

生体情報を用いた計算課題の難易度と取り組み状態の関係分析

Analysis of the relationship analysis between the difficulty of arithmetic tasks and the efforts using biometric information

原田 宗玄[†]
Harada Munenori

中平 勝子[†]
Katsuko T. Nakahira

1 はじめに

ニューノーマルの啓蒙にともない、e ラーニングを主体としたオンライン学習の機会が増加している。それにともない、学習の質やモチベーションへの影響など学習姿勢に対する課題が表出化すると考えられる。その一つの要因に呈示課題の難易度の学習者能力との合致度があげられる。本稿では、この課題解決のための一手法として、加算と乗算の筆算課題を例に、その際に起こる認知負荷の程度から呈示課題難易度の適切さの推定可能性について検討する。適切さ推定のために計算中の視線、瞳孔径などの生体情報から取り組み態度との関係を分析する。瞳孔は目に入る光の量によって広がったり、縮んだりするが、精神状態によっても変化する。瞳孔径と人の精神状態の関係については、次のような研究がある。田場らの研究 [1] では、精神的ストレス負荷をかけた場合に時間経過にともない散瞳が大きくなったが、ストレスの種類によって異なる変化を示すことが報告されている。また、Suzuki らの研究 [2] によって、被験者に徐々にオブジェクトが現れる動画を見せた際に、ひらめきを報告する前から既に散瞳していることが示された。

また、過去に計測された脳活性とも比較を行い、視行動での認知負荷推定の可能性について言及する。

2 難易度の違いによる取り組み状態の表現

相対的に難易度の高い（ハイレベル）な計算課題では、認知処理が増えることによって難易度の低い（ローレベル）の計算課題より散瞳することが考えられる。このことから答えを導き出したときの達成感やひらめきだけでなく、課題提示時間内に答えが導き出せない状況下でも、徐々に散瞳していくと考えられる。計算の難易度があがると提示される数字の数が増加するわけではないため、知覚プロセッサが知覚に要する時間は、あまり変わらないと考えられるが、認知プロセッサでの処理に要する時間は増加すると考えられる。今回の実験では、計算問題を解いた後に答えを見ることを想定しているため、難易度があがるにつれて計算問題から解答番号に視線が映る時間は遅くなるのが理想とされる。

難易度による取り組み状態の違いを分析するために、計算課題を解いている間の瞳孔径の変化量と問題から解答に視線が移動した時間がローレベルの課題とハイレベルの課題でどのような違いがあるか分析した。

横軸を瞳孔径変化量、縦軸を視線移動時間としたとき課題レ

ベルの違いによる取り組み状態の変化は図 1 に示すように状態 1~9 があると考えられる。

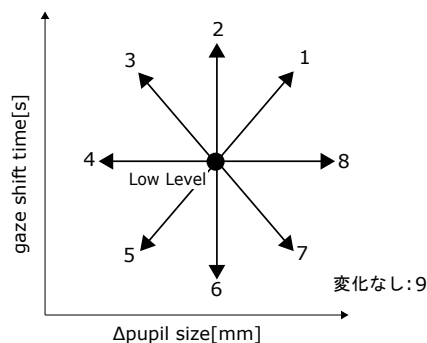


図 1: 難易度の違いによる取り組み状態

状態 1, 2, 3 では、課題レベルがあがることにより認知処理する時間が増えている状態であると考えられる。反対に状態 5, 6, 7 では、課題レベルが難しすぎることによって認知処理を諦めて、答えを探しにしている状態であると考えられる。また、ハイレベルの課題では認知負荷による精神的ストレスがローレベルの課題より大きいと考えられるので状態 1 のような傾向にあると推測できる。しかし、人によってはハイレベルの課題で認知処理を諦めることによって精神的ストレスが小さくなり状態 1 とは反対にある状態 5 の傾向が出ることも推測される。

3 実験方法

本稿では、鈴木ら [3] が行った実験データを元に脳波と視行動の分析を行った。

3.1 実験参加者

本実験では、10~20 代の大学生・大学院生 18 名を対象に実験を行った。そのうち 2 名分のデータはノイズが多かったため、分析対象から除外した。本実験では長岡技術科学大学の生命倫理委員会の承認を得て行われた。

3.2 実験装置

脳波計測には Emotiv 社の EPOC+ を使用した。本装置は国際 10-20 法に基づき 14 箇所電極が配置されており、生理食塩水を用いて安全かつ容易に装置が可能である。サンプリングレートは 128Hz である。視線計測には Tobii Technology 社の Tobii Pro Nano を使用した。サンプリングレートは 60Hz である。

実験課題の提示は Tobii Pro Labo を用いて、課題提示と同

[†] 長岡技術科学大学

時にパラレル信号を出力し、それを Psychopy で作成したプログラムによりシリアル信号に変換して脳波記録用の PC に送信することで、課題提示のタイミングと条件を記録した。

また、実験に使用したモニターは 21.5 インチで解像度が 1920 × 1080px のものを用い、モニターからの距離はおおむね 57.3cm となるようにセッティングを行った。

3.3 実験手順

実験の 1 試行の流れを図 2 に示す。画面中央に注視点が 2000msec の間表示され、その後 5000msec の間計算課題と解答の選択肢が表示されるというサイクルで実験を行った。計算

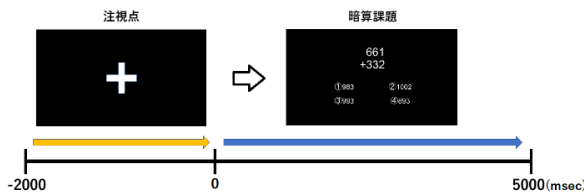


図 2: 1 試行の流れ

課題の難易度は表 1 の通りである。難易度設定は Normal 条件の解答時間を 5000msec 程度と想定し、解答がより容易なものを Easy 条件、より困難なものを Hard 条件として設定した。

この実験を 1 被験者につき各難易度 90 試行、全 270 試行分(所要時間 30 分程度)行った。

表 1: 計算課題の内容

条件	課題難易度
Easy	3 桁 + 3 桁の足し算 (繰り上がりなし)
Normal	3 桁 + 3 桁の足し算 (繰り上がりあり)
Hard	3 桁 × 2 桁の掛け算

被験者による操作は実験開始時のキー押しのみで、実験中は計算を行い、その後正答を探して注視するように指示をした。計算を促すため、計算問題は筆算形式で表示した。

3.4 生体情報分析

実験の結果得られた生体情報は次のように分析する。脳波データの解析については、EEGLABVersion2019.0 および EEGLABVersion2019.1 を使用した。課題提示前の 1500msec をベースラインとして設定し、提示から 4500msec を解析対象とした。

本実験の解析では、前頭葉正中線部から 6~7Hz で発現すると言われる Fmθ[1] に着目し、前頭葉正中線部に最も近い F3,F4 チャンネルについて周波数スペクトルを計算した。解析範囲はシータ波、アルファ波、ベータ波と呼ばれる帯域をまとめた 3~20Hz を対象とした。

視行動分析については Tobii Pro Labo で取得される Fixation および Fixation 時間、課題提示経過時間、瞳孔径をのちに示す方法で分析する

4 視行動分析

アイトラッカーで計測したデータのうち、目の動きの種類が Fixation となっているものを対象として分析を行った。同難易

度、正答番号が同じ複数試行の計測データをまとめて、難易度と正答番号による個人能力の違いを視行動、瞳孔径の観点から分析する。

視行動の 1 レコード分のデータ構造は、課題難易度 l 、正答番号 a 、計算課題提示経過時間 $t[s]$ 、視線データ $\theta[^\circ]$ 、瞳孔径データ $p[mm]$ となっている。

4.1 視線

視線データは、計算課題提示から 50ms ごとに四分位で表示し、固視箇所を表示する。アイトラッカーは視線データを画面の (x, y) 座標の 2 次元データで記録するが、図 3 で示すように、解答番号 1~4 の中央 (x_0, y_0) からの角度 θ である 1 次元データに変換して、問題をみていたのか解答番号を見ていたのかを示した。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_0 - y}{x - x_0} \quad (-180 \leq \theta \leq 180) \quad (1)$$

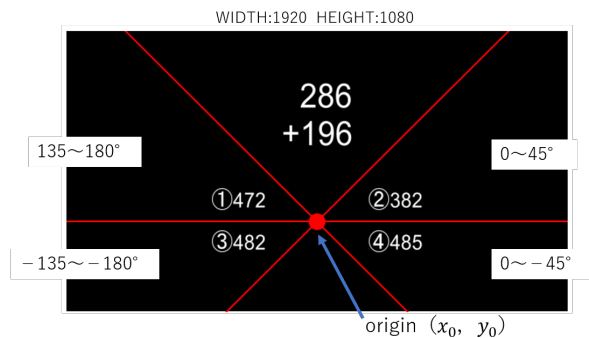


図 3: 解答番号中央からの角度

被験者 A の視線データ群を Θ としたときの同一条件 $l \sim a$ に対する視線の時系列データを θ とする。例として、 l が Easy、 a が 1 のデータセット A は以下のように表すことができる。

$$A = \{x(l, a) | l = \text{Easy}, a = 1, x(l, a) \in \Theta\}$$

A を 50ms ごとにわけるとき、課題提示された時間を $t = 0$ とすると $t = 0.05$ の視線データ $\theta(t, l, a)$ は以下ようになる。

$$\theta(0.05, \text{Easy}, 1) = \{x(t, l, a) | 0.05 \leq t < 0.10, x(t, l, a) \in A\}$$

θ を $0 < t < 5.00$ の範囲で四分位で表示したものを図 4 に示す。

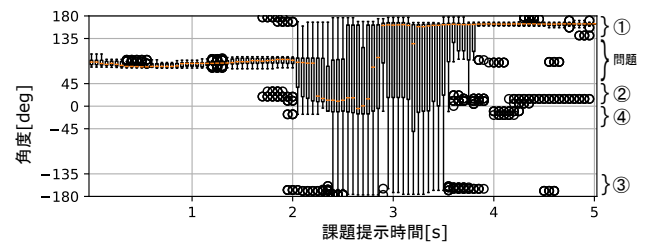


図 4: 被験者 A, 難易度 Easy, 正答番号 1 のときの視線

図の右端にある「問題」は計算問題を示している角度であり、①~④はそれぞれ解答番号を示す角度である。図 4 の場合は、計算課題が提示されて 2 秒過ぎまでは問題を見ていたことが多

く、その後解答②, ③などを見たのち、3秒あたりから解答①を見ていることが多いことを示している。

4.2 瞳孔径

瞳孔径データは、計算課題提示から 50ms ごとに平均値を計算した。

画像処理のアイトラッカーでは、実際の物理的な瞳孔径を測れないため、変化量で分析した。また、視覚刺激呈示の直前の 500ms 間の瞳孔径平均をベースラインとした。[4]

被験者 A の瞳孔径データ群を P としたときの同一条件 $l \sim a$ に対する視線の時系列データを θ とする。例として、 l が Easy, a が 1 のデータセット A は以下のように表すことができる。

$$A = \{x(l, a) | l = \text{Easy}, a = 1, x(l, a) \in P\}$$

A を 50ms ごとにわけるとき、課題提示された時間を $t = 0$ とすると $t = 0.05$ の瞳孔径データ $p(t, l, a)$ は以下ようになる。

$$p(0.05, \text{Easy}, 1) = \{x(t, l, a) | 0.05 \leq t < 0.10, x(t, l, a) \in A\}$$

$$\text{baseline} = \{x(t, l, a) | -0.50 \leq t < 0.00, x(t, l, a) \in A\}$$

p を $0 < t < 5.00$ の範囲で平均で表示したものを図 5 に示す。

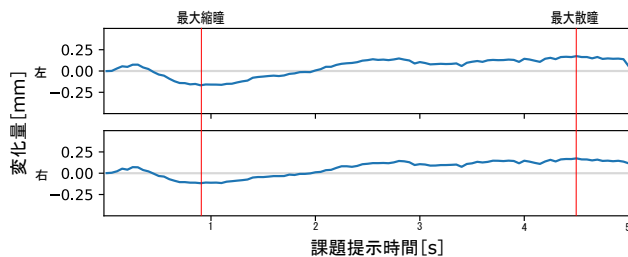


図 5: 被験者 A, 難易度 Easy, 正答番号 1 のときの瞳孔径変化

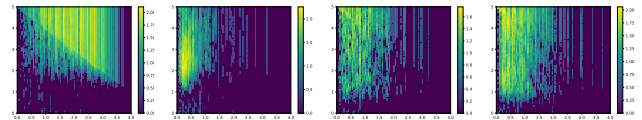
図の 0.00 は課題提示 500ms 前の平均値であるベースラインを示している。図 5 では、課題が提示された後一度縮瞳して、その後時間経過と共に散瞳していることを示している。

4.3 解答状況

本実験では、脳波への影響を極力減らすためボタン操作ではなく視線で解答を行っている。そのため視線データから解答状況を分析した。図 4 で示した通り、計算問題を解いた後、答えと合っている番号を探してから正しい番号のものを注視する。そのため、正答/誤答番号を注視していた総時間をそれぞれ算出し、これと経過時間ごとの正答/誤答番号の注視のタイミングとの関係を見ることで、回答の正誤判定に利用可能な特徴量の抽出を試みた。横軸が番号を見ている合計時間、縦軸が課題提示経過のどのタイミングで見たかの頻度分布を図 6 に示す。

Easy, Normal では正誤がはっきりしており、正しい番号と間違っている番号を見ている分布の特徴が似ていた。間違っている番号を見ている時間は 0.5 秒までの間が多く、問題を提示されてから 4.5 秒までの間に見ている。Hard では、間違っている番号と正しい番号を見ている分布が似ており、視線データから正誤を判断するのは困難であると考えられる。

よって Easy, Normal でみられた特徴の 0.5 秒以上正しい番号を見ている場合を正解とした。また、0.5 秒以下であっても



(a) Easy True Number (b) Easy False Number (c) Hard True Number (d) Hard False Number

図 6: 正答番号を見ている視線の割合

4.5 秒過ぎたあとに正しい番号を見ている場合は正解とした。これらの条件から計算した、推定正答率を図 7 に示す。

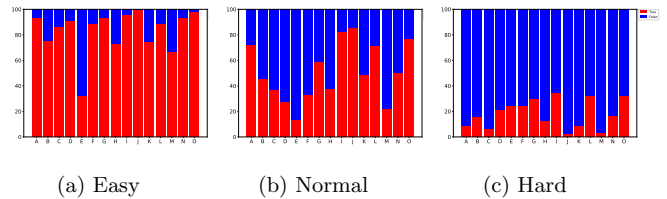


図 7: 視線行動による推定正答率 (赤: 正解, 青: 不正解)

5 分析結果

計算問題が提示されると瞳孔径が縮瞳する傾向が被験者全員の全ての難易度で確認された。そのため問題を見て縮瞳しきると考えられる 2 秒までの瞳孔径最小値と縮瞳が始まっていると考えられる時間から課題提示終了までの 4 秒間の瞳孔径最大を算出し、瞳孔径変化量とした。また、視線の変化として、計算問題から正答番号に視線が移り変わる最初の時間を算出し視線移動開始時間とした。難易度による違いを算出し被験者個々の難易度による違いを分析した。

上記の瞳孔径変化量と視線移動開始時間を被験者ごとにわけたのち、提示されている計算問題の正しい答えを見ていると思われるデータ (True) と問題しかみていないもしくは正しい番号をみていないデータ (False) にわけた。それらのデータを 3 種類の難易度ごとに分けて平均を計算した。計算した平均値をローレベルからハイレベルに向かって矢印で示したグラフを図 8 に示す。

6 考察

6.1 瞳孔径変化量と視線移動の関係

図 8(a) では、状態 1 が多くローレベルな課題 Easy よりハイレベルな課題 Normal の方が視線移動開始時間は長くなっているが、問題を解いたことに対する達成感は増していると考えられ、好意的に取り組んでいると考えられる。しかし、被験者の中で唯一 Easy を全問正解したと考えられる被験者 J は、視線移動時間は伸びたものの瞳孔径変化量は Normal の方が小さかった。変化量の差は 0.05mm もないことから被験者 J によっては Easy と Normal でストレスや達成感を感じられる難易度の差はなかったと推測される。図 8(d) では、正解しているときに比べて状態 1 が減り、状態 3 が増えている。瞳孔径変化量も正解しているときは 0.1mm 以上減少している人はいなかったが、不正解のときは 0.1mm 以上減少している人がみられた。特に視線移動開始時間が課題提示時間である 5 秒付近になっている被験者は瞳孔径変化量が 0.1mm 以上であった。

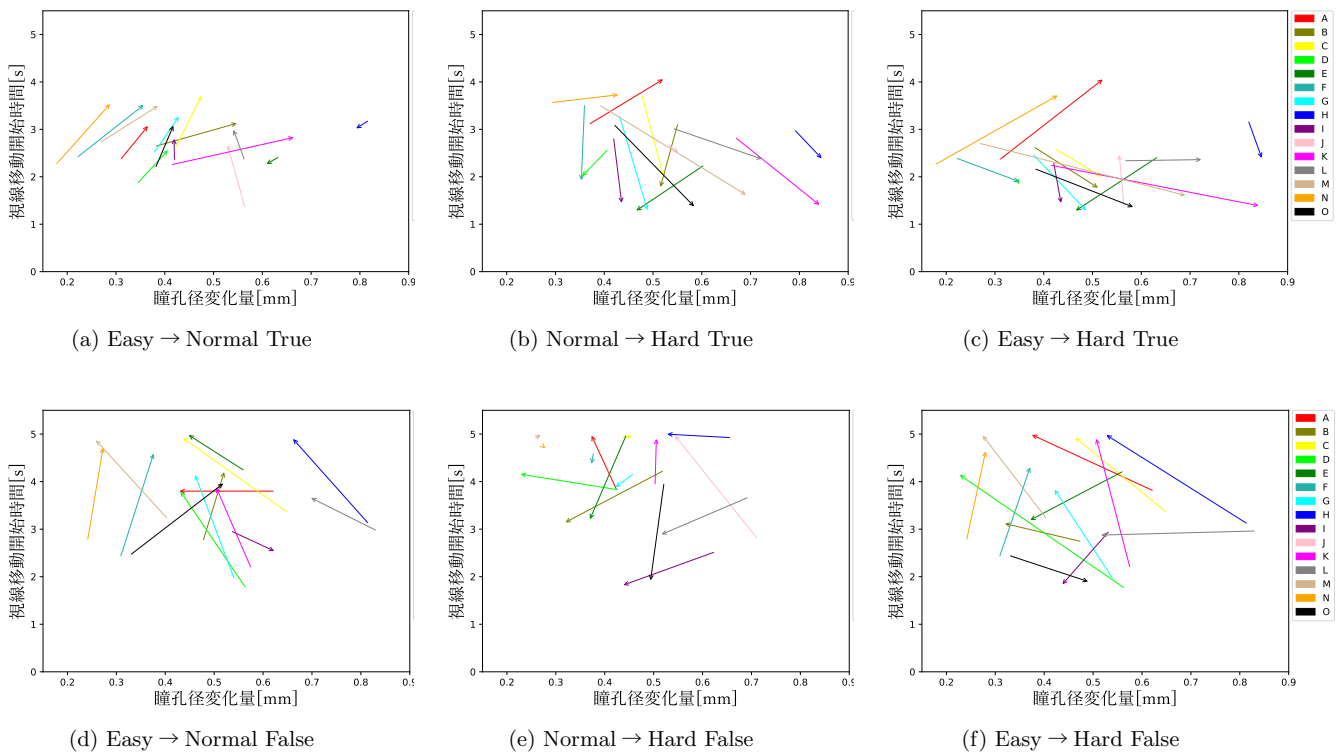


図8: 瞳孔径変化と視線移動

図8(b)では、状態7が多くローレベルな課題 Normal よりハイレベルな課題 Hard の方が視線移動開始時間は短く、瞳孔径変化量が大きい傾向にあった。ある被験者に質問したところ、Hard では計算課題が難しすぎたため下1桁同士の掛け算をして解答の選択肢を絞っていたという意見を得た。このことから、早めに解答を見ている場合でも諦めて計算をしているわけではなく、解答を探す認知処理が瞳孔を変化させていると考えられる。図8(e)では、状態5が多くローレベルな課題 Normal よりハイレベルな課題 Hard の方が視線移動開始時間は短く、瞳孔径変化量も小さい傾向にあった。視線は早めに動かしているが Hard で正解したときに比べると考えることを諦めていると考えられる。

6.2 脳波と視線

鈴木らの脳波解析結果 [3] を図9に示す。2秒以降で有意差が認められ、難易度間の差が検出できると推察している。2秒付近というのは、視線データでいうと図8(a)の Easy で視線移動が開始した時間あたりである。このことから Easy で正解している場合の瞳孔径変化量は認知負荷がない状態であると考えられる。

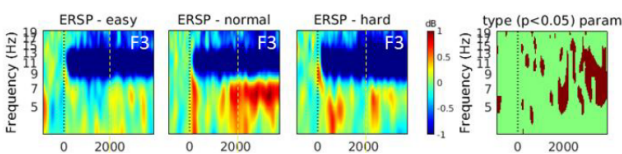


図9: F3チャンネルの時間周波数解析および検定結果

7 まとめ

今回の研究では、瞳孔径データと視線データを用いた計算課題の難易度と取り組み状態の関係について分析した。視行動、瞳孔径共に難易度による特徴がみられ、各難易度で正解していたとき、不正解のときの取り組み態度について考察した。Hard は5秒で解くのが難しく感で答えを見ていることが多く、正確な正誤判定ができなかったが、Easy と Normal に比べると視行動が大きく異なっていることが確認できた。このことから視行動のモニタリングを通じて学習者にとって適切でない難易度を見つけ、より適切な問題を付与するためのシステム設計可能であると考えられる。また、実験開始からの経過時間によるストレスや疲労の影響などについて分析する必要がある。

謝辞

本研究は科研費 (19K03026, 19K12246) の助成を受けた。

参考文献

- [1] 田場信裕, 高良富夫, 星野聖. ストレス負荷時の心拍数と瞳孔反応. テレビジョン学会技術報告, Vol. 20, No. 39, pp. 75-79, 1996.
- [2] Y Suzuki, T Minami, and S Nakauchi. Association between pupil dilation and implicit processing prior to object recognition via insight. Scientific Reports, Vol. 8:6874, No. 1, pp. 1-10, 2018.
- [3] 鈴木理玖, 秋元頼季, 中平勝子. 脳波・視線同時計測を用いた難易度推定指標の設計. 情報処理学会第83回全国大会予稿集, No. 4, pp. 181-182, 2021.
- [4] アイトラッカーで瞳孔径計測は可能か? <https://www.tobiipro.com/ja/service-support/learning-center/eye-tracking-essentials/is-pupil-size-calculations-possible-with-tobii-eye-trackers/> (accessed 2021.06.16).