

ロボットの腹式／胸式呼吸随伴運動システムによる 感情的身体反応の表現

Representation of Emotional Body Responses by a Robot's Abdominal/Thoracic Breathing Accompanied Movement System

藤井 良祐^{1*} 西口 雄斗¹ 森山 空耶¹ 万 キン¹ 米澤 朋子¹

¹ 関西大学

¹ Kansai University

Abstract: 本稿では、腹式／胸式呼吸の不随意表現を行う人形型ロボットシステムを報告する。ロボットの肩部、腹部を感情状態に応じて動作させる呼吸随伴運動を実装した。ロボットの興奮、不安、パニック、疲労、衰弱の度合いをモデル化し、動作制御を行う各サーボモータの速度、安定度、可動域を変化して表現することで感情的身体反応としてユーザに示し、より深いノンバーバルコミュニケーションを実現する。

1 はじめに

近年の高齢化社会において、少子高齢化による労働力不足を補うため、医療や介護分野におけるロボットの活用が進展している。特に、共感的なコミュニケーション機能を備えたロボットが、人間と協力してサービスを提供する機会が増加している。弱いロボットは、自立性や能力の制限を特徴とし、ユーザに「助けてほしい」という感情を喚起させることで、自然な関与を誘発する設計がされている [1]。一方で、幼く弱い表現が目立つため、強い複雑な情動表現はこれまであまり対象とされておらず、ネガティブな感情を含む深い関係性を構築するには課題が残る。

ロボットがユーザの行動を自然に誘導し、変容させるには、ノンバーバル表現を活用した感情の伝達が有効である [2]。ここでさらに、ロボットの内部感情の推移を動的にモデル化することで、直感的で効果的な人間とロボットのインタラクションを実現できる可能性がある。

本研究では内部推移モデル構築を目的とした、呼吸の不安定性、呼吸の深さ、呼吸部位、呼吸速度が変化する人形ロボットシステムについて報告する。

2 関連研究

2.1 ロボットの不随意表現

不随意表現の研究は人間とのより円滑なコミュニケーションを行う上で重要な役割を持つ。メッセージの分かりやすさや、エージェントに対する親しみやすさが向上することを示唆する研究もある [3]。物体への視線行動、凝視、接近といった随意的な行動と脈動といった不随意的な生理現象の表現を組み合わせたエージェントの内部表現モデルによるエージェントの行動と心拍表現のいずれでも生理的欲求の強さが表現できることが示されている [4]。また、初対面のエージェントがユーザの近くで呼吸や発話時の息遣い表現を行うことで、気持ち悪さが増加し、親密度に負の影響を与えることが示されている [5]。これらの研究ではロボットがユーザの側にいることを前提としている。これに対して本研究では、ロボットから離れた場所にいるユーザにも理解ができる生理表現を実装することで、ユーザとの距離に応じたコミュニケーションの実現を目指す。

2.2 呼吸によるインタラクション

呼吸、心拍、体温、体動を表現可能な着ぐるみロボットシステムを用いて、腹部の動きの速度がロボットの覚醒度として解釈されることを示した [6]。また、呼吸をするロボットを撫でるときのユーザの心拍数と呼吸数は、呼吸をしていないロボットを撫でるよりも有意に減少することを示した [7]。これらの研究ではロボットの呼吸する部位による影響については明らかにされ

*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 豊仙寺町 2-1-1
E-mail: yone@kansai-u.ac.jp

ていない。本研究では肩部、胸部による呼吸表現を用いて、覚醒度だけでなく内的不安度を含んだ内部感情表現及び呼吸部位の違いがユーザの印象に与える影響を明らかにする。

3 提案システム

3.1 システム概要

本研究では、ロボットの呼吸パラメータの組み合わせによる呼吸表現を実現するため、パラメータに基づいた不随意的な呼吸表現を行う人型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(図1)。

呼吸動作は肩部の動きと胸部の動きで表現した。また、ロボットの内部状態表現システムは、内部感情値制御部、身体表現部から構成される。内部感情値制御部では、ロボットの呼吸パラメータを決定し、身体表現部では、決定した呼吸パラメータを組み合わせる肩部、胸部のサーボモータで呼吸表現を行う。

この動きを実現するため、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た。ペットボトルの蓋部分と中心部分にそれぞれサーボモータをゴムベルトで固定した。なおサーボモータの制御はArduinoを用いて行った。また、腹部のサーボモータプラケットにポケットティッシュによる柔らかな基材を取り付け、腹式呼吸に見えるようにした。ロボットの造形をより人間に近づけるため、キルト芯を巻き付け、その上から幼児用の服を着用させた。

3.2 内部感情値制御部

内部感情値制御部ではロボットの呼吸パラメータに基づいて身体表現部で表出する呼吸状態を決定する。呼吸パラメータは呼吸の不安定度(動作のランダム性)、呼吸部の深さ(モータ動作の大きさ)、呼吸部位、呼吸(モータ動作速度)数の4種に設定した。なお4種の呼吸パラメータの入力値は0と1の2値入力とし、各呼吸パラメータの入力値を組み合わせ、身体表現部の動作を決定する。それぞれの呼吸パラメータの詳細を表1に示す。呼吸の不安定度は呼吸動作中にランダムでサーボモータが最大角度から0°までのランダムな角度で再び上昇する。肩部の呼吸が浅い状態、呼吸が深い状態の呼気の様子はそれぞれ図2に示す。

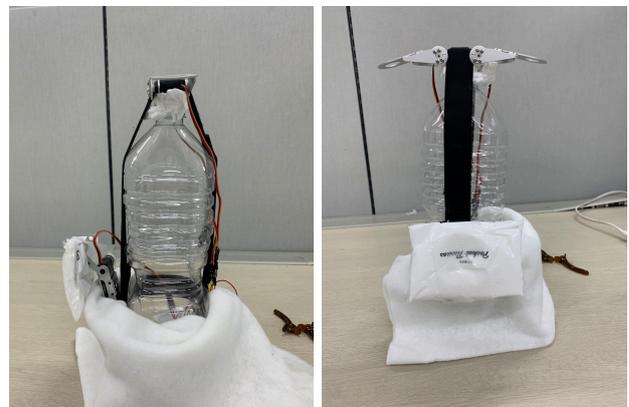
3.3 身体表現部

身体表現部では内部感情値制御部で決定された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



(a) ロボット外観(着衣)

(b) ロボット本体



(c) 人型ロボット(腹部)

(d) ケルト芯を巻きつけた腹部

図1: 呼吸表現ロボット

行う。呼吸随伴運動は胸部、肩部のサーボモータを用い、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、またそこから最初の位置までサーボモータが戻る処理を呼気とし、これら一連の動きを1呼吸とする。

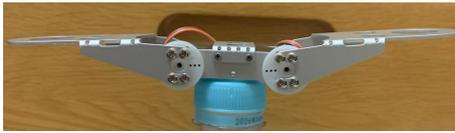
4 実験

4.1 実験目的

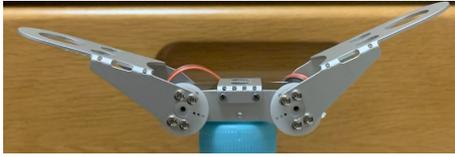
ロボットの内部状態の表現として、提案する呼吸表現のパラメータを用いて、「興奮」「不安」「パニック」「疲労」「衰弱」の印象にどのように関連するかを検証する。

4.2 実験仮説

実験の仮説を以下のように設定した。



(a) 通常時（肩動作なし）



(b) 胸呼吸時（肩動作あり）

図 2: 呼吸表現ロボットの肩動作

表 1: 呼吸の特徴分類

要因	分類	内容
要因 A: 呼吸の不安定さ	A1: 弱	不安定さ 30%
	A2: 強	不安定さ 50%
要因 B: 呼吸の深さ	B1: 浅い	胸部: 60度~80度 腹部: 100度~140度
	B2: 深い	胸部: 60度~100度 腹部: 100度~170度
要因 C: 呼吸部位	C1: 胸部	主に胸部が動く
	C2: 腹部	主に腹部が動く
要因 D: 呼吸速度	D1: 遅い	13 回/分
	D2: 速い	27 回/分

- H1: 呼吸速度が速いと興奮の印象を高める。
- H2: 呼吸の深さが深いほど各印象の度合いがより強調される。
- H3: 呼吸の位置が胸であると疲労、衰弱の印象が強くなる。
- H4: 呼吸の不安定さが大きいほど不安、パニックを感じさせる。

4.3 実験条件

以下の4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4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

21歳から25歳の男女15名（男性9名、女性6名、平均年齢25.3、標準偏差1.29）が実験に同意し参加した。

4.5 実験方法

提案システム（図1）を右斜め前方から撮影した16パターンの約15秒のロボットの呼吸動作の動画を視聴してもらい、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。

- Q1: 興奮したように見えた
- Q2: 不安を感じていた
- Q3: パニックになっているように見えた
- Q4: 具合が悪そうに見えた
- Q5: 生命的に危機的状況になっていそうに見えた

4.6 実験結果

各主観評価の結果に対し、有意水準 $\alpha=0.05$ で分散分析を実施した。表2、表3、表4、図3に実験の分散分析の結果を示す。

まずQ1において、主効果の有意差が要因B、C、Dに現れた（ $B2>B1$, $C1>C2$, $D2>D1$ ）。この結果から、呼吸が深く、胸部で、速いこと、がそれぞれ、興奮状態を表すことが示された。

次にQ2では、B、C、Dの主効果が有意だったのに加え、CDおよびBC間の交互作用に有意差が示された。交互作用グラフを図4(a)、4(b)に示す。まずBC間について、C2の時 $B2>B1$ 、B1の時 $C1>C2$ 、B2の時 $C1>C2$ の場合に有意差がみられた。つまり、胸部の呼吸は不安を強く表し、腹部の呼吸ならば深い方が不安を表すことがわかる。また、CD間の場合ではC1の時 $D2>D1$ 、C2の時 $D2>D1$ 、D1の時 $C1>C2$ 、D2の時 $C1>C2$ の場合に有意差が示された。つまり、胸部の呼吸が不安を強く表すことは変わりなく、腹部の呼吸なら速度が速いと不安が表される。これらより、胸部の呼吸が不安を強く表せることや、もし胸部でなくても速度や深さが不安を表す可能性もあることがわかった。

Q3では、A、B、C、D全ての要因の主効果が有意だったのに加え、AC間の交互作用に有意差が示された。交互作用グラフを図4(c)に示す。まずAC間について、A1の時 $C1>C2$ 、A2の時 $C1>C2$ 、C1の時 $A2>A1$ の場合に有意差が示された。つまり、胸部が動く呼吸はパニックを感じさせ、特に呼吸が不安定だとその傾向が強い。

Q4では、要因AとCの主効果が有意だったのに加え、BC、ABD、ABCD間の交互作用に有意差が示された。BC間、ABD間、ABCD間の交互作用グラフを図4(d)に示す。まずBC間についてはB1の時 $C1>C2$ 、

表 2: ANOVA 結果

	A		B		C		D	
	F	p	F	p	F	p	F	p
Q1	0.057	0.815	17.056	0.001*	123.352	<.001*	17.917	<.001*
Q2	0.752	0.4	5.533	0.034*	24.024	<.001*	6.255	0.025*
Q3	14.256	0.002*	6.525	0.023*	174.358	<.001*	23.719	<.001*
Q4	7.971	0.014*	2.392	0.144	21.491	<.001*	2.776	0.118
Q5	9.453	0.008*	2.858	0.113	22.11	<.001*	8.403	0.012*

*:<0.05

表 3: ANOVA-2 要因間交互作用

	AB		AC		BC		AD		BD		CD	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Q1	0.171	0.685	2.291	0.152	0.196	0.665	0.841	0.375	0.08	0.782	0.543	0.473
Q2	0.115	0.739	0.113	0.742	3.248	0.093	2.499	0.136	0.55	0.471	5.774	0.031*
Q3	0.953	0.345	8.52	0.011*	1.12	0.308	3.877	0.069	0.415	0.53	0.435	0.52
Q4	1.578	0.23	0.057	0.815	5.878	0.029*	0.864	0.368	0.923	0.353	4.16	0.061
Q5	0.281	0.604	2.628	0.127	0.063	0.805	4.569	0.051	4.569	0.051	0.007	0.934

*:<0.05

B2 の時 C1>C2, C2 の時 B2>B1 の場合に有意差がみられた。つまり、胸部の呼吸は体調の悪さを感じさせ、腹部の呼吸なら深い呼吸で体調の悪さが表せる可能性が示された。

ABD 間については A2B2 の時 D2>D1 の場合に有意差が示された。つまり、不安定さが大きい深く浅い呼吸は体調の悪さを感じさせ、腹部の呼吸なら深い呼吸で体調の悪さが表せる可能性が示された。

Q5 では、要因 A, C, D の主効果が有意な結果となり、 $a_2 > a_1$, $c_1 > c_2$, $d_2 > d_1$ より、この結果から、呼吸が不安定で、胸部で、速いこと、がそれぞれ、生命的危機状態を表すことが示された。

5 考察

5.1 概況

本研究では、ロボットの呼吸に伴う不随意表現によるユーザとの自然で効果的なノンバーバルコミュニケーションの実現を目指し、ロボットの呼吸表現における複数の要素を組み合わせた不随意的な呼吸表現を行う人型ロボットを作成した。

提案する表現によるロボットの状態に関する印象を検証した結果、まず全体的な傾向として、胸呼吸の方がよりネガティブな異常状態の表現強度が強いことが示された。これは肩の動作が視認されやすい胸呼吸が、

腹部の呼吸に比べ、ロボットの良くない内部状態として捉えられることを意味する。

次に、深い呼吸は、精神状態の異常に関わる評価 (Q1-Q3) が高まったことから、呼吸による体表位置の変化振幅が精神状態のネガティブな異常状態を示すと考えられる。また、速い呼吸は Q4 以外の印象を高めていた。これらから、深い呼吸や速い呼吸は、動き変化も大きく、たくさんの空気を取り入れなければならない状態を模すことから、通常状態よりも身体的にも負荷が大きい状態と考えられたことが推測できる。

さらに、呼吸が不安定なほど、身体状態の異常に関わる評価 (Q3-Q5) が高まったことから、不安定さが身体状態のネガティブな異常状態を示すと考えられる。

これらのような表現強度が強い呼吸状態の共通する事柄として、実際に身体的負担が大きい状態の人間の呼吸状態にみられる傾向と近いことが挙げられる。

最後に、これらの表現要素の組み合わせにより独特の表現効果が高まることから、いくつかの交互作用により示された。つまり、単純に呼吸表現要素を単体で調整するだけでなく、複合的に呼吸表現をデザインするシステムが必要であることがわかった。

5.2 仮説の確認

質問ごとの仮説検証として、まず Q1 の結果から、呼吸が深く、胸部で、速いこと、がそれぞれ、興奮状態

表 4: ANOVA-3-4 要因間交互作用

	ABC		ABD		ACD		BCD		ABCD	
	<i>F</i>	<i>p</i>								
Q1	0.159	0.697	1.555	0.233	2.259	0.155	1.739	0.208	0.048	0.83
Q2	0.011	0.916	0.327	0.577	0.745	0.402	0.326	0.577	2.549	0.133
Q3	0.056	0.816	0.733	0.406	0.186	0.673	0.785	0.391	0.023	0.881
Q4	2.943	0.108	5.11	0.04*	0.189	0.67	0.111	0.744	6.186	0.026*
Q5	0.878	0.365	0.161	0.694	0.481	0.499	0.001	0.972	0.217	0.648

*:<0.05

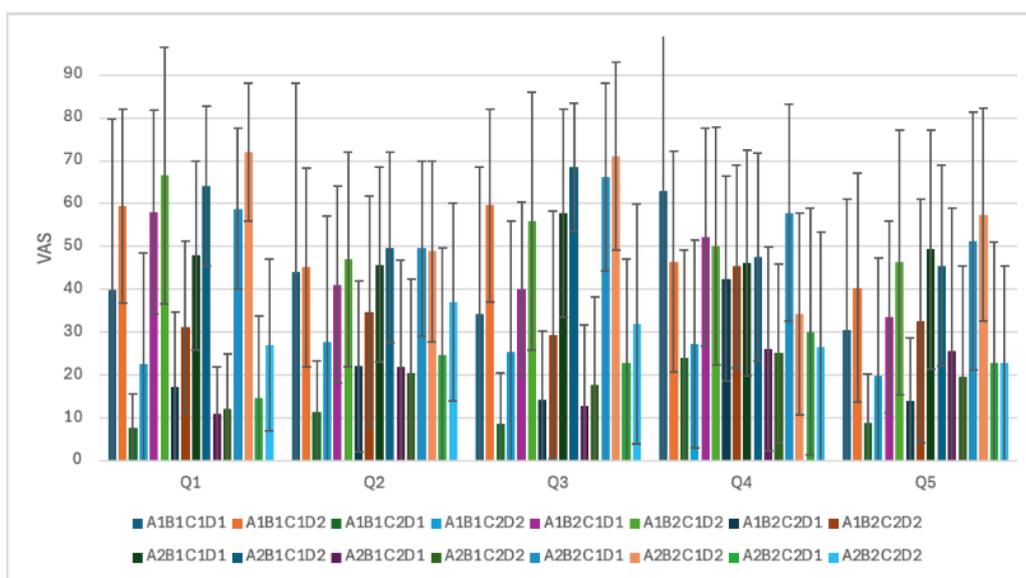


図 3: 分散分析表

を表すことが示され、このことから仮説 1、仮説 2 は支持された。

Q2 の結果から、胸呼吸は不安を強く表し、腹部の呼吸ならば深い方が不安状態を表すことがわかる。このことから仮説 4 が支持され、仮説 2 についても支持された。

Q3 の結果から、胸呼吸はパニックを感じさせ、特に呼吸が不安定だとその傾向が強い。このことから仮説 4 が支持された。一方で呼吸の深さに関して相互作用における有意差は見られず、仮説 2 は一部支持されなかった。

Q4 の結果から胸呼吸は体調の悪さを感じさせ、腹部の呼吸ならば深い呼吸で体調の悪さが表せる可能性が示唆され仮説 3 が支持されることとなり、仮説 2 についても支持される結果となった。

Q5 の結果から呼吸が不安定で、胸部で、速いこと、がそれぞれ、生命的危機状態を表すことが示された。このことから仮説 3 が支持された。一方で呼吸の深さに関して相互作用における有意差は見られず、一方で仮

説 2 は支持されなかった。

つまり仮説 2 は一部支持されず、それ以外の仮説が支持されたことが示された。

5.3 今後の展望

今回扱った呼吸表現要素について、現段階では検証結果に基づいた自動制御の段階にないため、内部状態に応じて、ネガティブな精神的異常状態とネガティブな身体的異常状態の表現を使い分けつつ、通常時と異常時の信号に応じた自動制御を実装する必要がある。

本研究では、ロボットの内部感情の変化を動的に可視化し、それを直感的に伝達する「内部推移モデル」の構築を目指す。このモデルは、ロボットの内部状態を時間経過や外部刺激に応じて連続的に変化させ、不随意表現と連動させることで、ユーザーとの自然で効果的なインタラクションを目指す。また、ロボット自身が一時的な不具合を示す場合に、その状態を迅速かつ正

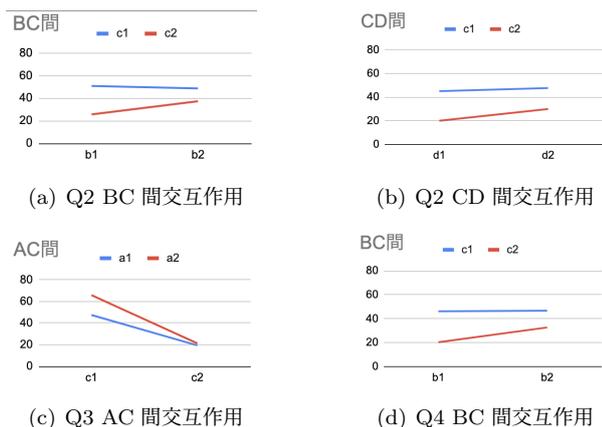


図 4: 交互作用グラフ

確にユーザに伝え、適切な介入や行動を促す仕組みを構築する。

内部推移モデルにより、ロボットの内部状態がユーザにとって理解しやすくなり、共感性や親密度が向上することが期待される。また、不安やストレスの表現を通じて、ユーザがロボットを助ける行動を自然に誘発することが可能となると考えられる。

加えて、ロボットが環境やユーザとの関わりに応じて内部状態を柔軟に変化させることで、状況適応性の高いインタラクションを実現できると考えた。また、今回は呼吸表現のみに着目したが、同じ呼吸状態でも顔色が異なると、伝わる内部状態が変わると考えられるため、実装した呼吸随伴運動システムに加えて新しいモダリティである「顔色」を実装する予定である。

呼吸や顔色の表現を組み合わせることで、より人間らしい身体動作が可能となり、ユーザに対してより共感をもたらすことで、より円滑なコミュニケーションの実現に寄与することが期待される。また、ユーザとロボットとの距離が一定の間隔より小さくなると、呼吸や顔色の変化を行うことでユーザにロボットのパーソナルスペースを伝えられるようになり、ユーザとの関係性の可視化及び構築に役立つと考えられる。

6 おわりに

本稿では、ロボットが環境やユーザとの関わりに応じて内部状態を柔軟に変化させることで、状況適応性の高いインタラクションを実現できると考え、呼吸パラメータに基づいて呼吸状態が変化する人型ロボットシステムを提案した。

実験の結果、複合的な呼吸表現要素の組み合わせにより独特の表現効果が高まることが、いくつかの交互作用により示された。単純に呼吸表現要素を単体で調整するだけではなく、複合的に呼吸表現をデザインす

るシステムの設計が内部推移モデルの実現においても必要であることがわかった。

今後は、内部推移モデルを実装し、実際のパーソナルスペースにおけるユーザの共感性および印象に対する有効性について検証する。

謝辞

本研究は一部JSPS科学研究費補助金 24K02977, 23K11202, 21K11968, 23K11278, 22K19792, の補助を受けて実施した。実験参加者のご協力に深く感謝する。

参考文献

- [1] 岡田美智男,; 人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, vol. 34, no. 5, pp. 299–303, 2016, 一般社団法人 日本ロボット学会.
- [2] 湯浅将英, 武川直樹: ユーザ行動を誘導するための擬人化エージェントの対人印象操作・非言語行動表出モデル, 電子情報通信学会論文誌 D, vol. 94, no. 1, pp. 124–137, 2011.
- [3] Yonezawa, Tomoko. and Yamazoe, Hirotake.: Wearable partner agent with anthropomorphic physical contact with awareness of user's clothing and posture, *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*, pp. 77–80,(2013)
- [4] Yoshida, Naoto. Ueno, Kaede. Mase, Kenji. and Yonezawa, Tomoko.: Arousal and Valence in Robot's Emotional Expression of Breathing and Heartbeat, *Human-Agent Interaction Symposium,G-6*,(2020)
- [5] Nakatani, Yukari. Yoshida, Naoto. and Yonezawa, Tomoko.: Breathing Expression for Intimate Impression Corresponding to the Positional Relationship, *Human-Agent Interaction Symposium,P-14*,(2014)
- [6] Yoshida, Naoto. and Yonezawa, Tomoko.: Investigating breathing expression of a stuffed-toy robot based on body-emotion model, *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction*, pp. 139–144, (2016)
- [7] Sefidgar, Yasaman S. and MacLean, Karon E. and Yohanan, Steve. and Van der Loos, HF

Machiel. and Croft, Elizabeth A. and Garland, E Jane.: Design and evaluation of a touch-centered calming interaction with a social robot *IEEE Transactions on Affective Computing*, Vol. 7, No 2, pp. 108–121, (2015)