

ロボットの呼吸停止・再開表現によるショックの印象に与える影響

Effects of Breathing Pauses and Restarts in Robots on Human Perceptions of Shock

藤井 良祐^{1*} 西口 雄斗¹ 玉本 孝哉¹ 八軒 裕生¹ 木村 彩香¹ 米澤 朋子¹

¹ 関西大学

¹ Kansai University

Abstract: 本稿では、呼吸の不随意表現における様相変化を通じてショック感情を表出する人型上半身ロボットを報告する。ロボットが感じたショックの度合いや種類を、感情的な身体反応としてユーザに提示するため、感情の興奮度が大きい時にショックを受け硬直し、その後呼吸再開後の呼吸における最初の一息(吸気/呼気)、一息の長短、呼吸が安定するまでの時間推移を変化させ表現する。ロボットの呼吸所作は、ロボットの肩部のサーボモータの可動域と速度、および速度の平常化までの経過時間を制御した。

1 はじめに

近年、教育・医療・福祉分野を中心に、コミュニケーションを通じて心のケアや関係構築を支援する弱いロボットが注目されている。弱いロボットは、自立性や能力をあえて制限し、ユーザの「助けたい」という感情を手がかりに、自発的な関与や援助行動を促す設計であり [1]、ユーザ自身の快適や利便性ではなく、不利益の方針 [2] のように行動変容に向けた情動的で愛着的な刺激をもたらすものといえる。従来の弱いロボットは、幼さや頼りなさといった「若い弱さ」の表現が目立ちやすく、内面の未熟さや弱さにより起こる驚きや動揺などの強い情動や、ネガティブ感情を含む複雑な情動状態を表出する試みは十分に検討されてこなかった。これは、ユーザ側が優位に立った弱さによる満足感や安心感に基づくコミュニケーション形態にのみ焦点が当たってきたともいえる。よって人間同士のようにコミュニケーションの齟齬による諍いや和解、本質的な悲しみやショックに対する深い共感を伴う長期的な関係を築くには課題が残る。

人間や動物は、突発的な出来事に対して瞬間的な身体反応を引き起こす。この時、二次感情であるポジティブ/ネガティブなどの感覚が沸き起こる前に、出来事の情動的意味が危険かどうかなどの判断をする機構が働くとされている [3]。よってこのような身体に現れる反応は、相手の理解を促す重要な手がかりになり得る。これまでに Human Robot Interaction に身体反応や不

随意の生理反応を導入する試みがされてきた。例えば、人間や動物の外見・運動を模倣し、相互理解を促すロボット設計が進展している。表情や身振りに加え、汗や鳥肌といった生理反応を模倣した設計も提案されており、生理反応の模倣はロボットの内部状態を直感的に伝え、ロボットの「弱さ」を表現する上でも有効なアプローチとなり得る [4]。他にも、心拍の表現によってロボットの「焦り」や「恐怖」を接触を通じて人間に伝達する試みや [5]、呼吸と心拍によって生物らしさを伝達するロボット [6] が挙げられる。一方でこれらの生理反応を突然の出来事に対する反応として設計要素に取り入れることが、ユーザの印象にどのような影響を与えるかは十分に明らかになっていない。

本研究では、呼吸の不随意表現に着目し、呼吸様相の変化を通じて、その瞬間に起きた出来事に対するショック感情を表出する人型上半身ロボットを試作し、ロボットが受けたショックの度合いや種類を身体反応としてユーザに提示したときの印象への影響を検証する。

具体的には、ロボットの興奮度が高い状態においてショックを受けて硬直し、その後の呼吸再開過程において、最初の一息(吸気/呼気)、一息の長短、呼吸が安定するまでの時間推移を操作するロボットシステムを提案する。本システムでは、呼吸表現ロボットの呼吸所作から肩部のサーボモータのみを動作させ、その可動域、速度、速度が平常化するまでの経過時間を制御対象として実装した。

*連絡先：関西大学総合情報学研究科知識情報学専攻
〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1
E-mail: k543861@kansai-u.ac.jp

2 関連研究

2.1 ロボットの不随意表現

ロボットなどの擬人化されたシステムは、顔表情の感情表現などノンバーバルな表現を伴ってその言語的な表現を補い、表現精度や強度を高めている [7, 8]. ロボットが人間を理解するために人間の生理的な反応の理解が有効であるように [9, 10], ロボットの表出チャンネルとしても生理反応の表出が有効であると考えられる. ノンバーバル表現の中には、視線やジェスチャなど随意的に表すことのできる表現だけでなく、身体状態の変化や精神状態が与える身体への影響が現れる不随意的な表出として、発汗や震え [11], 顔色 [12] など含まれる. このような真実味のある表現により人間とロボットの自然なコミュニケーションに近づくことが目的とされてきた [4].

一方で、特に、脈動などの生理信号は接触やセンサを介さなければ知覚が難しく、その変化が意味する内部状態を正確に解釈するには、観察者の予備知識を要する場合がある.

本稿では身体の不随意運動として視覚的に把握しやすい呼吸表現を対象とし、それが内部的なショック表現としてどの程度有効かに焦点を当てる. これにより将来的に、ロボットの呼吸の様相が表すショックの衝撃の大きさや、それにより影響を受ける精神的な弱さやもろさを用いて、ロボットに対する援助喚起や共感形成につなげることを視野に入れる.

2.2 接触インタラクションと呼吸

呼吸は非言語的コミュニケーションにおいて重要な役割を果たし、人は無意識のうちに相手の呼吸のテンポやリズムから感情や状態を読み取るとされる. 呼吸・心拍・体温・体動を再現可能な抱きぐるみ型ロボットを用いた研究では、腹部の呼吸速度がロボットの覚醒度として知覚されることが示された [13]. また、呼吸表現を持つロボットを撫でるといった接触インタラクションを行うことで、ユーザの心拍数および呼吸数が有意に低下することが報告されており、ロボットの呼吸表現がユーザの生理状態に影響を与える可能性が示唆されている [14].

一方で、これらの知見は主として「安定した呼吸」や「覚醒度の高低」といった呼吸状態の連続的な変化のみに着目したものであり、突発的な出来事に伴う呼吸の一時停止や再開などの非定期的な変化に関しては十分に検討されていない.

そこで本研究では、呼吸運動の一時停止後に生じる呼吸再開過程に着目する. 具体的には、最初の一息が吸気か呼気か、一息の長短、および呼吸が安定するま

での時間推移といったパラメータを操作可能なロボットを用いて、これらのパラメータの違いがユーザの印象評価にどのような影響を与えるかを検討する.

2.3 ショック表現

ショック表現は、予期しない出来事に対する驚きや警戒といった内的状態の変化を外部に表出するものである. 驚きの表出要素としては、刺激源への定位に加え、瞬間的な運動停止（フリーズ）が含まれ得ることが整理されており、人工エージェントの驚き表現設計においても複数の表出要素を組み合わせる手法が提案されている [15]. フリーズは脅威下の適応的防御反応の一つであり、脅威下での知覚感度や情報処理の様式そのものを変化させ得る点が示されている [16, 17].

ロボットにおけるフリーズ表現は、内部状態を伝えるために意図的に運動を停止する「表現としてのフリーズ」と、システム遅延・故障・破綻により相互行為が停止する「トラブルとしてのフリーズ」に大別できる. 後者のフリーズに至らないためにも前者のフリーズを適切に表出することが重要だと考えられる. 内部状態表出としてフリーズを用いる場合は、意図された停止であることをユーザが理解できるよう、呼吸再開時の挙動やフリーズ表現の前後の呼吸の変化により弁別できる設計にする必要があると考えた.

本稿では上半身ロボットシステムを試作し、フリーズ後の呼吸の再開動作によってショックの表現にどのような影響が生じるかを検証した.

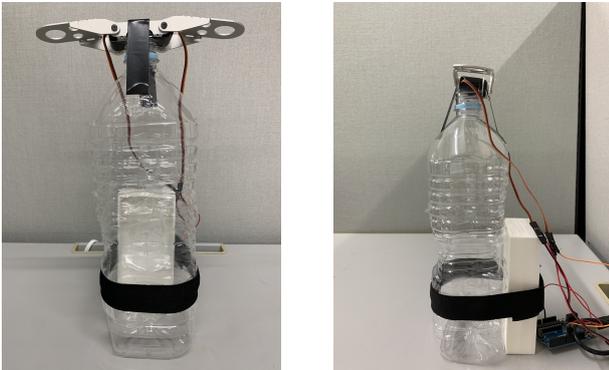
3 提案システム

3.1 システム概要

本研究では、ロボットの呼吸再開表現を実現するため、不随意的な呼吸表現を行う人型上半身ロボットを作成した. ロボットの呼吸に対し、ユーザの感情移入、共感を促すため、ロボットの形状は人型に設計した. ロボットの胴部分は市販の2Lの飲料水ペットボトルを使用し、蓋部分にサーボモータを固定した.

ロボットの背中部分に全身のバランスを支えるための土台をゴムバンドで取り付け、サーボモータを図1のように取り付け、人間における胸式呼吸に相当する動作を表現した. 更にロボットの造形をより人間に近づけるため、上から幼児用の服を着用させた. 本ロボットの外見を図2に示す. 本ロボットのソフトウェアは時系列制御部と身体表現部で構成される. 時系列制御部では、ロボットの呼吸状態の推移、特に呼吸再開時の呼吸動作パターンを決定する. 身体表現部では、現在のロボットの内部状態、呼吸動作パターンに応じ

た肩部のサーボモータで呼吸表現を行う。なおサーボモータの制御は Arduino を用いて行った。システムのフローチャートを図 3 に示す。



(a) ロボットの骨組み (正面) (b) ロボットの骨組み (横)

図 1: 呼吸表現ロボットの骨組み



(a) ロボットの外観 (b) ロボットの外観 (横)

図 2: 呼吸表現ロボットの外観

3.2 時系列制御部

時系列制御部ではロボットの内部状態と呼吸動作パターンを制御，身体表現部で表出する呼吸動作を決定する。本研究ではショック表現を「呼吸停止後，一度目の呼吸様相」と「通常状態へ推移するまでの時間」として定義し，これを時系列デザインとして整理した。ロボットの呼吸状態の詳細を表 1 に示す。

呼吸パラメータは呼吸再開時の最初の一息 (吸気/呼気)，一息の長短，呼吸安定するまでの推移時間の 3 種とした。各呼吸パラメータの組み合わせによって身体表現部の呼吸再開表現動作を決定する。各呼吸パラメータの詳細を表 2 に示す。なお，呼吸再開から呼吸

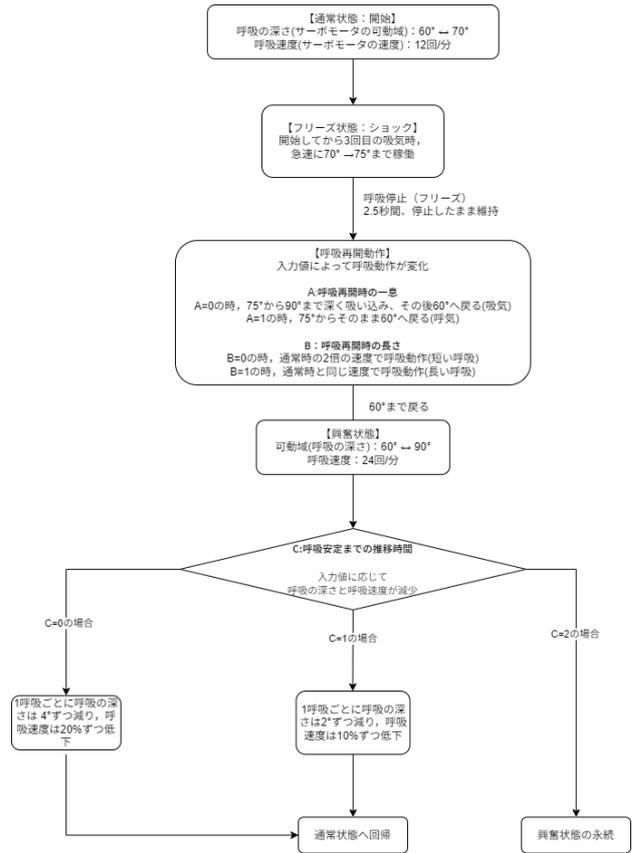


図 3: 動作システムのフローチャート

安定までの時間は徐々に通常状態へ移行する過程を表現するため，興奮状態になってからの呼吸数によって制御する。呼吸動作を行うたびに呼吸速度と深さが減衰していき，パラメータによって通常状態へ収束するまでに必要な回数が異なる。

3.3 身体表現部

身体表現部では時系列制御部で決定された内部状態，呼吸パラメータを表出するための，呼吸随伴運動の制御をする。呼吸随伴運動は肩部のサーボモータを用い，内部状態，呼吸パラメータに応じた位置までサーボモータが動く処理を吸気，またそこから初期位置までサーボモータを回帰させる処理を呼気とし，これら一連の動作を 1 周期の呼吸 (1 呼吸) と定義する (図 4)。

4 予備検証

4.1 呼吸再開動作による印象検証

本研究では，ロボットの呼吸停止後の最初の呼吸 (吸気/呼気，一息の長短) がショック表現の印象にどのよ

表 1: 呼吸状態とサーボモータの設定値

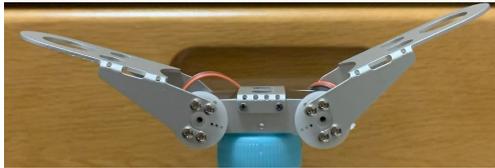
呼吸状態	呼吸速度 (動作速度)	呼吸の深さ (可動域)
通常状態	12 回/分	60 度 ~ 70 度 (約 1cm)
興奮状態	24 回/分	60 度 ~ 90 度 (約 3.5cm)

表 2: 呼吸パラメータの設定

要因	入力値・内容
要因 A: 呼吸再開時の一息	A=0: 息を吸う A=1: 息を吐く
要因 B: 呼吸再開時の長さ	B=0: 短い (0.5 秒) B=1: 長い (2 秒)
要因 C: 呼吸安定までの推移時間	C=0: 早い (5 回) C=1: 遅い (10 回) C=2: 変動なし



(a) 通常時 (肩動作なし)



(b) 胸呼吸時 (肩動作あり)

図 4: 呼吸表現ロボットの肩動作

うな影響を与えるかを検証する。

4.2 実験仮説

本実験では、以下のような仮説を設定した。

- H1: 最初の一息の吸気動作は Russell の感情円環 [18] におけるロボットの快度をあげる
- H2: 一息が短い場合, Russell の感情円環におけるロボットの快度を下げる

4.3 実験条件

以下の 2 つのロボットの呼吸パラメータを要因とした表現に対する評価を 2 要因 2 水準の被験者内実験計画として実施した。

4.4 実験参加者

20 歳~28 歳の男女 28 名 (男性 21 名, 女性 7 名, 平均 22.57 歳, 標準偏差 2.04 歳) が実験に同意し参加した。

4.5 実験方法

前章で述べた提案システムを正面から撮影した 4 パターンの約 40 秒のロボットの呼吸動作の動画を視聴させ, 以下の評価項目について当てはまる度合いを Google Forms にて 0-99 の主観評価による Visual Analog Scale 法により回答を求めた。なお, Q6 に関しては 2 択での回答を求めた。

- Q1: 想定外のことを経験したように見えた。
- Q2: 心から落ち着いてるように見えた。
- Q3: 無理やり落ち着こうとしてるように見えた。
- Q4: 強いショックを受けたように見えた。
- Q5: ショックに対し, まだ受け止め切れていないように見えた
- Q6: ロボットはどのような場面に直面したように見えた (1. うれしい出来事 or 2. 悪い出来事)

4.6 実験結果

各主観評価の結果に対し, Q1~Q5 を有意水準 $\alpha=0.05$ で分散分析, Q6 をカイ二乗検定で分析した。表 3, 図 5 に実験の分散分析, 表 4 にカイ二乗検定の結果を示す。実験の結果, Q4 において, 主効果の要因 B の主効果が有意であった ($B1>B2$)。この結果から, 再開時の呼吸の一息目が短いほど, 強いショック状態を表すことが示された。

5 呼吸変化時間によるショック表現の印象検証

5.1 実験目的

ロボットの再開時の呼吸様相, 興奮状態から通常状態へ推移する時間がロボットのショック表現印象にどのような影響を与えるかを検証する。

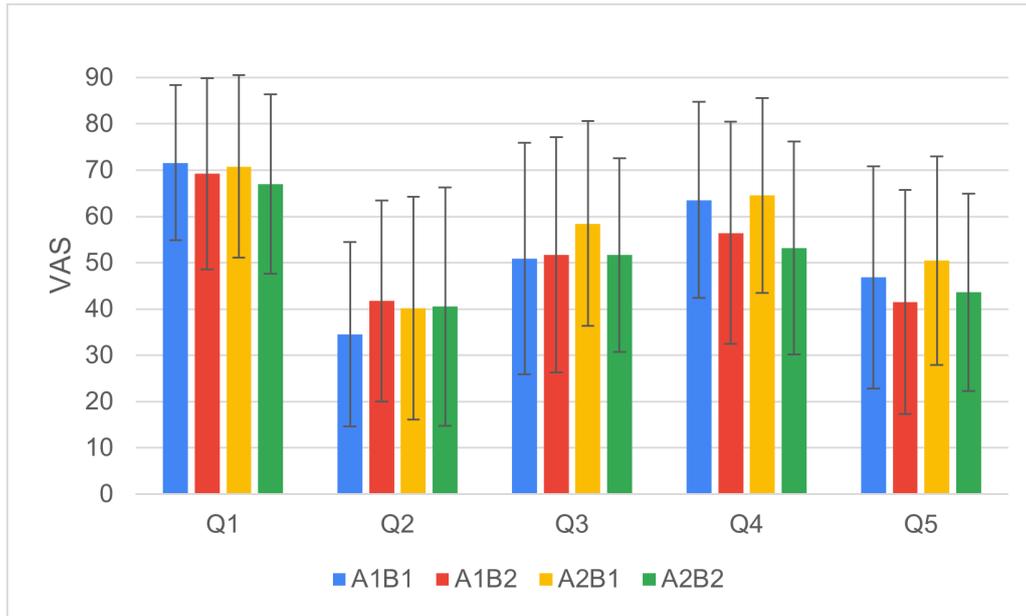


図 5: 実験 1:VAS 結果

表 3: 実験 1:分散分析の結果

Question	A			B			AB		
	F	p	多重比較	F	p	多重比較	F	p	交互作用の単純主効果
Q1	0.304	0.585	—	1.511	0.230	—	0.041	0.842	—
Q2	0.478	0.495	—	1.258	0.272	—	1.062	0.312	—
Q3	0.966	0.334	—	0.440	0.513	—	0.993	0.323	—
Q4	0.095	0.760	—	5.554	0.026*	B1 > B2	0.490	0.490	—
Q5	1.161	0.291	—	2.041	0.165	—	0.020	0.888	—

* $p < 0.05$

表 4: 実験 1:Q6 のカイ二乗検定の結果

		A1B1	A1B2	A2B1	A2B2
うれしい出来事	割合 (%)	39.3	46.4	17.1	46.4
	調整済み残差	0.2	1.1	-2.5	1.1
悪い出来事	割合 (%)	60.7	53.6	82.9	53.6
	調整済み残差	-0.2	-1.1	2.5	-1.1

$$\chi^2(3, N = 112) = 6.552, p = 0.088$$

5.2 実験仮説

以下のような仮説を立てた。

- H1: 最初の一息の短い吸気動作は, Russell の感情円環における 2 次感情の快度を下げる
- H2: 推移時間が短いと, Russell の感情円環における 2 次感情の快度を上げる

5.3 実験条件

本研究では, ロボットのショック表現に対する評価を呼吸再開様相と安定時間の 2 要因 6 条件の被験者内実験計画として実施した. 要因 C は「呼吸再開後, 最初の一息の呼吸状態」を表し, C1 (速い吸い) と C2 (長い吐き) の 2 水準とした. なお, C1, C2 に関してそれぞれ実験 1 の A1B1, A2B2 と同じである. これは, 前実験の仮説段階で小さなショックを表す表現の組み合わせ A1B1 と, 大きなショックを表す表現の組み

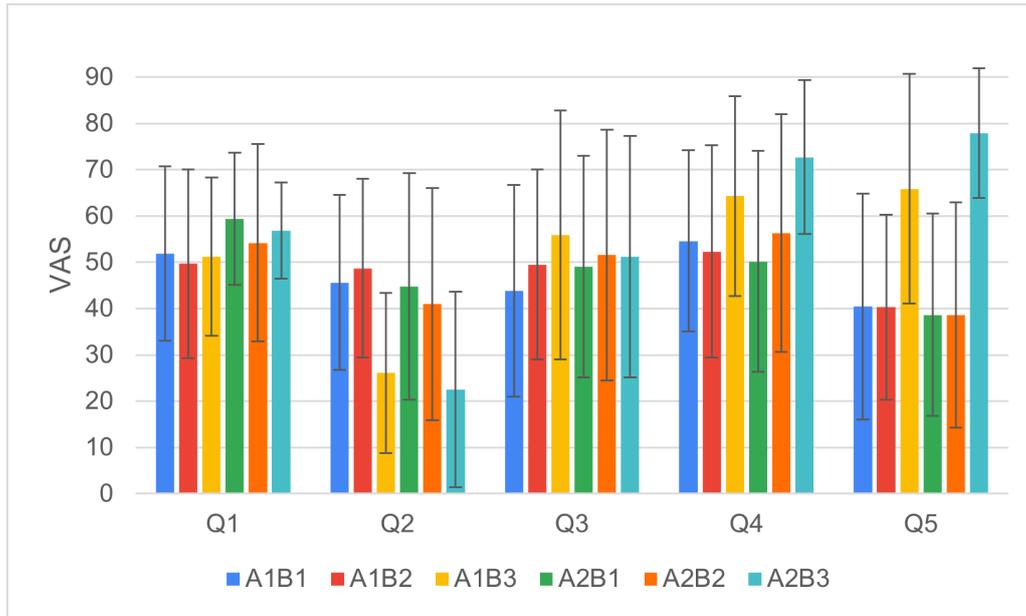


図 6: 実験 2:VAS 結果

表 5: 実験 2 : 分散分析の結果

Question	C			D			CD		
	F	p	多重比較	F	p	多重比較	F	p	交互作用の単純主効果
Q1	2.178	0.152	—	0.200	0.820	—	0.052	0.950	—
Q2	1.779	0.193	—	15.902	< .001*	D1 > D2 > D3	0.465	0.663	—
Q3	0.066	0.798	—	0.743	0.486	—	1.172	0.326	—
Q4	1.211	0.281	—	8.672	0.001*	D3 > D2 > D1	2.517	0.100	—
Q5	1.105	0.302	—	27.894	< .001*	D3 > D1 > D2	2.296	0.121	—

* $p < 0.05$

表 6: 実験 2:Q6 のカイ二乗検定の結果

		C1D1	C1D2	C1D3	C2D1	C2D2	C2D3
うれしい出来事	割合 (%)	42.9	42.9	28.6	28.6	25.0	14.3
	調整済み残差	1.6	1.6	-0.2	-0.2	-0.7	-2.0
悪い出来事	割合 (%)	57.1	57.1	71.4	71.4	75.0	85.7
	調整済み残差	-1.6	-1.6	0.2	0.2	0.7	2.0

$$\chi^2(5, N = 168) = 8.024, p = 0.155$$

合わせ A2B2 を準備したものである。要因 D は「呼吸が安定するまでの時間推移」を表し、D1 (早い), D2 (遅い), D3 (変化なし) の 3 水準とした。

5.4 実験参加者

20 歳～28 歳の男女 28 名 (男性 21 名, 女性 7 名, 平均 22.57 歳, 標準偏差 2.04 歳) が実験に同意し参加した。

5.5 実験方法

実験 1 と同じ手法の検証及び評価項目の回答を求めた。

5.6 実験結果

各主観評価の結果に対し、実験 1 同様に分析を実施した。表 5, 図 6 に実験の分散分析, 表 6 にカイ二乗検定の結果を示す。

まず Q2 において要因 D の主効果が有意であった ($D1 > D2 > D3$)。この結果から呼吸安定までの時間が短いと、心から落ち着いた印象を与えることが示された。

次に Q4 において要因 D の主効果が有意であった ($D3 > D2 > D1$)。この結果から呼吸が早い状態から変化しない、または呼吸が安定するまでの時間が長い場合、ロボットが強いショックを受けた印象を与えることが示された。

最後に Q5 において要因 D の主効果が有意であった ($D3 > D1 > D2$)。この結果から呼吸安定までの時間が長い時、ショックに対し受け止め切れていない印象を与えることが示された。一方、Q1、Q3 には両要因とも有意差がなく、全体を通じて C 要因には有意差が見られなかった。

6 考察

本研究では、呼吸の不随意表現でショック感情を表出する人型上半身ロボットを試作し、ロボットが受けたショックの度合いや種類を身体反応としてユーザに提示したときの印象への影響を検証した。

実験 2 の結果、再開時の呼吸表現より呼吸安定までの時間の方がショックの度合いに影響があるという全体的な傾向が示された。一方で直後の呼吸表現が異なっても、ショック表現において大きな影響は比較的少ないといえる。個別の結果を見ていくと、心の落ち着き (Q2) はショック後に早く呼吸が安定するほど高く捉えられ、反対にショックの強さ (Q4) は呼吸の回復が遅いほど強く捉えられた。一方で、ショックが受け止められない印象 (Q5) は、回復が最も遅いものが高い評価になったが、次に高い評価になったのは回復が最も早いものだった。これは、その速度でショックが解消することに共感がなく、ショックを受け止めたように見せつつ一旦飲み込んだかのように捉えられた可能性もある。呼吸安定までの時間の長さがロボットが通常状態へ戻る困難さを表し、それがショックの大きさと認知された可能性が考えられる。よって仮説 H2(推移時間が短いと、Russell の感情円環における 2 次感情の快度を上げる) が支持された。

また、実験 1 の呼吸再開動作検証においては、再開時の一息の長さが短い方が、ショックが強く捉えられること (Q4) と感じる傾向があることが示唆されており、仮説 H1 (最初の一息の短い吸気動作は Russell の感情円環における 2 次感情の快度を下げる) は支持されたといえる。本稿ではフリーズ動作直後の呼吸動作と通常状態へ移行するまでの時間に着目したが、今後はフリーズ動作の時間や通常状態へ移行するまでにしゃくりあげるなどの呼吸の不安定さが介入した場合の印象の評価を検討している。

今後はロボットの呼吸随伴運動を実際の言語コミュニケーションと連動させることで、ユーザとの自然で効果的なインタラクションを目指す。また、ロボットに発話機能を実装し、声は落ち着いている一方で呼吸運動が乱れるといった発話内容と呼吸表現の不一致を意図的に設計することで、我慢や建前を滲み出す表現を検討し、内部状態推定や共感誘起につながる設計指針の構築を目指す。この予備検証には、実験刺激動画に共通して手振れが含まれており、違和感や不快感、ショック強度などの主観評価に影響した可能性があるため、あくまで予備検証としての域を出ないという限界がある。一方、手振れは全条件に共通であるため、条件間差 (主効果・交互作用) の解釈への影響は相対的に小さいと考えられ、一定の呼吸表現の効果は見られたともいえる。今後は撮影条件の固定および刺激品質の事前評価を導入し、より厳密に統制したうえで、再検証を行う。

7 おわりに

本稿では、呼吸という不随意的な身体反応の様相変化を通じて、瞬間的に生起するショック感情を表出するロボット表現を提案し、予備実験により検討した。上半身型ロボットの肩動作により、ショック時の硬直反応とその後の呼吸再開過程を、最初の一息 (吸気/呼気)、一息の長短、および通常状態へ回帰するまでの時間推移を制御パラメータとするシステムを構築した。

ロボットが受けたショックの度合いや種類を身体反応としてユーザに提示したときの印象への影響を検証した結果、

- 1: 再開時の呼吸表現より呼吸安定までの時間の方がショックの度合いに影響があるという全体的な傾向が示された。
- 2: 一方で直後の呼吸表現が異なっても、ショック表現において大きな影響は比較的少ないといえる。
- 3: 呼吸安定までの時間の長さがロボットが通常状態へ戻る困難さを表し、それがショックの大きさと認知された可能性が考えられる。

今後は、一息の長さが瞬間的なショック感情の表現、推移時間がショックの継続性や深刻さとしてそれぞれ独立した設計を行うとともに、呼吸の不随意表現と発話機能を統合し、ロボットの我慢や建前を滲み出す表現の設計指針の構築を目指す。

謝辞

本研究は、一部科研費 JSPS 23K11202, 22K19792, 24K02977, 23K11278 の助成を受け実施した。

参考文献

- [1] 岡田美智男. 人とのかかわりを指向する < 弱いロボット > とその展開. *日本ロボット学会誌*, 34(5):299–303, 2016.
- [2] Hiroshi Kawakami, Maiko Nishimura, Osamu Katai, and Takayuki Shiose. System design based on benefit of inconvenience and emotion. In *2009 ICCAS-SICE*, pages 1184–1188. IEEE, 2009.
- [3] Henry M Evans. The emotional brain: the mysterious underpinnings of emotional life, 2000.
- [4] 孟曉順, 吉田直人, 万キン, and 米澤朋子. ロボットの皮膚上不随意表現による本能的反応表出の可能性. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 22(3):235–250, 2020.
- [5] Zachary Witkower, Laura Cang, Paul Bucci, Karon MacLean, and Jessica L Tracy. Human psychophysiology is influenced by physical touch with a “breathing” robot. *Emotion*, 2025.
- [6] Adnan Saood, Yang Liu, Heng Zhang, and Adriana Tapus. Designing a haptic interface for enhanced non-verbal human-robot interaction: Integrating heart and lung emotional feedback. In *In 2024 IEEE-RAS 23rd International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pages 772–778. IEEE, 2024.
- [7] Lisa Michelle Bohnenkamp, Olga Abramov, and Stefan Kopp. Are robots’ gestures understood? a study on the factors influencing how humans perceive information present in robot gestures. In *Companion of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 263–267, 2024.
- [8] Wa Gao, Shiyi Shen, Yang Ji, and Yuan Tian. Human perception of the emotional expressions of humanoid robot body movements: Evidence from survey and eye-tracking measurements. *Biomimetics*, 9(11):684, 2024.
- [9] Laura Fiorini, Gianmaria Mancioffi, Francesco Semeraro, Hamido Fujita, and Filippo Cavallo. Unsupervised emotional state classification through physiological parameters for social robotics applications. *Knowledge-Based Systems*, 190:105217, 2020.
- [10] Mikel Val-Calvo, José Ramón Álvarez-Sánchez, José Manuel Ferrández-Vicente, and Eduardo Fernández. Affective robot story-telling human-robot interaction: exploratory real-time emotion estimation analysis using facial expressions and physiological signals. *IEEE Access*, 8:134051–134066, 2020.
- [11] 孟曉順, 吉田直人, 万キン, and 米澤朋子. ロボットの恐怖を伝える複数の不随意な皮膚上生理表現における量的影響の検討. *日本知能情報ファジィ学会*, 33(4):742–756, 2021.
- [12] Pei-Chun Lin, Patrick CK Hung, Ying Jiang, Carolina Padilla Velasco, and Marco Antonio Martinez Cano. An experimental design for facial and color emotion expression of a social robot. *The Journal of Supercomputing*, 79(2):1980–2009, 2023.
- [13] Naoto Yoshida and Tomoko Yonezawa. Investigating breathing expression of a stuffed-toy robot based on body-emotion model. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction*, pages 139–144, 2016.
- [14] Yasaman S Sefidgar, Karon E MacLean, Steve Yohanan, HF Machiel Van der Loos, Elizabeth A Croft, and E Jane Garland. Design and evaluation of a touch-centered calming interaction with a social robot. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 7(2):108–121, 2015.
- [15] Beáta Korcsok, Veronika Konok, György Persa, Tamás Faragó, Mihoko Niitsuma, Ádám Miklósi, Péter Korondi, Péter Baranyi, and Márta Gácsi. Biologically inspired emotional expressions for artificial agents. *Frontiers in psychology*, 9:1191, 2018.
- [16] Karin Roelofs. Freeze for action: neurobiological mechanisms in animal and human freezing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1718):20160206, 2017.

- [17] Felix H Klaassen, Lycia D de Voogd, Anneloes M Hulsman, Jill X O ' Reilly, Floris Klumpers, Bernd Figner, and Karin Roelofs. The neurocomputational link between defensive cardiac states and approach-avoidance arbitration under threat. *Communications Biology*, 7(1):576, 2024.
- [18] James A Russell. A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6):1161, 1980.