

ユーザーとの持続的つながりを形成する バイオフィードバック機能を備えたロボットシステムの開発

日大生産工(院) ○菊池 俊行 日大生産工(学部) 清水 敦大 日大生産工(学部) 中村 大輔
日大生産工(学部) 高橋 知弥 日大生産工(学部) 岩渕 悠大 日大生産工 柳澤 一機

1. 緒言

近年、人間の心身状態をセンシングし、その情報をフィードバックするバイオフィードバック (Biofeedback:以下BFB) 技術が注目を集めている。BFBとは、通常は意識的に知覚できない生理活動を工学的手段で検出・可視化し、感覚的提示によって生理活動の随意制御を促す技法である。特にウェアラブルデバイスの進展により、心拍数や皮膚電位などの生理情報を日常的に取得することが容易になり、BFBは医療・ヘルスケア領域におけるストレス管理やリラクゼーション促進など幅広い応用が期待されている。

横須賀らは、心拍間隔(R-R Interval:RRI)からRMSSD (Root Mean Square of Successive Differences)を算出し、それをストレス指標としてフィードバックするパートナーロボット「Flabo」を開発した¹⁾。ユーザのストレス状態を可視化し、ロボットを介して音や光でフィードバックすることで、ユーザが自身の心理的状態に気づき、ストレスを自己調整できる可能性を示した¹⁾。

しかしながら、既存の研究の多くは短時間のBFB効果検証にとどまり、ロボットやエージェントとの長期的な関わりが人の感情、行動、ストレス耐性にどのような影響を及ぼすかについては十分に明らかにされていない。高橋は、従来のエージェント研究は、多くが短時間の対面的なやり取りに焦点を当てており、長期的に人とともに生活を共にできるエージェントの存在が今後の重要な課題であると述べている²⁾。さらにKoayらは、人がロボットからのフィードバックに慣れ、注意や関心が低下する可能性を報告し、継続的な関係構築においては感覚刺激の単調化を防ぐことが課題であると述べている³⁾。

これらを踏まえ、本研究ではユーザとの持続的なつながりを形成し、BFBを長期的に継続できるロボットシステムの構築を目的とする。単なるストレス評価デバイスではなく、感覚的・物語的な要素を併せ持つ「寄り添う存在」としてロボットを設計することで、ユーザの関心と愛着を維持しつつ、心理的安定化を支援することを目的とする。

2. 心拍情報による自律神経指標

ストレスの定量化にはさまざまな生理指標が提案されているが、唾液中のコルチゾールや脳波計測は侵襲性・準備時間・動作制限の観点から日常利用には不向きである。これに対して心拍変動(Heart Rate Variability:HRV)は非侵襲であり、短時間かつ身体動作の自由度を保ちながら測定できることから、実生活下のBFBに適した指標として知られている。

HRVは心電図(Electrocardiogram:ECG)におけるR波間隔(R-R Interval:RRI)の時間的変動であり、交感神経と副交感神経のバランスを反映する。交感神経が優位なときはRRIが短く揺らぎが小さくなり、一方で副交感神経が優位なときはRRIが長く揺らぎが大きいという特徴がある。つまりRRIの変動を分析することで、ストレスの程度やその変化を非侵襲的に把握することが可能となる。

RRIからストレス評価を行うための解析方法は複数存在しており、今回は短時間での解析に対応できる、RMSSDという副交感神経活動の指標を利用する。

3. ロボットシステム概要

3.1 ロボットコンセプト

ユーザとの持続的なつながりを形成するためには、感覚的要素と物語的要素の両方を備えることが重要である。高橋は「自分の日常と交わる物語」の意義を述べており²⁾、感覚的な情報と物語的な体験を結びつけることで日常的関与を促進できるとしている。

パートナーロボットゆめぼ⁴⁾は、ユーザに寄り添う関係性の構築を目的とし、感覚的寄り添いとして「手のひらサイズのロボットによる触覚・視覚・聴覚的反応」を、物語的寄り添いとして「存在理由を持つバックストーリー設定による意味的つながりの形成」を提案している。

この設計思想を基に、両要素を取り入れたロボットを構築した。物語的寄り添いの要素としては、ゆめぼで提案されたバックストーリー設定の考え方を踏襲し、ロボットに存在理由を与えることで、

Development of a robotic system equipped with biofeedback functionality to
establish sustained connections with user

Toshiyuki KIKUCHI, Atuhiro SHIMIZU, Daisuke NAKAMURA,
Tomoya TAKAHASI, Yuta IWABUTI and Kazuki YANAGISAWA

ユーザがその関わりに意味を見出せる構成とした。また、感覚的寄り添いの要素については、触覚・視覚・聴覚的反応を統合的に設計・実装し、ユーザの触れ方や動きに応じてLEDや表情、音が穏やかに変化する応答を実現した。

これにより、本ロボットシステムは、物語的背景による意味的つながりと感覚的反応による情緒的つながりの双方を備え、日常の中で自然に寄り添う相棒的存在として設計した。

3.2 ハードウェア構成

本研究で開発したシステムは、ユーザとの日常的なインタラクションを担うモバイルロボットと、充電およびストレスのBFB機能を実行するBFBロボットの2つのモジュールから構成される。図1に機体の外観を示す。筐体は3Dプリンタで造形されており、ユーザが日常的に携帯できるよう小型軽量な設計とした。

モバイルロボットは、ユーザが常に携帯することを想定した小型のデバイスである。内部には、ユーザからのインタラクションを検出するためのタッチセンサ(TTP223)と6軸加速度センサ(GY-521)を搭載している。これにより、「なでる」「持ち上げる」「揺らす」といったユーザの行動を認識することが可能である。これらの入力情報は、制御部であるArduino Nano Everyによって処理される。そして、フルカラーLEDによる光の変化、OLEDディスプレイ上の表情表示、およびDFPlayer miniを介した音声出力によって、ユーザに対してフィードバックを行う。

BFBロボットは、デスク等への設置を想定した定置型のモジュールであり、モバイルロボットの格納・給電、および心拍変動の解析、BFB信号の作成の役割を担う。

モバイルロボットとBFBロボットは、それぞれの筐体に内蔵された磁石によって物理的に接続される。この磁力による接合機構は、容易な着脱を可能にし、一体感を確保する役割を持つ。

モバイルロボットとBFBロボットにおける電気的な接続は、BFBロボット側に搭載された図2に示すスプリング式コネクタと、モバイルロボット側に設けられた金属製の接触端子によって行われる。両モジュールが結合する際、BFBロボットのコネクタがモバイルロボットの端子に圧接することで、電源供給およびデータ通信の経路が確立される。このデータ通信にはUART(シリアル通信)方式を採用しており、モバイルロボットからBFBロボットへ、解析されたストレス指標値がリアルタイムに送信される。この機構は、ケーブルの抜き差しといった煩雑な操作をなくし、ユーザが簡単かつ直感的に着脱できることを目的として採用した。

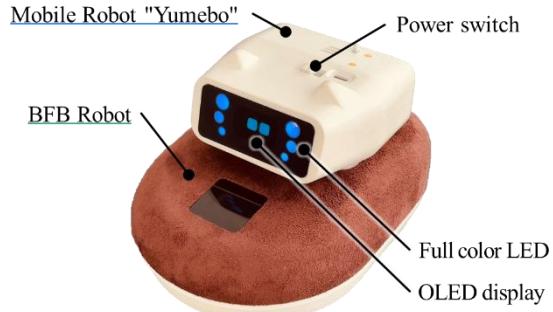


Fig.1 ロボットシステムの外観

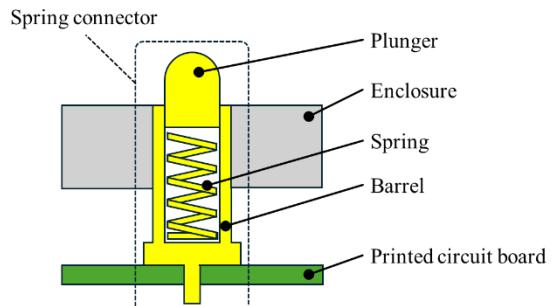


Fig.2 スプリング式コネクタ

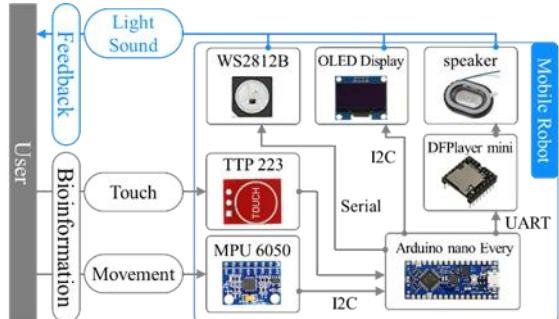


Fig.3 携帯運び時におけるロボットシステム構成⁴⁾

3.3 システム動作とデータ通信

本システムは、ユーザの状況に応じて「モバイルモード」と「BFBモード」の2つのモードで動作する。

持ち運び時であるモバイルモードのシステム構成を図3に示す。このモードでは、モバイルロボットが単体で動作し、タッチセンサや加速度センサからの入力に基づき、Arduino Nano EveryによってLED、ディスプレイ、音声を利用して感情表現を行う。

デスクでの使用時であるBFBモードのシステム構成を図4に示す。ユーザがモバイルロボットをBFBロボットに接続すると、システムはこのモードへ移行する。

この状態では、まずユーザの心拍データが胸ストラップ式心拍センサPolar H10からBLE通信を介してワイヤレスで取得される。取得されたデータはモバイルロボット内のRaspberry Piに送信され、

そこで心拍変動解析が行われ、ストレス状態を評価する指標としてRMSSDが算出される。

次に、モバイルロボットとBFBロボットを接続しているスプリング式コネクタを介して、給電と共に有線でのデータ通信経路が確立される。この有線経路を通じて、Raspberry Piでの解析結果がArduino Nano Everyへシリアル通信で送信され、BFBロボットが主体となってユーザに対してストレスのフィードバックを実行する。

このように、システム全体が単なるBFB機構に留まらず、ユーザの生活に寄り添い、継続的な関係性を支える日常行為の一部となるよう設計した。

3.4 電源システム

本システムは、モバイルモードでのバッテリー駆動と、BFBモードでの外部電源駆動を使い分ける。

電源回路は、Arduino Nano Everyがバッテリー駆動か外部電源駆動かを判別できるよう設計した。また、バッテリーと外部電源が同時に電源入力されることを防ぐため、ロードスイッチ(TCK108AF)を実装し、電源ソースを自動で切り替えることが可能である。さらに、バッテリーから外部電源回路への電流の逆流を防止するため、ショットキーバリアダイオード(SS2040FL)を配置し、システムの安全性を確保した。

3.5 フィードバック指標

榎本らはRMSSDの分布特性に基づき、平均値±1標準偏差で適切なストレス状態を定義できる可能性を示した⁵⁾。本研究ではこの手法に基づき、RMSSDが10.5[ms]以下を高ストレス($V=0$)、58.1[ms]以上を低ストレス($V=100$)とし、中間値を線形補間した指標 V を作成した。この V 値をリアルタイムで算出・更新することで、ユーザのストレス状態を定量的かつ連続的に把握することが可能になる。

3.6 フィードバック方法

指標 V に基づきLED、ディスプレイ、音声の3つの方法でユーザにフィードバックを行う。

LEDは、 V の連続的な変化をリアルタイムで視覚化する。LEDの色は、5秒ごとに更新され、 $V=0$ (低ストレス)を赤色、 $V=100$ (高ストレス)を青色とし、その間の値は赤から青への連続的なスペクトル変化として表現される。ディスプレイは、段階的な表情を視覚的に提示する。具体的には図5に示すように、高ストレスでは緊張、中間では安定、低ストレスでは穏やかな表情を表示する。

音声は高・低ストレス状態が5分継続した場合のみ鳴き声で通知する。これは、一時的なストレスの揺らぎによる頻繁な通知で集中を妨げず、持続的なストレス傾向を捉え、必要なタイミングでのみ注意を促すことを目的としているためである。

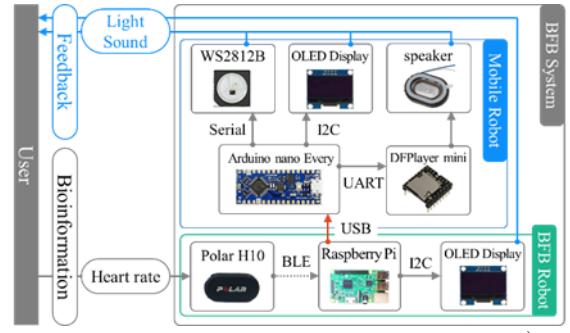


Fig.4 BFB時におけるロボットシステム構成⁴⁾



Fig.5 BFB時におけるフィードバック方法

4. 結言

本研究では、ユーザとの持続的なつながりを形成するBFB機能付きロボットシステムを開発した。

感覚的および物語的要素を持つ小型ロボットを基盤とし、日常的接触とストレスのBFBシステムを統合した長期的関与システムを提案した。今後はさらなる検証実験データを進め、継続使用によるBFB効果の分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 横須賀晴鷹:VDT 作業者にストレス状態をフィードバックする小型パートナーロボットの開発と評価;日本大学大学院生産工学研究科修士論文, (2024).
- 2) 高橋英之, 人に優しいロボットのデザイン, 福村出版株式会社, (2022).
- 3) Kheng Lee Koay et al, Living with Robots: Investigating the Habituation Effect in Participants' Preferences During a Longitudinal Human-Robot Interaction Study, RO-MAN 2007 - The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, (2007), pp. 564-569.
- 4) 菊池俊行, 伊藤景, 柳澤一機:ユーザとの持続的なつながりを形成するパートナーロボット ゆめぼの提案;ヒューマンインターフェースシンポジウム2025講演論文集, (2025), P037.
- 5) 榎本隆士:心拍変動バイオフィードバックシステムのためのストレス評価指標の評価;日本大学大学院生産工学研究科修士論文, (2024).