倒立振子移動機構を持つ人型ロボットの 反応動作の違いが人に与える印象の変化

垣 尾 政 之^{*1*2} 宮 下 敬 宏^{*2} 光 永 法 明^{*2}
石 黒 浩^{*1*2} 萩 田 紀 博^{*2}

How does a Reactive Behavior of a Wheeled Inverted-Pendulum-Type Humanoid Robot Affect Human Impressions?

Masayuki Kakio^{*1*2}, Takahiro Miyashita^{*2}, Noriaki Mitsunaga^{*2},
Hiroshi Ishiguro^{*1*2} and Norihiro Hagita^{*2}

In this paper, we report the importance of the reactive behaviors of humanoid robots against human actions for smooth communication. We hypothesize that the reactive behaviors of robots play an important role in achieving human-like communication between humans and robots since the latter need to be recognized by the former as communication partners. To evaluate this hypothesis, we conducted psychological experiments in which we presented subjects with four types of reactive behaviors resulting from pushing a wheeled inverted-pendulum-type humanoid robot. From the experiment, we found that subject's impressions to the robot regarding extroversion and neuroticism changed by the robot's reactive behaviors. We also discuss the reasons for such changes in impressions by comparing the robot's and human reactive behavior.

Key Words: Reactive Behavior, Wheeled Inverted Pendulum, Humanoid Robot

1. 緒 言

近年、ロボットの活動範囲は、工場などの非日常的な環境から、より身近な日常生活環境に広がってきた。そのため、人と接するロボットの不可欠な機能として、ロボットの音声対話や身体動作などのコミュニケーション機能の研究が盛んになっている[1]~[8]。我々の研究グループでは、見る・聴く・話す・ジェスチャーする、などのコミュニケーションの基本機能を持つロボットとして、上半身が人型の車輪移動ロボット Robovie (4号機の外観を Fig. 1 に示す) を研究開発している。この研究開発において、我々は一般から募集した被験者によるロボットとのコミュニケーション実験や、一般の人々を対象としたイベントでの展示を行ってきた。その経験から、我々は、コミュニケーション相手となる人々に、ロボット自身がコミュニケーション可能な対象であると認識させることが、人とロボットのコミュニケーションの実現において重要な要素の一つであると考えている。

ロボットが人にコミュニケーション対象であると認識されて

Fig. 1 Robovie-IV

いる場合と、そうでない場合とでは、人のロボットに対する話し方や接し方は異なっており、前者では人が人と接するときに近いコミュニケーションとなるが、後者では人が物と接するときに近い接し方になる。ロボットのコミュニケーション機能を人に近い形で実現するための前提条件は、ロボットのユーザである人が、人と接するときと近い形で利用してくれることであり、その前提条件を満たすためには、ロボットが人にコミュニケーション対象であると認識され、認識され続けることが大事な要素となる。コミュニケーション相手として「認識される」ことは「認識され続ける」ことの前提条件に当たる。「認識される」ことが継続されるのが「認識され続ける」であると考えら

原稿受付 2009年5月13日

^{*1}大阪大学大学院工学研究科

^{*2}(株) 国際電気通信基礎技術研究所知能ロボティクス研究所

^{*1}Graduate School of Engineering, Osaka University

^{*2}ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories

■ 本論文は提案性で評価されました。

れる。「認識され続ける」ためには、飽きなどの課題もあるかと考えられるが、「認識され続ける」ためには「認識される」と「続ける」ことが必要であり、「認識される」ことは「認識され続ける」に包含されると考えられる。

ここで、人が相手にコミュニケーション対象として認識され続けるための要素を考える。人は相手がなにを感じ、どのように考えているかを、様々な情報、特にノンバーバル情報を使って推し量っている[9]。人がもし、このような推量を行えなかったり、行えたとしても間違える場合は、相手がなにを感じ、なにを考えているのか知ることができないため、その人はコミュニケーション対象として認識され続けることは困難になるだろう。人とロボットのコミュニケーションにおいて、そのような困難さを回避するために、人の動作に対するロボットの（擬似的な）感情や性格、考えていることなどの内部状態を、顔表情や動作などのノンバーバル情報によって表すことができれば、ロボットは人にコミュニケーション対象として認識され続けやすくなると予想できる。

従来研究において、ロボットの内部状態を、顔表情を用いて表現する手法が考えられてきた。Breazeal et al. [2] は Kismet と名付けた人の形状を模したロボットを開発し、顔表情を用いたインタラクションを実現した。彼女らは、人の状況や覚醒度合いによる感情モデルからロボットの内部感情モデルを構築し、その表現形態として顔表情を用いた。Takanishi et al. [3] は WE-3RIII と名付けた人型ロボットを開発し、感情表現について研究した。彼らもまたロボットの感情に基づく内部状態などを構築し、Ekman and Friesen [10] によって提案された六つの基本表情を用いて顔表情を作り出した。これらの表現は人にとって、ロボットがコミュニケーション対象であると認識され続けるために必要なものである。しかしながら、これらの研究は、顔表情を使って内部状態を表現することに焦点が当てられており、ロボットから人への一方向の情報を伝える動作生成に関する研究である。人の動作に反応するロボットの動作（以後、ロボットの反応動作と呼ぶ）という視点は述べられていない。人に与える印象を考慮に入れた、このようなロボットの反応動作を用いれば、ロボットはより自分の内部状態を推量されやすくなると考えられる。

また、ロボットの内部状態を、ノンバーバルな動作を用いて表現する手法に関する従来研究として、Shibata et al. [6] や Nakata et al. [7] が行った、ロボットの人に対する反応動作の違いが、その人の持つ印象を変化させるとの研究がある。Shibata et al. はパロと名付けたアザラシ型のロボットの人の触れ合いを研究した。彼らは、人がロボットの頭を触ったときに、腕や足を動かす一連の反応動作が人に楽しみや安らぎを与えることを示した。Nakata et al. はシャチ型のロボットを用いて、その反応動作の違いによって、ロボットに対する親近感が変わることを示した。彼らの研究は動物型のロボットを用いた研究であり、それらの反応動作の印象はロボットの形状に大きく依存しており、人が人と接しているときと同様な印象を持っているとは言いがたい。

本論文では、ロボットが人のコミュニケーション対象として認識された上で、コミュニケーション相手として認識され続け

るために必要なロボットの反応動作の生成を行う。具体的には人に押されたときの人型ロボットの反応動作を構築し、その反応動作の違いによって人が持つ印象が変化することを示す。このような印象をロボットが制御できれば、相手にロボットの内部状態を自然に伝えることができ、より円滑なコミュニケーションの実現が期待できる。人に押されたときには、人の安全性の観点からは、ロボットの移動機構にかかわらず、押された方向に移動するのが代表的な反応動作であろう。本論文ではそのような反応動作を作り出すために、Robovie-IV と名付けた倒立振子移動機構を持つ人型ロボットを用い、その反応動作の違いによる人の印象変化を評価する実験を行う。倒立振子移動機構は、人に押されたときの人型ロボットの様々な反応動作を、移動機構の制御パラメータを変更することによって容易に構築することができるため用いた。実験の結果、ロボットの制御パラメータの違いによって作り出される反応動作の違いによって、人の印象が変化することが明らかになった。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では反応動作についての説明と実験で用いる人型ロボット Robovie-IV の説明を行う。第3章ではロボットの反応動作の説明および、その反応動作を用いた実験について示す。第4章で反応動作と印象の関係を考察し、第5章でまとめを示す。

2. 人の動作に反応するロボットの動作

本章では、人の反応動作が異なると相手に与える印象が異なることを、従来のノンバーバルな動作研究での知見を用いて示す。また、従来の知見を拡張して、対面する状況で前から押されたときの反応動作が異なる場合に、印象が変化することについて考察する。その考察内容を実現できるような、人に押されたときのロボットの反応動作の構築手法について述べる。

2.1 人の反応動作

人の動作に反応して、人が何らかの動作をするときに、同じ意図を持った反応動作であっても、その伝えたい意図の程度によって、その動作が異なり、また、相手に与える印象は大きく異なる。Morris [11] は人の反応動作の一つである威嚇動作について述べた。ある人が怒りの表現を他の人に伝えるときに、3種類の手法がある。一つ目は握り拳を作るなどの攻撃動作を始める動作である。二つ目は物理的接触はないものの動作を完了させる動作、例えば握り締めた拳を相手に身体的接触がないように振り回す動作などである。三つ目は実際に物理的接触はあるが、相手には接触することなくほかの対象、例えば机などを叩くような動作のことである。それら3種類の反応動作の違いによって、相手の印象が異なることは明らかであり、人は相手にどのような印象を与えたいかによってそれらの動作を適切に使い分けている。

同様の現象は、パーソナルスペースの知見からも読み取れる。Hall [12] はコミュニケーション時の人と人の距離を4種類に分類した（密接距離（0～450 [mm]）、個体距離（450～1,200 [mm]）、社会的距離（1,200～3,600 [mm]）、公衆距離（3,600 [mm] 以上））。例えば、密接距離は極親密な関係や怒っている感情を表現するときに観測される距離である。同様に、他の3種類の距離でもそれぞれの関係性や伝えたい感情の表現という意味を

Fig. 2 DOFs configuration and wheeled inverted pendulum mechanism of Robovie-IV

持っており、パーソナルスペースも一種の反応動作とみなすことができる。威嚇動作やパーソナルスペースと同様に、人が前から押されたときの反応動作でも同様にその反応動作の違いによって相手に与える印象が異なる。押されたときに、その場に留まろうと抗うのか、押されるがままに後退し、離れた場所に静止するのかなどは、押した相手に対して与える印象は異なるであろう。もし、押されたことに抵抗するような様子がみられた場合、押した人は押された人が気が強い人であるかのように感じるかもしれない。このような印象の違いを以下に示すコミュニケーションロボット Robovie-IV を用いて示す。

2.2 実験で用いるロボット Robovie-IV の概要

Fig. 1 に本研究で用いるロボット Robovie-IV を示す [13]。Robovie-IV は両腕に各 4 自由度、首には 3 自由度、両目に各 2 自由度を持つ。車輪部には、二つの駆動輪を持ち、キャスターによる四つの補助輪がある。また、補助輪状態と倒立振子状態を切り替えるために上体を持ち上げるジャッキを備える (Fig. 2)。補助輪状態の身長は 100 [cm] であり、倒立振子状態の身長は 105 [cm] である。倒立振子状態では、体の姿勢と車輪の位置のフィードバック制御を行っており [14]、体の姿勢や車輪に外乱が加わった場合、元の位置へ戻ろうとするトルクが生じる。

2.3 Robovie-IV の倒立振子移動機構

倒立振子移動機構は常に体の姿勢を保つ制御系が入っており、前から押されたときに人のような反応動作を作り出すことが可能である。この機構においては、車輪制御の PID ゲインの値の設定方法によって、外乱が加わった場合にバネ・ダンパの特性が異なる反応動作を実現できる。また、このような反応動作は倒立振子移動機構でなくとも、車輪にインピーダンス制御などを実装した機構でも実現可能である。

Robovie-IV では、Fig. 3 に示すように、Ha and Yuta [15] の制御モデルを変更したものをを用いる。彼らの研究では最適レギュレータ理論を用いたトルク制御が行われているが、Robovie-IV のモータドライバの入力が角速度であるため、式 (1)、式 (2) により角速度制御系を構築する。また、Robovie-IV は人型ロボットであるため、腕や首の動作の影響を考慮に入れる。Fig. 4 に一次元倒立振子モデルを示す。また、このモデルで用いられる変数を Table 1 に示す。このような変更の結果、我々は以下の式を導いた。

Fig. 3 Wheeled-inverted-pendulum block diagram

Fig. 4 Wheeled-inverted-pendulum model

Table 1 Variables of Wheeled-inverted-pendulum model

ϕ	the inclination angle of the body	K_p	gains for wheel control ($\dot{\theta}$)
θ	the angle of wheel rotation	K_i	gains for wheel control ($\ddot{\theta}$)
T	torque for wheels	K_d	gains for wheel control ($\ddot{\theta}$)
ϕ_{comp}	the compensation angle of the center of gravity	K_l	the gain that correlates to desired velocity with posture control
$\dot{\theta}_{des}$	the desired velocity of the wheels	M	the mass of the body
K_a	gains for posture control ($\dot{\phi}$)	$\dot{\alpha}_d$	the reference velocity of the motor as controller output
K_b	gains for posture control (ϕ)		

$$T = -K_p(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{des.}) - K_i \int (\dot{\theta} - \dot{\theta}_{des.}) dt - K_d \frac{d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{des.})}{dt} - K_a \dot{\phi} - K_b \int (\dot{\phi} + \dot{\phi}_{comp.} + K_l \dot{\theta}_{des.}) dt \quad (1)$$

$$\dot{\alpha}_d = \dot{\theta} + \frac{1}{M} \int T dt \quad (2)$$

Fig. 3 にこのコントローラのブロック線図を示す。車輪制御パラメータ K_p 、 K_i は反応動作が実験条件に合わせて多様なものとなるよう調整した。詳細は第 3 章に述べる。 K_d は、微小な値を入れて応答性能の改善を図った。また、腕や首の角度から重心補正角度 $\phi_{comp.}$ を導き、Fig. 3 の姿勢制御パラメータ K_a 、 K_b 、指令角度値が姿勢角度に与える影響に関するゲイン K_l は、予備実験を行い安定なパラメータをそれぞれ調整した。

3. 実 験

本章では、実験手法および、解析結果について示す。

3.1 Robovie-IV の反応動作の実現

本節では、Fig. 3 に示す車輪制御パラメータ K_p と K_i を変化させることによって得られる 4 種類の反応動作について示す。この 4 種類の反応動作は被験者の経験する 4 実験条件となる。Robovie-IV の車輪制御は、目標車輪角速度や目標位置などの

Fig. 5 Time series data of robot's position for each reactive behavior when a subject pushes the robot

指令値、各センサ情報を用いて、第2章の倒立振りコントローラを用いて制御される。本論文で作り出す反応動作は、この K_p と K_i のみを用いて作り出す。ただし、ロボットの動作が機械的な印象を与えないように、車輪の制御以外に、すべての反応動作で首と腕を4条件で同様に動かした。

K_p は $\dot{\theta}_{des}$ と $\dot{\theta}$ の差分にかかるゲインである。式(1)より、この倒立振りコントローラは前後方向に外乱を受けた場合、車輪モータの角速度誤差を減少させる方向にトルクが生じる。つまり K_p は、ダンパ定数に類似する。 K_i は $\int \dot{\theta} dt$ と $\int \dot{\theta}_{des} dt$ の収束誤差の積分ゲインである。式(1)より、この倒立振りコントローラは前後方向に外乱を受けた場合、車輪モータの角度誤差を減少させる方向にトルクが生じる。つまり K_i は、バネ定数に類似する。

これらの二つのゲインの組み合わせにより、**Fig. 5** に示すような4種類の反応動作を作り出した。グラフは前から押されたときのロボットの反応動作の時系列データを示しており、横軸が時間、縦軸が押された位置からのロボット前後方向の位置を示している。ここで、マイナス方向がロボットにとって前向き方向である。つまり、被験者から押され後退し、動作が収束することを示している。以下、それぞれの実験条件の詳細について示す。

実験条件：(a) $K_p(large)$, $K_i(large)$ (以下、(a) と示す)

PID チューニングにより、 K_p と K_i のゲインの組み合わせを構成した。これらのゲインの組み合わせにより得られる反応動作を **Fig. 5(a)** に示す。ロボットが前から押されたとき、ロボットは後ろに下がり、少しオーバーシュートしながら前進し、元の位置に戻ってくる。

実験条件：(b) $K_p(large)$, $K_i(small)$ (以下、(b) と示す)

この反応動作のゲインの組み合わせにおいて、 K_p は (a) と同様で、 K_i は (a) の3分の1になるように構成した。**Fig. 5(b)** に示すように、ロボットが前から押されたとき、ロボットは後ろに下がり、ゆっくりと元の位置に戻ってくるように前進する。

実験条件：(c) $K_p(small)$, $K_i(large)$ (以下、(c) と示す)

この反応動作は、 K_p は (a) の2分の1、 K_i は (a) と同様になるように構成した。**Fig. 5(c)** に示すように、ロボットが前から押されたとき、ロボットは後ろに下がり、オーバーシュートしながら素早く前進するが、数回振動をした後に元の位置に収束する。

実験条件：(d) $K_p(small)$, $K_i(small)$ (以下、(d) と示す)

この反応動作は、 K_p は (a) の2分の1、 K_i は (a) の3分の1となるように構成した。**Fig. 5(d)** に示すように、ロボットが前から押されたとき、ロボットは後ろに下がり、少しオーバーシュートしながら前進し、その先で停止する。

3.2 実験設定

前節で述べた四つの反応動作を評価するために、アルバイトとして一般の学生に公募をかけ、筆者ら、筆者らの所属する組織、実験者とは面識のない被験者を採用した上で実験を実施した。被験者は10代と20代の26名（男性16名、女性10名）の大学生であり、13名ずつの2グループ（Group A, B）に分類した。Group Aの被験者に対しては、(a) と (b) の2反応動作の評価をさせる。また、Group Bの被験者に対しては、(c) と (d) の2反応動作の評価をさせる。二つの反応動作のどちらかが終わるたびに、被験者は別室にてアンケートを書く。実験を行った順による効果を取り除くために、2条件の順序を統制し被験者間でカウンターバランスが取れるように行う。実験を行うに当たって被験者に指示する内容を以下に述べる。

1. ロボットの正面に立つ。
2. 実験者が教示するように、遊んでいるロボットをいじめるように軽く押す。

予備実験で様々な指示をした結果より、これらの指示は最小で適切なものであると考えた。このような指示がなかった場合、押し方が強すぎたり弱すぎたりする被験者が存在し、実験が成り立たなくなる。印象は状況に依存する。予備実験において、ロボットと被験者の状況などを何も指示をせずに実験を行ったところ、被験者がその状況をどう想像するかによって、ロボットに対する印象の評価結果が変化することが分かった。印象評価の結果に対して、なぜこの評価となったかを聞き取り調査したところ、ある被験者は「押したことに怒って、自分に迫ってくる感じが強気であると感じた」ので外向性が高いようにアンケートに答えたと述べた。またある被験者は「なぜ自分のほうに迫ってくるのか分からない」のですべて真ん中（どちらでもない）につけたと述べた。このように、同じ押されたことに対する反応動作であっても、被験者が思い描く状況によって印象が大きく異なることが明らかとなった。また、ロボットを人がいじめるという状況は、三菱重工業の *wakamaru* [16] やトヨタの *ロビーナ* [17] のデモンストレーションにおいても多く見受けられる。例えば、ロボットを叩いたり、ロボットの行き先を妨げたり、ロボットの目を隠したりする行為である。本論文では、人がロボットをそのようにいじめるという状況を用いて、被験者の持つ設定の統制を取った。被験者は、実験者に教示を受け一回の練習と一回の本番を行う。また、被験者は各動作を経験するたびにロボットの反応動作を評価するためのアンケートを書く。ロボットが遊んでいるということを表現するために、押さ

Fig. 6 Reactive behaviors (experimental scenes)

れるまで腕と首を軽く動かした。4種類の反応動作を Fig. 6 に示す。実験時間短縮と被験者が疲れることを防ぐために、各被験者が行う実験時間はアンケートに答える時間も含めて 30 分に限定する。30 分は実験時間として短く感じるが、直立して行う実験であり予備実験の結果から集中して行える限界の時間として設定した。

3.3 ビッグファイブ理論を用いた印象評価

ビッグファイブ理論によると人の性格は外向性、協調性、知性、情緒安定性、勤勉性の直交 5 因子によって表すことができる [18]。ここではロボットの反応動作の違いが人に与える印象の違いをこの直交した 5 因子を用いて評価する。しかし、評価した反応動作が必ずしも直交するとは限らない。

ビッグファイブは、B. Reeves と C. Nass によるメディアの等式 [19] でもメディアの振る舞いに対する印象を評価する指標として用いられている。彼らは人がどのようなメディアであっても擬人化するという性質を使って印象の評価をしており、擬人化することから、人の性格の評価であるビッグファイブをメディアの評価ツールとして使えることを示唆した。本論文では、メディアの一つとして捉えることができるロボットがどのように振る舞えばよいのか評価するために、メディアの等式と同様にビッグファイブの指標を用いている。そのため、ロボットの反応動作の違いを評価するのに最適であると考えた。

Table 2 Adjective pairs for each factor in five-factor model

Factor type	Negative meaning	Positive meaning
Extroversion (外向性)	不活発な 消極的な	活発な 積極的な
Agreeableness (協調性)	不親切な 冷たい	親切な 暖かい
Intellect (知性)	好奇心に乏しい 短絡的な	好奇心のある 思慮深い
Neuroticism (情緒安定性)	気分が不安定な 感情的な	気分が安定している 理性的な
Conscientiousness (勤勉性)	怠惰な 無責任な	勤勉な 責任感のある

各因子について文献 [18] [20] で用いられた形容詞対を参考に二つずつ選択し、7 段階評価によるアンケートを実施した。用いた形容詞対を Table 2 に示す。アンケート用紙上では、質問意図を隠すため、形容詞対の並びを変えている。各因子について二つの形容詞対の評価を平均し、その因子の得点とした。便宜上、肯定的な意味を持つ側の値を 7、否定的な意味を持つ側の値を 1 と表した。

3.4 実験結果

K_p の大小と K_i の大小の組み合わせの 4 種類の反応動作ごとに被験者のアンケート結果を分類し、条件によってウィルコクサン符号付順位検定もしくはマン・ホイットニーの U 検定に

Fig. 7 Average score of extroversion. There was a significant difference in the main effect between $K_i(large)$ and $K_i(small)$ ($p = 0.030$)

Fig. 8 Average score of neuroticism. There are significant differences in the main effect between $K_p(large)$ and $K_p(small)$ ($p = 0.091$), and $K_i(large)$ and $K_i(small)$ ($p = 0.0098$)

よって有意差が得られた印象評価の結果を **Fig. 7, 8** に示す。ここでは、 K_p が大きい条件である (a) $K_p(large)$, $K_i(large)$ と (b) $K_p(large)$, $K_i(small)$ をまとめたものを $K_p(large)$, K_p が小さい条件である (c) $K_p(small)$, $K_i(large)$ と (d) $K_p(small)$, $K_i(small)$ をまとめたものを $K_p(small)$ として分類し、そのグループ間の印象評価のアンケート結果をマン・ホイットニーの U 検定によって評価した。また、 K_i が大きい条件である (a) $K_p(large)$, $K_i(large)$ と (c) $K_p(small)$, $K_i(large)$ をまとめたものを $K_i(large)$, K_i が小さい条件である (b) $K_p(large)$, $K_i(small)$ と (d) $K_p(small)$, $K_i(small)$ をまとめたものを $K_i(small)$ として分類し、そのグループ間の印象評価のアンケート結果をウィルコクサン符号付順位検定によって評価した。このように K_p と K_i の大小で整理した場合、印象の有意差は外向性と情緒安定性において得られたが、協調性、知性、勤勉性では有意差は得られなかった。Fig. 7, 8 の上図は、水平軸方向に K_i を並べ、 K_p の大小ごとに線をつないだものである。鉛直軸方向は印象評価値の平均値を示す。また下図は、どのゲイン間に有意差があるか示すために、 K_i と K_p の大小ごとに整理し 2 条件にまとめなおし、平均値を示したものである。また、標準偏差を細い線分で示し、検定にて有意差の存在する組み合わせについて *, + を用いて示した。これらの結果から、 K_i と K_p の大小で反応動作が変化し、ロボットに対する被験者の印象が変化することが示された。因子ごとの整理結果の詳細を以下に述べる。

外向性

$K_i(large)$ と $K_i(small)$ を比較し、 K_i による印象の影響

をウィルコクサン符号付順位検定により評価した結果、有意差 ($p < 0.05$) が存在した。つまり K_p を固定して、 K_i を大きくすれば外向性の印象評価が高くなることを示している。

情緒安定性

$K_i(large)$ と $K_i(small)$, $K_p(large)$ と $K_p(small)$ を比較し、 K_i による印象の影響をウィルコクサン符号付順位検定、 K_p による印象の影響をマン・ホイットニーの U 検定により評価した結果、 $K_i(large)$, $K_i(small)$ の間に有意差 ($p < 0.01$), $K_p(large)$, $K_p(small)$ の間に有意傾向 ($p < 0.1$) が存在した。つまり K_p を固定して、 K_i を大きくするか、もしくは K_i を固定して、 K_p を大きくすれば情緒安定性の印象評価が高くなることを示している。

3.5 ロボットの反応動作の定量的評価

本節では、実験で用いた 4 種類の反応動作について各条件の定量的評価を行う。まず、制御ゲインを変化させることによって変化するロボットの反応動作の違いについて評価を行い、そのときの印象の変化について述べる。次いで、ロボットの押し方の違いによって変化するロボットの反応動作の違いについての評価を行い、印象との相関を計算する。また、予備的な解析から、 θ の時系列変化の割合に比べて ϕ の時系列変化の割合は小さく、その印象に与える影響も小さいと考えたので、 ϕ に関しては詳細な解析は行わない。

ロボットの反応動作の定量的評価は多様に行うことができ、例えば時系列を追って評価を行うと、「押す」→「後退した速度の最大値」→「後退した位置」→「人に近づく速度の最小値」→「人に近づいた位置」→「発振回数」という順序で評価を行うことができる。このなかで、「後退した位置」「人に近づく速度の最小値」「人に近づいた位置」で $K_i(large)$ と $K_i(small)$ の間で有意差が存在する (二要因二水準分散分析の主効果)。これらは予備的な評価であり、本論文では「人に近づく速度の最小値」「人に近づいた位置」について示す。また、人とロボットの動作の関係として、ロボットを押すときの距離についても示す。ここでの位置・速度は 3D モーションキャプチャシステム (Vicon MotionSystems, VICON 612) を用いてロボットの位置を計測することにより行う。サンプリング周波数は 60 [Hz] で、空間分解能は 1 [mm] である。

ここで、3.4 節に示したように $K_i(large)$ と $K_i(small)$ の間で印象の有意差があるのは、外向性・情緒安定性であり、これらの印象の形成は評価したロボットの動作の評価値と関係があると考えられる。そのなかで、外向性の印象の有意差があった理由として被験者に対するパーソナルスペースを侵すという理由でロボットの迫り方の違いが重要であると考えられる。ここでは、迫り方に関する評価指標として重要であると考えられる「人に近づく速度の最小値」「人に近づいた距離」について解析結果を示す。また、情緒安定性の印象の有意差があった理由として、 $K_i(small)$ ではロボットの元の位置付近に発振することなく動作が収束するような反応動作を行ったことが考えられる。そのため、発振回数についての解析結果を示す。

- ロボットが押されたあとに人に近づく速度の最小値

Fig. 9 Advancing velocity

Fig. 10 Approach position

押されたあとにロボットが人に近づく速度の最小値は、 $K_i(large)$ と $K_i(small)$ 、 $K_p(large)$ と $K_p(small)$ の間に有意差がある (Fig. 9, $p = 2.37 \times 10^{-10}$, $p = 0.028$).

● ロボットが押されたあとに人に近づく距離

押されたあとにロボットが近づいてきたとき、人とロボットの距離が最短となるのは $K_i(large)$ ではロボットの動作が未収束のときである。ここでの収束の判定について以下に述べる。本研究の $K_i(small)$ では、いくつかの実験で押されたときに元の位置に戻ってこず、その前後に静止することが散見され、一般的な制御の考え方の収束では定義ができない。そのため、ロボットの後ずさる最大速度の $\pm 10\%$ 以内でかつ 10 秒間その状態を維持できた時点を収束した時点とみなす (Fig. 5#2)。ここで、 $K_i(large)$ ではロボットが近づいた量は $K_i(small)$ に比べて有意に小さい (Fig. 10)。また、 $K_p(small)$ では収束の位置でのロボットが近づいた量は $K_p(large)$ に比べて有意に小さい ($p = 2.04 \times 10^{-7}$, $p = 4.87 \times 10^{-4}$)。

● 発振回数

発振回数の比較を行う。本論文では、発振しているとの判断を、先ほど計算したロボットの後退する距離から求める。その距離が $\pm 20\%$ 以上であれば発振しているとみなす (Fig. 5#1)。なお (b) と (d) では、前節で定義した収束の位置が、後退する距離の $\pm 20\%$ 以上であれば発振しているとみなす。その発振回数の平均値を比較し、対応なし二要因二水準分散分析により、条件間に有意差があることが示された (Fig. 11, $F(3, 51) = 26.64$, $p = 2.72 \times 10^{-10}$)。

さらに、 K_i 、 K_p の主効果を評価したところ、それら

Fig. 11 Number of oscillation

Fig. 12 Initial position

の間に有意差があることが示された ($p = 1.76 \times 10^{-9}$, $p = 1.28 \times 10^{-4}$).

次に、 $K_p(large)$ と $K_p(small)$ に分類して行ったロボットの定量的評価を行う。 K_i の大小によって変化するロボットの動作は「人に近づく速度」、「人に近づいた距離」、「発振回数」を用いて評価を行った。それらの評価は K_p の大小でも有意差が存在した。また、被験者がロボットを押したときの状況について解析を行う。具体的には、押したときの感触と距離である。

● ロボットを押したときの感触

被験者がロボットを押したときの感触は、ロボットの進行方向に対して原点付近で押されていることから、速度変化に関係する K_p のパラメータが位置変化に関係する K_i のパラメータに対して、先んじて影響を与えることが推測される。また、 K_p が大きいときには、車輪の目標速度との偏差に対する素早い反応が起こることから、元の速度に収束させるための大きな力、つまり“硬い”感触が得られる。逆に K_p が小さいときには、“柔らかい”感触となることが推測される。

● ロボットを押したときの距離

押したときの距離 (実験映像から被験者の顔とロボットの車輪間の距離を計測) は Fig. 12 に示すように有意に $K_p(large)$ が大きく、 $K_p(small)$ より遠くから押したことが分かる ($p = 0.0140$)。

ここで $K_p(large)$ と $K_p(small)$ の組の間に印象差の有意傾向があるのは情緒安定性についてであり、すなわちロボットの近くから押す“柔らかい”感触は情緒安定性の印象を低くすると考えられる。

3.6 ロボットの押し方の違いと印象との関係

ロボットの反応動作は被験者の押し方の違いによって、後退する距離や近づいてくる距離、後退する速度などが微妙に変化する。以下にはその変化した動作と印象の関係について示す。

先述のロボットの反応動作の評価指標と印象との相関を計算し

Fig. 13 Correlation coefficient between receding velocity of (b) and the impression

Fig. 14 Correlation coefficient between receding velocity of (d) and impressions

たところ、 $K_i(\text{small})$ の (b) と (d) にのみ有意な相関がみつかった。そのような相関は、(b) においては「後退した速度の最大値」-「協調性」(Fig. 13, $r = -0.60$, $p = 0.030$), 「後退した位置」-「協調性」($r = -0.52$, $p = 0.068$). (d) においては「後退した速度の最大値」-「外向性, 協調性」(Fig. 14, $r = 0.55$, $p = 0.051$, $r = 0.66$, $p = 0.015$), 「後退した距離」-「外向性, 協調性」($r = 0.58$, $p = 0.039$, $r = 0.58$, $p = 0.039$), 「人に近づく速度の最小値」-「協調性」($r = -0.62$, $p = 0.025$), 「人に近づいた位置」-「協調性」($r = -0.56$, $p = 0.047$) の間で有意な相関がみつかった。

4. 考 察

第 3 章では、車輪制御パラメータ K_p と K_i を変化させることによって、被験者の動作に対するロボットの反応動作を変化させ、被験者のロボットに対する印象が変化することを示した。状況を限定せずに反応動作の印象を評価することは我々の予備実験からも困難であることが明らかになっているため、このように印象が変化するのはロボットをいじめるという限定された状況において実験された結果ではあるが、これらの印象の変化はロボットの反応動作の違いによって考察することができる。本論文でのロボットの反応動作は、 K_p と K_i に依存する発振回数と収束位置によって分類できる。以下に、反応動作と外向性・情緒安定性の印象が変化した理由について考察する。

外向性: $K_i(\text{large})$ のように、ロボットが大きなオーバーシュートとともに被験者の方向に戻ってくると (Fig. 10), 被験者はロボットが外向的であるとの印象を持つ。この結果を人の動作に当てはめて考察する。人は姿勢のバランスを常に取っているが、平常な感情のときに押された場合、元の位置に戻ってくるような反応動作は通常は存在しない。しかしながら、人がもし押されたことに立腹したのであれば、

元の位置に戻ってきて、さらに押した側の人に近づく可能性がある。被験者はこのような人の反応動作をロボットの反応動作に当てはめ、ロボットへの外向性の印象を変化させたと考えられる。

また、パーソナルスペース [12] の考え方をを用いても考察することが可能である。本論文では、初めに被験者はロボットの前に立つよう指示されており、初対面で前から押すというシチュエーションから個体距離になっている。しかし、押した後 $K_i(\text{large})$ では、ロボットが被験者の方に近づき、個体距離の近接相や密接距離になっていることが明らかである (Fig. 10)。人と人のパーソナルスペースの考え方や距離をそのまま人とロボットの関係に当てはめるなら、初対面という状況を考えると個体距離や社会的距離が適切な距離となる。それに反して、 $K_i(\text{large})$ では個体距離の近接相もしくは密接距離になっており、そのために外向性の印象を変化させたと考えられる。

さらに、 K_i を大きくすることによって被験者に迫ってくるロボットの動作速度が速くなることが、外向性の印象を高めた可能性もある。従来研究では、ロボットアームが被験者に近づいてくる速度の違いによって印象が変化することが示されている [21] [22]。本論文で解析したような、被験者に近づく人型ロボットの動作速度の変化が外向性の印象を変化させるとの知見に直接関係するような文献は、筆者らが調べた所見つからなかったが、ロボットアームのショルダ・エルボ角の角速度が大きくなり被験者に近づく速度が速くなれば、被験者に対する心的負荷量が多くなることが示されている [21]。

情緒安定性: ロボットが後ずさるときに、 K_p が大きくなるにつれて、その速度が大きくなる。また、近づいてくる距離は、 K_p が大きくなるにつれて遠くなる。さらに、ロボットが被験者に近づいてくるときに、 K_p を小さくするか、 K_i を大きくするのに従って発振回数が多くなる。それらの結果、情緒不安定であるとの印象を変化させたと考えられる。被験者がロボットを押すときに、 K_p を大きくするのに従って、その感触が“硬く”なることが推測される。“硬い”感触は、情緒安定であるとの印象を与えた可能性がある。また、少し大きめの力で押すために $K_p(\text{large})$ では被験者がロボットに比較的遠くから押したことが示されている。これらの複合的な要因により、情緒安定性の印象が変化したと考えられる。

また、ゲインの組み合わせによって変化するロボットの反応動作による印象の違いだけでなく、被験者のロボットの押し方の違いによって生じる微小な反応動作の変化によっても外向性の印象が変化することが示された。Fig. 10 に示すように、ロボットが人に近づいてくる距離は、 $K_i(\text{small})$ でバラつきが大きくなる。そのようなバラつきの大きさがありロボットの反応動作を被験者が予想しにくいときのみ、押し方の違いによって生じる反応動作の違いによって印象が変化すると考えられる。印象が変化した理由として、強めに押したときに“硬さ”を感じ外向性が高い印象を持ち、期待どおりの反応をすることによって

協調性が高い印象となったと考えられる。

5. 結 言

本論文では、ロボットが人にコミュニケーション対象として認識され続けるための要素の一つとなりうる反応動作に注目し、人型ロボットが前から押されたときの反応動作を構築した。さらに、この反応動作の違いが、コミュニケーション相手の印象に影響を与えることを被験者を用いた実験で示した。具体的には、人がロボットをいじめるという状況において、ゲインの組み合わせの違いによって、被験者へのロボットの迫り方を変化させることができ、その結果外向性・情緒安定性の印象を変化させることができた。また感触を変化させることにより、情緒安定性の印象を変化させることが明らかになった。さらに、 $K_i(\text{small})$ ではロボットの動作の分散が大きく、被験者のロボットの押し方の違いによって外向性・協調性の印象が変化することが明らかになった。この実験結果から、ロボットがいじめられるなどの特定の状況においては、人型ロボットは、自らの反応動作で内部状態を表現しつつ、人とコミュニケーションを行うことができることが分かった。

ここでは、ロボットの車輪の制御パラメータを変化させて反応動作を構築したが、ほかにも目や顔の向き、腕の動きなどを用いた反応動作は多数存在している。今後の課題は、それらの制御パラメータを同様に変化させて、反応動作の違いを作ることにより、内部状態をより的確に表現することである。コミュニケーション相手である人は、これらの情報から内部状態を推し量ることがさらに容易になり、ロボットはコミュニケーション対象として認識されやすくなるため、より円滑なコミュニケーションの実現が可能になる。

謝 辞 本研究は、科研費基盤研究 (s) (20220002) の助成を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- [1] H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, T. Maeda, T. Kanda and R. Nakatsu: "Robovie: an interactive humanoid robot," *Int. J. Industrial Robotics*, vol.28, no.6, pp.498-503, 2001.
- [2] C. Breazeal and B. Scassellati: "A context-dependent attention system for a social robot," *Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 1999.
- [3] K. Itoh, H. Miwa, M. Matsumoto, M. Zecca, H. Takanobu, S. Roccella, M.C. Carrozza, P. Dari and A. Takanishi: "Various emotional expressions with emotion expression humanoid robot we-4rii," *TEXCRA*, 2004.
- [4] T. Tojo, Y. Matsusaka, T. Ishii and T. Kobayashi: "A conversational robot utilizing facial and body expressions," *SMC*, 2000.
- [5] H. Ishiguro and T. Minato: "Development of androids for studying on human-robot interaction," *Proceedings of 36th International Symposium on Robotics*, 2005.
- [6] T. Shibata, T. Mitsui, K. Wada and K. Tanie: "Subjective evaluation of seal robot: Paro - tabulation and analysis of questionnaire results," *Jour. of Robotics and Mechatronics*, vol.14, no.1, pp.13-19, 2002.
- [7] T. Nakata, T. Sato and T. Mori: "Producing animal-like and friendly impressions on artifacts and analyzing their effect on human behavioral attitudes," *SMC*, 1999.
- [8] N. Mitsunaga, T. Miyashita, Y. Yoshikawa, H. Ishiguro, K. Kogure and N. Hagita: "Robovie-IV: A robot enhances co-experience," *Proceedings of the Workshop on Ubiquitous Experience Media at ISWC*, 2005.
- [9] M.F. Vargas 著, 石丸正 訳: 非言語コミュニケーション. 新潮選書, 1987.
- [10] P. Ekman and W.V. Friesen 著, 工藤力 訳: 表情分析入門. 誠信書房, 1987.
- [11] D. Morris: *Manwatching*. Jonathan Cape, 1977.
- [12] E.T. Hall 著, 日高敏隆, 佐藤信行 訳: かくれた次元. みすず書房, 2000.
- [13] 光永法明, 宮下善太, 宮下敬宏, 石黒浩, 萩田紀博: "コミュニケーションロボット Robovie-IV の開発とオフィス環境での日常対話", *日本ロボット学会誌*, vol.25, no.6, pp.822-833, 2007.
- [14] 河潤秀, 油田信一: "屋内環境を自律的にナビゲーションする平行二輪倒立振り型自立移動ロボットの分散機能アーキテクチャによる実現", *日本ロボット学会誌*, vol.14, no.2, pp.238-248, 1996.
- [15] Y. Ha and S. Yuta: "Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum," *IROS*, 1994.
- [16] 三菱重工業, wakamaru, <http://www.mhi.co.jp/kobe/wakamaru/>.
- [17] Impress Robot Watch トヨタ パートナーロボット, <http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2007/08/28/622.html>.
- [18] 村上宣寛, 村上千恵子: 主要 5 因子性格検査ハンドブック. 学芸図書, 2001.
- [19] B. Reeves and C. Nass 著, 細野宏通 訳: 人はなぜコンピュータを人間として扱うか「メディアの等式」の心理学. 翔泳社, 2001.
- [20] 末永俊郎: 社会心理学研究入門. 東京大学出版会, 1987.
- [21] 笹原郁夫, 花鳥直彦, 疋田弘光, 山下光久: "ロボット動作特徴量による心的負担度の式表現について", 第 17 回計測自動制御学会北海道支部シンポジウム, 2002.
- [22] 柴田諭, 猪岡光: "評価尺度法によるロボット運動の心理的評価", *人間工学*, vol.31, no.2, pp.151-159, 1995.

垣尾政之 (Masayuki Kakio)

2004 年大阪大学工学部応用理工学科卒業。2006 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士前期課程修了。2009 年同専攻博士後期課程単位取得済み退学。2004 年 ATR 知能ロボティクス研究所学外実習生。2006 年 ATR 知能ロボティクス研究所研修研究員。2009 年より三菱電機株式会社先端技術総合研究所に勤務。在学時コミュニケーションロボットの研究に従事。
(日本ロボット学会正会員)

光永法明 (Noriaki Mitsunaga)

1997 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了。同年同研究科知能・機能創成工学専攻博士後期課程進学。2002 年同単位取得済み退学。同年同大学科学技術振興特任教員。2003 年博士後期課程修了。同年大阪大学大学院工学研究科助手。2004 年より ATR 知能ロボティクス研究所研究員。2008 年より金沢工業大学機械系ロボティクス学科講師。ロボットの知能に関連した問題に興味を持つ。人工知能学会、情報処理学会各会員。
(日本ロボット学会正会員)

萩田紀博 (Norihiro Hagita)

1978 年慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年電電公社 (現 NTT) 武蔵野電気通信研究所入所。NTT 基礎研究所などを経て、ATR メディア情報科学研究所長などを経て、現在 ATR 知能ロボティクス研究所長。この間、文字認識、画像認識、コミュニケーション科学、コミュニケーションロボットなどの研究に従事。工学博士。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会各会員。
(日本ロボット学会正会員)

宮下敬宏 (Takahiro Miyashita)

1995 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系制御工学分野博士前期課程修了。2000 年同大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程単位取得退学。博士 (工学)。1998 年より日本学術振興会特別研究員。2000 年 ERATO 北野共生システムプロジェクト研究員、和歌山大学システム工学部助手を経て、2002 年 7 月より ATR 知能ロボティクス研究所研究員。2007 年 7 月より同研究所室長となり現在に至る。視覚を持つ多自由度ロボット、全身触覚を持つロボットの研究に従事。人工知能学会員。
(日本ロボット学会正会員)

石黒 浩 (Hiroshi Ishiguro)

1991 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻修了。工学博士。同年山梨大学工学部情報工学科助手。1992 年大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻助教授。1998 年同大学大学院情報学研究所社会情報学専攻助教授。この間、1998 年より 1 年間カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員。2000 年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科助教授。2001 年より同大学教授。2002 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授。2009 年より同大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻教授。1999 年 ATR 知能映像研究所客員研究員。2010 年より ATR 知能ロボティクス研究所フェロー。知能ロボット、アンドロイドロボット、知覚情報基盤の研究に興味を持つ。人工知能学会、電子情報通信学会、情報処理学会、IEEE、AAAI 各会員。
(日本ロボット学会正会員)