

# バイオフィードバックを用いた学習支援ロボット Ovot の開発

## — 認知課題成績の比較 —

日大生産工(院)      ○葦川 颯人      日大生産工(学部)      菊池 俊行  
日大生産工(学部)      林田 みさき      日大生産工      柳澤 一機

### 1. 緒言

近年、人手不足の影響により、様々な現場でロボットの導入が進んでいる。教育現場では、ロボットが先生として課題の提示や採点を行うことで学習を支援する学習支援ロボットが導入されている。学習支援ロボットは、現在主流であるタブレット学習と異なり、豊かに表現される表情や音声によって学習者とコミュニケーションを行うことができる。

しかし、ロボットによる学習支援方法は、ロボットが学習者の状態を認識できないため、学習者の状態を重視せずに学習支援を行ってしまうことが課題である。特に、学習中のストレス状態はパフォーマンスに大きく影響を与え、その関係性はFig.1に示すヤーキーズ・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、適切なストレス状態ではパフォーマンスが向上し、眠気や疲れを感じている低ストレス状態や、不安や疲労を感じている高ストレス状態では、パフォーマンスが低下することを示した法則である。そのため、パフォーマンスの高い学習を行うためには、学習者本人が自身のストレス状態を認識し、適切なストレス状態を維持する必要がある。そこで、学習者に自身のストレス状態を認識させる学習支援ロボットを開発することで、高いパフォーマンスを維持できる可能性がある。

学習者にストレス状態を認識させる方法として、バイオフィードバックという方法が挙げられる。バイオフィードバックとは、通常知覚できない生理活動の状態を工学手段で検出し、その情報を知覚できるように提示することにより、訓練を通じてその生理活動の随意制御を可能とする技法である<sup>1)</sup>。学習中にストレス状態をバイオフィードバックすることで、学習者は自身のストレス状態を認識し、高いパフォーマンスを維持できる可能性がある。

本研究では、生体情報として心拍情報を用い

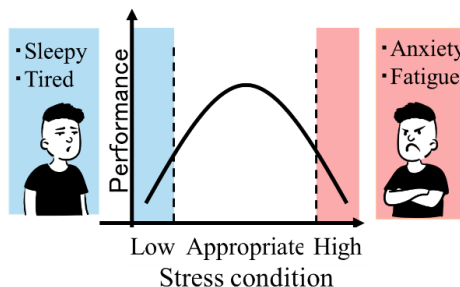


Fig.1 Yerkes-Dotson's law

てバイオフィードバックを行う学習支援ロボットを開発する。学習中に学習支援ロボットによるバイオフィードバックの有無がストレス状態に及ぼす影響と、学習前後のパフォーマンスの変化を認知課題であるストループ・逆ストループ課題の成績から比較し、ロボットの有効性を検証する。

### 2. 心拍情報によるストレス評価

学習の阻害をせずに生体情報からストレス状態を評価する手法として、心拍情報に注目する方法がある<sup>2)</sup>。一般に、ヒトは高ストレス状態では心拍変動の間隔(R-R Interval:以降RRI)が小さな値で安定し、心拍数が大きくなると言われている。反対に低ストレス状態では、RRIのばらつきが大きくなるといった特徴がある。

これを利用して、RRIをローレンツプロットした面積からストレス評価を行うことができる。ローレンツプロットとは横軸に $k$ 番目のRRI、縦軸に $k+1$ 番目のRRIをグラフ上にプロットし、楕円で近似した面積の大きさからストレス状態を評価する方法である。RRIをローレンツプロットした面積の概念図をFig.2に示す。ローレンツプロットされたすべての点を、 $y = x$ と $y = -x$ 軸に投影する。投影後、 $y = x$ において原点からの距離の標準偏差を $\sigma_x$ 、 $y = -x$ において原点からの距離の標準偏差を $\sigma_{-x}$ とする。したがって、長軸 $\sigma_x$ 、短軸 $\sigma_{-x}$ とする楕円の面積 $S$ は(1)式で求めることができる<sup>3)</sup>。

Development of “Ovot” a learning support robot using biofeedback

— Comparison of cognitive task performance —

Hayato ASHIKAWA, Toshiyuki KIKUCHI, Misaki HAYASHIDA and Kazuki YANAGISAWA

$$S = \pi \times \sigma_x \times \sigma_y \quad (1)$$

高ストレス状態と低ストレス状態のローレンツプロットの面積 $S$ の例をFig.3に示す. 高ストレス状態の場合, RRIが小さな値で安定するため, RRIをローレンツプロットした点は近い位置に集中し, Fig.3(a)のように面積 $S$ は小さくなる. 反対に, 低ストレス状態の場合はRRIのばらつきが大きいため, RRIをローレンツプロットした点は広範囲にプロットされ, Fig.3(b)のように面積 $S$ が大きくなる.

### 3. 開発した学習支援ロボットOvot

#### 3.1 Ovotの概要

本研究では学習者のストレス状態をバイオフィードバックする学習支援ロボットを開発した. 開発した学習支援ロボットの外見をFig.4に示す. ロボットの見た目はシンプルな無機物として卵型にし, 名前はラテン語で卵を意味するOvoとRobotを組み合わせさせてOvotと名付けた. Ovotの大きさは, ラグビーボールくらいの大きさであり, 学習者へのストレスフィードバックはLEDの色の変化やロボット上部の昇降によって行う<sup>4)</sup>.

Ovotの制作過程をFig.5に示す. Ovotの設計にはAutodesk社製の3DCADソフトFusion 360を用いた. 作成した3DモデルをFig.5(a)に示す. 作成した3Dモデルは, 3Dプリンタを用いて出力した. 出力したOvotをFig.5(b)に示す. 出力したOvotは表面を磨いて塗装し, Fig.5(c)のように仕上げた.

また, バイオフィードバックを行うための内部機構の作成にはレーザー加工機でアクリル板を切り出し, リンク機構を作成することで行った. Ovotの下部にはタッチパネルを取り付け, ストレスの計測開始や停止, データの保存などの各種操作を行えるように設計した.

#### 3.2 Ovotのシステム図

Ovotのシステム概要図をFig.6に示す. 学習者のRRIの計測には, Polar社製の心拍センサーPolar H10を使用した. Polar H10を学習者の胸部に装着し, RRIをBLE通信でOvotに搭載された小型シングルボードコンピュータであるRaspberry Piに送信する. Raspberry Piでは, RRI受信の60秒後からローレンツプロットの面積を算出し, 計測時点でのローレンツプロットの面積 $LP$ , 算出したローレンツプロットの最大面積 $LP_{max}$ , 最小面積 $LP_{min}$ を用いて正規化を行い, 以下の(2)式を用いてス

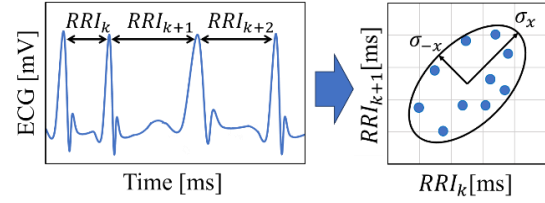


Fig.2 Lorenz plot in RRI

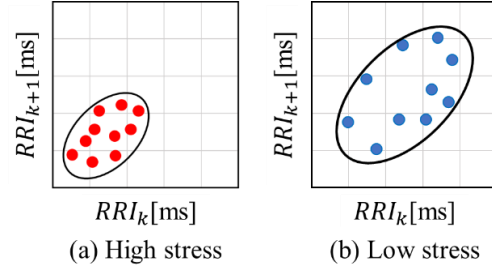


Fig.3 Example of Lorenz plot



Fig.4 Learning support robot (Ovot)

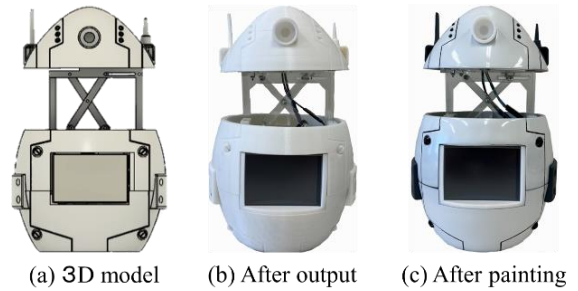


Fig.5 Ovot's production process

トレス評価指標 $V$ を作成する.

$$V = 100 - \frac{LP - LP_{min}}{LP_{max} - LP_{min}} \times 100 \quad (2)$$

(2)式からストレス状態は0~100の値で算出される. Ovotは $V$ が0~30を低ストレス状態, 31~69を適切なストレス状態, 70~100を高ストレス状態と定義した. $V$ に応じてArduinoにシリアル通信を行い, サーボモータとフルカラーLEDをPWM信号で制御し, ストレス状態を学習者にフィードバックする.

### 3.3 フィードバック方法

Ovot によるストレスのフィードバック方法を Fig.7 に示す。Ovot は学習者のストレス状態に応じて、フルカラーLED の色の変化とロボット上部の昇降によりフィードバックを行う。色によるフィードバックでは、低ストレス状態では青色、適切なストレス状態では緑色、高ストレス状態では赤色、各状態の間では中間色のように変化する。LED の色は  $V$  に応じて連続的に変化するため、学習者のストレス状態をリアルタイムにフィードバックしている。

Ovot の昇降によるフィードバックでは、適切なストレス状態では学習の障害をしないようにロボット上部が閉じた状態となる。パフォーマンスが低下してしまう可能性がある低ストレス状態及び高ストレス状態を 5 分間維持し続けた場合のみロボット上部が上昇し、学習者にパフォーマンスの低下を認識させる。

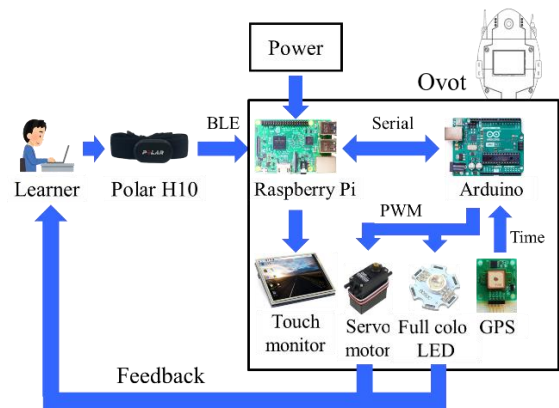


Fig.6 Ovot's system diagram

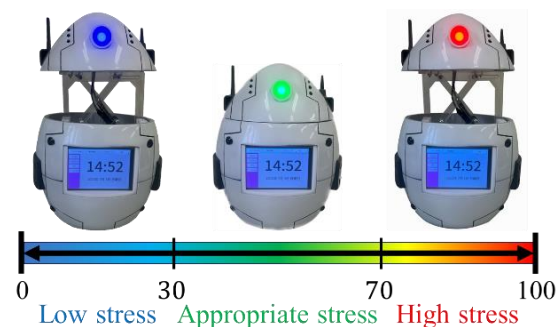


Fig.7 Stress feedback method

## 4. 検証実験

### 4.1 実験概要

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名と女性1名の計5名を対象に、日本大学生産工学部の倫理委員会(承認番号:S2023-003, バイオフィードバックを用いた学習支援パートナーロボットの効果検証)の承認を得て行った。実験プロトコルをFig.8に示す。学習中にOvotによるバイオフィードバックの有無がストレス状態に及ぼす影響と、学習前後のパフォーマンスの変化を、認知課題であるストループ・逆ストループ課題の平均反応時間と誤答数から比較し、Ovotの有効性を検証した。

### 4.2 Ovotによるバイオフィードバック実験

RRIから学習者のストレス状態を評価し、Ovotがバイオフィードバックを行うことで、学習者は適切なストレス状態を維持できるか検証した。各参加者には学習中にOvotによるバイオフィードバックありとなしの条件を1回ずつ行ってもらい、順序効果を考慮し条件は参加者ごとにランダムで設定した。

各条件を行う時間は60分間とし、その間はOvotの全体像が見える位置で試験勉強や論文作成といった学習時間を設けた。フィードバックありの条件ではOvotが提示するストレス状態に応じて休憩などのストレス管理を行ってもらい、フィードバックなし条件では各自の判断でストレス管理を行ってもらった。

Stroop・Revers stroop task	Study time (with or without feedback)	Stroop・Revers stroop task
8.5 min	60 min	8.5 min

Fig.8 Experimental protocol

Ovotがバイオフィードバックを行うことで、ストレス管理が容易になり、適切なストレス状態を維持することができると仮定し、60分間の学習中に適切なストレス状態を維持した時間の割合からOvotの有効性を検証した。

### 4.3 パフォーマンスの評価実験

学習時間の前後に、認知課題であるストループ・逆ストループ課題を行い、平均反応時間及び誤答数の変化を比較した。ストループ課題とは、色と意味が異なる文字を表示した際に、文字の色を解答する課題であり、逆ストループ課題は文字の意味を解答する課題である。

ストループ・逆ストループ課題を用いた先行研究としてByunらは、ストループ課題・逆ストループ課題の反応時間を評価指標にし、10分間の軽運動でも実行機能を支配する前頭前野の活動が高まること、実行機能が実際に高まることを明らかにしている。そのため、本研究でもパフォーマンスの比較にストループ・逆ストループ課題を使用した。

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」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で出題し、各32問ずつ、計64問出題した。課題の解答時間は1問につき2秒に設定した。

Ovotを使用し、適切なストレス状態を維持することで、学習者は実行機能が低い状態になると仮定し、学習前後の平均反応時間と誤答数の変化を比較した。

## 5. 実験結果

### 5.1 Ovotによるバイオフィードバック結果

有効参加者5名において、学習中に各条件を行った際の、適切なストレス状態を維持した割合を平均した結果をFig.9に示す。Fig.9より、ストレス状態のフィードバックあり条件のほうが、フィードバックなし条件よりも適切なストレス状態を維持した割合が多くなっていることがわかる。これは、OvotがLEDの色や昇降によってストレス状態をフィードバックしたことにより、適切なストレス状態を長期間維持することができた可能性を示している。

### 5.2 パフォーマンスの評価結果

有効参加者5名において、各条件の前後に行ったストループ・逆ストループ課題の平均反応時間と誤答数の変化から、学習者のパフォーマンスを評価した。

学習者の誤答数の変化については両条件とも平均6問程度で、条件間に明確な差は確認できなかった。

また、平均反応時間について比較した結果をFig.10に示す。ストレスのフィードバックあり条件では学習前後で平均反応時間が減少しているのに対し、フィードバックなし条件では増加している。これは、適切なストレス状態を維持したことによって実行機能が高まり、課題に対してすばやく解答できたことを示している。

## 6. 結言

本研究では、バイオフィードバックを用いた学習支援ロボットOvotを開発した。学習中にOvotバイオフィードバックの有無がストレス状態に及ぼす影響と、学習前後のパフォーマンスの変化を認知課題であるストループ・逆ストループ課題の成績から比較した。実験の結果から、学習中にOvotを使用することで、適切なストレス状態をより長く維持できることがわかった。また、適切なストレス状態を維持し実行機能が高まったことで、ストループ・逆ストループ課題の平均反応時間が減少することがわ

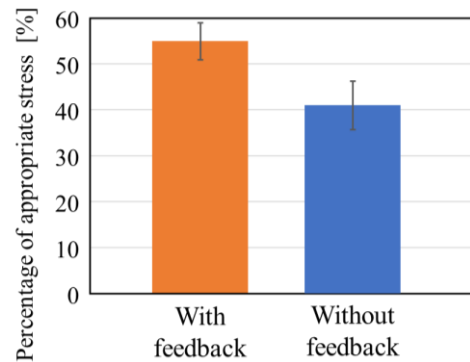


Fig.9 Averaged result for rate of appropriate stress state (5 participants)

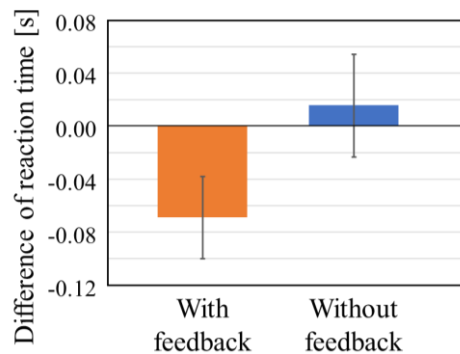


Fig.10 Averaged result for reaction time (5 participants)

かった。今後は実験参加者を増やし、統計解析を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 福長一義 他, NIRSを用いたニューロフィードバックのシステムの開発, 杏林医学誌, No.42, Vol.1, pp.2-11, (2011).
- 2) 吉田隆, 「パーソナル・ヘルスケア ～ユビキタス ウェアラブル医療実現に向けたエレクトロニクス研究最前線～」, 新日本印刷株式会社発行, (2013).
- 3) 豊福史 他, 心電図 RR 間隔のローレンツプロットによる副交感神経活動の簡易推定法の開発, 人間工学, Vol 43, No4, (2007), pp.185-192.
- 4) 葦川颯人 他, バイオフィードバックを用いた学習支援ロボットOvotの開発と検証, ヒューマンインターフェースシンポジウム2023, (2023), pp.631-634.
- 5) Byun. 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.