



---

# 卒業研究報告書

平成28年度

---

研究題目

視線と脳波の同時計測によるバグ発見時の事象  
関連電位発生を検証

---

指導教員 上野秀剛 講師

---

氏名 宮本靖貴

---

平成29年2月16日 提出

奈良工業高等専門学校 情報工学科

# 視線と脳波の同時計測によるバグ発見時の 事象関連電位発生を検証

上野研究室 宮本 靖貴

ソフトウェア開発工程において、より効率的で正確な開発を行うための手法の研究が多数行われている。ソースコード中に含まれるバグの発見手法もその1つであり、どのようにすれば効率良くバグが発見できるのかがわかれば、ソフトウェア開発支援に利用できると考えられる。そこで本研究では、バグ発見時のプログラムの行動を把握するための第一歩として、脳波 (EEG:Electroencephalogram) の特徴の1つである事象関連電位 (ERP:Event-Related Potential) がバグ発見時に発生するかを検証する。ERPは不自然なことや特異なことに気づいた時や、目的のものを発見した際の脳波の変化であり、認知科学や脳科学の分野の研究で用いられている。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が現れるのではないかと考えられる。検証実験では被験者にバグを混入したプログラムを提示し、バグ探索中の脳波を計測した。また、コードのバグのある箇所を読んでいるときの脳波を特定できるようにするため、視線情報も同時に計測した。脳波情報と視線情報を重ね、バグ発見の瞬間を特定し、事象関連電位が発生しているかを確認した。実験の結果、事象関連電位の発生は確認できなかった。視線情報により、バグ発見時のスイッチを押すまでの行動に違いがあることが確認できた。バグに気づいた後、再度確認を行うためにバグ行を見続けて押す場合や、バグに気づいた後すぐに押す場合などである。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>関連研究</b>	<b>3</b>
2.1	脳波 . . . . .	3
2.2	視線 . . . . .	3
<b>3</b>	<b>脳波と視線</b>	<b>5</b>
3.1	脳波 . . . . .	5
3.1.1	計測方法 . . . . .	5
3.1.2	事象関連電位 . . . . .	6
3.2	視線 . . . . .	7
<b>4</b>	<b>実験</b>	<b>9</b>
4.1	実験環境 . . . . .	9
4.1.1	ハードウェア . . . . .	9
4.1.2	ソフトウェア . . . . .	10
4.2	タスク . . . . .	12
4.3	手順 . . . . .	13
4.4	分析 . . . . .	14
<b>5</b>	<b>結果と考察</b>	<b>15</b>
5.1	実験中の脳波 . . . . .	15
5.2	実験中の視線 . . . . .	16
5.3	実験環境の改善 . . . . .	18
<b>6</b>	<b>おわりに</b>	<b>19</b>
	<b>謝辞</b>	<b>20</b>
	<b>参考文献</b>	<b>21</b>

# 1 はじめに

現在の社会ではあらゆる場所でソフトウェアが使われており、ソフトウェアなしでは成り立たない社会となっている。ソフトウェアは多くのプログラマが日々開発を行っており、効率よく正確な開発を行うことが必要となっている。ソフトウェア開発のためにはプログラミングが必要不可欠であるが、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り、この発見作業のために開発効率が低下することがある。バグ発見の手法はプログラマによって大きく異なると考えられ、エラーからバグのありそうな箇所を特定し即座に発見するプログラマも居れば、当て推量でソースコードを読み、なかなかバグを発見できないプログラマも一定数存在する。バグを早く発見するプログラマがどのような考えに基づいてソースコードを読み、バグを発見しているのかが把握できれば、バグ発見の効率的な手法が提案できる。この手法により、どのようなプログラマでもバグ発見を効率的に行うことができ、ソフトウェア開発のコスト削減につながると考えられる。

本研究では、バグ発見時のプログラマの行動を把握するための第一歩として、バグ発見時に脳波 (EEG:Electroencephalogram) の特徴の一つである事象関連電位 (ERP:Event-Related Potential) が発生するかを検証する。プログラマによるバグ発見とは、プログラマがソースコード中の文法・論理的な誤り、仕様との不一致に気づくことである。ERPは不自然なことや特異なことに気づいた時や、目的のものを発見した際の脳波の変化である [4]。人が不自然な写真や絵などを見た際のERPに関する研究が、認知科学や脳科学の分野では行われている [8]。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が現れるのではないかと考えられる。バグ発見時を特定するのにERPが利用できることがわかれば、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、バグ探索時の被験者の脳波を計測すると同時に、視線計測装置によってバグ探索時の視線情報も計測する。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 [15]。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と考えた行）を見ていると考えられる。視線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。

以下、2章では関連研究について説明し、3章で脳波と視線について紹介する。4章で詳しい実験方法について述べ、5で結果とそれに対する考察を示し、6章で結論を述べる。

## 2 関連研究

### 2.1 脳波

人の脳活動を非侵襲で簡単に測定する手法として、脳波(EEG:Electroencephalogram)がさまざま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測し、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 [7]。また、横田は、不自然な聴覚・視覚刺激が脳波に与える影響を調査し、ガンマ帯活動が不自然さを抽出する新たな指標として利用できることを明らかにしている [5]。

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  $\alpha$  波が増加し、見当がつかなかったときは  $\alpha$  波と  $\beta$  波の比が増加したことを確かめ、プログラムの解法の見当がついているかを脳波によって判断できることを検証している [1]。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 [2]。

また、脳波の特徴の一つであるERPに関する研究も数多く行われている。後藤らは、視覚情報として入力された画像の自然さの指標の抽出に、ERPが利用できることを示している [8]。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 [3]。

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わかる。特に、ソフトウェア工学の分野においては、プログラムの難易度や理解にかかる作業負荷を定量化するために、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いう試みが多数ある。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ほとんど行われていない。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時や、目的のものを発見した際の脳波の変化であるERPが、バグ発見時に発生するかを検証する。脳波を利用する利点としては、認知活動の研究に用いられる他の計測方法と比べて手軽で低コストであることが挙げられる。例えばfMRIなどであるが、巨大で高価な装置を用い、被験者を長時間拘束する必要がある [6]。

### 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パターンを

発見し、このパターンが検出される時にユーザが確かに迷っていることを明らかにした[11].

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。Steinらは、デバッグ開始時に他の開発者の視線移動を見た被験者が、視線移動を見なかった被験者よりも早くバグを発見できることを示した[9]. 應治らは、レビュー開始時に見るべき点を指示することでプログラムの流れ確認作業を促し、バグ発見率を向上させることを示した[10].

上記のように、視線情報は人間の文章読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においては、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[9][10]. 先行研究から、視線移動によりプログラム読解箇所を特定することが可能であると明らかになっている。そこで本研究では、バグ探索中にコードのどこを見ているかを特定し、脳波のERP発生時刻を特定しやすくするために視線移動を計測する。

## 3 脳波と視線

### 3.1 脳波

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 [4]。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。

- $\delta$  波 (0.5~8Hz)
- $\theta$  波 (4~8Hz)
- $\alpha$  波 (8~13Hz)
- $\beta$  波 (13~20Hz)
- $\gamma$  波 (30Hz 以上)

$\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  波は減少して、 $\beta$  波が出現する。睡眠状態に移行すると  $\delta$  波や  $\theta$  波が出現し、これらは周波数が低いため徐波と呼ばれる [4][12][16]。

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 [17]。

#### 3.1.1 計測方法

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 [4] が広く使用されている [12]。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 [1][17]。

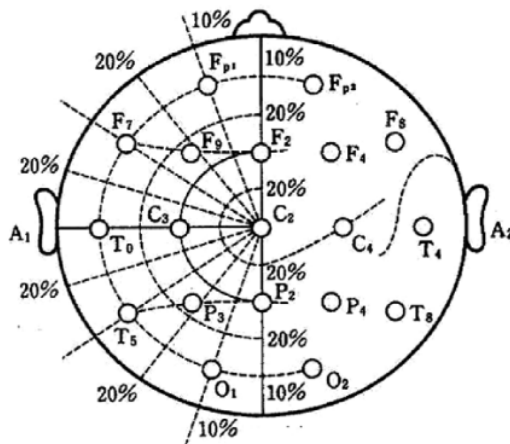


図1 国際式10-20電極配置法

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 [1][16].

### 3.1.2 事象関連電位

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]. 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。



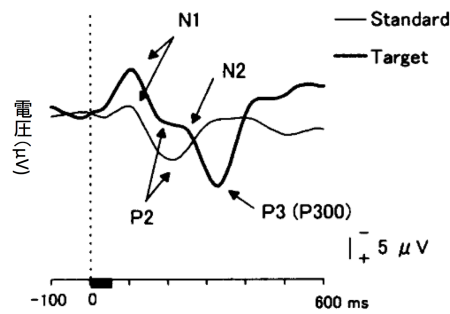


図2 事象関連電位 ([4] を元に筆者が加筆)

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 [16][17]。

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 [1][2][5]。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 [14]。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 [3]。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

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 [9][10].

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 実験

バグを混入したプログラムを提示したときのバグ探索中の脳波と視線を計測する。被験者は奈良工業高等専門学校(NTT)の学生10人で、年齢は17歳から20歳、全員がJavaによるプログラミングの基礎講義を受講済みである。

### 4.1 実験環境

実験は被験者1名と実験者2名のみが居る静かな部屋で実施する。体動によるアーチファクトを抑えるために、肘掛け・足置きを備えた椅子に座り、頭部と体をできるだけ動かさないように指示する。脳波計測にはナノテックイメージ社製 NeXuS-10 MARKII と対応ソフトウェア BioTrace+ Software を用いる。視線計測には nac Image Technology 社製非接触アイマークレコーダ EMR-AT Basic+ と制御用ソフト EMR-AT Basic+、コードレビュー実験用ソフトウェア Crescent (Code Review Evaluation System by Capturing Eye movemeNT)[15] を用いる。NeXuS-10 MARKII と EMR-AT Basic+ を被験者に取り付け、バグ探索中の脳波と視線を同時計測する。

#### 4.1.1 ハードウェア

脳波計測に用いるハードウェアは、ナノテックイメージ社製 NeXuS-10 MARKII とデータ出力用のノートPC1台である。

NeXuS-10 MARKII 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。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。データ出力用のノートPCは、Windows7 Intel(R) Core(TM)i5-3380M 2.90GHz でメモリ搭載量は4GB である。図3に装置の外観と装着時の様子、出力用PCとの接続の様子を示す。



[1] 装置の外観



[2] 装着時の様子



[3] 出力用PCとの接続の様子

図3 脳波計測用装置

視線計測に用いるハードウェアは、nac Image Technology 社製非接触アイマークレコーダ EMR-AT Basic+ と被験者へのタスク提示用PC、視線計測用PCである。EMR-AT Basic+ は非接触型の視線計測装置であるため、被験者にかかる負担を軽減す

ることができる。EMR-AT Basic+と連動したスイッチも用意し、バグ発見時に押しってもらうことでバグ発見時刻を特定しやすくする。タスク提示用PCの液晶ディスプレイ (EIZO FlexscanS1721) は解像度 1024 × 768 で使用した。視線計測用PCはWindowsXP Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E4600 @2.40GHz, タスク提示用PCはWindows7 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E7400 @2.8GHzである。図4に装置の外観と出力用PCとの接続の様子を示す。



[1] 装置の外観



[2] 出力用PCとの接続の様子

図4 視線計測用装置

#### 4.1.2 ソフトウェア

脳波計測に用いるソフトウェアは、NeXuS-10 MARKIIに対応したソフトウェアであるBioTrace+ Softwareである。BluetoothによってNeXuS-10 MARKIIから脳波データをリアルタイムで受信し、記録する。csvファイル形式で記録した脳波を出力でき、出力前に様々なフィルタをかけることも可能である。図5は計測時の動作画面である。上半分が脳波の生データであり、リアルタイムで現在の脳波が映し出される。左下のSTART, 右下のENDボタンは課題の開始・終了時を記録するためのボタンで、出力されるcsvデータに「Start」または「End」が記録される仕組みになっている。

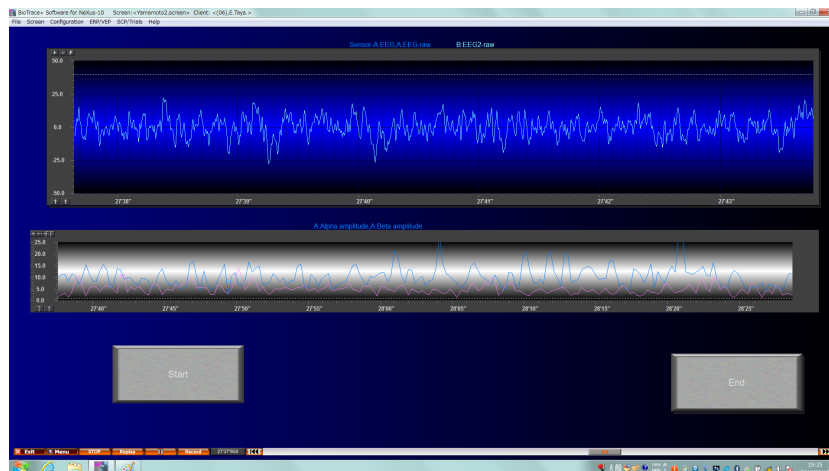


図 5 BioTrace+ Software 動作画面

視線計測に用いるソフトウェアは、EMR-AT Basic+制御用ソフトとコードレビュー実験用ソフトウェアCrescent (Code Review Evaluation System by Capturing Eye movemeNT) である。EMR-AT Basic+制御用ソフトの動作画面を図6に示す。制御用ソフトはEMR-AT Basic+から視線移動データを受信し、ファイルに保存する。CrescentはEMR-AT Basic+が測定した視線データを行単位のデータに変換するツールである。記録開始時と終了時にEMR-AT Basic+にリセット信号を送信することで、被験者のバグ探索時の視線移動を計測する。バグ発見の対象となるソースコードも表示する。Crescentの動作画面を図7に示す。計測後は測定された視線移動情報を図8のようにソースコードと並列させてバーチャートで表示する。時系列での視線移動情報をcsvファイルとして出力する。

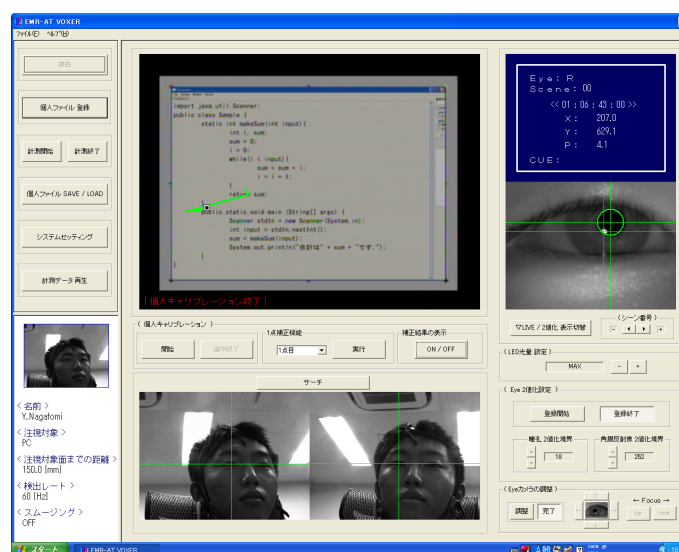


図 6 制御用ソフト動作画面

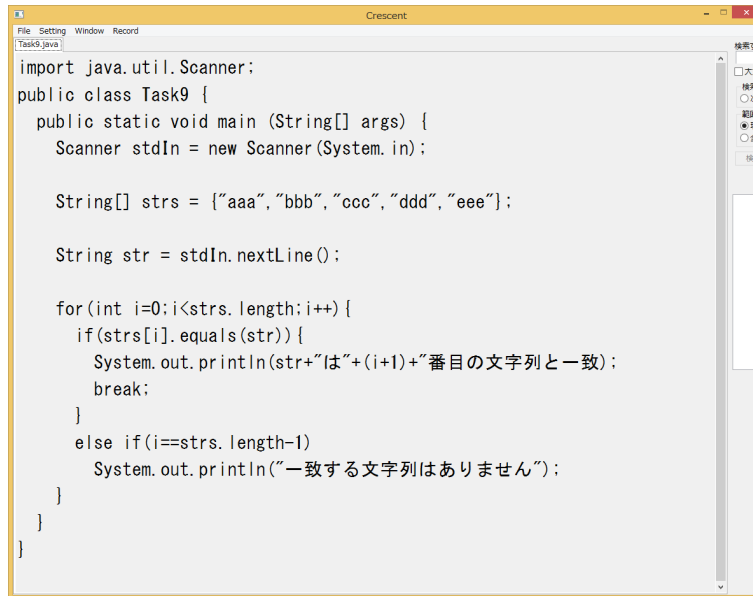


図 7 Crescent 動作画面

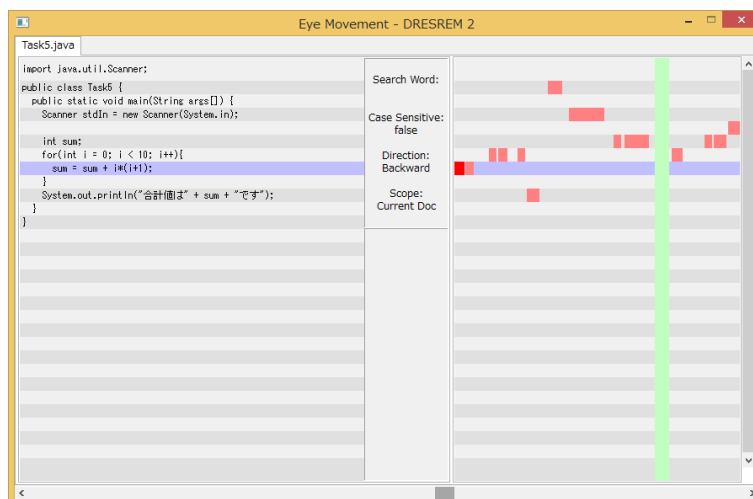


図 8 Crescent 結果画面

## 4.2 タスク

実験で被験者に課すタスクについて説明する。ERPの検出に十分な脳波数を確保するため、被験者1人につき15問のプログラムを与えた。本学のプログラミングの基礎講義で用いられている言語がJavaであるので、タスクはJavaを用いて作成した。バグは1つのタスクに1つだけ含まれるように設定し、バグ探索の時間は1タスク2分とした。プログラムの仕様を印刷したものをバグ探索開始前に被験者に提示し、プログラムはCrescentで表示した。タスクの内容は、そのタスク

を初めて見た被験者でも、その場でコードを読めば理解できるものにした。特定のアルゴリズムや数学の知識が必要となるタスクは、知識の有無や数式操作をプログラムに落とし込めるかの問題となり、プログラムを理解できない可能性があるためである。バグは論理系、文法系、データ系の3種類に分類し、種類によるERPの発生を違いを検証できるようにした。15種類のタスク・バグ内容を表1に示す。

表1 タスク・バグ内容

	仕様	バグ
1	入力整数の最大値と最小値の和の算出	数値の文字列連結
2	入力整数の平均値の実数での算出	キャストし忘れ
3	九九の表の出力	for文の終了条件間違い
4	インスタンス生成・変数参照	引数の順番違い
5	1から10までの隣接する数の積の和の算出	変数の初期化忘れ
6	インスタンス生成・2クラス的一致確認	クラスの=での比較
7	入力自然数に一致する数の検索	変数の有効範囲
8	3つの整数の中央値の算出	if文の括弧忘れ
9	入力文字列に一致する文字列の検索	ダブルクォーテーション忘れ
10	配列の要素を逆順にする	カンマとコロンの間違い
11	入力整数の素数判定	判定条件の反転
12	入力した月の季節を表示する	ORをANDとしている
13	入力整数の総和の2桁以上かの判定	if文の条件不足
14	入力文字列に一致する文字列の検索	到達不能コード
15	*で三角形を描く	while文の波括弧忘れ

### 4.3 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 MARKIIと、視線計測装置EMR-AT Basic+を被験者に装着し、設定する。視線計測装置装着後の顔面位置の変動を避けるため、脳波装置を先に取り付ける。

#### 3. 練習問題

1タスクの流れを被験者に確認してもらうために、練習問題を解いてもらう。

#### 4. タスクの実施

ディスプレイにタスクを2分間表示し、バグを探してもらう。

#### 5. バグの解答

バグ発見次第スイッチを押してもらい、バグ内容を口述してもらい、2分以内にバグを発見できなかった場合は、次のタスクに移る。

#### 6. 全タスクの実施

手順4, 5を15回繰り返す。

### 4.4 分析

実験で計測した脳波データを、バグを見つけられたものとバグを見つけられなかったものに分類する。本研究ではバグ発見時の脳波変化を計測するため、見つけたバグが予め混入したバグでない場合もバグを見つけられたものとして分類する。Crescentから出力されるタスク中の視線移動情報に含まれるバグ発見時刻を基準とし、そこから前10秒分を各タスクの脳波データから切り取る。全被験者分の切り取り後のデータを加算平均し、バグ発見時刻の前に自称関連電位が発生しているかを確認する。通常、ERPはタスク提示時に時刻をそろえて加算平均することで発生時刻が重なり、明瞭な電位の変化が得られる。しかし、バグに気づいた瞬間からスイッチを押すまでは個人差があると考えられ、バグ発見時にそろえるとタスクごとにERPの発生時刻がずれると予想される。したがって、オドボール課題 [3][8] のような明瞭な電位の変化は得られないと考えられる。しかし、ERPがずれて重なるため、大きな電位の変化は得られないにしても、その部分の電位が全体的に正の方向に膨らむと考えられる。バグ探索時の視線移動情報もグラフ化し、バグ発見時に予め混入したバグ付近を見ているかを確認する。



## 5 結果と考察

### 5.1 実験中の脳波

計測した脳波データの例を図9に示す。

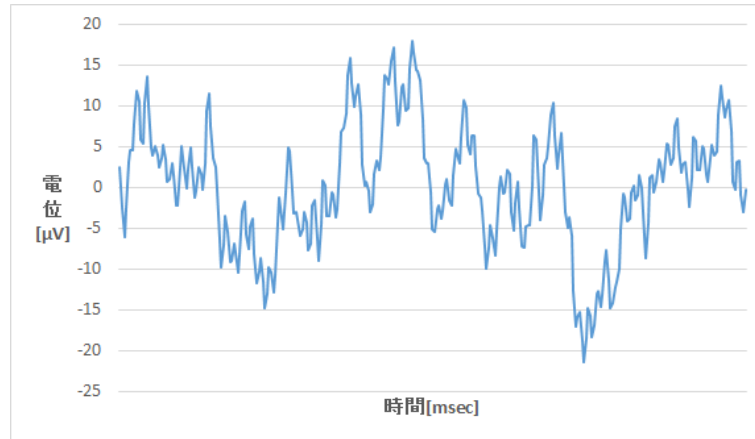


図9 計測した脳波データの例

全被験者分のタスクについて、視線移動情報に含まれるバグ発見時刻から前10秒分を各タスクの脳波データから切り取り、加算平均した脳波を図10に示す。ERPは電位が正の方向に膨らむため、負の電位は雑音となり得る可能性がある。したがって、脳波データの正の値のみを加算した。バグを見つけられなかったタスク、視線移動情報からバグ発見時刻を特定できなかったタスクは加算平均に加えていない。加算平均のタスク数は73である。

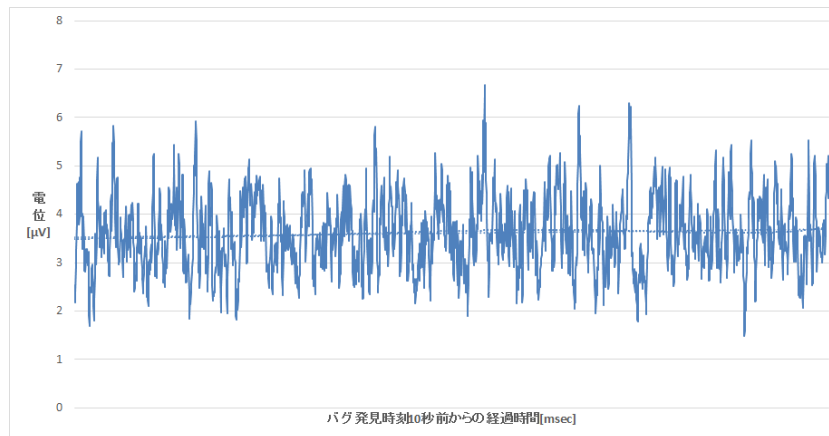


図10 全タスクのバグ発見時10秒前の加算平均

図10を見る限りでは、電位が全体的に正の方向に膨らんでいるような箇所は見当たらない。点線は6次の多項式近似であるが、全体的に変化が無い。ERPは検出することができなかったと言える。

被験者間やタスク間で、バグを発見した際にスイッチを押すタイミングに差があったことが、ERPが検出されなかった原因として考えられる。スイッチを押すタイミングの差とは、バグに気づいた瞬間すぐにスイッチを押す場合や、気づいた後に本当にバグかどうかを再度確認してからスイッチを押す場合などのことである。これによりタスク間でERP発生時刻の大幅なずれが生じ、加算平均をしても電位の膨らみが出来なかったと考えられる。バグを見つけるソースコードが1行であり、混入されたバグが文法エラーのような単純なバグであれば、被験者間のバグに気づくタイミングに大きなずれは生じなかったと予想できる。しかし、今回は12行~20行のプログラムを用い、バグに関しても文法エラーだけでなく、論理的なバグやデータ処理のバグも埋め込んだため、プログラム全体を理解してバグを探す必要があり、被験者間やタスク間でバグ発見時のスイッチを押す行動が異なると考えられる。被験者を数人にし、各人に多くのタスクを行ってもらえば、バグ発見時の反応が同じであるため、ERPが検出しやすくなると考えられるが、被験者の負担が大きくなるため現実的ではない。

このことも考慮し、加算平均ではERPの検出が行えなかったため、別の分析方法を検討する必要がある。ここで、スペクトル解析が考えられる。スペクトル解析とは、様々な周波数成分から構成されている波形から、周波数ごとの強さを求める処理である。スペクトル解析を行うことで、計測した脳波データにどの周波数成分がどのくらい含まれているのかを確認することができる。脳波には本来の脳波データ以外に雑音が含まれているが、一般的に雑音の周波数は高いため、スペクトル解析によって検出された周波数の高い成分を除去すると、脳波データのみが抽出できる。このような方法は脳波分析を必要とする研究でしばしば用いられている。スペクトル解析を利用した本実験に適切な分析方法を述べる。まず、各被験者の全タスクのスペクトル解析を行い、各スペクトルの平均を求める。その後、求めた平均を各タスクのスペクトルから引けば、全タスクに共通する脳波成分が除去され、その人特有の波が現れると考えられる。この特有の波はERPが発生したことでもたらされていると考えられるため、この方法でERPが検出できると予想できる。

## 5.2 実験中の視線

同じ被験者のバグ探索中の視線移動を図11, 12に示す。

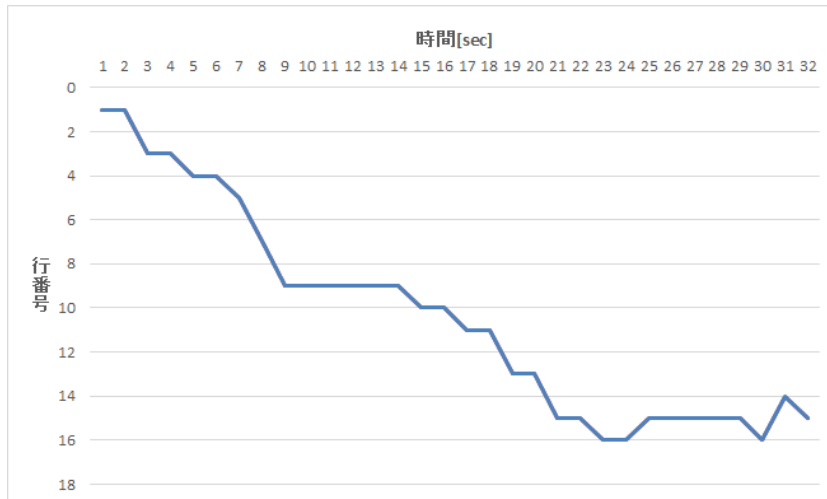


図 11 バグ探索中の視線(1)

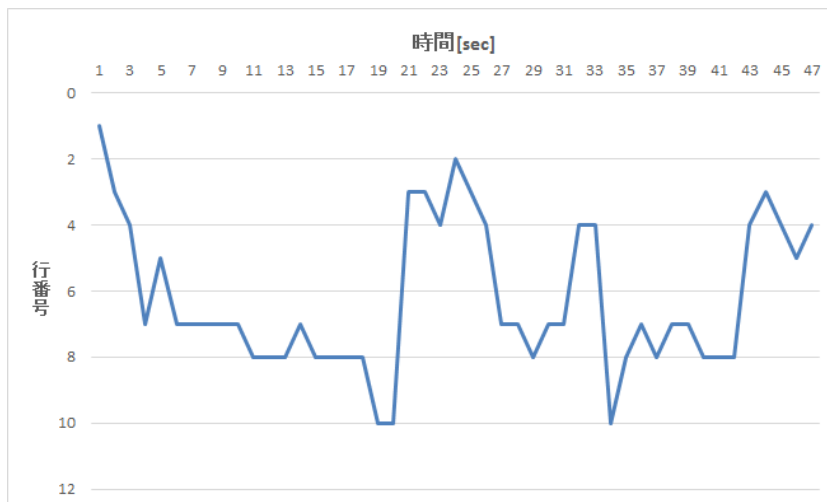


図 12 バグ探索中の視線(2)

両図とも横軸はタスクを提示してからバグを発見するまでの時間，縦軸は行番号を表している．図11のタスクには15行目に，図12のタスクには6行目にバグを混入させている．図11では，ソースコードを上から順に読み，バグのある15行目付近を10秒程度見続けていることがわかる．22秒付近でバグに気づいたが，そのバグで本当に出力結果が異なるのかなどを再度確認し，その後スイッチを押したと考えられる．図12では，一度ソースコード全体を読み，バグが見当たらなかったため，再び上から読んでいた様子が見える．その後何度かソースコードを繰り返し読み，6行目にバグがあることに気づきすぐにスイッチを押したと考えられる．

以上のように，バグに気づいた際に，バグのある行をずっと見続けてからスイッ

チを押した場合なのか、バグのある行を見た瞬間にスイッチを押した場合なのか  
が視線情報からわかる。前節において、被験者のスイッチを押すタイミングが異  
なることがERPが検出されなかった原因と述べたが、視線移動情報によりこのこ  
とが明確にわかる。

### 5.3 実験環境の改善

実験環境についていくつかの改善点が挙げられる。今回使用したプログラムの  
の長さは12行~20行であり、事前に埋め込んだ一つのバグを見つけるというタス  
クであった。また、バグの種類も、文法エラーだけではなく、プログラム全体を理  
解する必要のある論理的なバグやデータ処理のバグも埋め込んだ。被験者がバ  
グだと思った後に、そのバグが本当に結果が仕様と異なる原因となるものか、も  
しくはコンパイルエラーとなるのかを再度確認するという動作が行われること  
が視線移動により明らかになっている。実験では、「バグ発見時にスイッチを押す」  
という指示をしたが、バグに気づいた瞬間なのか、確認動作を行った後なのか  
が明確にされていなかった。このため、被験者が気づいた瞬間にスイッチを押さず、  
分析時にERP発生点のずれが生じ、検出できなかつたと考えられる。よって、バグ  
に気づいた瞬間（コードに違和感を感じた瞬間）にスイッチを押すように指示す  
れば、ERP発生点がずれず、検出が可能だと考えられる。

プログラムの長さやバグの種類に関しても改善すべき点がある。12行~20行の  
プログラムでは、バグを探す範囲が広く、被験者があらゆる部分をバグと疑って  
見る必要がある。これにより、上で述べたようなバグ発見時の確認動作が行われ  
ると考えられる。よって、プログラムをより短くし、被験者がバグを探す範囲を  
狭めるべきである。実際の開発環境では、統合開発環境のエラー表示によってあ  
る程度範囲を絞ってバグがあるかどうかを見ていると考えられるため、短いプロ  
グラムを用いることは環境をより再現することにもなると考えられる。

## 6 おわりに

本研究では、バグ発見時のプログラムの行動を把握するための第一歩として、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) が発生するかを検証した。被験者にバグを含んだソースコードからバグを探してもらい、その間の脳波と視線移動を計測した。実験の結果、バグ発見時にERPは検出されなかった。被験者がバグに気づいた瞬間すぐにスイッチを押した場合や、気づいた瞬間から本当にバグかどうかを再度確認してからスイッチを押す場合などが考えられ、ERP発生時刻の大幅なずれが生じたことが原因と考えられる。ERPは微小な電位の変化であるため、加算平均を行うことで初めて出現する。したがって、タスクごとに発生している位相が異なると、雑音として処理されてしまい、電位の膨らみが出来ないことが考えられる。バグに気づいた際に、バグのある行をずっと見続けてからスイッチを押す場合や、バグのある行を見た瞬間にスイッチを押す場合があることは視線情報からも確認できた。バグのある行を見続けている場合は、バグ発見時刻以前の視線移動が数秒~10秒間バグのある行に留まっているが、バグのある行を見た瞬間にスイッチを押した場合は、バグ発見時刻の数秒前はバグのない行を見ている。

加算平均に代わるERPの検出方法として、スペクトル解析が考えられる。各被験者の全タスクのスペクトル解析を行い、各スペクトルの平均を求める。求めた平均をその被験者の各タスクから引けば、全タスクに共通する脳波成分が除去され、その人特有の波が現れると考えられる。この特有の波はERPが発生したことでもたらされていると考えられるため、この方法でERPが検出できると予想できる。

今後、スペクトル解析を用いた分析を行うとともに、被験者のバグに気づいた瞬間を特定する方法を見直すことで、バグ発見時のプログラムの行動を把握するのにERPを利用するためのより有用な知見が得られると考えられる。

## 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。指導教員の上野講師には、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。松村准教授には査読教員として多くの指摘をいただきました。ありがとうございました。また、被験者実験に協力してくださった10名の学生の皆様にも感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 入野野宏, 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).
- [5] 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).
- [6] Siegmund, J., Kanster, K., Apel, S., Parnin, C., Bethmann, A., Leich, T., Saake, G., Brechmann, A. :” Understanding UnderstandingSource Code with Functional Magnetic Resonance ImagingProceeding ”, Proceedings of the International Conference on Software Engineering (ICSE), pp.378-389(2014).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).

- [13] ミユキ技研:研究のための脳波の基礎知識・Web セミナー, 入手先  
|<http://www.miyuki-net.co.jp/jp/seminar/solveBrainfunc/solveBrainfunc.shtml>; (参照  
2017-01-31)
- [14] 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).
- [15] 上野秀剛, 中村匡秀, 門田暁人, 松本健一:”プログラマ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).
- [16] 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).
- [17] 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).