

知覚運動課題に対する飽きの生起と抑制に關与する環境要因の検討 Environmental Factors involving Occurrence and Regulation of Boredom in Perceptual-Motor Task

米田 凌[†], 西川 純平[†], 長島 一真[†], 森田 純哉[†], 寺田 哲也[‡]

Ryo Yoneda, Jumpei Nishikawa, Kazuma Nagashima, Junya Morita, Tetsuya Terada

[†] 静岡大学, [‡] マツダ株式会社

Shizuoka University, Mazda Motor Corporation

yoneda.ryo.17@shizuoka.ac.jp

概要

外部環境との相互作用を伴う知覚運動課題において一定のパフォーマンスを維持するためには、作業者の覚醒度を適切に調節することが必要である。知覚運動課題における覚醒度に影響を与える要因として、学習や飽き、環境からの刺激などが想定される。これらの影響を、スクロールする線を円で追いかける課題を用いて検討した。初めの2つの実験は、クラウドソーシングを利用し、オンライン環境において実施した。実験1は、課題中の外部刺激の種類を変更し、実験2では、課題中に刺激を切り替えることの効果を検討した。これらの実験から、時間の経過に伴い、知覚運動課題のパフォーマンスが逆U字の形状を描くことが示された。しかし、そのようなパフォーマンスの変化に及ぼす刺激の効果は明らかとはならなかった。実験3では、対面環境において心拍を測定し、知覚運動課題中の覚醒度の変化を検討した。さらに、課題中の心拍から刺激を適応的に切り替える機構の有効性を検討した。結果として、課題の継続に伴って、心拍間隔が揺り戻しを伴いつつ増大していく様子が確認された。さらに、そのような心拍間隔の増大を抑えるための適応的な刺激変化を実現するための課題が明らかになった。これらの知見をまとめ、知覚運動課題において覚醒度が推移するメカニズム、およびそれを最適化する要因を議論する。飽きが知覚運動課題のパフォーマンスに影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：感情、覚醒度、意思決定、二重過程理論、WCST

1. はじめに

外界とのインタラクションを伴う作業（知覚運動課題）を、一定の質を保ちつつ継続するためには、作業者の覚醒水準（注意、あるいは集中）を適正に統制する必要がある。知覚運動課題における覚醒水準に影響する要因としては、時間の経過による習熟や飽き（馴

化）、外的な刺激による覚醒の喚起を想定できる。これらの要因は独立しつつも相互に関連し、複雑な影響を作業効率に及ぼす。

上記の要因のうち、飽きは習熟の結果として生じるとも考えられる。知覚運動課題に習熟することは、知覚された環境に対して、適正な運動を出力することである。当初は過剰あるいは過小な出力がなされ、作業者による自身の運動の予測と実際の運動の出力に不一致（予測誤差）が生じる。こういった予測誤差は、習熟によって減少していく。そして、予測誤差の低減は、一般的に飽きを導くとされる。

予測誤差の減少による飽きの生起は、知覚と運動の協調関係が習熟されることによつてのみ生じるわけではない。同一の外部環境に長くともどまることで、環境の変化に関する予測の精度が向上し、飽きが生じることもありうる。また、そのような外部環境に対する予測誤差の消失は、環境に内在する変化のパターンの種類によつて速くなったり遅くなったりすると考えられる。

本研究では単調な知覚-運動課題を用いた実験を通して、覚醒水準に関わる要因間の複雑な相互作用に関わる基礎データを取得することを試みる。ここで得られたデータを活用することで、人間の覚醒水準の変化を予測する詳細な計算機モデルの構築およびそのモデルに基づく介入システムの構築が達成されると考えている。

本報告では3つの実験を通して、知覚運動課題における習熟と覚醒水準、外的環境の関係を検討していく。実験1と実験2はクラウドソーシングにて行われ、覚醒度に及ぼす外敵環境の影響が検討された。実験3は実験室にて対面の実験を実施し、詳細な覚醒度に関する指標を取得した。また、この実験では適応的な刺激の提示を行うための実験条件が試行錯誤的に探索された。実験3に関して、本報告では各参加者のデータを事例として示しつつ、覚醒度が課題の成績に及ぼす影

響、外的環境による介入の効果を議論する。

2. 関連研究

単調な知覚運動課題における集中は多くの研究で扱われてきた。たとえば、Psychomotor vigilance task (PVT) は睡眠不足による注意の低下を検討する課題として頻繁に用いられてきた [1]。この課題中、参加者は画面に表示される対象を注視し、対象に動きが生じると、可能な限り速い速度でキー押しを行う。その反応時間から、睡眠や疲労による認知処理への影響が検討される。

また、大林ら [2] はオフィスにおける単調な知的作業に関する集中力の指標を開発し、適切な休憩の条件を検討する研究パラダイムを提起している。この研究から得られた反応時間の分布により、人は長期の作業を継続する際に、短期的な休息と長期的な休息を使い分けることが明らかになっている。さらに、これらの休憩の分布は、空調などの環境要因によって変化することが示されている。

上記の研究にみられるように、人間の覚醒水準は外的な環境に影響される。そのなかでも照明や背景音楽など、作業者が直接意識を向けない刺激（アンビエント刺激）について、多くの研究が行われている。その一環として、米田と森田 [3] は、クラウドソーシングを介した実験により、音や光が課題の成績に影響することを示した。また、そのような覚醒水準に影響を及ぼす刺激を心拍によって変動させ、ホメオスタシスの維持を狙うシステムを構築した [4]。

3. 課題

本研究では、知覚運動課題における習熟、飽き、外的刺激の効果を検討するために、単純な路線追従課題を設定した。図 1 に課題のスクリーンショットを示す。この課題の参加者は、40ms ごとに 1 ピクセル分、画面上部から下部にスクロールする直線を円でフォローすることを求められる。

もともと、この課題は自動実行機能への依存を検討するために考案されたものである [5]。その単純さゆえ、認知アーキテクチャなどをベースとしたトップダウン的なモデルの構築が容易という利点もある [6]。

本研究では、この単純な課題に対して、本研究の目的に合わせた修正を行った。まず、短時間での飽きを誘発するために、ランダムに組み合わされるコースパターンのうち、直線が選ばれる比率を 90% に設定した。また、同じコースが 1 分の周期で繰り返される構造とした。さらに課題中の覚醒水準の変化を検討する

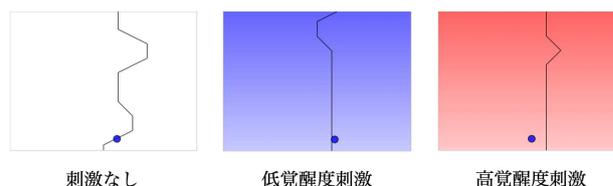


図 1: 課題中のスクリーン

ために、定期的にポップアップされるウィンドウ（プローブ）にて課題への集中の度合いを回答させる機能を構築した。なお、プローブの提示とコースの切り替えが同時になることを防ぐため、プローブの提示間隔は 50 秒を平均値とする正規分布によって決定した、

4. 実験 1：外的環境の効果

実験 1 は 3 節に示した課題を対象に、(1) 課題の習熟と飽きに関する行動指標、(2) 課題の習熟と飽きに対する外的環境の影響を検討する。

4.1 方法

4.1.1 参加者と実験デザイン

クラウドソーシングサイトにおいて参加者を募集した。募集の画面に貼られた URL をクリックすることで実験サイトにアクセスした 284 名が分析の対象となった。これらの分析対象者は、実験サイトにアクセスした順に下記の要因によって操作される 9 条件に割り当てられた。

- 視覚刺激
 - 刺激無：背景が白色の画面（図 1 左）で課題を行う
 - 低覚醒：背景が青色の画面（図 1 中）で課題を行う
 - 高覚醒：背景が赤色の画面（図 1 右）で課題を行う
- 音刺激
 - 刺激無：無音の中で課題を行う
 - 低覚醒：BPM80 の音刺激を聴取しつつ課題を行う
 - 高覚醒：BPM120 の音刺激を聴取しつつ課題を行う

上記の高覚醒／低覚醒と刺激の対応は、[3] に従うものである。

4.1.2 手続き

クラウドソーシングで募集された参加者は、課題に関する説明を自身のペースで読了した後に、課題内容の理解を確認するテストに回答した。このテストにおいて、音刺激の試聴も行われた。スピーカーから提示されるビーブ音の回数をカウントさせ、それに正解しない限りは本課題に進めなかった。課題は30分間行われ、終了と同時にアンケート画面に遷移した。

4.2 結果と考察

4.2.1 ドロップアウト率

実験サイトへのアクセスがあったものの、30分の課題を途中で中断（ドロップアウト）した参加者をカウントした。クラウドソーシングによる募集においては、通常でも多くのドロップアウトが生じる。飽きを対象とした本研究においてはドロップアウトされた参加者の比率（ドロップアウト率）そのものが有用なデータとなる。

ドロップアウトデータの決定は2段階のプロセスを経た。まず、所定の回数（30回）、プローブに回答していない参加者をドロップアウトとみなした。すでに述べたように、プローブは50秒に一回程度の頻度で発生する。そのため、課題を最後まで完遂していれば、プローブへの回答数は30以上取得されるはずである。

また、記録されたプローブの反応時間の分布から、異常な値をもつデータをドロップアウトとみなした。図2は全参加者の全試行（プローブに対する反応）を対象としたプローブ反応時間のヒストグラムを示す。図より右側に分布が広がるロングテールを確認できる。つまり、プローブに対する反応時間が極端に大きい試行が存在することが示され、課題を途中でドロップアウトした参加者の存在が示唆される。この反応時間の分布からスミルノフ＝グラブス検定による外れ値判定を行い、8.33秒 ($p < .0001$) を上回る反応時間をもつデータを除外した。

表1は上記の2ステップにより除外された参加者数の条件別の内訳を示す。この除外に関して、9条件間の比率の差を検定した。結果、比率の偏りは有意とはならなかった ($\chi^2(8) = 4.80, n.s.$)。

4.2.2 行動指標

図3は、ドロップアウトデータを除外した上でのプローブへの反応時間、オンライン率（全課題時間でラ

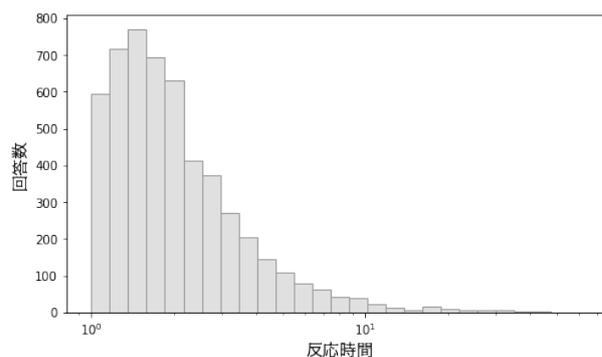


図 2: プローブ反応時間のヒストグラム

表 1: 各条件の参加者のうち、除外された人数

		視覚刺激		
		刺激無	高覚醒	低覚醒
音刺激	刺激無	2/29	3/28	2/31
	高覚醒	2/25	5/29	2/32
	低覚醒	2/34	1/26	2/29

インをフォローできていた時間の割合)の推移を示している。なお、ここでは30分の課題時間を6分割して、これらの結果を示している。

各指標について3要因（音刺激 × 視覚刺激 × 時間）の分散分析を実施した。結果、プローブ反応時間において、時間の主効果が認められ ($F(5, 1165) = 21.72, p < .01$)、初めの区間と他の区間での差が有意となった (Holm 法による多重比較: $p < .05$)。すなわち、ドロップアウトを除いた参加者においては課題の初期においてプローブ反応に対する習熟が生じていたと解釈できる。

オンライン率においても時間の主効果が有意となったが ($F(5, 1165) = 6.55, p < .01$)、この指標においては時間と音刺激の交互作用 ($F(10, 1165) = 2.26, p < .05$)、時間と視覚刺激 ($F(10, 1165) = 2.05, p < .05$)の交互作用が有意となった。前者の単純主効果検定により、音刺激のない条件においては初めの区間からのオンライン率の上昇が認められ (時間の主効果: $F(5, 1165) = 5.59, p < .01$, Holm 法による多重比較)、高覚醒の音刺激が提示された条件では最後の区間の課題成績がピーク (第2, 第3区間) から低下することが示された (時間の主効果: $F(5, 1165) = 4.33, p < .01$, Holm 法による多重比較)。また、後者の単純主効果検定からは視覚刺激のない条件において、ピークから (第2, 第3区間) 課題終盤 (第5, 第6区間) への成績の低下が観察された (時間の主効果: $F(5, 1165) = 4.83, p < .01$, Holm 法による多重比較)。

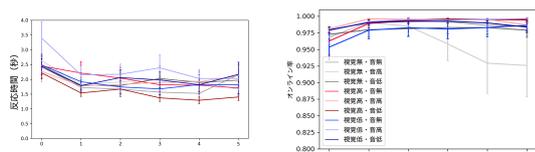


図 3: 実験 1 の行動指標 (左: プローブ反応時間, 右: オンライン率)

以上より、オンライン率における習熟の効果は、音刺激のない条件において顕著に観察され、課題後期の飽きは、視覚刺激がなく高覚醒の音刺激が提示された条件で観察されたといえる。

これらより、実験 1 では、オンライン環境において得られる行動指標から、習熟および飽きの効果を認めたと見える。これらに対する外的環境の影響については、存在は確認されたものの、刺激モダリティ間の複雑な交互作用が存在し、容易には解釈できないものとなった。

5. 実験 2: 外的環境の変化

実験 2 では、外的環境を途中で変化させることによる覚醒度の復帰を扱う。冒頭で述べた予測誤差の考えに従えば、外的環境に対する予測との不一致は、新規な刺激パターンの出現により、覚醒水準を復帰させると予測される。特に本実験では、実験 1 における高覚醒度刺激から低覚醒度刺激への遷移、低覚醒度刺激から高覚醒度刺激への遷移を条件とし、それぞれの条件による覚醒度を反映した行動指標の変化を検討する。

5.1 方法

実験参加者はクラウドソーシングにて募集された 41 名である。アクセスした順に以下の条件が均等になるように割り当てられた。

- 高低条件: 前半に音刺激・視覚刺激ともに高覚醒の刺激を提示し、後半に低覚醒の刺激を提示する。
- 低高条件: 高低条件とは逆のパターンで刺激を提示する。

実験の手続きは実験 1 と同様であった。

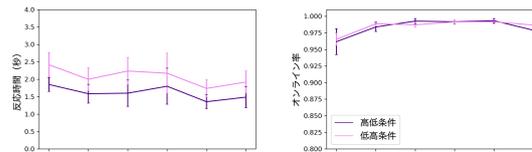


図 4: 実験 2 の行動指標 (左: プローブ反応時間, 右: オンライン率)

5.2 結果と考察

5.2.1 外れ値除去

実験 1 と同じ手続きでドロップアウトを判定した。高低条件において 18 名中 2 名、低高条件において 23 名中 4 名分のデータが除去された。 χ^2 検定の結果、条件間の差はなかった ($\chi^2(1) = 0.014, n.s$)。

5.2.2 行動指標

図 4 は実験 2 におけるプローブへの反応時間、オンライン率の推移を示す。これらの指標に対して、2 要因 (刺激条件 \times 時間) 分散分析を実施した。結果、プローブ反応時間に有意な効果が認められず、オンライン率において第一区間から、それ以外の区間への上昇が認められた (時間の主効果: $F(5, 1165) = 5.44, p < .01$, Holm 法による多重比較)。

上記の結果、切り替える刺激の種類によらず、実験 2 ではオンライン率の上昇が導かれた。一方で実験 1 の一部の条件で認められた課題終盤でのオンライン率の低下は認められなかった。実験 2 において、飽きの効果が観察されなかったことは、覚醒水準の維持に対する刺激切り替えの有効性を示唆する。ただし、実験 2 における 2 条件のオンライン率に対して、実験 1 の対応する条件 (音刺激・視覚刺激ともに高覚醒、音刺激・視覚刺激ともに低覚醒) と比較しても有意な結果は得られなかった。

6. 実験 3: 生体信号に駆動された環境変化

上記 2 つの実験は、行動指標のみを分析の対象とし、覚醒度の変化を直接的に観察していなかった。実験 3 では本研究で設定する路線追従課題において取得される心拍計測の事例を示す。また、心拍によって計測される覚醒度に応じて刺激を適応的に変化させるための条件も探索した。

6.1 方法

6.1.1 参加者と条件

実験は複数の条件で行った。ここでは解釈可能な心拍データの得られた結果のみを報告する。これらのデータは以下の3条件において得られた。

- 参加者 1: 刺激無 → 刺激無
- 参加者 2: 刺激無 → 低覚醒
- 参加者 3: 高覚醒 → 低覚醒

参加者 2, 3 において刺激の切り替わるタイミングは、心拍指標を用いることで設定された。心拍指標としては SDNN (Standard Deviation of NN) を設定した。この指標は自律神経のゆらぎを扱う指標として用いられる。覚醒水準の高い状況では SDNN が低下し、覚醒水準の低下によって SDNN が上昇する。課題中のこの指標が、課題前の安静状態（ベースライン）において計測された SDNN の平均に SD の 3 倍を加えた値 ($3*SD$) を初めて上回ったときに自動的に刺激が変化した。なお、SDNN を算出する際に、心拍間隔 (RRI) が 500ms 未満と 1500ms を超過していた場合は計測のアーチファクトとして除外した。

6.1.2 機材

無線接続により計測可能な MyBeat (Union tool) を心拍計として用いた。

6.1.3 手続き

参加者は心拍計を胸に装着した状態で課題に取り組んだ。課題時間や教示は実験 1, 2 と同じである。

6.2 結果と考察

図 5 に各参加者から計測された RRI (R-R interval), SDNN, オンライン率, プロープ反応時間を示す。SDNN のグラフにおける緑の水平線はベースラインにおける平均に $3*SD$ を加えた値を示している。

各参加者の特徴は以下のように記述できる。

- 参加者 1: 課題中盤から終盤に向けて SDNN が上昇をした。
- 参加者 2: 課題の終盤に SDNN の上昇が確認された。また、課題の序盤と中盤で、アーチファクトによる SDNN の上昇があった。最初のアーチファクトが発生した 400 拍付近で刺激は切り替わった。

- 参加者 3: 課題終盤に、SDNN が上昇した。また、課題の序盤では、複数回にわたるアーチファクトによって SDNN が上昇した。そのため、課題の序盤で刺激が切り替わった。

課題の序盤や中盤にアーチファクトが発生した事例はあるものの、全参加者の傾向をまとめれば、SDNN は課題の終盤に向けて増加傾向にあるといえる。6.1.1 節で述べたように、SDNN の上昇は覚醒度の低下を反映しており、課題の終盤において参加者に課題への飽きが発生した可能性が示される。

ただし、このような SDNN の相対的な増加によって飽きを検出し、刺激を切り替えることの有効性については疑問が残る。参加者 2 と 3 では大きなアーチファクトによって、刺激が切り替わった。この動作は実験の設定上意図したものではなかったが、アーティファクトを除いたとしても、これらの参加者の SDNN が刺激を切り替える基準値（ベースラインの平均に $3*SD$ を加えた値）を超えることはなかった。このことから、本実験で設定した刺激を切り替える基準は、課題中の参加者の覚醒度の低下を判定するには高すぎた可能性がある。したがって、覚醒度の低下に応じた適応的な刺激の切り替えを行うためには、現在よりも低い値に刺激切り替えの基準を設定する必要があると考えられる。

一方で、この方法ではアーチファクトの発生に対応することができない。アーチファクトへの対処として、SDNN の算出に用いられる RRI の範囲を狭くすることが考えられる。参加者 2 や参加者 3 において今回刺激切り替えのトリガーとなった RRI は 1200ms を超えていたものの、課題実施時にアーチファクトの基準として設定していた 1500ms よりも小さいものであった。そのため、今後、課題中のアーチファクトの判定基準を 1500ms から 1200ms に変更することで、本来の覚醒度の変化に適応した刺激切り替えを実現できると考える。

また、心拍とそれ以外の指標を組み合わせることで、覚醒度推定の精度は向上するだろう。まず、オンライン率やプロープ反応時間などの行動指標と心拍を組み合わせたことが考えられる。そうすることで、課題のパフォーマンスが低下してきたタイミングで SDNN が上昇したときの刺激の切り替えが可能になる。また、皮膚コンダクタンス反応、眼球運動などの生体指標を組み合わせることも考えられる。複数の生体指標を用いることで、特定の指標にアーチファクトが発生しても、覚醒度の推定に及ぼす影響は小さくなる。このように、覚醒度を推定するために複数の生体

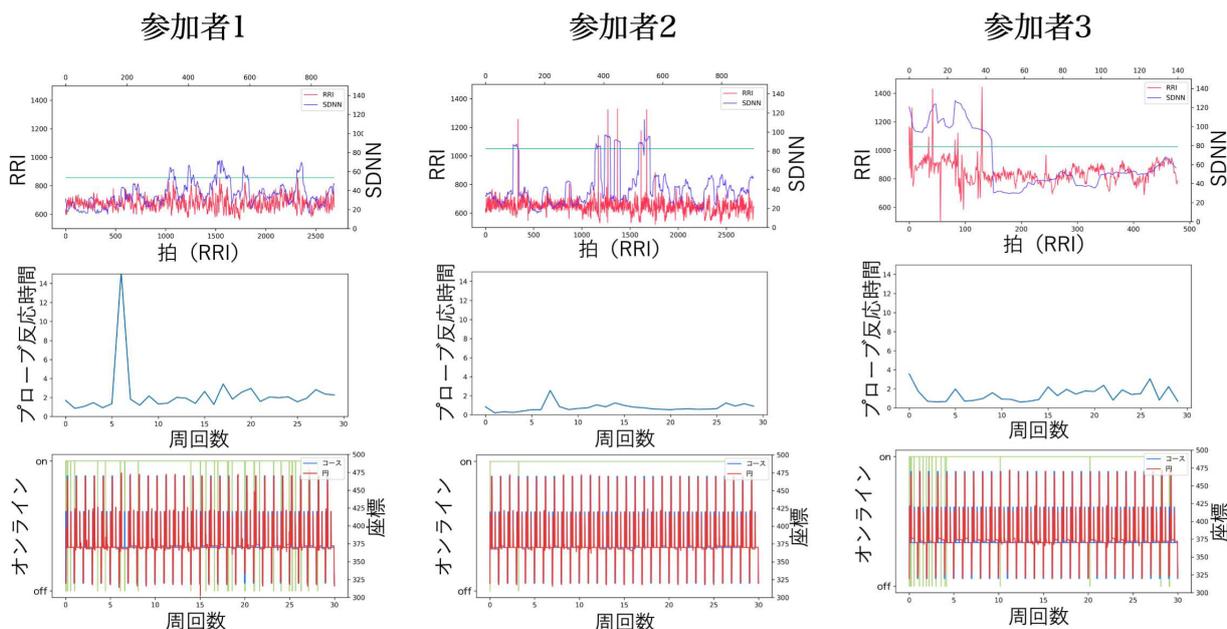


図 5: 実験 3 における各参加者の結果. 上段: 心拍データ (赤線: RRI, 青線: SDNN, 緑線: ベースラインの平均+3SD), 中段: プローブ反応時間, 下段: 路線追従課題の行動指標 (赤線: 円の座標, 青線: フォローすべき座標, 緑線: オンライン判定)

指標を用いることで、アーチファクトによらずに安定した覚醒度の推定が可能になるだろう。

7. おわりに

本研究では知覚運動課題における覚醒水準に及ぼす習熟と飽き、外的環境の影響を検討した。実験の結果、設定された課題に対するそれぞれの効果は確かめられたものの、要因間の相互作用に関しては依然として解釈が困難なものとなった。これらの解釈の困難さは、今後、個々のデータに対する検討を追加することで解決できる可能性がある。クラウドソーシングから得られたデータに関しては、より工夫されたドロップアウトデータの判定方法を開発する必要がある。また、生理データの取得に関しては、ノイズ判定の精度の向上と実験参加者数の増加が求められる。さらに、これらのデータと対応付けられる計算機モデルを構築することで、知覚運動課題における覚醒水準を適正に保つ条件を検討できると考えている。

文献

- [1] Jillian Dorrian, Naomi L Rogers, and David F Dinges. *Psychomotor vigilance performance: Neurocognitive assay sensitive to sleep loss*. CRC Press, 2004.
- [2] Fumiaki Obayashi, Kazune Miyagi, Kyoko Ito, Kazuhiro Taniguchi, Hirotake Ishii, and Hiroshi Shimoda. Objective and quantitative evaluation of in-

tellectual productivity under control of room airflow. *Building and Environment*, 149:48–57, 2019.

- [3] Ryo Yoneda and Junya Morita. The internal state mediating between decision-making and arousal. In *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Agent Interaction, HAI '21*, page 75–83, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [4] 米田 凌 and 森田 純哉. 心拍変動を用いた認知課題中の情動制御. In *WISS 2021: 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ*, 2021.
- [5] Akihiro Maehigashi, Kazuhisa Miwa, Hitoshi Terai, Kazuaki Kojima, and Junya Morita. Experimental investigation of calibration and resolution in human-automation system interaction. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E96.A(7):1625–1636, 2013.
- [6] Junya Morita, Kazuhisa Miwa, Akihiro Maehigashi, Hitoshi Terai, Kazuaki Kojima, and Frank E. Ritter. Cognitive modeling of automation adaptation in a time critical task. *Frontiers in Psychology*, 11, 2020.