脳機能マッピングを示す。図3より、上記のプログラミング的思考を総合的につかさどる部位はCzである。Pzは、認知処理を行い、タスクの条件式を見たときに数値を演算子を認知し、記憶する。すなわちPzでは、条件式を認知し、Czで数的思考、プログラミング的思考を用いて条件式の成立を判断すると考えられる。

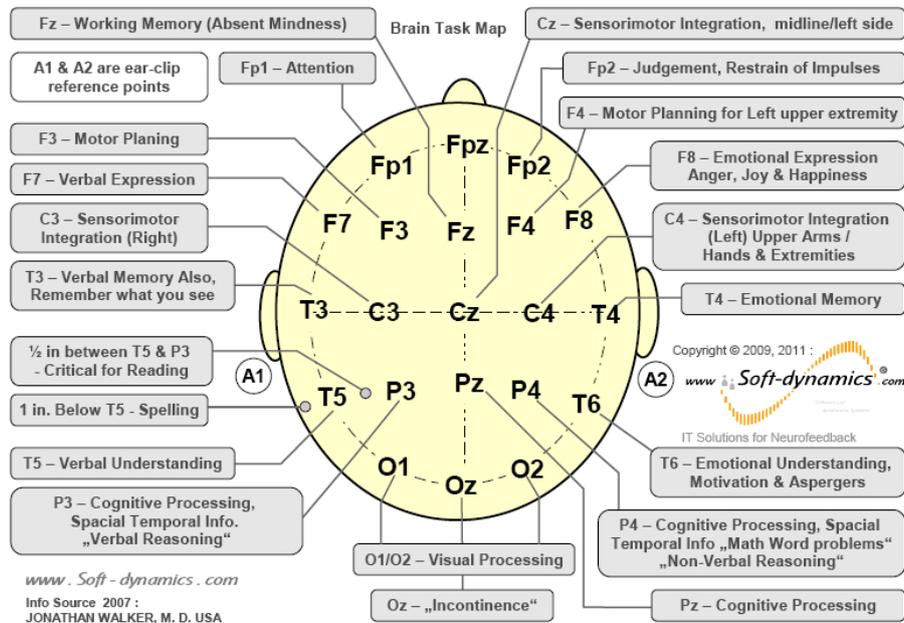


図3 実験装置図

¹<https://philippineurofeedback.com/method/>

5 実験環境構築

5.1 環境構築における留意点

本研究の目的に沿った実験環境の構築に必要な要件について説明する。本研究では、プログラムをデバッグしている時のプログラマの脳波と視線移動（以降、単に視線と呼ぶ）を計測し、脳波と視線を組み合わせて分析することで、効率の良いデバッグをするための知見を得る。

まず、実験で被験者に課すタスクは、プログラマがデバッグをしているときと同じ脳活動を発生させる必要がある。デバッグは変数記憶や論理的判断、数的判断、選択判断等の様々な脳活動を伴うが、分析を容易にするためには、少数の脳活動だけが発生するタスクを構築することが望ましい。また、ERPを取るために数百や数千のデータ数が欲しい。そのためには数秒で終わるようなタスクが求められる。さらに、ERPを取るために個々のタスクの完了時間ができるだけ揃うような性質や難易度を持つことが必要。本研究では上記を満たすことができるタスクとして、Java言語のif文の条件式（数値の大小比較）が真か偽か判断するタスクを設定する。タスクの詳細は5.3節で述べる。

実験で計測する脳波と視線は同一人物の同タスクに対するデータを計測する必要があることから、同時に計測する環境が必要である。また、それぞれ計測する装置が異なるため、計測後に出力されるデータの時間軸をそろえ、ミリ秒のオーダーで同期がとれている必要がある。それぞれの計測装置が制御、および計測データの保存にPCを利用するが、PCのタイマーは一般に精度が高くなく、タスク開始前に同期を取ったとしてもタスク中に誤差が生じ、ある期間の視線に対応する脳波の期間が特定できなくなる恐れがある。本研究では、タスクの開始ごとに脳波計測装置と視線計測装置を同期するためのトリガー信号を出力し、装置間での同期を取ることで、各タスクに対応する視線と脳波を特定できるように設計する。

視線や脳波のデータは、被験者の行動に応じてグルーピングする必要がある。タスクは条件式の成立が真か偽を判定するタスクであり、真となるタスクと偽となるタスクの判断に有する認知活動はそれぞれ異なる可能性がある。また、条件式を正しく判断したときと誤って判断したときでも脳活動が異なる可能性がある。そのため、これらを区別できるように、被験者に提示するタスクの正解と、各タスクに対する被験者の回答を記録する必要がある。本研究では、条件式の真偽による異なる脳活動を区別できるように、タスクの事前生成を行い、被験者には回答を入力させる。計測されたデータは表示したタスクが真か偽かでグループ分けすると共に、それぞれに対して正答か誤答か記録する。次節以降では、構築した実験環境における、実験環境（装置等）、タスク、構成、手順、分析方法に分けて、詳しく説明する。

5.2 実験環境

5.2.1 ハードウェア

実験環境を構成する装置の配置と各装置の入出力を図4に示す。

図中の四角は計測に使用する装置を示し、装置から入出力される矢印はデータのやり取りを示している。中心には被験者、その隣にはオペレータ（実験者）が配置される。視線は視線記録・タスク提示PC、脳波は脳波記録PCへそれぞれの生体情報が記録される。

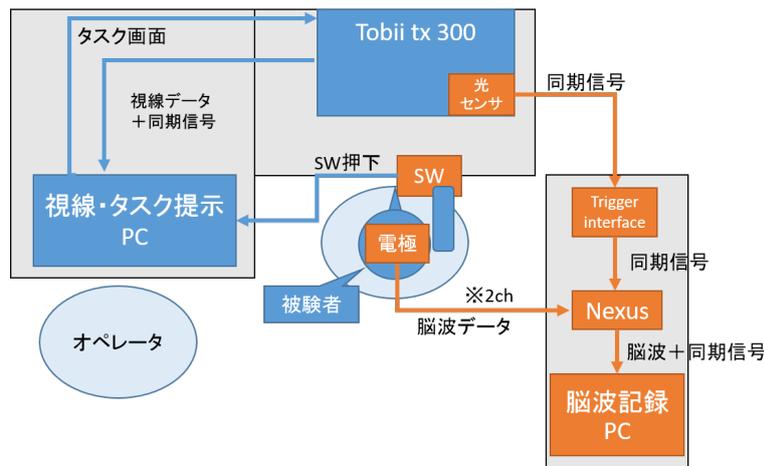


図4 実験装置図

脳波計測に用いる装置は、ナノテックイメージ社製のNeXus-10 MKIIと、NeXus記録用PC、Trigger Interface、光センサ、電極である。以下、宮本の論文[12]を参考に同じ装置を利用した。NeXus-10 MKIIは脳波だけでなく、脳血流・呼吸・心電といった生体信号をリアルタイムに計測できる装置である。被験者に装着する電極は、計測用ケーブル（装着部が4股に分かれていて、陽極用、陰極用が2つずつになっている）と、アースケーブルの2種類である。計測用ケーブルの陽極はそれぞれPz、Cz点に、陰極は左耳、右耳に装着し、アースケーブルは、ボディーアースとして使用するため、被験者の額に装着する。本研究では頭部の2か所（Cz,Pz）から脳波を得るため、NeXus-10 MKIIには2チャンネルのデータが入力される。計測周期は256Hzであり、計測された脳波はBluetooth経由で計測用PCに転送され、csvファイル形式で出力される。

NeXus記録用PCは、Windows7 Intel(R) Core(TM)i5-3380M 2.90GHzでメモリ搭載量は4GBのノートPCである。Trigger Interfaceは視線装置との同期を行うための装置である。同期の方法については後に説明する。図5に、NeXus-10 MKIIの外装²とTrigger Interfaceの外装³、装着時の様子を示す。

²<https://www.stens-biofeedback.com/>

³<https://www.mindmedia.com/en/products/accessories/nexus-trigger-interface/>



図 5 脳波計測装置

視線計測に用いる装置は、Tobii Technology 社製の Tobii tx 300 Eye Tracker と、視線記録・タスク提示 PC である。

Tobii tx 300 Eye Tracker はディスプレイ一体型の装置であり、画面上に表示されるタスクに対して、被験者がどこを見ているかをモニタ下部にある視線移動センサーで計測する。非接触型の視線計測装置で、被験者に何かを装着してもらう必要が無いため、被験者にかかる負担を軽減することができる。計測周期は 300Hz であり、計測されたデータは CSV ファイル形式で出力される。図 6 に Tobii tx 300 Eye Tracker の外装⁴を示す。



図 6 Tobii tx 300 Eye Tracker の外装

視線計測用 PC と連動したスイッチを用意し、被験者がタスクの真偽を入力できるようにする。図 7 に被験者用のスイッチ⁵を示す。被験者は条件式を真と判断したなら、A ボタン（赤）を押し、偽なら B ボタン（黄）を押し、被験者の入力した

⁴<https://www.tobiipro.com/ja/product-listing/tobii-pro-tx300/>

⁵<http://buffalo.jp/product/input/gamepad/bsgp801/>

内容は視線装置が出力する視線データに統合され出力される。



図7 スイッチ

視線・タスク提示用PCはタスクを提示すると共に、視線計測装置と脳波計測装置の同期が必要である。そこで、視線計測用装置は、PsychoPyにTobii tx 300用のSDKを用いることで、ソフトウェア的に同期をとることができた。脳波計測装置には、同期を行うための画面出力を行う。視線計測装置(Tobii tx 300)には画面の右下にそれぞれ光センサーが貼付けられている。センサは暗い状態にあるときに明るくなったことを感知すると、トリガー信号を出力する。したがって、タスクが表示されるまでの画面出力で黒を出力しておき、タスクが表示されてからは白を出力することで、タスク提示がされたタイミングで脳波計測装置へのトリガー信号を出力できる。センサはTrigger interfaceに入力される。Trigger interfaceはさらにNeXusに接続されている。タスク提示画面の右下にセンサ用の小ウィンドウを表示し、タスク表示前に黒、タスク表示中に白を出力することで、各タスクが開始した瞬間に脳波計測PCに信号が送られる。

5.2.2 ソフトウェア

脳波計測に用いるソフトウェアは、NeXus-10 MKIIに対応したソフトウェアであるBio Trace+NX10である。BluetoothによってNeXus-10 MKIIから脳波データをリアルタイムで受信し、記録する。脳波データは様々なフィルタを設定し、表示とCSVファイルへの出力が可能である。図8に、脳波計測時のBio Trace+NX10の画面を示す。図中の上半分と下半分にそれぞれ異なる電極から計測した脳波が表示されている。また、それぞれの電極について、上（上から1番目、および3番目）が脳波の元波形、下（上から2番目、および4番目）が周波数帯域別にフィルタをかけた脳波である。



図8 脳波計測時のBio Trace+NX10

視線計測およびタスク提示にはPsychoPyを用いる。

PsychoPyはタスク提示と視線情報の記録が可能なので、本研究でもタスクの提示をPsychoPyで行う。また、Tobii tx 300 Eye Tracker用SDKをPsychoPyに導入することで、視線装置のキャリブレーションと計測した視線データを出力できるようにする。データ出力は視線データとタスクログデータの2種類をCSVファイルとして出力する。ログデータは、表示されたタスクのIDと、出題された条件式とその真偽、被験者のボタン押下による回答と押下された時間を含む。このログデータをもとに、分析で、採取した脳波データを選別し、グルーピングを行う。

構築する実験環境では，連続する個々のタスクに対して以下の情報を同期して計測することができる．

- PsychoPy キー入力 CSV 出力ファイルの内容
 - － 実行中のセッション番号
 - － 実行中のタスク番号
 - － セッションスタートキー入力の有無
 - － スタートキー入力時間
 - － 提示中の条件式
 - － 条件式の成立の真偽
 - － 被験者の回答キーの入力
 - － 回答キー入力時間

- 視線 CSV 出力ファイルの内容
 - － 計測時刻
 - － 右（左）目の水平方向座標
 - － 右（左）目の垂直方向座標
 - － 右（左）目の瞳孔の推定サイズ
 - － 右（左）目が正しく認識されたかを示す信頼度
 - － 両目の平均的な注視点の垂直座標
 - － 両目の平均的な注視点の水平座標
 - － トリガー入力の有無

5.3 タスク

タスクは、ERPを採取できるように、Java言語のif文の条件式（数値の大小比較）の成立が真か偽かをプログラマに判断してもらうという簡単なタスクを用意した。タスクの設計には、実験時間、取得したいタスク数、プログラムの行数・難易度等の懸念事項が多い。これらの条件に加えて、真となる条件式と偽となる条件式の出現比率等を考慮してタスクの設計をする必要があった。

タスクはJava言語のif文の条件式のみを画面に提示する。本実験で扱う条件式とは、左辺と右辺にそれぞれ1桁の数字が表示され、中央の演算子との関係性から真偽が決定するものとする。例えば"3<4","1>4","9==8",...のような条件式を画面に表示する。出題されるタスクの左辺・右辺の数値は09までの整数10種類、演算子は"==" ,"<" ,">" ,"<=" ,">="の5種類である。

右辺, 左辺, 演算子の各要素をランダムに組み合わせ、タスクを生成する。1つのタスクは1.5秒間表示（以降、タスク表示）される。その後1.5秒間は視線移動のフィクセーションを、次のタスクの視線計測開始位置を画面中央に統一するために、画面中央に"+"を表示（以降、ブレイク）させる。上記の3秒をトライアルと呼び、これを被験者1人あたり1000回繰り返す。被験者には1タスクを3秒以内に、真か偽かを手元のボタンによって判断してもらう。しかし、指を動かすと、指の筋肉の収縮が脳波にとってノイズとなるため、ERPがノイズに埋もれて検出できない可能性がある。また、被験者は指を動かそうと考えるだけでも、ERPにとっては、思考的なノイズとなり、このような運動によるノイズをモータと呼ぶ。よって、被験者はタスク表示時間中はボタンを押すことは許されない。したがって、被験者はタスク表示時間中は、脳内で条件式の成立が真か偽か判断だけをする。

被験者のタスクの回答はブレイク中に視線の計測点の修正と同時にしてもらう。ブレイク中に回答することによって、被験者がタスクに対して真か偽かを判断する脳活動とボタン押下によるモータを分離できる。被験者が「判断する」という事象と、「ボタンを押して回答する」という事象を分離することによって、同じ時間に2つの事象に対する脳波が計測されることを回避できる。

画面に表示される条件式（文字列）は演算子によって、文字列長が変化する。例えば"3<4"と"3==4"を比較したときに、3文字と4文字で文字列長が変化するため、各要素は独立に配置し、文字列長に関係なく固定のポジションに表示されるようにした。よって、文字列長に関係なく、各要素がすべてのタスクにおいて固定の領域に位置しているため、視線の分析が容易になる。

タスクの出題方法について説明する。タスクは画面に表示され、3秒間で表示された条件式の成立が真か偽を判断してもらう。この作業を100トライアル×10回（休憩あり）繰り返してもらう。また、タスクは条件式の成立が真となるタスク（真タスクと呼ぶ）、偽となるタスク（偽タスクと呼ぶ）があり、実験前にあらかじめ真のタスク500、偽のタスク500の合計1000タスクを生成した。本研究のよ

うな被験者に数秒程度の簡単なタスクを数百あるいは数千タスク分を実施するタスクをオドボール課題という。オドボール課題をする上では，出現率が低いタスクをレアタスク，出現率が高いタスクを標準タスクと呼び，レアタスクと標準タスクのの比率のことをオドボール比と呼ぶ。図9に，今回の真タスクと偽タスクの出現比率を示す。生成した真タスクと偽タスクは500タスクずつ存在し，それらを単にランダムに出題しても，真タスク，偽タスクそれぞれに対するERPは出現しにくい。よって100タスクを1セッションとして，オドボール比を $TRUE_{small} : FALSE_{many} = 1 : 4$ あるいは $TRUE_{many} : FALSE_{small} = 4 : 1$ になる2種類のセッションを5セッションずつ生成し，各セッションを $TRUE_{rare}$ セッション， $FALSE_{rare}$ セッションとする。このようにセッション内で真タスクと偽タスクのオドボール比を偏らせることで，被験者は出現頻度が少ない方のタスクには，より強い違和感や気づきを感じERPが観測しやすくなる。各セッションの中での出題タスク順はランダムで構成され，セッションの出現順もランダムで決められている。セッション順をランダムにしたことにより，順序効果による被験者のタスクの攻略をなくした。タスクの攻略とは，被験者が「次のタスクは真（偽）タスクが来るであろう」や「次は $TRUE_{rare}$ ($FALSE_{rare}$) セッションが来るだろう」という予測をすることである。実験前にタスクの表示順は決まっているため，被験者間での出題順序はすべて同じである。

$TRUE_{many}$ 4	:	$FALSE_{small}$ 1	$FALSE_{rare}$ 合計5セッション
$TRUE_{small}$ 1	:	$FALSE_{many}$ 4	$TRUE_{rare}$ 合計5セッション
$TRUE$ タスク群 500タスク		$FALSE$ タスク群 500タスク	

図9 真タスクと偽タスク出現比率

5.4 手順

実験の手順を以下に示す。

1. 実験の説明

実験概要，脳波・視線計測時の注意点を説明する。

2. 装置の装着・設定

脳波計測装置 NeXus-10 MKII と，視線計測装置 Tobii tx 300 Eye Tracker を被験者に装着し，設定をする。脳波計測装置を取り付け，被験者に椅子に座る位置を調整してもらった上で，PsychoPy 上で視線のキャリブレーションを行う。

3. 練習タスク

10 トライアル分を実施し，被験者にボタンを押すタイミング，ボタンの対応を慣れてもらう。

4. タスクの実施

セッション(5分間)を実施し，個々のタスクについて条件式の真偽を判断してもらう。

5. 全タスクの実施

セッション間に休憩を1分程度取りながら4.を10回繰り返す。

5.5 分析方法

CSVファイル形式で出力された脳波データをトリガーが入力された時間から次のトリガーが入力されるまでの時間で分割する。分割した脳波データのうち，分析対象と分析対象外のデータ群に分ける。分析対象となるタスクは計測ミスがなく，タスクの条件式の真偽と，被験者の回答が一致しているタスクである。分析対象外となるタスクの条件を以下に示す。

- 頭部につけた電極が途中でとれる等の計測機器によるミスがある。
- タスク表示中の1.5秒間にユーザによる入力がある。
- 被験者がタスクの条件式の真偽を誤答している。
- 被験者がタスクに対して，無回答である。

分析対象となるタスクをさらに，真タスクと偽タスクの2群にわけ，それぞれ加算平均処理をして，1つの合成波形を生成する。上記の作業を Cz, Pz の脳波それぞれに行うと，最終的に，Cz の真の脳波・偽の脳波，Pz の真の脳波・偽の脳波の合計4つの波形が得られる。これらの4つの脳波を Cz-Pz 間，真一偽間で比較し，ピークが出るタイミングやピークの強さ等を観察する。

6 試験運用

構築した実験環境を用いて被験者1人の視線と脳波を計測し、環境の有用性を確認する。

6.1 試験運用中の脳波

情報系の教員1名を対象に実験環境を用いて計測を行った。実施した1000タスクの内、67タスクが分析対象外となった。分析対象の偽タスクは449/500タスク、真タスクは484/500タスクである。図10に得られた脳波をエラーレートと共に示す。縦軸は脳波 [μV]、横軸は時間 [sec] であり、タスク表示中の1.5秒間の波形を示している。エラーレートの計算式は、以下の数式を用いた。

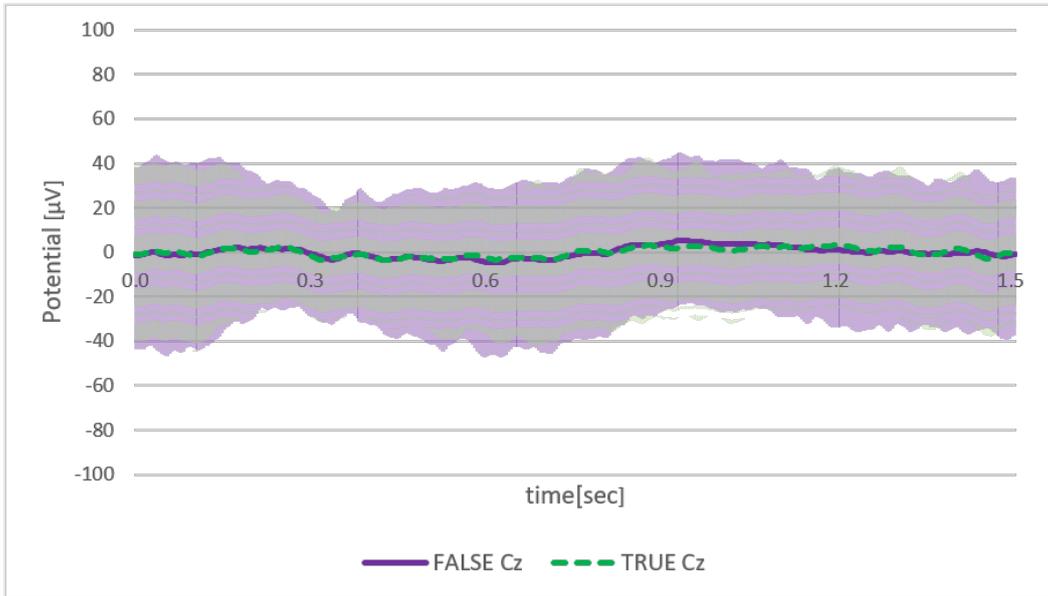
$$R_t = AVE_t \pm 2Sx_t \quad (1)$$

ここで、 t : 時刻, R_t : 時刻 t における誤差範囲, AVE_t : 時刻 t における加算平均値, Sx_t : 時刻 t における標準偏差を示している。

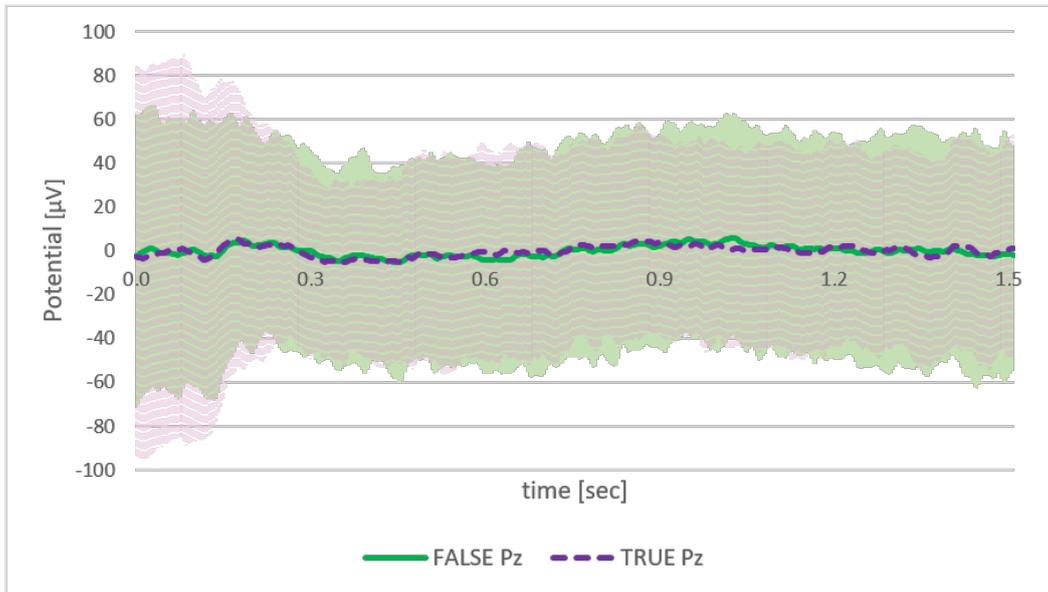
タスクに対して活発になる脳部位がタスク間、被験者間で同一であることを確認するために、エラーレートを表示した。エラーレートは、ある時刻における元波形群のデータのばらつきを示している。エラーレートが大きい、または時間によって変動が激しいと、本来タスクに対して不必要な脳機能、脳部位が活発になっている可能性がある。逆にエラーレートが小さければ、タスクに対して主になって活発に働いた脳部位を計測できたことが分かる。そのため、ここでは電極 (Cz-Pz) 間、および真と偽の間でエラーレートに差があるか分析する。

図10(a)(b), 図11(a)(b) はそれぞれ、真-偽間の Cz の脳波、真-偽間の Pz の脳波、Cz-Pz間の偽の脳波、Cz-Pz間の真の脳波である。各グラフの横軸は時刻 [sec]、縦軸はある時刻における電位 [μV] を示している。

図10(a)(b)より、真タスクの脳波と偽タスクの脳波のエラーレートはほとんど重なり合っているため、Cz, Pzにおける真タスクと偽タスクで活発に働く脳部位が異なっていないことが分かる。図11(a)(b)より、Pz-Cz間のエラーレートを比較すると、Czのエラーレートの方がPzのエラーレートより、小さいことが分かった。上記の結果より、真-偽間で機能する脳部位が大きく異なることはない。また、本研究のタスクではPzよりCzの脳機能を特に使用されることが確認できた。よって、Cz, Pzはともにタスクに関して機能する脳部位であり、計測対象としては適切である。

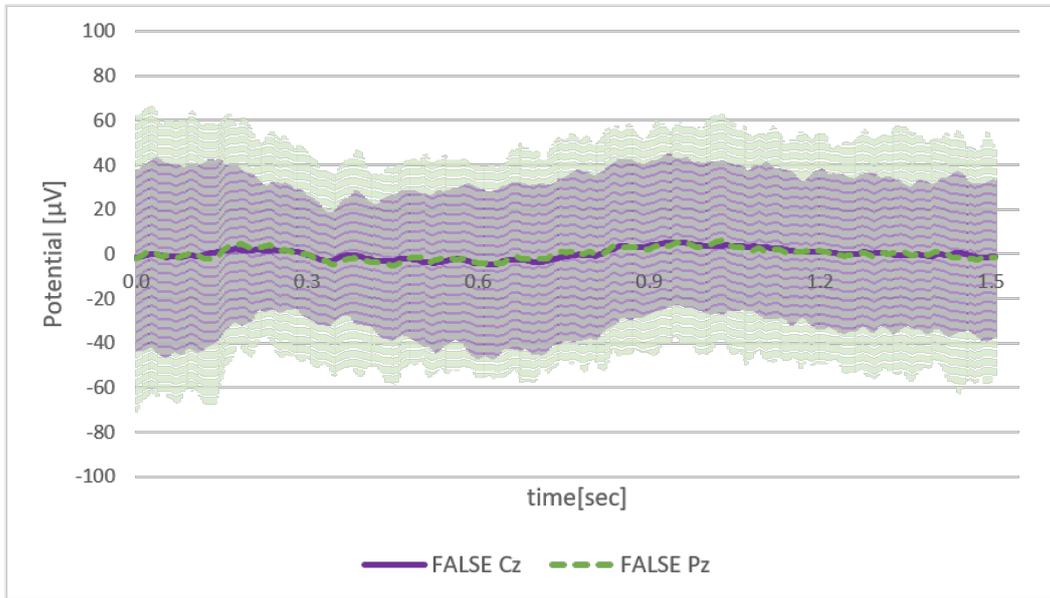


(a) Cz 真-偽間 脳波 1

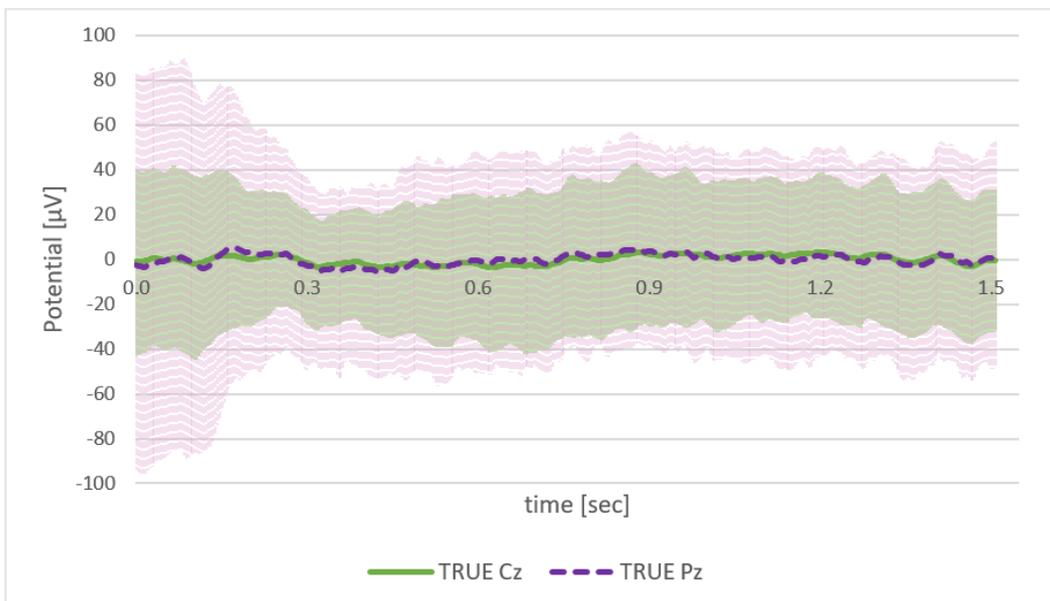


(b) Pz 真-偽間 脳波 1

図 10 エラーレート付き脳波結果 1



(a) 偽 Cz-Pz 脳波 1



(b) 真 Cz-Pz 脳波 1

図 11 エラーレート付き脳波結果 2

図12に試験運用で得られた脳波を示す。図12(a)(b), 図13(a)(b)の横軸は時刻[sec], 縦軸はある時刻における電位[μ V]を示している。図12(a)(b), 図13(a)(b)はそれぞれ, 真一偽間のCzの脳波, 真一偽間のPzの脳波, Cz-Pz間の偽の脳波, Cz-Pz間の真の脳波である。また, 各図の下部にあるグラフはその上部にある2つの脳波間でのウェルチのt検定 ($p < 0.05$) による結果を表し, 上に突出している時刻での, 2つの脳波間で有意差があることを示している。

ERP研究においてP1,P2のように時間0秒から順番にピーク(縦軸方向に突出している個所)にナンバリングする定義と, ピークが出現した時間(msec)をとって, (例えば出現時間が300msecの時は)P300のようにナンバリングする定義が存在する。本論文では各図中で, 電位が正の方向に大きく突出している個所を時間が0に近いほうから順番に $P1_{FALSE}$, $P1_{TRUE}$, $P2_{FALSE}$, $P2_{TRUE}$ とナンバリングする。

タスクの特徴等でピークの出現位置やピークの高さが変化することが知られていて, 分析に重要な要素である。本研究の結果は1名分のデータで信頼性は低い, 結果として得られた脳波の概形はERPの概形に似ている。よって, 結果として得られた脳波はERPであると仮定して, その特徴を議論する。

図12(a)(b)より, $P2_{FALSE}$ は $P2_{TRUE}$ よりもピーク値が高いことが分かる。また, 図12(b)の $P2_{FALSE}$ は $P2_{TRUE}$ よりも出現が遅延している。図12(a)より, $P2_{FALSE}$ は $P2_{TRUE}$ よりもピーク値が高く, 出現が早いことが分かる。また, 図12(b)の $P2_{FALSE}$ は $P2_{TRUE}$ よりもピーク値が高く, 出現が遅延している。 $P2_{FALSE}$ はCz, Pzでもピーク値は高いが, Czでは出現が早く, Pzでは出現が遅い。

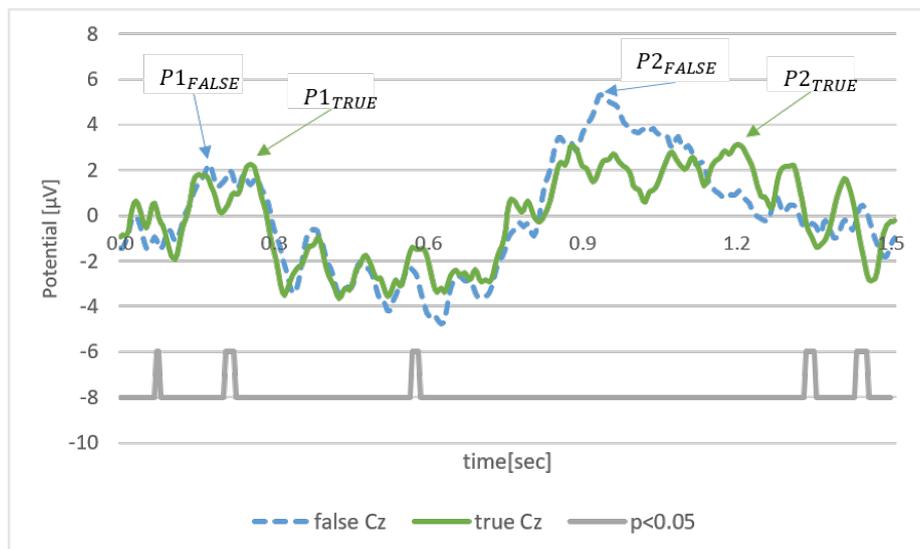
図13(a)より, $P2_{Pz}$ は $P2_{Cz}$ よりもピーク値が高く, 出現が遅い。また, 同様に図13(b)の $P2_{Pz}$ は $P2_{Cz}$ よりもピーク値が低く, 出現が遅い。 $P2_{Pz}$ は, 真であっても偽であっても $P2_{Cz}$ より, 出現が遅い。また, $P2_{Pz}$ は $P2_{Cz}$ に比べて偽タスクの時はピークが高く, 真タスクの時は低い。

よって, FALSEとなる条件式を判断するときの被験者の脳活動は, TRUEとなる条件式を判断するときより, 強い違和感や気づきを感じている可能性がある。また, 条件式を見たときにはPzより, Czの方が先にP2が出現していることから, CzはPzよりも早くタスクに反応または認知している可能性が高い。被験者は1人であるが, Cz-Pz間, 真一偽間それぞれで有意差があり, P2のピークの高さや出現時間に違いが見られるため, 実験設計はおおよそ確からしい。

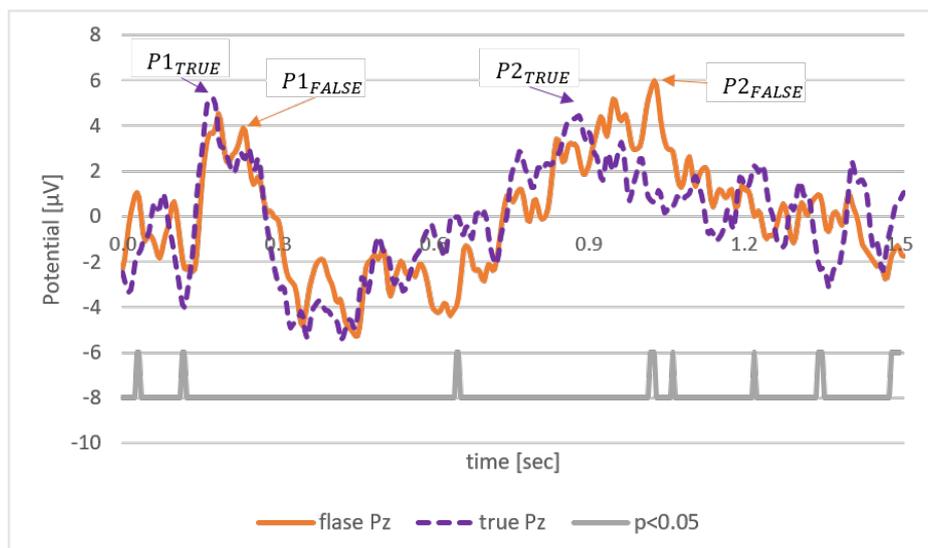
また, 被験者の主観としては, 「真タスクは表現(2==2とか1>5)が表すものそのままなので特に何も感じずに判断できましたが, 偽タスクは「表現と逆だから…」という思考をしていたように感じました。」と述べている。

被験者の主観からは, 画面に表示されている条件式が間違っている(成立しない)場合は真ではないため, 偽であるという思考をしてしまうので, 図10(b)のように, 真タスクの脳波より偽タスクの脳波の方が, P2の出現が遅延したと考えられる。また, 遅延した分, タスクに対する違和感・気づきが大きかったため, ピー

クも真タスクの波形より強く出現したと考えられる。

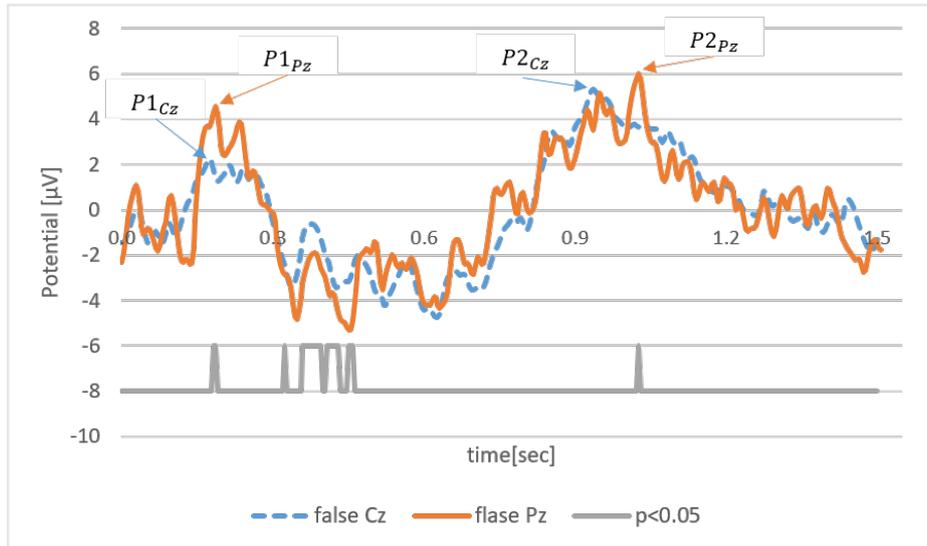


(a) Cz 真-偽間 脳波 2

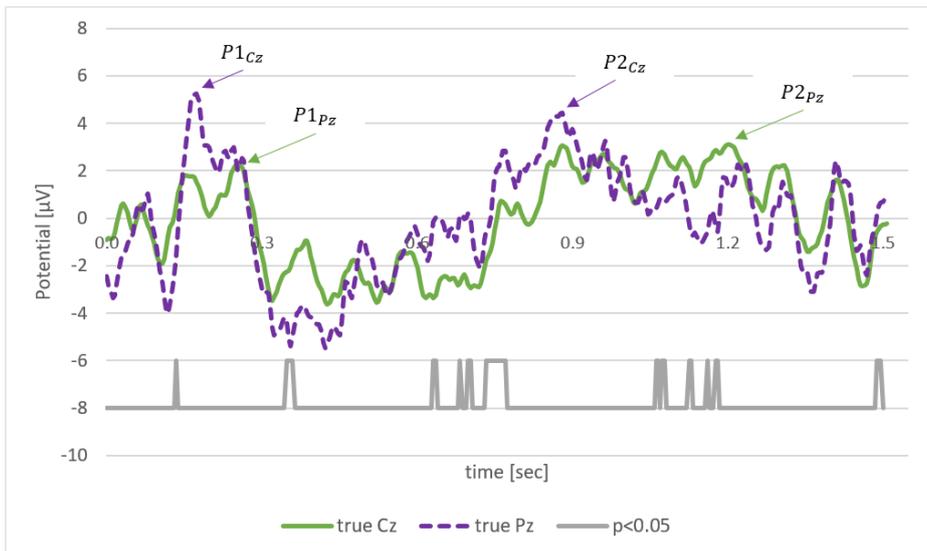


(b) Pz 真-偽間 脳波 2

図 12 t 検定付き脳波結果 1



(a) 偽 Cz-Pz 脳波 2



(b) 真 Cz-Pz 脳波 2

図 13 t 検定付き脳波結果 2

6.2 脳波と視線の同期

図 14 に視線と脳波の元データにトリガー信号が入力されていることを示す。図 14(a),(b) はそれぞれ元データの一部を示している。(a) より、脳波データには、“Events” 列の“Light Trigger” (破線で囲われている部分) が、時刻 0:00:52 にトリガーが入力されたことを示している。(b) より、視線データには、“Events” 列に“start_recoding 2018-11-28 15:22:17.708589”, “stimuli 2018-11-28 15:22:17.719993” が記録されている。“start_recoding...” は、視線の計測を開始したことを示すトリガーで、“stimuli...” は脳波データと同じタイミングに入力された同期をとるトリガーを示している。また、後続に続く“...” は、各トリガーが入力された日付、時刻を示している。

採取された脳波と視線の CSV ファイルには、それぞれトリガーとして、PsychoPy 上のタスクが開始されると同時に、同期信号が入力されている。脳波計測装置と視線計測装置の計測周期はそれぞれ、256Hz と 300Hz と、異なる周期であるが、タスク提示時刻及び提示時間と同期がとれているため、それぞれのタスクの開始時刻から 3 秒間に、各タスクに脳波と視線は対応付けされている。トリガーによって、1000 タスクそれぞれへ脳波の対応がとることができた。

hh:mm:ss	256 SPS	256 SPS	256 SPS	
TIME	Sensor-A:[A]	EEG (1:[B]	EEG (1	Events
0:00:00	9.534	-764.311	-1467.21	
0:00:00	3829.224	-3471.43	-6663.62	
0:00:00	10771.91	-6362.26	-12228.8	

⋮ 省略

0:00:52	11370.63	-8.313	-14.362	
0:00:52	11378.01	2.791	-8.773	
0:00:52	11384.38	11.323	-2.405	
0:00:52	11388.9	16.616	9.688	
0:00:52	11384.6	19.454	21.514	Light Trigger
0:00:52	11378.19	19.139	26.515	
0:00:52	11374.88	14.939	28.277	
0:00:52	11374.3	8.73	32.226	

(a) 脳波データ トリガー入力

GazePointY	Event
nan	start_recoding 2018-11-28 15:22:17.708589
0.0725	
-1.6873	stimuli 2018-11-28 15:22:17.719993
0.2198	
nan	
0.21	
0.1302	

(b) 視線データ トリガー入力

図 14 CSV ファイル中のトリガー入力

6.3 実験環境の改善

試験運用実験の結果より，実験環境を用いることで1名の被験者のみのデータながらERPに類似した波形が得られた．また，視線と脳波の同期も確認できたことから，利用可能な実験環境が構築できたと考えられる．実験環境の改善案として，計測可能な脳波のチャンネル数を増やすことがあげられる．より多くのチャンネル数で計測を行うことで，デバッグに必要な脳活動部位をより局所的に調べることができ，時刻別に活発になる脳活動部位を調査できる．ERPの計測では多量の脳波データを計測することから，計測した脳波を各タスクに対応付けて，自動で分割し，所望のグルーピングを行う分析プログラムを作成することも重要である．また，加算平均するまでの脳波データの下処理には，複数の出力ファイルを参照し手作業で，タスクと脳波の対応を付けをしたため，多大な時間と労力を消費した．今後，データ数が増えることを見越して，各機器から出力されるCSVファイルの内容を改良する必要がある．さらに，計測した脳波を各タスクに対応付けて，自動で分割し，所望のグルーピングを行う分析プログラムを作成することが実現できると分析はより容易になる．

7 おわりに

本研究では、デバッグにおけるプログラムの行動を理解するための第1歩として、if文に利用される条件式が真か偽か判断しているときのプログラムの脳波と視線を同時に計測する環境を構築した。

構築した環境は、タスク提示と各計測装置間で同期がとることができ、被験者の視線、脳波はCSVファイルに出力されていることが確認できた。構築した環境で、被験者1人に協力してもらい、計測を試みた。

計測の結果、ERPとよく似た波形が得られ、さらに、出力波形をERPと仮定して分析すると、Cz-Pz間、真-偽間で有意差が確認できた。被験者に3秒周期で画面に提示される条件式の成立が真か偽かを判断してもらい、手元のボタンで回答してもらった。ERPは筋肉そのものの動きや動かそうとする脳内の思考がノイズとなり、埋もれてしまうため、被験者への指示を、タスク表示中の1.5秒は脳内で条件式の成立が真か偽かを判断するフェーズと、ブレイク中に指を動かしてボタンで回答してもらったフェーズに分離したため、結果としてERPらしき概形の脳波を得ることができた。

今後の発展として、被験者数及び取得サンプル数を増やし、ERPが表れるか確認するとともに複数の電極を用いて脳波を計測し、より多くの脳部位のERPを検証することがあげられる。分析の詳細化として、ERPのピークの大きさや出現時刻等の特徴の原因を追究するために、より詳細なグルーピングを行い群間で比較することが望ましい。より詳細な分析の例として、正答・誤答間、左辺が右辺より小さい(大きい)、または等しいなどのある一定の基準を設け群間比較することが挙げられる。このような詳細な分析は、プログラマが感覚や経験に基づいてデバッグをする主観的な認知活動について、有用な知見が得られると考えている。また、脳波と同時計測した視線データについて分析を行い、2つのデータを組み合わせた考察を行うことも重要である。

謝辞

本論文の執筆および研究をすすめるにあたり，多くの方々に協力して頂きました．本研究の初期段階から，手厚く，たくさんのご指導ご鞭撻をしてくださった奈良先端科学技術大学院大学の久保孝富准教授，畑秀明助教，幾谷吉晴さんにはとても感謝しています．指導教員の上野准教授には，研究の知識やアドバイス，発表練習など様々な面でご指導をいただきました．岩田講師には査読教員として多くの指摘をいただきました．本研究に協力していただいた皆様，ありがとうございます．

参考文献

- [1] 入野宏, 堀忠雄: "心理学研究における事象関連電位 (ERP) の利用", 広島大学総合科学部紀要4理系編, Vol.26, pp.15-31(2000).
- [2] 後藤紀美子, 打尾健太, 北崎充晃, 中内茂樹, "オドホール課題における視覚刺激の不自然さが事象関連電位に与える影響", 信学技報, Vol.106, No.407, pp.19-24(2006).
- [3] 上野秀剛, 中村匡秀, 門田暁人, 松本健一: "プログラムの視線を用いたコードレビュー性能の要因分析", ソフトウェア工学の基礎 XIII, pp.103-112(2006).
- [4] 水野(松本)由子, 田中康仁, 林拓世, 岡本永佳, 西村治彦, 稲田紘: "精神作業負荷時における作業環境と関連した脳波・静脈の定量解析", 生体医工学, Vol.48, No.1, pp.11-24(2010).
- [5] 山本愛子: "脳波によるプログラム解法の見当がついた状態の識別", 奈良工業高等専門学校卒業論文(2016).
- [6] 上野秀剛, 石田響子, 松田侑子, 福嶋祥太, 中道上, 大平雅雄, 松本健一, 岡田保紀: "脳波を利用したソフトウェアユーザビリティの評価—異なるバージョン間における周波数成分の比較", ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.233-242(2008)
- [7] 奥村祥太: "事象関連電位による開発者が感じる違和感の推定", 奈良工業高等専門学校卒業論文(2015).
- [8] Siegmund, J., Kanster, K., Apel, S., Parnin, C., Bethmann, A., Leich, T., Saake, G., Brechmann, A. : "Understanding Understanding Source Code with Functional Magnetic Resonance Imaging Proceeding", Proceedings of the International Conference on Software Engineering(ICSE), pp.378-389(2014).
- [9] 高木啓伸: "視線の移動パターンに基づくユーザの迷いの検出—効率的な作業支援を目指して", 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.5(2000).
- [10] Randy Stein, Susan E. Brennan : "Another Person's Gaze as a Cue in Solving Programming Problems", In Proceedings of The 6th International Conference on Multimodal Interface, pp. 9-15(2004).
- [11] 應治沙織, 上野秀剛: "レビュー開始時における対象物の比較指示によるバグ発見率の向上", 信学技報, Vol.114, No.441, pp. 57-62(2015).
- [12] 宮本靖貴, "視線と脳波の同時計測によるバグ発見時の事象関連電位発生の検証", 奈良工業高等専門学校卒業論文(2016), 参照 pp.5-8.

- [13] 満倉靖恵:”脳はウソをつかない-脳波で判るあなたの真実-”, 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol.118, No.4, pp. 461-465(2015).
- [14] 堀忠雄:”整理心理学-人間の行動を生理指標で測る-”, 培風館(2008).
- [15] 宮田洋, 藤澤清, 柿木昇治, 山崎勝男:”新生理心理学-生理心理学の基礎-”, 北大路書房(1998).
- [16] 横田悠右:”脳波を用いた知覚・認知情報の抽出に関する研究”, 豊橋技術科学大学博士論文(2013).
- [17] 大石衡:”聴解析器の再分析処理を統率する原理について”, 認知科学, Vol.13, No.4(2006).
- [18] MANUEL MARTI´ N-LOECHES, PILAR CASADO, RAQUEL GONZALO,LIDIA DE HERAS, and CARLOS FERNA´ NDEZ-FRI´ AS,”Brain potentials to mathematical syntax problems” ,Psychophysiology, 43 (2006), 579–591. Blackwell Publishing Inc. Printed in the USA. Copyright r 2006 Society for Psychophysiological Research.