

人口ロボット相互作用における人型ロボットの外見の影響

神田 崇行^{*1} 宮下 敬宏^{*1} 長田 拓^{*2}
配川 有^{*2} 石黒 浩^{*1*3}

Analysis of humanoid appearances in human-robot interaction

Takayuki Kanda^{*1}, Takahiro Miyashita^{*1}, Taku Osada^{*2}, Yuji Haikawa^{*2} and Hiroshi Ishiguro^{*1*3}

It is important to identify how much the appearance of a humanoid robot affects human behaviors toward it. We compared participants' impressions of and behaviors toward two real humanoid robots in simple human-robot interaction. These two robots have different appearances but are controlled to perform the same recorded utterances and motions, which are adjusted by using a motion capturing system. We conducted an experiment where 48 human participants participated. In the experiment, participants interacted with the two robots one by one and also with a human as a reference. As a result, we found that the different appearances did not affect the participants' verbal behaviors but did affect their non-verbal behaviors such as distance and delay of response. These differences are explained by two factors, impressions and attributions.

Key Words: human-robot interaction, robot appearance, body movement analysis, humanoid robots

1. 序 論

近年、腕・頭部・足などの人間と似た表現能力を持つ人間型ロボットが盛んに開発されるようになってきた [1] [2]。このようなロボット研究は「コミュニケーションロボット」という新しいロボット研究の方向性を示唆するものであると我々は考える。コミュニケーションロボットは人間の日常生活の場において人間のパートナーとして活動し、軽作業などを行うだけでなく、コミュニケーションによって情動的・情緒的支援を行うロボットである。例えば、ロボットの身体を活用したコミュニケーションにより、コンピュータを使うのが苦手な人も容易に情報ネットワークにアクセスできる、といった理想的なメディアとしての可能性を持っている。

最近の HCI (human-computer interaction) 分野の研究からも情報を媒介するインタフェースとしてのロボットの有用性が明らかになりつつある。Nass らは、コンピュータが従来のテレビやラジオのように情報を媒介する新しいメディアであることを示した一連の研究の中で、テキストのみのシンプルなインタフェースであっても、人は他の人に対して振舞うときと同様にコンピュータに対しても対人的に振舞う、例えば礼儀正しく

振舞い、個別の性格を感じる、等のことを明らかにした [3]。さらに、身体性エージェントに関する Cassell らの一連の研究は、頭部や腕といった擬人的な表現を用いて、アイコンタクトやうなずき等によりターンテキングの調整を行うなどにより、擬人化エージェントがコンピュータエージェントと人との間の効率的な情報伝達を実現することを明らかにした [4]。そして、実ロボットとコンピュータ上のエージェントを比較した研究において、コンピュータ上のエージェントよりも実空間に存在するロボットの方が、卓上の積み木を積み上げるといった、実空間上の物体に関する対話に適していることが見出されている [5]。

これらの研究が示唆するように、ロボットが人間に似た身体を持つことの一つの意義は、人間とのコミュニケーションにあると考えられる。人間に似た身体を持つロボットは言語情報に加えて豊富な非言語情報をもたらし、人間同士が会話するような自然で円滑な対話を可能にする。これまでにも、身体を用いたロボットのコミュニケーションが研究されてきた。たとえば、うなずき [6]、手の動き [7]、頭部の向き [8]、顔の表情 [9] などロボットの身体を使った相互作用行動の重要性が見出されている。

さらに、対話ロボットの外見に関する問題を取り扱った研究がわずかながらこれまでに行われている。Goetz らは外見の親しみやすさと会話タスクの日常性の関係を、実ロボットの顔を用いて比較し、遊びタスクには親しみやすい外見が望ましい(会話タスク継続時間が長い)ことを示した [10]。既に様々な企業や研究機関で開発されているロボットの中で人間との相互作用を想定しているものは親しみやすい外見が採用されている。

原稿受付

*1 ATR 知能ロボティクス研究所

*2 株式会社 本田技術研究所

*3 大阪大学

*1 ATR Intelligent Robotics & Communication Laboratories

*2 Honda R&D Co., Ltd.

*3 Osaka University

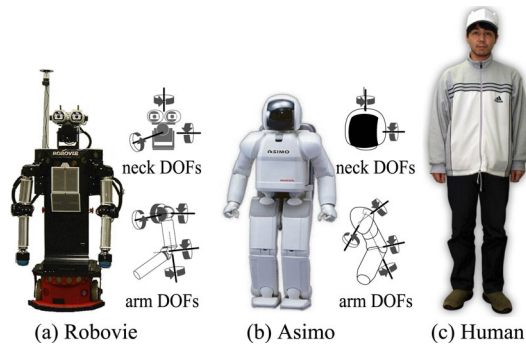


Fig. 1 Experimenters: Robovie, ASIMO, and a human

しかし、同じ親しみやすさを考慮してもロボットの外見は多種多様であり、その差異による効果は明確ではない。たとえば、ロボットによって、二足歩行型と車輪移動型、白い色と黒い色、丸みを帯びた外見と角ばった外見、といった違いがある。これらの違いが人間との相互作用に与える影響を検証することは、ロボットを構築する上で重要となる。

このような検証を行う上での難しさは、統制実験の困難さにある。人間型ロボットは非常に高価であり、比較のためだけにロボットを作ることは経済的に困難である。むしろ、今あるロボットの比較の中から差異の与える影響を発見的に仮説として見出してゆくことが重要であると我々は考える。このような発見的な研究のアプローチはしばしば人文科学の統制実験の難しい分野で幅広く用いられてきた [11]。

本稿では、人間型ロボットと初めて会った人が簡単な相互作用をする際の、ロボットの外見の影響に関する実験の結果を報告する。ここで、我々は対話相手として ASIMO [2] と Robovie [12]、そして人間を比較した (Fig. 1)。結果として、外見から受ける印象だけでなく、「人間のように話し相手として尊重できるか」といった属性が被験者の非言語行動に影響したが、一方、言語的行動にはロボットの外見が影響しなかったことが見出された。

2. 人間型ロボット

2.1 Robovie

Fig. 1(a) に本研究で用いたロボット Robovie を示す [12]。このロボットは、高さが 120cm、4 自由度の腕、3 自由度の頭部、各 2 自由度の眼球部 (カメラ内部の可動部) により人間とのコミュニケーションに用いられる様々なゼスチャが可能である。また、マイクロフォン、接触センサ、超音波センサ、ステレオカメラ、全方位視覚センサ、といった多様なセンサによりコミュニケーション相手の情報を取得し、自律的に人間と相互作用することが可能である。さらに、コンピュータやモータ制御ボードなどの制御機器を全て内蔵している。

2.2 ASIMO

ASIMO は Honda の開発した二足歩行型ロボットである [2]。Fig. 1(b) に ASIMO の概要を示す。ASIMO は二脚式歩行機能により、自由な方向への歩行移動が可能である。高さ 120cm、重さ 52kg である。頭部には Robovie と同様に 2 つのカメラとスピーカが取り付けられている。ASIMO は、左右の脚部にそ

れぞれ 6 自由度、左右の腕にそれぞれ 4 自由度、手首と手にそれぞれ 1 自由度、そして首に 2 自由度を持つ。動作は、Honda の開発した制御システムによって制御され、無線 LAN 経由で動作の開始、停止を指令することができる。

2.3 ロボットの動作

Robovie と ASIMO の動きが同一になるように、以下の方針で動作を生成した。ASIMO については、あらかじめ本田技術研究所により用意された、指差し、うなずき、よそ見といった上半身に関するサンプル動作と、歩行と旋回を行う移動動作を組み合わせて利用した。Robovie に関しては、上記の ASIMO の動きを光学式モーションキャプチャシステムで計測し、動作のタイミングと速度、頭部の向きと手先位置が等しくなるように上半身の動作を調整した。また、移動動作についても、動作のタイミング、速度、移動距離、旋回角度が等しくなるように調整した。

3. 実 験

3.1 被験者

実験への参加者は大学生 48 名である (男性 22 名、女性 26 名)。平均年齢は 20.6 歳だった。

3.2 実験条件

実験対象 (人間あるいは人間型ロボット) と被験者が簡単な相互作用を行う実験を行った。実験対象には以下の 3 条件がある。

- A 条件
実験対象には ASIMO を用いる
- R 条件
実験対象には Robovie を用いる
- H 条件

実験対象はある人間 (著者の一人の宮下) Fig. 1(c) である。各被験者は、A, R, H 条件のそれぞれを一人ずつ行った。観察順はランダムに決定し、カウンターバランスをとった。

3.3 環境

Fig. 2 に実験環境を図示する。実験は、ATR 知能ロボティクス研究所内の実験室にて行われた。実験室の大きさは 7.5m x 10.0 m である。被験者と実験対象は、間に黒線が引かれ、4 つのポスターが置かれた部屋の中で対話した。ポスターの内容は京都の古い建造物についての写真である。また、12 台の赤外線カメラからなる光学式モーションキャプチャシステムと、録音用のマイクロフォンが部屋の中に設置され、被験者と実験対象の行動の記録に用いられた。

3.4 実験方法

Fig. 2 に示すように、被験者は前方から移動してくる実験対象と黒線をはさんで対面し、簡単な会話を行う。具体的には、以下の 4 ステップに分かれる。

ステップ 1: 初対面の会話

被験者は「ロボットが向こうから部屋の真ん中まで歩いてくるので、ロボットの前に立って挨拶してください。ただし、安全のため黒線は超えないように」と初期位置で教示される (Fig. 2)。その後、実験対象が前方から一定速で近づいてくる。実験対象は必ず同じ位置で停止する。停止後、実験対象は「こ

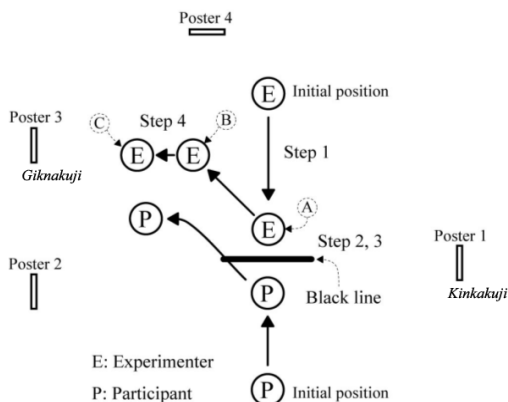


Fig. 2 Environment and positions for experiments

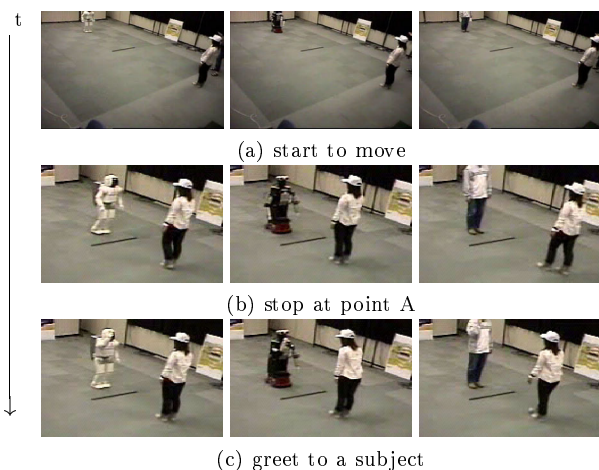


Fig. 3 Detailed movements at Step 1

んにちは」と発話する。この際に、被験者の立ち位置と返答動作を計測した。(Fig. 3)

ステップ 2：ロボットへの発話

実験対象の正面に立っている被験者に「あなたの名前と、今日どうやって研究所まで来たかをロボットに話してください」と指示を与えた。被験者がこれらの情報を実験対象に話した際に、実験対象は発話の間の無音部でうなずき動作を行った。うなずき動作では瞬間的に頭部を約 5 度下方向に向ける。A 条件と R 条件では、H 条件の実験対象が遠隔操作を行い、H 条件の場合と同一のタイミングになるよううなずきを行った。(実験場面の映像から動作が判別できないため写真は省略する)

ステップ 3：ロボットからの案内会話

さらに、実験対象の前に立っている被験者に「今から、ロボットがこの部屋について説明します。説明を聞いてください」と教示を行った。ここで実験対象が「京都には古い建物がたくさんあります。この部屋にはその写真があります」と発話し、頭部を右、左、そして正面に向けることで部屋を見回した(具体的には、頭部は水平に左右 50 度の方向に向けられた)。さらに、実験対象は「これを見てください」と発話しながら、頭部を左に向けると同時にポスター 1 を左手で指差した。動作が終

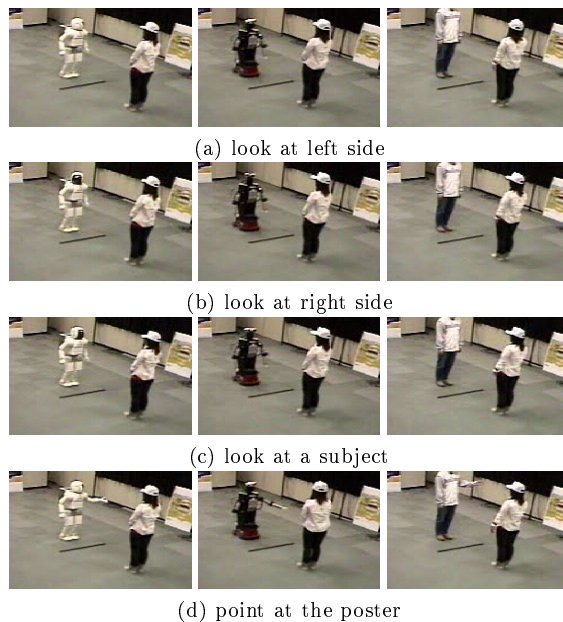


Fig. 4 Detailed movements at Step 3

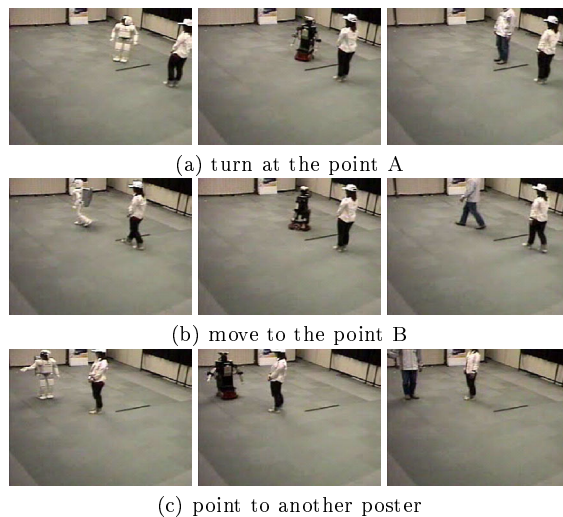


Fig. 5 Detailed movements at Step 4

わった後、実験対象は通常の姿勢に戻り「これは金閣寺です」と発話した。(Fig. 4: 図中で人間条件の頭部の動きが写っていないが、これは実験の様子を撮影したビデオから映像を切り出したことが原因である。人間条件では人間はロボットと同様に左右へ頭部を向けた。)

ステップ 4：移動を伴う案内

さらに、実験対象の前に立っている被験者に「今からロボットが他の場所に連れて行ってくれます、ついていってください。今からは黒い線を超えて移動していただいて結構です」との指示を与えた。そして、実験対象は「ついてきてください」と言っており、地点 A にて時計回りに 135 度回転した。さらに、1.4m 前進して地点 B に到達した後、反時計回りに 45 度回転し、0.5m 移動して地点 C にて 90 度反時計回りに回転した。最後に、実

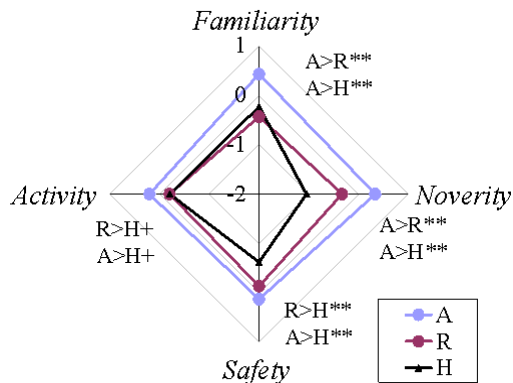


Fig. 6 Comparison of impressions based on factor scores

験対象は「これを見てください」といって、頭部を右に回転するとともに右手で指を指してポスター 3 を示した。動作終了後に、実験対象は通常の姿勢に戻り「これは銀閣寺です」と発話した。(Fig. 5)

上記のステップにおいて、ロボットの動作のタイミング、速度、位置、姿勢は 2.3 節に述べた方針に従って準備された。また、ロボットの発話は H 条件の実験対象による発話を録音して再生した。

3.5 評価

被験者の身体動作の計測には赤外線の利用した光学式モーションキャプチャシステムを利用した。このモーションキャプチャシステムは 12 台のカメラと赤外光照射装置、赤外光を反射するマーカから構成される。システムは、すべてのカメラの画像から各マーカの 3 次元位置を計算する。時間解像度は 120Hz、位置誤差は実験環境において 1mm である。また、被験者の発話もマイクロフォンにより記録した。各実験条件が終了した後に毎回、被験者は SD 法の質問紙に回答した。この質問紙は Table 1 に示す 36 の形容詞対から構成され、各実験対象の印象を評価するために用いられる。

なお、SD 法(意味差判別法)は Osgood が考案した印象の調査方法である。数十の「明るい-暗い」「早い-遅い」といった幅広い形容詞対を用いて評価対象について繰り返し主観評価を求めることにより、単純な優劣の判別よりもむしろ印象の違いを判断することを目的とする [13]。本研究では文献 [14] で利用された形容詞対にいくつかの形容詞対を追加することで 36 の形容詞対を選択した。

4. 結 果

4.1 印象

以下のように、36 の形容詞対を用いた SD 法による印象評価の結果を因子分析した。なお、このように SD 法による印象評価の結果を因子分析する方法は、文献 [14] のロボット評価の手法と同様である。因子分析に関する Kaiser-Meyer-Olkin の標本妥当性は 0.835 であり、問題がない水準であった。主因子法による因子抽出を行い、固有値の変動に基づき 4 因子解を仮定して再度因子分析を行い、バリマックス法による回転

Table 1 Factor matrix (Varimax rotated)

		Familiarity	Novelty	Safety	Activity
Warm	Cold	0.732	0.21	0.333	0.001
Accessible	Inaccessible	0.707	0.056	0.177	-0.221
Frank	Rigid	0.675	0.179	0.15	0.12
Friendly	Unfriendly	0.656	0.124	0.379	-0.178
Cheerful	Lonely	0.638	0.249	0.057	0.185
Light	Dark	0.618	0.349	0.33	0.253
Humanlike	Mechanical	0.596	0.132	0.134	0.323
Favorable	Unfavorable	0.533	0.376	0.474	0.064
Showy	Quiet	0.523	0.476	-0.035	0.113
Light	Heavy	0.512	0.141	0.057	0.191
Active	Passive	0.456	0.201	0.445	0.159
Full	Empty	0.432	0.389	0.004	-0.006
Intelligent	Unintelligent	0.062	0.742	0.217	0.117
Exciting	Dull	0.409	0.647	0.281	0.206
Good	Bad	0.398	0.599	0.5	-0.033
New	Old	0.435	0.595	0.162	0.18
Rich	Poor	0.289	0.563	0.086	0.323
Likable	Dislikeable	0.429	0.532	0.459	-0.073
Interesting	Boring	0.414	0.52	0.149	-0.078
Sharp	Blunt	0.261	0.497	-0.11	0.417
Complex	Simple	-0.129	0.451	-0.113	0.116
Clean	Dirty	0.366	0.418	0.221	0.1
Happy	Unhappy	0.308	0.412	0.228	0.187
Small	Large	-0.157	-0.125	0.599	0.183
Kind	Cruel	0.437	-0.009	0.56	-0.302
Distinct	Vague	0.292	0.288	0.541	0.138
Safe	Dangerous	0.354	0.107	0.494	-0.153
Pleasant	Unpleasant	0.399	0.13	0.493	0.209
Pretty	Ugly	0.333	0.372	0.414	-0.214
Altruistic	Selfish	0.1	0.098	0.407	-0.117
Calm	Agitated	0.047	0.057	0.401	-0.381
Rapid	Slow	0.293	0.207	-0.02	0.732
Quick	Slow	0.318	0.204	-0.146	0.607
Brave	Cowardly	-0.144	0.049	0.031	0.566
Robust	Delicate	0.106	0.153	-0.137	0.504
Strong	Weak	-0.004	0.028	0.121	0.414

を行い、Table 1 に示すような因子行列を得た。累積説明率は 48.9%であった。負荷の高い形容詞に基づき、各因子を命名した。第一因子は、近づきやすい、親しみやすいといった形容詞の負荷が大きかったため Familiarity(親近感)、以下、同様に Novelty(新規性)、Safety(安心感)、Activity(活動性)の 4 因子を命名した。

また、因子得点に基づき、各被験者の各因子の得点を比較によって、主観評価を比較した (Fig. 6)。分散分析により分析したところ、各因子について有意差が見出された(それぞれ、 $F(2, 143) = 12.9^{**}, 37.5^{**}, 10.3^{**}, 3.5^{*}$, なお*は $p < .05$ を、**は $p < .01$ の有意差を、+は $p < .1$ の有意傾向を示す)。

そこで、有意差のあった各項目について Tukey の HSD により多重比較を行った。Familiarity に関しては、A 条件の結果が R 条件および H 条件の結果よりも $p < .01$ の水準にて有意に大きかった(以後、これを $A > R^{**}, A > H^{**}$ と示す)。Novelty に関しては、 $A > R^{**}, A > H^{**}$ の結果が得られた。Safety に関しては、 $A > H^{**}, R > H^{*}$ 、Activity に関しては、 $A > R + (p = .061), A > H + (p = .057)$ という傾向が見られた。つまり、ASIMO が全般に最も良い印象を与える傾向があったと言える。

4.2 言語的反応

被験者の実験対象への言語行動について分析した。被験者は、3 章にて述べたステップ 2 において、自分の名前と、どうやって ATR まで来たかについての説明を求められる。この際の被験者の発話内容を比較した。なお、被験者は ATR 近隣の大学の学生であるが大半の学生は ATR を始めて訪れるため ATR の詳しい位置は知らなかった。ただし、ATR は最寄駅から離れた位置にあり、多くの被験者は最寄り駅からバスで ATR を訪れていたために、細かい道順の説明よりもむしろ「駅からバスで来ました」といった回答が多く得られた。録音の失敗

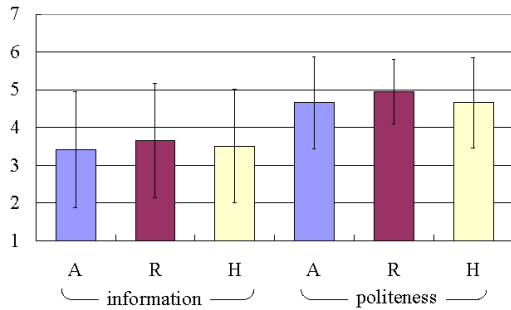


Fig. 7 Comparison of participants' verbal response to the robots (In figures in the paper, colored bars represent average and vertical lines represent standard deviation. That is, the ranges of average ± 1 are denoted by the vertical lines.)

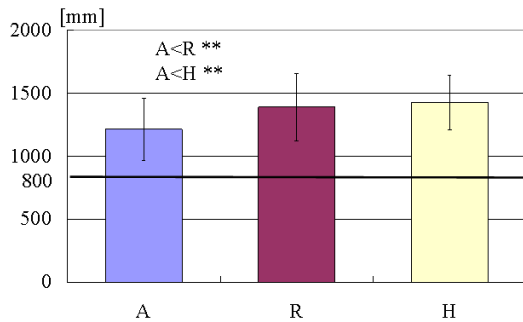


Fig. 8 Distance between participants and experimenters at first time conversation

により 7 被験者分のデータが分析から除外された。結果的に、41 名分、123 データが分析対象となった。

実験条件を知らない第 3 者 1 名が、評定者としてすべての発話を発話の情報量の多さ (information)、丁寧さ (politeness)、の 2 つの点に関して 7 を最も肯定的とする 1-7 の 7 段階のスコア付けを行った。なお、評定者は ATR に勤務しており、ATR の詳しい位置や ATR 近傍の交通手段についての十分な知識を持つ。得られたスコア付けの結果に対し、条件間でのスコアの比較を行った (Fig. 7)。分散分析の結果、両者ともに有意差は見られなかった (それぞれ、 $F(2, 122) = 0.269$, $F(2, 122) = 0.960$)。つまり、被験者は ASIMO, Robovie, 人間に対して同程度の情報を同程度の丁寧さで説明したといえる。

4.3 会話中の非言語反応

非言語の反応の中でも、歩行動作があまり関係しない会話時の動作についての分析を行った。会話動作に関して Robovie と ASIMO に関しては完全に統制されており、両者の動きは等しい。また、H 条件においても実験対象がほぼ同じ動きをするように振舞った。なお、モーションキャプチャシステムのデータが時にオクルージョンにより取得できなかったため、有効なデータ数は実験ごとに異なり、印象評価の場合よりも少ない。

実験のステップ 1 での、初対面での対話距離に関する分析を行った。有効データは 46 名分の 138 データであった。分散分析の結果、条件間に有意差があり ($F(2, 137) = 28.77^{**}$)、多

重比較により $A < R^*$, $A < H^*$ との結果が得られた (Fig. 8)。つまり、H 条件と R 条件に比べて、A 条件の場合に被験者はよりロボットに近づいて会話をした。A 条件では被験者の中には停止ラインの黒線ぎりぎりまで近づく人も数名いたため、ラインが無かった場合にはそれ以上近くなった可能性もある (ただし、今回は実験運用規定によりラインを設定した)。

次に、ステップ 1 でロボットが移動終了後に「こんにちは」と発話した後の、被験者の反応を計測した。この際に、被験者が行ったお辞儀動作の大きさと「こんにちは」などの返答発話を行うまでにかかった時間を分析した。お辞儀の大きさに関しては、お辞儀動作を行った際の頭部と腰の最大曲げ角度を比較した。腰の角度に関して 134 データが分析に用いられた (Fig. 9)。比較的個人差が大きく、やや標準偏差が大きい傾向にあったようである。分散分析の結果、有意傾向が見られた ($F(2, 133) = 2.936$, $p = .056$)。参考のため、Tukey HSD による多重比較を行ったところ、 $H > R + (p = .061)$ となる有意傾向が見られた。なお、頭部の角度に関して 134 データが分析に用いられた (Fig. 10)。こちら標準偏差が大きく、分散分析の結果、有意差は見られなかった ($F(2, 133) = 1.475$, $p = .233$)。我々は、この実験結果は二つの可能性を示していると考え。一つは、被験者は人間に対して、Robovie に対する場合よりもより大きくお辞儀をした可能性である。この結果、腰に関しては人間にお辞儀をした場合の方が大きい角度となり、頭部の角度に関しては、Robovie と ASIMO が人間と比べてかなり小さいため、結果的に下を見おろすことによりお辞儀の角度との打ち消しあい起きて有意差が生じなかった可能性がある。第二の可能性は、対話時の揺らぎの差によるものである。垣尾らによる予備的な実験の結果、人間が他の人間と対面するとき、揺らぎの起きないロボットと対面する場合には、人間の揺らぎの振幅が異なる可能性が指摘されている [15]。つまり、今回の実験において Robovie や ASIMO の上半身は人間と異なり揺らぎなく静止しているため、この差により被験者の上半身の揺れの周波数が低くなり、結果として挨拶の間に測定した際に揺れの最大値が訪れず、最大角度が小さくなった可能性も考えられる。

また、返答発話までの時間については、7 人の被験者に関して録音の失敗があったため発話の記録されていた 123 データが分析対象となった (Fig. 11)。実験の際、ほぼすべての被験者がロボットが移動終了するのと同時か、あるいは被験者の方がやや早く立ち止まった。つまり、ほぼすべての被験者が立ち止まってロボットに対してあいさつを返した。分散分析の結果、有意差があり ($F(2, 122) = 12.852$, $p < .01$)、Tukey HSD による多重比較の結果 $H < A^*$, $A < R^*$, $H < R^{**}$ なる有意差が見出された。つまり、被験者は人間に対してもっともすばやく返答し、Robovie に対する返答がもっとも遅かった。なお、本実験結果は先行研究 [16] における発話の応答遅延時間約 0.5 秒と比べて大きい結果を示しているが、これは先行研究と異なり本研究では被験者が移動してきた後に挨拶をしたこと、また初対面の相手への挨拶であったことが影響した可能性があると考え。

ロボットの種類が異なる場合に、ロボットに対するゼスチ

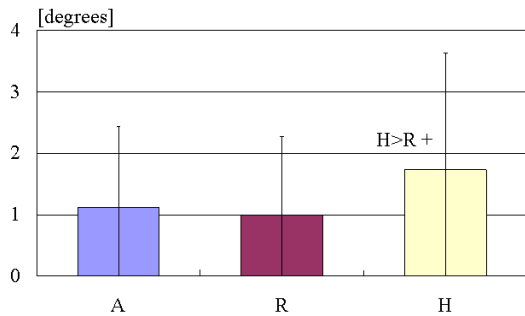


Fig. 9 Degree of participants' waist angle at bowing as greeting

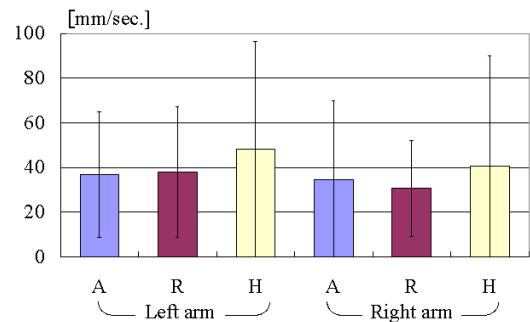


Fig. 12 Amount of each arm's movements when participants were talking

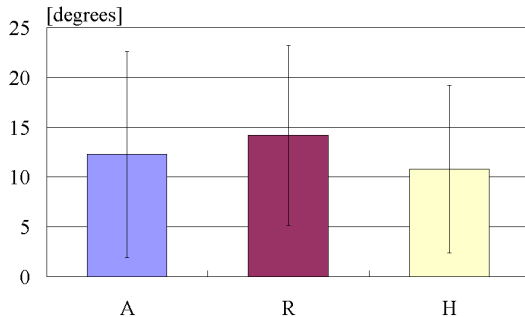


Fig. 10 Degree of participants' head angle at bowing as greeting

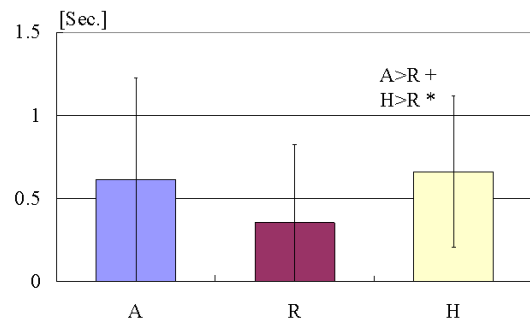


Fig. 13 Participants' delay time of gaze-response to pointing

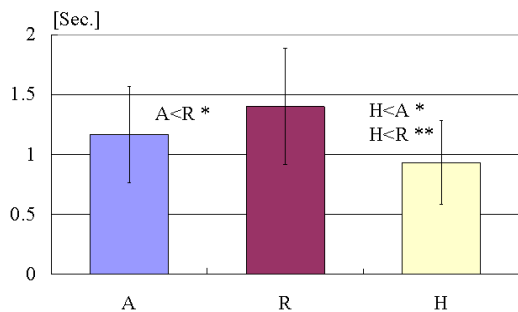


Fig. 11 Participants' delay time of vocal-response to greeting

の量が変化しないかを調べるため、ステップ 2 の間の被験者の単位時間あたりの腕の動き量を分析した (Fig. 12) . 左右の腕それぞれについて分散分析を行ったが、条件間に有意差は見られなかった (左: $F(2, 119) = 1.203, p = .304$, 右: $F(2, 117) = .689, p = .504$) .

ステップ 3 での、実験対象からの指差し会話に対する反応を分析した . 実験対象は「これは金閣寺です」とポスターを指差し、同時にポスターの方を見て、発話を行う . この際に、実験対象がポスターの方を見てから、被験者がポスターを見るまでの反応時間を比較した (Fig. 13) . 分析対象は、モーションキャプチャのデータが取れ、かつ被験者がポスターの方を見た 122 データである (条件毎の分析対象数は A 条件:39, R 条件:43, H 条件:40 である) . 分散分析による比較の結果、条件間に有意差があり ($F(2, 121) = 4.276, p < .05$) , Tukey HSD による多重

比較の結果 $A > R + (p = .065)$, $H > R^*$ なる有意差、有意傾向が見出された . つまり、Robovie が指差しを行った場合に被験者がもっとも早くポスターを見る反応をしたことが示唆される .

4.4 歩行中の非言語行動

非言語の反応動作のうちで、歩行に関するものの分析を行った . 具体的には、ステップ 4 において、実験対象がその場で旋回し、次の地点まで移動し、さらにその場で旋回するまでの間の被験者の行動を分析した .

はじめに歩行時の対ロボット距離を分析した . 144 のすべてのデータが分析可能であった (Fig. 14) . 分散分析による比較の結果、条件間に有意差が見出され ($F(2, 143) = 6.898, p < .01$) , Tukey LSD による多重比較の結果 $A < H^{**}$, $A < R^{**}$ なる有意差が見出された .

次に、被験者の速度と実験対象の速度について分散分析により分析したところ (Fig. 15) , 実験対象の速度 ($F(2, 143) = 50.778, p < .01$, 多重比較 $H > A^{**}$, $H > R^{**}$) , 被験者の速度 ($F(2, 143) = 36.996, p < .01$, 多重比較 $H > A^{**}$, $H > R^{**}$) の両方に有意差が生じた . これは、実験対象の速度の影響である可能性が大きい (ロボットの速度は非常に遅いため、人間の実験対象は通常時よりもかなりゆっくり歩いたものの、ロボットの歩きを真似しきれなかったことが原因である) . ASIMO, Robovie のロボット条件間にはロボットの速度、被験者の速度ともに有意差は見られなかった .

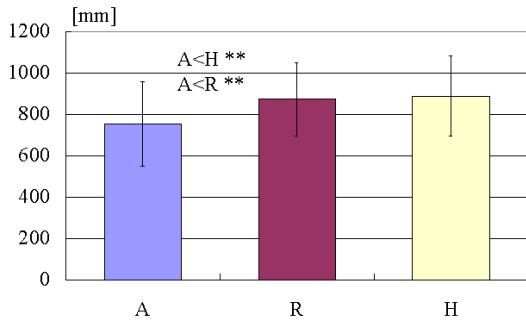


Fig. 14 Distance between participants and experimenter during walking

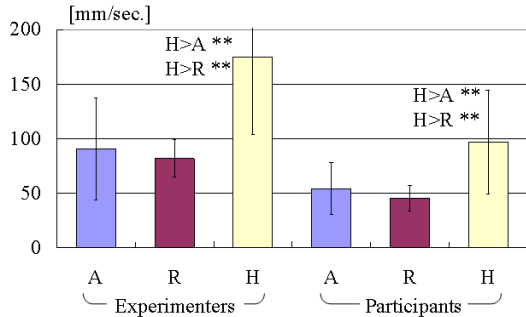


Fig. 15 Speed of experimenters and participants during walking

5. 考 察

5.1 外見, 印象, 行動の関係

今回の実験結果と、その原因に対する我々の仮説を Table 2 に示す。印象に関しては、ASIMO が全般に良い印象を与え、また Robovie が新規性と安全性に関して人間よりも良い印象を与える傾向が見られた。ASIMO と Robovie の外見を比べると、ASIMO の方が丸みがあり白い色をするなどの違いがある。これらの外見に関するデザインの違いが、これら 2 種類のロボットの印象の違いを生じた可能性が大きい。

また、人間の印象は 2 つのロボットよりも低くなった。これは、実験において人間はロボットと同内容の行動を行ったため、結果的に「部屋の中で正面から初対面の人が無表情でいきなり近づいてくる」といった、人間同士が普段あまり行わない行動をしていた可能性が高い。一方、被験者の大半は 2 つのロボットに実際に対面するのは初めてで、新しい経験を楽しんでいた可能性がある。また、ロボットの場合には「ロボットである」ということが、このような不自然さを生じさせなかった可能性がある。

また、これは今回の実験で外見の比較を行ったため、実験対象に関して自由度をできるだけ統制したことに起因すると言える。具体的には、頭部に関して ASIMO は 2 自由度を持ち、Robovie は 3 自由度（厳密には、右目・左目に該当するカメラ内部にパン・チルトの 2 自由度がそれぞれあるので、7 自由度）、人間は多自由度であるが、実験中での実験対象の動作は基本的に 2 自由度で表される内容である「うなずき」や「物

Table 2 Summary and hypotheses for results

		Result	Hypothesis
Impression	Familiarity	A > R, H**	Appearance
	Novelty	A > R > H**	
	Safety	A, R > H**	
	Activity	A > R, H+	
Verbal behavior	Information	n.s.	
	Politeness	n.s.	
Non-verbal behavior	Talking Distance	A < H, R	Impressions
	Greeting motion	H > R+	
	Greeting delay	H < A < R**	Position & Impressions
	Gaze delay	H, A > R*	
	Arm movement	n.s.	
Walking behavior	Distance	A < H, R*	Impressions
	Speed	H > A, R*	

体の方向を見る」といった内容であった。結果として、瞬きなどの制御できない動きはあったものの、Robovie が頭部の第 3 の自由度により首をかしげたり、人間が笑顔を作ったりすることは実験では行わなかった。ゆえに Robovie や人間条件の実験対象の表現能力がすべて利用されたわけではなく、またこれが結果的に Robovie や人間に対する印象を低下させた可能性がある。

非言語の反応に関しては、ロボットの外見や印象の違いの影響を受けることが見出された。たとえば、会話の際の距離や歩行の際の距離は、親しみやすさの印象と同様の傾向を示した。人間に関しては身長の違いも影響すると考えられるが、身長のほぼ等しい Robovie と ASIMO との比較において、このような親しみやすさと対人距離の関係は、心理学分野での Hall の対人距離の研究結果 [17] と一致する。

一方、悪い印象を与えた人間が、より印象が良かった Robovie よりもポジティブな反応を受ける場合が見られた。たとえば、挨拶の応答時間 (Fig. 11) において、人間は他の 2 つのロボットよりもすばやい応答を得た。また、お辞儀の大きさ (Fig. 9) に関しても、これと同じ傾向の有意傾向が示唆されている。挨拶の応答時間と指差し会話の遅延時間 (Fig. 13) での結果の不一致は一見矛盾するようにも見える。このような実験結果の解釈には様々な可能性があるが、この不一致に対する我々の仮説は、人間は人間に対しては日常的な挨拶は反射的に返すが、会話の際の視線はむしろ直後に追従せず、そのかわりに発話直後には相手をより長く見ている、という遅延時間の意味の違いに起因するのではないかと考える。つまり、対話相手としての社会的立場がある方が、挨拶への応答時間は短く、視線追従の遅延は長くなる。また、人間の方がロボットよりもこの社会的立場 (social position) がある、といったことを示しているのではないかと考える。

非言語の行動の違いに比べて、言語的内容の違いは小さい。どの条件でも発話内容の情報量は丁寧さはほぼ等しかった。また、類似して、ゼスチャ(腕の動き)の大きさにも違いは無かった (Fig. 12)。つまり、外見や、人間-ロボットの違いは、意図的に行われた言語行動よりも、むしろ無意識的に行われた非言語行動に影響したと言える。ただし、これは実験での会話の内容があまり複雑ではなかったことに起因する可能性がある。以前、著者らが行った先行研究のひとつである道案内実験 [18] では、被験者の、人間に対する説明とロボット Robovie に対する説明では、たとえばロボットに対しては簡単なランドマークのみを使うなど、説明の仕方が違うケースがみられた。これには、ロボットが理解できそうかどうか、という判断が入ってき

ていると考えられる。

これらの結果をまとめると、ロボットに対する人間の行動は以下のようなモデル化が可能であるとの仮説が考えられる：

ロボットへの非言語行動 = $f(\text{印象}, \text{属性})$

ここで、属性 (attribution) は、一般的には人間が相手をするような存在であると帰属するかを表すが、特にここでは「それが会話相手として尊重できる」という特徴と関連する。本実験では、少なくとも相手が人間であることが、このような会話相手として尊重されるという属性を満たしていることが分かったものの、人間ではない存在がこのような特徴を満たすことができるのかどうかはまだ明白ではない。たとえば、人間に酷似した外見のロボットや、機械的だが非常に洗練された外見のロボットはこのような特徴を持つかもしれない。このように、ロボットの外見が「会話相手として尊重される」という属性を生み出す可能性があるかどうかを検証することは、今後の研究課題である。

5.2 コミュニケーションへの二足歩行の影響

本研究では、ロボットの歩行機能の有無がどの程度被験者の行動に影響するかどうかの一つの比較項目であった。しかし、歩くことや脚があることが直接コミュニケーション行動に影響した証拠は実施した実験においては見出されていない。もちろん、この歩行機能が新しさに関する印象に影響を与え、間接的に被験者の行動に影響した可能性はある。

一方で、ロボットの歩行速度が遅く、被験者の中にはロボットについて歩くのが難しかったとコメントする人もいた。このような一緒に歩きやすいロボットを作るといった点は、今後のロボティクスの重要な研究課題であろう。

5.3 得られた知見の一般化の限界

本研究から見出された知見には以下のような一般化の限界 (limitation) がある。今回の実験では、Robovie と ASIMO という二つの人間型ロボットを比較したため、ロボットの一般化可能性には限界がある。今回の実験の結果からは、得られた知見が他のすべてのロボットに利用可能であるとの保証はできない。しかし、我々は、この実験設定は十分に現実的であり、このようなロボットの外見と人間のロボットへの行動を比較する研究の初期段階としても重要であると考えられる。

人間との比較に関しては、人間の動きは完全にロボットと同一なわけではない。これは、人間の身体動作とタイミングを完全に制御することは困難であることに起因する。従って、外見の差異のみならず動作の差異も、ロボット/人間に対する行動の違いを引き起こした可能性は否定できない。しかし、たとえ多少の統制の難しさがあっても、人間との比較から見出される知見は十分に重要なものであると考える。

また、本実験から見出されたモデルは、ロボットとの初対面の対話を対象とするものである。たとえば、第一印象からは新規性が対人距離に影響したように示唆されるが、新規性の効果は通常は続かない[19]。むしろ、関係の時間的な変化と、その際の主観と行動との関係を見出すことも重要な将来課題である。

6. 結 論

本研究では、異なる外見を持つ二つのヒューマノイドロボット Robovie と ASIMO に対する人間の行動の違いに関する実験を行った。二つのロボットはモーションキャプチャシステムを利用して同じ動作をするように統制された。挨拶、自己紹介、指差しを含む案内、誘導と言った初対面の簡単な対話における被験者の反応行動と印象が計測された。さらに、人間の実験対象も同じ動きと発話を行うことで、ロボットとの対比に用いられた。このような事例研究アプローチによる比較の結果、我々は、外見が異なるロボットに対して人間がどの程度違った行動をとるか、についての具体的なデータを見出すことが出来た。また、このような違いが、ロボットへの印象と行動が一对一に関係するというよりも、むしろ印象と属性 (特に、人間のようには会話対象とみなせるかどうか) の両者がロボットへの行動に結びつくという仮説により説明ができることがわかった。

今回の実験に用いられた2種類のロボットに対する被験者の行動の差は決して大きくはなく、案内や誘導目的には大きな影響はなさそうではあるものの、この差はロボットを利用する目的によっては本質的となる可能性もある。本研究の一つの大きな意義は、見出された具体的な情報がロボットの利用目的に応じてロボットの外見を考慮すべきかどうかの一つの判断の根拠として利用可能であること、である。また、見出された仮説は今後のロボットの外見に関する研究の手がかりとなることが期待される。

謝辞 本研究は独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の研究委託「超高速知能ネットワーク社会に向けた新しいインタラクション・メディアの研究開発」により実施したものである。

参 考 文 献

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, The development of the Honda humanoid robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '98)*, pp. 1321-1326, 1998.
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, The intelligent ASIMO; System overview and intergration, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '02)*, pp. 2478-2483, 2002
- [3] B. Reeves and C. Nass, *The media equation*, 1996.
- [4] J. Cassell, T. Bickmore, M. Billinghurst, L. Campbell, K. Chang, H. Vilhjalmsón, and H. Yan, Embodiment in conversational interfaces: Rea. *Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99)*, pp. 520-527, 1999.
- [5] C. Kidd and C. Breazeal, Effect of a Robot on User Perceptions. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '04)*, 2004.
- [6] H. Ogawa and T. Watanabe: InterRobot: speech-driven embodied interaction robot, *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 3, pp. 371-377, 2001.
- [7] 尾形哲也, 菅野重樹, 人間とロボットの情緒的コミュニケーションの実験的評価~アームハンドによる人間との物理的インタラクション, システム制御情報学会論文誌, Vol.13, No.12, pp.566-574, 2000.
- [8] 中臺一博, 日台 健一, 奥乃 博, 溝口 博, 北野 宏明: ヒューマノイドを対象にした視聴覚統合による実時間人物追跡: アクティブオーディションと顔認識の統合. *ロボット学会誌*, Vol.21, No.5 (Jul. 2003), pp.517-525.
- [9] C. Breazeal and B. Scassellati, A context-dependent attention system for a social robot, *International Joint Conference on*

- Artificial Intelligence (IJCAI '99)*. pp. 1146-1151, 1999.
- [10] J. Goetz, S. Kiesler, and A. Powers, Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation, *IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN '03)*, 2003.
- [11] B. G. Glaser, and A. L. Strauss, *Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*, Aldine De Gruyter, 1967.
- [12] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平, 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット“Robovie”の開発, 電子情報通信学会論文誌 *D-I*, Vol. J85-D-I, No.4, pp.380-389, Apr. 2002.
- [13] 岩下豊彦, *SD法によるイメージの測定*, 川島書店, 1983
- [14] 神田崇行, 石黒浩, 石田亨, 人間ロボット間相互作用に関わる心理学的評価, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.3, pp.362-371, 2001
- [15] 垣尾政之, 宮下敬宏, 石黒浩, 小暮潔, 萩田紀博, “ヒューマノイドロボットのバランス動作に基づく振動の対人効果の評価”, 第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2005. (2005/9/15 発表予定)
- [16] 山本倫也, 渡辺富夫, ロボットとのあいさつインタラクションにおける動作に対する発声遅延の効果, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.87-94, 2004-8.
- [17] E. T. Hall, *The Hidden Dimension*, Anchor Books, 1990.
- [18] M. Kamasima, T. Kanda, M. Imai, T. Ono, D. Sakamoto, H. Ishiguro, and Y. Anzai, Embodied Cooperative Behaviors by an Autonomous Humanoid Robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '04)*, pp.2506-2513, 2004.
- [19] 神田崇行, 平野貴幸, ダニエル イートン, 石黒浩, 日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp.636-647, 2004

数工学専攻修士課程修了。1985年(株)本田技術研究所入社。1989年から人間型ロボットの研究・開発に従事。現在(株)本田技術研究所和光基礎技術研究センター主任研究員。自動車技術会, 日本機械学会会員。

石黒 浩 (Hiroshi Ishiguro)

1963年10月23日生。1991年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程修了。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年京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻助教授。2001年, 和歌山大学システム工学部情報通信システム学

科教授。現在, 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授, ATR 知能ロボティクス研究所第二研究室客員室長。視覚移動ロボット, 能動視覚, パノラマ視覚, 分散視覚に興味を持つ。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)

神田 崇行 (Takayuki Kanda)

1975年12月7日生。1998年京都大学工学部情報工学科卒業。2000年同大学大学院情報学研究所社会情報学専攻修士課程修了。2003年同専攻博士課程修了。博士(情報学)。現在, ATR 知能ロボティクス研究所上級研究員。ヒューマンロボットインタラクション, 特にロボットの自律対話機構や社会的能力, 人間型ロボットの身体を利用した対話に興味を持つ。

(日本ロボット学会正会員)

宮下 敬宏 (Takahiro Miyashita)

1970年7月30日生。1993年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1995年同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となり現在に至る。視覚と全身触覚を持つ多自由度ロボットの研究に従事。人工知能学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

長田 拓 (Taku Osada)

1961年8月30日生。1984年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1986年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系制御工学分野修士課程修了。同年本田技研工業(株)入社。1998-2000年米国カーネギーメロン大学ロボット研究所客員研究員。現在(株)本田技術研究所 和光基礎技術研究センター 勤務。二足歩行ロボットの研究開発に従事。情報処理学会会員

配川 有二 (Yuji Haikawa)

1956年10月27日生。1979年東京大学工学部計数工学科卒業。1981年東京大学大学院工学系研究科計