

心拍指標に基づく人間状態推定のロバスト性に関する研究

Study on Robustness of Human State Estimation Based on Heart Rate Indicators

○大槻翼, 高橋信

○Tsubasa Otsuki, Makoto Takahashi

東北大学

Tohoku University

キーワード : 心拍変動(heart rate variability), ワークロード推定(workload estimation),

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 総合研究棟 904 号室 高橋・狩川研究室
大槻翼, Tel: (022)795-7921, Fax: (022)795-7921, E-mail: tsubasa.otsuki.p2@dc.tohoku.ac.jp

1 はじめに

現代社会の多くのシステムにおいて、システムの自動化が進んでいる。自動化により、経済性・安全性の点で多くの恩恵がもたらされている。一方、人間と自動化システムの協調という新たな問題が提起されている。機械の操作においては自動化システムの寄与を大きくすることで、作業員の負担の軽減や安全性の向上などのメリットがある。多くの自動化システムにおいては、システムの機能限界外の事象に対しては操作員が介入することで安全性を担保している。しかし、突発的な事象に対して、操作員が適切に介入できる保証はない。人間と機械のより良い協調の形が望まれている。

人間と自動化システムの協調の問題による事故を防ぐために、適応的機能配分が提案されている。適応的機能配分とは、人の状態やシステムの状態、周囲の環境などに応じて人と機械の役割分担を変更することで安全性を維持しようとする仕組みである。例えば、自動化システムの機能限界時でも、操作員の信頼性が極端に低下している場合にはシステムが操作を行うことが考えられる。

適応的機能配分の実現のためには、人間状態を推定する技術が必要である。常に変化する操

作員の人間状態を推定し、操作員の信頼性によって人間と機械の役割分担を変更する必要がある。

心拍変動指標を用いた人間状態推定手法においては、多くの研究がなされているが、被験者内の変動を調査した研究は少ない[1], [2]。人間の心拍リズムは常に変動しており、その変動は人の内的状態を表していると考えられている。この変動は個人差が大きいため、先行研究では個人ごとに推定モデルを作製して推定を行うことが提案されている[3]。しかし、個人内における心拍変動指標の変化に対する知見は不足している。

本研究では、適応的機能配分の実現を目指し、人間状態推定における心拍変動指標の個人内の変動を調査した。人間のパフォーマンスを変動させる要因として、精神的作業負荷に注目し、心拍変動による精神的作業負荷の推定手法において、心拍変動指標の反応傾向の時間的な変化に対する推定手法の信頼性を検証した。

2 手法

2.1 実験概要

男子学生 8 名 (平均年齢 20.3 歳,SD=1.22) に対し、異なる作業負荷下にある被験者の生理指標を同一被験者に対して 4 回測定し、生理指

標の時間的変動を調査した。被験者は午前の時間帯（8時から11時）と午後の時間帯（15時から20時）にそれぞれ2回ずつ、合計4回実験に参加した。電極装着時の都合により参加者を男性に限定した。

なお、本研究は、東北大学大学院工学研究科人を対象とする医学系研究に関する倫理委員会（承認番号 22A-18）の承認を得て、被験者に十分な説明を行い、文書にて同意を得た上で行った。

2.2 作業負荷を制御するタスク

各回の実験において、被験者に黙読タスクとタイピングタスクを課した。実験は黙読タスク、タイピングタスク、黙読タスクの順で行った。各実験タスクにおいて被験者の心拍データを取得した。タイピングタスクにおいては心拍に加えて、主観的作業負荷と瞳孔径を測定した。

黙読タスクにおいては、刺激的表現の少ない内容の雑誌を5分間黙読した。これは、被験者を安静状態に誘導し、作業負荷のない状態を再現することを目的としている。

タイピングタスクにおいては、被験者に3段階の作業負荷のタスクを行ってもらい、異なる作業負荷の状況を再現した。複数回実験することによる被験者の習熟や慣れといった変動要因を除くように予備実験にて作業負荷調整を行った。

タイピングタスクでは、画面上端から下端へ一定速度で移動する数字を入力するタイピングタスクを被験者に課した。タスク中は画面上端から数字が画面上に現れる。被験者は表示された数字が画面下端に到達する前に数字を入力する。5分間経過するか、数字が画面下端に3回到達した時点でタスクが終了する。

タイピングタスクにおける実験条件は作業負荷低・中・高の3段階で行った。作業負荷は①数字の桁数、②数字の出現頻度の2つのパラメータにて設定を行った。実験前には被験者の習熟のために3分間の練習シナリオを2回行った。被験者間で作業負荷を統一するため、被験者ごとに基準となるタイピング速度を測定し、基準をベースにして本番シナリオでの数字の出現頻度を決定している。

2.3 心拍変動指標

心拍データはkenz Cardy 305 pico(ケンツメディコ社製)を用いて測定した。心電データから時系列RR間隔を取得し、SG検定による外れ

値除去を行い、1Hzでリサンプリングを行った。先行研究をもとに

表1に示す計10個の心拍変動指標を算出した[1]–[5]。算出においては先行研究を基に解析ウインドウ幅を120秒に固定し、n秒のときの指標をn-120秒からn秒のデータを基に算出した。

表 1：算出した心拍変動指標

指標名	説明
DSDa	逐次差分の絶対値の標準偏差
DSDn	逐次差分が正の値の場合の逐次差分の標準偏差
DSDp	逐次差分が負の値の場合の逐次差分の標準偏差
HF	周波数0.05Hz-0.15Hz帯域のパワー
LF	周波数0.15Hz-0.40Hz帯域のパワー
LF/HF	LFをHFで除した値
LPS	ローレンツプロット面積
SDNN	標準偏差
RMSSD	逐次差分の二乗平均平方根
SDNN/RMSSD	SDNNをRMSSDで除した値

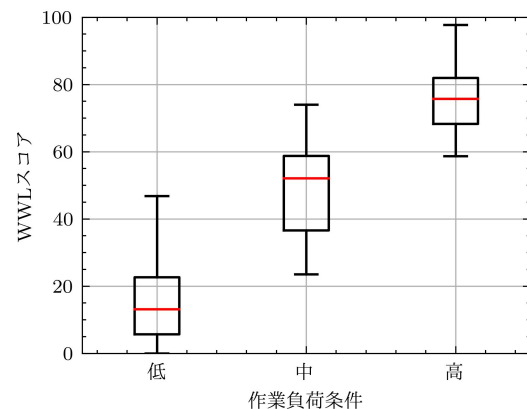


図 1：作業負荷と WWL の関係

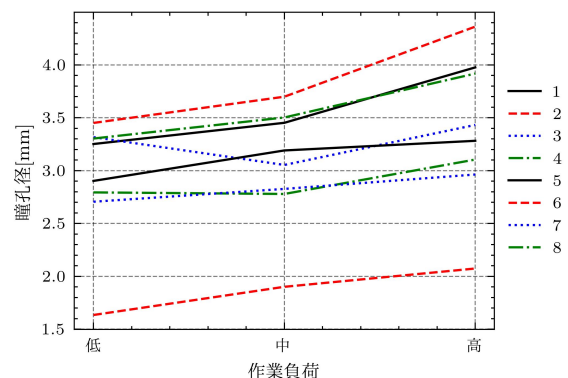


図 2：異なる作業負荷下の瞳孔径の大きさ

2.4 主観的作業負荷

各タイピングタスク終了後に被験者の主観的作業負荷を NASA-TLX の回答から WWL (weighted workload)を計算することで取得した。WWLの計算は先行研究を基に行った[6]。

2.5 瞳孔径

タイピングタスクにおいて瞳孔径の測定も Tobii Pro Fusion (Tobii 社製)を用いて行った。瞳孔径は作業負荷との関連が指摘されている。得られた時系列瞳孔径データに対してSG検定を用いた外れ値除去と欠損値において直前の値で補完する処理を行い、平均値を算出した。

3 結果

3.1 主観的作業負荷

WWLは作業負荷上昇とともに増加する傾向が見られた。図 1 は作業負荷と WWL スコアの関係を表している。Bonferroni法による多群間比較を行った結果、3条件すべての組み合わせで5%水準の有意差が認められた。

3.2 瞳孔径

タスクごとの平均値において、先行研究と同様に作業負荷上昇とともに瞳孔径が増大することが示された。図 2 は作業負荷と瞳孔径の大きさの関係を示す。Bonferroni法による多群間比較では、作業負荷低条件と高条件 ($p=.0016<.0167, d=.69$)、中条件と高条件 ($p=.0027<.0167, d=.51$)に有意差が見られた。

被験者間の反応傾向においては、2要因分散分析で交互作用が有意であることが示された。 ($F(14,72)=1.84, p=.048<.05, \eta_p^2 = .26$)。単純主効果においては作業負荷 ($F(2,72)=36.7, p<.001$,

$\eta_p^2 = .50$)、被験者 ($F(7,72)=83.3, p<.001, \eta_p^2 = .89$)それぞれにおいて有意差が認められた。

被験者内の反応傾向では、全被験者で2要因分散分析における交互作用に有意差は認められなかった。

3.3 心拍変動指標

1名の被験者において、計測状況の問題で2回の実験で測定ができなかったため、心拍変動指標は7名の被験者で解析を行った。

タスク作業負荷ごとに算出した心拍変動指標では、LF/HF、SDNN/RMSSD 指標以外でタスク作業負荷が上昇すると指標が低下する傾向が見られた。図 3 は作業負荷と心拍変動指標の関係を示す。LF/HF、SDNN/RMSSD は作業負荷に対する一貫した傾向が見られないため、以後の解析から除外した。

被験者間の反応傾向において2要因分散分析では HF 指標以外で交互作用が5%水準で有

表 2：心拍変動指標の交互作用と主効果

指標名	被験者間		被験者内 [人/7人中]		
	交互作用		交互作用	作業負荷	実験時間帯
DSDa	○		0	4	2
DSDp	○		0	4	2
DSDn	○		0	5	2
HF	×		2	4	4
LF	○		0	5	1
LPS	○		0	6	2
SDNN	○		0	7	2
RMSSD	○		0	5	2

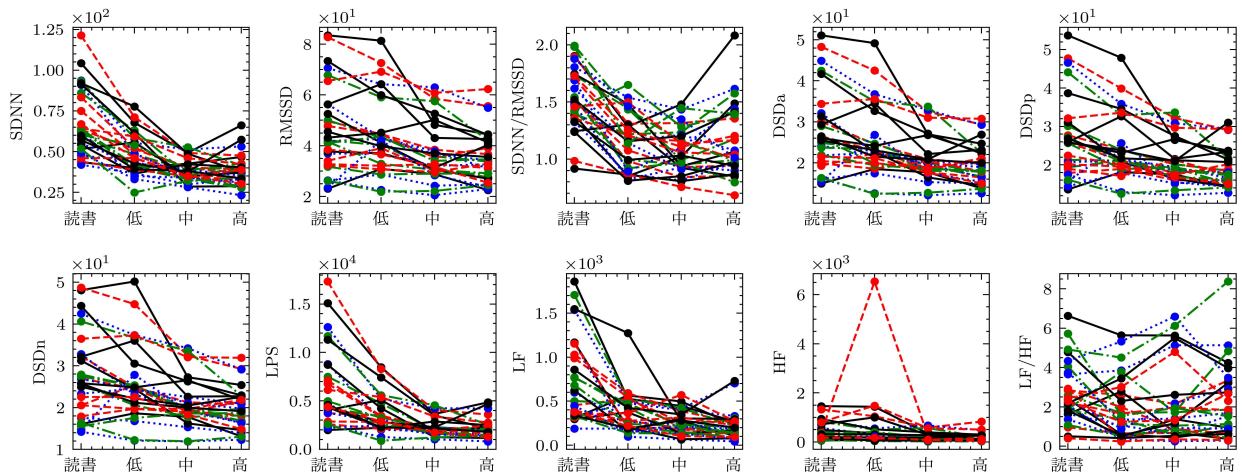


図 3：各作業負荷条件での心拍変動指標

意であった。表 2 は各心拍変動指標における被験者間の交互作用の有無と各被験者内における交互作用に有意差があった被験者の人数、作業負荷の主効果に有意差があった被験者の人数、実験時間帯の主効果が 5%水準で有意であった被験者の数を示している。HF 指標においては1名の被験者で除外しきれない外れ値があったことでHF 指標の交互作用が有意と認められなかったが、当該被験者を除外した分散分析の結果は交互作用が有意であった。

被験者内の反応傾向においては2要因分散分析の結果、HF のみ交互作用が有意な被験者が2名、それ以外では交互作用が有意でなかった。

4 考察

NASA-TLX の WWL の評価から、タイピングタスクの作業負荷が適切に設計されていると考えられる。作業負荷の上昇によって WWL が上昇し、条件間での順序が実験条件と同じであったことから、本実験で設定した作業負荷は妥当であったと考えられる。

瞳孔径を用いた人間状態の推定においては、個人ごとに推定モデルを作製することが有効であることが示された。作業負荷に対する瞳孔径の変化は先行研究と同一の傾向であった[7]。被験者間の反応傾向には有意差が見られたことから、作業負荷に対する反応傾向は個人ごとに異なると考えられる。一方、被験者内の反応傾向は交互作用が認められなかったことから、個人内での反応傾向は変化しないことが示された。

心拍変動指標を用いた人間状態推定においても、個人ごとに推定モデルを作製することが有効であると考えられる。被験者間の反応傾向の比較において有意差が認められたことから、作業負荷に対する反応傾向は個人差があると考えられる。一方、被験者内の反応傾向の比較では、ほとんどの指標において交互作用が有意ではなかったことから、個人内での作業負荷に対する反応傾向は一貫していることが示された。

5 まとめ

本研究では、個人ごとの推定モデルによる人間状態推定における個人内での反応傾向の時間的変化の影響を検証するために、被験者に対し複数回の認知実験を行い、得られた心拍変動指標の時間的変動に対する検討を行った。

被験者内における反応傾向の時間的変化は

認められなかった。これは、心拍変動を用いた人間状態推定において、個人ごとに推定モデルを構築することが妥当であることを示す。

今後の研究においては、実現場の応用を目指し、より実現場に近いタスクにおける信頼性の検証が必要である。

6 参考文献

- [1] 厚生村田, “心拍変動性指標によるメンタルワークロードの測定,” 人間工学, vol. 28, no. 2, pp. 91–98, 1992, doi: 10.5100/jje.28.91.
- [2] 要平柳, 賢一岩崎, 省吾神田, and 一嘉谷島, “メンタルワークロード (mwl) の測定・評価法に関する実験的検討,” 人間工学, vol. 32, no. 5, pp. 251–259, 1996, doi: 10.5100/jje.32.251.
- [3] 秀太郎國政, 恭一瀬尾, 宏下田, and 裕剛石井, “知的作業中の生理指標計測による作業成績推定手法,” 計測自動制御学会論文集, vol. 55, no. 4, pp. 260–268, 2019, doi: 10.9746/sicetr.55.260.
- [4] 花江才門, “生体情報に基づくリアルタイム認知状態推定に関する研究,” 東北大学, vol. 平成28年度 修士学位論文, 2017.
- [5] 小西健斗, “権限移譲のための自動化システムの情報提示に関する研究,” 東北大学, vol. 令和3年度 修士学位論文, 2022.
- [6] 晋司三宅 and 雅晴神代, “メンタルワークロードの主観的評価法--NASA-TLX と SWAT の紹介および簡便法の提案,” 人間工学 *Jpn. J. Ergon.*, vol. 6, p. p399~408, Dec. 1993.
- [7] D. Kahneman, J. Beatty, and I. Pollack, “Perceptual Deficit during a Mental Task,” *Science*, vol. 157, pp. 218–219, Jul. 1 1967, doi: 10.1126/science.157.3785.218.