

人-ロボット相互作用における身体動作の数値解析

神田 崇行^{†1} 今井 倫太^{†1,†2,†3}
小野 哲雄^{†1,†4} 石黒 浩^{†1,†5}

将来、日常生活の中で人間と関わりながら活動する人間型ロボットが現実のものとなりつつある。このようなロボットは、擬人的な身体を活用することで非言語情報を伴ったコミュニケーションを行い、人間と自然で円滑な対話を行うことが可能になると考えられる。このような身体を伴ったコミュニケーションを実現するため、我々は音声やゼスチャを用いて人間と自律的に対話する人型対話ロボットを開発してきた。さらに、このようなコミュニケーションロボットにとって重要な身体動作を見いだすため、ロボットと人間との相互作用の際の身体動作を時間的・空間的に高い分解能で数値的に取得し、主観的な評価と比較することを試みた。実験の結果、得られた身体動作の数値解析結果から、視線や身体動作の協調の重要性が見いだされた。また、この身体動作と主観的な評価の関係をj用いて人間の瞬間的な評価を推定することで、ロボットの行動開発などに利用することが可能になる。

Numerical analysis of body movements on human-robot interaction

TAKAYUKI KANDA,^{†1} MICHITA IMAI,^{†1,†2} TETSUO ONO^{†1,†4}
and HIROSHI ISHIGURO^{†1,†5}

This paper reports an importance of cooperative behaviors in human-robot interaction, which found through precisely measuring of body movements during human-robot interactions. We believe that a humanoid robot is becoming to participate in our daily life. Since such a humanoid body provides an abundance of non-verbal information, it enables us to smoothly communicate with a humanoid robot. Toward this effect, we have developed a humanoid robot that autonomously interacts with humans by speaking and making gestures. This robot is used as a testbed for studying embodied communication. We intend to identify the essential communicative behaviors. Our strategy is to analyze the human-robot interaction in terms of numerical body movements. A motion capture system allows us to precisely measure the body movements. We have performed experiments to compare the body movements with impressions of the robot; as the result, the experiments have revealed the importance of cooperative behaviors.

1. はじめに

近年、様々なヒューマノイドロボットが開発される中で、インタフェースとしてのロボットの役割が注目されてきている。このようなロボットは将来的に人間の物理的なサポートをするのみでなくコミュニケーションの側面のサポートも行うことができる。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する事ができる。さらに、高齢者の話し相手といった役割を果たすロボットもすでに実用に向けた試みが行われている¹⁾。

我々は、ロボットが人間似の身体²⁾を持つことの意味はコミュニケーションにあると考える。人間同士のコミュニケーションにおいても、このような言語以外の部分が活用されている。黒川は、人間同士のコミュニケーションにおいて半分以上の情報がノンバーバルコミュニケーションによって伝達されると考察し、身体的特徴・衣服などの外面的で静的な特徴と、表情・視線・身振りなどの身体動作、対人接触、周辺言語(音声のピッチや抑揚など)、対人距離といった動的な特徴の双方の重要性を議論した³⁾。このようなノンバーバルコミュニケーションにおいて、身体を持つロボッ

†1 ATR 知能ロボティクス研究所
ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories

†2 慶應大学
Keio University

†3 科学技術振興事業団さきがけ研究 21
JST Presto

†4 はこだて未来大学
Future University Hakodate

†5 大阪大学
Osaka University

トはコンピュータ上の固定されたインタフェースに比べて多様な可能性を持つ。身体が実際の3次元空間で動作することによって、2次元のスクリーン上での物の動きとは比べ物にならない程の視覚的効果をもたらされる。特に、ヒューマノイドロボットは、その腕や頭部といった人間に類似した身体機能を用いることで、表情や身振り、視線といったノンバーバルコミュニケーションを行うことができるため、人間同士で対話する場合と同様の自然で円滑なコミュニケーションが可能となると考えられる。

これまでも、身体を用いたロボットと人間のコミュニケーションに関する研究が行われてきた。特に注目されて来たのが視線である。たとえば、話者の方を見て対話する音声対話ロボット⁴⁾、音声と視覚による人物追従⁵⁾などの研究のように、視線を対話相手に向けたアイコンタクトは、ロボットが自らのコミュニケーション意図を人に伝え、人間と自然に対話するために役立つ。さらに、視線には他者と注意を共有する機能もある。「他者が見ているところを見る」ことにより、人やロボットは互いの持つ注意を共有しながら対話することができる。このような共同注意機構により、アイコンタクトのみでなく人間が注意を向けている対象物にも視線を向けて共同注意を行うロボットの研究も進んでいる^{6),7)}。

視線に加えて身振りにおける腕などの利用も進められている。小野らは道案内をするロボットにおいてアイコンタクトや腕によるジェスチャ、相手に対する適切な身体の向き的重要性を示した。さらに非言語情報は、話者から聞き手へと情報を視覚的に伝える直接的な役割のみでなく、双方が互いに引き込まれるような同調的ジェスチャを行う中で、聞き手が言語によって伝えられた情報を理解するために重要である⁸⁾。このように無意識に生じる身体動作の引き込み現象はエントレインメント(Entrainment)と呼ばれる。この他にも、うなずきなどの身体動作の同期によって、エントレインメントを引き起こすロボットも開発されている⁹⁾。我々は、コミュニケーションロボットが人間と継続的關係を維持するために、このような身体動作の同期が不可欠であると考えられる。

このように、ロボットの身体の個別の機能(視線や腕のゼスチャ)の有効性を確かめる個別評価型の研究は数多く行われているが、一方で得られた要素技術を組み合わせて評価する方法は見いだされていない。このようなコミュニケーションロボットの開発において不可欠なのが個別要素を組み合わせたシステムの評価方法である。身体がどのように対話に効果があったの

かを評価する必要がある。特に、視線や腕のゼスチャなど体の一部のみの評価ではなく、ロボット総体全体を統合したままの評価が必要である。人口ロボットインタラクションの評価はこれまでも様々な研究が行われているが、主観的・身体的な影響の評価¹⁰⁾など主に質問紙を用いてある一定期間のインタラクションを静的に評価するものが中心であった。しかし、実際にロボットのインタラクション行動を設計、改善するためには、インタラクションの瞬間毎の動的な評価が必要になる。これまでに、比較的少数の行動要素を持つロボットの行動に関してインタラクション行動を要素に分解し、取り出したシンプルな要素を評価する¹¹⁾といった要素分解型の研究も行われてきた。

我々は身体機能を組み合わせた総合的なロボットにおける個別の機能の役割に関心を持つ。つまり、むしろ複雑なロボットを総体として評価するなかから、重要な要素を見つけだすことが重要であると考えられる。このために、多数の自律対話行動を伴い、日常的会話を行うインタラクティブロボットを作り、相互作用を解析する中で、人とロボットの身体や身体動作の相互の関わり合いを見いだす。特に、ロボットが人間に何かする一方的な関係ではなく、ロボットと人が協動的に動作するような、コミュニケーションにおける協創的關係に関しても調査を進める。

このため、本稿では人間の身体動作の計測を行うことで、人口ロボットインタラクションの分析を試みる。具体的には、人間の身体的動作と主観的評価の間の関係を見いだすために、モーションキャプチャシステムを用いて人口ロボットインタラクションの際の人間の身体的動作を数値的にとらえ、身体的動作、個人の個性、ロボットの評価の間の関係を定量的に分析する。このようなモーションキャプチャシステムは映画やゲームの作成、個体動作の分析などによく利用されるものの、複数の主体間の相互作用の解析にはこれまであまり利用されてこなかった。このモーションキャプチャシステムを利用することで、これまでビデオ分析のように半ば主観的に行われてきた相互作用分析が数値的・定量的に行うことが出来る。また、空間分解能、時間分解能の両方に優れるため、精緻な分析が可能である。

さらに、本稿では相互作用の分析を通じて主観的評価との比較から導き出される身体動作間の関係を用いて、人のロボットへの瞬間毎の動的な主観的評価を推定する方法を提案する。このような動的な評価は、実装されたロボットの行動の評価に用いることでインタラクション行動を設計、改善するといった利用が可能だけでなく、将来的にはロボットが人との相互作用

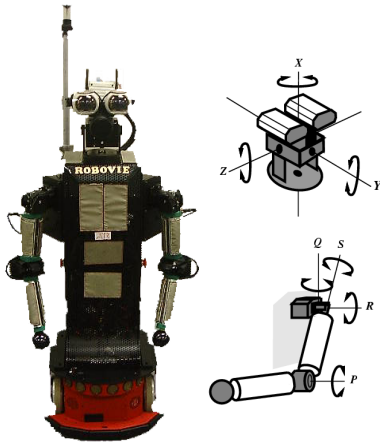


図 1 人型対話ロボット Robovie
Fig.1 Robovie: an interactive humanoid robot.

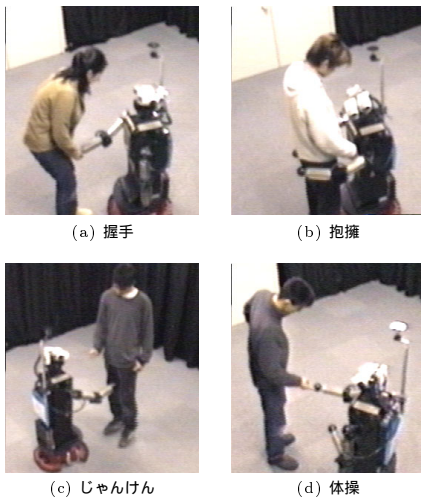


図 2 Robovie の行う対話的行動の例
Fig.2 Example of implemented interactive behaviors

において適応的に振る舞うために重要になると考えられる。

2. コミュニケーションロボットの開発

2.1 ハードウェア構成

図 1, 図 2 に我々の開発したロボット “Robovie” を示す¹²⁾。Robovie は人間とコミュニケーションするために人間に類似した上半身を持つヒューマノイドロボットである。人間が視覚・触覚・聴覚をもつようにカメラ, マイク, 接触センサなどの様々なセンサを持つ。このような人間に類似した身体とセンサを用いて, Robovie は人間とのコミュニケーションに必要な様々な音声とゼスチャを交えた対話的行動を生成することができる。また, Robovie はすべての必要な制御機器

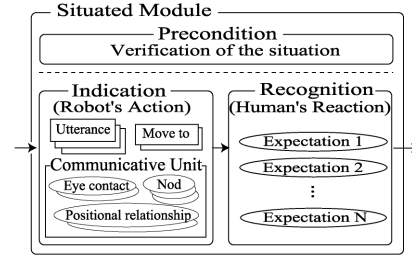


図 3 コミュニカティブユニットと状況依存モジュール
Fig.3 Communicative unit and situated module

を内蔵している。本体下部に搭載されている Pentium III 850MHz の PC を用いて, 音声認識や画像処理を行うとともに, すべてのモータおよびセンサを制御している。

2.2 自律対話行動のためのソフトウェア

ロボットの身体を活用するためにこれまでに行われた認知科学的実験に基づき, 我々は自律的に人間の行動に反応して動作するコミュニケーションロボットのソフトウェアを考案し, Robovie 上に実装した。このソフトウェアは, 状況に応じて動作するシンプルな個々の行動モジュール(状況依存モジュールと名付けられる)を大量に用意し, このモジュール間の関係をシンプルなルールによって記述することからなる。このようにシンプルな構造から複雑な自律システムの挙動が生じることがこのソフトウェアの特徴である¹³⁾。

2.2.1 コミュニカティブユニット

これまでにヒューマノイドロボットの視線や腕の動作に関する研究が行われてきた。コミュニケーションユニット (Communicative Unit) は, このようなコミュニケーションにおける身体の利用に関する知見に基づき, 身体を利用したコミュニケーションのために必要な基本要素行動である。具体的には, 視線を合わせる, 物の方を見る, 物を指さすといったコミュニケーションの基礎となる要素行動である(図 3 Indication 内の Communicative Unit)。

2.3 状況依存モジュール

状況依存モジュール (Situated Module) はこのソフトウェアの基礎となる行動モジュールである。これは, 特定の限られた状況で, ロボットにある特定の動作をさせる行動モジュール

と定義することができる。状況依存モジュールは前提条件部 (Precondition), 提示部 (Indication), 認識部 (Recognition) からなる。前提条件部は, 現在の状況がこの状況依存モジュールが実行可能な状況かどうかを判断する。たとえば, インターネットに接続して

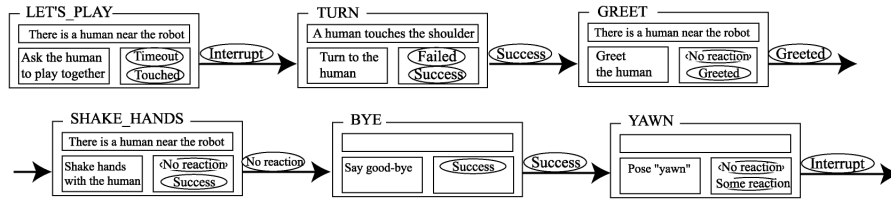


図 4 状況依存モジュールの遷移例

Fig. 4 Illustrated example of situated module transitions

明日の天気について話すモジュールは、インターネットに接続できない場合には実行できない。また、握手を求めるモジュールはロボットの前方に人(と想定される近距離の物体)がない場合には実行されない。

提示部は人間に働きかけを行う。これはコミュニケーションユニットを組み合わせ、また不足する行動(特定の発話, ある地点に移動する, 等)を直接実装することで実現される。たとえば握手モジュールは、アイコンタクトを行い、適切な位置関係を取り、そして「握手してね」といって人間に手を差し出す。このロボットの行動は、アイコンタクトや位置関係に関するコミュニケーションユニットに、特定の発話を追加することで実現される。

認識部は提示部でロボットが行った行動に対する様々な人間の反動的な行動を認識するように設計される。これは、人間の行動の予期を行うことを意味する。状況依存モジュールは実行する状況を限定するのみでなく、モジュール自身が特定の状況を作り出し、そしてこの特定の状況下において人間の複雑な行動を認識する。たとえば「握手しよう」といって手を差し出した時に、手先が触れられれば、それは人間の握手行動である。また、「どこから来たの」とロボットの問いかけに対しては、地名の返答を期待して音声認識を行うことができる。

ロボットシステムは逐次的に常に1つの状況依存モジュールロボット実行することにより自律行動を実現する。このモジュールの実行が終了すると、状態遷移モデルと同様に、状況依存モジュールの実行結果に応じて、あらかじめ決められた遷移を行い、次に実行する状況依存モジュールが決まる。

2.4 自律行動の動作例

このようなアーキテクチャに基づいて、人間と日常的なコミュニケーション行動をする自律行動を実装した。このようなインタラクション機能は将来日常生活の場で活動するロボットには欠かせないものである。自律インタラクション機能の実験のために、「抱擁」「握手」「簡単な会話」「物の指さし」といった80種類程度

表 1 形容詞対を用いた主観的評価

Table 1 The adjective-pairs for subjective evaluation, and the mean and standard deviation as the result

形容詞対	平均	標準偏差
良い 悪い	4.88	0.95
やさしい こわい	4.85	1.29
かわいらしい にくらしい	5.08	0.93
面白い つまらない	4.46	1.61
好きな 嫌いな	4.77	1.03
評価性得点	4.81	0.92

の人間との遊び行動(図2)および「頭をかく」「腕組みする」といった20種類程度の待機行動、パトロールの真似をする等の環境を移動する10程度の行動を実装した。ロボットシステムは、人間からの働きかけがないときは待機行動や移動行動を実行し、人間からの働きかけがあった場合には、働きかけがある限り遊び行動を続けるように設計されている(図4)。

3. 相互作用の数値解析実験

3.1 実験設定

実験において個々の被験者は前章で述べた自律的に動作するロボットを10分間観察した。被験者は26名であり、平均年齢19.9歳の大学生である。観察前に、被験者はあらかじめロボットとのコミュニケーションの見本を示された。実験は7.5 m x 10 mの部屋で行われた。

また、被験者とロボットはモーションキャプチャシステムの動作計測用のマーカーを取り付けて実験を行った。この身体的動作の数値的結果と、被験者のロボットに関する主観的印象(実験に用いた形容詞対を表1に示す)を分析することで、人口ロボット相互作用を数値的に解析することを試みる。

3.2 モーションキャプチャシステムを用いた身体動作の数値化

実験に用いたモーションキャプチャシステムは、部

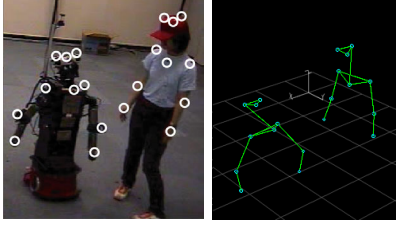


図5 マーカーの取り付け(左)とキャプチャされた身体の3次元位置(右)

Fig. 5 Attached markers(left) and obtained 3-D numerical position data of body movement (right)

屋の外周に沿って取り付けられた12台の赤外線照射装置付きの赤外線カメラと、赤外線を反射するマーカーから構成される。モーションキャプチャシステムはすべてのカメラ画像上での各マーカーの2次元位置をもとに各マーカーの3次元位置を計算する。用いたシステムの時間分解能は120Hz、空間分解能は実験環境において約1mmである。

図5に示すように、このマーカーを取り付けた。取り付け位置は、頭部(人間はマーカーが取り付けられた帽子をかぶる)、肩、首の付け根、腕の各関節である。このようにロボットと人の双方に類似の位置に取り付けることで、人とロボットの身体動作の相互作用を分析する。頭部の3点のマーカーにより視線の高さや向き(アイコンタクト)を検出する。また、肩と首の付け根のマーカーにより、対ロボット距離および移動距離を測定する。また、腕のマーカーにより、手先の運動量(体に対する手先の相対位置の移動量)や、腕の同調的動作(ここでは、人とロボットの間で、体に対する手先の相対位置の3秒間の相関値が高い時間領域、と定義する)の検出を試みる。なお、接触行動の分析はロボットの内部ログを用いた。

以下に、特に以後の議論で重要となるアイコンタクトおよび腕の同調的動作の計算方法を示す。なお、本稿では両者の頭部の向きがそれぞれ互いの方を向いていることをもってアイコンタクトがあったものと見なした。

3.2.1 アイコンタクト

被験者Aの頭部左前につけたマーカーを $LFHD_A$ 、頭部右前につけたマーカーを $RFHD_A$ 、後頭部中央につけたマーカーを $CBHD_A$ 、としたときに、 $LFHD_A$ と $RFHD_A$ の中点を $CFHD_A$ とすると、被験者Aの視線ベクトル \vec{v}_A は

$$\vec{v}_A = \overrightarrow{CBHD_A CFHD_A} \quad (1)$$

さらに、被験者のマーカーは帽子に取り付けられていた

ため、顔の中心 $CFHD'_A$ を、簡単のため $CFHD_A$ のZ成分を $Zdist_A$ 差し引いたものと定義する。同様に被験者Bの視線ベクトル \vec{v}_B 、顔中心 $CFHD'_B$ も定義することができる。ここで、 $CFHD'_A$ を通り視線ベクトル \vec{v}_A 方向の直線と、相手側の $CFHD'_B$ との距離が一定の閾値 $FaceTH$ 以内であれば視線がっていると定義する。ここで点aを通るベクトル \vec{v} 方向の直線と点bとの最短距離を $Dist(v, a, b)$ とすると、被験者AがBの顔方向を見ていたかどうかを示す関数 $IsWatch(A, B)$ は次式にて定義される。

$$IsWatch(A, B) = Dist(\vec{v}_A, CFHD'_A, CFHD'_B) < FaceT \quad (2)$$

さらに、 $IsWatch(A, B)$ かつ $IsWatch(B, A)$ が成立したときに、両者がアイコンタクトをしていたと定義した。

$$IsEyeContact(A, B) = IsWatch(A, B) \text{ and } IsWatch(B, A) \quad (3)$$

ゆえに、本実験における被験者SとロボットRとのアイコンタクトは $IsEyeContact(S, R)$ により定義される。また、実際の間人およびロボットのサイズから $Zdist_S = 120$ 、 $Zdist_R = 50$ 、アイコンタクトの際の顔方向と実視線の誤差を考慮して $FaceT = 400$ (単位はいずれもmm)を用いた。

3.2.2 腕の同調的動作

被験者Aの左肩につけたマーカーを $LSHO_A$ 、右肩につけたマーカーを $RSHO_A$ 、左右の手先につけたマーカーをそれぞれ $LFIN_A$ 、 $RFIN_A$ とすると、被験者Aの体からみた右手先の相対位置ベクトル \vec{r}_A は、腕の長さの個人差を標準化して、

$$\vec{r}_A = \overrightarrow{RSHO_A RFIN_A} / L_A \cdot rotate(-\theta) \quad (4)$$

により表される。ただし、 θ は被験者Aの身体の向き(ここでは、 $\overrightarrow{LSHO_A RSHO_A}$ のXY平面上への投影がX軸と成す角として求まる)、 $rotate(\alpha)$ はZ軸まわりの角度 α 回転を表す行列、 L_A は腕の長さである。同様に、被験者Aの体からみた左手先の相対位置ベクトル \vec{l}_A も求めることができる。

ここで、被験者A,Bの両者の手先位置相関判別関数 $IsCor$ を、変数a,bに関するピアソンの積率相関係数を $c(a, b)$ として、以下のように定めた。

$$IsCor(\vec{r}_A, \vec{l}_A, \vec{r}_B, \vec{l}_B) = \max(c(\vec{r}_A, \vec{r}_B), c(\vec{l}_A, \vec{l}_B)) > T_{max} \text{ and } \min(c(\vec{r}_A, \vec{r}_B), c(\vec{l}_A, \vec{l}_B)) > T_{min} \quad (5)$$

ここで、時刻tにおける $IsCor()$ を求める際には、時刻tからt+3(sec)までの手先位置から $c(\vec{r}_A, \vec{r}_B)$ な

表 2 身体動作に関する実験結果
Table 2 Results of body movements

	平均	標準偏差
距離 (m)	0.547	0.103
アイコンタクト (s)	328	61.8
視線の高さ (m)	1.55	0.124
移動距離 (m)	35.2	17.0
手先の移動距離 (m)	108	29.5
手先の同調的動作 (s)	7.95	6.58
接触 (回数)	54.9	20.8

どを求めた。さらに、同調動作の際に左右の手が入れ替わる場合を考慮して、両者の手先同調判別関数 $IsSync(A, B)$ を以下のように定義した。

$$IsSync(A, B) = IsCor(\vec{r}_A, \vec{l}_A, \vec{r}_B, \vec{l}_B) \\ \text{or } IsCor(\vec{r}_A, \vec{l}_A, \vec{l}_B, \vec{r}_B) \quad (6)$$

(ただし、 \vec{r}_B, \vec{l}_B はそれぞれ \vec{r}_B, \vec{l}_B の x 成分の符号を反転させたものである。) なお、本実験における被験者 S とロボット R との腕の同調的動作は $IsSync(S, R)$ により求まる。ここで、 T_{max}, T_{min} の決定に際しては、パラメータを変化させながら計算結果を実データ 1 サンプルに関するビデオと比較し、 $T_{max} = 0.5, T_{min} = 0.3$ とした。

3.3 実験結果

本節では相互作用の際の身体的動作の数値的解析の実験結果を示す。数値的に得られた身体動作 (特に、人とロボットとの協調的動作) と主観的評価との相関関係を分析することで、人-ロボット相互作用解析の新しい方向性を見出すことが、本稿のアプローチである。以下に、具体的な実験結果と分析の内容を示す。

3.3.1 SD 法に基づく印象の主観的評価

7 段階の SD 法を用いてロボットの印象の主観的評価を行った。表 1 に用いた形容詞対と、26 人の実験結果の平均値と標準偏差を示す。実験に用いた形容詞対は、ロボット評価に関する従来研究¹⁰⁾ における因子分析で見いだされた第一因子である評価性因子に負荷を持つ形容詞を選択した。また、これらの 5 つの形容詞対への評価を平均することにより、ロボットの印象に関する評価性得点を計算した。

3.3.2 主観的評価と身体的動作の相関

表 2 に身体動作に関する数値的解析結果を示す。アイコンタクト (図 6) の平均時間は 328(sec.) であり、10 分間の実験時間の半数を上回った。また、被験者の通常の視線の高さの平均値は 1.63(m) であり、実験結果の視線の高さの平均値は 1.55(m)、ロボットの視線の高さは 1.13(m) であることから、一部の被験者は若干かがんで時にロボットと視線の高さを合わせたこと

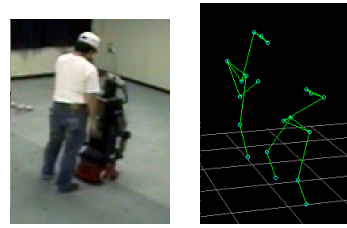


図 6 アイコンタクト
Fig. 6 A scene of eye contact

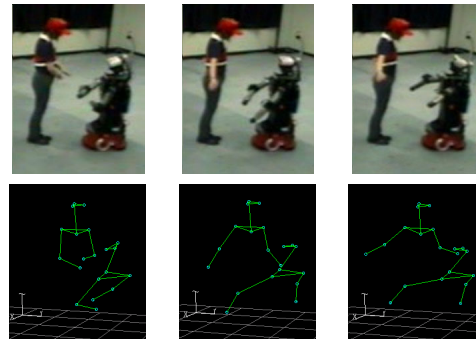


図 7 手先の同調的動作
Fig. 7 A scene of synchronized body movements

が推測される (実際、このような様子は実験の際のビデオからも観測された)。また、一部の被験者に、ロボットの体操などの腕の動きを真似する同調行動が見られた (図 7)。

さらに、表 1 に示した形容詞対を基に計算された評価性得点と、表 2 の身体動作との相関を計算した。この結果を表 3 にしめす。被験者数が 26 であるので、相関値の絶対値が 0.3297 以上が有意な相関である (表中に太字で示す)。分析の結果、アイコンタクトと同調が主観的評価と比較的強い相関を示した。一方で、身体動作の間での相関をみると、アイコンタクト-距離、アイコンタクト-移動量、同調-指先移動量、同調-接触といった項目で相関がみられるものの、距離・移動量・指先移動量・接触は主観的評価とあまり相関が見られなかった。つまり、単にロボットに近づき、指先を活発に動かしたり、ロボットに触れたり、という活発なインタラクション行動が良い印象につながるわけではなく、むしろロボットとの間にアイコンタクトや同調的動作という協調的な関係を築き上げた被験者がロボットに良い印象を持ったことがわかる。

3.4 重回帰分析による身体動作間の関係の検証

実験結果から、主観的評価と身体動作の間には相関関係が見られた。そこで、重回帰分析により印象に関する評価性得点をこのような身体的動作から推定する

表 3 身体動作と主観的評価の相関

Table 3 Correlation between body movements and subjective evaluation

	Eval.	Dist.	E. C.	E. H.	M. D.	M.D.H.	S. M.	Touch
Dist.	-0.04	1.00						
E. C.	0.57	-0.47	1.00					
E.H.	0.08	-0.39	0.29	1.00				
M. D.	-0.32	0.20	-0.43	0.02	1.00			
M.D.H.	0.01	-0.04	-0.21	-0.09	0.49	1.00		
S. M.	0.54	-0.05	0.28	-0.05	0.15	0.61	1.00	
Touch	0.21	-0.45	0.49	-0.07	-0.15	0.35	0.41	1.00

(Eval.: 評価性得点, E.C.: アイコンタクト, E.H.: 視線の高さ, M. D.: 移動距離, M.D.H.: 手先の移動距離, S.M.: 手先の同調的動作)

表 4 身体動作と主観的評価についての重回帰分析により得られた標準化偏回帰係数

Table 4 Standardized partial regression coefficients obtained by multiple linear regression analysis

	Coefficient	Value
距離	α_{dist}	0.173
アイコンタクト	α_{ec}	0.476
視線の高さ	α_{eh}	0.019
移動距離	α_{md}	-0.228
手先の移動距離	α_{mdh}	-0.029
手先の同調的動作	α_{sm}	0.535
接触	α_{touch}	-0.186

ことを試みる。このような分析から身体動作間の主観的印象における関係を見いだす。

このため、身体動作と評価性得点に関して重回帰分析を行い、表 4 に示す標準化偏回帰係数を得た。得られた重回帰式を (7) に示す ($DIST$, EC , EH , DM , DMH , SM , $TOUCH$ はそれぞれ各身体動作の測定値を正規化したものである)。なお、 E は 7 段階評定のスコアの平均値であることから値域は 1 から 7 である。この回帰式の重相関係数は 0.77 であることから、評価性得点の 59% がこの式から説明されることが分かる。なお、この重回帰式に関する有意性を分散分析により検証したところ、 $F(7, 18) = 3.71$, $P < 0.05$ で有意であった。

$$E = \alpha_{dist} \cdot DIST + \alpha_{ec} \cdot EC + \alpha_{eh} \cdot EH + \alpha_{dm} \cdot DM + \alpha_{dmh} \cdot DMH + \alpha_{sm} \cdot SM + \alpha_{touch} \cdot TOUCH + \alpha_{const} \quad (7)$$

分析の結果、偏回帰係数が示すように、ロボットの評価性得点について、アイコンタクトと同調的動作が多い被験者ほどロボットへの評価が高くなったことが分かる。一方、単にロボットとの距離が近く、移動距離が大きく、または接触行動が多い被験者はロボットへの評価が低い傾向があったことが分かる。

ここで、この回帰式の各項目は瞬間毎に測定可能な値であることから、式 (8) のように瞬間毎の評価の推定値を計算することができる ($DIST(t)$ など時刻

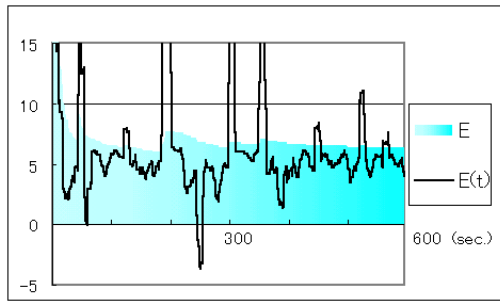
t における身体動作の測定値を意味する)。この瞬間毎のインタラクションの評価値 $E(t)$ は、協調的な動作の影響が大きいことから、主観的評価の推定と同時に被験者が身体動作においてエンタテインメントを起こした指標にもつながると考えられる。

$$E(t) = \alpha_{dist} \cdot DIST(t) + \alpha_{ec} \cdot EC(t) + \alpha_{eh} \cdot EH(t) + \alpha_{dm} \cdot DM(t) + \alpha_{dmh} \cdot DMH(t) + \alpha_{sm} \cdot SM(t) + \alpha_{touch} \cdot TOUCH(t) + \alpha_{const} \quad (8)$$

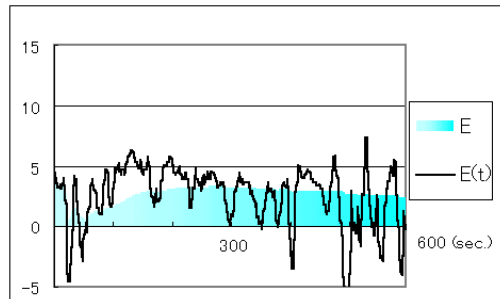
また、 E と $E(t)$ には次式 (9) の関係がなりたつ。つまり、主観的な評価に関する瞬間毎の動的な推定値が得られる。

$$E = \int_0^t E(t) / t \quad (9)$$

実際にこの瞬間値に基づき実験データをグラフ化した。被験者 1 は実験後に「目の動きが本当に子供に見上げられて見つめられている気分になった。本当に人間の子で無邪気な人格であるかのように錯覚しそうになった。」とコメントし、ロボットと上手く遊んだ被験者である。図 8 にこの被験者の主観的評価の推定値の時間遷移を示す。グラフ中の実線はこの推定値を示し、塗りつぶされた領域は時刻 t までの $E(t)$ の平均値である。また、被験者 2 は対照的に、ロボットと上手く相互作用が出来なかった被験者の例である。両者のグラフを比較すると、被験者 1 のグラフは推定値が 5 付近で推移し、時に大きな値を示していることが分かる。被験者 1 はロボットの近くでロボットと目を合わせながら子供に話しかけるように対話を続けた。時刻 200[s] 付近での大きな値は、被験者がロボットの体操する腕の動きを真似たことから生じた。これに対して、被験者 2 のグラフはしばしば 0 以下の値を示し、特に実験の終盤では非常に不安定に低い値を示している。実際に、被験者 2 は実験の終盤にロボットの目を隠し、苛立つようにロボットの接触センサを触り、ロボットから遠ざかるような動きを見せた。



被験者 1



被験者 2

図 8 主観的評価の推定値の推移例

Fig. 8 Illustration of entrainment score (estimation score of subjective evaluation)

表 5 主観的評価の推定値に関する下位 5 モジュール

Table 5 Worst five situated modules based on average entrainment score

ID	内容	得点
TICKLE	くすぐる	-2.09
APOLOGIZE	謝るまね	-1.96
NOT_TURN	「忙しい」と言って遊ばない,	-0.51
SLEEP_POSE	眠ったふり	-0.42
FULLY_FED	お腹がいっぱい, のポーズ	0.32

3.5 主観的評価の推定値に基づくインタラクティブロボットの行動開発

ここまでの身体動作に基づくロボットの相互作用の評価は、ロボットの開発アプローチとは独立であり、身体動作を行うどのようなインタラクティブロボットにも適用可能である。ここでは、さらに我々の状況依存の行動モジュールと単純なルールに基づく開発手法の上で、この評価方法を利用することを考える。これは、同時に引き込み感がインタラクションの瞬間的評価を表していることの検証にもつながる。

我々は、すべての被験者の実験データに関して、ロボットが実行したモジュール毎に、そのモジュールが実行されていた間の瞬間毎の評価値を計算した。表 5、表 6 はこの評価値が最も低かった 5 モジュールと、最も高かった 5 モジュールを示す。評価値が低かったモ

表 6 主観的評価の推定値に関する上位 5 モジュール

Table 6 Best five situated modules based on average entrainment score

ID	内容	得点
EXERCISE	体操	5.75
ASK_SING	「歌を歌おうか」と問いかけ	5.59
CONDUCTOR	指揮をする真似	4.85
WHERE_FROM	「どこから来たの」と問いかけ	4.55
LET'S_PLAY	「触ってね、遊ぼうよ」と呼びかけ	4.24

ジュールはあまりインタラクティブなモジュールではなかった。例えば、*SLEEP_POSE*, *FULLY_FED* は人間の行動に反応せず「寝たふり」などを行うモジュールであり、*NOT_TURN* は、このような人間の行動に反応しないモジュールを実行している際に人間がロボットの肩をたたいて遊ぶように呼びかけた際に、人の手を振り払って「忙しい」と言うモジュールである。これに対して評価が高かったのは体操や指揮の真似といった、人間がロボットの身体動作を真似しがちなモジュールや、問いかけや遊びの呼びかけと言ったインタラクティブ性が高く、人間をロボットとの対話に引き込むようなモジュールであった。

このように、主観的評価の推定値を利用することが、ロボットのインタラクティブな行動の設計に利用できることが示された。同時に、この方法による瞬間毎の主観的評価の推定の正しさを示すものである。このように身体動作から推定される主観的評価の推定値を利用することで、例えば相互作用行動の学習や内界センサを用いた人間の主観的センシングなど、同様のインタラクティブなロボットに一般的に応用可能であると考える。

4. 考 察

4.1 相互作用における協調的身体動作

分析の結果、インタラクションの評価には、人の協調的行動（アイコンタクトや同調行動）が深く関わることが見いだされた。つまり、ロボットの行動に対して協調的に振る舞う人ほどロボットのことを高く評価する。ここから考察されるのは、人はロボットとの相互作用の間に、ロボットとの協調的な関係を築き上げ、このような関係を上手く構築できた人はロボットと上手くインタラクションし、ロボットを高く評価する、という仮説である。ロボットに実装した対話的行動の評価からも、快活に身体を動作させることで人の同調的な身体動作を引き起こすモジュールや問いかけによって返答を求めるモジュールのように人間を相互作用に引き込むモジュールが高く評価されたことが見いださ

れた。このように、身体的に、また文脈として対話に引き込むことがロボットと人間との間に協調的な関係を作り出すのではないかと考えられる。

また、身体動作に関する重回帰分析から約6割の主観的評価が身体動作から説明された。これは、言語的内容を全く含んでいないことを考えると大きな値であると言える。開発したロボットは、音声認識により小さい子供程度の能力ではあるが人間と会話することができる。実験においても、被験者は時に自発的にロボットに話しかけた。発話の内容は、主にロボットに対する要求的な内容であった(特にロボットが前に実行した行動を再び要求するものが多い)。このような呼びかけに対して、ロボットは時に正しく反応し、あるいは誤って反応した。このような発話内容の分析は会話分析などにより可能ではあるが、これらの方法は分析のために人間が介在するため主観的な要素が含まれる。また主に探索的に事象を見いだすことに用いられることが多い。これに対して、本稿にて報告した身体動作に基づく方法は、文脈と独立に数値的に得られた身体動作という客観的な指標のみを利用しており、人手を介さずに計算可能なことから様々な応用可能性があると考えられる。

4.2 身体動作に対する人間の個性の影響

さらに実験結果の妥当性を検証するため、性格テストを用いて身体動作と被験者の性格の関連を分析した。テストにはYG法検査(矢田部-ギルフォード法)を用いた。YG法は1949年に開発されたGuilford-Zimmerman Temperament Survey(10 factor scale)を用いられる)を元に、1958年に矢田部が日本人向けに翻訳したものである。被験者は120の質問(3-point rating scale)に回答することにより、12因子に関する性格・気質の傾向が明らかになる¹⁴⁾。

この性格テストの12因子に関するスコアと主観的評価、身体動作の相関を計算した。この結果を表7に示す。主観的評価に対しては抑鬱性と社会的外向が相関を示し、身体動作には表中の太字に示すように多くの項目が相関を示した。たとえば、協調性の欠ける被験者は同調的動作と負の相関を示した。つまり、協調的でない被験者ほど、同調的動作をしなかった。また、抑鬱性(厭世的気分を表している病的な精神状態)の高い被験者も同調的動作をせず、かつロボットを高く評価しなかった。支配的な被験者はアイコンタクトをしがちであった。社会的外向の大きい被験者は対話の際にあまり歩き回らず、またロボットを高く評価する傾向があった。

このように性格テストと身体動作の関係に関する実

験結果は、自然に理解しやすい結果であったといえる。たとえば協調的でない被験者は同調的な動作を行わなかった。つまり、被験者の身体動作は性格により異なったものとなると考えられる。一方で、主観的評価は被験者の性格だけでなく、むしろ協力的な身体動作からも形成される。つまり、身体動作を観察することで、人間の行動からその人がどの程度ロボットとの対話に引き込まれているのかを見いだすことができると考えられる。同時に、ロボットが対話している人の性格を行動から分類することも可能になると考えられる。これまでも¹⁵⁾のようにロボットの性格を変化させるアプローチが提案されている。人間の性格を分類してこれに応じてロボットの性格を変化させることで、性格に関する相互作用が生じることが考えられる。このような性格レベルのインタラクションに関して本手法を適用することは興味深い将来課題のひとつである。

4.3 身体動作の数値解析の応用可能性

本稿では、人間型ロボットが人間との対話において引き起こす互いの身体動作を数値的に解析することで人間の主観的評価の推定を行った。さらに、我々はこの手法が様々な応用が可能であると考えた。たとえば、人間同士の対話や、実体を持たないコンピュータ上のキャラクタエージェントでも無意識に顔みや相づちといった人間の身体動作を引き起こすようなものは、協調的な身体動作を測定することで本手法が適用可能であろう。

また、瞬間的な主観的評価の推定に関しても、年齢や文化など被験者の母集団や対話対象が変わったとしても、重回帰式の係数や評価対象とする身体動作を調節することで適応可能であると考えた。この推定値をロボットやエージェントが対話している人間に適応するように適切な行動パターンを学習に用いる、あるいは前節で述べたように対話している人間の個性の推定に用いる、といった利用法も考えられる。身体動作の測定による分析アプローチは幅広い応用可能性があると考えられる。

さらに、本手法から瞬間毎の身体動作の数値から主観的評価を動的に推定できること、またこのような動的な評価値がロボットの内部モジュールの評価につながるが見出された。将来的にロボットはこの動的な評価値を利用して、自らの相互作用行動を切替え、人間により良い印象を与えるように個人個人に適応的に振舞うことが可能になると考えられる。一方、この際には単に身体動作から推定される動的評価値が高くなるような行動をし続けるように内部モジュールを切替えるというよりも、より高度なメカニズムや長期的

表 7 被験者の性格, および主観評価・身体動作との相関
Table 7 Subjects' personalities and their correlation with subjective evaluation and body movements

	Eval.	Dist.	E. C.	M. D.	M.D.H.	E. H.	S. M.	Touch
抑鬱性	-0.35	-0.25	-0.29	0.33	0.02	-0.07	-0.36	-0.08
回帰性	0.02	-0.03	-0.12	0.21	-0.03	-0.21	-0.10	0.24
劣等感	0.08	-0.22	0.10	0.18	0.09	-0.19	-0.10	0.20
神経質	-0.13	-0.24	-0.03	0.15	-0.07	-0.10	-0.25	0.23
客観性の欠如	0.21	0.15	0.01	0.21	0.18	-0.39	0.17	0.17
協調性の欠如	-0.27	-0.08	-0.13	0.20	-0.19	0.23	-0.41	-0.10
愛想の悪さ	0.15	-0.07	0.19	-0.04	-0.27	0.47	0.00	-0.06
一般的活動性	0.13	-0.25	0.06	0.01	0.11	0.42	0.20	0.17
のんきさ	0.23	-0.21	0.15	0.28	0.04	-0.03	0.14	0.21
思考的外向	0.23	0.26	0.18	-0.08	-0.20	-0.33	0.12	0.14
支配性	0.28	0.03	0.34	-0.19	-0.11	0.38	0.25	0.12
社会的外向	0.51	-0.01	0.32	-0.43	-0.05	0.25	0.26	0.09

(Eval.: 評価性得点, E.C.: アイコンタクト, E.H.: 視線の高さ, M. D.: 移動距離, M.D.H.: 手先の移動距離, S.M.: 手先の同調的動作)

な行動戦略が必要になると考えられる。つまり、単に評価値の低いものから高いものに切替え続けられれば人のロボットへの印象評価値を高く保ち続けることができるかどうかは定かではなく(短期的には保つことができるであろうが、それが永続的であるとは限らない)、むしろこのような動的な評価値をもとに、例えば時に評価値が低いものを交えながら相互作用を持続する、といった長期戦略を実行する必要があると考える。

5. おわりに

本稿では、モーションキャプチャシステムを利用した相互作用の数値解析について報告した。我々の開発したロボットは音声のみでなく視線や腕のゼスチャを交えて自律的に人間とコミュニケーションを行う。26名の被験者による実験により、このロボットと人間との相互作用を身体動作に関して分析した。実験の結果、アイコンタクトや同調的行動といった人間とロボットが協調的にふるまう身体行動が主観的評価に大きく貢献した。また、重回帰分析により主観的評価の約6割が身体動作から説明されることが分かった。この結果から、人間とロボットとのコミュニケーションは単にロボットが人間に何かを提示するのみでなく、人間とロボットが協調的關係を築き上げることの重要性を示していると考えられる。

また、我々の相互作用の数値解析アプローチの可能性は大きい。近年、多くのヒューマノイドロボットが開発され、教育、介護といった目的への利用が行われようとしている。このような人間型の対話ロボットを作るにあたって、瞬間的評価の推定といった身体動作の数値解析は、ロボットが人間の身体動作を観察することで人間の主観的評価を推定できる可能性を示したことから、将来的にロボットが適応的な行動をする上で重要であると言える。さらに、本実験のような身体動作の数値解析は、ロボットの行動の設計のみならず、

人間同士のコミュニケーションの分析など、幅広い利用の可能性があると考えられる。今後、本手法を人-ロボットのみでなく、人同士の相互作用にも適用することで、コミュニケーションにおける身体動作の役割の解明を進めたい。

謝辞 本研究の一部は通信・放送機構の研究委託により実施したものです。

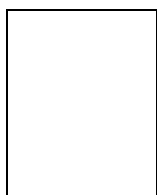
参 考 文 献

- 1) 山本浩司, 水谷研治: 高齢者コミュニケーション支援システムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.192-194, (2000).
- 2) 岡田美智男, 三嶋博之, 佐々木正人 編: 身体性とコンピュータ, 共立出版, (2000).
- 3) 黒川隆生: ノンバーバルインターフェース, オーム社, (1994).
- 4) 松阪要佐, 東條剛史, 小林哲則: グループ会話に参与する対話ロボットの構築, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.6, pp.898-908, (2001).
- 5) Nakadai, K., Hidai, K., Mizoguchi, H., Okuno, H. G., and Kitano, H.: Real-Time Auditory and Visual Multiple-Object Tracking for Robots, *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp.1425-1432, (2001).
- 6) B. Scassellati: Investigating Models of Social Development Using a Humanoid Robot, *Biorobotics*, MIT Press, (2000).
- 7) 小嶋秀樹, 高田明: 社会的相互行為への発達のアプローチ — 社会のなかで発達するロボットの可能性, 人工知能学会誌, Vol.16, No.6, pp.812-818, (2001).
- 8) 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平: 身体表現を用いた人とロボットの共創対話, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6, pp.1348-1358, (2001)
- 9) 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基: 発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム, 日本機械学会論文集 (C編), 66 巻 648 号, pp.251-258, (2000).

- 10) 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平: 人間と相互作用する自律型ロボット Robovie の評価, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.315-323, (2002).
- 11) 中田亨, 森武俊, 佐藤知正: ロボットの身体動作表現と生成される印象とのラバン特徴量を介した定量的相関分析, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.2, pp.104-111, (2001).
- 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) Kanda, T., Ishiguro, H., Imai, M., Ono, T., and Mase, K.: An approach for developing interactive humanoid robots, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2002).
- 14) 辻岡美延: 新性格検査法 -YG 性格検査 応用・研究手引-, 日本心理テスト研究所, (2000).
- 15) Okuno, H. G., Nakadai, K., and Kitano, H. : Realizing Audio-Visually Triggered ELIZA-Like Non-verbal Behaviors, *PRICAI2002, LNAI 2417, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, pp.552-562, (2002).
- 16) 神田崇行, 石黒浩, 今井倫太, 小野哲雄, 人-ロボット相互作用における身体動作の数値解析- 協動的動作の重要性 -, インタラクシオン 2003, pp.247-254, (2003).

(平成 平成 15 年 4 月 2 日受付)

(平成 平成 15 年 9 月 5 日採録)



神田 崇行 (学生会員)

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科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研究員 . ヒューマンロボットインタラクシオン, 視覚移動ロボットに興味を持つ .



今井 倫太

1992 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業 . 1994 年同大学大学院計算機科学専攻修士課程修了 . 同年, NTT ヒューマンインタフェース研究所入社 . 1997 年より ATR 知能映像通信研究所研究員を経て, 現在, 慶應義塾大学理工学部専任講師, ATR 知能ロボティクス研究所客員研究員, 科学技術振興事業団さきがけ研究 21 研究員 . 博士 (工学) .

ロボットとの対話, センサを用いた状況知覚に興味を持つ .



小野 哲雄 (正会員)

1997 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了 . 同年より ATR 知能映像通信研究所客員研究員 . 2001 年公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科助教授, ATR 知能ロボティクス研究所客員研究員 . 博士 (情報科学) .

感情の計算モデル, マルチエージェントモデルによる共通言語の組織化, ヒューマンロボットコミュニケーションに関する研究に従事 . 認知科学会, 人工知能学会各会員 .



石黒 浩 (正会員)

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科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, 日本ロボット学会, 電子情報通信学会, IEEE, AAAI 各会員 .