

# 心拍に応じて瞳孔表現が可能なプロトタイプ システムの作成

井口万央<sup>1</sup> 井口拓海<sup>2</sup> 佐藤未来子<sup>1</sup> 渡辺晴美<sup>1</sup>  
菅谷みどり<sup>2</sup>

**概要:** 本研究は、癒しを与えるペットロボットのアイコンタクトを可能にするために、ロボットの瞳孔表現と利用者の生体情報との関係性を明確にすることに貢献する。癒しを与えるペットロボットの多くは動物の振る舞いを再現し人の元気を引き出す心理的作用を利用して癒しを与えようとしている。更なる発展として、感情との結びつきがあるとされている生体情報を入力とし、それを動きに反映することが可能になれば今までのペットロボットよりも確実に癒しを与えられることが期待され、研究が行われている。現在、生体情報とロボットのアイコンタクトとの関係性は明らかになっていない。本研究ではペットロボットのアイコンタクトとして瞳孔表現に着目し、ペットロボットの利用者の生体情報と関連付けるフレームワーク EyeROS を提案する。EyeROS フレームワーク上に構築した犬型ロボットの inputs は、触れ合う利用者が身に付けた心拍センサであり、出力はロボットの瞳孔の大きさ変化である。これらの入出力関係を明らかにすることで瞳孔表現と利用者の生体情報の関係性を評価し、癒しを与えるアイコンタクトが可能なロボットの実現を目指す。

**キーワード:** ペットロボット, 心拍情報, 瞳孔表現

## 1. はじめに

近年日本では様々なストレスを抱えて生活している人が多い。厚生労働省の個人調査では対象者の内、仕事や職業生活に関することで強い不安やストレスとなっていると感じる事柄があると答えたのは 54.2[%]であったことが報告されている[1]。

ストレスを軽減させるために癒しを与えることを目的としたロボットとして、パロ[2]や AIBO[3]などが発売されている。これらのロボットはセンサを用いて人からの声掛けやロボットに対する物理的接触を検知してそれに反応する[2][3]。更に撫で方や周りの音にしっぽを動かして反応する Qoobo[4]や、人の手助けを引き出す NICOBO[5]等の様な人に行動を起こさせ人々に癒しを与えるペットロボットが今後増えていくと考えられる。上述したロボット[2-5]は本物の動物の振る舞いを再現し、人の元気を引き出す心理的作用を利用して癒しを与えようと動作している。

既存研究として感情を推定する手法[6]やコミュニケーションにおける目の役割に関するもの[7-10]がある。感情を推

定する研究[6]の原理を利用し感情をリアルタイムに測定しながらロボットの行動に反映させる研究[11-12]も存在しているが、生体情報と瞳孔に基づいたロボットの表現は明らかになっていない。瞳孔表現は、目による情動が反映されやすい反応として、情動を伴った行動との関連性[7]や、それを反映したロボットの反応した場合の有効性について[8-9]研究が行われている。コミュニケーションにおいて相手の目を見ることは重要視され、親密なコミュニケーションの実現には視線等の非言語情報によって同調し合い、一体感を生み出し共感を深めていく必要があると言われている[8]。それは人間同士のみならず動物にも通じることであり[10]、動物の振る舞いを再現しているペットロボットにも大事な要素であると考えられる。

以上を踏まえ、リアルタイムに計測した生体情報から感情を推定し、癒しを与えるために適切なアイコンタクトを取るためのフレームワーク EyeROS を提案する。EyeROS を実現することで様々なロボットへ容易に癒しを与えるようなアイコンタクトを取る機能を実装する。そこで本研究では EyeROS を用いて犬型ロボットを実現し、生体情報と瞳

<sup>1</sup> 東海大学  
Tokai University  
<sup>2</sup> 芝浦工業大学

Shibaura Institute of Technology

孔表現をどのように関連付けると相手にどのような影響を与えることができるか実験を通して評価する。

本論文は以下の構成である。第 2 節は関連技術であり、EyeROS の入力と出力として扱う心拍情報と瞳孔の表現に関する関連技術について述べる。第 3 節は EyeROS の提案であり、EyeROS や犬型ロボットのシステム構成、瞳孔の大きさの定め方について述べる。第 4 節は実験であり、実際に行った心拍情報と瞳孔表現の関連性を調べる実験について述べる。第 5 節では結果であり、第 4 節で述べた実験結果の提示について述べる。第 6 節では第 5 節の結果を基に心拍情報と瞳孔表現の関連性や改善点について述べる。第 7 節は結論であり、本研究で得られた成果について述べる。

## 2. 関連技術

本節では、EyeROS の入力と出力に当たる心拍情報と感情に関する技術と瞳孔表現に関する技術について述べる。

### 2.1 心拍情報からの感情推定方法

池田ら研究では感情推定を行うために x 軸を快・不快の指標として心拍情報から算出される pNN50 を、y 軸の覚醒度に脳波情報の数値をそれぞれラッセルの円環モデルに当てはめて感情の分類と強さを推定している[6]。pNN50 とは図 1 の心拍の間隔時間 Hbt\_x, 隣接する Hbt\_x の差を Diff\_x ( $|Hbt_1 - Hbt_0| = Diff_0$ ,  $|Hbt_2 - Hbt_1| = Diff_1$ ...)と定義した場合、一定区間内の Diff\_x が 50[ms]を超えた個数の割合を指す [6]。図 1 の Hbt\_x は最も振幅が大きい R 波と R 波の間隔として R-R 間隔と言われており、自律神経系や内分泌系による調整を受けて体位や精神的活動の状態により影響を受け変動する[13]。人にストレスが加わると心臓交感神経が興奮し、同時に心臓副交感神経が抑制された結果、R-R 間隔の平均値が小さくなることを利用し、この平均値と主観的ストレス値との相関が強いことが報告されている[13]。R-R 間隔は変動しているがストレスがかかった場合、隣り合った R-R 間隔の時間差が 50[ms]を超えることも少なくなり結果 pNN50 の値も小さくなり、緊張した状態であることを示している。逆に pNN50 の値が大ききときは R-R 間隔の時間差が大きくなり、50[ms]を超えることも多くなり結果、リラックスした状態であることを示している。

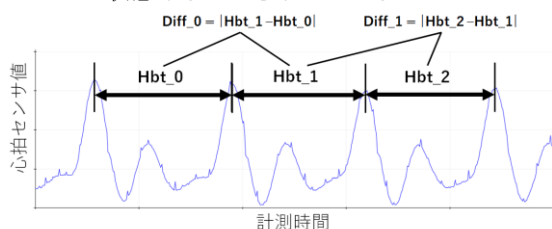


図 1 心電図の波形と各パラメータ

### 2.2 瞳孔の反応

コミュニケーションにおける瞳孔の変化や相手に与える印象について様々な研究が存在する。例えば自然な笑い作り笑いにおける印象と瞳孔反応の関係を調べた結果、快を伴った自然な笑いが発生した時の瞳孔径が通常時の約 1.23 倍拡大し、快を伴わない作り笑いの場合は通常時の約 0.85 倍まで瞳孔が縮小することが示されていることが報告されている[7]。更に対話者が笑うタイミングで快を伴った笑いの瞳孔反応を片目のみのインターフェースで実行させたときに共感や親近感が向上したという実験結果が報告されている[8]。このことから瞳孔の変化はコミュニケーションにおいて相手の印象に十分に影響を与え、癒しを与える可能性が高いと言える。

上記の瞳孔表現の効果を得る方法としては、液晶に映し出す画像を変化させることで簡易に再現が可能である。CG キャラクタと片目のみのインターフェースの瞳孔を変化させ被験者の印象を評価した実験が存在し、どちらのメディアでも瞳孔拡大時と縮小時で印象に変化があったことが報告されている[9]。

## 3. EyeROS

EyeROS は生体情報を入力とし、アイコンタクトを出力とするフレームワークである。癒しとは精神的な不安や苛立ちなどを鎮め平安な気分させることと解説されており[14]、EyeROS ではリラックスにすることが癒しを与えることであると解釈して心拍情報を EyeROS の入力とする。そして心拍情報を基に実行する反応に瞳孔表現を採用する。

図 2 に EyeROS を用いて実現した犬型ロボットの構成を図示する。本実験では心拍情報から瞳孔表現のみを行うが、将来的に様々な入力情報からユーザが癒しを与える表現豊かなアイコンタクトを出力可能なフレームワークを目指している。また今後 EyeROS を様々なロボットで使えるようにするため、今回犬型ロボットへの実装は ROS[15]に対応させる。ROS とはオープンソースで提供されるロボット向けのメタ・オペレーティングシステムであり、機能や通信の拡張や追加が容易であることが特徴である[15]。EyeROS を用いて実現した犬型ロボットのシーケンス図を図 3 に図示する。心拍情報から pNN50 を算出し EyeROS へ受け渡し、EyeROS から出力される瞳孔の大きさを EyeSystem へ送信し、ディスプレイに表示させる処理を行う。

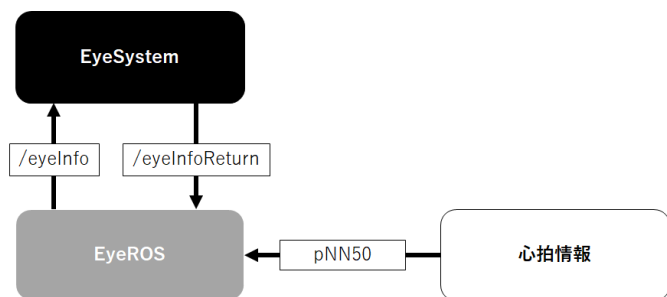


図 2 EyeROS を組み込んだ犬型ロボットの概要図

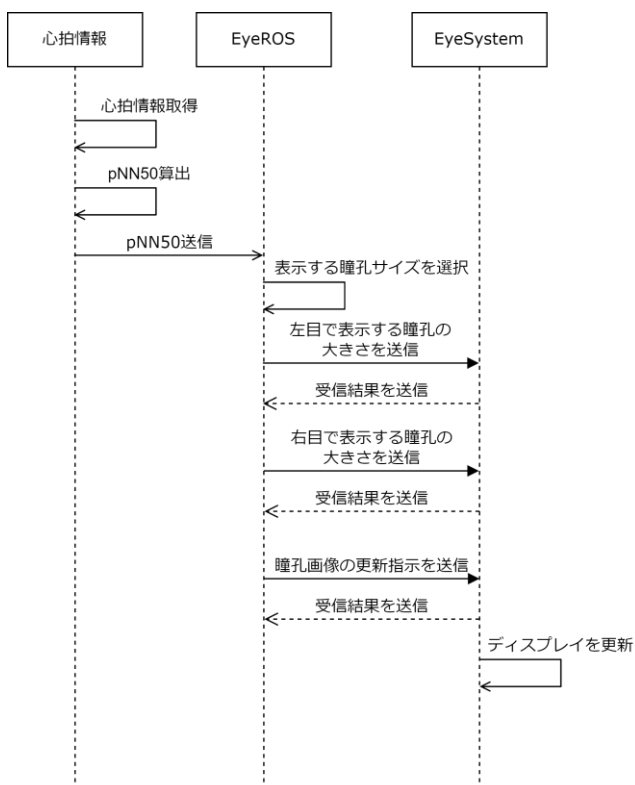


図 3 犬型ロボットのシーケンス図

以降は犬型ロボットにおいて瞳画像の表示を実行する EyeSystem と EyeROS における瞳の大きさの定め方について述べる。

### 3.1 EyeSystem

EyeSystem は EyeROS から送られるトピックから受け取ったコマンドが対応しているかどうかの判定と、ディスプレイの制御を担っているマイコンへの指示、受け取ったコマンドを基に瞳画像を表示する処理、処理が正常に行われたかどうかの判定を行う。犬型ロボットの瞳表示部分のハード構成を図 4 に図示する。小型コンピューター(Raspberry Pi 4[16])とマイコン(Raspberry Pi Pico[17])は USB ケーブルを介して通信しており、左目の表示を担うディスプレイはマイコンの SPI0 系の信号線に、右目の表示を担うディスプ

レイは SPI1 系の信号線にそれぞれ接続する。両目のディスプレイは SPI 通信で制御が可能な SSD1331 搭載の OLED RGB ディスプレイ[18]を採用する。ROS に対応するため Raspberry Pi 4[16]は Ubuntu MATE 20.04[19]を載せて使用しているが、この状態で Raspberry Pi 4[16]から直接 SPI 通信を行う手法を見つけることができなかった。そのため Raspberry Pi Pico[17]というマイコンからディスプレイを直接制御し、Raspberry Pi 4[16]からの信号は USB ケーブルを介して通信するという形で実装する。Raspberry Pi Pico[17]を選んだ理由としては瞳画像を直接マイコン内に保存して置けるほどのメモリ容量が存在したため、そして SPI 通信系統が 2 つあったためである。

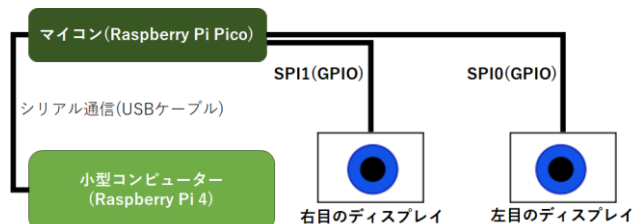


図 4 犬型ロボットの瞳表示部分のハード構成

図 2 の EyeSystem ではコマンドを eyeInfo から受け取り、それが受け取り可能なコマンドかどうかを判定している。受け取るコマンドは文字列のデータかつ“‘パラメータ’: ‘数値’”と記述する必要がある。‘パラメータ’は EyeROS が送信した目の表現方法の指示であり、具体的なパラメータを表 1 に示す。‘数値’は整数型で変換できるかどうかで判定している。更に受け取ったコマンドの‘パラメータ’を文字列のデータとして、‘数値’を整数型のデータに変換しマイコンへ送信し、両目のディスプレイに画像を表示している。

表 1 EyeSystem で扱うパラメータ一覧

パラメータ	パラメータの説明
pupil_L	左目の瞳の大きさの指定
pupil_R	右目の瞳の大きさの指定
eyelids_L	左目の瞼画像の指定
eyelids_R	右目の瞼画像の指定
blinkMax	瞬きを行う周期
dispFlug	送信した数値をディスプレイ表示に反映させる

### 3.2 EyeROS で定めた瞳の大きさ

人間の瞳の大きさは平均約 2-8[mm]に変化している[20]。犬型ロボットの瞳もこの範囲で変化させたいが、人間の目の大きさと犬型ロボットの目の大きさは異なるのでそのまま適用することはできない。先行研究の片目のインターフェース[9]は球体のディスプレイであり、その直径は成人の眼球サイズのおおよそ 10 倍である 250[mm]

という関係性を基に瞳孔の大きさを選定していた。しかし、犬型ロボットのディスプレイは平面であるため、その手法でロボットに合わせた瞳孔と虹彩のサイズを算出することができなかった。既存研究において平均的な虹彩サイズについて記載されている論文が見つからなかったため、ナチュラルコンタクトの虹彩の直径を調べ[21]、表 2 に示す。ロボットの顔からディスプレイ部分が露出している部分の高さを基準にロボットの虹彩サイズを決め、ロボットとナチュラルコンタクトの虹彩の直径の比率を基にロボットの瞳孔の変化範囲を定めた。定めた変化範囲を表 3 に示す。

表 2 ナチュラルコンタクトの虹彩サイズ

商品名	虹彩直径サイズ[mm]
ReVIA NUDE BROWN	13.0
Candymagic Marriage Moca	13.8
AngelColor PURE BROWN	13.6
TOPARD Date Topaz	13.4
LuMia SWEET BROWN	13.6
Envie PLUM BLACK	12.8
平均値	13.4

表 3 人間と犬型ロボットでの瞳孔の変化範囲

	部位	直径[mm]
人間	虹彩の直径	13.4
	瞳孔の最大値	8.0
	瞳孔の最小値	2.0
犬型ロボット	虹彩の直径	9.4
	瞳孔の最大値	5.7
	瞳孔の最小値	1.4

## 4. 実験

本実験では犬型ロボットを用いて下記の 3 パターンの瞳孔表現を実行し、その時の様子を被験者に見てもらい、心拍情報を測定し癒しが与えられる瞳孔表現であるかどうかを評価する。

パターン A：被験者の pNN50 の値と比例して瞳孔の大きさが拡大する

パターン B：被験者の pNN50 の値と反比例して瞳孔の大きさが縮小する

パターン C：定められた瞳孔の大きさを維持し続ける

pNN50 が大きくなるほどリラックス、小さいほど緊張した状態を判定している。

図 5 に本実験に用いた犬型ロボットの画像を図示する。



図 5 EyeROS で実現した犬型ロボット

瞳孔画像は表 3 の範囲内で 4 種類分用意した。先行研究 [6,11]では快・不快の判定基準は LVAD のポンプデータに関する研究より [22]pNN50 の平均値が 0.3 であったことから、図 5 の犬型ロボットの瞳孔も 0.3 を基準に拡大・縮小する。表 4 に瞳孔の変化を示す。

表 4 犬型ロボットの瞳孔表現に用いた pNN50 の判定条件

パターン A	パターン B	パターン C	表示される瞳孔画像
0.15 未満	0.45 以上	-	
0.15 以上 0.30 未満	0.30 以上 0.45 未満	-	
0.30 以上 0.45 未満	0.15 以上 0.30 未満	固定	
0.45 以上	0.15 未満	-	

### 4.1 実験方法

測定データは心の快/不快状態の判断にも使われている pNN50 である。実験対象者は全 6 名(男性 4 名, 女性 2 名)であった。また最初に受けるパターンが強く影響を受ける可能性があるため、実験で実行するパターンの順番は被験者に伝えずランダムに入れ替えて行う。図 6 に示す通り、被験者の指に心拍センサを取り付け、その状態で犬型ロボットの瞳孔を観察してもらいその時の pNN50 を測定する。



図 6 実験中のイメージ図

図 6 の心拍センサは World Famous Electronics llc 製の心拍センサ [23]を使用した。この心拍センサはアナログ信号として心拍情報を出力するので、ATmega328P を搭載したマイコンボードである Arduino Uno [24]を介してデジタル信号へ変

換してから犬型ロボットに搭載した Raspberry Pi 4[16]に心拍情報を送信し、pNN50 に換算している。実験で使用した心拍センサとマイコンボードを図7に図示する。



図7 使用した心拍センサとマイコンボード

瞳孔表現を見た時とそうでない場合(瞳孔を見せていない場合=瞼を閉じた場合)の pNN50 や印象に差があるかを判断するために安静と瞳孔表現パターンの実行を交互に繰り返して実験を行った。安静と瞳孔表現パターンの実行の切り替えは pNN50 の測定データが 60 個保存された時に行う。また計測後は瞳孔表現を見た時の印象を口頭で答えてもらう。

#### 4.2 実験手順

以下に行った実験の手順について述べる。

1. 心拍計を指につけて犬型ロボットの瞳に注目してもらう。
2. 安静状態の pNN50 を測定する。この時犬型ロボットは瞳孔表現を見せないために瞼を閉じた状態にしておく。
3. pNN50 の測定データが 60 個保存された時点で瞼を開き、瞳孔表現パターンを実行する。
4. pNN50 の測定データが 60 個保存された時点で瞼を閉じ、再び安静状態に移行する。
5. 2-3 を 3 パターンの瞳孔表現を実行するまで繰り返す。
6. 最後に 3 パターンそれぞれの瞳孔表現を見た時の印象と、3 パターン全体を通して見た時の印象を口頭で答えてもらう。

### 5. 実験結果

#### 5.1 瞳孔表現の有意

実験から図8に示す pNN50 の時系列データを計測することができた。

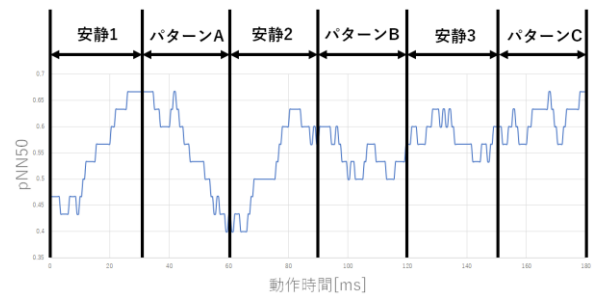


図8 pNN50 の時系列データ

実験において安静時と瞳孔表現実行時で計測された pNN50 の平均値を求めた。pNN50 の値は、高いほどリラックス状態を示し、低いと緊張状態を示す。しかし、その変異は被験者ごとに大きくなることから、このまま pNN50 の平均値を比較しても、どのように変化したのかを評価することができない。そこで先行研究[12-13]を参考に式(1)より変化率を求め、その値で比較する。

$$\text{変化率} = \frac{\text{瞳孔表現実行時の平均値} - \text{安静時の平均値}}{\text{安静時の平均値}} \times 100 \quad (1)$$

式(1)を実験結果に適用し、求めた pNN50 の変化率を表5に示す。その結果瞳孔表現を行った場合(瞳を見せた場合)と瞳孔表現を行わなかった場合(瞼を閉じた場合)で全 18 通り(6名×3パターンの瞳孔表現)の内 15 パターン、約 83% の確率で有意な差(p<0.05)があることを確認することができた。

表5 pNN50 の変化率

実験協力者	区間	区間内のpNN50変化率[%]	有意差の有無
1	安静-A	4.09	無し
	安静-B	3.71	無し
	安静-C	5.35	有り
2	安静-A	40.75	有り
	安静-B	36.97	有り
	安静-C	9.24	無し
3	安静-A	23.48	有り
	安静-B	46.74	有り
	安静-C	-5.42	有り
4	安静-A	-9.80	有り
	安静-B	10.54	有り
	安静-C	-26.96	有り
5	安静-A	-6.64	有り
	安静-B	10.46	有り
	安静-C	24.49	有り
6	安静-A	-14.60	有り
	安静-B	6.68	有り
	安静-C	81.04	有り

#### 5.2 pNN50 の変化率に基づく結果分析

表5より3パターン全てにおいて有意差が認められた被験者4名の変化率から分散分析を行った。その結果を図9に

図示する。P 値も約 0.58 と示され、瞳孔表現 3 パターンにおいて有意差( $p < 0.05$ )が認められない結果となった。しかしパターン A とパターン B・C に差が存在すると思ひ、図 10-12 に示した通りパターンごと t 検定を行った。その結果パターン A・B、パターン A・C で有意差( $p < 0.05$ )があることが確認できた。このことからパターン B・C が pNN50 を引き上げる、つまり癒しを与える効果が存在する可能性があるといえる。

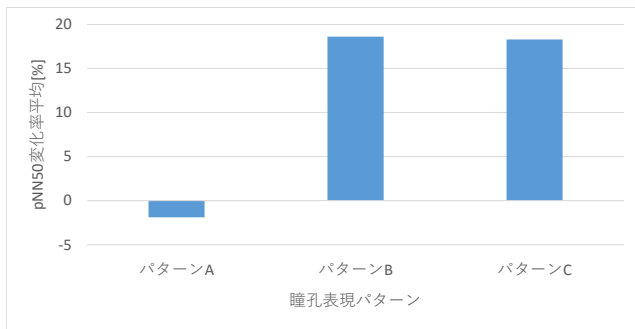


図 9 3 パターンでの変化率の分散分析

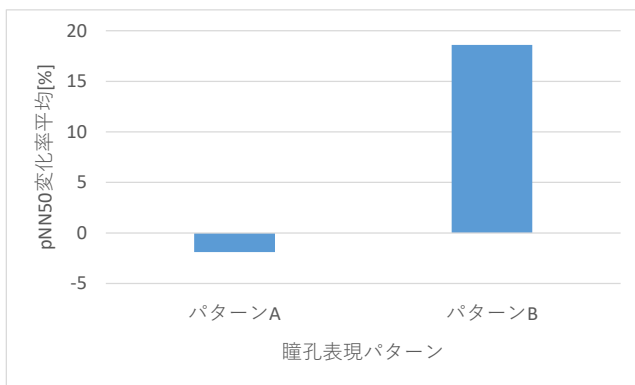


図 10 パターン A-B での変化率平均の比較

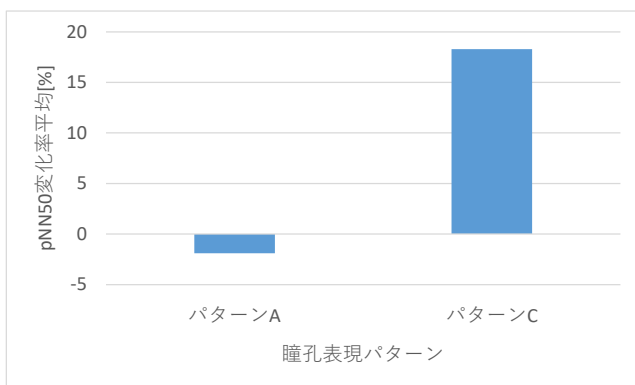


図 11 パターン A-C での変化率平均の比較

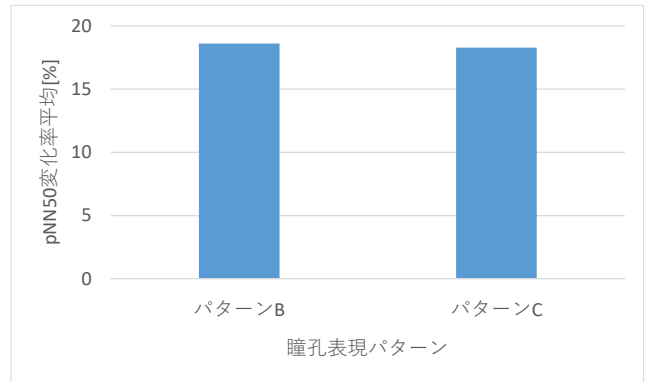


図 12 パターン B-C での変化率平均の比較

## 6. 議論

### 6.1 瞳孔の大きさと pNN50 との関係性について

瞳孔表現パターン B・C が癒しを与える効果がある可能性が示された。そこで癒しを与える効果が瞳孔の大きさにあるかを考察するために、変化率の分散分析対象だった時の各瞳孔表現パターンにおいてどの瞳孔が最も表示されたのかを表 6 に示す。

表 6 各瞳孔表現パターンでの最頻値の瞳孔画像

動作パターン	最も表示された瞳孔画像
パターン A	
パターン B	
パターン C	

結論から記述すると、pNN50 の変化率と瞳孔表現パターンでの関連性を見出すことができなかった。まずはパターン B・C において関連性があるかどうかについてだが、瞳孔の大きさに関しては大・小の違いが存在するため瞳孔の大きさ自体に共通性は無い。次に注目したのは変化の有無である。パターン A・B は pNN50 が設定した閾値を超えると瞳孔の大きさを変化させたが、pNN50 の値が予想よりも大きかった場合が多く、あまり変化した印象を受けなかった。そこでパターン A のほうがパターン B よりも表示された瞳孔の大きさにばらつきが確認できれば、瞳孔の大きさに変化が無いほうが pNN50 の値を上がる、すなわち癒しを与える可能性がある。そこでパターン A・B で表示された瞳孔の大きさの t 検定を行い有意差の有無と分散を確認した。パターン A・B における瞳孔の大きさの分散を図 13 に図示する。この 2 パターンにおいて有意差( $p < 0.05$ )があることは確認できたが、瞳孔の大きさの分散はパターン A よりもパターン B の方が大きいことが確認できた。よって本実験では心拍

情報と瞳孔表現の関連性を見出すことはできなかった。

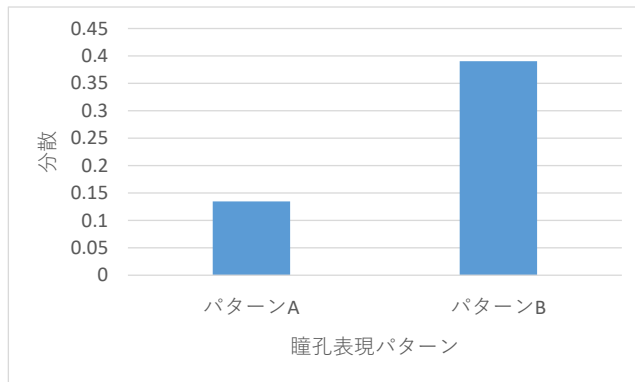


図 13 各パターンにおける瞳孔の大きさの分散

口頭でのアンケートにおいても瞳が大きいほうが小さかった時と比べ“かわいい”や“フレンドリー”など好印象な回答が多く、小さいときは“威圧感”や“何を考えているのかがわからない”などあまり良い印象を得られる回答が得られなかった。しかし少数とはいえ、“瞳孔が小さいときの方が優しさを感じる”との回答や、大きい瞳孔でも“威圧感”や“不気味感”を表す回答した被験者も存在した。

## 6.2 入力と出力の関連付け方について

今回の実験では瞳孔の大きさは予め定めた閾値を超えた場合に变化するように実装した。今回の実験では 0.3 を基準に瞳孔が変化するように閾値を設定したが、図 14 のように pNN50 の変化が同じでも絶対値が高かった場合变化する回数が減ってしまうという可能性があることが分かった。

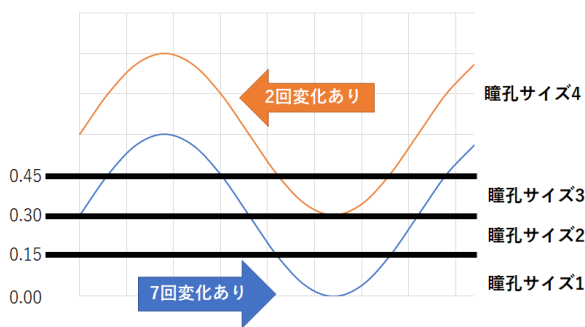


図 14 変化の頻度に差が発生する例

このように予め定めた閾値を超えた場合にのみ瞳孔の大きさが変化する場合の実装方法の場合、個人差によって変化が多い人と少ない人が現れてしまう可能性が高いと予想される。そこで pNN50 の値をそのまま閾値とせず、ある一定の区間内での変化量に換算することで個人差に左右されずにストレスがかかっている場合と癒しが与えられている場合、特に影響を受けていない場合の判定が可能になると考えられる。今後の実装ではこの方法で瞳孔表現のパターンを作

成していきたい。

## 6.3 顔の動きの検討

本実験において心拍情報と瞳孔表現に関連性が見られなかったのは事実ではあったが、安静時と瞳孔表現時の pNN50 の値に有意差が生じたのも事実である。瞳孔表現以外に安静時の状況と比べ顔を閉じているか開いているかという図 15 に示す違いが存在する。

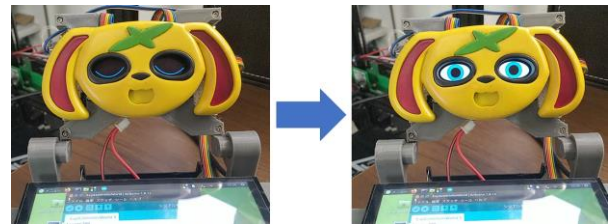


図 15 顔を閉じている時(左)と顔を開いて瞳孔表現をしている時(右)の様子

3 パターンの瞳孔表現をそれぞれ実行したときの顔の動きは同じだったが、心拍情報と瞳孔の大きさ変化について、現時点では関連性を見出すことができなかったため、顔の動きの影響があった可能性も考えられる。計測後のアンケートでも“顔を開く瞬間が早すぎてびっくりした”、“目が開いてかわかった”等顔に関する回答も得ることができた。今後は瞳孔表現だけでなく顔の動きも生体情報との関連性を検討していく必要があると考える。

## 6.4 瞳のデザインについて

今回の瞳孔表現は人間の瞳孔表現を参考にして取り入れた。しかし、実験で使われた犬型ロボットのデザインは実物寄りではなくアニメ寄りのデザインであったためか、アンケートでは“予想と違った目のデザインだった”という意見も存在した。この意見を解決するならば実際の人間の動きではなくアニメ寄りの瞳孔表現を取り入れることで顔のデザインとのギャップを埋めることができるのではないだろうか考える。そのため今後はアニメの瞳を描く手法を参考にしたデザインを犬型ロボットに取り入れ、顔のデザインとのギャップを無くしていくことも検討していく必要があると考える。

## 7. おわりに

本研究では生体情報を入力とし、アイコンタクトを出力とするフレームワーク EyeROS の実現のために心拍情報と瞳孔表現を 3 パターンの方法で関連づけさせ実験と評価を行い、入力と出力の関連性を考察した。結果、心拍情報と瞳孔表現を関連付けることで、癒し効果を与えることが確認

できた。

今後の課題として、被験者数を増やした評価や、瞳孔表現のパターンの増加と改善、瞼の動きによる癒しへの効果の評価、瞳孔のデザインの検討に取り組んでいきたい。

**謝辞** 本研究はCREST Society 5.0 を支える革新的コンピューティング技術 「MEC 用マルチノード統合システムの開発」(JPMJCR19K1)の支援を受けている。心拍情報に関する知識についてご教授・心拍情報の取得プログラムを御貸しして頂いた芝浦工業大学の基盤システム研究室の皆様方、実験にお付き合い頂いた親族に深く感謝し、御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] “令和 2 年 労働安全衛生調査(実態調査) 結果の概要”。  
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/r02-46-50b.html>  
(参照 2022-1)。
- [2] “メンタルコミットロボット パロ”。  
[https://www.daiwalease.co.jp/service/ict/04kaigo\\_paro.html](https://www.daiwalease.co.jp/service/ict/04kaigo_paro.html)  
(参照 2022-1)。
- [3] “aibo”。<https://aibo.sony.jp/> (参照 2022-1)。
- [4] “Qoobo・Petit Qoobo”。<https://qoobo.info/index/> (参照 2022-1)。
- [5] “【パナソニック開発】気ままな同居人ロボット「ニコボ」。寝言やおナラまで。”。  
<https://www.makuake.com/project/nicobo/> (参照 2022-1)。
- [6] Yuhei Ikeda, Ryota Horie, Midori Sugaya. Estimating Emotion with Biological Information for Robot Interaction. *Procedia Computer Science* Volume 112, 2017, p.1589-1600.
- [7] 瀬島吉裕, 渡辺富夫. 第 4 節 快の情動を伴った笑い生成時における瞳孔反応の解析, 生体情報計測による感情の可視化技術. 株式会社 技術情報協会. 2020. p.207-212.
- [8] 江川翔一, 瀬島吉裕, 佐藤洋一郎, 渡辺富夫. 音声対話における笑い反応による共感誘発のための瞳孔反応システム. *日本機械学会論文集* 83 巻 853 号. 2017. p.17-00076.
- [9] 瀬島吉裕, 川本宙輝, 佐藤洋一郎, 渡辺富夫. 瞳孔表現メディアにおける瞳孔面積が印象形成に及ぼす影響. *日本機械学会論文集* 87 巻 903 号. 2021. p.21-00187.
- [10] 鮫島和行. ヒトと動物のインタラクション研究. *バイオメカニズム学会誌* 43 巻 3 号. 2019. p.173-178.
- [11] 伊藤哲平, 菅谷みどり. Mihabilly: 感情を考慮したリハビリテーション時の声かけロボット. *インタラクション 2018 論文集*. 2018. p.1068-1071.
- [12] 西田裕己, 保科篤志, 池田悠平, 馮晨, 高橋裕也, 菅谷みどり. おもてなしロボットの生体情報による評価. *マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集*, 2017, p.865-875.
- [13] 高津浩彰, 宗像光男, 小関修, 横山清子, 渡辺與作, 高田和之. 心拍変動による精神的ストレスの評価についての検討. *電気学会論文 C* 120 巻 1 号. 2000. p.104-110.
- [14] 山田忠雄, 柴田武, 酒井憲二, 倉持保男, 山田明雄, 上野善道, 井島正博, 笹原宏之. 癒(や)し, 新明解国語辞典 第七版. 三省堂. 2011.
- [15] “ja/ROS/Introduction”. <http://wiki.ros.org/ja/ROS/Introduction>  
(参照 2022-1)。
- [16] “Buy a Raspberry Pi 4 Model B”.  
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>  
(参照 2022-1)。
- [17] “Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi Pico”.  
<https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html> (参照 2022-1)
- [18] “有機ELディスプレイ 0.95 インチ 96×64 ドット RGB”.  
<https://akizukidenshi.com/catalog/g/gP-14435/> (参照 2022-1)。
- [19] “Raspberry Pi | Ubuntu MATE”. <https://ubuntu-mate.org/raspberry-pi/> (参照 2022-1) .
- [20] 高野博史. 第 2 節 快・不快情動に対する瞳孔径変動の特性, 生体情報計測による感情の可視化技術. 株式会社 技術情報協会. 2020. p.164-170.
- [21] “【2021 年最新版】ナチュラルカラコン特集”, [https://begirl.com/user\\_data/natural\\_contact.php](https://begirl.com/user_data/natural_contact.php) (参照 2021-10)。
- [22] Moscato F, Granegger M, Edelmayer M, Zimpfer D, Schima H. Continuous monitoring of cardiac rhythms in left ventricular assist device patients. *Artif Organs*. 2014 Mar;38(3). p.191-198.
- [23] “Pulse Sensor”. <https://pulsesensor.com/> (参照 2022-1)。
- [24] “Arduino Uno Rev3”.  
<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/> (参照 2022-1)。