

バイオフィードバックを行う小型パートナーロボット Flabo の開発

- 認知課題成績の比較 -

日大生産工(院) ○横須賀 晴鷹 日大生産工 柳澤 一機

1. 緒言

現代社会では、ほとんどの事業所でコンピュータが使用されているが、長時間VDT(Visual display terminals: 以降 VDT)作業を行う労働者は、目の疲れ・肩こり等の身体的な疲労の他に精神的な疲労を感じていることが指摘されている¹⁾。

そのため、VDT作業に伴う精神的なストレスを解消させる必要がある。しかし、実際にVDT作業を行う労働者は決められた仕事量を時間内に終わらせる必要があることから、ストレスを解消しつつ、パフォーマンスを下げないことが望ましい。

ストレス状態とパフォーマンスの関係性はヤーキーズ・ドットソンの法則に従うとされている。ヤーキーズ・ドットソンの法則とは、ストレス状態とパフォーマンスには逆U字の関係があり、適度にストレスがかかっている時に最もパフォーマンスを発揮することを示した法則である²⁾。したがって、自身のストレス状態を知覚し、適度なストレス状態を維持することで、高いパフォーマンスを発揮できる可能性がある。しかし、作業をしながら自身のストレス状態を知覚しコントロールすることは困難である。そのため、作業者にストレス状態を知覚させる手法が必要である。

ストレス状態を知覚させる手法として、バイオフィードバック(Biofeedback: 以降 BFB)が挙げられる。BFBとは、通常は知覚することのできない生体情報を、光や音などの知覚可能な方法で提示する手法である。従来のBFBはモニターに表示された数値化シンボルによって行われてきた。しかし、継続的なBFBを行う際に単調な提示方法であると、使用者の興味関心が低下してしまうといった課題がある³⁾。

興味関心を維持したままBFBを行う方法として、ロボットを用いることが挙げられる。作業者はロボットのフィードバック(以降:FB)を見ることで、ストレスのコントロールが容易になり、適度なストレス状態を維持することによってパフォーマンスが向上する可能性がある。

そこで本研究では、BFBを行う小型パートナーロボットを開発する。作業者のパフォーマンスの比較は、VDT作業前後に実施したストループ・逆ストループ課題の反応時間から、日常生活における計画・判断・意思決定などを行う際に重要とされる実行機能の変化を比較することで行う。ロボットによるFBあり・なしの2条件でVDT作業を行った際の実行機能の変化を比較し、ロボットの有効性を検証する。

2. 原理

ストレスを評価する際に用いられる代表的な生体情報として心拍変動(Heart rate variability: 以降HRV)が挙げられる。HRVとは心電図(Electrocardiogram: 以降ECG)上のR波とR波の間隔(R-R Interval: 以降RRI)のゆらぎのことである。

HRVの以外の生体情報としては、唾液、脳活動等が挙げられるが、唾液は、ストレス評価の際に、作業を中断する必要がある。脳活動は、計測の際に体動を制限する必要がある。本研究では、作業者の負担にならない方法で、継続的に計測することができる生体情報として、HRVに着目した。

HRVから算出できる副交感神経活動の指標として、RMSSD(Root mean square of successive differences)が挙げられる。RMSSDはRRIの差の二乗平均平方根であり、 i 番目のRRIを n_i 、解析区間内のサンプル数を N とするとRMSSDの値は以下の(1)式で求めることができる。

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (n_i - n_{i+1})^2} \quad (1)$$

一般的にリラックス時に副交感神経活動が亢進状態になるため、RMSSDの値が減少するとき、ストレスを受けていると考えられる。

HRVから算出できる自律神経活動の指標としては、RMSSDの他にHRVの低周波数(Low frequency: 以降LF)成分、高周波数(High frequency: HF)成分が挙げられる。

HRVから周波数成分を求める際は、通常5分程度のRRIデータが必要とされている。RMSSDは解析区間5分間と1分間の間に相関があることが報告されているが、LF及びHFについては相関がないことから、RMSSDは短時間の解析でも信頼性がある指標であるとされている⁴⁾。BFBにおいては、リアルタイムにストレスを評価し、FBをすることが望ましいため、本研究では短時間での解析に対応できるRMSSDを用いてストレス評価を行うことにした。



Fig. 1 開発した小型パートナーロボット Flabo の外観

3. 開発した小型パートナーロボット

3.1 コンセプト

学習者へのFBは、視覚提示によって行うことにし、視覚的に分かりやすいLEDの色の変化と伝統的な視覚信号の一つである手旗信号を模した旗の昇降によってFBを行うように設計した。

開発した小型パートナーロボットの外観をFig.1に示す。名前は旗振りロボットを意味するFlag waving robotから、Flaboと名付けた。Flaboの大きさは、幅×奥行き×高さ＝140mm×70mm×55mmと手のひらサイズであり、電源はパソコンから供給される。

Flaboの機体下部はノートパソコンやデスクトップモニタの画面上部に取り付けられる形状にした。画面上部に設置することで、高い視認性と小型化を実現した。

3.2 システム概要図

Flaboのシステム概要図をFig.2に示す。RRIの計測にはPolar社製の心拍センサPolarH10を使用し、BLE(Bluetooth low energy)通信でパソコンに送信する。パソコンでは受信したRRIの値を基にRMSSDを算出する。算出したRMSSDの値に応じて、FB用の機器制御信号をシリアル通信でArduino Nano Everyに送信し、フルカラーLEDとサーボモータをPWM制御する。そして、フルカラーLEDと旗の昇降により作業者にストレス状態のFBを行う。

3.3 フィードバック指標

フルカラーLEDとサーボモータを制御する際に用いるFB指標を作成することを目的に、インフォームドコンセントを得た健常な20代男女11名を対象に、60分間ノートパソコンを使ったVDT作業を行ってもらい、作業期間中のRRIを計測した。

計測したRRIから解析区間60秒でRMSSDを算出したところ、平均値は34.3ms、標準偏差(Standard deviation : 以降SD)は11.9msだった。作成したヒストグラムをFig.3に示す。緑の

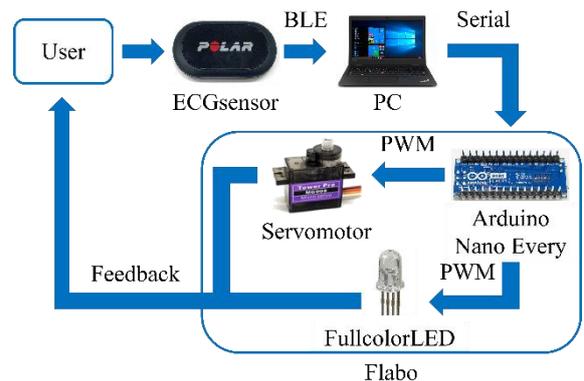


Fig. 2 Flabo のシステム概要図

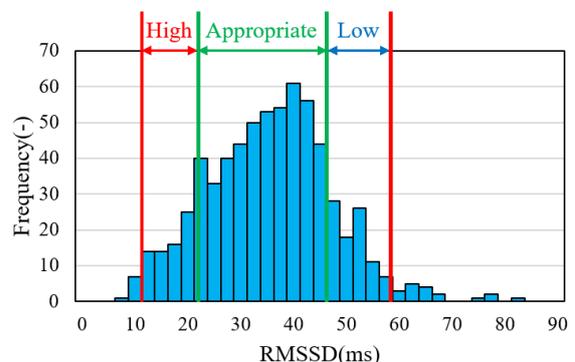


Fig. 3 RMSSD のヒストグラム(11名)

線は平均値±1SDの値、赤い線は平均値±2SDの値であることを意味する。この結果から、平均値±1SDに収まっているRMSSDの値(22.4ms ≤ RMSSD ≤ 46.2ms)を適切なストレス状態と仮定した。また、(46.2ms < RMSSD < 58.1ms)を低ストレス状態、(10.5ms < RMSSD < 22.4ms)を高ストレス状態とし、以下の(2)式よりFB指標Vを作成した。

$$V = \frac{RMSSD - 10.5}{58.1 - 10.5} \times 100 \quad (2)$$

RMSSDが10.5msより小さい時はV = 0, RMSSDが58.1msより大きい時はV = 100になるように補正を行う。

3.3 フィードバック方法

FB方法をFig.4に示す。フルカラーLEDの色によるFBでは、FB指標 V の値が100では青色、50では緑色、0では赤色となり、各状態の間では中間色となることで、連続的にFBを行う。

また、動きによるFBでは、適切なストレス状態の場合、旗の高さが平行になる。低ストレス状態または高ストレス状態が3分間継続した場合、作業者にパフォーマンスの低下を知らせるため、低ストレス状態では青い旗が上昇し、高ストレス状態では赤い旗が上昇することでFBを行う。



Fig.4 フィードバック方法

4. 検証実験

検証実験は、インフォームドコンセントを得た健康な20代男性4名を対象に実施した。

4.1 計算課題

参加者に行ってもらおうVDT作業は、作業内容を統一することを目的として、2桁の加算・減算を採用した。課題は、加算・減算をランダムに出題した。参加者には解答をキーボードで入力してもらい、できる限り早く正確に解答するように教示した。

4.2 ストループ・逆ストループ課題

ストループ課題とは、色名を表す単語とその単語が書かれている実際の色が異なる場合、単語の色を解答する課題であり、逆ストループ課題は単語の意味を解答する課題である。

ストループ・逆ストループ課題は実行機能の評価に用いることができる。Byunらは、10分間の軽運動により実行機能が高まることをストループ・逆ストループ課題の反応時間の変化から明らかにしている⁵⁾。

本実験では、ストループ・逆ストループ課題に使用する色と意味は、「あか、あお、みどり、きいろ」の4色を使用し、文字はひらがなで表示した。ストループ・逆ストループ課題はランダムに出題し、解答時間は1問につき2秒に設定した。

4.3 実験プロトコル

心拍への影響を抑えるため、参加者には最低6時間は睡眠をとり、実験開始1時間前は食事をしないように教示した。

実験は30分間の計算課題を実施し、計算課題前後にストループ課題・逆ストループ課題を実施した。計算課題中は、FlaboによるFBあり条件では、高ストレス時は計算のスピードを落とし、低ストレス時はより素早く計算課題に解答する様に教示した。FBなし条件では、各自

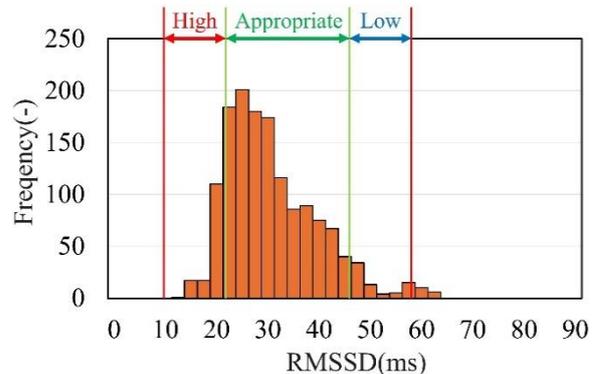


Fig.5 FBあり条件のRMSSDのヒストグラム(4名)

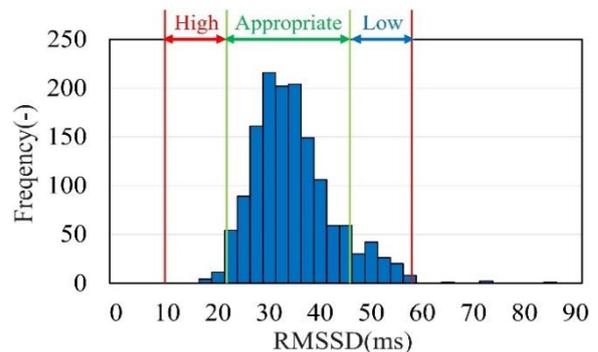


Fig.6 FBなし条件のRMSSDのヒストグラム(4名)

の判断でストレス状態を管理し、計算のスピードを調整してもらった。

5. 実験結果

5.1 計算課題中のRMSSD

30分間の計算課題中のRMSSDからヒストグラムを作成した。FBあり条件をFig.5に、FBなし条件をFig.6に示す。両条件ともに、適度なストレス状態の割合が最も高く、FBあり条件はFBなし条件に比べて高ストレス寄りに偏っていることを確認した。

Flaboの旗の昇降によるFBを受けた参加者は3名であり、1度も旗が昇降しなかった参加者は1名だった。旗の昇降によるFBを受けた参

加者の代表的な結果として、参加者CのRMSSDの結果をFig.7に示す。Fig.7の赤くなっている区間は、参加者Cが高ストレス状態を3分間維持していると判定された結果、Flaboの赤旗が上昇していることを表している。赤旗が上昇した区間のRMSSDを見ると、参加者CのストレスがFBを受けたことで下がっていることがわかる。これは、参加者Cが旗の昇降によるFBを受けて、自身のストレス状態が高ストレス状態であることを認識し、計算のスピードを落として、ストレスを下げようとしたためであると考えられる。このように、旗の昇降によるFBを受けて適度なストレス状態にしようとする動きは旗の昇降によるFBを受けた他の2名でも見られた。1度も旗が昇降しなかった参加者はLEDのみのFBで適度なストレス状態を維持していたと考えられる。

5.2 実行機能の変化

計算課題前後に実施したストループ・逆ストループ課題の誤答数の変化については、両条件ともに平均2問未満で、条件間に明確な差は確認できなかった。

平均反応時間の変化について比較した結果をFig.8に示す。FBあり条件では、作業前後で平均反応時間が減少しているのに対し、FBなし条件では平均反応時間が増加していることを確認した。これは、FBあり条件では実行機能が向上し、FBなし条件では低下したことを示している。

Fig.5, Fig.6, そしてFig.8の結果から、FBあり条件はFBなし条件に比べて、高ストレス寄りのRMSSDが多いが、実行機能は向上していることがわかる。そのため、実行機能が向上するRMSSDの範囲が、本研究で定義した高ストレス状態と適度なストレス状態の境目付近だった可能性がある。

6. 結言

本研究は、VDT作業者にストレス状態をFBする小型パートナーロボットFlaboを開発した。実験の結果から、Flaboを使用することで自身のストレス状態をコントロールしながら作業を進めることが可能となり、実行機能が向上することがわかった。また、実行機能が向上する適度なストレス状態は、本研究で定義した高ストレス状態と適度なストレス状態の境目付近だった可能性がある。

課題点としては、実験参加者が4名と少ないことが挙げられる。今後は実験参加者を増やしFlaboの有効性の検証を行う予定である。

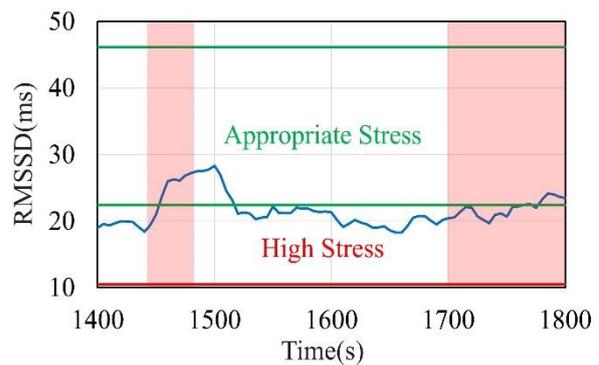


Fig.7 参加者CのRMSSDの時系列変化

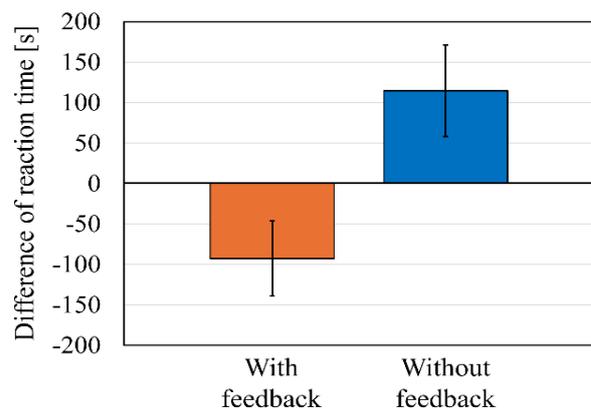


Fig.8 平均反応時間の比較(4名)

参考文献

- 1) 厚生労働省: 平成20年技術革新と労働に関する実態調査; (2008) <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/48-20.html>, (2024.07.01閲覧).
- 2) Robert M. Yerkes, John D. Dodson: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation; *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, Vol.18, No.5, (1908), pp.459-482.
- 3) 渡部真, 宍戸道明: 視覚と聴覚のバイオフィードバックにおける集中力向上効果の比較検討, *科学・技術研究*, Vol.5, No.1, (2016), pp.41-46.
- 4) U. Nussinovitch, K.P. Elishkevitz: Reliability of Ultra-Short ECG Indices for Heart Rate Variability; *Ann Noninvasive Electrocardiol*, Vol.16, No.2, (2011), pp.117-122.
- 5) Byun, K., Hyodo, K., Suwabe, K., et al: Positive effect of acute mild exercise on executive function via arousal-related prefrontal activations: An fNIRS study, *NeuroImage*, Vol.98, (2014), pp.336-345.