

人-ロボット相互作用における身体動作の数値解析 - 協調的動作の重要性 -

神田崇行¹ 石黒浩^{1,2} 今井倫太^{1,3} 小野哲雄^{1,4}

¹ATR 知能ロボティクス研究所, ²大阪大学, ³慶應大学, ⁴はこだて未来大学

概要: 人とロボットのコミュニケーションに関する従来研究から視線や身体の同調的動作の重要性が注目されている。我々は、開発した人型インタラクティブロボットによる相互作用を、時間的・空間的に高い分解能で数値的に解析することにより、相互作用における身体動作の役割の解明を試みた。この身体動作の数値解析結果を主観的な評価と比較することにより、視線や身体動作の協調の重要性が見いだされる。

Numerical analysis of humans' body movement on human-robot interaction

Takayuki Kanda¹, Hiroshi Ishiguro^{1,2}, Michita Imai^{1,3}, and Tetsuo Ono^{1,4}

¹ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories, ²Osaka University, ³Keio University, and ⁴Future University-Hakodate

Abstract: Toward an ideal human-robot communication, we developed an interactive humanoid robot that complexly behaves and autonomously interacts with humans by speaking and taking gesture. This is a testbed for embodied communication. Our approach is to precisely measure the interaction represented as body movements between the robot and humans to identify the essential embodiment and behavior. We performed an experiment about the interaction. The body movements is measured by a motion capture system, and then compared with subjective evaluation about the robot and personality of the subjects. As the result, it reveals the important role of the cooperative body movements.

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、インター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。つまり、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。これ

までにも、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。特に身体の中でも非常に効果があると考えられているのが視線である。たとえば、視線を対話相手に向けてアイコンタクトを行うことで、ロボットは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ことが可能になる。これまでにも音声と視覚による人物追従[2]など多くの研究が行われた。このほか、身振りにおける腕や身体の向き[3]、顔の表情[4]などの研究が行われている。

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従来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るための方法は見いだされていない。我々は身体機能を組み合わせた総合的なロボ

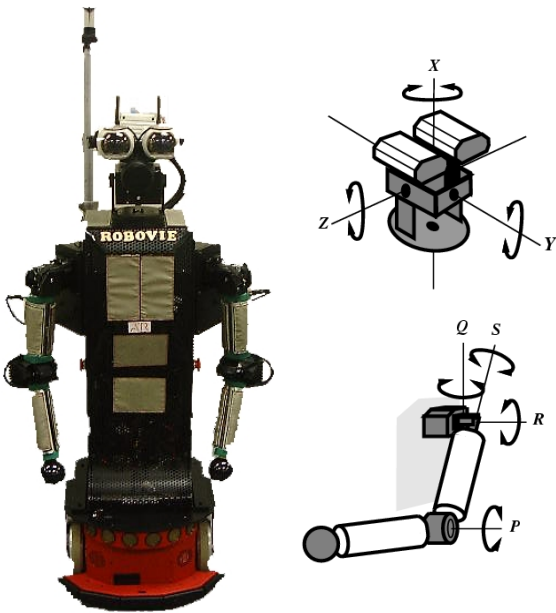


Figure 1: "Robovie"



Figure 2: Interactive behaviors

ットにおける個別の機能の役割に関心を持つ。このために、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、ロボットと人が協調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調査する。

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 1,2 に我々の開発したロボット "Robovie" を示す。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。[5]

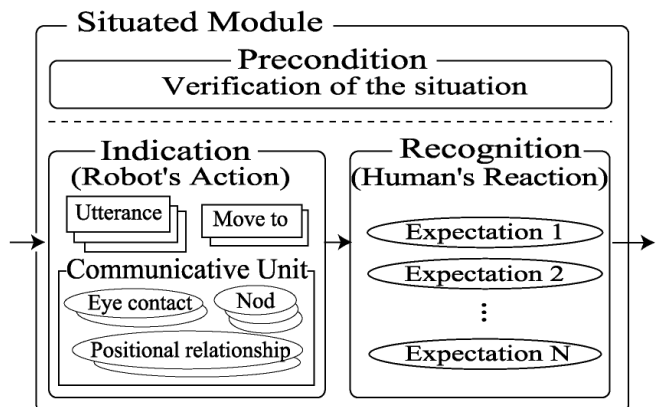


Figure 3: Situated module

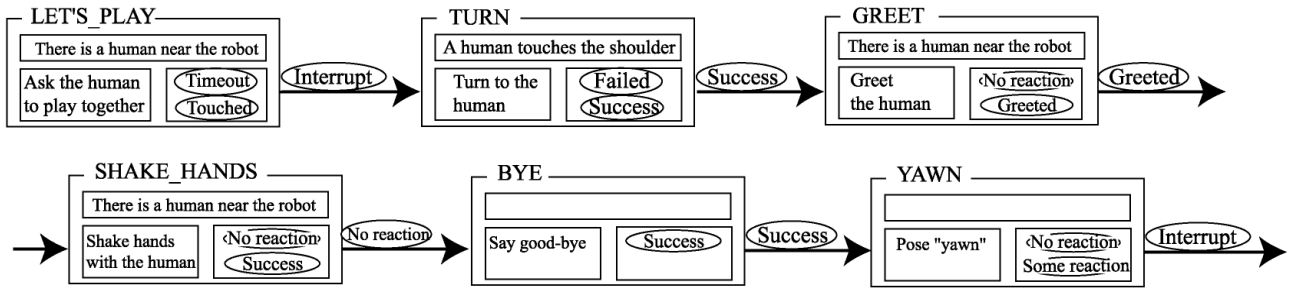


Figure 4: Example of situated module transition

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活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)。

2.2.2 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。

2.2.3 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種類程度の人間との遊び行動および、「頭をかく」「腕組みする」といった

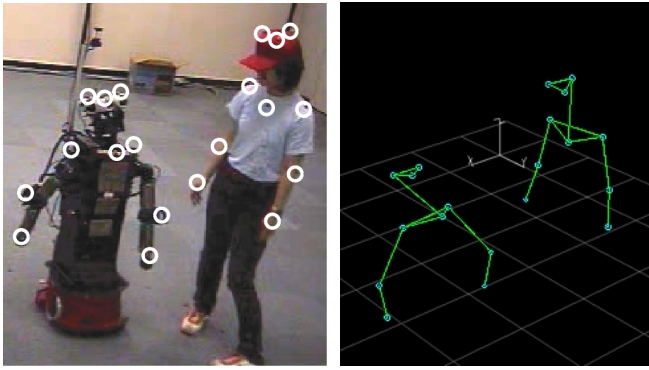


Figure 5: Attached markers (left) and obtained 3-D numerical position data of body movement (right)

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[6]は，部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

Adjective-pairs		Mean	Std. Dev.
Good	Bad	4.88	0.95
Kind	Cruel	4.85	1.29
Pretty	Ugly	5.08	0.93
Exciting	Dull	4.46	1.61
Likable	Unlikable	4.77	1.03
Evaluation score		4.81	0.92

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

	Mean	Std. Dev.
Distance (m)	0.547	0.103
Eye contact (s)	328	61.8
Eye height (m)	1.55	0.124
Distance moved (m)	35.2	17.0
Distance moved by hands (m)	108	29.5
Synchronized movements (s)	7.95	6.58
Touch (num. of times)	54.9	20.8

Table 2: Results for body movement

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(eye height)や向き(アイコンタクト(eye contact))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(distance)および移動距離(distance moved)を測定する。また，腕のマーカーにより，手先の運動量(distance moved by hands)(体に対する手先の相対位置の移動量)や，腕の同調的動作(synchronized movements)(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(touch)の分析はロボットの内部ログを用いた。

	Evaluation	Dist.	E. C.	E. H.	D.M.	D.M. 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				
D.M.	-0.32	0.20	-0.43	0.02	1.00			
D.M.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

Table 3: Correlation between body movements and subjective evaluation

(E.C.: eye contact, E.H.: eye height, D. M.: distance moved, D.M.H.: distance moved by hands, S.M.: synchronized movements)

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。実験の主な結果としては、主観的評価が被験者の身体動作と相関を示すことが見いだされた。つまり、ロボットとの対話の際にロボットや対話の内容をどのように感じているかが身体動作に表出する、と考えられる。また、主観的評価と強い相関を示したのは人とロボットが協調的に振る舞った結果生じる動作であったことはたいへん興味深い。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[7]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(Evaluation score)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。アイコンタクトの平均時間は328(sec.)であり、実験時間の半数を上回った。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が分かる。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。

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に示す。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、主観的印象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(standardized partial regression coefficient)を得た。得られた重回帰式を(1)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．

$$E = \alpha_{dist} \cdot DIST + \alpha_{ec} \cdot EC + \alpha_{eh} \cdot EH + \alpha_{dm} \cdot DM + \alpha_{dmh} \cdot DMH + \alpha_{sm} \cdot SM + \alpha_{touch} \cdot TOUCH + \alpha_{const} \quad (1)$$

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くなること分かる．

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(2)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)などは時刻 t における身体動作の測定値を意味する）．このような瞬間毎のインタラクションの評価値を引き込み感得点と名付ける．

$$E(t) = \alpha_{dist} \cdot DIST(t) + \alpha_{ec} \cdot EC(t) + \alpha_{eh} \cdot EH(t) + \alpha_{dm} \cdot DM(t) + \alpha_{dmh} \cdot DMH(t) + \alpha_{sm} \cdot SM(t) + \alpha_{touch} \cdot TOUCH(t) + \alpha_{const} \quad (2)$$

また，E と E(t)には次の関係がなりたつ．

$$E = \int_0^t E(t) / t \quad (3)$$

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 6 にこの被験者の引き込み感得点の時間遷移を示す．グラフ中の実線は引き込み感得点を示し，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 のグラフは引き込み感が 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

	Coefficient	Value
Distance	α_{dist}	0.173
Eye contact	α_{ec}	0.476
Eye height	α_{eh}	0.019
Distance moved	α_{dm}	-0.228
Distance moved by hands	α_{dmh}	-0.029
Synchronized movements	α_{sm}	0.535
Touch	α_{touch}	-0.186

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

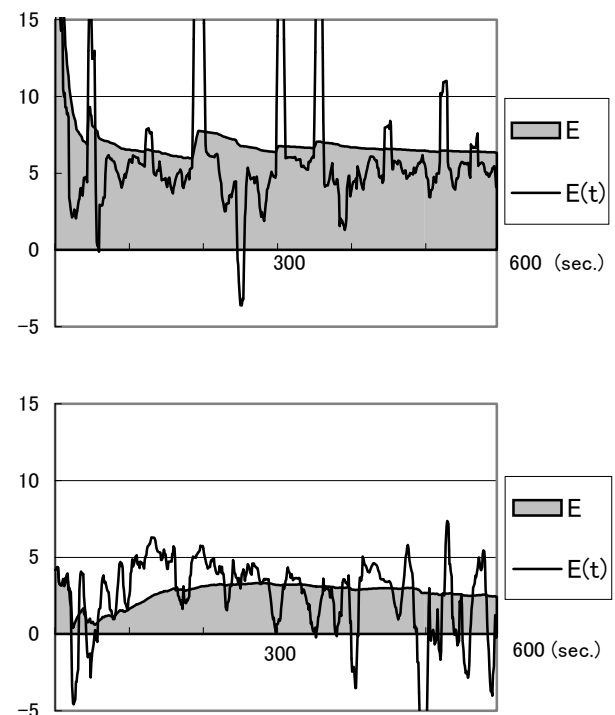


Figure 6: Illustration of entrainment score (upper: subject who treated the robot as if it were a human child, lower: subject who was embarrassed by interacting with it)

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．

ID	Contents	Evaluation
TICKLE	Tickle	-2.09
APOLOGIZE	Apologize	-1.96
NOT_TURN	Say, "I'm busy", and refuse to play together	-0.51
SLEEP_POSE	A pose of sleeping	-0.42
FULLY_FED	A pose of being fully fed	0.32

Table 5: Worst 5 *situated modules* based on average entrainment score

3.5 引き込み感に基づくインタラクティブロボットの行動開発

ここまでの引き込み感評価は、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、引き込み感を利用することが、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、この方法による引

ID	Contents	Evaluation
EXERCISE	Exercise	5.75
ASK_SING	Ask humans, "May I sing a song?"	5.59
CONDUCTOR	Pose imitating a musical conductor	4.85
WHERE_FROM	Ask humans, "Where are you from?"	4.55
LET'S_PLAY	Say, "Let's play, touch me"	4.24

Table 6: Best 5 *situated modules* based on average entrainment score

き込み感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引き込み感を利用することで、例えば相互作用行動の学習や内界センサを用いた引き込み感センシングなど、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

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。近年、相互作用における引き込み（Entrainment）現象に関する研究が行われるようになってきたが（[4][8]など）、このような引き込み現象の概念に基づくと、ロボットが多様な身体的動作を行うことで、人間の身体動作の引き込み現象を生じさせて、ロボットへの協調的な関係を生じさせていると言える。

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自律的に人間とコミュニケーションを行う。特に、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。こ

の結果は，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関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．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] K. Nakadai, K. Hidai, H. Mizoguchi, H. G. Okuno, and H. Kitano: "Real-Time Auditory and Visual Multiple-Object Tracking for Robots," Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp.1425-1432, 2001.
- [3] C. Breazeal, B. Scassellati: ``A context-dependent attention system for a social robot." Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp.1146-1151. 1999.
- [4] 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)
- [5] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, T. Ono and K. Mase, An approach for developing interactive humanoid robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002.
- [6] Vicon Motion Capture System. <http://www.vicon.com/>
- [7] 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.
- [8] 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.