

特集 「エンターテインメントとAI」

# 人と調和するペットロボットのための 対人心理作用技術

## Methodology for Synthesizing Affectionate Pet Robots

佐藤 知正  
Tomomasa Sato

東京大学大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo.

中田 亨  
Toru Nakata

独立行政法人産業技術総合研究所  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

**Keywords:** human robot interaction, impression producing robot, Laban movement theory.

### 1. ペットロボットと知能

ペットロボットの理想像の一つとして、本物のように生き活きと人間と交流する存在が考えられる。つまり、ユーザに対して心理上の作用機能がペット同然のロボットである。

この実現のためには、柔軟な素材を使ったり可愛らしい外見にしたりすることも検討項目であるが、ロボットをどのように振る舞わせるかというアルゴリズム上の問題も重要である。本稿では、後者の問題に対する筆者らの考え方と取組みを述べる。

具体的には、実際のペットと飼い主の關係に着目し、それを模倣してペットロボットの対人行動アルゴリズムに応用することを扱う。

さて、実際のペットは性格や気持ちを飼い主に表現することができる。物言わぬペットがなぜそのような内容を飼い主に伝えられるのであろうか。

[亀山 00] によれば、ペットの行動に手掛かりがあるという。例えば、ある食べ物をペットに見せた場合に、反応が速ければ速いほど、その食べ物が好きなのだと推定できる。食べ物をねだる行動が何度も繰り返し行われれば、その食べ物がとても好きなのだと推定できる。

このように、(1) 行動の形態 (身振りの軌道など)、(2) 行動の強度 (速度・回数など)、(3) 行動の因果關係などによる手がかりを介して、ペットは人間に表現している。この対人表現機能は、犬・猫・ハムスターにおいて顕著であり、魚や亀では弱い。つまり知能の産物と言える。

従来のペットロボットや動物育成ゲームにおいても、これらの行動の手がかりを人間に提示することは行われてきた。しかし、行動の手がかりを理論に基づいて設計することはまれであったと考えられる。むしろ、設計者が

アプリケーションごとに、アドホックに対人表現をつくっていた。

ペットロボットの人に見せる行動の設計の理論があれば、ロボットが臨機応変に振舞いを自分で設計し実行できる。しかし実際は、有力な理論がないため、ペットロボットは、その振舞いの種類が有限であり、マンネリに見え、飽きられてしまう危険をはらんでいる。

そこで本稿では、動物行動学や身体表現学にこの理論の規範を求めて、その研究事例を紹介し解説する。つまり、ロボットの振舞いの形態設計をいかに理論に基づいたものにするかについて述べる。具体的には、(1) ロボットの身体運動による感情表現の理論、(2) 人に対する親和感の演出、(3) 対人反応行動の規則性と印象の相関關係を、以下に紹介する。

### 2. 身体運動による心理表現

喜怒哀楽などの心理状態は、身体の姿勢形状と運動に反映する。ペットロボットにおいても、その身体を用いて心理を表現したい。

心理状態と身体姿勢と運動との關係を構造化する試みは [Darwin 1872] 以来さまざまに行われてきた。その中でも Rudolf Laban とその後継者による理論「ラバン身体表現理論」(Laban Movement Analysis: LMA) が最も具体的かつ網羅的である。

そこで筆者らは、LMA を力学的・幾何的に解釈しロボットの身体運動設計に応用することにした [中田 01a]。以下にその概要を紹介する。

Darwin によれば、動物の身体表現は攻撃意思表示の形態と服従意思表示の形態とを極とする両極構造を取る。LMA ではこれを修正し、戦闘緊張形態 (Fighting) と陶醉形態 (Indulging) とを身体表現の二つの極限形態とした。さらに、動きの質 (これを Effort と呼ぶ) と、

姿勢の全身的な幾何的特徴 (*Shape* と呼ぶ) という概念をうち立てて、この両極構造をより詳細化した。表 1 に示すように、戦闘緊張の心理状態の場合、動物の身体運動は、力強く、何かに目がけて直線的に、突発的に動くという特徴の *Effort* を持つ傾向にある。この逆となるのが陶酔的な心理状態であり、身体運動は、力弱く、ふらふら曲線的に、そろそろと動く傾向にある。







表 1 エフォートの構造

Effort Element	Fighting	Indulging
Weight	Strong	Weak
Space	Direct	Indirect
Time	Sudden	Sustained

また、身体運動の全身レベルの幾何的特徴である *Shape* にも、戦闘・陶酔の心理が現れる (表 2)。全身の姿勢形状を大まかに把握するために、身体の凸包 (身体を袋で包み込んでできる領域) を考える。凸包の水平面への投影を "*Table Plane Shape*" と呼ぶ。同様に、前後面への投影を "*Door Plane Shape*", 正中面への投影を "*Wheel Plane Shape*" と呼ぶ。*Shape* は、戦闘形態ではテーブルの面で対象に集中して収縮し、ドアの面では誇示のため上昇し、車輪の面では警戒して後退しがちになるという特徴を持つ傾向にある。陶酔形態はその逆の傾向にある。

このように LMA は、心理状態と身体動作の幾何学的

表 2 シェイプの構造

	Table Plane	Door Plane	Wheel Plane
Fighting	 Spreading	 Ascending	 Retreating
Indulging	 Enclosing	 Descending	 Advancing

力学的特徴とを網羅的に関連付けている。また、自由度が極めて大きい身体運動を、その要点となる要素だけを抽出している点は、工学的に有用である。

筆者らは、これら *Effort* と *Shape* を力学や幾何学の外面に翻訳し、"ラバン特徴量" として、身体動作の印象を決定する指標として用いることとした。

例えば、力加減に相当する *Weight Effort* は、素朴に身体動作の運動エネルギーに相当すると考えて、次式のように定式化する。

$$(\text{Effort Element}) = \sum_{\text{Each Limb}} a_i \theta_i^2 \quad (1)$$

ここで、 $\theta_i$  は各関節の関節角であり、 $a_i$  は重み付け係数である。つまり関節角速度の自乗の重み付け総和で力強さの印象の度合いを再現しているのである。

このほかの *Effort* や *Shape* の数量化も同様に可能である。

もちろん、数量化の方法は一通りではなく、善し悪しがある。例えば *Weight Effort* は、運動エネルギーよりも、速度の最大値を用いたほうが、観客が感じる力強さをより忠実に反映するかもしれない。

このような裁量の問題があるが、身体動作の幾何的・力学的特徴と、観客が感じる印象との因果関係を定量的に分析してみることにした。

実際に、図 2 に示すロボットの数種類の舞踏を 21 人の被験者に見てもらい、各舞踏でロボットの感情状態が、喜・怒・驚・悲の四つの基本情動のどれに見えるか、あるいはこのいずれでもないように見えるかを、アンケートで答えてもらった。各舞踏のラバン特徴量と印象回答結果データの関係を因子分析で処理し、両者の因果関係を構造化したものが図 1 である。これを見ると、ラバン特徴量が印象と強くかなりの直交性を持って関係しており、確かにラバン特徴量が印象の原因となっていることがわかる。

このように、人間が振り付けたロボット舞踏において、印象の原因を分析できた。印象原因の特定の成果は、ロボットの身体表現動作の自律生成へとつながるものである。これはいわば自動作曲の舞踏版であり、LMA 理論が楽理に相当している。

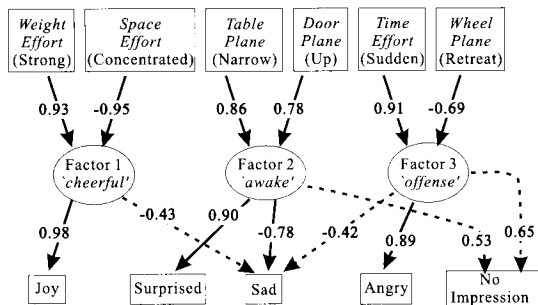


図 1 ラバン特徴量による舞踏印象の分析結果 (因子分析結果パス図)

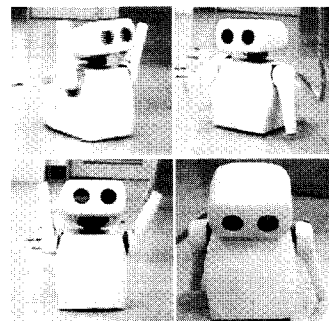


図 2 分析にかけた六つのロボット舞踏の一部

### 3. 接触反応による親しみの演出

ペットロボットはユーザに親しみを与えることも望まれる。

そこで、人に親しみを与える工学的な手法を考案すべく、筆者らは動物行動学に学ぶこととした [中田 97]。

動物においては、親しみ・敵意を表現するメディアの一つとして、他者との触れ合いが用いられる。母親が赤ん坊をなだめるとき、赤ん坊を抱きなでて働きかける。これからわかるように、触れ合いは相手を宥和すること(あるいは脅すこと)に関して、最も基本的で強力なメディアであると言える。

親しみの表現についてオオカミでは、相手の接触に対し力学的に受動的に振る舞うことでなされ、敵意は逆に反発的な反応でなされるという報告がある [Fox 74]。

そこで、ロボットでも人間との接触インタラクションにて受動的な反応を起こすことにより、人間に親和感を与えることができると仮説を立て、実験を行った。

実験では、図3に示すペットロボットに、こっくりこっくり首振りを繰り返す動作をさせる。被験者がこのロボット額部に接触したときに、図4に示すように、(A)力学的に受容する(人の手を押し返さずうなづく)、(B)反発する(人の手を押し返す)、(C)無視して従来の行動を継続するの3パターンの反応を行わせた。そして、20名の被験者にそれぞれの反応に感じる印象についてアンケートで答えてもらった。

図5に、ロボットの反応に感じる親しみのアンケート

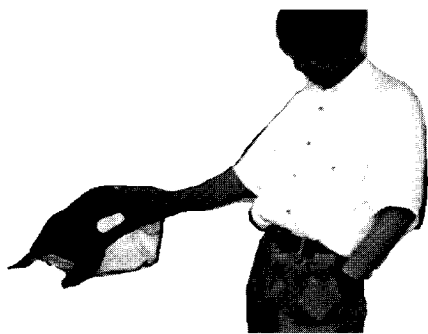


図3 接触反応による親和感演出の実験風景

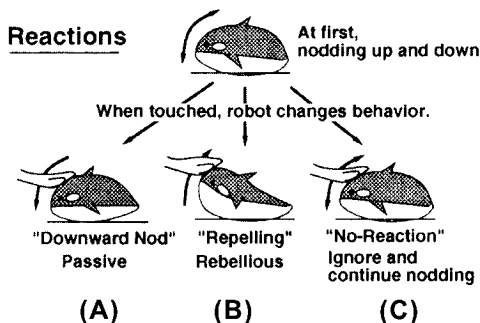


図4 ロボットの接触反応の3様式

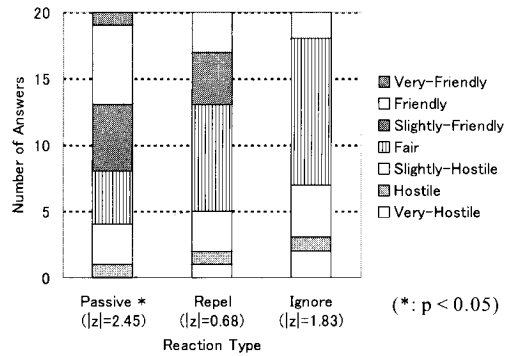


図5 接触反応様式の違いと親しみ演出効果の差

回答の結果の分布を示す。受容的に反応するパターンで、親しみの印象が比較的強く演出されていることがわかる。つまり、オオカミの親和感演出の方法が、ロボットから人間への場合でも通用したといえよう。

アンケートにはこのほかの設問を設けたので、それらの結果もまとめておく。ロボットの行動に意図を感じるのには、図4の(B)の反発反応パターンにて極めて強い。(C)の無視パターンでは、逆にロボットの行動を無意味に感じる傾向があり、飼い馴れた感じがせず、機械的で、危険な感じがした。これらの結果は、ロボットが人からの接触に反応することが、信頼感や好き嫌いなど社会心理的交流の形成に深く関与していることを示している。したがって接触コミュニケーションはペットロボットにとって最重要のメディアの一つであるといえる。

### 4. 交流の情報理論的性質と印象

前章の実験で、人からの働きかけに反応することが、ペットロボットの対人心理作用にとって重要であることがわかった。そこで、これをより詳細に調べてみることにした。

動物行動学では、二つの行為者の間のインタラクションを観察し、両者の絆の深さ(これを“連関度 (association)”という)を定量的に測る手法が種々開発されている。これらを、人とロボットの絆の深さの計測方法に応用してみることを試みた。

連関度の定量化手法は数あるが、本稿では、情報理論を用いた連関度を取り上げた。これは、“ペットが人になつく”という一種の学習現象と縁が深く重要である。

人間や動物は、自分の行動に対する相手の反応の規則性(でたらめか、否か)を意識する本能がある。自分の働きかけに対する相手の反応が一定しない場合は、こちらの意図が通じていないように感じる。逆に、相手の反応が規則的な場合は、意思疎通がうまくいっていると感じたり、相手の行動を支配できていると感じたりする。

人間や動物どうしの場合と同様に、人間の働きかけに対するロボットの反応の規則性も、表現の内容を支配するだろう。そこで筆者らは、ロボットの人に対する反

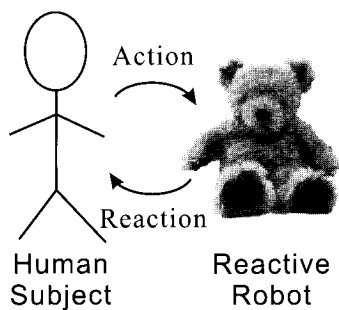


図6 ダイアドの模式図

表3 ダイアド発生頻度表の仮定の例

Frequency		Reaction				Sum
		Shake	Kick	Curl	Silence	
Action	Call	5	3	0	0	8
	Hug	3	0	0	0	3
	Touch	0	4	0	0	4
	Silence	2	0	1	5	8
Sum		10	7	1	5	23

$$H_{Human} = 1.88 \text{ [bit]}, H_{Robot} = 1.72 \text{ [bit]}, H_{Cross} = 2.67 \text{ [bit]},$$

$$I := H_{Human} + H_{Robot} - H_{Cross} = 0.94 \text{ [bit]}, \eta := I/H_{Robot} = 0.54$$

応の規則性と、そこから人が感じる印象との関係を実験で調査することとした。

反応の規則性を定量的に評価するために情報理論の手法を用いる。図6に示すような、人とロボットとの働きかけと反応の対である dyad のインタラクションで考える。両者の間の dyad を観察し、その頻度分布が表3のようであったとする。

ここで、ロボットの反応の規則性は Shannon の流儀に従って計算する。まず、人間の働きかけ行動選択のばらつき具合 ( $H_{Human}$ )、ロボットの反応行動のばらつき具合 ( $H_{Robot}$ )、ダイアドの対のばらつき具合 ( $H_{Cross}$ ) などの“行動エントロピー”を計算する。例えば人間の行動の頻度分布は {8, 3, 4, 8} で頻度総数 23 となっているから、このばらつき具合  $H_{Human}$  は以下のように計算される。

$$H_{Human} = -\frac{8}{23} \log_2 \frac{8}{23} - \frac{3}{23} \log_2 \frac{3}{23} - \frac{4}{23} \log_2 \frac{4}{23} - \frac{8}{23} \log_2 \frac{8}{23}$$

$$= 1.88 \text{ bit} \tag{2}$$

続いて情報伝達量 ( $I$ ) や、情報伝達効率 ( $\eta$ ) を計算する。この例での計算結果は表3の下部に示す。

さて、ロボットの対人反応の情報伝達効率と、それに感じる印象の相関関係の調査実験は次のように行った。図6のぬいぐるみをロボット化するべく、内部に接触セ

ンサや加速度センサを装備し、四肢を動かすアクチュエータも仕込んだ。そして、人がロボットをなでたり揺らしたりする働きかけに対して、手足の運動で反応するアルゴリズムとした。

アルゴリズムは、情報伝達効率  $\eta$  が 1 のもの、0.5 のもの、0 のものの、3 種類をつかった。情報伝達効率の数値自体には比例尺度としての意味がないので、情報伝達効率が大中小のもので比較したと考えていただきたい。 $\eta = 1$  の場合はある働きかけに対する反応は一意に決まる。逆に  $\eta = 0$  の場合は、働きかけの種別は無視して、反応行動はランダムに選択される。

この3種類のアルゴリズムを20人の被験者に体験し

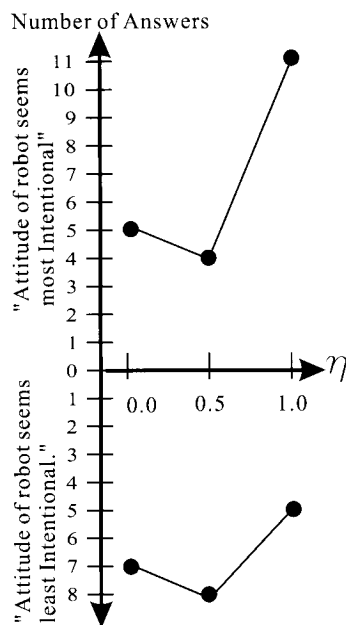


図7 ロボットの応対の情報伝達効率とロボットの行動に意図を感じる強さ

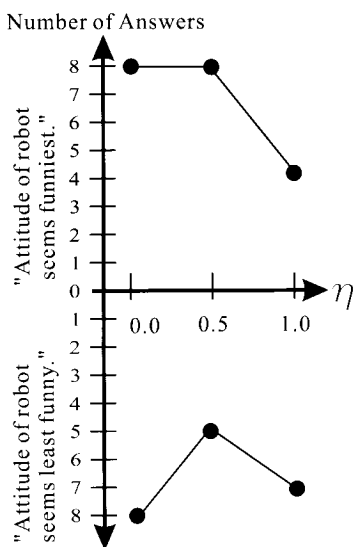


図8 ロボットの応対の情報伝達効率とロボットのおもしろさ

てもらい、印象の優劣を3パターンの中で相対順位付け評価してもらった。

図7は、ロボットの行動に意図を感じる度合いについての結果である。 $\eta = 1$ の場合が、一番意図を感じさせる効果があった。このように反応の規則正しさは意思疎通が行われた印象を与えることがわかる。

図8は、ロボットにおもしろさを感じる度合いについての結果である。 $\eta = 0.5$ の場合が、一番おもしろさを感じさせる効果があった。おもしろさ演出のためには、反応に適度な規則性とランダム性のバランスが必要であることがわかる。

図9は、ロボットにかわいらしさを感じる度合いについての結果である。 $\eta = 1$ の場合がかわいいという人と、逆に $\eta = 0$ のほうがかわいいと答える人に二分されている。これは、情報伝達効率が高いわば従順なロボットがかawaiiと感じる意見と、情報伝達効率が低いだっ子タイプがかawaiiと感じる意見との分裂と解釈できる。つまり、ユーザにも好みがあり、ロボットのユーザとの相性が良い行動特性を持つことが求められていることを示している。

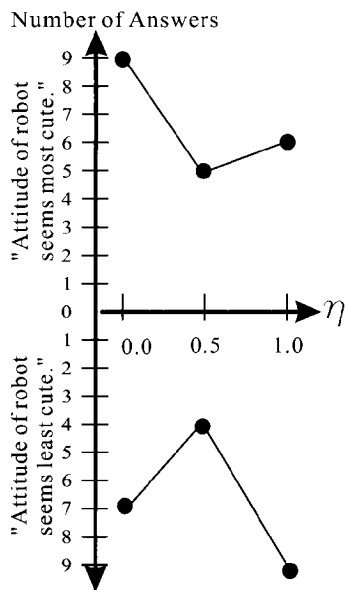


図9 ロボットの応対の情報伝達効率とロボットのかわいらしさ

このように、インタラクションの情報理論的特徴は、面白さ印象などロボットの全体的な印象の生成に関わっている。さらに、個人とロボットとの相性が、印象判定を左右することがわかった。

### 5. ま と め

本稿では、人に実世界で接するロボットが人に対して演出する印象の制御について、その理論と方法論を、実験報告を交えて述べた。

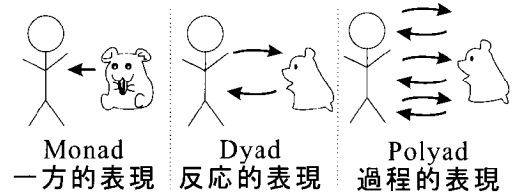


図10 インタラクションの回数による分類

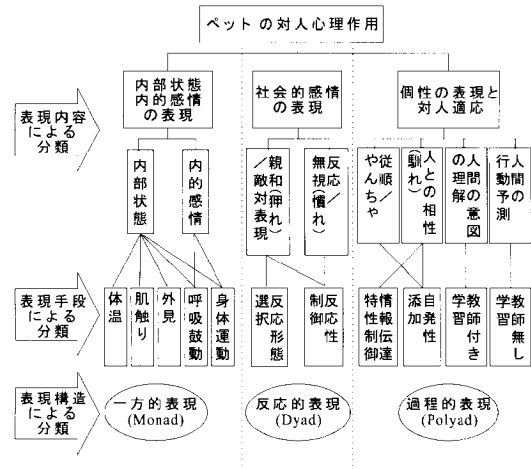


図11 ペットの対人心理効果の構造 (表現内容・方法・構造)

これらの知見は、人間への表現内容と表現手段と表現の構造には図10のような関係があったとまとめられる。

人とペットロボットのインタラクションを、図11のようにそのやり取りの構造(“回数”)で分類してみると、この回数が表現内容と呼応していることがわかり興味深い。つまり、インタラクションのない一方通行の表現(monad)ではペットロボットの内的状態が表現され、反応のある交流(dyad)ではロボットのユーザに対する感情が表現された。交流が長くなると(polyad)、おもしろさなどのロボットの個性・特性に関する印象が発生し、ユーザとロボットの行動特性との相性が、感じる印象に関与するといえよう。

本稿で紹介した試みのように、ペットロボットの対人行動のアルゴリズムは理論に基づいて設計できる余地がある。そしてアルゴリズムの設計を理論ベースに行うことによって、人間により多種多様な心理的效果を与える可能性が広がると考える。

### ◇ 参 考 文 献 ◇

[亀山 00] 亀山: 人がペットの「心」を推論する過程—異種に対する「心の理論」の適応, 第6回ヒトと動物の関係学会学術大会予稿集, p. 30 (2000)  
 [Darwin 72] Darwin: *On the Expression of the Emotions in Man and Animals*, John Murray (1872)  
 [中田 97] 中田, 佐藤, 森, 溝口: ロボットの対人行動による親和感の演出, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 7, pp. 1068-1074 (1997)

- [中田 01a] 中田, 森, 佐藤: 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 (2001)
- [中田 01b] 中田, 森, 佐藤: 人とロボットのインタラクションにおける生成印象と情報伝達の相関分析, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 5 (2001)
- [Fox 74] Fox: *Concepts in Ethology*, University of Minnesota Press (1974)

2001年3月22日 受理

著者紹介



佐藤 知正

1948年生まれ。1972年東京大学工学部卒業。1976年同大学院工学系研究科博士課程修了。工業技術院電子技術総合研究所、東京大学先端科学技術研究センターを経て、現在東京大学大学院情報理工学系研究科教授。人間支援ロボットおよび微細作業ロボットの研究に従事。工学博士。日本ロボット学会、日本機械学会などの各会員。



中田 亨

1972年生まれ。1995年東京大学工学部卒業。2001年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。2001年4月より独立行政法人産業技術総合研究所に入所。ペット動物が持つ知能のロボットへの応用の研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会、日本動物行動学会、ヒトと動物の関係学会、日本認知科学会などの各会員。