

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11394

研究課題名(和文) 脳波インタフェース構築のための随意性・不随意性眼球運動の脳波特徴量の特定

研究課題名(英文) Saccade-related EEG signals related to voluntary and involuntary eye movements for BCI

研究代表者

船瀬 新王 (Funase, Arao)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60378239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究成果は眼球運動に関連した脳波を明らかにするものである。特に、随意性眼球運動と不随意性眼球運動を運動の意志決定という観点から分類することができることを示唆している。運動の意志決定を必要とする眼球運動は随意性眼球運動であり、眼球運動直前の脳波変動に着目することにより分類可能であることを示した。この結果は眼球運動のみならず指の運動等の他の運動にも見ることができる結果であると考へており、運動の意志決定と脳波の関連性を明らかにする一端となる研究である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本結果は、随意性眼球運動を不随意性眼球運動を脳波から分類することが可能であることを示している。この事は他の運動においても同様に随意運動と不随意運動を脳波から分類できることを意味しており、この点を明らかにしたことは学術的な意味があると考えられる。さらには本結果より、自動車の脇見運転を警告するシステムに応用が可能であると考えられる。これは単純に眼球運動の状態を計測するだけではそれが意図した眼球運動が意図しない眼球運動かを明らかにすることはできない。本結果を使用することにより脇見運転防止システムのさらなる向上を図ることができると思われる。

研究成果の概要(英文)：Our research is to study relationship between EEG signals and saccadic eye movements. Especially, our results indicate it is possible to classify the voluntary eye movement and the involuntary eye movement from EEG signals. Our research focus on the motivation for movement in eye movements. When subject move their eyes with voluntary, subject has the motivation for movements.

This feature in voluntary eye movements is generated in finger movements. Therefore, our research results show relationship between EEG signals and decision making for movements.

研究分野：生体信号処理

キーワード：脳波 眼球運動 随意運動 不随意運動

1. 研究開始当初の背景

これまで多くの研究者たちが脳波を用いたインタフェースである脳波インタフェース (Brain Computer Interface) の研究を行ってきた。この脳波インタフェースの利点としては、「体を動かすことなしにコンピュータのマウスカーソル等を動かすことができる」と「運動の予測をすることができる」というものがある。

従来研究の脳波インタフェース研究においては特に「体を動かすことなしに」という点に着目しているものが数多く存在しており[1]、「運動の予測」という点に着目している研究は数少ない。そこで申請者はこれまで「運動の予測」という点において着目して研究を行っている。

「運動の予測」を行うためには、運動を実際に行う前に発生する何らかの信号を検知し、予測する必要がある。そこで脳内情報処理に関連する信号を計測することが重要となるが、簡便に記録することが可能であるものは脳波である。

また、「運動の予測」を行うためには、どのような運動を行うかが重要となる。従来手の運動や足の運動に着目した研究は多くあるが眼球運動の予測に着目した申請者が知る限りにおいては存在しない。また、眼球運動は他の運動に比較して脳神経科学の知見が多い。眼球運動の意図に関連する脳波の妥当性を論じるときにこの事は重要になると考えられる。また、実際に運動を行う前にはからならず外界の状況を視覚情報にて確認した後にはヒトは運動を行う。よって、眼球運動を予測することは手足の運動の予測精度を向上させる手がかりとなることも考えられる。

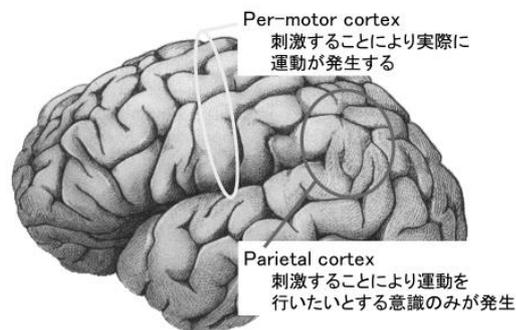


図1：運動の意志に関連する脳部位 ([3]より改変)

BP (Bereitschaftspotential)

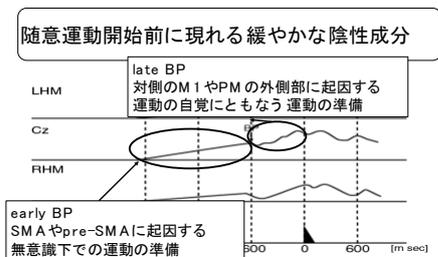


図2：運動準備電位のBP成分について

2. 研究の目的

申請者は、眼球運動を行う前の脳波を使用して、眼球運動を予測する研究をこれまで行ってきた[2]。本申請はこの従来研究を押し進め随意性眼球運動と不随意性眼球運動を脳波から予測することを目的とする。

眼球運動は、概要でも述べたが随意的な眼球運動と不随意的な眼球運動が存在している。

この、随意性運動と不随意性眼球運動を分離すると言うことは、運動の意図を抽出することと同等である。意図を持って行われる指の運動の知見はすでに存在している[3]。よって、この知見を元にするを考える。

運動の意図と実際の運動に関連する脳部位の違いに関する研究成果として、てんかん患者での脳への直接刺激実験から、前運動野を刺激すると「実際の指運動」が発生し、運動野より後ろにある頭頂葉付近に対して電気刺激を行うと「運動部位を特定しない運動を行いたいという意図」のみが発現するというものが存在する。(図1参照)

この研究より、「実際の運動に関連する脳部位」と「運動部位を特定しない運動の意図に関わる脳部位」が違っていることが明らかである。よって、運動意図のみに関連する計測部位と脳波波形を明らかにすることができるかと予想される。

さらに、手足の運動においては運動準備電位と呼ばれるものが明らかになっている[4]。この運動準備電位は、運動前の成分と運動後の成分に分かれるが、運動前の成分の前半部分を early BP、運動前の成分の後半部分を late BP と呼んでいる。この early BP は無意識下にて運動の準備を行うというヒトの意図に大きく関わる変動である(図2参照)。このような知見からも眼球運動に関連した運動準備電位において意図の抽出を行う事が十分可能であることが予測される。

本申請結果においては工学的には、安定性のある眼球運動予測システムを構築することができるということである。さらに本研究を押し進めることにより協見運転の警告システムの構築を行う事ができると考える。従来型の協見運転の警告システムは実際の協見運転を行った後に

警告を発している。しかしながら、眼球運動を予測することが可能となれば脇見運転を行う前に警告を発するシステムが構築可能となると考える。

脳科学的には、運動の動機づけが後頭頂葉にて行われているという従来結果を、複数運動を比較するという別の観点から示すことができるという点、運動の意図に関連する眼球運動関連電位を明らかにするという点において意義があると考えられる。

3. 研究の方法

眼球運動に関連する意図を脳波から抽出するためにまず以下のようなサブゴールを定め、本申請においては研究を行う。

特にここでは申請書で示したサブゴール(1)と(2)について述べる。

(1) 眼球運動の意図を明確化するために、[3]の知見から後頭頂葉付近に眼球運動の意図に関連する脳波が発生することを確認する。また、[3]の研究で使用している指の運動においても位置に関連する脳波が発生するかを明らかにする。

(2) 一般的な運動に関連する準備電位は、手足の自由運動時の脳波変動である。そこで、自由なタイミングにて行う眼球運動時の運動準備電位を確認する。また、Cued の眼球運動時の運動準備電位を確認する。この比較検討により、「運動を行う」という意図を抽出する。また、運動の種類に共通な成分と共通でない成分を明らかにし、脳波インタフェースに適切な脳波成分を特定する。

(1)と(2)を行うために以下のような実験を行う。

実験は暗室内で行い、被験者を暗室に設置した椅子に座らせる。刺激呈示用のディスプレイを被験者より正面 60[cm]の位置に設置する。ディスプレイ上には 3 つの十字状の固視点を表示する。中央の固視点と左右の固視点とのなす角度は被験者より 10[°]とする。脳波計測用の電極は Ag-AgCl 電極 (EASY CAP 社製) を 19 個使用し、国際 10-20 法に基づき配置する。接地電極として脳波用皿電極を被験者の額に配置する。基準電位は左耳耳朶に設置した A1 電極と右耳耳朶に設置した A2 電極の平均電位を使用する。また、右目の上下に 1 対、右こめかみと左こめかみに 1 対、合計 2 対の脳波用皿電極を配置し、2 電極間の差分導出を用いて眼電図 (EOG; Electrooculogram) を記録する。右目の上下に配置した電極は垂直方向の眼球運動を検出し、右こめかみと左こめかみに設置した電極は水平方向の眼球運動を検出するために使用する。

AC/DC アンプ (BrainAmp MR plus, BRAIN PRODUCTS 社製) を使用して脳波及び眼電図をサンプリング周波数 1000[Hz] で計測する。脳波および EOG の計測時においてはハードウェアフィルタとして、250[Hz] のハイカットフィルタ、0.016[Hz] のローカットフィルタ、60[Hz] のノッチフィルタを使用する。また、EOG の計測後にソフトウェアフィルタとして 0.3[Hz] のローカットフィルタ、30[Hz] のハイカットフィルタを使用する。

本稿では 6 名の健常者を対象とした。すべての被験者が正常な視力を持ち、ディスプレイ上の固視点や矢印刺激を認識することが可能である。実験においては GO 課題と GO/No-GO 課題の二種類の課題を設定した。これらの課題を記憶誘導性眼球運動に基づいて行う。記憶誘導性眼球運動実験は 3 つの Cue を用いて行う。Direction-Cue は矢印の形をした視覚刺激であり、運動の方向を示す。Go-Cue は色付きの視覚刺激であり、運動の実行開始を示す。Return-Cue は聴覚刺激であり、被験者が中央の固視点に視線を戻すことを示す。

実験の 1 試行の流れを以下に示す (図 3)。

- (1) 被験者はディスプレイ中央の固視点を注視する。
- (2) 中央の固視点上に 500[m sec]間 Direction-Cue が提示されるため、被験者は運動方向を記憶する。
- (3) インターバルの後に Go-Cue が提示される。GO 課題においては中央の固視点の色が常に青に変化する。被験者は Direction-Cue で示された方向の固視点に視線を移す。一方 GO/No-GO 課題においては、中央の固視点の色が青になると被験者は Direction-Cue で示された方向の固視点に視線を移すが、中央の固視点が赤になると被験者は視線を中央の固視点から動かさない。
- (4) Return-Cue が提示され、被験者は中央の固視点を注視する。

1.5~2.0[sec]のインターバルは、Direction-Cue 提示前と Direction-Cue 提示後に設置する。また、Go-Cue が提示された後には 1[sec]のインターバルを設置する。

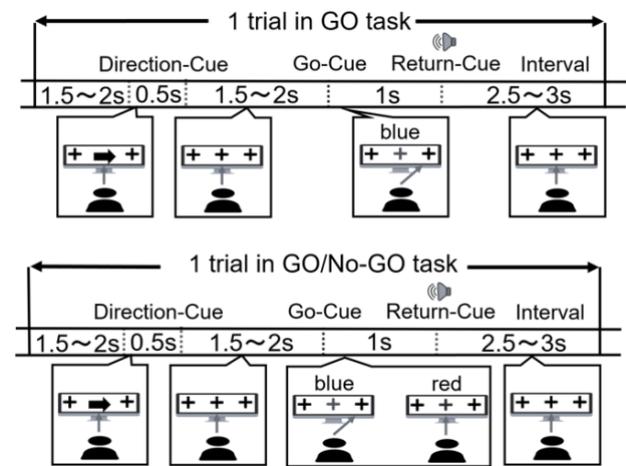


図 3 : GO 課題と GO/No-GO 課題の実験の 1 試行

GO 課題, GO/No-GO 課題ともに被験者は 100 回の試行を行う。左右の矢印を提示する試行はそれぞれ 50 回ずつとし, 方向予測が出来ないよう運動方向の呈示はランダムに行う。

本稿では, 計測された脳波の電位変動に着目する。先行研究[5]より, 運動の意思決定はヒトの脳の後頭頂葉で行われていると示唆されている。そこで, 後頭頂葉に対応する P3, P4, Pz 電極において計測された脳波に対して解析を行う。はじめに, 実験中に計測された脳波データにベースライン処理を行う。本稿ではベースラインの長さを 500[m sec]とする。次に, 2 課題において Go-Cue 呈示から眼球運動開始までの区間に計測された脳波データに対して加算平均を行う。加算平均は眼球運動開始時をオンセットとする。

その際, EOG を用いて加算平均を行う区間中に瞬目のノイズが含まれるデータを排除する。右眼の上下に設置した脳波用皿電極の差分導出より, $\pm 100[\mu V]$ を超えた時点を瞬目が生じていると判断する。また, Direction-Cue が呈示された方向に対して正しく衝動性眼球運動を行えていない試行は, 加算平均より除外する。

これらの上述の実験内容については眼球運動を主体に述べたが, 手を使用した際の脳波実験においては眼球を右へ動かす際には右手の指運動を, 眼球を左へ動かす際には左の指運動をボタンを使用して計測した。

4. 研究成果

本結果においては, 眼球運動を行った際の脳波のみ言及をする。

図 4 は GO 課題と GO/No-GO 課題において計測した脳波のうち, Pz 電極において計測した脳波を示したものである。図 2 に示した脳波は眼球運動開始時をオンセットとして全被験者・全試行で計測した電位を加算平均している。横軸は時間 [ms], 縦軸は電位 [μV] を示す。点線は GO 課題において計測した脳波を, 実線は GO/NO-GO 課題において計測した脳波を示しています。0[ms]は眼球運動開始時刻, 300[ms]付近の縦線は GO 課題および GO/No-GO 課題における Go-Cue 呈示の平均時間を示す。

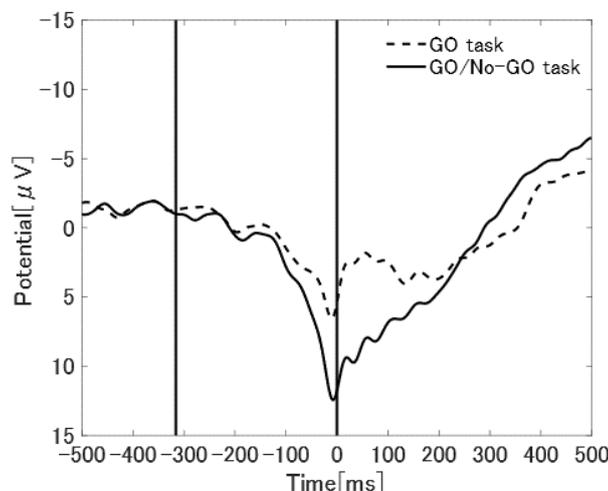


図 4: Pz 電極において計測した全被験者・全試行平均波形

図 4 は, 2 課題間で眼球運動開始直前に脳波の電位が上昇することを示した。また, このときの電位のピークは, GO 課題においては約 $6.5[\mu V]$, GO/No-GO 課題においては約 $12.5[\mu V]$ である。この特徴は P3, P4 電極においても同様に確認した。

図 4 より, P3, P4, Pz の各電極における GO/NO-GO 課題において計測される電位は, GO 課題よりも大きな値を示している。GO/NO-GO 課題において計測された電位上昇が GO 課題よりも大きいことを証明するために, 課題 (GO 課題 vs. GO/NO-GO 課題), 電極 (P3vs. Pzvs. P4), 各時間窓内の平均電位 (窓 1: $-350[\text{ms}]-301[\text{ms}]$ vs. 窓 2: $-300[\text{ms}]-251[\text{ms}]$ vs. 窓 3: $-250[\text{ms}]-201[\text{ms}]$ vs. 窓 4: $-200[\text{ms}]-151[\text{ms}]$ vs. 窓 5: $-150[\text{ms}]-101[\text{ms}]$ vs. 窓 6: $-100[\text{ms}]-51[\text{ms}]$ vs. 窓 7: $-50[\text{ms}]-1[\text{ms}]$) を要因とした三要因分散分析の後, グループ内およびグループ間でボンフェローニの多重比較検定を行った。三要因分散分析の結果を表 1 に示す。表 1 から, 主な差の要因はタスクと時間窓であることがわかる ($p < 0.001$)。電極には有意な差は確認されなかった。

続いて, 課題と時間窓に対してどのグループに属する電位が有意に異なるか示すためにボンフェローニの多重比較検定を行う。多重比較検定の結果を図 5 に示す。

縦軸は電位 [μV] を示してしており, 横軸は時間 [m sec] を示す。バーは各要因の組み合わせによる平均電位の 99%信頼区間を示している。図 3 より, $-100[\text{m sec}]$ から $-1[\text{m sec}]$ までの平均電位 (窓 6, 7) が他の時間窓の電位と有意に異なることを示している ($p < 0.01$)。この特徴は GO 課題と GO/No-GO 課題の両課題において確認した。また, 時間窓 5, 6, 7 における電位の平均値が二課題間で有意に異なることを確認した ($p < 0.001$)。

眼球運動直前に後頭頂葉において計測した脳波の平均電位は, 有意水準 1% で有意に上昇することを確認した。この特徴は GO 課題と GO/No-GO 課題の両課題において確認した。また, P3, P4, Pz 電極で計測した

表 1 三要因分散分析

要因	d.f	F value	P value
課題	1	242.23	0.0000
電極	2	1.25	0.2876
時間窓	6	430	0.0000
課題*電極	2	287.8	0.0112
課題*時間窓	6	2295.3	0.0000
電極*時間窓	12	1.42	0.1477

GO/No-GO 課題の平均電位は-150[m sec]~1[m sec]においてGO課題より有意水準1%で有意に高く上昇することを確認した。

本稿では、運動の意思決定を行うタイミングの異なる二課題において衝動性眼球運動の実行に関連する脳活動に着目した。GO課題において運動直前に行う脳活動は運動の準備に関連している。一方、GO/No-GO課題においては運動直前に行う脳活動は運動準備の他に運動の意思決定に関連している。したがって、眼球運動直前-150[m sec]~-1[m sec]において計測される脳波の電位上昇の課題間差異は運動の意思決定に関連することを示唆する。

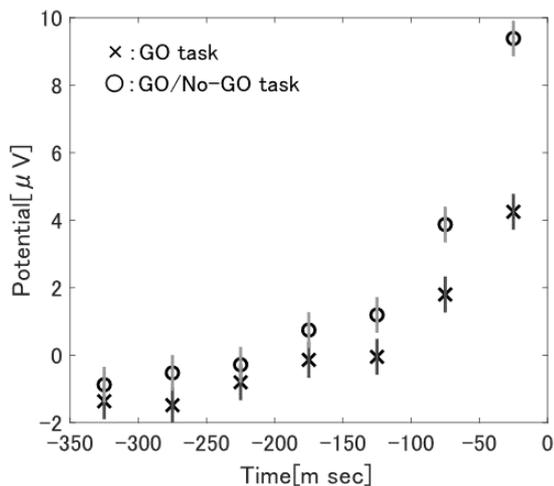


図5：課題および時間窓に対する多重比較検定

- [1] 船瀬新王, 八木透, 久野悦章, 大熊繁, 電気学会論文誌C, vol. 123, no. 1, pp. 93-99, 2003
- [2] S. Takagi, S. Takahashi, A. Funase, I. Takumi, Proceedings of Life Engineering Symposium 2016 (LE 2016), pp. 216-217, 2016
- [3] S. Takahashi, S. Takagi, A. Funase, I. Takumi, Proceedings of Life Engineering Symposium 2016 (LE 2016), pp. 218-219, 2016
- [4] 船瀬新王, A. K. Barros, A. Cichocki, 他, 生体医工学, vol. 41, no. 4, pp. 342-351, 2003
- [5] Ramakrishnan A. and Murthy A. : “Brain mechanisms controlling decision making and motor planning”, Progress in Brain Research, No. 202, pp. 321-345(2013)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 武田浩明, 福島裕介, 船瀬新王, 内匠逸	4. 巻 N/A
2. 論文標題 GO-NoGO課題時における後頭葉で観測される衝動性眼球運動に関連する脳波変動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会C部門大会予稿集	6. 最初と最後の頁 243-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鈴木柚子, 三木俊太郎, 船瀬新王, 内匠逸, 藤原清悦, 平田豊	4. 巻 55(9)
2. 論文標題 点滅視覚刺激の呈示時における金魚の視蓋神経細胞の追従性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 545-551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.545	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 横田和幸, 船瀬新王, 藤原清悦, 内匠逸	4. 巻 57(2-3)
2. 論文標題 ヒトを対象にした迷路課題の難易度を定量的に決定するパラメータの検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 生体医工学	6. 最初と最後の頁 57-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11239/jsmbe.57.58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 福島裕介, 船瀬新王, 内匠逸	4. 巻 1
2. 論文標題 衝動性眼球運動時の意思決定に起因する後頭頂葉で観測される脳波変動についての検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会C部門大会予稿集	6. 最初と最後の頁 74-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Fukushima, A. Funase, I. Takumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Study on relationship between negative ERPs caused by Go-Cue and decision-making of saccadic eye movement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018予稿集	6. 最初と最後の頁 25-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Nakamura, A. Funase, S. Fujiwara, I. Takumi	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Brief 12-18 Hz oscillation during LIGHT sleep after virtual spatial explore task	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2020	6. 最初と最後の頁 985-986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H, Takeda, A. Funase, I. Takumi	4. 巻 N/A
2. 論文標題 EEG signals related to the decision-making of saccadic eye movement in response to visual stimulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc of the ISET2020	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中村美登, 船瀬新王, 藤原清悦, 内匠逸	4. 巻 MBE-20-001-031
2. 論文標題 睡眠時に発生するスピンドルの個数が迷路課題に与える影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料 医用・生体工学研究会	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 武田浩明, 福島裕介, 船瀬新王, 内匠逸
2. 発表標題 GO-NoGO課題時における後頭葉で観測される衝動性眼球運動に関連する脳波変動
3. 学会等名 電気学会C部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Funase, Y. Suzuki, S. -E. Fujiwara, S. Miki, I. Takumi, Y. Hirata
2. 発表標題 Following neural response against 15Hz blinking light stimuli in goldfish 's optic-tectum
3. 学会等名 Neuroscience2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島裕介, 船瀬新王, 内匠逸
2. 発表標題 衝動性眼球運動時の意思決定に起因する後頭頂葉で観測される脳波変動についての検討
3. 学会等名 電気学会C部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Fukushima, A. Funase, I. Takumi
2. 発表標題 Study on relationship between negative ERPs caused by Go-Cue and decision-making of saccadic eye movement
3. 学会等名 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村美登, 船瀬新王, 藤原清悦, 内匠逸
2. 発表標題 睡眠時に発生するスピンドルの個数が迷路課題に与える影響
3. 学会等名 電気学会 医用・生体工学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Nakamura, A. Fuanse, S. Fujiwara, I. Takumi
2. 発表標題 Brief 12-18 Hz oscillation during LIGHT sleep after virtual spatial explore task
3. 学会等名 the SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H, Takeda, A. Funase, I. Takumi
2. 発表標題 EEG signals related to the decision-making of saccadic eye movement in response to visual stimulation
3. 学会等名 ISET2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平下拓海, 石黒隆, 船瀬新王, 内匠逸
2. 発表標題 文音読課題による精神疲労の蓄積時における脳波及び脈波への影響
3. 学会等名 2020年度日本生体医工学会東海支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平松芳章, 船瀬新王, 三木俊太郎, 内匠逸, 藤原清悦, 平田豊
2. 発表標題 9種類の周波数を用いた点滅視覚刺激の呈示時における金魚の視蓋神経細胞の追隨性についての検討
3. 学会等名 2020年度日本生体医工学会東海支部大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関