

学位論文
ペット動物の対人心理作用能力の
ロボットにおける構築

東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻

中田 亨

2000年12月15日提出

目次

第 I 部	課題設定と研究計画の構成	3
第 1 章	緒論	5
1.1	研究の背景	5
1.1.1	対人心理作用を持つ機械の現状	5
1.1.2	対人心理作用を行う機械の課題	8
1.2	研究目的	10
1.3	解決への基本戦略	10
1.4	本論文の構成	11
第 2 章	ペットの対人心理作用能力	13
2.1	対人行動の社会性によるペットの分類	13
2.2	コンパニオン・アニマルの人間の心理状態・精神活動に対する効果	14
2.3	工学研究としてのペット能力の研究範囲の設定	15
第 3 章	人工物の対人行動による対人心理作用の枠組み	17
3.1	分析対象“対人行動物”の定義	17
3.2	“対人行動物”の分析項目	17
3.2.1	コミュニケーションのチャンネル・モダリティによる分類	18
3.2.2	インタラクションの回数による分類	19
3.2.3	インタラクションの回数の心理効果上の意味	20
3.2.4	対人行動物のインタラクションの回数の工学的意味	22
3.2.5	対人行動の多様性による分類	22

3.2.6	インタラクションの陳腐化対策手法による分類	23
3.2.7	インタラクションの社会行動性による分類	24
3.2.8	インタラクションの経時変化性による分類	24
3.2.9	対人行動物分類のまとめ	25
3.2.10	参考: おもちゃ売場での分類	26
3.3	研究計画の構造化	27
第4章	対人行動物の実例とその分析	31
4.1	0次対人作用型	31
4.2	モナッド型	32
4.3	ダイアド型	33
4.4	ポリアド型	42
4.5	高次ポリアドと見せる/見立てる, あやつり人形	45
4.6	対人行動物の実例研究のまとめ	46
第II部	ロボットから人へのモナッド表現	47
第5章	モナッド表現 (一方的表現) の理論	49
5.1	表現とは何か?	49
5.2	表現行動の発生の理由と, 表現行動の進化	50
5.2.1	表現発生の理由	50
5.2.2	「心の理論」を共有知識とする方法	52
5.2.3	表現プロトコルの偶然発生と進化による方法	53
5.3	対人行動物研究での表現の課題	53
5.4	非儀式的表現の構造	54
5.5	対人行動物への応用	56
5.5.1	対人行動物でのモナッド表現の基本原則	56
5.5.2	対人行動物でのモナッド表現の選定	56

第 6 章	呼吸鼓動による表現	59
6.1	研究の背景と目的	59
6.2	呼吸・鼓動の知覚とその効果	60
6.2.1	呼吸の構造	60
6.2.2	鼓動の構造	60
6.2.3	呼吸・鼓動の速さの決定要因	61
6.2.4	呼吸・鼓動表現の手段と効果	61
6.2.5	人間のリズム認知特性	62
6.3	擬似呼吸運動と擬似鼓動運動による動物らしさ感と切迫感の演出実験	63
6.3.1	実験目標	63
6.3.2	実験方法	63
6.3.3	実験結果	71
6.3.4	考察	79
6.4	結論	80
第 7 章	ロボットの身体運動による表現	83
7.1	研究の背景と目的	83
7.2	動作体の身体表現とラバン特徴量	84
7.2.1	研究対象の身体表現	84
7.2.2	身体運動の解釈法	85
7.2.3	ラバン特徴量とその工学的解釈	86
7.2.4	あるロボットでのラバン特徴量定義例	88
7.2.5	定義の主観性とその対処	92
7.3	行動譜による舞踊作成と編集	93
7.3.1	ロボットの身体動作記述法の必要性	93
7.3.2	行動譜の構造	93
7.4	ロボット舞踊の印象測定実験	95
7.4.1	実験目標	95

7.4.2	方法	95
7.4.3	結果	102
7.4.4	考察	105
7.5	結論	107

第III部 単ダイアドによる表現 109

第8章	人間からの接触に対するロボットの反応行動による表現	111
8.1	研究の背景と目的	111
8.2	親和感とその演出方法	112
8.2.1	親和感	112
8.2.2	オオカミの受容的行動による親和感の演出	112
8.2.3	ロボットの対人受容的行動による親和感演出の仮説	113
8.3	ロボットの人間への接触反応行動による親和感の演出実験	113
8.3.1	実験目標	113
8.3.2	実験方法	113
8.3.3	実験結果	119
8.3.4	考察	127
8.4	結論	133

第IV部 ダイアドの繰り返しにおけるロボットから人への表現 135

第9章	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	137
9.1	研究の背景と目的	137
9.2	社会的行動インタラクションと情報伝達	139
9.2.1	人間・動物の外界随伴性の確認行動	139
9.2.2	対人インタラクションアルゴリズムへの応用方針とその課題	140
9.2.3	インタラクションの情報理論的特性の定量化手法	140

9.2.4	定量化手法の注意点	143
9.3	人とロボットとのインタラクションにおける情報伝達効率と生成される印象の相関実験	146
9.3.1	実験目標	146
9.3.2	実験方法	147
9.3.3	実験結果	157
9.3.4	考察	161
9.4	結論	165
第 V 部	結論編	167
第 10 章	結論	169
10.1	総括	169
10.1.1	課題と解法設定	169
10.1.2	試みたロボットの対人表現の総括	169
10.1.3	インタラクションの複雑度の違いに関する比較考察	172
10.1.4	研究課題と成果との呼応	172
10.2	将来課題	173
参考文献		177
付録 A	Mann-Whitney の U 検定	205
A.1	原理	205
A.1.1	Mann-Whitney の U 検定の対象となるデータ	205
A.1.2	統計検定の一般的解説と注意	206
A.1.3	計算の考え方と手順	207
A.2	Mann-Whitney の U 検定プログラムソースコード	211
著者紹介		218

第I部

課題設定と研究計画の構成

第1章 緒論

1.1 研究の背景

1.1.1 対人心理作用を持つ機械の現状

我々の日常生活の中で、心理に作用しながら人間に対応する機械に接することが多くなってきている。

例えば、自動販売機には、表示画面に店員の姿をしたアニメーションが表示され、「いらっしゃいませ」などと発言し接客の真似事をするものがある。自動販売機に顔があつて「いらっしゃいませ」と声をかけてくれることは、物品の販売に対して実務的・作業的な効能は特に無い。しかし、客が機械と接する際に、心理的緊張を緩和する効能は期待できそうである。つまり、機械のヒューマンインターフェース機能の感性的・心理的な部分を補助する役割を担っていると言える。

心理作用を伴って人間と対応することを、機械の主目的としている場合もある。現状のペットロボット、サイバーペット、ヒューマノイドなどが該当する。これらは1990年代以降に急激に様々事例が現れ、その一部はブームを呼んだ。確かに、人間や動物に似せたロボットは、見たり遊んだりしてみたいという好奇心をかき立てる。

このように現在では、対人心理作用を伴う人と機械のインタラクションは、補助的あるいは娯楽的な目的の下になされていることが多い。

将来はさらに、機械がインタラクションの心理的な側面も考慮して人間に対応することの重要性は増すものと考えられる。その理由を2つ挙げる。

機械の自発行動の増加 将来登場する機械の中には、その動作アルゴリズムが非常に自律化し、特に人間から命令を受けなくとも、状況に応じて自発的に動作するものが増えるだろう。

従来の機械は人間の命令を待って動作するものであり、人間と機械の関係は人間と道具の関係であった。それゆえ、人と機械のインタラクションは社会

心理的な性質をあまり帯びていなかったと考えられる。

だが、自発的に臨機応変に動作する機械、つまり勝手にいろいろなことをする機械となると、人間にとって機械は、もはや非生物の道具という位置づけではなく、一個の“行為者”と見なせるようになるだろう。

人間は“行為者”と対応する時、心理的な情報に気を配る。例えば、相手の性格・気分はどのようなものか、相手はこちらの要求を理解しているのか、相手は自分に対して好意的なのかなどである。人間がこのような心理情報に関心を配ることは本能的に行われるものであり、相手が機械であると解っていても気になるし、心理情報に応じて機械への態度を変更することがありえる [2]。

従って、自律的に行動して人間に応接する機械をユーザに受け入れてもらうためには、機械がインタラクションに於いて人間に与える心理的作用を適切なものにする理論と手段の開発が重要となる。

コミュニケーションのマルチモーダル化 人間から機械への情報伝達も、従来のような、リモコンボタン操作や、言語情報の入出力だけではなく、身振り手振りのように人間同士のコミュニケーション形態も用いて行われるようになるだろう。

これらの非言語的なコミュニケーション要素は、言語的情報よりも感性的・心理的情報を表現することに優れている。また、機械側が心理的な内容を表現するつもりは無くても、前項で述べたように、ユーザの人間は心理的情報を汲み取ろうと気を配る本能があるから、非言語的表現が奇妙な機械は“不気味なもの”と感じられてしまう恐れがある。

つまり、機械の非言語的対人表現は心理的表現には強力であるが、不用意に行っては逆効果となりかねない。非言語的対人表現を適切なものとする理論と手段が求められている。

ここで具体的な例を挙げたい。

本論文に含まれる研究の一部は、*Robotic Room* プロジェクトの一環として行われた。*Robotic Room* (写真: Fig. 1.1) とは、部屋全体をロボット化した病室であり、部屋の中にいる患者の状態を観察し、あるいは患者のジェスチャによる命令を受けるとロボットアームで物を取ってくるなどの作業をこなすものである。Fig. 1.1 に見て取れるように、この *Robotic Room* には小動物に似せた体を持つロボットが備わっている。このロボットの役割は、*Robotic Room* の代表として、人間に応接することである。例えば、以下のような仕事を行う。

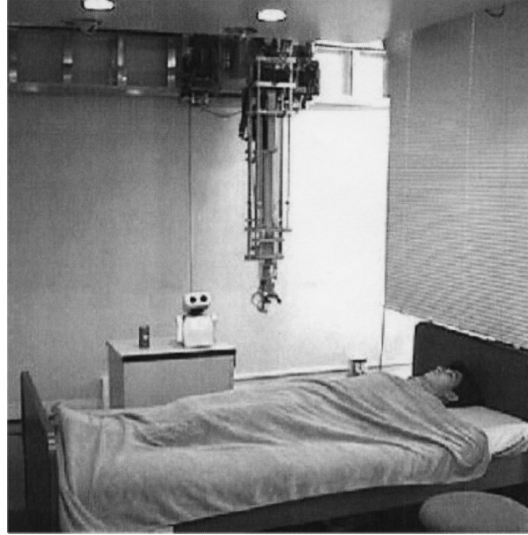


FIGURE 1.1: *Robotic Room*[3]

システムの内部状態の表現 *Robotic Room* に特にする仕事がない場合，全ての機械が微動だにしないと，ユーザに *Robotic Room* の電源が切れていると誤解されかねない．そこで，このロボットが呼吸の真似として首などを小さく動かし続け，*Robotic Room* 電源が入っていて正常に作動していることを示す．

作業上の合図の表現 *Robotic Room* がユーザの指さしジェスチャを認識した時は，首をユーザに向け手を挙げる合図をし，“わかったよ” という意味と伝える．認識に失敗した時は，首を傾げて “わからない” ことと伝える．

感情表現 *Robotic Room* の作業が成功した時は，ロボットは踊って喜ぶ．失敗した時は，悲しげに振る舞う．

以上の人へ表現する機能は，ロボットの身体動作を用いて行われている．

これらの表現を言語情報で行うと，“システムは正常です” と始終言ったり表示したりするのは煩わしいし，“合図を確認しました” と応えるよりは，ロボットが合図を返してくれた方が簡素で，かわいいロボットが手を振ってくれるというある種の楽しさも味わえる．ユーザは，このロボットに話しかければよいのだと，勝手に納得する．ユーザはこのロボットに向かって命令を出すようになる．応対用ロボットというコミュニケーションの対象に対してであれば，ただ漠然と壁に向かって合図を出すよりも，自然であるからである．MIT の AI Laboratory も部屋型の知能システム *Intelligent Room* を作っている [4]．こちらは SF ドラマ “ス

タートレック”の影響で，ユーザが部屋に音声で命令するときは，誰でも自然と天井を見て話すそうである．どこも見ずにただ漫然と音声命令することが如何に心理的に苦痛か，よく分かる事例である．

このように，人間同士の非言語コミュニケーションの方式を備えるべき機械システムは，これから増加していくだろう．

1.1.2 対人心理作用を行う機械の課題

上述のような，対人心理作用を行う機械の本格的な実現に対して，どのような課題が残されているだろうか．

上記で Robotic Room を例として挙げたが，対人心理作用を行う機械の典型的モデルの一つに“人間共存型ロボット”がある．これは，家庭内や公共的な場の日常生活環境において人間を支援するロボットを指す．日本ロボット学会の人間共存型ロボット研究専門委員会は，“人間共存型ロボットシステムにおける技術課題”[46]を次のようにまとめている．

物理的親和性の確保 機械の人間への傷害防止などの安全性の確保．

情動的親和性の確保 機械が外界の状態を認識する能力，および人間と円滑に通信し情報を共有する能力の実現．

情緒的親和性の確保 人間を心理的に苦しめたり疲れさせず，親しみ楽しませる能力の実現．このためには，ロボットの感情を表現する能力と，人間の感情を認識する能力が必要．

環境・経済的親和性の確保 機械の使用環境条件や価格的条件の緩和．

本論文は，情緒的親和性の確保を研究対象として選ぶ．

情緒的親和性の確保は重要性を指摘されてはいたが，感性的で曖昧な研究対象であり法則を立てにくく，工学的な研究は難航していた．情緒的親和性の確保のサブゴールである，機械から人間への感情表現についても同様で，機械の動作の何が表現の要素となるのか，またそれが人間にどのような心理的效果を与えるのか，明示的な法則を体系的に組織するには至っていない．

一方で，人間は心理的作用を伴うコミュニケーションには経験的に慣れていて，これらの表現の形態を自らの感性で作ることができる．例えば，ロボットが喜ん

でいる様に見える踊りを振り付けることが出来る。(だが、その踊りが喜びに見える理由は判然としない、という問題は付いて回る。)

このように、機械の対人心理表現の設計では、わざわざ表現の法則に立ち返りそれを探究して表現を設計するよりも、人間が設計した表現のデッド・コピーやせいぜいその小幅な修正を行わせる方が容易であった。

その結果、以下に述べる問題点を抱えるようになった(この問題は多くの対人心理作用を行う機械に共通している。具体的事例については第4章にて紹介し分析する。)

表現の理論的裏付けの欠如 機械の対人表現が、表現の理論によってではなく、設計者の感性や勘に基づいて作れてきた。

従って機械は、人間があらかじめ設計した表現しか行えないため、表現のレパートリーが有限であり、しばしばマンネリに見える。

また、ハードウェアに特化した表現設計であるため、他のハードウェアに対して適用することが困難である。

表現手法の個々のアプリケーションへの依存性 従来の表現設計は特定のアプリケーションに必要な表現を作成することを目的としており、アプリケーションごとの個別的対応であった。

確かにアプリケーションごとに表現を設計することでその場の問題は済むが、反面、他のアプリケーションでも通用する普遍性の強い表現手段を開発する取り組みがなかなか増えないことにもなった。

さらには、アプリケーションといういわば実用上の問題から離れて、そもそも機械にはどのような表現が出来るか、という問いに立った研究は少ない。新規の表現手段を創造し、それをういて新しいアプリケーションを考案するという試みは希である。

この結果、対人非言語コミュニケーションを行う機械の研究の視野が狭いままとなっている。例えばいわゆるペットロボットは、どれも“芸をする”、“名前を呼ぶと反応する”程度の存在で止まっている。そもそもペットと接することの最大の喜びは愛情を感じることであるが、愛情表現の手段の追究が進んでいないため実現するに至っていない。

1.2 研究目的

以上の問題点に応じて、次の研究課題を立てる。

普遍性のある表現の法則の追究 表現の設計を理論にのっとり行うようにする。基本的表現（例えば喜怒哀楽の表現など）は、普遍的な表現法則があるはずであり、これを探究する。最終的には、機械が自律的に自分の表現を設計し行えるように、表現のアルゴリズム化を目指す。

表現法則間の構造の明確化 個々の表現の法則が判っても、それが人と機械のコミュニケーションの全体から見て、どこに位置し何をカバーするものなのか不明であっては、機械には何が表現できるか、どのような心理効果を人間に与えるかという問いに応えることは出来ない。従って、個々の表現について、表現形態での分類や表現内容での分類を行い、表現の体系化を試みる必要がある。

本研究は、この2点を研究目的とする。

1.3 解決への基本戦略

本論文では、上記の研究目的に対して、人間とペット動物¹との非言語コミュニケーションの理論を規範として用いて解決しようとする。イヌやネコなどのペット動物は飼い主の人間と円滑にコミュニケーションを行うことができる。この能力を模倣して機械に持たせたいと考えた。

ペットは決して知能が高いわけではない。例えばハムスターなど単純なペットなら、反射と学習で大体の行動の説明が付いてしまう。しかし、ハムスターのように、飼い主と深く緊密な社会関係を構築し長期間にわたって維持できる人工のシステムは今のところ実現できていない。対人行動物の工学者にとって、ペットにはまだまだ学ぶ余地がある。

と同時に、動物のコミュニケーション行動は、動物行動学の研究対象として観察され、数理的統計的に分析されている。つまり、表現形態と表現内容との関係を結びつける“表現の法則”が、具体的な物理量・数量を伴って語られている。これは機械への応用際に非常に有利である。

¹ペットは“撫でさする物”という蔑称めいたニュアンスがあるので、最近は“家庭動物”や“コンパニオン・アニマル”と呼ぶことが多い。だが、現在のところ日本では一般的な言葉ではないので、ここではペットと呼ぶこととする。

以上の議論から，本論文では，ペット動物の対人心理作用能力について，動物行動学に知見を求め，その法則を規範とし援用して，機械の人間への心理作用能力を実現することで，研究課題に応えることとする．

1.4 本論文の構成

第2章では，規範とするペット動物の対人心理作用効果を論じる．

第3章では，機械による対人心理作用について，その構造とメカニズムを論じ，研究全体の計画を立てる．

第4章では，従来の対人心理作用を主目的とする機械・システムについて整理し，その心理作用のメカニズムと長所短所について分析する．

第5～9章では，第3章での研究計画に従って，表現方法を仮説立て，実験で実証する．第5～7章では，ロボットから人間への一方的表現による，ロボットの内部状態の表現を論じる．

第8章では，ロボットの人間に対する反応的表現による，ロボットの社会的内容の表現を論じる．

第9章では，人間とロボットとの長いインタラクションでの，ロボットの個性・特性の表現を論じる．

第10章にて，研究成果を総括・検討し，論を結ぶ．

第2章 ペットの対人心理作用能力

本章の主旨

ペットの何を学ぶかを明らかにすることが、本章の主題である。

ペットが人間に与える様々な効果を取り上げ、その中から機械を擬人化し行わせることが工学的に可能で、かつ意義があるものを取り出し、本論文の目標とするペットの対人心理作用の対象範囲を定める。

2.1 対人行動の社会性によるペットの分類

ペットにはさまざまな動物が含まれるが、本論文では以下の様に分類する。

飼い主との社会的交流が希薄なペット：人間に対する社会的な交流はないが、振る舞いを眺めることで飼い主に楽しさを感じさせるペット動物。金魚などが該当する。

飼い主との社会的交流の強いペット：飼い主が撫でたり体を接したりし愛着の対象となり、また飼い主と行動を共にするなど人間と協調的な関係を構築しえる動物。

本論文では、このタイプのペット動物を他のペット動物と区別するためにはコンパニオン・アニマル (companion animal) の語を用いることとする¹。

典型的には、イヌ、ネコ、ウマ、ウサギ、ハムスター、鳥などのペットである。これらは哺乳類・鳥類であり、子育てを行う動物と捉えることができる。子育ては親子間の愛着関係と協調関係の成立を必要とする。この愛着協調関係を、飼い主とペットの間にも成立させることにより、これらの動物がコンパニオン・アニマルになりえると、考察できる [9]。

¹社会関係上の能力から“ペット全般”と“コンパニオン・アニマル”を分離した。政治的配慮からペット全般を“コンパニオン・アニマル”と呼称することとは意図が異なる。

また、飼い主とコンパニオン・アニマルとの愛着関係・協調関係は、つきあいが長くなるにつれ発展すること（なつくこと）が多い。

つまり、ペットの人間への関わり方は、

1. 振る舞いを一方的に見せる。
2. 人間とインタラクションをして、愛着を表現したりや行動の協調を行う。
3. 愛着関係・協調関係を、時間経過と共に強化・発展させる。なつく。

の3つのレベルがあると考えられる。

2.2 コンパニオン・アニマルの人間の心理状態・精神活動に対する効果

コンパニオン・アニマルと関わる人間の側には、どのような変化が生じるのであろうか。要約すると、“コンパニオン・アニマルは人間のコミュニケーションへの関心を刺激し、動機付けする”と言えるだろう。

コンパニオン・アニマルに対する人間は、基本的にコンパニオン・アニマルを擬人化し、実際以上に知的なものとして扱う傾向がある [84]。つまり、インタラクションにおけるコンパニオン・アニマルの役割に対して課題に期待し、コンパニオン・アニマルの挙動を高度な意味があるものと見なす傾向がある。このように、人間はコンパニオン・アニマルに対して関心を払っている。

また、コンパニオン・アニマルが存在することで、人間のコミュニケーションを積極化させる効果があることも報告されている。

Holcombら [6] らの治療報告によると、高齢男性を2週間、小鳥の様子を眺められたり、触れられたり出来る環境に置くと、鳥によく触った人ほど鬱症状の軽減が見られ、他者に対するコミュニケーションも活発化した。

Adams [7] は、脳梗塞によって失行症（言いたいことがあっても、言葉にすることができない症状）となった女性の元に、2頭のイヌを連れてきてインタラクションをさせる実験を行った。治療者がイヌを指して「あれは何ですか」などとイヌを題材にした質問を行うと、（1語だけの返答ではあるが）返答の数が増え、言語活動の改善が見られた。

Limondら [8] は、ダウン症候群の子供（総数9名）に、本物のイヌ、またはイヌのぬいぐるみと7分間のインタラクションを行わせた。本物のイヌとのインタ

ラクションの方が，子供の注意を引きやすく，また子供の言語活動を積極化させる効果があった．このように，コンパニオン・アニマルを人間の周辺に存在させて，人間の外向性を向上させたり，精神状態の改善を計る治療は，動物介在療法 (Animal Assisted Therapy, AAT)[5] として発達しつつある．

2.3 工学研究としてのペット能力の研究範囲の設定

機械への応用の立場から，規範とするペットの対人能力の項目を定める．

前項のようなコンパニオン・アニマルの対人効果には，人間の精神状態の改善など高度で因果関係が未だ明らかになっていないものもある．従って，これほどまでに高度な内容を工学の研究テーマに結びつけることは困難である．

しかし，これら高度の効果の実現を下支えしている，比較的低次の効果は，工学の観点から捉え直すことが可能であろう．本論文では，コンパニオン・アニマルの対人心理作用能力の中で，工学的に実現可能な研究対象となるものとして，次のものを取り上げる．

機械の内部状態の表現機能 機械・システムの (擬似的な) 生理的状态 (興奮活性
度，緊張など) や感情状態 (喜怒哀楽) やを，人間に表現する機能．

機械のユーザへの社会的感情の表現機能 機械がユーザに対して抱いている感情
(宥和心，敵対心等) を，人間に表現する機能．

機械の個性・気分の表現機能 面白さや可愛らしさなどの機械の個性 (機械の個体
差) や気分 (同一機械での場面による差) を，人間に感じさせる機能．

よって以降，本論文では以上の3つの表現機能について，表現の理論的な手段を考案し，それら表現原理のロボットで構築し評価することを試みる．

第3章 人工物の対人行動による対人心理作用の枠組み

本章の主旨

機械やロボット，あるいはビデオゲーム内のキャラクターが，人間に対して行動を起こし，楽しさや可愛らしさなどの心理的な内容を演出するという現象のメカニズムを分析する枠組みを提示する．次いで，その枠組みに従って，本論文の研究項目を設定し，研究計画を立てる．

3.1 分析対象“対人行動物”の定義

人間に対して行動を起こす人工物を“対人行動物”と呼ぶことにする．(関連する研究では，しばしば対人行動物のことを“エージェント (Agent)”という語で表現している．Agent の語義は，一般的な意味としては行為者や動作主や代理人であり，もう一方で情報工学では情報処理を行う独立性を有したプロセスの単位である．対人行動物は確かに，それに接する人間から見れば行為者と見なせる．だが，ソフトウェアとしてエージェントであるとは限らない．よって混乱を避けるために“エージェント”という語は用いない．)

3.2 “対人行動物”の分析項目

多種多様ある対人行動物の表現方法と対人効果を分析するにあたり，その方法論を述べる．

3.2.1 コミュニケーションのチャンネル・モダリティによる分類

対人インタラクションで用いられる，コミュニケーションのチャンネル（五感での分類）やモダリティ（表現要素の形態での分類）による分類法がある．

非言語のコミュニケーションは，そのモダリティによって目的・形態・効果が異なることから，モダリティごとに分類し研究するスタイルが従来から一般的であった．

これは，ハードウェアでの分類，ハードウェアを作る研究者の立場からの分類でもある．例えば，顔表情を人工的に生成するロボットは数多くあるが，それらは顔ロボットとしてまとめられていた．

しかし，この分類によって，対人行動物の心理作用を分析するには，次の2つの問題点がある．

表現メディアの違いの等閑視 Reeves と Nass[2]らは，表現のモダリティの違いは，人間が受ける心理的効果の違いにさほど影響しないことを強調している．例えば，顔ロボットは喜怒哀楽を表現するものであるが，顔以外にも喜怒哀楽を表現する手段は，声や言語などいくらでもある．高品質の画像での悲しい顔表情でも，漫画のような単純な線画での泣き顔でも，あるいは文章による悲しみの心情表現でも，解釈の上では，全て“悲しさの表現”と同一視される．つまり，人間は刺激の違いを認識するが，刺激の解釈の段階では同一視した訳である．

対人行動物の表現の同時多チャンネル性 既存の対人行動物の多くは，複数の表現モダリティを併用して対人作用を行っている．併用することで，対人表現を強めたり，解釈を安定化させる効果が期待できるからである．

例えば，動くおもちゃでは，ロボットの身体動作と鳴き声を，協調的に併用することが多い．

このように表現のモダリティが複合してくると，モダリティによる分類は不便であったり，あるいは不適切な分類法になるだろう．

このように，コミュニケーションのチャンネルやモダリティでの分類は，対人行動物を考える上では，あまり有効ではない．

表現の実態についての分類で，なおかつそれが対人心理効果上での違いと呼応するものが相応しい．そこで本研究は，下記のような分類を取り上げる．

3.2.2 インタラクションの次数による分類

インタラクション (interaction) とは、複数の行動者の間にて取り交わされる働きかけのやり取りである。インタラクションは通常、相手の行動に応じて、それに対する反応行動を決定し実行することで成立する。逆に、相手の行動を斟酌せず勝手に振る舞っている場合は、インタラクションが成立しているとは言い難い。

相手への行動決定は、相手の最新の行動だけではなく、働きかけの履歴データも決定の参考とされることがある。また、自分の行動の履歴データも同様に決定関数の引数となる。本論文では、何回前までの履歴データを行動決定関数の引数として用いるかを、“インタラクションの次数 (degree of interaction)” と定義する。

では具体的に、インタラクションを次数の観点から分類してみよう。

ダイアド

一番簡単なインタラクションは、反射である。つまり相手から刺激 (S) が提示され、それに対して反応 (R) を行うインタラクションである。相手がそれ以前に行った行動や、自分が行った行動の履歴は、行動決定に参加しない。行動生成アルゴリズムは、S と R の二つの組の対応関係のみに言及している。このような行動決定アルゴリズムのインタラクションの次数は、2 次である。また、S と R の行動の組をまとめてダイアド (dyad) と呼ぶ。

ポリアド

ダイアドよりもさらに昔の履歴を、反応行動の決定に動員するものは、3 次履歴のものをトライアド (triad)、4 次履歴のものをクアドアド (quadad) と、順次名付けられている。

トライアドとは、自分が相手に行った行動 P とし、P に対する相手の反応行動 S とし、さらに P と S に基づいて選択する自分の反応行動 R とするとき、この (P, S, R) の組のことを言う。

本論文ではトライアド以上をポリアド (polyad) と呼ぶことにする。

モナッド

ダイアドより簡単な1次履歴のインタラクションは、モナッド (monad) と呼ばれる。相手の行動を受信者は傍観するだけで終わりというコミュニケーションの形態である。

モナッドは、表現が一方通行なので、モナッド単独ではインタラクションとは言えない。だが、受信者に作用が伝わっていることを鑑みれば、モナッドをコミュニケーションの一種と見なせる。また、モナッドしか行えない対人行動物の事例は多い。よって本論文では、モナッドをダイアドらと共に並列するほうが便宜上よい。

0次コミュニケーション

モナッドよりも簡単な0次のは名付けられていない。静物の対象物を、観客が傍観する場合はこれに相当する。¹

3.2.3 インタラクションの次数の心理効果上の意味

対人行動物のアルゴリズムが持つインタラクションの次数が、それに接する人間にどのような心理効果を持つか、述べる。

対人行動物の挙動の複雑さとの関係

第1に、インタラクションの次数は、対人行動物の挙動の複雑さと正に相関する。

つまり、低次のインタラクションの視野で対人行動物の決定アルゴリズムを組まれた対人行動物のインタラクションは、代わり映えのない、マンネリのインタラクションであることを意味する。“If A, then B” 式の“機械的な”インタラクションであるので、これに接する人間は“この機械はこうすれば、こう反応するのだな”と見破り易い。

対人行動物のカラクリが不思議で見破ろうとして、興味本位で接してい

¹ここで言う0次コミュニケーションを、“表現が変化しないモナッド”として、モナッドに分類することも出来る。だが、表現者が行動を起こした回数はゼロである。工学的には行動の回数を尊重する方が便宜上よいので、本論文では0次コミュニケーションと呼ぶこととする。

た人間は，見破ってしまうと，謎が解けたことに満足し，対人行動物に興味を失う傾向がある [108]．逆に，ユーザが機械のカラクリには別段の興味がなく，作業のため機械を使用している場合は，“飽きる/飽きない”という意識はしない．

一般の機械は，人間にとって挙動が把握しやすく，人間の命令を忠実に実行すればよいのであるから，なるべく低次のインタラクションのみで対人行動物アルゴリズムを形成する方が良い．

逆に，高次のインタラクション，つまり長い履歴に応じて挙動を変化させる対人行動物では，そのアルゴリズムをユーザが見破ることは難しい．

人間による解釈内容との関係

第2に，インタラクションの次数は，対人行動物のふるまいの，人間にとっての解釈を変える．

モナド以下では，対人行動物が人間を気にせず勝手に振る舞い，人間は傍観している状況である．このため，対人行動物のふるまいは，傍観者である人間に対してのメッセージを持たないもの，と解釈される．

ダイアドでは，対人行動物は人間の働きかけに対して反応しているので，その反応は人間に対しての意味を持つものと，人間には解釈される可能性がある．例えば，人間が対人行動物に挨拶をしたことに対して，対人行動物が返事をすれば，これは友好的社会関係が存在していることを印象づける．

但し，一般の機械でも，ボタンを押すと特定の作業を行うというダイアドを行える．このような場合には，社会行動的な意味は解釈されない．しかし，機械が故障していて，ボタンを押しても反応しないような事態になると，人間は機械が反抗的であると感じて怒ることもある．このように，普段は社会関係的な意味が明示的ではなくとも，場合によって顕在化することがある．

トライアド以上では，対人行動物の行動は，人間の行動をインタラクションの文脈に照らして対人行動物が下した評価である，と解釈される可能性がある．これを以下に詳しく説明しよう．

トライアドは，ダイアド (P, S) と，それに引き続く行動 R の組と見なせる．そのため，R はダイアド (P, S) に対する評価 (機械学習論用語では“教師信号”) と見立てることができる．

例えば，サーカスのライオンを調教師が調教する場面を取り上げよう．調教師のライオンに対する命令を P，P に対するライオンの反応行動を S，(P, S) に対

する調教師の“アメとムチ”式の報奨・懲罰行動を R と、見立てることが出来る。つまり、“教師付き学習”とは、トライアドかトライアド以上で構成されたインタラクションと考えることができる。

さて、対人行動物と人間とのトライアドの場合を考えよう。つまり、先に対人行動物が行動 P を行い、人間がそれに対して S と反応し、(P, S) のダイアドに対して対人行動物が行動 R を行う。例えば、ペット飼育ゲームで、P が「お腹が空いたとピーピー鳴く」、S が「ペットに餌をやる」とし、R が「喜びはしゃぎまわる」だとする。この場合、“P に対しての S は正しかったのだ”と解釈されるだろう。しかし、P が「満腹で寝ている」に対し、S が同じく「餌をやる」では、R は「餌を食べない」という結果になる。前の例では正しかった S であっても、文脈が変われば正しいとは言えない。そのことを示すためには、トライアド以上のアルゴリズムを用いて、S の評価の表現の役割を持つ R を適切に決定しなければならない。

3.2.4 対人行動物のインタラクションの次数の工学的意味

森下はその著書の「おもちゃ革命 — 手遊びおもちゃから電子おもちゃへ」[43]の中で、おもちゃの歴史的変化を分析している。副題にあるように、最近のおもちゃの最大の変化は電子化であることが指摘されている。

電子化とは、おもちゃの対人インタラクションの次数を上げることであった。昔ながらの木のおもちゃと人間のインタラクションは、モナッド以下の見て遊ぶ形態や、竹とんぼやコマのように人間が働きかけておもちゃが反応するダイアドまでであった。だが、現在の電子化されたおもちゃは、より高次のインタラクションも行うことができる。より複雑なインタラクションほど、より多様なより深い楽しさを、人間に与える可能性があるため、電子化によってインタラクションの次数は上げられてきたのであろう。

従って、インタラクションの次数による分類は、対人行動物の年代や進化系統を分析する上でも都合がよい。

3.2.5 対人行動物の多様性による分類

対人行動物には、多様な対人行動物のレパートリを持つものがある一方、1種類しか出力行動がないものもまた多い。この違いでも対人行動物の特徴が分類できる。

出力が 1 種類しか無くとも、行動の発生させるタイミング、長さや繰り返し数、

速さや大きさなど行動の強度などのパラメータがあり，これらを可変にしていることもある．

また，人間からの働きかけ行動を認識する場合の分類カテゴリー数も，対人行動物の特徴を分類するカギとなる．

一般に，行動レパートリー数が少なく行動のパラメータも多く調節できない対人行動物は，ユーザに，単調なインタラクションを強いることになるので，退屈感を誘いやすい．逆に，行動レパートリー数が多く，行動のパラメータも緻密に設定できる対人行動物の方が，より感情を感じさせる行動や動物らしい行動を振る舞うことに有利であり，また飽きられにくいと言える．だが，クラップ [114] の理論を援用すれば，あまりに“何でもできる”，“どのようにでも行える”という状況では，かえってユーザにとって，対人行動物は，全体像が把握しにくいものに思えたり，細かいオプションを指定しなければならないものに思える恐れがある．例えば，高機能・多機能すぎるビデオデッキはかえって扱いにくく，最小機能しか持っていないビデオデッキの方がユーザに好まれる現象などがこれにあたる．

3.2.6 インタラクションの陳腐化対策手法による分類

ユーザが対人行動物とのインタラクションをしてみると，応答がマンネリで飽きてしまうことが多い．そこで，インタラクションの陳腐化を防ぐ対策が講じられることがある．

単純な対策としては，対人行動物のインタラクションアルゴリズムにランダム性が添加する方法である．

ランダム性には，次の3種類がある．

乱数関数内蔵型：対人行動物の行動選択アルゴリズム自体が，乱数発生手段を有し，その乱数を用いて行動選択がランダムに行われるタイプ．

外乱利用型：センサ情報に含まれる外乱を用いて，外界認識に不確実性を添加するもの．当然，行動選択にもランダム性が加わる．

インタラクションのカオス利用型：多数の行為者が参与するインタラクションでは，各々の行動選択アルゴリズムが決定論的であっても，インタラクションはカオス的に不確実になることがある．これを利用して，ランダム性を帯びているように見える行動を行う対人行動物もありえる．

また，乱数・カオスを用いずに，情報源・変化の源を外部に求める戦法もある．

台本交換型: インタラクションに飽きる頃になると, インタラクションで用いる話題・台詞などの台本データを, 新しいものに取り替えるもの.

改造遊戯型: 対人行動物のハードウェアやソフトウェアを, ユーザが改造できるもの. しばしば改造すること自体が楽しみとなる.

情報源借用型: ユーザとシステムとその他のインタラクションの状況から, 行動生起のきっかけを得て, 対人行動物がユーザに対してインタラクションを行うもの. 例えば, 電子メールが来ると声で知らせるCGや, テレビ番組の場面の応じて踊る人形などがある.

あやつり人形型: 実は隠れた人間が対人行動物を操っているというタイプ.

3.2.7 インタラクションの社会行動性による分類

対人行動物は, その社会行動性によっても分類できる.

社会行動性とは, 入力として人間の社会的な行動を検知し, 出力として社会的な意味をもつ表現を行える能力の度合いである. 社会的に意味を持つ行動とは, 視線・発声発言・接触・空間的間合いなどである. これらは, 人間にとって本能的に社会関係の意味が付帯されるものである.

一方, 社会行動性が低い人と機械のインタラクションとしては, ボタンを押したらエレベータが来るなど, 一般的な作業用機械の, 意味中立的なものが挙げられる.

3.2.8 インタラクションの経時変化性による分類

時間の経過や使用回数の増加に対するインタラクション特性の変化の仕方によっても分類できる.

この経時変化には, 2種類ある.

履歴効果型: インタラクションの出入力履歴により, 行動選択アルゴリズムが変化するもの. また, 特定の行動アルゴリズムに収束するものを, 特に学習型と呼ぶ.

ステージ遷移型: 時間の経過や使用回数の増加が生じると, 行動選択アルゴリズムがあらかじめ用意しておいた別のアルゴリズムに入れ替えられるもの. 対人行動物の成長を演出したい場合に簡便な方法として用いられる.

3.2.9 対人行動物分類のまとめ

- コミュニケーションのチャンネル・モダリティ: (多チャンネルの同時的複合的使用の事例に対しては, 適用に問題がある.)
- インタラクションの次数: 対人行動選択アルゴリズムの複雑度
 - 0次コミュニケーション: 静物・ぬいぐるみ.
 - モナッド: 動く鑑賞物.
 - ダイアド: 人間の働きかけに反応するもの.
 - ポリアド: 履歴・文脈に応じて, 対人反応を変えるもの.
- 対人行動の多様性
 - 行動レパートリー数: 行える行動の種類の数
 - 行動パラメータ数: 各行動の調整・修正の余地.
- インタラクションの陳腐化対策: 対人行動をマンネリにしない努力.
 - 乱数関数内蔵型: アルゴリズム自体に乱数源がある.
 - 外乱利用型: センサ情報の誤差などの用いる.
 - インタラクションのカオス利用型: 単純なアルゴリズムを持つ行為者が多数で相互作用することによるインタラクション展開の不確実化.
 - 台本交換型: 受け答えのデータ (台本) を交換して新規化する.
 - 改造遊戯型: ハードウェア・ソフトウェアをユーザが改造する.
 - 情報源借用型: 他の現象から, インタラクションのきっかけをもらう.
 - あやつり人形型: 実は人間が対人行動物を操っている.
- インタラクションの社会行動性: 社会行動として自然なものを入出力として採用しているか.

- 入力 of 社会行動性: 人間の対人行動物への働きかけかたが社会行動として自然なこと .
 - 出力 of 社会行動性: 対人行動物の人間への働きかけかたが社会行動として自然なこと .
- インタラクションの経時変化性: 記憶・成長・馴化の能力 .
 - 履歴効果型: インタラクションの履歴データから , 行動アルゴリズムを修正する .
 - ステージ遷移型: インタラクションが進むと , あらかじめ作られた別の行動アルゴリズムに切り替える .

3.2.10 参考: おもちゃ売場での分類

2000年10月現在, 東京渋谷の東急ハンズ渋谷店のアミューズメントグッズ売場にて, 動くおもちゃに類するものの分類を調べてみた .

動くぬいぐるみコーナー ワイヤ付きリモコンで操縦する“歩く子豚のぬいぐるみ”“はねるウサギのぬいぐるみ”などが典型的 . Furby もここでいまだに売られている . 要するに, “毛皮の外皮を持つ動物型機械玩具”として分類した様である .

センサートイコーナー 人間が近付くと発声する置物などがあつた . 動物型の置物もあつた .

ロボットペットコーナー 外観が銀色やスケルトンのプラスチックで作られ, つるつるしている動く機械玩具がこころまとめられている . 体形は動物型であるが, 外皮は毛皮ではないので“ロボット”であるということなのだろう .

ぬいぐるみコーナー このコーナーに, ゼンマイを巻くとぶるぶる震えるぬいぐるみなどもあつた . 要するに, エネルギーを人力から供給されて動くものは, “動くぬいぐるみ”とは見なされず, 単に“ぬいぐるみ”と分類されいた .

携帯電話グッズコーナー このコーナーに, 形態電話に着信すると, 声を出して踊るぬいぐるみなどがあつた .

この分類は、客が品物を探す際に見つけ易いようにするためのものであろう。おもちゃの購買行動は、“ぬいぐるみ”は女の子向け、“ロボットペット”は男の子向けなど、社会の文化・慣習に強く依存している。“ロボットペットコーナー”で欲しい物がある男の子が、“ぬいぐるみコーナー”にも興味を持つとは限らないのだろう。それを「自分で動くおもちゃ」などと大きくまとめてしまえば、客にとっては探しづらい。

すると、文化差・性差などで、対人行動物の捉え方も変わると予想が成り立ちうる。本論文では、万人共通と思われる単純な印象測定実験もあるが、対人行動物のより複雑で微妙な表現行動についてもその印象測定実験を行う。このような場合、文化差・性差が影響することがありえる²。

キャラクターでは、“どこでもいっしょ”の“トロ”、“ピカチュウ”、“ドラえもん”、“ハローキティ”、“ポストペット”の“モモ”などが、依然として人気がある。休日の渋谷だったので、あちこちの街頭のイベントに、これらのキャラクターの着ぐるみが登場していた。“トロ”、“ピカチュウ”、“モモ”はいずれも“サイバーペット”からの出身である。漫画やデザイン出身のキャラクタと人気で肩を並べている。

3.3 研究計画の構造化

対人行動物の対人心理作用を研究テーマとする場合、その対象の広さにとまどい、どこから手を着ければよいのか困惑する。

しかし上記の議論からすれば、対人行動物の分析の鍵として、表現方法と表現内容とを同時に呼応関係を保って分類する“インタラクションの回数”が最も本質的で強力であると考えられる。

従って本論文は、“インタラクションの回数”の軸に沿って、主要な表現内容に関して研究を進めていくことが最も効率的であろうと考える。具体的には以下のようにレベル分けをする (Fig.3.1, Table 3.1)。

- 1) 即時的モナッド的表現: これは、表現者から一方的に (そしてしばしば即時的に) 提示される信号による表現である。外見・呼吸鼓動などのヴァイタルサイン・身体運動などによる表現が該当する。これは、主に生き物らしさや内的感情を表現すると予想される。
- 2) ダイアド的表現: これは、被表現者の行動に対する表現者の反応によって印

²実際、9章の実験で文化差・性差が現れた。

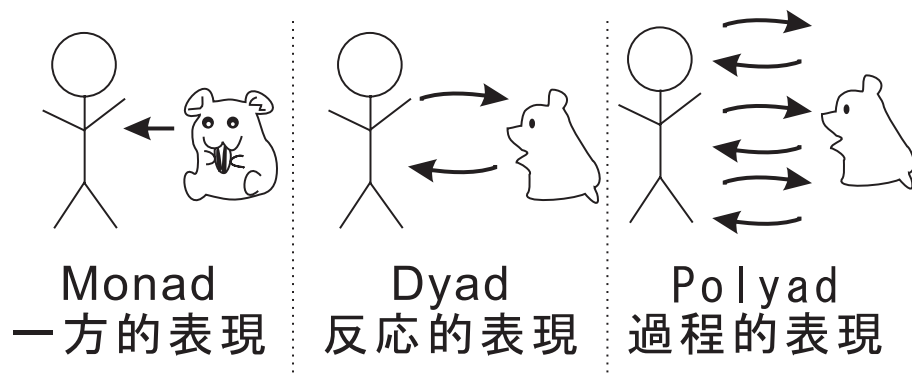


FIGURE 3.1: 行動のやりとりの複雑度による分類

TABLE 3.1: インタラクションの複雑度と表現

インタラクションの複雑度	表現機会	表現内容	表現の実体
モナッド	常時提示	表現者の内部状態	表現者の状態
ダイアド	反応として	表現者と受信者の社会的関係	表現者の個々の反応
ダイアドの繰り返し	反応として	表現者の特性・相性	表現者の反応特性

象・意味を生じさせるタイプの表現である．相手への接触・呼びかけ等への反応が代表例である．これは対外感情・社会関係に関する感情を表現すると予想される．

- 3) ダイアドの繰り返しでの表現: 表現者と被表現者の間で何度もインタラクショ
ンを繰り返すことに印象・意味を生じさせるタイプの表現である．これは主
に相手の個性や協調が表現できると予想される．

以上のように，対人行動物の対人表現をレベル分けした．以降の章ではこの各
レベルについて議論を進める．各々の章で課せられた課題は，以下の通りである．

表現法則の探求: 上記までの議論では，表現のレベルと，そこで表現できる可能
性のある内容を挙げたが，具体的にどう表現行動を行えば，どのような意味・
対人効果を生じるかは論じていなかった．しかし，ロボットなど対人行動物
の対人表現の法則を論じた議論は，まだほとんど無い．従って，表現の法則
の仮説を，他の学問分野に広く知見を求めた上で，構築しなければならない．

実験による検証: 表現法則の仮説を実験で検証しなければならない．

結果の法則化: 本研究の究極的な目標は，対人行動物が自律的に自分の対人表現
を生成することである．従って，たとえ自ら立てた表現法則の仮説が実験結
果に支持されとしても，アルゴリズム化できなければ意味がない．このため
には，

1. 特定のアプリケーションに特化せず一般性のあるコミュニケーションを
題材とすること
2. 特定の対人行動物のハードウェアに特化せずに，様々な対人行動物に広
く適用できる概念で，現象を法則化すること

が求められる．

第4章 対人行動物の実例とその分析

本章の主旨

人間とのインタラクションを行う擬人化・擬動物化されたシステムは、従来の研究や作品・製品の中に多く見つけられる。長く愛顧されている成功例もあれば、飽きられてしまった失敗例もある。

本章では、擬人化・擬動物化された対人行動物の事例を整理して紹介し、その対人作用手法の成り立ちを分析する。

分類の第1のキーはインタラクションの回数とする。その理由は、3.2.3節で述べたように、インタラクションの回数と、インタラクションで人間に対して演出される印象の内容との呼応が強く見られるからである。

また、対人行動物の事例はあまりに多いため、動物そっくりの人工物を作ることと指向する事例、及びペットの対人能力の長所を人工物の対人機能に取り入れようとする事例を優先して取り上げる。

4.1 0次対人作用型

動かない人形やぬいぐるみなどが該当する。これらは行動は行わないので、行動物とは呼びにくい。

しかし、可愛らしい外見は、観客の保育本能を刺激する社会的刺激 [93] であるので、社会的コミュニケーションの範疇に入れることができる [10]。

人形・ぬいぐるみは、しばしば子供がぬいぐるみの役まで一人二役でこなして遊ぶものであり、遊ぶ人の主観的には人間と本物の動物・人間との社会的インタラクションと感ぜられる。なまじ人形が自分で動くと、このような心理的投影・観入の邪魔になると思われる。

子供がお気に入りのぬいぐるみをどこへでも連れていく現象の強さを考えると、

以降に出てくる動くオモチャと比較しても、場合によっては遙かに社会心理的効果が大きいと言える。

社会的効果の強さが、この0次型の対人作用物の人気の源泉となっている。実際、動くオモチャの価格は2000円から4000円程度であるが、ぬいぐるみはこれより高いものが多い。また、アニメーションやサイバーペットなどのキャラクターの絵がデザインされた衣料品や小間物も非常に多く人気がある。キャラクターの出身は動く世界であるのに、人気は絵という0次コミュニケーションの世界に於いても損なわれていない。

4.2 モナッド型

対人行動物は自分で行動を行い人間に見せるが、反動的な行動は行わないタイプである。モナッド型の対人行動物は、その動きの動物らしさや見事さを人間に鑑賞させることを主目的としているものが多い。

人工物としてモナッド型を取っている事例を挙げる。

古くは、カラクリ人形・自動人形などの多くはこのモナッド型である。中でも有名なものは、18世紀中葉にヴォーカンソンが作った“笛吹き童子”・“太鼓叩き少年”・“アヒル”の自動人形である[48]。例えば“アヒル”は、餌をついばみ、ガーガー鳴き、水浴びをするという、まことしやかな動きを行った。また1770年にはスイスのジャケドロス父子が、“文字書き人形”・“絵描き人形”・“オルガン弾き人形”を製作した。このようにジャケドロス父子は、自動人形の動きの巧みさの追求を目指した。

時代が下っても、見事に動く人形、臨機応変にも巧み動けるロボットを鑑賞することは、充分観客を満足させるものだった。19世紀後半のカナダのジョージ・モアが作った“蒸気歩行人間”、1928年の日本の西村真琴の蒸気式上半身駆動人形“学天則”[44]、1980年代になると、つくば科学万博にて、オルガン演奏ロボット“WABOT-2”などをはじめ、巧みな動きをするロボットが多く出品された[48]。アミューズメントパークなどの、人間型・動物型の“ロボット”、正確には動くマネキンには“あやつり人形型”も例が多い[82]。

最近の動くオモチャの中では、例えばひもを引っ張りゼンマイを巻き離すと震え出す“ぶるぶるミニうさぎ”（タカラ社）(Fig.4.1)などの、本物の動物の特徴を彷彿させる行動を提示するものがある。CGでも、魚飼育ゲームなど、同様に本物の動物を真似た動きを見せることを主題としている。



FIGURE 4.1: タカラ社“ぶるぶるミニウサギ”外観

モナッド型ロボットで秀抜であるのが，三菱重工業の水中アニマトロニクスシステム [58] である．これは外観・動作が本物そっくりの魚型ロボットである．その類似度は非常に高い．このロボットは，観客からの指令を受けてインタラクティブに行動を変えることも可能であるが，やはりメインの楽しさは，その振る舞いのリアルさであろう．したがって，モナッドがコミュニケーションの舞台である．

コミュニケーションの次数が低いからといっても，対人行動物は，リアルさ，動きの妙，動きの面白さなどで充分人間に作用し楽しませてくれる．

4.3 ダイアド型

外界の特定の変化に対して，反射的に反応するタイプである．

これは多種多様な実例がある．

草創期：動物の反射システムの模倣ロボット

行動のほとんどが反射で説明できる単純な動物を，ロボットで模倣することは比較的簡単であるし，またそのロボットの振る舞いもそれなりに動物の行動に似ていて，見ていて面白い．

それゆえ，ごく初期から動物の反射システムを模倣するロボットが登場している．Walter[132]は1951年に，カメの光と障害物に対する反射行動を模倣したアル

ゴリズム (昔のことなのでアナログ・コンピュータで作った) カメロボットを発表した。(これは今にして見れば, Brooks[134] の subsumption architecture と同内容のものである [133].)

反応して動くおもちゃ・ぬいぐるみ

ロボットが人間の行動に対して反射を行えば, 人間とロボットとのダイアドインタラクションが成立する.

タカラ社の, 音に反応して動く“フラワーロック”[77]が有名である. 当初(1987年)は, 音に合わせて動く犬のぬいぐるみ“のらくろロック”として登場した. その後, 植物が動く方が意外であるというコンセプトから 1988年に“フラワーロック”が登場し, 2年間で700万個を売れた. さらに1990年には, 外観をジュースやビールの缶にした“ミュージカン”を開発し, 1年で450万個も売れた.

これらの商品が動作するきっかけは, 装置の付近に流れる音楽のビートから得ている.(だから, “ロック”という名前なのだろう). 従って, 音楽が変われば動作のタイミングはマンネリにならない. よって情報源借用型の陳腐化対策を取っていると言える.

また, 商品コンセプトの意外性を求めて, 実際の動物の外観を模倣しなくなった. くねくねした動作は動物の模倣であるから, 非動物の擬動物化の妙に楽しさの源泉を求めたと言えるだろう.

しかし, この戦略によって, “フラワーロック”は, 音量増加に反応し体をくねらすだけで, その振る舞いに社会的な意味は弱く, 社会行動性に乏しいものとなった.

最近になると, センサーは多様なものが使われるようになった.

エポック社の“かじかじハム太郎”(Fig.4.2)は, ひまわりの種やチーズなどの食べ物に見立てた磁石を近付けると, 食べ物を囓るような動きをする, ハムスター人形である. ユーザは“ハムスターに食べ物をあげて可愛がっている”と社会的な意味を持ち得る. また, “ハムスターはひまわりの種が好きなのだ”と, 相手の特性を推察でき, ユーザに相手を把握する楽しさを与える. 出力行動は“囓る”しかない.(厳密には“囓る”と“何もしない”の2種類と見なすべきである. 行動選択自由度が1なのである.) “囓る”行動を実際の行動に似せる努力はなされている.

タカラの“みつけてハムスター”(Fig.4.3)は, 光センサを備え, 明るい所では迷走し, 暗い所に入ると停止するという, ハムスターの行動特性を模倣したロボッ



FIGURE 4.2: エポック社“ かじかじハム太郎 ”外観



FIGURE 4.3: タカラ社“ みつけてハムスター ”外観

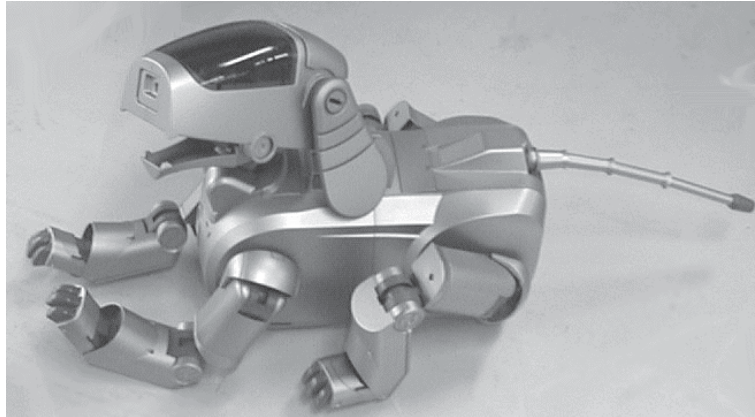


FIGURE 4.4: ソニー社 “AIBO” 外観

トオモチャである．出力行動は“直進”“転回”“停止”の3種類¹である．“直進”中に障害物にぶつかると，“転回”する．従って，行動は外界の状況を利用したランダム性を帯びている．動物を模倣するねらいが強い．人間は付属の懐中電灯でハムスターロボットを照らし，ハムスターロボットを逃げさせて遊ぶ．しかし，このような人間の働きかけ方では社会行動としての意味は弱い．

AIBO

ソニーの AIBO(Fig.4.4) は犬型ペットロボットである．“赤い物体を追う”，“転倒すると起き上がる”，“頭を撫でられると喜ぶ”などのダイアドベースのインタラクションを行える．また，自発的行動も行ない，また行動アルゴリズムはステージ遷移型の経時変化をする．

人間が AIBO に行うことができる社会心理的な意味を帯びた入力は，額部への接触のみである．よって，撫でさすり愛玩するペットとしては物足りないと思える．

AIBO の商品コンセプトについて，ソニーは“犬ではなくロボットである”と強調している．つまり，触れ合って可愛いロボットと言うよりも，犬らしい動作を 4 足アクチュエータで行うことのリアルさを優先し，また，外観デザインは“テクノ風”の無機的で滑らかな質感となっている．価格は 20 万円を超えて高いが，安い

¹ 平常状態の行動を“特に行動していない”と見なす流儀の数え方では 2 種類と呼ぶべきである．つまり数学的には「行動選択の自由度が 2 である」と表現すればよい．しかし，平常状態では“直進”なのでこれを“何もしていない”と見なすことは常識に照らして奇妙である．この章では読者が混乱しないように常識的な数え方にする．

ものには興味がなく新しいものや質の高いものを求める消費者の心理に合ったものであろう。

もともとは、ソニーが1998年に発表したロボット“オープンR”が原型となっている。オープンRは、例えばロボットの足の代わりに車輪を装着しても、ソフトウェアの改変なしに使うことが出来るという、パソコンで言うところのプラグアンドプレイのロボット版を実証するための試作機であった。だが発表の直後から、このロボットの買いたいという問い合わせが殺到したため、“オープンR”の設計をエンタテインメント用に改め発売することとなった。

AIBO 登場当初の1999年はブームを起こし、2000年秋現在までに4万5千体ほど販売されたと発表されている。だが、2000年に入ると人気も衰退した。これを執筆している2000年9月現在、<http://www.aibotown.com/>などで活発に活動しているファン団体が見受けられるが、他の多くのWebサイトでは2000年1月～5月まででの閉鎖・更新終了が目立つ。掲示板の書き込み状況を調査してみると、同一人物が書き込む期間は、多くは1ヶ月前後までしか持続していない。

2000年11月に、後継機のAIBO 2nd Generationが登場した。インタラクションの社会性を向上させるためだろうか、音声コミュニケーションを大きく拡充し、タッチセンサも顎下や背中に増設された。また、ユーザも行動アルゴリズムの設計や身体動作の振り付けを出来るようになり、改造遊戯型の陳腐化対策が摂られていると言える。

PostPet

ソニー・コミュニケーション・ネットワーク社の“PostPet”は、基本的には電子メールソフトであるが、CGの仮想的ペットが登場する。このペットは伝書鳩のような役目であり、自分のペットにメールを運ばせたり、他人のペットがメールを運んできたりして、メールと共にペットの行き来する。また、ペットは、飼い主にマウスクリックによって“撫で”てもらったり、おもちゃで一人遊びしたり、日記を付けたり、メールを運んでいる途中で見つけた“宝物”を蓄えたりする。世話を怠ると、ペットの健康状態や幸福度が低下する。最終的には、メールを運ぶ回数に限界があって、それを超えると死ぬ。

PostPetはサイバーペットとしては非常に成功したものである。その理由を分析してみよう。飼い主とのインタラクションはダイアドベースであり、アルゴリズムとしてはさして高級なものではない。しかし、飼い主が“撫でる”ことが出来る点で社会行動性がある。行動のレパトリーも上記のように豊富である。単に行動の種類が豊富であるのではなく、ペットの個性を感じさせる行動を多く取りそ

ろえていることも重要である。インタラクションの陳腐化対策は、ユーザの電子メールでのコミュニケーション活動に、ペットの行動のきっかけを求める“情報源借用型”であると言える。また、PostPet を使っている友人と遊ぶために PostPet を買うという図式で急速に普及した。これらの理由により、現在も続くブームを勝ち得たと考えられる。

たまごっち

バンダイ社の“たまごっち”は、1996年から発売された携帯型のペット飼育ゲーム機である。たまごっち以前にも、中で猫が飼える電子手帳などの類似の商品は複数あった。しかし、たまごっちは次の点で革新的であった。

携帯化 ハードウェアはポケットに入る大きさであり、ユーザは常に携帯することが出来る。子供が学校に忍ばせて持っていけることが可能であるが、これは実時間化・インタラクション強制化を実現する上で重要である。

本機能化 飼育ゲーム以外の機能は時計機能以外にない。従って、機体を“たまごっちが住んでいる入れ物だ”と観想しやすい。

実時間化 飼育ゲームのゲーム内の時間進行は実時間である。たまごっちは、本物の動物のような時間のオーダーで空腹になったり、排泄したり、睡眠をとる。このため、動物らしさが高い。

インタラクション強制化 たまごっちは、お腹が空いたり、遊んで欲しかったりすると、ピープ音を発して、ユーザの行動を求める。また、ユーザが世話を怠ると、たまごっちは病気になり、最終的には死ぬ。仮想の生き物とは言え、世話をせずに殺すのは心理的に忍びないことである。このため、ユーザは機械とのインタラクションを強制される。

たまごっち発売当初の96年から97年は、大変なブームを引き起こした。しかし、その後急速にブームは終息した。

陳腐化対策として、たまごっちの成長形態を決定するアルゴリズムにランダム性が取り入れられている[78]。このため、何匹か飼育しなければ(=何回か遊ばなければ)、たまごっちの全ての姿を見ることが出来ない。さらには、登場が極めて希な形態(隠れキャラ“おやじっち”)もあり、隠れキャラに育てられるかと、ユーザの競争心を煽る戦略もあった。

また、初代の“たまごっち”に続いて、登場するペットのキャラクターを変えた“新種発見たまごっち”・“海で発見たまごっち”，最後に“たまごっち”が死ぬことを嫌って“天国に戻る”というストーリー設定にした“天使のたまごっち”，さらにオスメスを分け交配を出来るようにした“おすっち”・“めすっち”などを開発し、刷新を行ってきた。

だが、インタラクションは，“空腹には餌をあげればよく”，“病気になったら注射ボタンを押せばよい”など，単純で定型的なダイアドの集合にすぎない。また，たまごっちの行動レパートリーは少なく，各行動も定型的である。このため，ある程度ゲームを遊んでみると，ユーザがカラクリを見透かして，飽きられてしまった。

なお2000年秋現在，“たまごっち”等の類似品は，“たくさん歩くとペットが喜ぶ歩数計”として，歩数計の分野でのみ生き残っている。機械の主目的を，歩行運動の楽しさ増進へとずらしているので，ペット自体の飽きは商品価値にそれほど影響しなくなったのだろう。

このように，機械のペット役割の本機能化を回避することは，サイバーペットの人気の長寿化の一つの手段である。

実用的対人行動物: パソコン・機械のインターフェースとして

実用的な対人行動物のアプリケーションとして，まず思いつくのがパソコン・機械のユーザに対するインターフェースであろう。

このタイプの対人行動物は，児童教育用の製品が多い。

Microsoft社の“ActiMates”は，テレビやパソコンに接続して使用する動くぬいぐるみである[51]。Actimates制御用の信号を含むテレビ番組や，専用パソコンソフトに連動して動き，1000語以上の語彙を持って発言できる。つまり陳腐化対策は台本交換型を用いている。外見は，米国の子供番組のキャラクターであるバーニー，アーサー，D.W.などの形状をしている。Actimatesは，テレビ・パソコンからの信号や，手足へのユーザの接触を，行動生起のきっかけとしている。ユーザへの出力としては，歌を歌ったり，発言したり，手足と首を動作させるなどである。

台本データがオンラインで更新されるので陳腐化対策としては手厚い。しかし，身体動作はそれほどレパートリーが無く，退屈するのではないかと思える。おそらく，幼児が手足を乱暴に握っても，ロボットは壊れず，子供も傷つけないようにするため，身体動作アクチュエータは単純なものにせざるを得なかったからだろ

う。また，ユーザが不意に腕をつかむなどの，台本で対象できない事態での，即興のインタラクションはダイアドベースの反射型だと推測できる。

Mattel Media 社の “My Interactive Pooh” は，パソコンにつなぎ，幼児の学習用プログラムと連動して動いたり発言する，クマのぬいぐるみのロボットである。またソフトウェアをロボット本体にダウンロードすれば，パソコンから離れても使用できる。入力は，音とパソコンからの指令であり，出力は，身体動作と口の動作，子供向けのお話語り，歌，児童の学習のための質問を行う。児童用・教育用であること，台本交換型であること，有名なキャラクターの外観をしていることなど，ActiMates に非常に類似している。

また，大人・高齢者と機械とのインタラクションの取り持ち役の事例も多い。

松下電器産業の猫型ロボット “たま” [57] は，“高齢者コミュニケーション支援システム” という正式名称で，独居老人と支援施設との定期的な連絡を行うための取り持ち役ロボットである。このロボットには，高齢者の安否確認という実務的に意味がある。

NEC 社の “パーソナルロボット R-100” [56] は，部屋に人間と同居するタイプの移動ロボットである。外観は，ロシア人形のマトリョーシカ風の外形と，機械的な質感を持つ。つまり，世間でいう “ロボット” を意識した外観であり，名前も R100 と “ロボット” 的なものである。このロボットは音声認識が可能で，人間の命令を受けて家電を操作するという仕事を持つ。

R-100 の行動の社会行動性は，実用対人行動物の中では比較的高い。R-100 は普段は自律的に室内うろついているが，人間を発見すると側に近寄ったりする。これはペットも行うな親愛表現である。また，自分を叩いた人物に対して嫌いになったりする感情モデルを持っている。このように行動の設計に，人間との社会関係の構築への配慮がうかがえる。

富士通は “タッチおじさんロボット” や “ハローキティのパソコンフレンズ” など，パソコンと連動するマスコットを商品化した [55]。行動はダイアドベースであり，ロボットの行動のきっかけは，メール着信，スケジュールアラーム，ユーザの活動が長くなった時の休憩提案，おしゃべり遊びなどである。これらは，パソコン用マスコットロボットの典型的なアイデアである。

TOMY 社の “TEL-DA” は，携帯電話機を入れておくための，ぬいぐるみである。携帯電話着信をきっかけにして発声し踊る。外観は，ピカチュウ，ドラえもんなどがある。行動レパートリは1つで，アルゴリズムもダイアドベースであり，非常に単純である。

以上見てきたように，実用対人行動物の有利な点は，たとえロボットの振る舞

いや感性的な表現に飽きられても，対人行動物とのインタラクションには実用的な理由があるから，対人行動物の使用が打ち切られる心配が少ないことである．

ただし，“わざわざ動物類似物を持ち出して表現するなど，わずらわしい”と感じさせる恐れがある．非言語にて何を表現するか，また人間との社会関係と如何に構築し何に利用するかについて，検討が必要である．

動物システムの生理状態・感情状態遷移の模倣事例

ここでは生物の模倣や人工生命の創造という観点から作られた対人行動物の事例を見よう．

ATRのTosa[69, 51]は，人間の呼びかけ声に反応して，喜怒哀楽の表情・身体運動を示すCGの研究を行ってきた．例えば，MICと呼ばれるシステムでは，人間の声の抑揚や音量の特徴を入力とし，ニューラルネットを介して喜怒哀楽を決定するアルゴリズムとなっている[69]．

しかしMICは，応答の安定性が悪い．同じように話しかけたつもりでも異なった反応をしたり，逆に違った掛け声をして同じ反応をすることがよくある．外乱利用型の陳腐化対策である．また，ニューラルネットを，本物の動物の心理システムを模倣するために使っているというよりは，一見不思議なダイアドアルゴリズムを作るための仕掛けと思える．

早稲田大学の尾形と菅野[65]は，動物の生理心理システムを模倣した行動アルゴリズムを有するロボットWAMOEB A-2を開発した．このロボットは，例えば空腹度合いなどの内部状態に応じて，お腹が空いたのでうろつくなど行動する．アルゴリズムは，複数のパラメータが絡み合い時間変化する複雑なものではあるが，行動決定の核心部分は，“状況Aならば行動Bを行う”というダイアドベースアルゴリズムと考えてよからう．

WAMOEB A-2の外見は武骨であるが，行動生起の因果関係を上記のように動物類似にすることで，機械の擬動物化を目指す．また，人とのインタラクション実験も行ない，動物らしさの印象の強さなども調査している．ロボットのアルゴリズムが動物類似ならば，外見が機械であっても，その振る舞いには動物らしさを感じるだろうという仮説の上に成り立っている．この仮説は，亀山[88]によって詳しく分析されている重要なものなので，次章で解説する．

このようにMICとWAMOEB A-2は，心理と行動のシステム全体を動物模倣する試みである．

一方，動物のもっと部分的な特性を模倣する試みがある．動物の行動アルゴリ

ズムは一般に複雑なものであるが，その全てを真似するのではなく，単純なアルゴリズムで記述できる部分を抜き出して模倣を試みる研究である．

例えば，伊藤 [79] は，視線による人間とのインタラクションを行う“共同注意ロボット Infanoid”を開発した．このシステムは，対面する人間の視線を見地し，ロボットの視線を制御してアイコンタクトをとったり，同じ対象物を見つめるなどの行動を行う．人間との対話の言語的側面を模倣することは難題である．それに比べれば，視線コミュニケーションの規則は簡単なアルゴリズムで模倣できるだろう．

言語的インタラクションでは，1960年代にMITのワイゼンバウムが作ったおしゃべりソフトウェア“ELIZA”が有名な成功例である [83, 84]．言語行動はもちろんずば抜けて複雑な行動であるが，会話の中の相づちや短い返事の行動は単純なアルゴリズムで模倣できる．実際，人間か機械かを見分ける方法としてチューリング・テストというものがあるが，Eliza はしばしばこれに合格し“人間”と判定された．ELIZA の発言アルゴリズムは，ほぼダイアド・ベースであるので大したものである．ただし，話題の進行が奇妙なので，話し相手の人間は次第にいらだってくる．

Eliza 系統の対人行動物には，“人工無能”と呼ばれるアミューズメントソフトウェアやソニーコンピュータエンターテインメントのゲームソフト“どこでもいっしょ”(1999)[68] など数多くあり，ある程度の人気を得ている．

第3の動物模倣として，群システムの模倣がある．これは，対人行動物それぞれが単純なアルゴリズムしか持たなくとも，それらが複数となって互いに相互作用することで，全体として複雑な挙動を行わせるという試みである．

例えば後述する Furby は，Furby 同士は相互通信でき，互いに行動を同期させたりしている．行動の動機は，実際の動物の群の現象からの模倣であろう．

4.4 ポリアド型

ポリアド型の対人行動物の事例は少ない．これは，

- 相手の行動や場面状況の認識が難しい．
- ダイアドベースでもそれなりに効果がある．
- ポリアドの特色として，学習の可能性がある．しかし，人間との行動インタラクションにおける学習は困難である．人間は何度でも同じ行動をするわけ

ではないので学習が収束しにくいからである。従って、特にポリアドを用いても新しい効果が期待できない。

などの理由からである。

Emotional Dialogue System: トライアドインタラクションの典型

池邊ら [66] は、パソコン画面上の人間型 CG キャラクター “EDS(Emotional Dialogue System)” を開発した。このシステムは「音楽を聞きますか？」などと人間に話しかける際の“提案感情”(自信のあり/なし)と、人間の応答を受けた後の“反応感情”(喜怒哀楽)を分けている。例えば、システムの提案をユーザが受け入れると、システムの反応感情は喜びになるなど、トライアド型のインタラクションアルゴリズムを行う。

つまり、トライアドでインタラクションを構えることによって、ユーザの選択行為について、システムがどう思っているかを表現し、システムの心理や性格をユーザに印象付ける効果を狙っている。

このようにトライアドの3つの行動の組は、“きっかけ・それに対する相手の反応行動・反応行動に対する評価”という文脈で解釈されることが多い。最後の行動は“相手への評価”の意味合いを含んでいることから、性格・価値観・相手との立場関係など比較的高度な社会心理的内容を表現することがありえる。

Furby: ペット玩具の複雑化

Tiger Electronics 社の Furby は、しゃべるぬいぐるみである。但し、高機能で、センサシステムには、音声認識、機体の揺すられ検知、機体への接触検知、他の Furby からの通信受信などの能力がある。出力も、瞬き・耳のばたばた運動・口の運動の身体運動と、Furbish (ファービー語) と名付けた喃語の発音を行う。ユーザが Furby とインタラクションを行っていくと次第に英語などの自然言語を話すようになる。行動アルゴリズムに“気分”を取り入れてあり、気分によって怒ったり、機嫌よく歌ったりする。(富士 [81] によると、Furby は 16 の状態を持つオートマトンであるようだ。従って明示的な感情度などのパラメータを持っているのではなくて、個々の状態自体に喜怒哀楽を色付けしてあるのだろう。) また、個体によって行動アルゴリズムの設定が微妙に異なるため、同じ状況でも他の個体と異なる行動を取ることもある。また他の Furby とのインタラクションが可能のため、3者以上の複雑なインタラクションも取り得て、インタラクションにカオスが生じる

可能性がある。

98年秋に米国で発売され、当初はヒット商品であった。しかし、半年程度でブームは終息した。当初は高機能のペットロボットと見なされていたが、2000年秋現在、おもちゃ売場では“しゃべるぬいぐるみ”のひとつという程度の位置づけである。

この衰退の理由を考えてみよう。Furbyの最大の特徴は、言語的コミュニケーションを重視していることである。(裏を返せば、身体的な表現は不得意である。)しかし、人間と機械との言語的インタラクションを、もっともらしいもの、あるいは楽しいものとして維持するためには、会話の文脈をある程度は理解しなければならないが、これは困難な問題である。しかるにFurbyは、ほぼダイアドベースの会話アルゴリズムであったと筆者には推測される。筆者の実感では、ワンパターンな受け答えのダイアドと、音声認識の失敗によるためなのかランダムな受け答えダイアドが混合していた。このため、Furbyの発言から、Furbyが喜怒哀楽のどの状態にあるのか、把握しづらいものであった。

たま

柴田ら [75] は、猫型ロボット“たま”(オムロン社と共同開発)やアザラシ型ロボット“ぱろ”の動物型ロボットを製作した。どちらかと言えば人工生命の実現やアミューズメントを指向する研究である。これらのロボットの行動生起アルゴリズムは、内的な欲求や人からの行動に対する反射ルールによって組み立てられている。さらに、ロボットが個々の行動の後、人間から撫でられることを褒美の教師信号、叩かれることを罰の教師信号として、より適切な対人インタラクションを学習する。したがって、トライアドのインタラクションを行うロボットと言ってよい。入出力機能は充実している。入力には、触覚センサ、音源定位機能付き聴覚センサ自己姿勢センサを有し、出力としては、鳴き声の他に、まぶた・前足・尻尾などの部位に合計8自由度のモータがあり身体運動を行う。

しかし、上記の難点は、コンピュータの中の世界・ゲームの世界ならば、解決できる。人間の行動は、ボタン操作など認識しやすく有限なものに限定されるため、ポリアドを認識し、学習を行うこともはるかに容易である。

CGの対人行動物でのポリアドインタラクション事例

任天堂の“ピカチュウげんきでちゅう”は1998年に家庭用ゲーム機のソフトとして売り出された。このゲーム機は音声認識ができ、動物型CG(ピカチュウ)と音声通じてインタラクションする。ユーザが声をかけピカチュウが反応するダイアド型や、場所に応じてピカチュウが勝手に遊ぶ自律モナッド型、ピカチュウが他のCGエージェントとインタラクションを行う群インタラクション型など、多彩なインタラクションを用意している。

これに似たものに、富士通主導で企画された、CGの仮想生命体の棲む星TEOワールド[54, 53]という仮想空間に登場するマスコット“フィンフィン”[53]がある。“フィンフィン”の行動アルゴリズムは、条件に応じて反射するダイアドルールと、感情モデルによる動機付けを併用している。

MIT Media LaboratoryのBlumberg[70]は、実環境と仮想環境が混合した環境で人間と共存し、人とインタラクションを行うCG犬“Silas”を製作した。CG犬の行動の長さ・強さ・因果関係に正当性を持たせるため、動物行動学の本能リリーサ理論を参考にし、犬の行動学習アルゴリズムを作った。しかし、犬の心理システムの精密化に偏っているためか、犬は「ピカチュウげんきでちゅう」ほどには活発でなく、愛嬌も少ない。

岡田[71]は、人と音声インタラクションするロボット“む〜”を開発した。このロボットは、赤ん坊程度の知能を持った生物という設定であり、よたよたした動きや喃語を発することで赤ちゃんらしさを演出している。Lorenz[92]によれば、このような赤ちゃんらしい特徴を見せることで人間の保育本能を刺激できる。インタラクションのアルゴリズムはダイアドベースかトライアドベースと思えるが不詳である。

4.5 高次ポリアドと見せる/見立てる、あやつり人形

18世紀の欧米では、チェス指し人形という見せ物が流行った[48]。(米国では“メルツェルのチェス指し”と呼ばれた。)これは、上半身のみの人形が腕を動かして駒を持って客とチェスの対戦をするというものである。原理は、チェス台の下に操縦者の人間が潜んでいて操っていたのだろうと推測される。文字通り“あやつり人形型”の陳腐化対策である。

このような“あやつり人形型”の対人行動物は現在もなお多い。

例えば、渡辺[73]は、テレ・コミュニケーションシステム“InterRobot”を製作

した。これは、遠隔地間通信でも、話者の身体運動情報も実体感をもって伝達できるように、人の振る舞いを再現し相手先で代行するロボットである。テレビ電話とは違って、InterRobot 自体を相手話者だと見立てる。だが、体の動きについての相談でも無い限りこのような装置は無駄であり、テレビ電話で充分である。このシステム開発の真の動機は、ロボットを人と見立てることの楽しさ・生々しさに惹かれたからではと思える。

また最近では、CG で出来た天気予報キャスター・アナウンサーなど、CG あやつり人形が多くテレビ番組に登場する。これは人形のもつ幻想性への懐古と、CG という新技術への珍しさの融合現象なのだろう。

4.6 対人行動物の実例研究のまとめ

本章の議論から、既存の対人行動物の実例に関して、以下のことが言えるだろう。

- 確かに、“インタラクションの回数” は表現の形態に関する分類でありながら、同時に、インタラクションで人間に対して演出される印象の内容、つまり表現内容の分類となっていた。よって分類の第1のキーとしたことは妥当であった。
- 発売開始当初はブームを起こしながらもユーザに飽きられてしまった対人行動物の例を分析すると、飽きの原因の中でも、とりわけ対人行動物の行動の社会性の低さに問題があることが判る。実際「お手」などの芸をするペットロボットの事例は多いが、人になついたり愛着を表現するものは少ない。これはペットとは大きな違いであり、ユーザに飽きられる大きな原因となっていると考えられる。

第II部

ロボットから人へのモナッド表現

第5章 モナッド表現（一方的表現）の理論

本章の要旨

本章では，人間や動物のモナッド表現（一方的表現）に関する諸理論をまとめ，対人行動物に表現能力を備えさせるための理論的基礎を構築する．

5.1 表現とは何か？

表現とは，伝えたい内容が受信者に分かるように工夫がなされたコミュニケーション信号である．

まず最初に，もっとも純粋な表現の問題事例を取り上げる．

Frank Drake[135] は，宇宙に存在する知的文明の個数の推定式（ドレイクの宇宙文明式）で有名な電波天文学者である．彼はこの推定式作成からもうかがえるように，地球外の知的生命との交信を，科学的に夢見ていた．

そして彼は，1974年，なるべく知的生命が受信できる確率が上がるように，星が密集している M13 星団の方角に向けて，途中の障害物による吸収減衰の恐れが少ない波長の電波で，信号を送ることにした．

しかし，信号をいかに設計すればよいのか，これは難問である．地球人と相手の宇宙人とが共有する言語も通信プロトコルがない．モールス信号にしる他の符号化法にしる，相手に言語的な内容を伝え理解させることは絶望的である．

そこで彼は，言語情報が無理ならば，絵画情報を送ることにした．つまり，人類・地球・太陽系の姿や，人類の知っている自然科学の知識（DNA の螺旋構造など）を，白黒のビットマップにして，そのビット列を送信することにした．

ビットマップ信号から絵を復元するためには，縦と横のビット数が分からなければならない．Drake は縦横のビット数をそれぞれ素数（横 23，縦 73）にした．絵

全体のビット長 1679 を素因数分解すると、縦横それぞれの長さの数字のみが算出される。つまり、電波を受信できる知的文明であれば、素因数分解ぐらいの知識は持っているはずであり、彼らは受け取ったビット列を素因数分解して、ついには絵を復元するだろう、と考えた。

このように、表現とは相手が解読できるものでなければならない。表現とは受信者が解読できる暗号であるとも言える。

しかし我々は、人間同士でいともたやすく多彩なコミュニケーションのチャンネルを通じて通信できる。また、相手が動物であっても、相手が怒っているのか、おびえているのかぐらいは見て分かる。それは、人間や動物で共有する通信プロトコルがあるからである。Drake は、一見したところ共有知識が無い者の間の通信の実現問題を、“素因数分解は知的文明の共有物である”ことを発見し、これを暗号解読の鍵に用いたものであった。

5.2 表現行動の発生の理由と、表現行動の進化

5.2.1 表現発生の理由

送信者と受信者に、全く共有する知識がなければ、表現は成り立たないだろう。この場合は現物を見せる他に方策がない。実際、旅行者はジェスチャーすら通じない外国では、相手を連れ回して状況を理解させる。子供に作業を教える場合は、相手を手取り足取りして表現したかった内容の現物を示さねばならない。

このように現物を見せていたのでは通信のコストが高すぎる。

表現出来ない場合の通信のコストが特に高いものは、敵意の伝達である。敵意を表現できない動物がいたとしたら、相手を攻撃することでしか、敵意を伝達できないだろう。しかし攻撃は、失敗すると死に至るし、成功しても大して利益がなく損害が大きい場合が多い。このため、本気での戦闘を避け、にらみ合い程度で決着をつけることができるならば、その種は繁栄する上で有利である。繁栄する上で有利なことを進化適合 (Adaptation) という。

このような理由で、多くの動物は、少なくとも敵意と服従意思の表現を進化の過程で備えるにいたった。

ここで、動物が表現の対象としている主なものを列挙する。それぞれ進化適合であり、表現を行うコストを払っても、通信による利益の方がはるかに大きい。

警告 (warning): 相手への攻撃意思を知らせる。リスクーな本気の戦闘を避ける

ため .

警報 (alarm): 敵襲などを仲間知らせる . 他者を助けることになるが , 自分もいつかは仲間から助けられるのだから , 進化適合である .

求愛 (courtship): 自分が生殖可能であることと , 配偶者を募集していることを知らせる . これは種の繁栄に直結する問題である .

満足 (contentment): 自分が満足していることを相手に知らせるフィードバック信号 . それを知らせておけば , 相手が再びいいことをしてくれる可能性が上がるので , 進化適合である .

不満 (distress): 自分が不満であることを相手に知らせるフィードバック信号 . 相手は再び嫌なことをしないようにしてくれる可能性が上がるので , 進化適合である .

召集 (assembly): 仲間を呼び寄せる信号 . 群をなしている方が外敵の攻撃に対抗できるため安全で , 狩をする時など効率的であるので進化適合である .

個体識別 (identification): 自分が誰であるか , 群の仲間に知らせる . 群の社会構成の構築する上で必須である .

縄張り主張 (territoriality): 侵入者に , ここが自分の縄張りであることを知らせ , 排除する . 縄張りを持つという習性は , 縄張りが持てる強い個体の生存を安定させるため , 進化適合である .

出産時期の同期 (synchronized birth maturation): 出産時の母子は外敵に容易に攻撃される . 各個体がばらばらに出産すると , 各個に攻撃されしまう . したがって , 群で出産の時期を揃えることは進化適合である . ヌーなどの大型草食動物のメスは , 鳴き声で同期をとる .

これらの伝達すべき内容を動物が表現するためには , 身体運動 , 接触 , 鳴き声 , 体表模様 , 発光 , 臭いなどで信号を作らなければならない . しかしここで , Drake の問題に突き当たる . つまり , 送信者が自分勝手に作った信号 (という名の暗号) では , 相手には理解されないのである .

この問題を解くには , 次の 2 つの方法がある .

5.2.2 「心の理論」を共有知識とする方法

「心の理論」とは、Premack と Woodruff(1978) が提唱した、他者理解の認知的システムの名称である。他者を理解する時、相手の状態に心的状態を帰属させ、その行動に意味を付与するして、相手の状態を推定し解釈する、というものである。要するに、相手の立場に立ったつもりになって、相手の心理状態を解釈する方式である。

実例を見てみよう。亀山 [88] は、イヌ・ネコ・ハムスター・コトリ・カメ・サカナの飼い主 23 人にインタビューし、ペットの行動や状態から何がわかるかについて質問した。

イヌ・ネコ・ハムスター・コトリ¹の飼い主は、ペットが以下のような状態であるとき「ペットはそのことが好きなのだ」と解釈する。

1. 同じ行動を繰り返す。
2. 反応が速い。(刺激提示から反応開始までの時間遅れが短い。)
3. 行動の強度が強い！「たくさん食べる」、「強くする」など。
4. その場に留まる。

ペットの振る舞いから意味を受信するためには、“ペットにも人間と同じ様な心があるとしたら、これらの状態はどのような心理状態・生理状態が引き起こしたもののなのか”と、擬人化による推定が必要である。逆に言えば、ペットには人間と類似した心理システムなど無く、これらの振る舞いは単なる現象に過ぎないと見なしている限りは、飼い主はペットから何ら情報を得ることが出来ない。

このように、相手を擬人化して相手の振る舞いという暗号を解く戦略が成り立つ。

しかし、ペットの擬人化はしばしば行き過ぎることが多い。イヌやネコが人間と同じ様な心理システムや知能を持っているわけでは、当然ない。しかし、飼い主はイヌやネコに人間の言語でよく話しかける。当然、イヌやネコは複雑な言語情報はわからない。それでもなんとなくイヌやネコは反応する。そして、ペットと意志疎通が出来ているように思えてしまう。この“相手に対するひいき目”をデヴィッドソンは“好意の原理”と呼んだ [84]。

しかし、“好意の原理”は単なる非科学的で無用なひいき目として捉えるよりも、表現という暗号解読のための有用で進化適合である本能と考えた方が正しい

¹このことから解るように、飼い主が心理を理解しやすくコンパニオンアニマルとなり得るのは、イヌ・ネコ・ハムスター・コトリ以上の動物であるようである。1990 年代中頃から、日本で動物飼育を題材にした漫画が流行しているが、そこで取り上げられる動物も、この 4 種である。

だろう。

5.2.3 表現プロトコルの偶然発生と進化による方法

「心の理論」を用いて相手の振る舞いから推察できる信号の意味は限られている。例えば「出産の同期」という意味内容を、振る舞いで相手に察してもらうことは、相当に困難であろう。ミツバチが餌のありかを仲間に表現するダンスを「心の理論」式の通信で成し遂げることは、絶望的に不可能である。

従って、特殊な伝達内容を表現するためには、まず表現専用の特殊な行動を作り、その行動が特定の意味を表すものである規約を送信者と受信者とで共有しなければならない。つまり表現プロトコルの共有である。

だが、表現プロトコルの共有は、Drakeの問題で見たように、容易には出来ない。

従って、動物が特殊な意味を伝達する表現専用の行動を有するに至った経緯は、突然変異によるものと考えられる。つまり、ある個体が突然変異のため、異常な行動を行うようになり、なおかつ、受信者がその行動を従来の方法で解釈しようとした結果起こす反応が、偶然その文脈にふさわしいものであったと、考えるしかない。そして進化適合の結果、その“異常な行動”が“表現専用の行動”として遺伝的に定着するに至ったのであろう。この過程をティンバーゲンは儀式化と呼んだ [93, 18]。

儀式化された表現行動の例は実に多い。求愛の時期になると体表に発色する婚姻色「ホーホケキョ」など定型で複雑な構造を持つ鳴き声信号、ミツバチのダンス、人間の言語などである。

5.3 対人行動物研究での表現の課題

儀式化された表現行動、つまり意味特定性の強い表現を対人行動物に行わせて人間に伝達させることは、本質的な工学研究課題にはならない。なぜなら、これらの表現は行えば安定して解釈されるから、何ら難しいところはない。ロボットが「こんにちは」と話せば、人間に意味は確実に伝わる。だが、ミツバチのダンスで人間に表現したところで、人間がプロトコルを知らないのであれば理解できないままである。

一方、非儀式的表現（つまり受信者が送信者の状態を推察できるような振る舞い）を対人行動物に行わせることは、工学的研究課題として成立するだろう。未だ

全貌の解明には至っていないが、このタイプの表現にも法則があり、それを対人行動物のアルゴリズムに移植することは可能だと思われる。また、今後のロボットやCGの発達に伴い、非儀式的表現の利用場面も増えるだろう。

5.4 非儀式的表現の構造

ここで、非儀式的表現の全体像に関する理論をまとめる。

この問題に初めて着手したのは、ダーウィン [17] であった。ダーウィンは非儀式的表現の生成には、次の3つの原理が働いているとした。

連想表現の原理 動物は伝達したい内容を連想させるものを提示することで表現する。怒りを表現したい時は、歯を剥いたり、拳を握って上げてみせたり、前進したり、力強くすばやく動いたりするという戦闘準備の体勢を、相手に見せる。すると相手はこちらの敵意が解る。

反対表現の原理 伝達したい内容を連想表現の原理で表現しづらい場合は、逆の意味内容を表す表現の特徴を逆にした表現を提示する。例えば、友愛心を表現したい場合は、まず友愛の逆内容の敵意の表現を考え、表現の特徴を全て逆にして行う。つまり、歯を剥かず、腕は脱力し、後退し、力をぬいてゆっくり動くことで、相手に友愛心を伝達する。

神経的反射の振る舞いの原理 上記以外に、神経の反射などにより発生する振る舞いもある。膝蓋反射など。この原理は、高等動物の表現にはさして重要ではない。

このように、非儀式的表現は、連想表現と反対表現の二極構造からなっている。では、この対立軸の方向は、何と何を指しているのだろうか。

ダーウィンは、この軸は敵意表現と服従表現を指すように配置されているという。つまり、攻撃の振る舞いを連想させる怒りの表現と、その反対表現としての服従の表現が、動物や人間の表現の基礎である。そして、その他の表現は、この対立軸から派生したものであると考える。

上述したように、表現はそのコストに見合った効果がなければ発生も発達もしない。動物が生きていくなかで、最もリスクな問題は戦闘である。これをにらみ合いで決着をつけることを最重要課題である。このため、動物の身体運動や鳴き声などのコミュニケーション信号は、まず敵意/服従の表現を優先して表現するように設計されたのであろう。

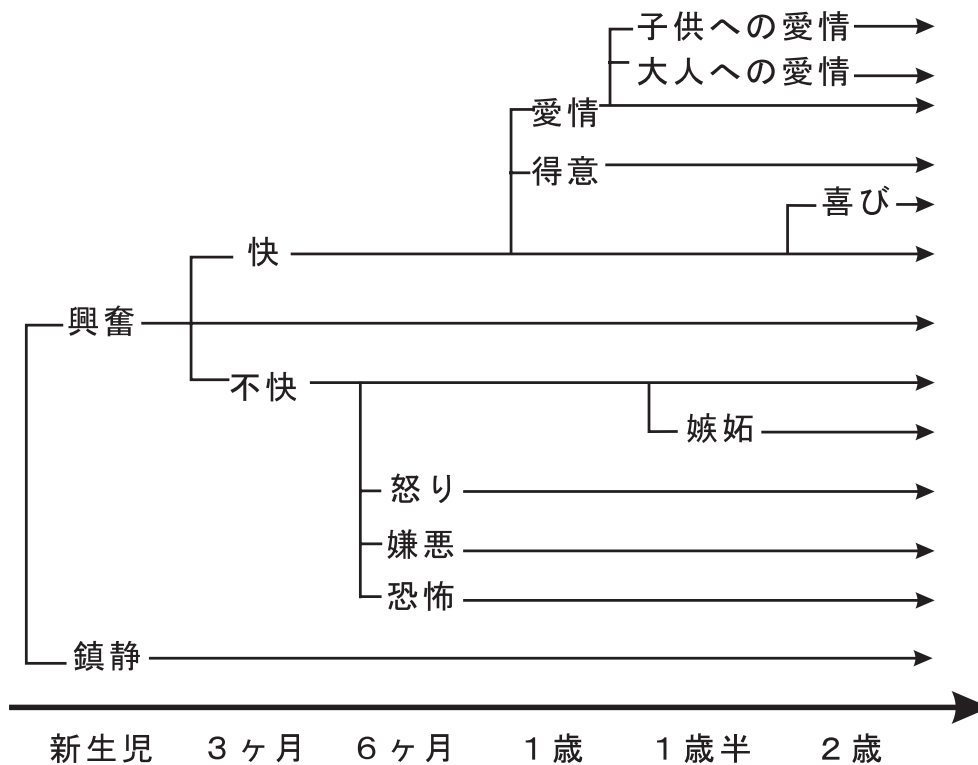


FIGURE 5.1: BRIDGES の情動分岐図

実際、動物の身体の表現は、基本的には敵意/服従を表現するものである。例えば、イヌの尻尾は、敵意の心理状態の場合はピンと上に立てる。受信者に戦闘時の筋肉の緊張を連想させるためである。逆に、おびえている場合は、尻尾の形状的特徴を反対にして、うなだれさせる。尻尾を振ることで喜びを表現することが出来るが、これは突然変異で生じた儀式化された動きであろう。

Bridges[19] は、別の案を出している。彼は、赤ちゃんの情動 (感情) が月齢とともに、どのように分化し発達していくか、その樹形図を 1932 年に作成した。それは Fig.5.1 のような分岐図となる。つまり、人間には、敵意/服従という相手に対する感情 (社会的情動) より前に、鎮静/興奮や快/不快という内部状態が備わるものとしている。そして、赤ちゃんが、知能の発達に伴って不快の発生源を認知できるようになると、不快の発生源に対して怒りという感情を持つことができるという。

つまり、Bridges は “活発に活動しないこと” を “鎮静の表現” と見なした。一方ダーウィンは “活動しないこと” を表現行動としては意識しなかった。また Bridges は人間の赤ちゃんの情動の分岐発達を研究対象とし、人間特有の多様な情動を分

析した。ダーウィンは、人間よりも下等な動物に対しても広く成立する、敵意/服従という連想表現・反対表現の原理を提示した。

5.5 対人行動物への応用

5.5.1 対人行動物でのモナッド表現の基本原則

以上の理論の対人行動物への応用法について、本論文では以下のように仮説を立てる。

- 対人行動物においても、連想表現の原理と反対表現の原理が成り立つ。つまり、人間に「心の理論」を介して何かの感情を感じさせる表現と、その表現の特徴を反転させて逆の意味内容を伝える表現という、2つの戦略が対人行動物でも可能である。
- 鎮静/興奮の表現は、活発に動作しない/活発に動作するという行動状態の制御によって表現することができる。
- 興奮の表現はより細かい内容を表現するため分岐させることができる。その際、身体運動や発声による表現は、快/不快（社会的な表現としては相手に対する敵意/服従）のなどの対立軸に沿った、連想表現の原理と反対表現の原理を基礎として組み立てられる。

5.5.2 対人行動物でのモナッド表現の選定

表現の方法は多種多様に存在する。実際の動物同士のコミュニケーションの例を見ると、五感を介して行われるコミュニケーションはもちろんのこと、電気ウナギの電気による通信やクモでの振動による通信などの特殊なものも存在する。

対人行動物が用いることができそうなコミュニケーションの方式を、Table 5.1に挙げ、長所短所を検討する。視覚・聴覚・嗅覚・温度感覚などから代表的なコミュニケーション手段を取り上げた。

符号化(coding)とは、意味を表現に割り当てる方式のことである。有縁的(iconic)とは表現内容と表現形態が直接関連を持っている符号化のことである。例えば、“怒りの情動”を表現する時に“握り拳を見せる”ことや、“犬”のことを表現するとき“ワンワン”と言うことは、有縁的な符号化である。一方、規約的(arbitral)と

TABLE 5.1: BRIDGES の段階から見たモナッド表現の可能性

表現形態	生死	興奮鎮静	快不快	詳細な情動	符号化
呼吸鼓動運動	(直接的)		×	×	有縁的
体温	(直接的)		×	×	有縁的
身体運動					有縁的
顔表情					規約的
臭い()	×				規約的
鳴き声					有縁的・規約的

“臭い” は虫や動物などの化学物質によるコミュニケーション。
人間では極端に退化しているので、実質的に全て×。

【凡例】

- ：表現が可能であり，その表現にまた適している
- △：表現が可能ではあるが，場合によっては困難
- ×：表現は不可能

は，表現内容と表現形態の関係を天下りの的に決めてしまう方式である。“犬”のことを“dog”と綴って表現することなどがこの方式である。

規約的な表現を対人行動物にも行わせるようにするためには，符号化の規約を守りさえすればよく，課題はそれだけである。従って，これは工学的な問題ではない。

一方，有縁的な表現は，表現内容を感じさせる表現形態を，対人行動物に於いて如何に巧みに生成するかという問題を持ち，工学的にやりがいがある問題である。

本論文では，特に，呼吸鼓動運動と身体動作による情動表現を取り上げたい。呼吸鼓動運動は生死や興奮鎮静を表現するのに非常に直接的な手段であり，生々しさやリアルさを感じさせると期待できる。身体動作表現は最も基本的な非言語コミュニケーションの手段であり，そのため多くの研究事例で取り込まれているが，表現の法則を系統的に立てて行っている例は非常に少ない。だが，これほど基本的なものならば，表現の法則があってしかるべきである。本論文では，ラバンの身体動作表現理論をその法則の候補として取り上げる。

有縁的な符号化での鳴き声の表現が取り残されることになったが，これについては Darwin と Morton の法則 [18] があり充分解明されているので，本論文で特に取り扱わない。

よって以降では，6章にて鎮静/興奮の表現についてロボットの擬似呼吸・鼓動を用いる試みを実験を通じて検証する。また，7章にて，身体運動による表現を，

ラバン理論による興奮表現の分岐を用いて整理し，その構造を数理化して，実験にて検証する．

第6章 呼吸鼓動による表現

本章の要旨

呼吸や鼓動のように動物ならではの生理的な身体運動現象は，それに接する人間に対して，1) 生き物らしく感じさせる，2) 安心しているのか切迫しているのかなど対象の情動状態を演出するなどの効果をもたらす．

したがって，1) ロボットを動物に似せるためには，このようなヴァイタルサインの模倣が必要であり，また2) 切迫感演出による対人アラームなどにも応用できるだろう．

本章は，ロボットの擬似呼吸・鼓動運動が人間に与える心理的作用と，擬似呼吸・鼓動運動の速さとリズム構造との相関関係を，実験により明らかにする．

6.1 研究の背景と目的

生き物らしさの表現は，人間に対して大きな心理的效果を与える．それは瞬間的であり，人間が物体に接した時に，本能的に早く判定することである．

生き物らしさの要素としては，身体の動き，体温，外見などがある．このうち，本章では，呼吸運動と鼓動運動をとりあげる．

鼓動の音は，テレビや映画の特殊効果でしばしば用いられるように，聴く人をもドキドキした切迫した心理状態にさせることが知られている．また，ゆっくりとした鼓動音は，落ち着かせる [10]．

呼吸も，鼓動と同様に効果音として用いられる．また，呼吸は胸郭や腹部の変形をともなうため，見せることで観客に表現することも可能である．

このように既に特殊効果として多用されてきた呼吸・鼓動信号であるが，いずれの場合でも動物・人間の鼓動に類似したリズム形態の信号を用いている．動物ではあり得ないリズム形態ではどのような対人心理効果が得られるのか，不明で

あった。

しかし、機械での擬似的な呼吸や鼓動信号の模倣では、リズム構造を動物のそれに類似させないということも可能である。また、動物類似の範囲内であっても、裁量も幅がある。これは、対人表現を行うロボットが呼吸・鼓動表現を備える場合に、いかにリズム構成を設定するかという問題になる。また、一般の機械の動作音が持つリズムが、人間に対してどのような影響を及ぼすかも知りたい。

そこで、本章では、ロボットに様々な呼吸運動や鼓動運動に模した表現信号を発生させ、人間に感受させる実験を行い、呼吸・鼓動信号における、動物らしさの条件や、対人心理効果について分析する。

6.2 呼吸・鼓動の知覚とその効果

6.2.1 呼吸の構造

医学用語としての呼吸とは、細胞レベルでの酸素と二酸化炭素の交換も含めるが、本論文では、外呼吸を単に呼吸と呼ぶことにする。外呼吸のための胸郭・腹部の運動は呼吸運動と呼ばれる。

吸息の際は、胸腔を拡張させるために、胸郭が上方および左右に拡張し、また横隔膜の平坦化して腹部を下方に押しやるため、体幹は胸部から腹部にかけて膨張する。呼気の際は逆に、胸郭の収縮と、腹壁の筋肉群の収縮などによって、体幹が縮む。

呼吸のリズム構造は、吸息・呼息・休止期からなる。その時間比率は、正常な場合、1 : 1.5 : 1 である [13]。

健康な成人の呼吸周期の典型値は、安静時は 5.1[s]、軽労働時に 3.5[s]、重労働時には 2.8[s] である。新生児の平常時な呼吸の周期は 2.1[s] である。

6.2.2 鼓動の構造

鼓動とは、心音のなかで、ドキドキと短く強い音と、その際の心臓部の脈動的振動を指す。

正常な心臓の場合、短く特に強い心音には、I 音と II 音がある。I 音は、僧帽弁の閉鎖と動脈への血液駆出などによって生じる音である。II 音は、大動脈弁と

肺動脈弁の閉鎖によって生じる音である．I音からII音までの時間間隔は，II音からI音までのそれより短い．

健康な成人の安静時の場合，鼓動の1周期はおよそ1~0.7[s]程度である．乳幼児の場合は0.5~0.6[s]程度である．運動時には，鼓動周期が成人では0.3[s]程度まで短くなる．

6.2.3 呼吸・鼓動の速さの決定要因

本川は，様々な動物で比較した結果の経験則として，呼吸や鼓動の速さが体重依存すること指摘している．それによれば，呼吸・鼓動の周期は体重の1/4乗に比例する．そこで本論文は，この法則を利用して，ロボットの体重に相応しい呼吸・鼓動周期を定める．

また，呼吸・鼓動運動は，身体の状況に応じて制御されている．体内の内呼吸の需要に応じるため無意識的に制御される．また呼吸は発声や嚥下する場合には意識的に制御される．また心理状態によっても影響を受ける．例えば，運動しようとする心構えをし緊張するだけでも呼吸・鼓動運動は活発になる．

体内のエネルギーの消費は，安静休息を1とした場合，座位では1.3，歩行は4，かけ足は8，自転車乗りは5，入浴は2，夜間睡眠時は0.80~0.9が典型値である．従って，運動時には呼吸・鼓動運動は，周期を短くし，1回の換気量・拍出量を大きくしなければならない．従って，運動時には，呼吸・鼓動運動も頻繁にかつ大きく行われる．

6.2.4 呼吸・鼓動表現の手段と効果

呼吸を感じるには，息の気流を触覚等で感じる，息の気流の音を聞く，体幹の変形を見る，呼吸運動に関連する筋肉の緊張・収縮を触覚で感じる，などの方法がある．

鼓動を感じるためには，心音を聞く方法と，振動を触覚で感じる方法がある．また，鼓動を連想させる表現として，目に見えるように誇張して見せる方法もありえる．例えば，映画では，人工皮膚の下に忍ばせた風船に圧搾空気を送り込み鼓動や脈動を誇張して見せる手法がある．この技法は古くは1920~30年代のシリーズ喜劇“ちびっこギャング *Our Gang Comedy*”から，“狼男アメリカン *An American Werewolf in London*”(1981)，“マスク *The Mask*”(1994)などに至るまで使われて

いる。

呼吸・鼓動運動には多種多様の情報が反映している。従って、人間は自分や他者の呼吸状態に接することで、生理状態や心理状態を推測したり、印象や意味を感じる事が起こり得る。

Morris[10]に依れば、毎分60～70回ゆるやかな鼓動心音には、幼児を鎮静させる効果があった。

6.2.5 人間のリズム認知特性

リズムとは、音の列の周期的な時間構造である。

1拍子というリズムが成り立たないことからわかるように、リズムとは主となる先頭部分があり、それに引き続く従となる部分という、主従の複数の部分からなる構造となっている。

普通、音量が強い部分がリズムの先頭部分と認知される。いわゆるアクセントである。また、音の高さ(音程)が前の音から大きく移動した場合も、先頭部分と認知されやすい。

では、音量と音程がほぼ等しい場合はどうなるであろうか。

この場合は、マイヤー[14]によると、間隔が短い音同士は、認知上は統合される傾向がある。つまりこの場合、後続の音は前の音の従とされ、リズムの先頭部分には認知されにくい傾向がある。

また、芥川[15]によれば、人間は2拍子や3拍子に認知する傾向がある。4拍子であっても、微視的には前の2つの拍子で2拍子、後ろの2つの拍子2拍子をなし、また前後の2拍子の組のペアで2拍子を作っていると感じやすい。5拍子は、2拍子と3拍子の直列として作曲されている。5拍子の音楽を先頭のアクセントとそれに続く4つの音とからなるリズムとして演奏すると、無拍子の音楽のように聞こえる。内部で2拍子と3拍子に分け、それぞれのアクセントをつけて演奏するのが正統的な演奏法である。

さて、心音の場合は、I音とII音からなる3拍子的リズムである。心音は、I音からII音までの間隔が短いので、I音を先頭にしてII音と統合して認知されやすい傾向にある。

この統合を押し進めると、I音とII音との間は音のある部分、II音と次のI音との間は音の無い部分、つまり東洋音楽でいう「間」の部分と、大雑把に認知されることになる。

リズムの速さは、単純にはリズムの周期構造の周波数と見なせる。しかし、演奏では、リズム速さに変化を与えることがある。特に東洋音楽では「間」を適切に伸縮させることが、周波数を維持することより尊重される。

つまり、リズムの速さの認知を強く支配する要素は、主の部分の出現頻度と、「間」の長短であろうと予想できる。リズム内の従の音の密度や長さや、音の認知上の統合により印象が摩滅し、結果リズムの速さの認知にはあまり影響を及ぼさないだろう。

6.3 擬似呼吸運動と擬似鼓動運動による動物らしさ感と切迫感の演出実験

6.3.1 実験目標

擬似呼吸運動と擬似鼓動運動するロボットに於いて、人間にロボットを動物らしく感じさせる効果と、呼吸運動・鼓動運動のリズム的条件との相関関係を分析することを、実験目標とする。

また、効果が予想される切迫感/安心感の表現についても、その効果を与えるリズム構造上の要因を分析する。

6.3.2 実験方法

被験者

20代の大学生 15人を被験者とする。

実験装置

Fig.6.1 に示すロボットを用いる。外皮として、犬のぬいぐるみを用いている。

この中に、センサ及びアクチュエータを Fig.6.2 のように配置した。センサは次章の実験で用いる。

アクチュエータは、鼓動に類似した振動と打撃音を発生させる擬似鼓動装置と、風船に圧縮空気を送り込み腹部を膨張・収縮させる擬似呼吸装置からなる。Fig.6.3

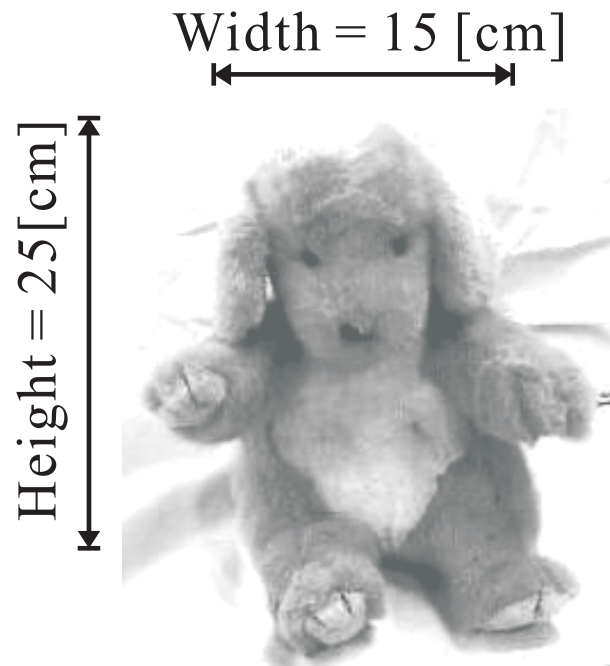


FIGURE 6.1: APPEARANCE OF THE EXPERIMENTAL ROBOT

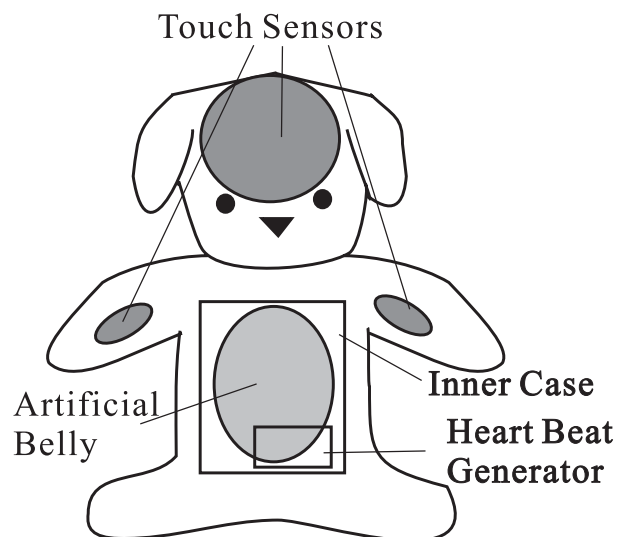


FIGURE 6.2: SET-UP OF THE EXPERIMENTAL ROBOT

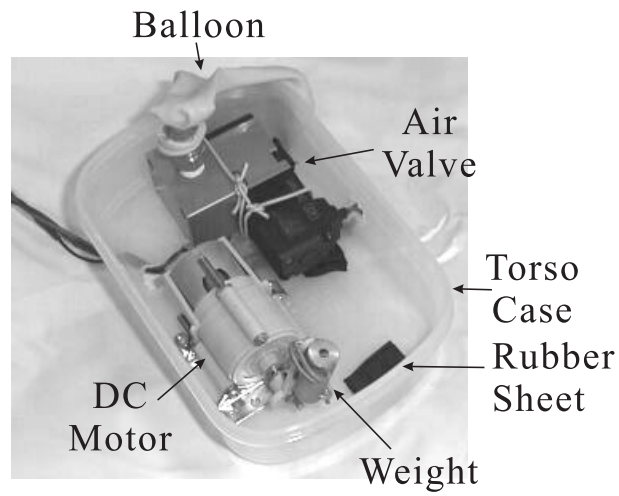


FIGURE 6.3: INSIDE OF THE ROBOT'S TORSO BOX

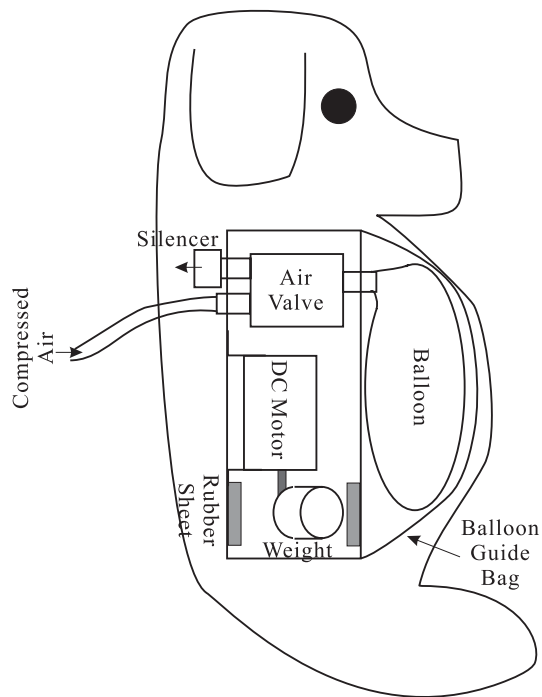


FIGURE 6.4: ACTUATORS' SETUP

はそれらの写真を，Fig.6.4 はそれらの配置と構造を表す．

擬似鼓動装置は，13[g] の分銅を，DC モータによって振り，ロボット胴体の筐体に打撃させることで，鼓動の心音に類似した音と衝撃を発生させる．

擬似呼吸装置は，Fig.6.4 に示すように，ロボットの背面から引き入れたゲージ圧 0.02 [MPa] の圧縮空気を，ロボット胴体内の電磁弁を介して，ロボット腹部の風船に導入し，腹部を膨張させる．また，排気は，電磁弁を切り替えて，ロボット背面のサイレンサから大気中に放出することで行う．サイレンサによって，電磁弁の駆動音は被験者に聞き取れないほどに減殺されるが，空気の流れによるシューという音は聞こえる．

ロボットの機重は 2[kg] である

要因計画

独立変数は，擬似呼吸運動の形態上特徴と擬似鼓動運動の形態上特徴である．本実験では，運動の速さとリズム構造に注目し，これら进行操作する．具体的なパラメータは後述する．

呼吸運動と鼓動運動の提示を同時に行うと組み合わせ数が大きくなるので，本実験では，別々に実験を行う．つまり，呼吸運動を被験者へ刺激として呈示する場合は鼓動運動は停止し，鼓動運動を呈示する場合は呼吸運動は行わない．

従属変数は，ロボットの呼吸/鼓動運動から被験者が感じる，ロボットの動物らしさ印象の強さと，ロボットが切迫/安心しているように感じる印象の強さである．

注意すべき剰余変数は，ロボットの外見・肌触り・体重・ケーブルなど静的な特徴が挙げられる．これらの要素の差による印象の変化も考えられる．本実験では，全ての実験条件にて，同一のロボットを用いることで統制する．

擬似鼓動運動のリズムパターン

擬似鼓動運動を記述するにあたり，運動のパラメータの置き方は Fig.6.5 のようにする．

実験に用いた鼓動は Fig.6.6 に図示した 6 つである．

H-1 $Span1 : Span2 = 250 : 500[ms]$ のリズム．これは，成人の平時の心音のリズムである．

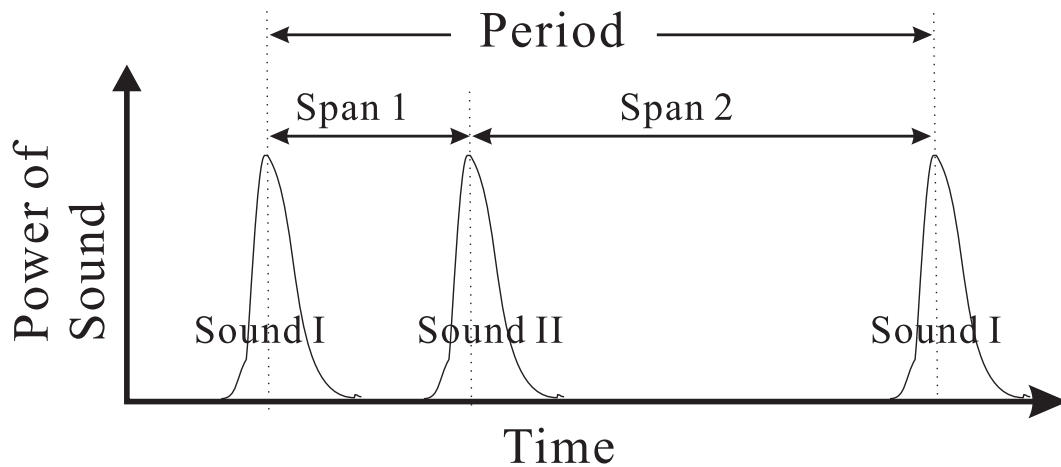


FIGURE 6.5: TEMPORAL STRUCTURE OF TYPICAL HEARTBEAT

- H-2 $Span1 : Span2 = 100 : 270[ms]$ のリズム . 極端に速い鼓動リズムである .
- H-3 $Span1 : Span2 = 100 : 650[ms]$ のリズム . 全体の周期は H-1 と同じであるが , 短い音の間隔が $100[ms]$ であり H-2 と同じというリズムである . 印象は , H-1 と H-2 のどちらに近いかわかるため実験する .
- H-4 $Span1 : Span2 = 250 : 1000[ms]$ のリズム . H-1 の $Span2$ を 2 倍に伸ばしたもの .
- H-5 $Span1 : Span2 = 375 : 375[ms]$ のリズム . 全体の周期は H-1 と同じのままにして , 音が等間隔にしたもの . 従って , 音の長さに差がないから , リズム構造が特定できない . 2 拍子でも 3 拍子でも , あるいは 1 拍子とでも解釈できる .
- H-6 $Span1 : Span2 : Span3 = 250 : 250 : 500[ms]$ のリズム . H-1 のリズムに , 余計な音を 1 つ付け加えたリズムである . 3 つの音で構成されているので , 動物の鼓動とは類似性が低くなると予想できる .

擬似呼吸運動の試験リズムパターン

Fig.6.7 に , 腹部の膨張と呼吸のリズム構成を示す .

このロボットは吸気は圧縮空気によって比較的能動的に制御されるが , 排気は大気への放出のため , 呼気期間と休止期間の境界をはっきりさせるようには制御

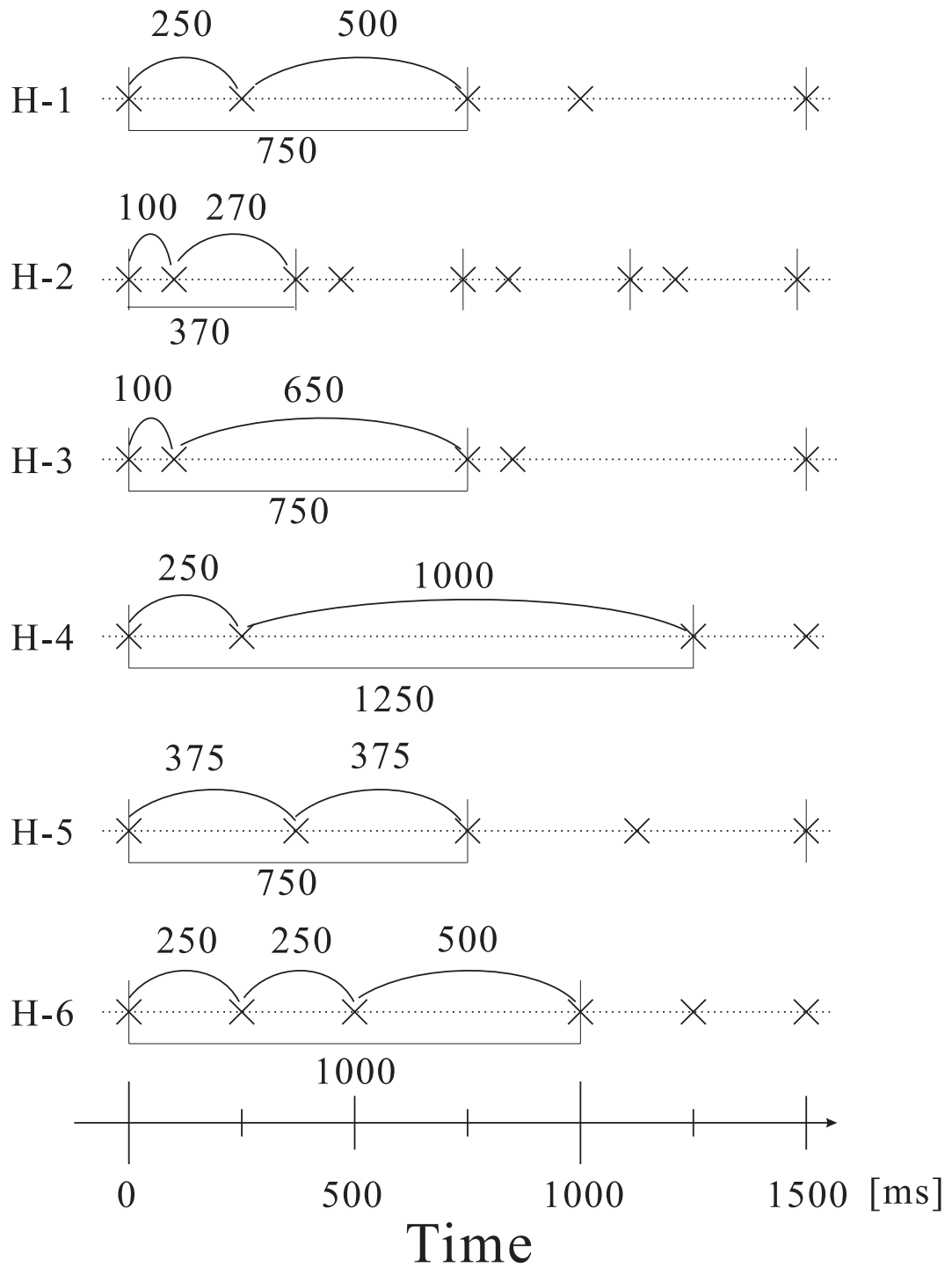


FIGURE 6.6: EXPERIMENTAL HEARTBEAT RHYTHMS

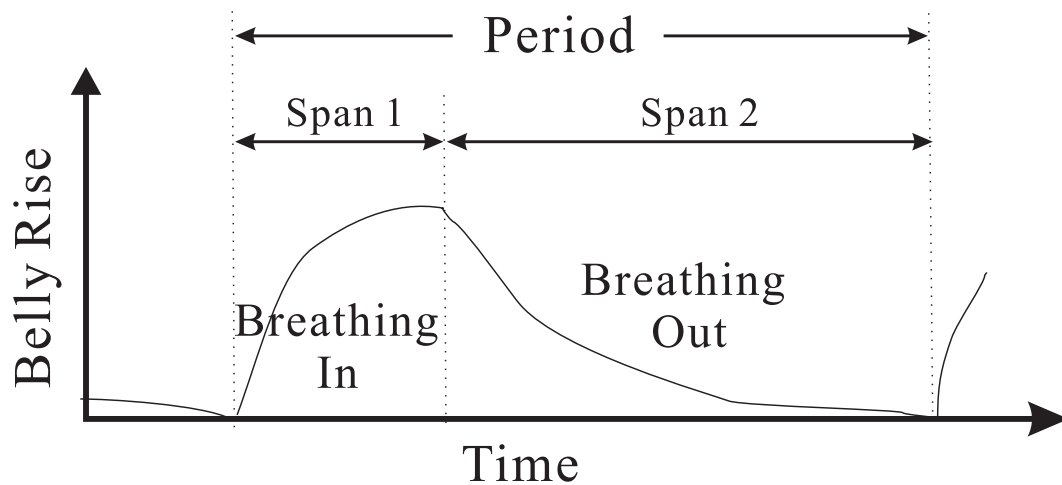


FIGURE 6.7: TYPICAL RESPIRATION CURVE

できない．そこで，本実験では，呼気期間と休止期間を区別せずに，吸気期間と呼気・休止期間の長さとの比率を制御する．

実験に用いた呼吸リズムは，Fig.6.8 に示す 4 通りである．

- B-1 膨張期：収縮期 = 500 : 2700[ms] のリズム．これは，成人の軽作業時の呼吸リズムを基にした．
- B-2 膨張期：収縮期 = 70 : 410[ms] のリズム．これは，成人の安静時の呼吸リズムを本川の法則に従って体重 5[kg] 相当の周期に縮めたものである．
- B-3 膨張期：収縮期 = 1600 : 1600[ms] のリズム．これは，周期は B-1 と同じであるが，リズム配分を 1:1 にしたものである．
- B-4 膨張期：収縮期 = 2700 : 500[ms] のリズム．これは，B-1 の吸気と呼気休止を逆転させたものである．

実験手続き

被験者には，ロボットを抱きかかえさせて，鼓動運動・呼吸運動の振動や膨張収縮がよく知覚できるようにする．

被験者は，各鼓動運動と各呼吸運動が 1 つ終わる度，それから得られた印象を評価する．他の鼓動運動や呼吸運動との比較ではなく，それぞれの運動パターンについて絶対評価するように被験者に指示する．

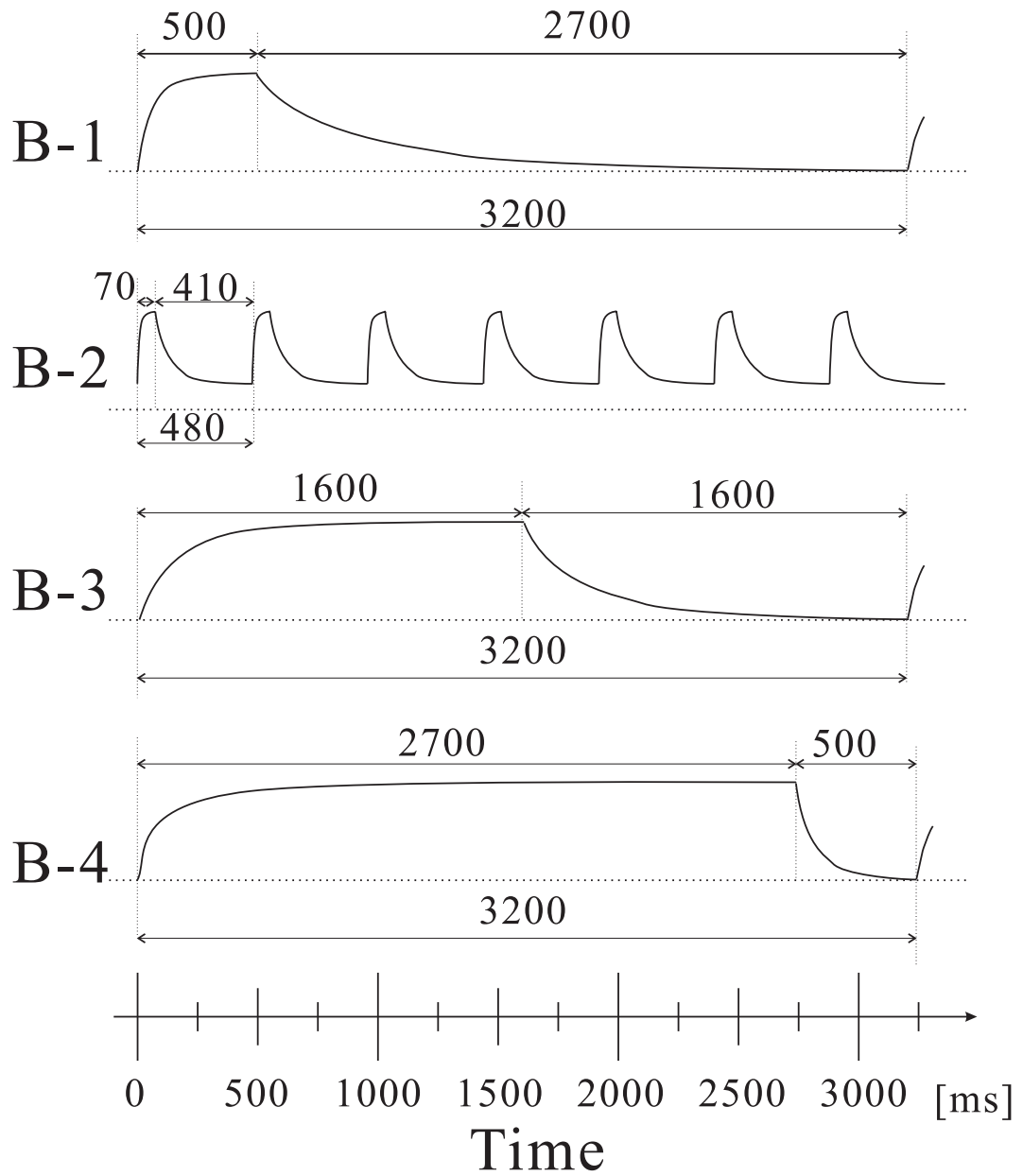


FIGURE 6.8: EXPERIMENTAL BREATHING RHYTHMS

印象の質問項目は2つある。

第1の設問では「このロボットの動きは、動物らしい/動物らしくない/どちらともいえない、のどれに近く感じましたか? 」と、3件法で聞く。

第2の設問では「このロボットの動きは、ロボットが切迫しているように感じる/落ち着いているように感じる/どちらともいえない、のどれに近く感じましたか? 」と、3件法で聞く。

実験結果の検定方法

回答結果分布が“どちらでもない”から特定の印象の方向に有意に偏って分布しているかを検定するために、Mann-Whitney の U 検定を用いる。

有意水準は5%とする。

具体的計算方法については、付録 A に記す。

6.3.3 実験結果

各印象の強さは以下のように定義して表現することにする。

$$\begin{aligned} (\text{動物らしさ印象の強さ}) &= (\text{ロボットは動物らしく感じると回答した人数}) \\ &- (\text{動物らしくないと回答した人数}) \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} (\text{切迫印象の強さ}) &= (\text{ロボットは切迫していると回答した人数}) \\ &- (\text{落ち着いていると回答した人数}) \end{aligned} \quad (6.2)$$

鼓動リズムの諸パラメータと、印象の強さとの相関関係を、Table 6.1 に示す。同様に、呼吸リズムの諸パラメータと、印象の強さとの相関関係を、Table 6.2 に示す。

実験結果 1: 動物らしさ感の演出効果

鼓動の場合のアンケート回答分布を Fig.6.9 に示す。

TABLE 6.1: 鼓動リズムの諸元と印象の相関

リズム名	リズム構造	最短音間隔 [ms]	最長音間隔 [ms]	長短間隔 の比	全体周期 [ms]	動物類似 印象強度	切迫感 印象強度
H-1	実例模倣	250	500	0.50	750	3	3
H-2	実例を速く	100	270	0.37	370	0	12
H-3	短間隔を短く	100	650	0.15	750	2	-3
H-4	長間隔を長く	250	1000	0.25	1250	0	-10
H-5	等間隔	375	375	1.00	750	-1	5
H-6	3音4拍子打ち	250	1000	0.50	1000	-7	0
切迫印象強度との積率相関係数		-0.28	0.13	-0.25	-0.30		
動物類似感強度との積率相関係数		-0.13	-0.96	-0.25	-0.91		

TABLE 6.2: 呼吸リズムの諸元と印象の相関

リズム名	リズム構造	膨張時間 [ms]	排気時間 [ms]	膨排時間 の比	最短時間 間隔 [ms]	最長時間 間隔 [ms]	短長間 隔の比	全体周期 [ms]	動物類似 印象強度	切迫感 印象強度
B-1	実例模倣	500	2700	0.19	500	2700	0.19	3200	0	-3
B-2	実例を速く	70	410	0.17	70	410	0.17	480	-6	10
B-3	等間隔	1600	1600	1.00	1600	1600	1.00	3200	7	-9
B-4	吸気を長く	2700	500	5.40	500	2700	0.19	3200	3	-10
動物類似感強度との積率相関係数		0.72	0.28	0.37	0.89	0.53	-0.43	0.85		
切迫印象強度との積率相関係数		-0.82	-0.31	-0.58	-0.69	-0.80	-0.43	-0.96		

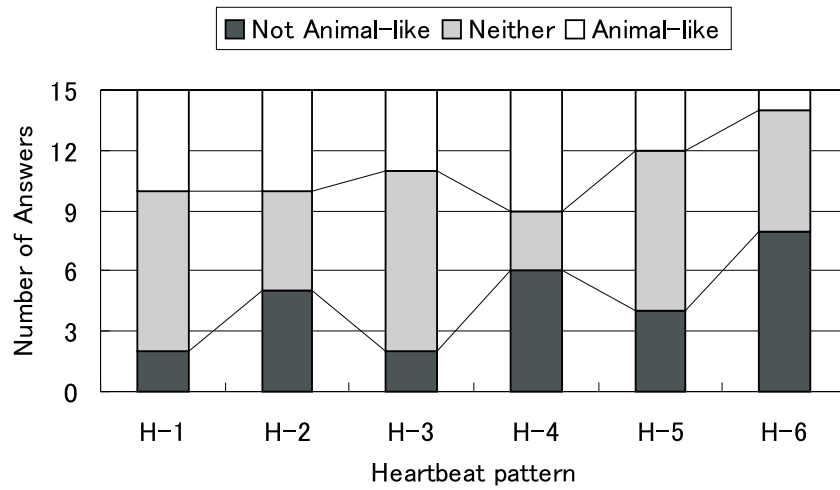


FIGURE 6.9: RHYTHM PATTERN OF HEARTBEATS VS. RESULT OF ANIMAL-LIKE IMPRESSION ANSWER DISTRIBUTION

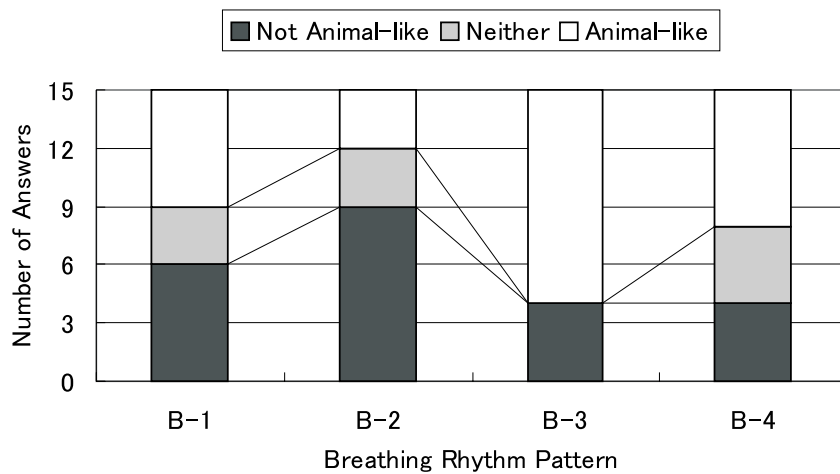


FIGURE 6.10: RHYTHM PATTERN OF BREATHING VS. RESULT OF ANIMAL-LIKE IMPRESSION ANSWER DISTRIBUTION

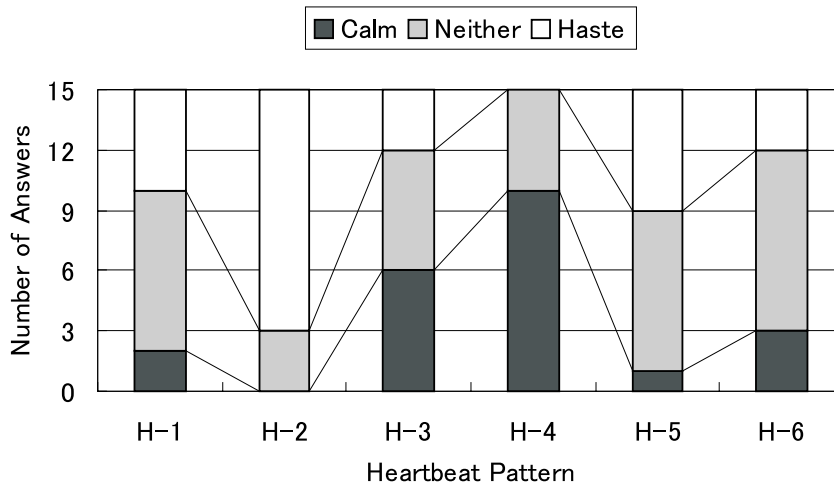


FIGURE 6.11: RHYTHM PATTERNS OF HEARTBEATS VS. RESULT OF HASTE/CALM IMPRESSION DISTRIBUTION

H-6の3音リズムでは、有意水準1%で有意に動物らしくない印象を与えた。これ以外の鼓動パターンでは、回答は“どちらでもない”中心に分布し、特に動物らしさ演出についての効果が、有意にあるとは言えなかった。

呼吸の場合のアンケート回答分布を Fig.6.10 に示す。

B-2 (70: 410[ms]) は有意に動物らしくない印象を与えた。逆に、B-3 (1600:1600[ms]) は有意に動物らしい印象を与えた。B-1 と B-4 は、有意な演出効果を生じなかった。

実験結果 2: 切迫感の演出効果

鼓動の場合の切迫感アンケート回答分布を Fig.6.11 に示す。鼓動の周期と切迫印象の強さの相関状況を可視化するため、Fig.6.12 に、横軸に鼓動周期、立軸に切迫印象の強さをとり、実験データと近似直線を示す。

同様に、呼吸の場合の切迫感アンケート回答分布を Fig.6.13 に示す。呼吸の周期と切迫印象の強さの相関状況も、同様に Fig.6.14 に、横軸に鼓動周期、立軸に切迫印象の強さをとり、実験データと近似直線を示す。

呼吸・鼓動いずれの実験においても、運動の速さと切迫した印象を与える強さとの間には強い正の相関があった (Table 6.1, Table 6.2)。相関係数は、鼓動の場合 0.87 であり、呼吸の場合は 0.96 であった。この関係を一次式で近似すると、

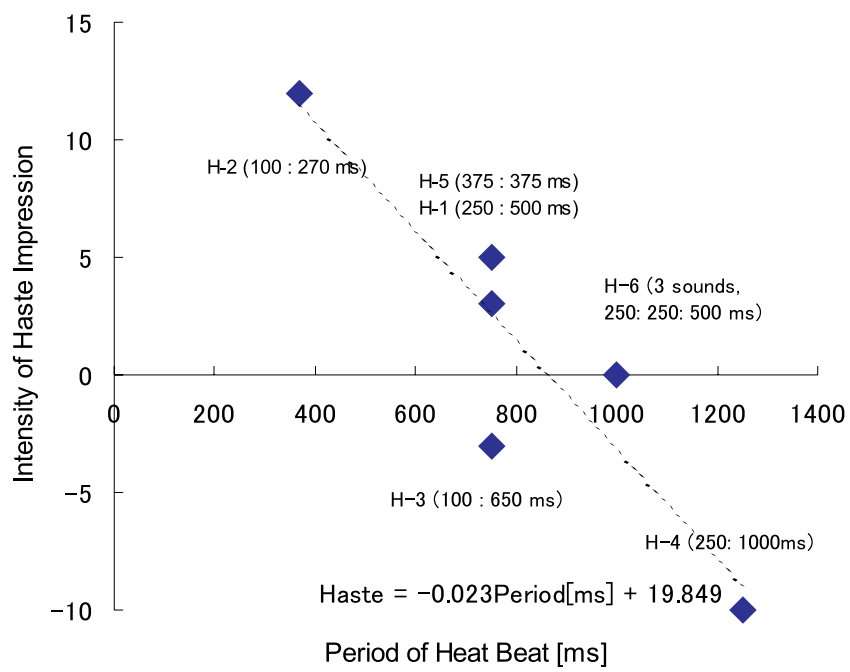


FIGURE 6.12: PERIOD OF HEARTBEAT VS. INTENSITY OF HASTE IMPRESSION

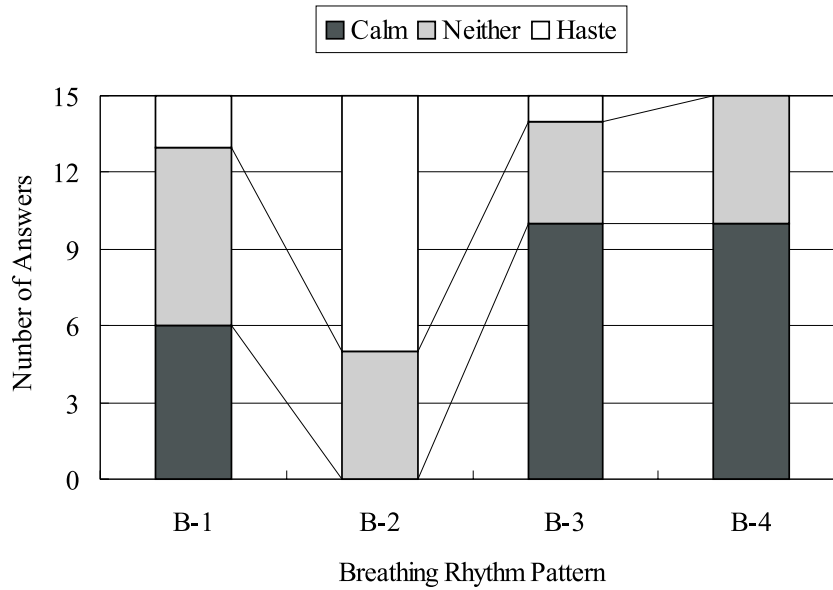


FIGURE 6.13: RHYTHM PATTERNS OF BREATHING VS. RESULT OF HASTE/CALM IMPRESSION DISTRIBUTION

Fig.6.12 に示された鼓動周期 (Period) と切迫印象強さ (Haste) では、

$$Haste = -0.023Period[ms] + 20 \quad (6.3)$$

という関係を持ち、切迫と安心の印象の切り替わりの閾値はおよそ 0.87[s] と推定される。

同様に Fig.6.14 に示された呼吸周期と切迫印象強さとの関係は

$$Haste = -0.0065Period[ms] + 13 \quad (6.4)$$

と近似され、切迫と安心の印象の切り替わりの閾値はおよそ 2.0[s] と推定される ..

また、呼吸リズムの H-1, H-3, H-5 はいずれも周期が 750[ms] と等しい。しかし、H-5, H-1, H-3 の順に切迫感が強い。このように周期の長さが等しくとも、リズムの構造が異なることで切迫感効果に差があるように見える。しかし、U 検定してみると、一番差が大きい H-3 と H-5 でも、かろうじて有意水準 10% で有意

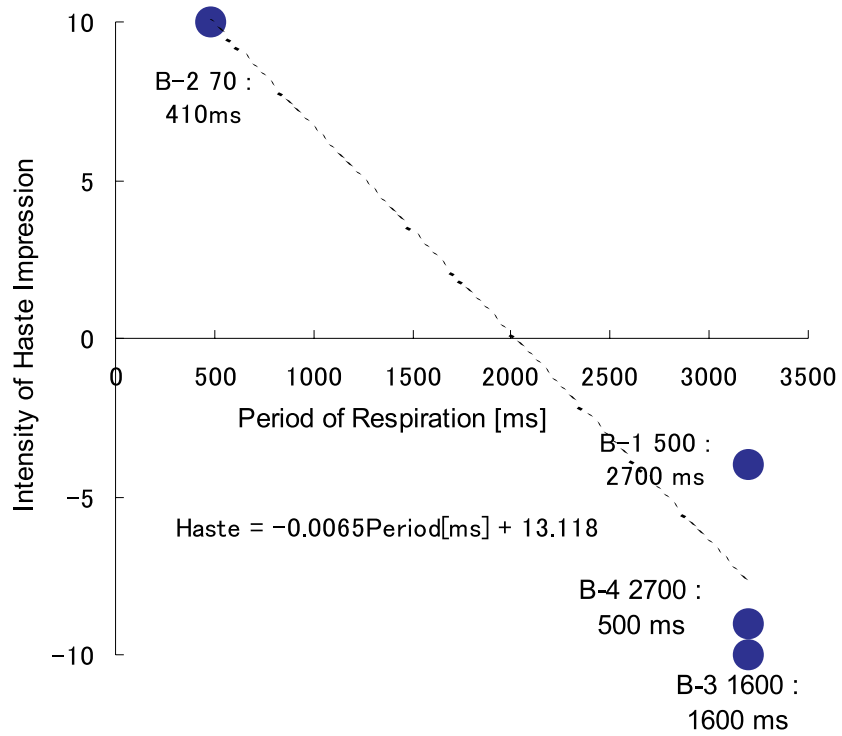


FIGURE 6.14: PERIOD OF BREATHING VS. INTENSITY OF HASTE IMPRESSION

差が認められる程度なので，本実験での基準である有意水準 5%では差があると断定することはできない．

6.3.4 考察

動物らしさ感の演出の支配要素

H-6 の鼓動の 3 音リズムは，動物らしくない印象であった．普通の人間の鼓動は 2 つの音から構成される．従って 3 音リズムは平常鼓動リズムに対して明らかな形態上の相違がある．また，実験した鼓動リズムの中では，H-6 のみが 3 音であり，また動物らしく感じられなかった．従って，H-6 の実際の鼓動リズムに対する形態上の相違が，動物らしさの知覚を支配したと考えられる．

このように，動物らしさの知覚には，実際の動物での特徴との形態上の類似性が必要条件となることが分かる．

呼吸の実験結果では，極端に速い呼吸リズムである B-2 が動物らしくない印象を与えた．これは，動物ではあり得ない程にあまりに速い呼吸のため，実際の動物での特徴との形態上の類似性を失った結果と考えられる．

また，B-3 は，人間の平常時の周期 (3.2[s]) であり吸気期と排気期が同じ長さのリズムであるが，これは動物らしい印象が有意に強かった．この程度の速さとリズム配分が，人間の考える典型的な呼吸であるのだろう．

切迫感の演出の支配要素

切迫感については，“速い運動 (=短い時間スパン) は切迫感を与える” ことが実験の全体的な傾向だった．

より細かく見てみよう．

鼓動の分析結果の Table 6.1 と呼吸の分析結果の Table 6.2 とを見比べてみる．

鼓動の切迫感は，最も長い音間隔の長さと強い負の相関している ($r = -0.96$)．6.2.5 節で紹介したマイヤーの理論では，音の間隔の短いものは一つの音としてまとめられて認知される傾向がある．そのため，短い音の間隔より，長い音の間隔の方が次の音を待つ時間，つまり「間」として意識されやすいのだろう．このため，長い音間隔の方が切迫感の知覚に強く作用したと言える．

一方，呼吸の切迫感は，鼓動と同様に最長時間間隔とも相関しているが，吸気

膨張時間の長さ強い負の相関している ($r = -0.82$)。どちらが主要素なのか、あるいはどちらも切迫感に関係するのかは、呼吸を4例しか実験していないので論じられない。しかし、鼓動の結果とは矛盾するものではない。

さて、本川の法則は、呼吸と鼓動の周期には体重に応じて生物学的に相応な値があることを意味していた。今回の実験の場合、ロボットはの重量は2[kg]であり、被験者はロボットを抱きかかえていたから、その重量をよく実感していたはずである。

しかし、今回ロボットの体重に対して生物学的に相応と思われる速い呼吸や鼓動は、切迫した印象を与えた。人間の通常の速さの呼吸・鼓動運動は、落ち着いて感じられた。つまり、人間は、相手の体重から生物学的に相応と思われる呼吸鼓動の速さを見積もるという作業はせず、単純に自分の呼吸鼓動速さと比較して、切迫感を判定していると考えられる。

切迫感の演出の量的指針

安心感と切迫感の印象の切り替わりは、鼓動周期では0.87[s]、呼吸周期は2.0[s]程度と推定された。

この値は、成人の人間の正常時の呼吸・鼓動周期に近い。よって、印象判定の閾値は、被験者の平常時の呼吸・鼓動周期に由来しているものと考えられる。

切迫感/安心感の表現は1次式で近似できる強弱表現であった。従って、切迫/安心を誤解釈されないように表現したい場合は、周期を、上記の閾値から離れた値になるように、大きく(例えば1.5倍などに)伸ばしたり、あるいは縮めたりすることで、印象の強度を強めることができるだろう。但し、あまりに極端な値の周期では、生き物らしく感じられなくなるので注意が必要である。

6.4 結論

本章では、ロボットの呼吸・鼓動に似せた運動が、人間に与える印象上の効果を実験で調べた。

ロボットの擬似呼吸鼓動運動から感じる動物らしさ印象の強さは、実際の動物の呼吸鼓動のリズム構造との類似性によって支配されることが分かった。

また、周期が短く速い呼吸鼓動運動は、切迫感を演出するところが分かった。切迫感の判定の際、人間は、ロボットの体重に対して生物学的にふさわしい呼吸鼓

動運動の速さと比較するのではなく，人間の呼吸や鼓動の速さを基準にして判定していることが分かった．また，短い音の間隔より，長い音の間隔の長短の方が，切迫印象の強さに強く相関することが分かった．

これらの知見により，ロボットに動物らしさを備えさせ，切迫した心理状態や安心した心理状態を人間に表現するための，呼吸鼓動運動の設計法が得られた．

第7章 ロボットの身体運動による表現

7.1 研究の背景と目的

近年，エンタテインメントの分野では，ロボットやコンピュータグラフィックスによって構成したキャラクタの身体（以下“動作体”）の動作を用いて，人間へ表現する試みが盛んになりつつある．

動作体による表現の研究が目標とするところは，身体動作を適切に用いて人間とインタラクティブなコミュニケーションを行なう動作体システムの実現である．即ち，動作体が自己の動作が観客に与える印象を評価し，さらには自律的に自己の動作を生成し，表現すべき印象を場面に応じて適切に観客に与える技術の確立である．

動作体の動作が生成する印象は，動作の特徴を表す実体的な量（以下“物理的特徴量”）のセットによって説明され得ると考える．例えば，動作の速度が一般的に速ければ，観客はまず“機敏な動きである”などと動作の一般的な物理的状态に注目し，それに応じて“動作者は楽しいそうである”などの動作者の内面に関する印象を感じる．よって，観客がまず注目する物理的特徴量のセットをピックアップしてまとめることが，動作体表現の印象評価技術の鍵となる．

物理的特徴量のセットに求められる要件は，印象との相関が十分高いこと，一般の動作への適応が容易であるように運動の力学的・幾何的特徴を網羅的にカバーすること，動作体の制御システムが動作印象の自己評価の計算できるように数理的であること，表現の科学の知見を十分取り入れてあることである．

本章の目的は，上記の要件を十分満たす物理的特徴量のセットを提案することである．

関連する研究の主なものを上げる．

(1) 部分的な動作の物理的特徴量と，生成される印象の相関の分析に取り組む研究に，池浦ら [62] と柴田ら [63] と溝口ら [64] がある．これらの研究では，人間の

近くで動く産業用ロボットの運動を，その速度分布，加速度，対人接近軌道，などに注目し，それら物理量と人間が感じる主観的印象の相関を研究している．

(2) 動物型全身ロボットにおいて，全身的な動作の物理的特徴量と生成される印象の相関の分析に取り組んでいる研究もなされてきた．井口ら [60] は自動人形を開発し，その性能評価のために，“温もり”・“やさしさ”・“目を引く”の3つの主観評価項目を取り上げている．池浦ら [61] は，人間型動作体の運動自由度の大小が観客の主観的に感じる舞踊の類似度との関係を報告している．Hattori[38] らは，文楽での人形の感情の伴った動作と感情なしの動作との物理的な比較分析を行った．Mizoguchi[152] では，動物型ロボットの対人視線一致，対人間合い距離と，人間が感じる“ロボットが人間に注目しているか?”などの主観的対ロボット印象の相関関係を報告している．

しかしこれらの研究は，動作の物理的特徴量の設定は各問題で個別的になされた．つまり，一般の身体表現に対応し，印象と強い相関を持つ物理特徴量を提案するには至っていない．

本章の方針として，動作の物理特徴量として舞踊学にて実績があるラバン理論を基に物理的特徴量のセットを組織し，より一般の身体動作について，それが生成する印象を定量的に評価する方法を提案する．さらに，実験によりその有効性を示す．

7.2 動作体の身体表現とラバン特徴量

7.2.1 研究対象の身体表現

一般に表現は多種の要素が複合しているものである．しかし，本章は身体表現に関する要素の分析を目的としているため，実験は身体表現を以下の通りに限定したのに対して論じる．

1) 一方的表現: 見る人がインタラクション無しに傍観者として動作体を見る場合に限る．身体の接触や視線の一致などの，見る人の傍観性を侵す表現行為は取り扱わない．

2) 基本情動に関する印象: 見る人が感じ取る，動作体の基本情動(喜怒哀楽など)についての印象のみを取り扱う．これは身体動作を用いる製品分野において，実用的ニーズが大きいためである．

3) 身体表現単独: 音声表現などを併用しない．

4) 儀式化された表現の除外: “敬礼”の動作など, 文化により意味が特定された身体表現は研究対象から除外する.

5) 無文脈環境下: 表現の場面に, 特に文脈を用意しない. つまり動作体が踊る理由・きっかけについては, 見る人に示さない. また, 見る人が動作体の身体表現から得られる基本情動の印象のみに注目する. よって, 動作体が動作を行う意味や価値について, 見る人が主観的に下す判定については研究対象としない.

7.2.2 身体運動の解釈法

一般に多自由度である身体表現を, 少ない自由度の力学的・幾何的特徴を表す量の組としてまとめるという考えは, Darwin[17] に始まる.

Darwin は, 身体動作による表現には戦闘形態と服従形態の2つの形態による2極構造があるとした.

戦闘形態の表現とは, 相手を威嚇するために, 実際の格闘時の身体運動に類似する特徴をとり, 相手に見せる表現である. 例えば, 拳を作って腕を直線的に突き上げる動作表現は, 格闘時の身体運動を連想させるため, 見る人に怒りや決意の印象を与える.

服従形態の表現は, 服従の意思を示すための身体運動である. 後退など服従時に行う動作を相手に示すことでも可能である. また, 戦闘形態の特徴を反転させることでも, 服従の表現は可能である. 例えば, 拳をゆるめ腕を曲線的にゆっくりと下げる動作からは, 攻撃性は感じられず, 逆に安心感が演出されると考えられる.

舞踊学では, “身体動作の力学的・幾何的特徴”をより詳細に分類する枠組みを Movement System と呼ぶ [25].

有名な Movement System をとりあげよう.

世阿弥の「手体風智」「舞体風智」動作の, 具体性(作業性)対抽象性による分類.
何かの所作の真似しているものを手体風智, 漠然と揺れ動いている踊りを舞体風智と名付け分類した [26].

指揮法サイトウ・メソッド 指揮動作の予告性・突然性による分類 [28].

ダルクローズシステム 自己の体への接触や, 動きのリズムによる分類.

デルサルトシステム 動きの意味による分類.

Laban System 動きの力学的幾何学的特徴による分類 .

これらの中で Laban System は , 網羅性・明快性 , そして使用する概念の数理的明確性において , 最も優れている .

7.2.3 ラバン特徴量とその工学的解釈

Laban System で用いられる身体動作の力学的・幾何学的特徴項目は , その概念定義の具体性がゆえに , 数理的に定義し数量化すること出来る . この特徴量を以下 “ラバン特徴量” と呼ぶ .

本節では , ラバン特徴量の一般的な説明を述べ , その工学的解釈を挙げる . より具体的な定式化は , 個別の動作体に即して行う必要があるので , 次節で述べる . 定式化の一般性・一意性の議論は 7.2.5 節で行う .

Laban は , Movement System を構築するため , 特徴量の項目を 5.4 節で紹介した Darwin の敵意/服従システムを元にし , 戦闘/陶醉の 2 極構造の Movement System を考案した¹ .

戦闘形態は能動的でめりはりがあり活発な身体運動である . 逆に陶醉形態は酒に酔った時のごとくふらふらした力の弱い身体運動を意味する .

Laban は以下のように , 戦闘/陶醉形態を , さらに細分化した .

ラバン特徴量の項目には , 大別して “エフォート”(Effort) , と “シェイプ”(Shape) とがある . エフォートは動作の力学的特徴 , つまり動きの質を意味する . シェイプは身体の全体的な形状についての幾何学的特徴を意味する . そして , これらエフォートとシェイプも , 身体動作の特徴は戦闘形態 (Fighting Form) と陶醉形態 (Indulging Form) の 2 極構造をとるとした .

エフォートには次の 3 要素がある (Table 7.1 参照) .

力加減エフォート (Weight Effort): 原義は , 身体動作の力強さである . 身体運動が力強ければ (Strong) 戦闘形態であり , 逆に弱々しい場合 (Light) は陶醉形態である . 力強さを物理量として解釈すれば , 身体運動の実行に投入される単位時間あたりのエネルギーが該当する . この際 , 可動部の質量が登場するが , 動作体の見かけで予想される質量 (以下 “視覚的質量”) を見積もって用いる . 別の解釈実現形は種々あり得る . 例えば , 動作中の最高速度や運動量などを力強さと見なすこともできる . 別解釈の許容条件については , 2.5 節で述べる .

¹Laban System は時代によって変化・発展している . 本章では , 最新版である Bartenieff[32] を基にし , Kestenber[33] を参考にして修正した Laban System を用いる .

TABLE 7.1: DYNAMICAL AND GEOMETRICAL FEATURES OF EFFORT ELEMENTS

<i>Effort</i>	Indulging Form	Fighting Form
<i>Weight</i>	Light	Strong
<i>Space</i>	Indirect	Direct
<i>Time</i>	Sustained	Sudden

空間エフォート (Space Effort): 原義は、身体動作の方向的偏りの度合いである。腕や視線の方向が一方向に収斂すること (Direct) が戦闘形態の特徴である。逆に各部の移動の方向や差し出しの方向が、揃っていないこと (Indirect) が陶醉形態と特徴である。解釈法として、動作体の四肢の差し出し方向と視線の向きの方向一致度を考えればよい。例えば、これらの単位方向ベクトルの内積などで数値化できる。







時間エフォート (Time Effort): 原義は、動作の変化の慌ただしさである。突発的 (Sudden) ことが戦闘形態の特徴であり、逆に継続的 (Sustain) であることが陶醉形態の特徴である。工学的解釈としては、慌ただしさをソフトエウアの負荷 (人間ならば認知的負荷) と解釈して、単位時間あたりの、運動の指令の数をもって、時間エフォートの値とすることもできる。次節でのロボット実機での定義例ではこの方式を採用している。別の解釈法として、運動の時間変化と捉える方法がある。つまり、単位時間あたりの、動作体の各部の速度変化 (または加速度変化、運動量変化など) を、数値化して用いる方法である。

次に、身体動作の全身的な形状的特徴であるシェイプについて述べる。シェイプには3項目存在し、Table 7.2 に概略を示す。シェイプの定義の仕方は複数通りあるが、本章では Kestenbergl に倣い、定義が明快な“2次元のシェイプ”を用いる。

2次元のシェイプは、動作体のシルエットを仮想的に水平面・正面・側面に投影した時の、シルエットの広がり・動きとして定義される。正面・側面などの置き方は、動作体の胴体 (より詳しくは骨盤) の向きを用いて決める。Table 7.2 に各面とその広がりの概念図を掲げる。

最も単純な工学的解釈の方法として、“シルエットの広がり”をシルエットの凸包の内部面積と解釈し、動きをシルエットの重心移動と解釈する方法が挙げられる。だが次節の具体例の一部では、計算簡単化のため凸包形状自体は明示的に算出せず、動作体の関節角を直接用いて、より簡素にシェイプを定義する方法例を用いている。

TABLE 7.2: TWO-DIMENSIONAL *Shape*

<i>Plane of Movement</i>	<i>Table Plane</i>	<i>Door Plane</i>	<i>Wheel Plane</i>
Fighting Form	 Enclosing	 Ascending	 Retreating
Indulging Form	 Spreading	 Descending	 Advancing

ドアの面シェイプ (Door Plane Shape): これは正面上のシルエットの広がりのことである。シルエットの領域 (重心で代表してもよい) が上方へ偏よることが戦闘形態の特徴であり、逆の場合は陶醉形態と特徴である。

車輪の面シェイプ (Wheel Plane Shape): これは側面上のシルエットの前後への変動のことである。シルエットの領域 (重心で代表してもよい) が後退することが戦闘形態の特徴であり、逆に前進することが陶醉形態の特徴である。

テーブルの面シェイプ (Table Plane Shape): これは、水平面上のシルエットの広がりのことである。特に、手を持つ動作体では、手先と視線の注目先との近接度合いが重要であるので、これらの端点が張る凸包の広がりと考える場合が適切であることが多いと考えられる。これらの広がり狭いことが戦闘形態の特徴であり、逆に広い (手足がバラバラに広がる様な場合) と陶醉形態の特徴である。

なお、これら6つのラバン特徴量の要素は原則として互いに独立である。例えば、人間が重い物体を押す動作は、大きい力を出力しているから力加減エフォートは攻撃形態であるが、動作の時間変化は少ないので時間エフォートは陶醉形態と言える。このように、ラバン特徴量の要素において、攻撃形態と陶醉形態が入り交じることがあり得る。

7.2.4 あるロボットでのラバン特徴量定義例

ラバン特徴量を具体的に、あるロボットの身体機構に対して定義する。

適応させるロボット (以下“舞踊ロボット”) について、Fig.7.1 に概観、Fig.7.2

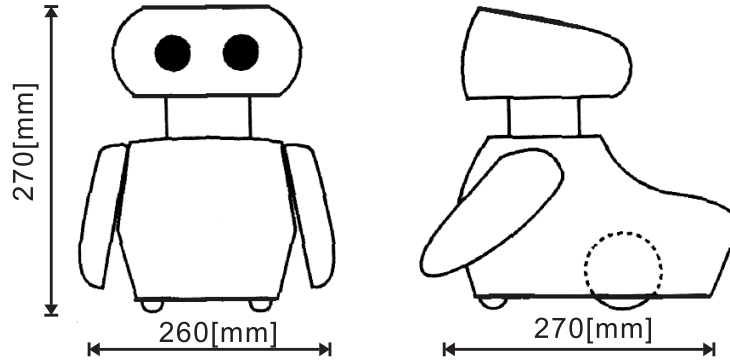


FIGURE 7.1: EXPERIMENTAL DANCING ROBOT

に可動関節とその関節角の定義，Fig.7.6 に舞踊を行っている時の写真を示す．

舞踊ロボットの可動部は，Fig.7.2 に示した通り，両腕の振り回し回転にそれぞれ 1 自由度，頭部にうなずき角度の 1 自由度がある．さらにロボット底面にの 2 つの車輪によって床上移動が可能である．

次のようにエフォートおよびシェイプを定義する．なお，戦闘形態側において数値が大きくなる様に定義する．

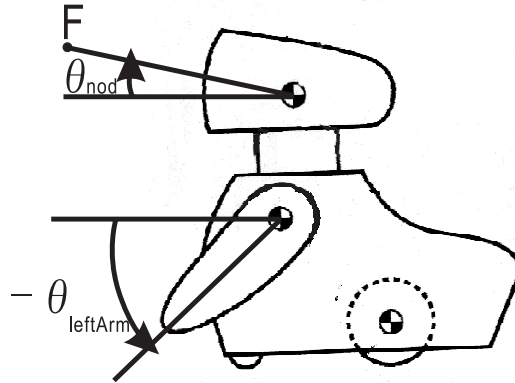
1) 力加減エフォートは，単位時間あたりの各可動部の運動エネルギーの重み付き総和と考える．それは，関節角速度の自乗の級数として，式 (7.1) に定式化できる．

$$\begin{aligned} WeightEffort = & A(a_{la}\dot{\theta}_{leftArm}^2 + a_{ra}\dot{\theta}_{rightArm}^2 \\ & + a_{tr}v_{trans}^2 + a_{tn}v_{turn}^2 + a_{nod}v_{nod}^2) \end{aligned} \quad (7.1)$$

重み a は，各部位の視覚的質量と被注目度を定義者が勘案して，胴体の動作による項には大きく，即ち $a_{tr} = 4$, $a_{tn} = 4$ とし，手や首などの軽量部分の動作の項には小さく $a_{la} = 2$, $a_{ra} = 2$, $a_{nod} = 1$ と設定した．全体にかかる係数 A は，他のラバン特徴量との数字の桁の乖離を緩和するという美観的目的のためのものであり， $A = 0.001$ と設定した．もちろん A は後述の分析結果に対しては何ら実質的な影響を及ぼさない．

2) 空間エフォートは，両腕の仰角と頭部のうなずき角との方向の角度差の重み付きの総和と考える．これは式 (7.2) のように定義できる．

$$\begin{aligned} SpaceEffort = & b_{tn}|\theta_{turn}| + b_{lr}|\theta_{leftArm} - \theta_{rightArm}| \\ & + b_{nl}|\theta_{leftArm} - \theta_{nod}| + b_{rn}|\theta_{rightArm} - \theta_{nod}| \end{aligned} \quad (7.2)$$



$$\begin{cases} v_{turn} &= \dot{\theta}_{leftWheel} - \dot{\theta}_{rightWheel} \\ v_{translate} &= \dot{\theta}_{leftWheel} + \dot{\theta}_{rightWheel} \end{cases}$$

FIGURE 7.2: DEFINITION OF JOINT ANGLES AND VELOCITIES

重み b の設定に当たって，動作の左右対称性に強く印象づける両腕の向きの一致度の項 b_{lr} とターンの項 b_{tn} の重み -5 にした．うなずき角度と腕の角度の一致の項 b_{nl}, b_{rn} は注目度が弱いと判断し -1 とした．なお正負の方向の調整のため負の係数とした．

3) 時間エフォートは，単位時間あたりの舞踊ロボットへの関節角度目標値指令の更新回数とする．この舞踊ロボットシステムでは，舞踊の編集の便宜のため舞踊指令は楽譜とのアナログで記述する [151]．即ち，1 指令を“音符”(note) と呼ぶ．また時間軸を量子化して，その単位長さ“拍”(beat) と呼ぶ．これらを用いて上記の時間エフォートを定義すると式 (7.3) になる．

$$TimeEffort = \frac{(Number\ of\ Notes\ in\ one\ Beat)}{(Time\ Span\ of\ one\ Beat)} \quad (7.3)$$

1) ドアの面シェイプは，式 (7.4) に，両腕と頭の仰角角度の正弦の重み付き総和と定義した．

$$DoorPlane = c_l \sin \theta_{leftArm} + c_r \sin \theta_{rightArm} + c_n \sin \theta_{nod} \quad (7.4)$$

正弦は各関節角度の上向きの度合いを表すものとして用いた．各項の重みは平等が適当と考え， $c_l = c_r = c_n = 1$ とした．

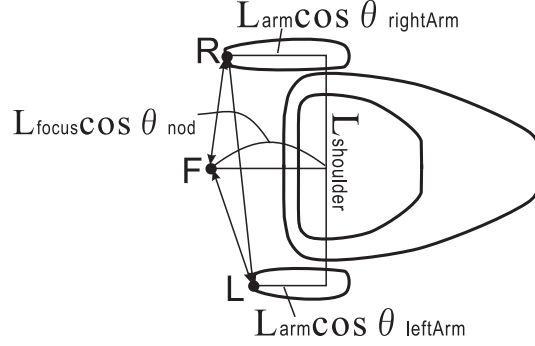


FIGURE 7.3: CONCEPTUAL DIAGRAM FOR TABLE-PLANE CALCULATION

II) 車輪の面シェイプは，式 (7.5) に，ロボットの前進後退速度と腕の末端の前後速度の重み付き総和と定義した．

$$\begin{aligned} WheelPlane = & d_t v_{translate} + d_l L_{arm} \frac{d}{dt} \cos \theta_{leftArm} \\ & + d_r L_{arm} \frac{d}{dt} \cos \theta_{rightArm} \end{aligned} \quad (7.5)$$

L_{arm} は舞踊ロボットの腕の長さであり 10[cm] を代入する．重みは移動部分の視覚的質量から勘案して，胴部項の重み $d_t = -6$ ，腕端部項の重み $d_l = d_r = -1$ とした．

III) テーブルの面シェイプの定義法を Fig.7.3 を用いて説明する．点 L と R はそれぞれ左右の腕の端点を，水平面上に投影した点である．また，視線の注目先を定義として，ロボットの目の正面 10[cm](= L_{Focus} とする) の点を選び，その点の水平面上への投影を F とした．テーブルの面シェイプの計算は，まず点 L, R, F の相互距離を式 (7.6, 7.7, 7.8) に従って算出する．

L_{shldr} は舞踊ロボットの肩幅であり 15.4[cm] を代入する．

$$T_{lr} = \sqrt{L_{shldr}^2 + (L_{Arm} \cos \theta_{lArm} - L_{Arm} \cos \theta_{rArm})^2} \quad (7.6)$$

$$T_{nl} = \sqrt{\left(\frac{L_{shldr}}{2}\right)^2 + (L_{Arm} \cos \theta_{lArm} - L_{Focus} \cos \theta_{nod})^2} \quad (7.7)$$

$$T_{nr} = \sqrt{\left(\frac{L_{shldr}}{2}\right)^2 + (L_{Arm} \cos \theta_{rArm} - L_{Focus} \cos \theta_{nod})^2} \quad (7.8)$$

次にこれら相互距離の総和をとり，正負の方向を合わせるためその逆数をもって，テーブルの面シェイプを式 (7.9) のように定義した．

$$TablePlane = E / (T_{lr} + T_{nl} + T_{nr}) \quad (7.9)$$

E は数値の桁の調整用の係数であり，100 とした．

7.2.5 定義の主観性とその対処

上記の定義例にある通り，ラバン特徴量の数式定義において，定義者が主観的な裁量で決める項目が多く，このままでは定義者ごとに定義形態に差が出るのが予想される．その差には以下の3つのタイプがあると考えられる．各タイプでの差の許容範囲と対処法を合わせて述べる．

1) 動作体での定義差: 異なる機構の動作体では，異なる可動部の存在などにより，定義が異なる可能性がある．シェイプについては，動作体のシルエットの凸包を介して定義すれば，機構の差異は吸収される．エフォートも，何らかの物理量の重み付き総和として定義する方針をとれば，表面的には数式が異なることがあっても，概念的には同等の内容を意味する量を算出する式が得られる．根本的な問題として，動作体の“腕”や“正面”などの概念定義の定義者による差異の問題がある．しかし，動物類似の体形に作った動作体においては，この差異は小さいと考えられる．

2) 物理量選択での定義差: 例えば“運動エネルギー”を用いる代わりに関連性のある物理量の“運動の最高速度”という方策もある．どちらがより印象生成過程の要素として適切であるかは，印象調査実験を行わないと判断しがたい．だが実際の評価量設計では，まず定義者の経験や常識で物理量を選択することが多いだろう．それらが戦闘形態/陶醉形態の度合いに応じてほぼ単調に増減し，かつ予備の印象調査実験にて印象との相関関係が見いだせれば，定義は成功したものとみなせる．定義者の主観を排除して，用いる物理量を常に固定する方法もあるが，印象との相関が強いものや計算が平易なものを選ぶ方が実用的である．

3) 対観客効果見積もりでの定義差: 見る人がよく注目する部位とそうでない部位とでは，印象生成の効果差がある．また，CG 動作体ではもともと質量が無く，寸法も実世界の長さで視覚的效果が同等とは限らない．よって，全身でラバン特徴量の総和をとる際には，対観客効果を見積もって重み付けをすることが求められるだろう．実用上は，まず部位差無しの場合の下に定義式を作り，部位差を反映するために係数を経験的に調整することになる．係数調整の評価は，2) と同じく，印象実験を行い印象との相関の強さを調べることによる．

7.3 行動譜による舞踊作成と編集

7.3.1 ロボットの身体動作記述法の必要性

そこでロボットの身体表現運動を記述し編集するためのロボット言語として「行動譜」を提案する。「行動譜」を開発した動機を述べる。

本実験では、ロボットの複雑な身体運動が必要になる。しかし、全アクチュエータの駆動のデータを設計することは容易ではない。時々刻々の関節角を指定する方式ならば、どのような動作でも書き表せるが、編集性がほとんど期待できない。身体動作の設計には編集推敲が欠かせないため、これは重大な欠点である。

また、従来のロボット言語を用いることも難しい。なぜなら、これまでの大半のロボット言語は作業記述を目的としていた [142]。つまり作業結果が成功することに意味があり、記述法は簡明さが求められていた。そのため、高級なロボット言語では、手順の順序は重視するが、実行の時間タイミングは省略されることが多い。身体表現は動作のタイミングが重要なので、これも大きな欠点である。

また、低級なロボット言語、つまり1動作ごとのコマンドで記述する方式ではロボット言語を使うことの利点がなくなってしまう。

表現行動はより複雑で同時発生的な多自由度の動きの組合せになるため、記述法は、編集のしやすく、動きの調和が記述から容易に見て取れることが望まれる。これを実現するために、音楽の楽譜を手本として「行動譜」を提案した。

ラバンの考案した舞踊記譜法 Labanotation も楽譜とのアナロジーで組み立てられているので、この「行動譜」と原理的に同じである。筆者は Labanotation の存在を知る前に独自の「行動譜」を作成したが、当然ラバンの方が先である。

なお、CGの動作の記述でよく用いられる BVH 形式は、別のダンス記譜法 Benesh Notation [31] を元に行っている。

7.3.2 行動譜の構造

行動譜の構造は、表 7.3 に示す楽譜とのアナロジーで説明できる。

楽譜での音階は、行動譜では量子化された体の部位の位置になる。厳密な位置は表現行動には必要ないから、量子化することにより編集しやすくする。

拍子は量子化された時間である。量子化する理由は編集しやすくするためだけではない。表現行動は各部位が関係して一斉に始まったり終ることが多いため、時

TABLE 7.3: 行動譜と楽譜との対応関係

楽譜	行動譜
音階	各部位の量子化した位置 (スケール)
拍子	量子化した時間
音符	各部位の移動目標位置と所要時間とエフォート
和音	音符の並列実行・ポーズの遷移
小節	和音の列
リズム	強弱の時間周期構造
曲	表現行動
テンポ	行動の全体的な速さ
音の調和	シェイプの調和
調	全体のエフォート

間的に調和のとれた動きを記述するのに有利であるからである。

音符は、各部位の動きの最小の単位である。編集の簡便化のため、出発位置と途中経路は指定せず、目標位置と移動所要時間とエフォートのみを指定する。

和音はロボットのポーズ間遷移に対応することになる。

小節は和音の列である。つまり一定の時間的長さをもった動きである。

リズムは強弱の時間周期構造であるが、これは動きの三要素のリズムに対応する。

曲は小節の統合になるから、一つの表現行動に対応する。

テンポは行動の全体的な速さである。

楽譜での音の調和は、行動譜での体の姿勢の調和となるから、これはシェイプ調和である。

音楽でいう調は、行動では全体的なエフォートに対応する。

行動譜の例を図 7.4 に示す。LISP 言語のリスト形式で、分かりやすいように中を入れたものである。

筆者は、上記と基本構造を同じくする LISP リスト形式の行動譜を、EusLisp[141] で処理しロボットに表現行動を行なわせるシステムを製作した。これは次節の実験で用いられる。

```

(defvar *nodding*           ; 行動名「うなづき」
'((tempo 30                 ; 大域変数 テンポ=30
  rhythm straining         ; リズム=straining
  measure Dab)             ; 調(エフォート)=Dabの組
(#1                          ; 小節1
 (head (low 2) (center 1)); 頭の音符
 (arm (center 3)))        ; 腕の音符
(#2                          ; 小節2
 (head (up 2) (center 1)); 頭の音符
 (arm (center 3))))))    ; 腕の音符

```

FIGURE 7.4: 行動譜の例

7.4 ロボット 舞踊の印象測定実験

7.4.1 実験目標

本実験は，“動作体の身体運動が観客に対して基本情動の印象を与える過程の構造は，ラバン特徴量を媒介することによって，定量的に分析・記述できる”という仮説を検証することを目標とする．

7.4.2 方法

装置

実験に用いた動作体は，Fig.7.1に示されるロボットである．このロボットの自由度配置を Fig.7.2に示す．即ち，胴体下面に取り付けられた2つの車輪によって床上移動が可能である．また，左右両腕と頭部のうなづき角度は，ステッピングモータによって制御される．

舞踊動作のデータ記述方式と，動作制御のアルゴリズムについては前項に記述したとおりである．

要因計画

独立変数は、ラバン特徴量である。前述したように、ラバン特徴量は、3つのエフォートと3つのシェイプからなる6次元の量である。

理想的には、この6つの特徴量の大小の組み合わせをバランスよく網羅的に実験するべきである。しかしこれには次の2つの難点がある。

- 6つのラバン特徴量の大小を網羅するためには、用意する踊りの数が膨大になる。このため、実験実施が困難になり、また被験者が実験の途中で疲労する恐れもある。
- 6つのラバン特徴量は互いに独立ではない。ラバン特徴量は各関節の角度や角速度より算出されるものであり、1つの特徴量を変えようとする、関節角度・角速度を変えることになり、結果として他のラバン特徴量に変化を与える。したがって、任意のラバン特徴量を備えた踊りを設計することは、一般には困難である。

そこで本実験では、実験者が主観によって作成したロボットの6つの踊りを用いる。踊りの詳細は後述する。

従属変数は、ロボットの踊りから被験者が感じる基本情動である。調査法は後述する。

注意すべき剰余変数は以下のものが挙げられる。

ロボットの動作音 本実験に用いたロボットは、床上移動用車輪の駆動にて大型の歯車を介しているため、床上移動時には騒音がする。この騒音の除去は、ロボットの機構上、困難である。対策として、被験者に「騒音を気にせず、踊りの見たくて印象を評価してください」と指示する。

ロボットと被験者との位置関係 全ての実験条件で次のように統一した。被験者を椅子に座らせ、その正面約2[m]の位置の床上にロボットを置き、その地点から踊りを始める。

ロボットの外見 他の外見や、大きさ、体格・機構を持つ動作体では異なる印象が生じる可能性もある。本実験では、同一のロボット動作体を用いることで統制する。

1つ目のロボットの動きの印象は?ひとつに丸をつけてください:
 印象: 嬉しそう・びっくりしている・悲しそう・怒っている・どれでもない
 その度合いは?: 0 - 1 - 2 - 3
 0は「どれでもない」、1は「やや」、2は「まあまあ」、3は「とても」

2つ目のロボットの動きの印象は?ひとつに丸をつけてください:
 (以下同様)...

FIGURE 7.5: QUESTIONARY SHEET

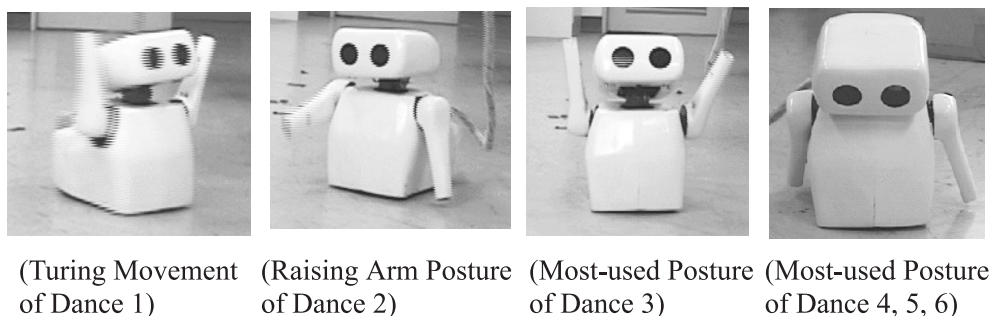


FIGURE 7.6: TYPICAL POSTURES OF EXPERIMENTAL DANCES

被験者

20代の工学系大学生 21人(男性 17人, 女性 4人)を被験者とした。

実験手続き

1) まず被験者に Fig.7.5 に示す印象回答用紙を渡し, 回答方法を教示する。回答方法は, “嬉しそう”・“びっくりしている”・“悲しそう”・“怒っている”の4つの基本情動から択一する。適当なものがない場合は“どれでもない”を選択する。いずれかの基本情動を選択した場合, 印象の強さを“やや”・“まあまあ”・“とても”の3段階で評価する。

2) 次に被験者の正面 1[m] 程度の床上で, ロボットを動作させ舞踊提示する。実験に用いた舞踊については, Fig.7.6 にそれぞれの舞踊の代表的なポーズを示した写真を示す。各舞踊の動作計画データを Fig.7.7 から 7.12 に示す。

舞踊 1: 両腕を真上に上げ, 頭部うなずき角も上方に向け, 床上ではその場で

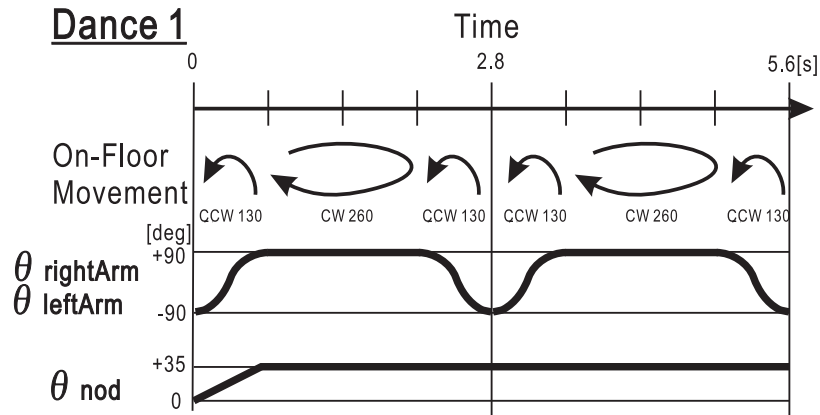


FIGURE 7.7: MOVEMENT DATA OF EXPERIMENTAL DANCES 1

左右交互に旋回する動作を繰り返す．動作計画データを Fig.7.7 を示す．

舞踊 2: 床上では右斜め前方に急速に進み，次いで急速に元の位置へ戻る移動をする．この前進にタイミングを合わせて，右腕を前方に振り上げ，頭部うなずき角もあげる．この舞踊は他の舞踊に比べ，実行時間が短い．動作計画データを Fig.7.8 を示す．

舞踊 3: 両腕を真上に上げ，頭部うなずき角も上方に向け，後退と停止を断続的に繰り返す．動作計画データを Fig.7.9 を示す．

舞踊 4: 両腕を後方斜め後に引き，うなずき角を下げ，等速度で連続的に後退する．動作計画データを Fig.7.10 を示す．

舞踊 5: 舞踊 4 と同じ姿勢で断続的に後退・停止を繰り返す．動作計画データを Fig.7.11 を示す．

舞踊 6: 舞踊 4 と同じ姿勢で断続的に前進・停止を繰り返す．動作計画データを Fig.7.12 を示す．

各舞踊に関して，2章で掲げた式を用いて計算したエフォート・シェイプの数値を Table 7.4 に示す．

なお，舞踊 1 の力加減エフォートの値が他に比べ突出しているが，これは舞踊 1 ではロボットは胴体ごと常時大きく旋回しているためである．

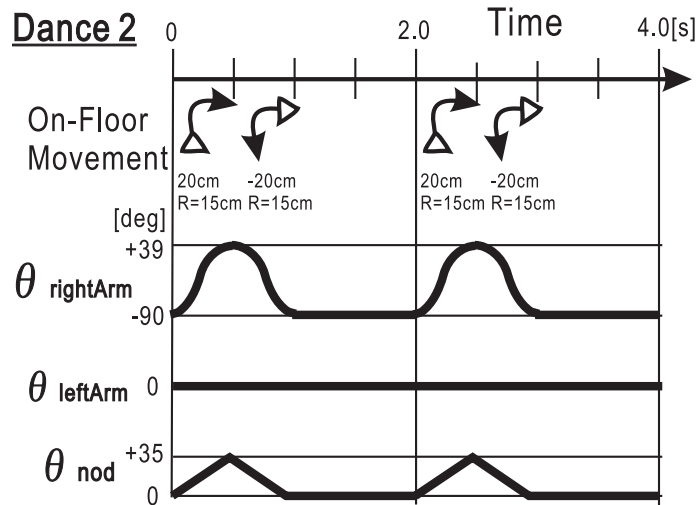


FIGURE 7.8: MOVEMENT DATA OF EXPERIMENTAL DANCES 2

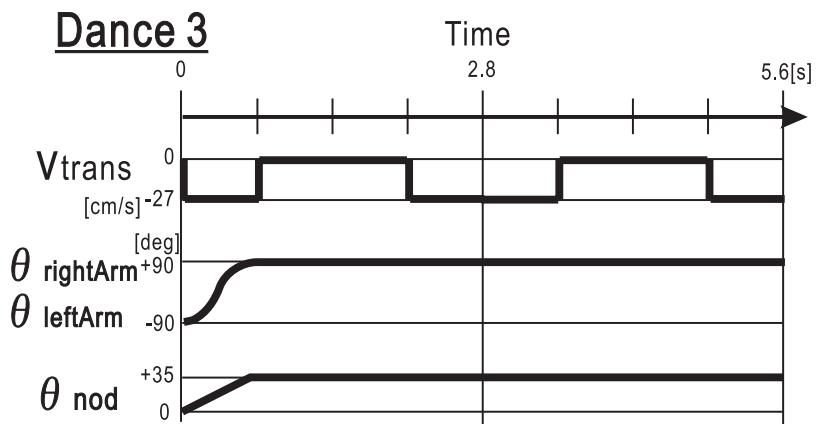


FIGURE 7.9: MOVEMENT DATA OF EXPERIMENTAL DANCES 3

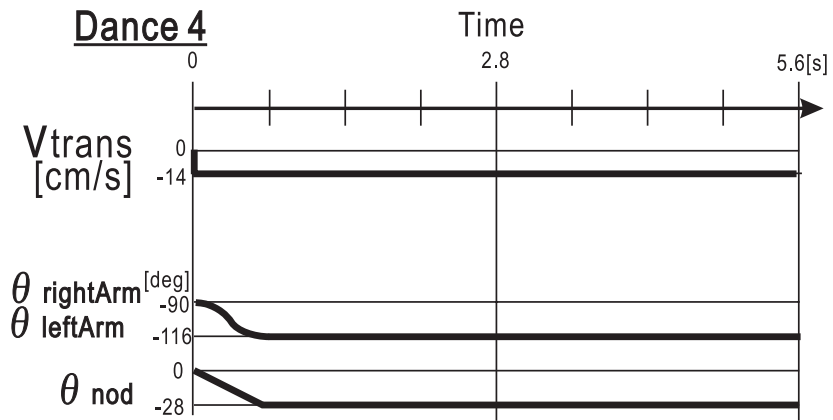


FIGURE 7.10: MOVEMENT DATA OF EXPERIMENTAL DANCES 4

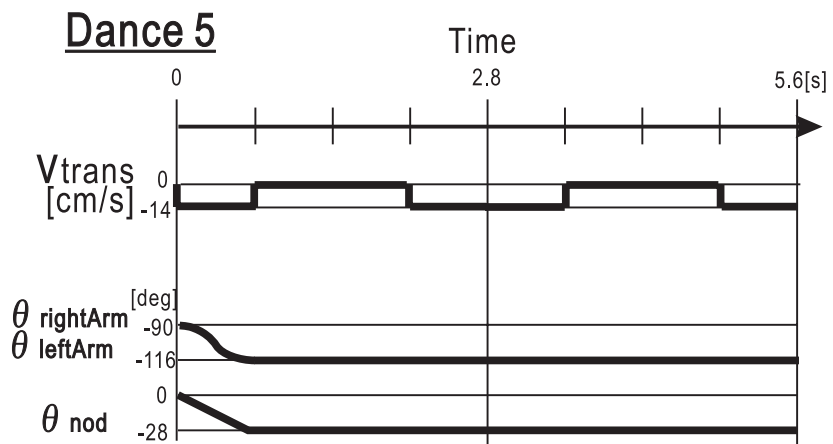


FIGURE 7.11: MOVEMENT DATA OF EXPERIMENTAL DANCES 5

TABLE 7.4: EXPERIMENTAL RESULT : RELATIONSHIP BETWEEN LABAN'S MOVEMENTAL FEATURE VALUES AND PRODUCED IMPRESSION

Dance	<i>Effort</i>			<i>Shape</i>			Impression (Score Total)				Impression (Number of Persons)				
	<i>Weight</i>	<i>Space</i>	<i>Time</i>	<i>Door</i>	<i>Wheel</i>	<i>Table</i>	Joy	Sur- prised	Sad	Angry	Joy	Sur- prised	Sad	Angry	No Impression
1	17364	-7060	18.6	20.6	0	0.376	49	6	0	2	17	3	0	1	0
2	6742	-3628	40.0	-11.6	34	0.364	1	2	0	10	1	1	0	7	12
3	2787	-1060	18.6	20.6	456	0.376	0	30	0	0	0	15	0	0	6
4	128	-1583	7.1	-18.2	465	0.320	0	0	39	0	0	0	20	0	1
5	99	-1583	18.6	-18.2	237	0.320	0	0	29	1	0	0	17	1	3
6	99	-1583	18.6	-18.2	-219	0.320	0	0	21	9	0	0	12	8	1

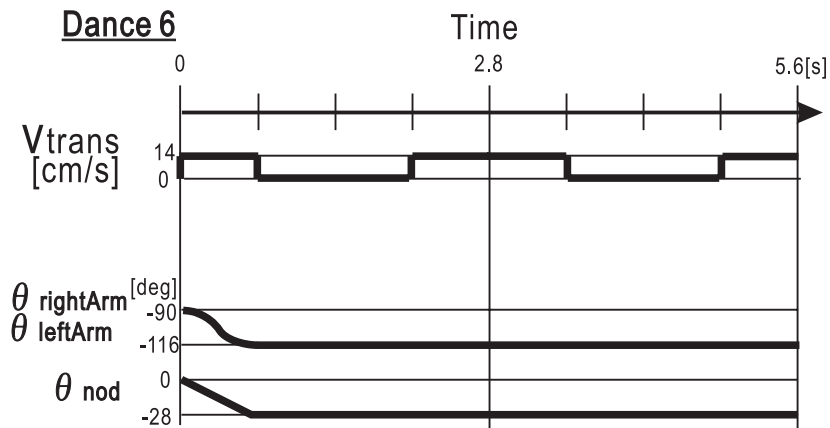


FIGURE 7.12: MOVEMENT DATA OF EXPERIMENTAL DANCES 6

7.4.3 結果

回答結果を Table 7.4 に示す．この表では，2つの集計法で結果を表示している．ひとつは，印象の強さ“やや”・“まあまあ”・“とても”をそれぞれ1, 2, 3に割り当て，全被験者での合計を算出したデータである．この方法は情動の種類だけでなく，表現の強さがわかり有益である．しかし，厳密には強さの数値は間隔尺度として成り立つか保証がない．よって，強さのデータを無視し，各情動の種類に回答した人数のみの計をとったデータを主として解析に用いる．このデータを Table 7.4 の右方に示す．

実験結果の分析の目的は，Table 7.4 に示される，人間への刺激としてのラバン特徴量と，人間からの応答としての印象評定との因果関係を明らかにすることである．これらのデータの数値は，値の大小順序には意味がある順序尺度であるが，間隔尺度としての性質を備えている保証はない．

よって相関分析には Kendall の順位相関係数の算出しその有意性を検定する [113] ．

相関分析結果を Table 7.5 に示す．個々のラバン特徴量と個々の印象に於いて有意な相関関係が得られた対は6対である．それらの関係を文章に書き下すと以下の通りになる．

相関関係 1: 力強い (力加減エフォートが“力強い”特徴を持つ) 身体運動は，喜びの印象を与える傾向がある．

相関関係 2: 力強く，かつ両腕や視線が上方に向かい (ドアの面が上昇)，かつ腕や視線の方向が揃った (テーブルの面が収縮) 身体運動は，驚きの印象をい与える傾

TABLE 7.5: KENDALL'S CORRELATION COEFFICIENT BETWEEN LABAN'S MOVEMENT FEATURE VALUES AND PRODUCED IMPRESSION

Impressed Emotion	<i>Effort</i>			<i>Shape</i>		
	<i>Weight</i>	<i>Space</i>	<i>Time</i>	<i>Door</i>	<i>Wheel</i>	<i>Table</i>
Joy	0.93* <i>Strong</i>	-0.56	0.18	0.67	-0.07	0.67
Surprised	0.69* <i>Strong</i>	-0.15	0.09	0.89* <i>Ascending</i>	0.14	0.89* <i>Enclosing</i>
Sad	-0.75* <i>Weak</i>	0.33	-0.67	-0.61	0.15	-0.61
Angry	-0.15	-0.42	0.67	-0.17	-0.75* <i>Advancing</i>	-0.17

(*: Asterisk indicates that the correlation is significant with significant level $p < 0.05$.)

向がある。

相関関係 3: 弱々しい(力加減エフォートが“弱い”)身体運動は、悲しみの印象を与える傾向がある。

相関関係 4: 前進する(車輪の面が“前進”)身体運動は、怒りの印象を与える傾向がある。

しかしこのような単純な相関分析では、有意な相関関係にある対は数が少なく、これらだけでは、複数のラバン特徴量が組み合わさり関与する印象生成の構造が見て取れない。

複数要素間の因果関係を分析する手法としては因子分析が優れている。よって本論文では、以下に因子分析を用いて、ラバン特徴量と印象の因果関係の定量的な分析と記述、すなわち印象生成過程のモデル作りを行い、実験仮説の検証に用いる。

因子数を決定する予備計算(探索的因子分析)では、固有値が1より大きい因子は3個存在した。因子の有効性を判断する慣例的な基準として、固有値が1より大きいことがある。よって本計算(確認的因子分析)では因子数3個のモデルにて分析した。共通性の推定はSMC法を用い、因子の直交化にはバリマックス回転を用いた。3因子の寄与率の合計は93%であった。

TABLE 7.6: FACOTR ANALYSIS RESULT ON EXPERIMENTAL RESULT

Factor			F1	F2	F3	Com.
Fator Contribution			0.33	0.33	0.27	
Factor Loading on Inputs	Effort	Weight	0.93	0.28	0.11	0.96
		Space	-0.95	-0.06	-0.17	0.94
		Time	0.05	0.35	0.91	0.95
	Shape	Door	0.53	0.78	-0.27	0.97
		Table	0.48	0.86	0.13	0.98
		Wheel	-0.40	0.32	-0.69	0.73
Factor Loading on Outputs	Joy	Score	0.98	0.07	-0.14	0.99
		# of Prsn	0.99	0.07	-0.11	0.99
	Surpirsed	Score	-0.13	0.90	-0.30	0.92
		# of Prsn	-0.13	0.90	-0.30	0.92
	Sad	Score	-0.43	-0.78	-0.42	0.97
		# of Prsn	-0.43	-0.79	-0.39	0.96
	Angry	Score	-0.02	-0.15	0.89	0.81
		# of Prsn	-0.09	-0.22	0.84	0.77
	No Imp. (# of Prsn.)		-0.34	0.53	0.65	0.82
Factor Score	Dance 1		2.18	0.20	-0.34	
	Dance 2		-0.32	0.66	2.02	
	Dance 3		-0.56	1.71	-0.83	
	Dance 4		-0.58	-0.93	-1.53	
	Dance 5		-0.33	-0.77	0.07	
	Dance 6		-0.38	-0.87	0.60	

‘Com.’ is Communality (共通性).

確認的因子分析の結果の数値データを Table 7.6 に示す . 表の右端の欄は , Communality (共通性) の値であり , これは各データの挙動の内 , 因子分析モデルで説明できる比率 , (つまり誤差の少なさ) を表している .

また , 分析結果が意味する因果関係構造を示すパス図を Fig.7.13 に示す . 図中の矢印は因果関係を示し , 矢印上の数字は因子負荷量である . 因子負荷量の絶対値が 0.7 以上であるものを強い因果関係として実線の矢印で示した . また参考としてであるが , “悲しみ” 印象の強さが , 3 つの因子から , それぞれある程度影響を受けていたので , 因子負荷量が -0.39 の弱い関係も破線の矢印で示した .

このパス図は , 実験身体動作のラバン特徴量から印象評定の人分布への写像の構造を示している . 図の読み方の例を挙げる . 両腕やうなずき角が上方に向かう身体動作は , ドアの面特徴量は 2 章の定義では正に大きく算出される . (上方 (Up) が数値の正の向きであるので , 図中に (Up) と示した .) この数値は第 2 因子と負荷量 0.79 で相関しているのので , 第 2 因子も増加させられる影響を受ける . 因子が

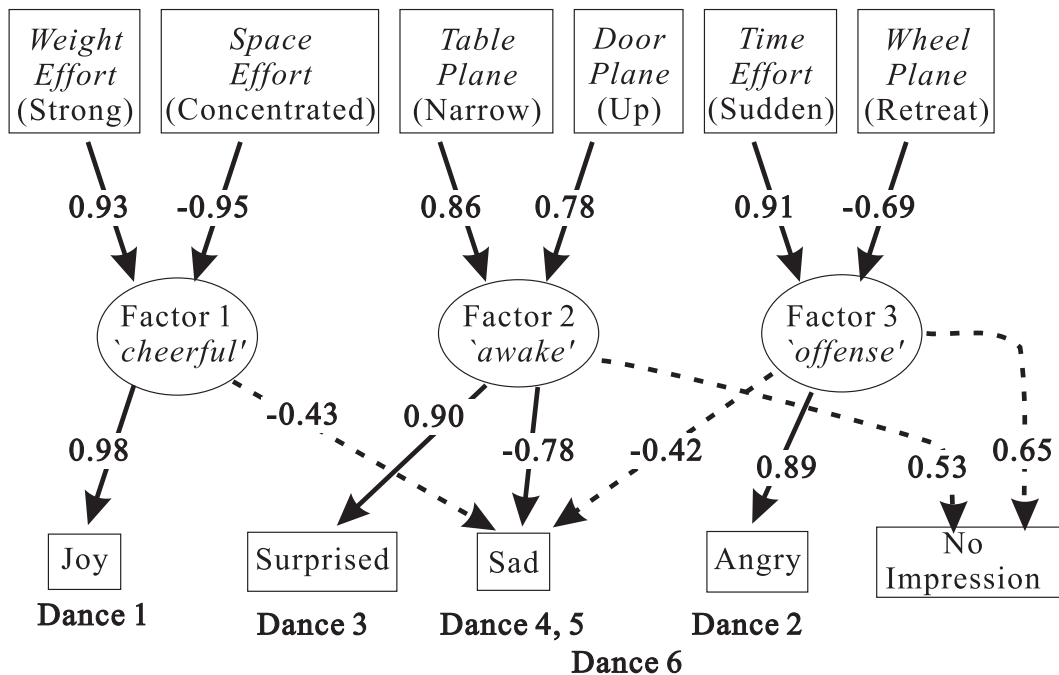


FIGURE 7.13: PATH DIAGRAM DEPICTING FACTOR ANALYSIS RESULT

ら印象の回答人数データへの因果関係も同様に矢印と負荷量で示されている。

次に、各舞踊の印象空間での類似性を、因子得点データを用いて図示する。今回、因子得点は3次元のデータになった。第1因子については、舞踊1だけが突出している。そこで第1因子を省略して、2次元データとしてFig.7.14にプロットする。ここでは、第2因子に関する得点をx座標に、第3因子の得点をy座標としてプロットした。また同図中に、各情動への因子負荷量を方向ベクトルの成分として、印象の方向を示した。なお、第1因子の軸は紙面に対して垂直であり、“嬉しそう”印象の方向は紙面に対してほぼ垂直である。

7.4.4 考察

ラバン特徴量と基本情動印象の強さの関係について、本実験結果では、有意な順位相関を持つ関係が見い出された。これらの相関関係は常識に反するものではないが、不完全さがある。例えば、相関関係1は“身体運動は力強いと喜んでいるように見える”ということの意味する。確かに、喜んでいる時は身体運動は快活になる傾向がある。しかし、テーブルの面などの他の要素も、喜びの印象の決定に

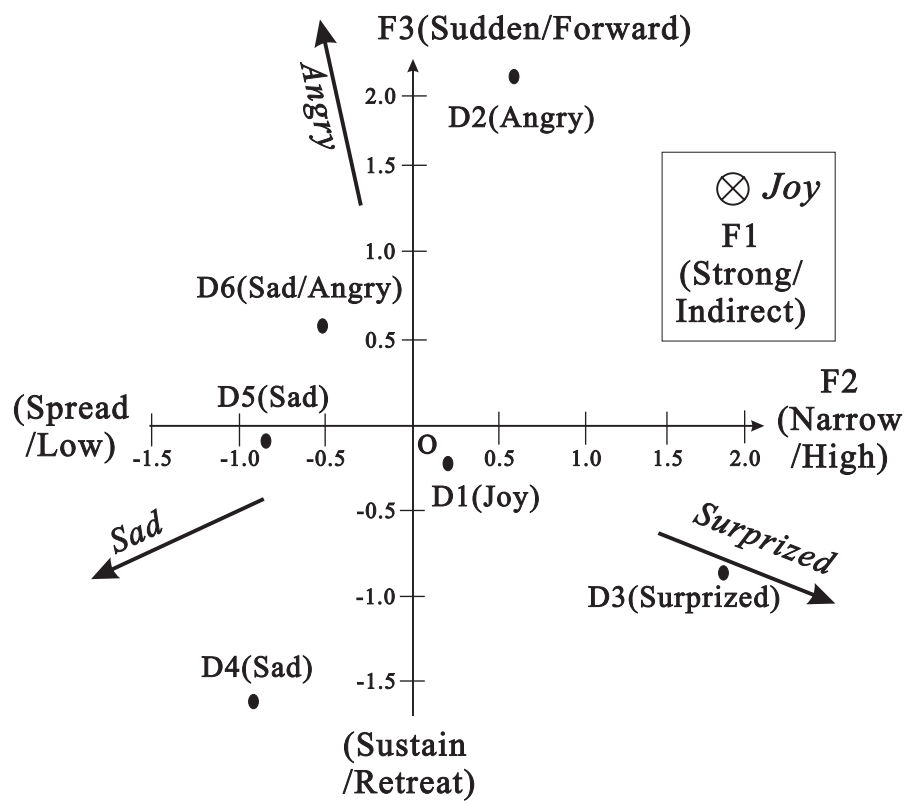


FIGURE 7.14: SPACIAL REPRESENTATION OF SIMILARITY OF THE IMPRESSIONS

関わるべきである。実際実験結果では、テーブルの面と喜び印象との相関係数は0.67であり比較的高いが、統計上有意とは判定されなかった。また実験結果の普遍性については、相関関係2で“驚いている時はキョロキョロしない”ということの意味しているが、これは常識に照らして普遍的な事実であるとは言い難く、むしろ実験舞踊の組み合わせから生じた見かけ上の相関関係と見なす方が安全である。これらの問題は、本実験では舞踊の数が6つと少ないから生じていると考えられる。従って、他の多様な舞踊に対しても追加実験を行うことで、相関分析結果の不完全さを是正することが出来るだろう。

また因子分析による印象生成過程のモデル化においても、因子負荷量の大きくかつ直交性が高い因果関係によって組み立てられたモデルを得ることに成功した。このことは、身体運動の印象生成過程を記述することに対してラバン特徴量が有用性を持つことを意味し、実験の仮説を支持するものである。

この結果は、動作体の身体運動のラバン特徴量が定まれば、身体運動の印象もほぼ定まることを意味する。よって、動作体表現の印象を制御するという問題に対して、目標の印象に対応するラバン特徴量を実現するように動作を制御するという方法が提案できることがわかった。

しかし、今回得られたラバン特徴量と情動印象の関係が一般的な法則であるかは、保証できない。なぜなら、実験に付した舞踊が6パターンと少なく、また動作体も1体のロボットを用いただけである。法則の有意性を調べるためには、さらなる実験が必要である。

7.5 結論

ロボットなどの動作体の身体運動が観客に与える印象の生成過程を分析するために身体運動の特徴を定量的に表すラバン特徴量セットが応用可能であることを示し、具体的なラバン特徴量の計算法の設計指針と、計算例を挙げた。

さらに有効性を検証するため、ロボットのダンスが観客に与える基本感情(喜怒哀楽)に関する印象の計測実験を行い、ラバン特徴量と観客が得た情動印象が、有意にかつ直交性高く相関することを示した。因子間の直交性が高いということは、特定の印象を表現させたい場合、それを身体運動の特徴に変換することが容易であることを意味する。さらには、そうして設計した身体運動が表現する印象が、所望の印象に近いことを意味する。

これらの結果は、ラバン特徴量セットによって、身体動作の印象の生成過程を数理的に記述できることを示している。

ただし，以下の課題が残った．

- 1) ラバン特徴量から印象を予測する精度は，まだ改善の余地がある．特に，緒論で言及した“部分的な動作の物理的特徴量”の研究などを参考として，ラバン特徴量の定義を改良することが出来るだろう．
- 2) 本実験で用いた動作体の体型は，頭が1つ，腕が2本で左右対称という，哺乳類類似体型であった．しかし，特殊で異常な体型に対してラバン理論がどの程度成立できるか不明である．裏を返せば，不気味さ・異様さの知覚についても理論があるはずである．これが明らかになれば，ラバン理論と補完しあって，動作の知覚・解釈の過程を説明付けるだろう．
- 3) 本章では，身体動作以外の要素を併用する表現までは至らなかった．しかし，身体動作以外の表現要素についても，表現形態とその印象とを結びつける法則で既知のものが数多くあるので [18]，それらとの併用についても研究することが可能である．対人行動物が複数の表現要素を協調的に用いることにより，より人間に深く心理的な作用を与えることができるだろう．

将来の展開については次のような展望を持っている．本章で得られた知見を高精度化し応用すれば，動作体の任意の身体動作について，それが与える基本情動の印象を事前に予測・評価することができる．これは，動作体が自律的に身体動作を生成し人間に対し情動を表現することの可能性を強く示唆するものである．

また，人間動作を解析して，その人の心理状態を機械が分析することも考えられる．これは対人コミュニケーションの入力手段として重要になるだろう．

さらに動作体の情動システムが動物らしい適切なものになれば，感情面での対人コミュニケーションは完成を見る．しかし，この問題には文脈に応じて情動を適切に変化させる技術も必要であり，これについては本論文の以降の章で論じる．

第III部

単ダイアドによる表現

第8章 人間からの接触に対するロボットの反応行動による表現

本章の要旨

反応としての行動はしばしば，反応者が相手に対して抱いている心理を反映している．従って，反応の仕方でも，相手に親しみを持っているのか，逆に敵意を持っているのか表現できる．

この表現をロボットにも応用できれば，ロボットが親しみを人間に表現する手段となるだろう．

そこで本章では，オオカミが仲間に対して親しみの表現に用いる接触時の受容的反応を，ロボットに応用できるものと仮説を立てた．

人間の接触に対して反応するロボットを作り，実験を行った結果，オオカミの場合と同じように，人間の接触に対するロボットの力学的に受容的な反応によって，人間に親しみを演出することができた．

8.1 研究の背景と目的

ダイアド・インタラクションではしばしば，相手の反応の仕方に，相手が自分のことをどのように思っているかが反映される．このように他者に対して向けられた心理を社会的心理と呼ぶ．怒り・嫌悪・親しみなどが社会的心理の典型例である．

対人行動物も，人間の行動に対して反応するという場面が多い．しかし，対人行動物の行動によって，そのような社会心理が表現されるかを考慮しなければ，人間に嫌悪を表現する恐れもある．実際，自分の思ったように動作しない機械に文句を言う人がいるが，これは機械の反応を“非協力的である”と擬人化して解釈し，機械が自分に対して敵意や嫌悪感を抱いていると感じてしまうからであろう．

逆に、対人行動物が反応行動を適切に選択すれば、人に対する反応行動によって、人間に親しみや忠誠心を印象付けることも可能であろう。

そこで、本章では人間とロボットのダイアドにて、ロボットが人間に親しみ（親和感）を与える手段を、オオカミの社会行動を規範として構築し、その効果を実験により検証する。

8.2 親和感とその演出方法

8.2.1 親和感

一般に、“親和感”や“親しみ”という言葉には、仲間の人物への好意や、愛用品への愛着や、住み慣れた場所への愛着などの意味が含まれる。

本章では、人間間や動物個体間での社会関係に関する、コミュニケーションの役割とその成り立ちに注目する。よって、物体や場所などへの親しみや研究対象から除外する。

社会関係における親しみには、自分の子孫への愛情のように本能的で強いものから、初対面の人に対して示す礼儀としての協調的態度での親和感など一次的・仮設的なものまで、強度・持続性・純粋性の様々異なるものがありえる。

本研究では、まず最も基本的な親和感を、機械が人間に与えることを目標とする。そこで、“親和感”を、“自分と相手とは仲間であり、敵対せず協調的態度をとることを感じる印象”と、定義する。

8.2.2 オオカミの受容的行動による親和感の演出

群れを作る動物の社会では、仲間意識や敵対感などの個体間の関係に関する情報は、敵と見方を区別し、繁殖のため求愛し、仲間と協力して行動し、群の社会秩序を維持するために重要である。そのため動物は行動を、しばしば個体間の関係の情報を伝達するために使用する [96]。

これら動物の社会的な行動は動物行動学などの分野で研究されてきた。

代表的な例としてオオカミの社会行動が挙げられる。オオカミは群れの中で生活する動物であり、群れの社会秩序維持のために、社会行動をとることが知られている。親和感に関連した社会行動を挙げると、オオカミは他の個体を仲間として受

け入れる時に、それを表現するために、相手の動きに対して逆らわない動きをする [94]。つまり受容的な行動が仲間意識や服従の意図を伝え親和感を演出するのである。これを宥和行動という。

ここに、受容的行動を体の接触に際して相手の動きに力学的に逆らわない行動と定義する。

8.2.3 ロボットの対人受容的行動による親和感演出の仮説

オオカミの受容的行動による親和感演出に着目し、ロボットであっても、人間の動きに対して受容的な行動が人間に親和感を与えるという仮説を立てる。

すなわち、人間がロボットに接触した時に、その接触部位の動きを力学的に受容する反応行動をロボットが行うことは、人間に対して親しみの感情を表現する効果があるとする仮説である。“力学的に受容する反応”とは、簡単に言えば押し返さない反応である。より正確には、力学的エネルギーが人間からロボットへ流れる接触状態と言い表せる。

この仮説を検証するために次節で述べる実験を行なう。

8.3 ロボットの人間への接触反応行動による親和感の演出実験

8.3.1 実験目標

前節で導出した仮説である「人間の接触に対して、ロボットが力学的に受容的な反応（押し戻さない反応）を行うことによって、その人間に親和感が演出される」を検証することを実験の目標とする。

8.3.2 実験方法

被験者

本実験では、20代男子学生15人、20代女子学生2人、男子高校生3人、合計20人を被験者にした。



FIGURE 8.1: OVERVIEW OF EXPERIMENTAL GRAMPUS ROBOT

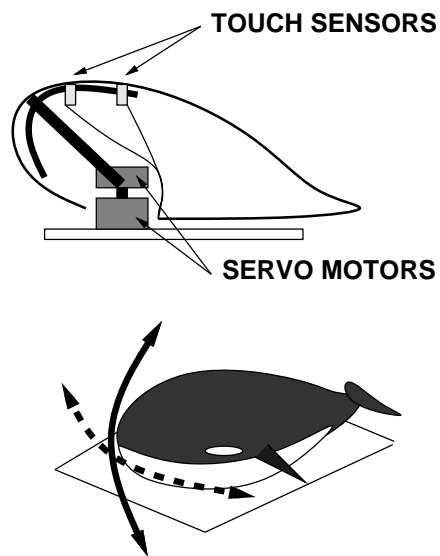


FIGURE 8.2: EXPERIMENTAL GRAMPUS ROBOT AND ITS MOVEMENT

実験装置

Fig.8.1 にロボットの外観を示す. ロボットの外装はシャチのぬいぐるみを用いている. ロボットの大きさは, 全長 50[cm], 横幅 35[cm], 高さ 20[cm] である.

Fig.8.2 に内部構造を示す. このロボットの頭は, 内蔵された 2 つのラジコン用サーボモータモジュール (双葉電子工業製, FP-S3001) によって, 縦方向と横方向にそれぞれ動かすことができる.

ただし本実験では, 首の縦振り方向の動きのみを使用し, 首の横振りを行なわなかった. なぜなら, 受容反応 (押し返さない反応) を実現するためには, 被験者の手の動きの軸に沿う軸の 1 自由度の動きで充分であり, また横振りを含む反応

行動を取り入れると問題が複雑になるからである。

さらにロボットの額の内部には、二つタッチセンサー（押しボタンスイッチ）が内蔵されており、実験において被験者が額に接触した時にそれを検知する。

この二つのサーボモータモジュールは、トランスピュータ計算機によって制御される。トランスピュータ計算機は、サーボモータの回転角度（つまり首の関節角）の指令をPWM信号に変換し、その信号をサーボモータモジュールに転送する。また、トランスピュータ計算機はロボット額部のタッチセンサからの接触情報を検知し、それに応じてロボットの行動を変化させる。以上のプログラムをトランスピュータにダウンロードするためにワークステーション（NSSUN社、SP/5）を1台用いた。

実験計画

独立変数は、被験者のロボット額部への接触に対する反応の様式である。反応様式を決定する項目として、次の2つを独立変数として採用する。

1. 反応性: 被験者の接触によってロボットの行動が変化するか、それとも無視して変化しないかの特性。
2. 力学的反応特性: 被験者の接触に対して、ロボットが押し戻すか、それとも逆らわずに押されるかの特性。（より厳密には、被験者とロボットの間で、力学的エネルギーの流れる方向として定義することもできる。）

実験に用いる独立変数の組み合わせは3つ用意した。詳細については次項で述べる。

全ての被験者は、3つ全ての実験条件に参加する。

従属変数は、ロボットに対して被験者が抱く印象である。被験者の主観に属するものなので、後で述べるアンケートによって計測する。

剰余変数としては、ロボットの外見・肌触り・運動に伴う音が該当する。これらは変化させずに実験を行うことで統制する。

刺激

独立変数は、反応性と力学的反応特性である。

まず、反応性の有無、つまり人間の接触によってロボットの動きが変わる場合と、変化しない場合とに、分類できる。

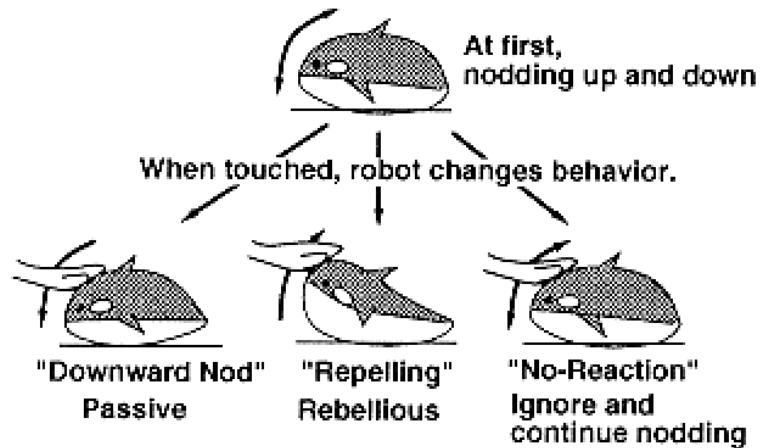


FIGURE 8.3: REACTIONS OF THE ROBOT

反応性が有る場合は，さらに，その反応の力学的反応特性について分類できる．今回は，人間の手を押し戻す場合と，押し戻さず受容する場合の2つに分類した．

従って，今回実験に用いる刺激は，Fig.8.3に示す3つである．

反応型 1: 第一の反応型は，被験者に額を触られるとうなづき，首を下に向け，止まる反応である．これは被験者の手の動きに対して逆らわない，つまり受容的行動である．以下これを「うなづき行動」と呼ぶ．

反応型 2: 第二の反応型は，触られると首を急速に上げ，上げたままで停止する反応である．これは被験者が伸ばしてきた手を払い除ける，反発的行動である．以下これを「払い除け行動」と呼ぶ．

反応型 3: 第三の反応型は，接触されても無視し，初期状態の首の上下運動を繰り返すものである．これは比較のために用いた．以下これを「無反応行動」と呼ぶ．

実験手続き

1. まず，Fig.8.4のように被験者にロボットの前に立ってもらう．この時ロボットは，Fig.8.3の上図に示すように，首を上下に振る運動を繰り返している．首の仰角の振れ幅は0度（水平方向）から70度までで，1往復を2[s]で行なう．
2. 実験者は被験者にロボットの額に触るように指示する．被験者の手がロボットの額に接触すると，ロボットはそれまで続けていた首の縦振り運動をやめ，あ



FIGURE 8.4: SCENE OF THE EXPERIMENT

TABLE 8.1: QUESTIONNAIRE FORM

Q. 今回のぬいぐるみの動きからどのような印象を受けましたか?
 (0は“どちらともいえない”. 1は“やや”, 2は“まあまあ”, 3は“かなり”.)

動きに意図がある	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	意味不明な動き
生き物的	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	機械的
好意的	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	敵対的
顔は近付けたくない	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	頬ずりしたい
野良的	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	飼い馴れの的

らかじめ設定された定型の反応行動を起こす.

3. 被験者がロボットに触り, ロボットに反応行動させることを, 各反応型につき5回から10回繰り返した後に, 実験者は被験者に反応の印象に関するアンケートを行った.

Table 8.1 にアンケート用紙を示す.

本実験では, 5個の印象の対を7段階に分割し, 被験者に評価をさせた.

印象の対と, その設定理由は次の通りである.

1. 「動きに意図がある/意味不明な動き」: ロボットの挙動にそもそも意味を感じ得たかを調べるための設問.
2. 「生き物的/機械的」: ロボットの挙動が, 動物の表現と同様に解釈されたか

調べるための設問 .

3. 「好意的/敵対的」: 親和感を与えたかを調べるための設問 . 直接的な質問 .
4. 「顔を近づけたくない/頬ずりしたい」: 人間のロボットへの接近に関する安全/危険の印象評価を調べるための設問 .
5. 「野良的/飼い馴れの的」: ロボットの反抗性/従順性の印象を調べるための設問 .

また, ロボットの反応についての感想も任意に簡潔にコメントしてもらった .

結果の有意性の検定方法

それぞれの反応行動について各被験者が答える回答は, 被験者により差異が存在する . 従って, 回答から結論を導くためには有意性の検定が必要となる .

本実験の場合, アンケート設問の結果の平均値が, 「どちらでもない」を意味する 0 から, 有意な差をもって離れている時に, ある反応行動が特定の印象を与える作用を持つと結論する .

注意すべきことは, アンケートの回答の尺度は順序尺度であっても, 比例尺度ではないことである . つまり, ロボットの動きに意図を感じる度合いが, 2 であるという回答が, 1 であるとする回答の 2 倍の効果を表すという保証はない . 従って, このアンケート結果はノンパラメトリックな統計手法によって分析され検定されなければならない .

ノンパラメトリックな統計データの母平均のずれの大きさを検定する統計学的手法として, Mann-Whitney の U 検定を用いた [101]. これにより, 回答分布が特定の印象の方向に有意にずれているか否かを判定できる .

判定の過程は次のようになる . まず, 20 人分の被験者の実験結果のデータセットを実験で集め, これを A と呼ぶ . 例えば,

$$A = \{-2, 0, 2, 2, 0, 2, 1, -2, -2, 2, 2, -1, 3, 3, 3, 2, 2, 3, 2, 0\} \quad (8.1)$$

のようなアンケート結果が得られたとする .

次いで比較対象のダミーデータセット D を考える . 今回は「どちらでもない」という結果との差を比較したいので, D は,

$$D = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\} \quad (8.2)$$

とする .

U検定は、まず2つのデータセット A, D から統計量 z を算出する。(U検定の計算は、他の章でも使うので、巻末付録 (p.205) にまとめて詳説する。)

この例の場合、 $z = -2.72$ である。

次に $|z|$ と z 臨界値表 A.2 に記載されている臨界値を比較し、 $|z|$ が臨界値より大きければ、2つのデータセットの分布の中心は有意に異なると判定できる。

本実験では、実験結果データの偏向について特に強い予想を与える知見がないので両側検定とし、有意水準は5%とした。

この有意水準設定の場合、 z の臨界値は数表 A.2 によれば 1.96 である。従って、 $|z| = 2.72 > 1.96$ であるから、データ分布 A と D の分布の中心は異なると言える。すなわち、A の分布の中央値が 2 であるのに対して、D の中央値は 0 であるから、A の方が D より有意に正の方向に偏って分布していると判定できる。

8.3.3 実験結果

実験結果データを、反応型 1 (ロボットの反応型がうなづき行動) については Table 8.2 に、反応型 2 (ロボットの反応型が払い除け行動) については Table 8.3 に、反応型 3 (ロボットの反応型が無反応行動) については Table 8.4 に掲げる。また、被験者の自由回答を併記する。さらに、印象の代表値としての回答の中央値と、有意性の検定として有意水準 5% での U 検定の結果も、表に併記する。

これらのデータをグラフ化したものが、Fig.8.5 ~ 8.9 である。図中の*印は、回答分布に有意な偏りが存在することを示す。

動きに意図を感じるか？

Fig.8.5 は、「このロボット動きに意図を感じるか？ あるいは意味不明な動きか？」という問いに対する回答である。

U-検定を行なうと、うなづき行動の回答分布の $|z|$ は 2.72 であり、意図を感じさせる効果が有意に存在すると言える。

払い除け行動の回答の $|z|$ は 5.24 であり、被験者に意図を感じさせる傾向があると言える。うなづき行動との比較では、払い除け行動の方が効果が強い。

また、無反応行動の $|z|$ は 2.06 であり、被験者に意味不明な行動と思われる傾向が有意にあると言える。

TABLE 8.2: IMPRESSION RESULT DATA OF PASSIVE REACTION

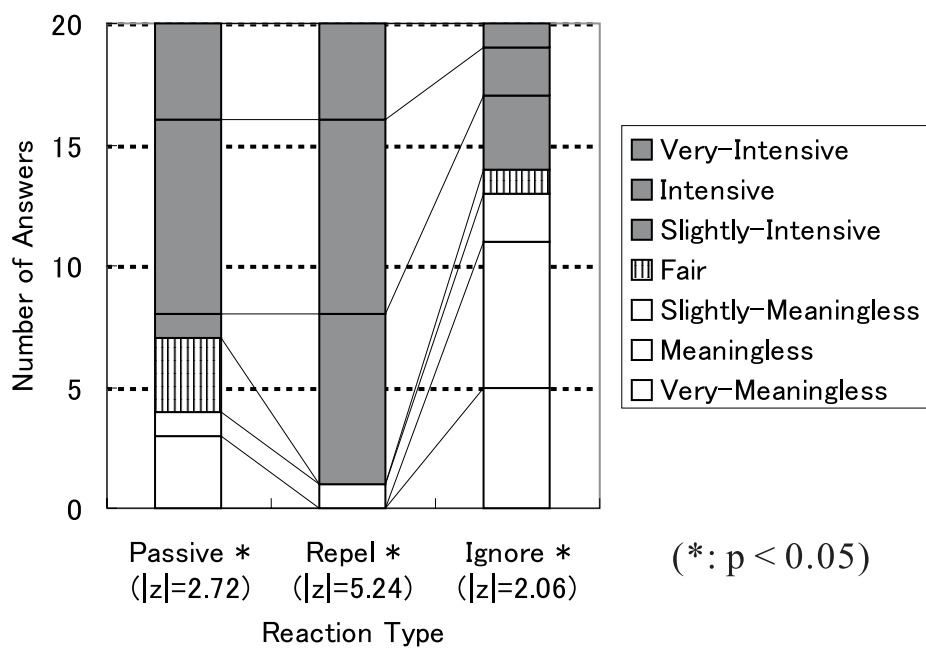
被験者	意図感	好意的	野良的	生物感	顔近忌避	自由回答
A	-2	1	-3	-3	0	
B	0	1	-2	-1	0	叩いて急に動きが止まると変
C	2	0	0	2	-1	ダンゴムシの死んだ振り
D	2	-1	-3	-1	0	
E	0	2	-3	2	-2	
F	2	3	-2	-2	0	
G	1	2	0	1	-1	
H	-2	2	-2	2	0	
I	-2	1	-1	-1	0	
J	2	1	-2	-1	-1	
K	2	0	-1	-1	0	
L	-1	2	-3	-1	0	押すべき所を押しているのか疑問
M	3	0	-2	2	0	
N	3	-1	2	-1	3	
O	3	0	-3	-3	0	
P	2	2	-3	-2	0	どのパターンも機械的に見える
Q	2	2	-2	3	0	とてもかわいい．何のせいかわからない（外見？材質？）は不明．
R	3	-2	1	-1	2	
S	2	-1	-1	-1	1	見方によっては，頷き・押上の評価を入れ替えてもいい
T	0	1	-2	-1	2	
中央値	2	1	-2	-1	0	
z 値	2.72	2.45	4.16	2.34	0.02	
5%有意性	意図感有	好意的	飼馴的	機械的	-	

TABLE 8.3: IMPRESSION RESULT DATA OF REPELLING REACTION

被験者	意図感	好意的	野良的	生物感	顔近忌避	自由回答
A	1	0	1	-3	0	警戒的？
B	-1	0	-1	-1	2	
C	2	0	0	2	-1	エキマキトカゲの威嚇
D	3	-3	-3	-3	3	
E	2	0	2	3	0	
F	2	0	1	1	1	
G	2	-2	2	1	1	
H	1	0	0	1	1	
I	2	2	-2	2	-1	
J	1	1	-2	-1	-1	
K	2	-1	-2	2	0	
L	1	2	0	1	2	押すべき所を押しているのか不安でそのことが評価に影響した
M	3	1	-3	2	0	
N	2	1	1	-1	2	
O	3	1	-3	-3	0	
P	2	0	-3	-2	0	どのパターンも機械的に見える
Q	1	-1	1	3	1	かなり生き物の動きに近い感じで驚いた
R	1	-1	2	-2	2	
S	3	2	-2	2	-2	見方によっては、頷き・押上の評価を入れ替えてもいい。
T	1	0	-3	-1	1	
中央値	2	0	-0.5	1	0.5	
z 値	5.24	0.68	0.91	0.59	1.91	
5%有意性	意図感有	-	-	-	-	

TABLE 8.4: IMPRESSION RESULT DATA OF IGNORING REACTION

被験者	意図感	好意的	野良的	生物感	顔近忌避	自由回答
A	-3	0	0	-3	1	つまらない
B	-3	-3	3	-3	2	
C	1	0	0	-2	1	つまらない
D	-3	0	0	-3	3	
E	-3	0	0	-3	3	
F	1	-2	2	-1	2	
G	-2	-1	1	-2	2	
H	2	-3	2	-2	-2	
I	3	0	0	-2	0	
J	-2	2	-2	2	-1	
K	-2	-1	2	-2	1	
L	-1	-1	2	-3	0	
M	0	0	0	-1	0	
N	-2	0	0	-2	3	
O	-2	-1	2	1	0	
P	-2	0	2	-2	1	どのパターンも機械的に見える
Q	-1	0	2	1	1	意図感が不明。本物の動物はこんなことはしない。
R	-3	0	3	-3	1	
S	2	2	-2	2	-2	
T	1	0	-2	-2	1	
中央値	-2	0	0.5	-2	1	
z 値	2.06	1.83	2.28	3.49	3.06	
5%有意性	意味不明	-	野良的	機械的	顔近忌避	



質問: 「このロボット動きに意図を感じるか? あるいは意味不明な動きか? 」
 Question 1: “Do you think the movement of robot is expressive of some intention?”

FIGURE 8.5: RESPONDENTS OF QUESTION NO.1

ロボットの動きは好意的か？

Fig.8.6は「このロボットの動きは好意的か/敵対的か？」という問いに対する結果である。

うなづき行動の $|z|$ は2.45であり、被験者に好意的印象を与え得ると言える。

一方、払い除け行動の $|z|$ は0.68であり、印象回答が特にどちらに偏っているとは言えない。

無反応行動の $|z|$ は1.83であり、有意な偏りは見られない。

ここで、3反応パターン相互間での、分布の違いの有意性を計算してみる。

- “うなづき行動” 対 “払い除け行動” では、 $|z|$ は1.51であり、差の有意性は認められない。
- “うなづき行動” 対 “無反応行動” では、 $|z|$ は2.57であり、これは有意である。即ち、“うなづき行動” との比較の上では、“無反応行動” は友好的印象を減じ、敵対的な印象を与える作用があると言える。グラフを見ると、好意的印象が大幅に減じていることがわかる。
- “払い除け行動” 対 “無反応行動” では、 $|z|$ は1.38であり、差の有意性は認められない。

よって、“払い除け行動” は、好意感/敵対感に対して中立的であるのに対して、“無反応行動” は好意感の低減作用を持っていることが解る。

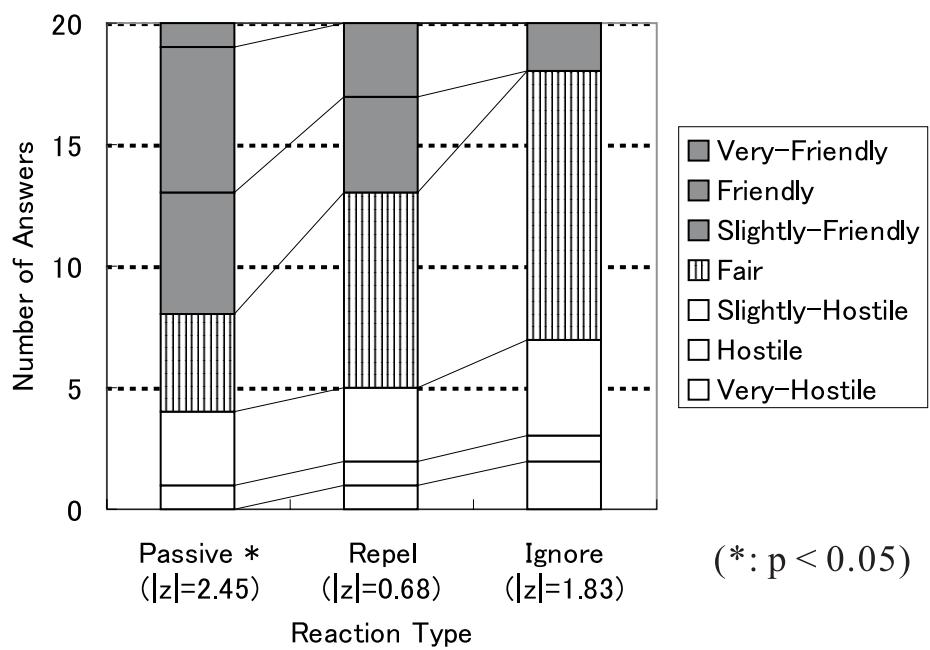
飼い馴れた感じがするか？

Fig.8.7は、「このロボットは飼い馴れている感じがするか？ あるいは野良的か？」という問いについての結果である。

うなづき行動の $|z|$ は4.16であり、被験者にロボットが飼い馴れているという印象を与えたと言える。また、その効果の強さもグラフに見るように強い。

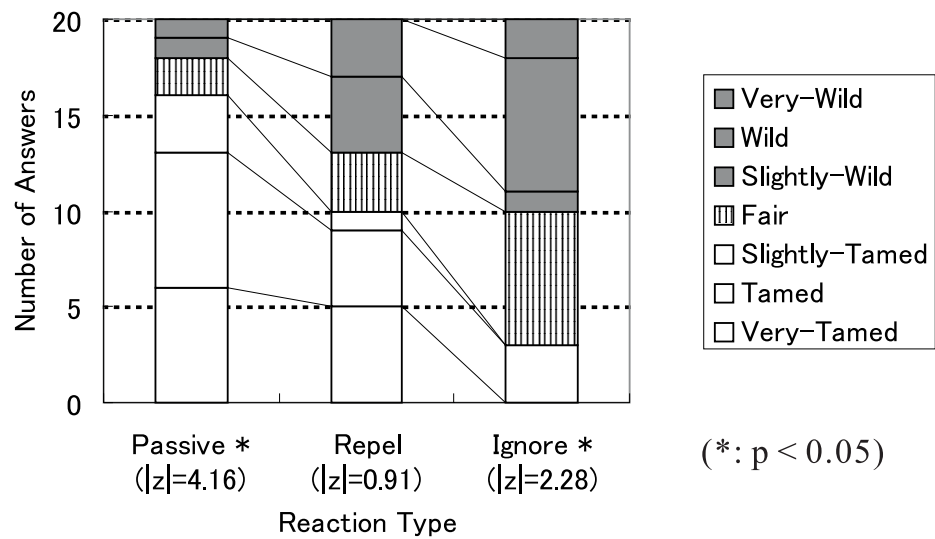
払い除け行動の $|z|$ は0.91であり、有意な偏りは見られない。

無反応行動の $|z|$ は2.28であり、被験者にロボットが野良的であるという印象を与えたと言える。



質問: ロボットは好意的であると感じるか? / 敵対的か?
 Question 2: "Do you feel the robot has goodwill or hostile feeling?"

FIGURE 8.6: RESPONDENTS OF QUESTION NO.2



質問: このロボットは野良的に感じるか? / 飼い馴れのか?

Question 3: "Do you feel that this robot is tame?"

FIGURE 8.7: RESPONDENTS OF QUESTION NO.3

生き物らしい動きか？

Fig.8.8は、「このロボットは生物学的か？あるいは機械的か？」という問いについての回答の集計結果である。

うなづき行動の $|z|$ は、0.234であり、機械的であるという印象を与える傾向があると言える。

払い除け行動の $|z|$ は、0.59であり、有意な偏りは見られない。

無反応行動の $|z|$ は 3.49であり、被験者に機械的であるという印象を与える傾向があると言える。また、その効果の強度はグラフに見るように強い。

うなづき行動と無反応行動との間で分布差を検定してみると、 $|z|$ は 2.49である。よって、無反応行動は、うなづき行動より、より強い機械的な印象を与えると言える。

なお、この設問については、「どちらでもない」と回答した例は、いずれの反応パターンにおいても全く無かった。つまり、この質問については全ての被験者は全ての事例に於いて、機械的か生き物的かどちらかに判断した。

顔を近付けてもよいか？

Fig.8.9は、「このロボットに顔は近付けたくないか？逆に頬ずりしたいか？」という問いに対する回答の集計結果である。

うなづき行動の $|z|$ は 0.02であり、回答に有意な偏りは見られない。

払い除け行動の $|z|$ は 1.91であり、有意な偏りは見られない。

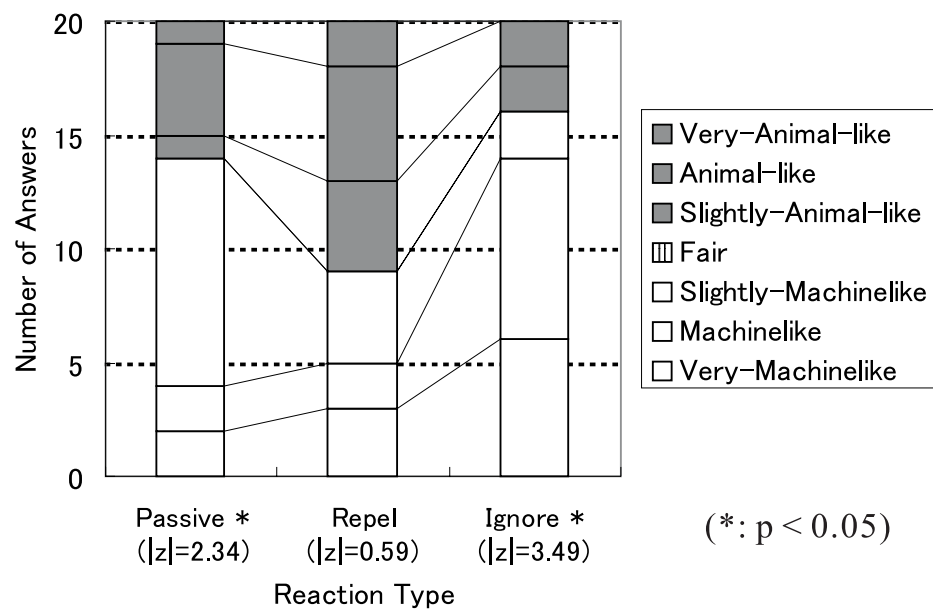
無反応行動の $|z|$ は 3.06であり、被験者に顔を近付けたくないという印象を持たせる傾向があると言える。

8.3.4 考察

設問の意味

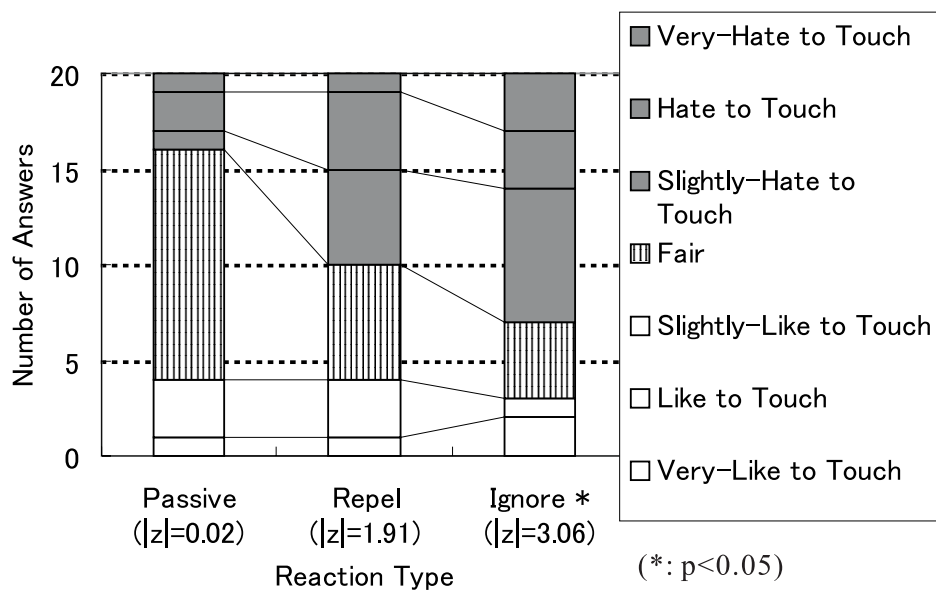
第1の設問は、行動の意図の分かり易さを測定するためのものである。(Table 8.5では意図性と記した。)

第2の設問は、行動の好意感/敵対感を測定した。



質問: このロボットは機械的に感じるか? / 生き物的か?
 Question 4: "Do you feel the robot machine-like or animal-like?"

FIGURE 8.8: RESPONDENTS OF QUESTION NO.4



質問: このロボットに顔を近付けたくないか? / 頬ずりしたいか?
 Question: "Do you like or hate to put your face near to the robot?"

FIGURE 8.9: RESPONDENTS OF QUESTION No.5

第3の設問は、飼い馴れ感を測定した。

第4の設問は、行動の生き物らしさを測定した。

第5の設問は、被験者にロボットに顔を近付けてもよいかと質問することで、ロボットが安全な印象を与えているか、逆に危険な印象を与えているかを測定したものである。(Table 8.5では安全感と記した。)

受容的行動に関する考察

人間の手の動きに対して受容的な行動である「うなづき行動」は、好意を表現し、飼い馴れ感を与えた。つまり親和感演出を果たしている。この事実は本章の仮説“受容的行動が親和感を与える”を支持するものである。

無反応行動と比較すれば、受容的行動は好意感・飼い馴れ感という親和感の要素を増大させている。同じロボット機体であっても、対人反応行動によって親和感を増大させることが出来た。

反発的行動に関する考察

人の手の動きに対して反発的である払い除け行動は、ロボットの行動の意図を強く人間に感じさせた。

一方、好意/敵対、野良/飼い馴れ、の質問について回答結果が分かれた。つまり被験者によって、払い除け行動の意味が、敵対的行動とも宥和的行動とも解釈されたのである。

被験者の払い除け行動についての感想を調べると、頭を触ると急に払い除けるように頭をあげるので反抗的だと解釈した場合と、頭を触るとそれに応えるように頭を上げるので愛らしいと解釈した場合の、2つパターンがあった。

この結果を、前章で用いた舞踊学の Laban 身体動作分析理論 [29][32] から解析してみる。Laban 理論は動作とその印象の関係を、動きの軌道 (shape) と質 (effort) の二つの面から説明する。

本実験の反発行動を shape の視点から解析すると、筆者の設定では「触られると払い退ける反応」であったが、「触られると接近する反応」とも解釈される可能性がある。接近は「接近する対象への興味や好意を表わす行動」であるので好意を感じることもありえたのであろう。これは「払い退け」による敵対感の演出とは逆の印象である。本実験のロボットは可動範囲が狭く shape を明確に表現するには不

十分であった。

一方、払い退けの行動の effort を解析すると、急激に頭を上げる行動であるから、「直線的」「急激」「力強い」という質を持つように設定されたといえる。しかし、一旦頭を上げてしまうと、手が離されないかぎりには上げたままになり動作が停止する。停止状態には上記の払い退け動作の質は無い。このため、ロボットから手をすぐに離す被験者と、そうではない被験者では、印象が分れることになったと推測される。

よって、動作の与える印象をより精度良く制御するためには、1) ロボットの可動範囲の拡大し、自由度を増やして、表現能力を向上させると、2) 動きの質を動作を通じて統一することが必要となるだろう。

無反応行動に関する考察

無反応行動は、意図が分かりにくく、機械的な印象を与え、顔を近付けたくないという印象を与えている。また、自由回答では「つまらない」という回答を2人から得ている。

従来の産業用ロボットは、人間の機体への接触に対して無反応であるから、これらの無反応行動の特徴を持つと言える。従ってこの結果から、心理的インタラクションを想定せず製作された産業用ロボットを、そのまま人間の住む室内に持ち込んでも、その動きの不気味さから、人間はロボットを拒絶すると予想される。よって、人間共棲ロボットにおいては、その対人行動を心理的影響を考慮して設計する必要があることを、この結果は指摘している。

結果の総括

調査対象の印象5項目の結果を Table 8.5 にまとめる。

人間に対して心地よく接するロボットとしては、その意図が判りやすく、好意的で、反抗的でなく飼育された感じがして、ユーザが話しかける相手として不自然でないように生き物らしさをある程度備え、安全な印象を与えることが望ましい。

そこで、Table 8.5 では上記の望ましい印象を有意に与えた場合には 印を、逆に望ましくない印象を与えた場合には×印を記す。

全般的にうなづき行動が、望ましい印象を演出している。払い除け行動は、設問によっては、うなづき行動より望ましい印象を演出していることがある。無反

TABLE 8.5: SUMMARY OF RESULTS

反応型	意図性	好意感	飼慣感	生物感	安全感
受容 (うなづき行動)				×	—
反発 (払い除け行動)		—	—	—	—
無反応	×	—	×	×	×

- ... 欄に示された, 人間と接するロボットにとって望ましい印象を, 反応行動が与える有意水準 5%で検証されたケース.
- × ... 望ましくない印象を与えることが同様に検証されたケース.
- ... 有意な結論が得られないケース.

応行動は, 総じて望ましくない印象を与えている.

ここで, 知見を一般化するために各反応をより本質的に言い表してみる.

- “うなづき行動” と “払い除け行動” の差異を, 数理的・物理学的に言い表すなら, 人の手とロボットの額の接触面での押し合いのエネルギーの流れの向きの違いである. つまり, “うなづき行動” では, 人間がロボットに対して (力学用語の) 仕事をし, エネルギーは人からロボットへ流れた. “払い除け行動” では, 逆に, ロボットが人間に対して仕事をし, エネルギーはロボットから人へ流れた. このエネルギーの流れの方向の差が, 両者の印象の差の原因である.
- “無反応行動” とは, 人間の接触行動を全く無視していることが特徴の行動様式であり, 数理的に言えば人間からロボットへの情報伝達がゼロのインタラクションである. “無反応行動” が, 人間に接する存在として望ましくない印象を与えてたが, これは情報伝達不能という欠陥に起因するものと考えて良い. このように, 人間とロボットとの情報伝達上の特性も, 人間がロボットに対して抱く印象を支配することが判る. よって, 次章において, 情報伝達に関する議論と実験を取り上げることとする.

統計的に有意な結果の普遍性

本章での有意水準 5%にて有意な結果とは, 概ね, 被験者の 3/4 以上が一致したの多数意見であると考えて良いだろう. つまり, 有意な傾向と言っても, 1/4 の人にとっては, 特に印象を判定しづらいか, あるいは逆の印象を得る恐れがある.

しかし、本表現手法を用いて印象をより精度良く制御し演出する可能性は充分にあると考えられる。本実験では、特に実験場面に文脈がなく、被験者は実験者に指示されて初対面のロボットに特に理由もなく接触インタラクションを行った。しかし、文脈を用いることで、表現の意味内容をより細かくかつ精度良く伝達することが可能になるだろう。例えば、印象意見が分かれた“払い除け行動の親和感/敵対感”に関して、敵対感を表現したい場合を考えよう。払い除け行動の前後にて、ロボットがユーザから遠ざかり逃げていれば、ロボットがユーザを怖れて嫌がっているというに感じられ、敵対感の演出に誘導できるだろう。逆に、ロボットがユーザに呼ばれて近くにきた後、払い除け行動の接触インタラクションを行ったのなら、ロボットはユーザに従順という印象が先立っているから、払い除け行動を敵対とは感じにくくなるだろう。

また、顔表情や言語情報をインタラクションに追加し、印象形成をより安定して行うことが期待できる。

このように、本実験での統計的に有意な結果は、普遍性を備えた表現に関する法則・傾向を意味し、印象形成を補足する手段を併用することで、その再現性を充分実用可能な域まで向上することができる。

8.4 結論

本章では、ロボットの行動による親和感の演出の原理を提案した。そして、その妥当性をロボットを用いた心理実験で検証した。

動物行動学の知見に依れば、親和感/敵対感など社会関係的内容は、相手に対する反応行動の形態によって表現されるのであった。即ち、ダイアドに於いて、社会関係的内容が表現されるのであった。

本章では、親和感の表現原理としてオオカミの社会行動に範を求めた。オオカミでは、接触に対して力学的に受容的な反応行動を行うことで、仲間に親和感を表現しているのであった。

そして、この原理をロボットの対人表現に応用した。具体的には、ロボットが、人間の接触に対して、それを押し戻さず受容的に振る舞うことで、人間に親しみを表現することを目指した。実験にて、これを確認した。

また、実験にて、人間の接触に対して無反応である場合には、意図が解りにくく危険な印象を与えることが解った。

第IV部

ダイアドの繰り返しにおけるロボット から人への表現

第9章 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

本章の要旨

人とロボットの行動 (接触や音声) を介したインタラクションにおいて、ロボットに対して抱く印象は、人間の働きかけに対するロボットの反応の様式に依存すると考えられる。本論文では、ロボットの反応特性を、インタラクションの情報伝達効率として定量化し、それと生成される印象との相関について仮説を立て、実験により検証した。

実験では、ロボットの応対の様式を、情報伝達効率が高いもの (ある入力に対して特定の反応を必ず返すもの)、中間のもの (たまに予想外の反応をするもの)、低いもの (入力と反応の対応関係がランダムで無法則なもの)、の3つを用意しそれらの印象を比較し、相関関係を調べた。

結果、意図を感じさせる効果は情報伝達効率の高い場合に得られ、面白さ印象は中間的な情報伝達効率の場合のロボットの反応行動によって得られた。

9.1 研究の背景と目的

前章までは、対人行動物の個々のモナッド、ダイアドによる対人表現を研究対象としてきた。

しかし、特定の意味を表現するモナッドやダイアドであっても、それが何度も繰り返されると、人間は既視感を感じ飽きるという現象が起こり得る。既存の対人行動物の製品の多くがユーザに飽きられているが、それは対人行動物の反応の仕方が同じで、行動アルゴリズムが見え透いてしまうことが大きな原因の一つであろう。何度も繰り返されるインタラクションに於いてユーザに飽きられないよ

うに振る舞うことは、対人行動物には難問である。

だが、ペットは逆に、人間とインタラクションを何度も繰り返すことで、より人間の愛着を深めることができる。つまり、人間とペットの社会関係を発達させることができるのである。

従って、ペットの行動アルゴリズムを数理的に定式化しソフトウェアとして移植できれば、ユーザに飼い馴れる対人行動物が実現できるだろう。

しかし、対人行動物が人間との社会関係を行動インタラクションを通じて深めるための方法論は、個別的な知見の報告 [76][65][146] があるものの、あまり体系的には研究なされていない。特に、対人行動物のインタラクションアルゴリズムを、対人社会関係の深化を目標にして、数理的に設計するという試みは少ない。

この問題に取り組むに当たって、動物行動学の手法は大変参考になる。動物行動学では社会関係を、行動から客観的に計測し定量化する方法が数多く開発されている。社会関係の強さを表す量は“連関度”(association) と呼ばれ定量的に研究されている。

例えば、Harlow ら [103] は相手に触っていた時間の長さを用い、Hinde ら [104] は積極的に相手を触った割合を用いた。また Clutton-Brock ら [105] は一緒にいるところを見かける割合や、存在位置の相互距離などを用いている。

これらの知見を基にして、対人行動物が人間との社会関係を発達させるために、“一緒にいる割合”などの構造が単純な連関度を制御目標とすることは比較的实现が容易であると考えられる。

だが、インタラクションの様式、すなわち相手から働きかけに対する対人行動物の反応アルゴリズムの違いによっても、相手を感じる社会的印象は異なるであろう。本論文では、このインタラクション様式とその印象の関係の分析を取り扱う。

さて、インタラクション様式を分析する場合、インタラクション様式についての数理的な方法論が必要になる。この問題に対しては、これも動物行動学が発展させてきた、個体間のインタラクションの情報理論的分析が有力である。行動インタラクションにおける情報伝達量が、社会関係的内容と相関関係を持つことは多くの研究で明らかにされている [106], [120], [107]。例えば Dingle [106] はエビの行動について、初対面の個体間では、社会的序列を決するために盛んにインタラクションが行われるため情報伝達量が多いが、しだいに序列が定まるとインタラクションが減り情報伝達量が減少することを明らかにした。

動物行動学は客観性を重視するため、“相手に対する印象”などの主観的・情緒的な内容を明示的な研究対象とはしていない。だが、インタラクションの情報理論的特徴と、それが人間に与える社会关系的印象との間に、何らかの法則が存在

することは期待できる。例えば，呼べばすぐ来る犬と，呼んでも反応しない犬とでは，“親しさ”などの印象は当然異なるであろう。

そこで本論文は，人間と対人行動物との行動によるインタラクションの情報理論的特徴と，そこで対人行動物が人間に与える面白さや可愛らしさなどの対物的・社会関係に関わる印象との相関関係を，インタラクションの情報理論的手法を利用して，実験にて分析することを目的とする。

9.2 社会的行動インタラクションと情報伝達

9.2.1 人間・動物の外界随伴性の確認行動

人間・動物は，関心を持った外界物について，そのインタラクション上の特性について，本能的に調べようとする。

代表的な研究である Watson[108] の随伴性 (responsiveness) 探知実験では，乳幼児が自分の目の前に提示されたおもちゃが作動する法則を見破る努力をすることが観察された。例えば，おもちゃが乳幼児の体の動きに応じて作動する設定の場合，乳幼児は自分の体を動かし，おもちゃが反応して作動することを，数回繰り返し見取った後，止める。逆に，おもちゃが乳幼児の体動とは無関係に作動する場合でも，乳幼児は体動を数回試みて，おもちゃに随伴性が無いことを見取った後止める。つまり，相手の反応の法則性の有無が関心事となっている。

このように，随伴性の確認は乳幼児期から本能的に行われており，人間・動物が外界に臨むにあたっての基本的な戦略になっている。従って，人間に応接するロボットに対しても，この戦略が適用されることが予想される。

Watson の実験結果からすると，外界物に高い随伴性が存在する場合でも，低い随伴性が存在する場合でも，その確認が済めば人間は随伴性確認行動を止める傾向があると言える。つまり，マンネリでカラクリが容易に探知できる反応様式や，でたらめで無法則の反応様式では，確認行動を繰り返すうちに好奇心欲求が治まり，過剰な確認行動を起こさぬようになっていいると考えられる。

このように，人間や動物は，対象物の行動に含まれる対人随伴性に応じて，対象物に関する印象を形成し，働きかけ行動を改める戦略を採る。従って，機械が人間とインタラクションする場合にも，機械の行動の対人随伴性は，人間が感じる印象や人間の行動に強く影響を与えられられる。

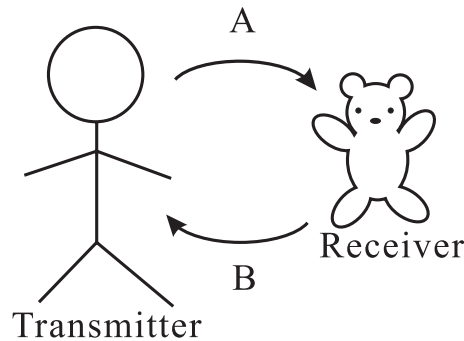


FIGURE 9.1: A DYADIC INTERACTION

9.2.2 対人インタラクションアルゴリズムへの応用方針とその課題

幸い随伴性は，次項で述べるように，情報理論的な量的概念として数理的に書き下すことができる．また，随伴性を制御目標量とする対人インタラクション行動選択アルゴリズムを構築することは容易である．

しかし，その制御の方針となるべき，インタラクションの情報理論的特徴（随伴性の強弱やその時間変化）とその対人効果との関係は，未だよく明らかになっていない．

これを解明するための第一歩として，本論文では，ロボット行動の対人随伴性と，人間が得る対ロボット印象の相関関係を，実験で定量的に調査する．

9.2.3 インタラクションの情報理論的特性の定量化手法

インタラクションの最も簡単な形態である，2つの行動のやりとり，即ちダイアドインタラクションの枠内にて議論する．

Fig.9.1 にダイアドの模式図を示す．図の左側が先に行動を起こす行為者（以下“先動者”と呼ぶ）であり，右側が後に行動を起こす行為者（“後動者”）である．

先動者は行動 $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ を起こし得て，後動者は行動 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ を起こし得るものとする．先動者の先行する行動 A_i 生起の後，後動者が後発の行動 B_j を生起するしたとすると， (A_i, B_j) の対をダイアド (Dyad) と呼ぶ．

さて，後動者の行動が先動者の行動の反応として為されたか否かを，客観的に判定するには，先動者の行動選択が後動者の行動の選択に及ぼす影響（行動カテゴリ選択上の影響度）を指標とすべきであり，これは以下に述べる Shannon 式の情

TABLE 9.1: SOCIOMETRIC MATRIX

Transmitter's behavior \ Receiver's behavior	B_1	...	B_j	...	B_n	Row totals
A_1	f_{11}	...	f_{1j}	...	f_{1n}	$f_{1\cdot}$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
A_i	f_{i1}	...	f_{ij}	...	f_{in}	$f_{i\cdot}$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
A_m	f_{m1}	...	f_{mj}	...	f_{mn}	$f_{m\cdot}$
Column totals	$f_{\cdot 1}$...	$f_{\cdot j}$...	$f_{\cdot n}$	N

報理論の計算手法で定量化できる。

ダイアド (A_i, B_j) が起こった回数を f_{ij} とする。 f_{ij} を行列状にまとめたものを sociometric matrix という (Table 9.1 参照)。

例として Table 9.2 に sociometric matrix の擬似データを示す。例えばこの場合、先動者が相手を胴体を揺すった (A3) 後に、後動者が足を動かす (B2) というダイアドの回数 f_{32} が 4 回であったことを示している。

以下、次のように諸量を定義する。

先動者の行動回数小計: $f_{i\cdot}$

$$f_{i\cdot} = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (9.1)$$

後動者の行動回数小計: $f_{\cdot j}$

$$f_{\cdot j} = \sum_{i=1}^m f_{ij} \quad (9.2)$$

全ダイアド回数: N

$$N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (9.3)$$

両者間のダイアドインタラクションの行動不確かさ: H_{AB}

$$H_{AB} = \log_2 N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \log_2 f_{ij} \quad (9.4)$$

ただし $0 \log 0 = 0$ とする。

先動者の行動不確かさ: H_A

$$H_A = \log_2 N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m f_i \log_2 f_i \quad (9.5)$$

後動者の行動不確かさ: H_B

$$H_B = \log_2 N - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n f_j \log_2 f_j \quad (9.6)$$

インタラクションで伝達した情報量: I

$$I = H_A + H_B - H_{AB} \quad (9.7)$$

情報伝達効率 (本論文では「後動者の識別率」と呼ぶ): D

$$D = I/H_A \quad (9.8)$$

情報伝達効率 (本論文では「後動者の可制御率」と呼ぶ): C

$$C = I/H_B \quad (9.9)$$

先動者の行動が後動者の行動選択に影響しない場合は、 D, C はほぼ 0 と計算される。逆に、先動者の行動が後動者の行動選択に強く影響する場合は、 D, C は 1 に近い値に算出される。

本稿では、情報伝達効率について、 D を、先動者の行動の違いが後動者の行動選択に反映されている度合いを示す量であるから、“後動者の識別率 (Distinguishability)” と呼ぶ。また、 C を、後動者の行動選択を先動者が制御できる度合いを示す量であるから、“後動者の可制御率 (Controllability)” と呼ぶ。

例えば、Table 9.2 の場合を計算すると、 $N = 23, H_{AB} = 2.67[\text{bit}], H_A = 1.88[\text{bit}], H_B = 1.72[\text{bit}], I = 0.94[\text{bit}], D = 0.49, C = 0.54$ となる。可制御率 ($C = 0.54$) が識別率 ($D = 0.49$) より高い。これは、先動者の側からは後動者の反応を指定することが比較的容易であることを意味する。A2 に対しては B1 が、A3 に対しては B2 が、A4 に対しては 62.5% で B4 が引き起こされると期待できる。一方、B 行動から A 行動を逆推定することは比較的難しい。先動者の行動に依らず後動者は B1 か B2 の反応をすることがあるからである。¹

このようにして、識別率と可制御率によって、2 者間の行動インタラクションにおける行動カテゴリ選択上の影響度を定量的に表すことができる。

¹なお、 N が小さいデータを基に D, C を算出すると、真の値に対して過大評価になるので Miller & Madow の補正が必要である [126, 127, 128, 98, 101]。また、 D, C は比例尺度や間隔尺度の資格を持っていないので、これらの数値の差や比に意味を持たせるためには David 法などの補正の手続きが必要である。[98, 101]

TABLE 9.2: AN EXAMPLE OF SOCIOMETRIC MATRIX

Observed Frequencies		Reciever's Reaction				Row Totals
		B1: Raise Arms	B2: Move Legs	B3: Curl	B4: No Reaction	
Trans- mitter's Behavior	A1: Call	5	3	0	0	8
	A2: Touch	3	0	0	0	3
	A3: Shake	0	4	0	0	4
	A4: No Action	2	0	1	5	8
Column Totals		10	7	1	5	23

9.2.4 定量化手法の注意点

実際の研究実施では、ダイアドを用いることや、ダイアドの要素である行動を定義することは、注意深い考察を要する作業である。

特に次の問題点は分析の正当性に関わる重大なものである。

1) わずか2つの行動のやりとりであるダイアドで分析に充分か？

実際の対人間インタラクションでは、文脈の変化発展に応じて、相手の反応様式は変化するものである。このような文脈依存性の強いインタラクションに対しではダイアドの分析では不十分である。

だが、3つ以上の行動のやりとりについて分析を試みる研究例もあるが、組み合わせ数が多くなり、観測データのサンプルが充分集まらず分析できないことが多い。

本論文の実験では、人間とペット役のロボットの短いインタラクションを対象とする。これは、文脈依存性が少なく、たとえダイアドの枠内で分析であっても、充分意味のある結果が期待できるからである。

なお、高次の行動のやり取りの枠組みでインタラクションが成立しているかを調べるためには、後動者の行動と、先動者の次の行動とのダイアドにて情報伝達を計算するとよい。もし、この情報伝達効率が高ければ、後動者の行動が次の先動者の行動選択に影響しており、ダイアドより長い行動の連鎖の枠組みでコミュニケーションが起きている。逆に、情報伝達効率が低ければ、コミュニケーション

の大半はダイアドで成り立っていることと言える。

2) 持続時間が長い行動や断続的な行動の場合は何をもって1回の行動と数えるか?

最も一般的な手法は，Dawkinsらがヒヨコ [110] とハエ [111] の行動についての研究で採用した持続時間の差異を無視する方法である．これは問題の単純化を狙ったものであるが，意味のある結論を導くに至っている．Fentress[112] のマウスの行動の研究では，個々の動作を行動と定義せず，動作の繰り返しのレベルにて行動を定義することで，観測データから有意な結論を導いている．

このように行動の持続時間が長く可変であったり，1行動が複数の動作から構成される場合では，“1回の行動”の妥当な定義を定めることには考察が必要になる．

本論文の実験ではこの問題を回避するため，ロボットの行動の持続時間を等しく短くし，1.0[s]と設定した．(中村 [16]によれば，インタラクションにおける適切な時間的“間”は1[s]前後である．従って，1[s]程度の持続時間のロボット行動ならば，人間に特に長くも短くも感じさせないと考えられる．)

また，人間からロボットへの行動については，被験者に“ロボットへの働きかけ方”を教示することで，被験者が短い時間で行動を終えるように，またロボットが他の行動と弁別性よく認識できるように誘導している．

3) 先行行動と後発行動の間の時間遅れをどの程度許すか?

先行行動と後発行動の間の時間遅れが大きい場合，後発行動を待たずして先動者が新たな先行行動を起こす可能性がある．この場合，後発行動がどの先行行動に対する反応であるのか判定が難しい．

本論文の実験ではこの問題を回避するため，ロボットが人間に対して行う後発行動は，時間遅れほとんどなしに即時に行われるよう設定した．

但しロボットの後発行動の中に1つだけ例外として“無行動”がある．しかし1つだけの例外であるので対策が成り立つ．実験者は被験者にロボットの反応に1つだけ“静止して何もしない”ことがあることを教示する．すると，被験者が行動を生じた後にロボットが反応せず停止している時点で，被験者は，ロボットが無行動を選択していることを察知できる．従って，ロボットの反応行動の種類を判定するために，時間遅れを待つ必要はなく，先行行動と後発行動の対応関係を被験者は混乱なく認知できる．

4) 行動のカテゴリの切り分け方の設定問題

上記の議論では，“呼ぶ”・“撫でる”などの行動の分類は，筆者が主観的に行っている．しかし，この分類を，例えば“大声で呼ぶ”・“小声で呼ぶ”など，より詳細に分類を設定することが出来る．逆に，分類をより大雑把にすることもできる．

しかし，行動のカテゴリの分け方によって，情報理論に関係する量の計算値は異なる．例えば，行動エントロピは，カテゴリ分けが詳細になればなるほど，値が大きくなる傾向にある．逆に，大雑把なカテゴリ分けでは，エントロピは小さく見積もられる．情報伝達効率も，カテゴリ設定の詳細さに応じて計算値が変動する．

このため，妥当な行動カテゴリを設定する方法が求められる．

この“行動カテゴリ設定問題”に対して，計算機が自動で客観的に行う方法がある．まず，計算機が自動でカテゴリを設定する方法としては，ポロノイ法や教師無し学習法などがある．そのような手段で得られたカテゴリ設定が，詳細過ぎるか，大雑把過ぎるかは，情報量基準（赤池情報量基準，ベイジアン情報量基準など）で評価できる [130]．

但し，この自動カテゴリ設定は，下記の困難な問題を抱えている．

1. カテゴリを情報量基準などで評価するために，データのサンプル数が相当数必要である
2. 時間的に広がりを持つ行動や事象の回数などのようにカウントするかが問題．
3. あくまで意味中立でカテゴリを設定するために，そのカテゴリを基にして計算される情報伝達効率が，実際に人間が感じる意志の伝わり具合など感性的な印象の強度と一致する保証がない

結局のところ，人間が常識に従って行動カテゴリを置くことが，手早く簡単で，かつ意味的にも妥当性がある程度は保証されていると考えられる．

このような問題があるが，カテゴリの自動設定手法とは，機械やロボットが，外界の事象の分類を人間に依存せず，自分で学習しながら行う手法である．いわば，機械の外界認知システムが学習し成長するわけであり，人間や動物の知的成長を考える上でも，より賢い機械・ロボットの作る上でも，興味深い研究テーマである．

9.3 人とロボットとのインタラクションにおける情報伝達効率と生成される印象の相関実験

9.3.1 実験目標

人間とロボットの行動ダイアドインタラクションにおいて、人間の働きかけ行動からのロボットの反応への情報伝達効率と、人間がロボットに対して抱く社会関係に関わる印象との関係を調査することを目標とする。

調査する社会関係に関わる印象は、

- “ロボットの振る舞いに意図を感じる度合い”
- “ロボットの振る舞いを面白さ”
- “ロボットの振る舞いを可愛らしさ”

の3つである。

これらは、対象物に対する社会的な第一印象の代表例である。また、本実験のように短時間で無文脈のインタラクションであっても充分形成できると考えられる。(より複雑な社会的印象、例えば“親切さ”などは、本実験のインタラクションでは印象形成が難しいであろう。)

これらの印象の実験結果について、以下のように予想した。

仮説1 意図を感じる度合い: 自分の働きかけに対する相手の反応が安定していると、相手の性質・性格を把握しやすく意図を感じる。

仮説2 面白さ: 相手の反応挙動が安定であると、やがてマンネリに感じ退屈する。逆に、相手の反応が無規則であると、相手に働きかける甲斐が感じられずつまらない。

仮説3 可愛らしさ: 自分の働きかけに対する相手の反応が安定していると、自分になつて素直であるという感じがして可愛らしく感じる。

これらの仮説の成否の検証を軸に分析する。

9.3.2 実験方法

被験者

20 歳代の男子学生 8 名，20 歳代の女子学生 2 名，20 歳から 30 歳代のデザイナー 5 名，20 歳代の事務職の女性 5 名，40 歳代の男性事務職 1 名の，合計 20 名を被験者とした。

被験者数の設定は次のように考えた。本実験はロボットの感性研究の分野では初めて行われる試みであり，知見探索的な実験である。従って，明確に現れる万人共通的な感性の傾向を探り出すことを目的とし，それは 20 名の意見データを分析することで十分可能と考えた。但し，より細かい知見，例えば被験者の個人属性（性別・年齢など）と印象結果の関係などを詳しく分析するには足りない。

実験計画

独立変数は，人の行動と，それに対するロボットの反応行動のダイアドの情報伝達効率である。今回は，情報伝達効率が 0, 0.5, 1 の，3 つの水準のものを実験にかける。詳細については後述する。

従属変数は，被験者がロボットの対して抱く印象であり，“ロボットの振る舞いに意図を感じる強度”・“ロボットの振る舞いに感じる面白さ”・“ロボットの振る舞いに感じる可愛らしさ”である。調査法については後述する。

剰余変数としては，下記のものが注意すべきものと考えられ，下記のように統制する。

ロボットの外見・肌触り ロボットの外皮はぬいぐるみを用いるため，外見や肌触りだけで，可愛いと感じさせる効果が予想される。そこで，本実験の印象評価では，実験条件間の相対順位評価とし，統制する。また，ロボットの体型や外観の違いにより実験結果が異なることがあり得る。しかし全ての外観を実験することは不可能なので，典型例について実験することとする。そこで，近年の対人行動物の多くは，このような動物のデフォルメされ幼児化された機構と外観をしているので，これを採用した。

ロボットの個々の反応動作から感じる意味 本実験では，インタラクション全体から感じる印象を調査するが，個々の動きに可愛らしさや面白さを感じることも予想できる。これに対処するためには，まず，ロボットの個々の動作をな

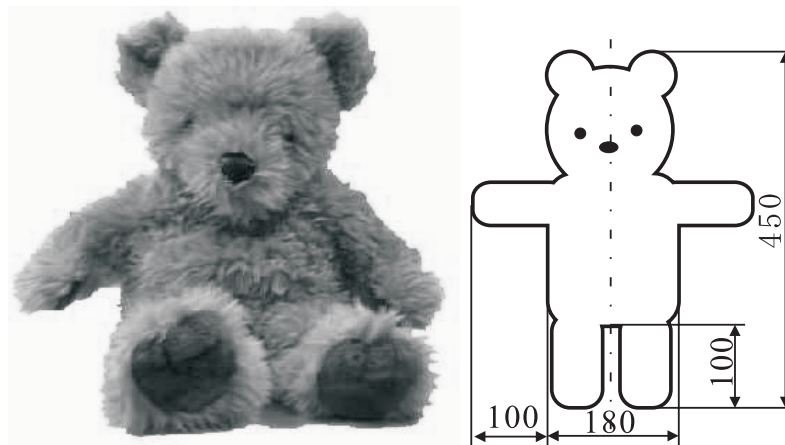


FIGURE 9.2: EXPERIMENTAL INTERACTION ROBOT

るべく意味中立的なものを採用する．つまり，ロボットの行動は，それぞれ同様に短くし，特定の意味を与える動作を避ける．

また，インタラクションの時間を十分に長くとり，ロボットの入出力の対応が，被験者が把握できるようにする．このようにして，被験者の関心が，ロボットの個々の反応動作から，インタラクション全体へ，移れるようにする．

実験条件の順番 順番による効果が相殺されるように，被験者ごとに順番を変える．本実験は3つの実験条件を持つので，その順番は6通り (ABC, ACB, BCA, BAC, CAB, CBA) ありえる．特定の順序だけを突出して用いないように実験を行う．

全ての被験者は，3つ全ての実験条件に参加する．

実験装置

実験に用いる対人接触インタラクションロボットの外観を Fig.9.2 に，センサとアクチュエータの配置を Fig.9.3 に，4肢の動作機構を Fig.9.4 に示す．

このロボットの外皮は，デフォルメされたクマのぬいぐるみである．

ロボットの4肢はそれぞれ2つの直流モータによって，折り曲げることができる．動物らしい関節の折り曲げを実現するためには，1点で2自由度の折り曲げが出来ることが望ましい．そこで本ロボットでは，2つのモータの回転軸の間隔をなるべく近付けるように設計し，実機ではその間隔は15[mm]である．

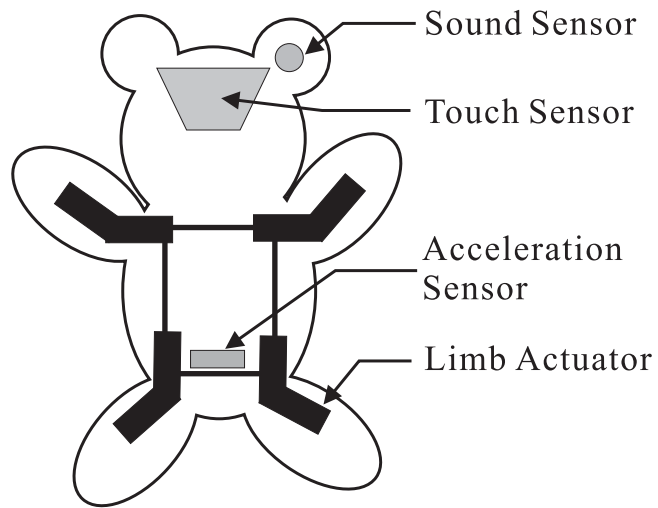


FIGURE 9.3: SENSORS AND ACTUATORS OF THE ROBOT

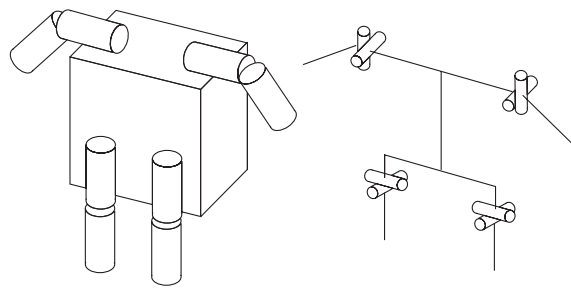


FIGURE 9.4: ACTUATOR-SETUP OF THE ROBOT

センサは、以下の3種類を装備した。

耳部音量センサ: EK Japan 社製の音量センサ PS-3001S であり、ロボットの頭部付近での被験者の呼びかけ声を検知することを目的とする。

胴体加速度センサ: Analog Devices 社製の2軸加速度センサ ADXL202 であり、ロボット胴体の前後方向と左右方向の加速度を計測する。被験者のロボットの持ち抱えの仕方、特に意図的な揺さぶりを検知することを目的とする。

額部接触センサ: 被験者のロボット額部への接触を検知することを目的とする。このセンサの材質は導電性スポンジ (HOZAN 社製 IC フォーム F-10B) であり、加圧時にスポンジの変形による電気抵抗の変化を利用して圧力を計測する。センシング領域の大きさは上底 100[mm]、下底 60[mm]、高さ 65[mm] の台形領域である。

実験手続き

被験者集団の構成は、20歳代の男性学生8名、20歳代の女性学生2名、20歳から30歳代のデザイナー5名、20歳代の女性事務職5名、40歳代の男性事務職1名の、合計20名とした。

被験者数の設定は次のように考えた。本実験はロボットの感性研究の分野では初めて行われる試みであり、知見探索的な実験である。従って、明確に現れる万人共通的な感性の傾向を探り出すことを目的とし、それは20名の意見データを分析することで十分可能と考えた。但し、より細かい知見、例えば被験者の個人属性(性別・年齢など)と印象結果の関係などを詳しく分析するには足りない。

実験は、毎回、被験者1人ずつに対して行う。

まず被験者に、ロボットに装備されているセンサを説明し、どのように働きかけるとロボットが検知するかを教示する。働きかけの方法は具体的には、額部への接触と、胴体の揺さぶりと、頭部への声かけである。そして、ロボットは被験者の働きかけに反応して、あるいは無視して、行動を起こしたり起こさない様に設定されていることを教示する。

次に、インタラクションセッションを行う。実験セッション中は、Fig.9.5のように、被験者はロボットを抱きかかえる。

1つのセッションは90[s]の間、行う。セッション実施時間があまり短いとロボットの反応様式を十分に体験することが出来ない可能性がある。1回のダイアドに3[s]程度かかるとして、ダイアド総数(N)が30程度を見込め、分析するには十分なデータ数である。また、セッション実施時間があまり長いと、被験者に心理的疲



FIGURE 9.5: SCENE OF EXPERIMENT

労を与えたり，前のセッションの印象を思い出しにくくなる恐れがあるので，90[s]が適当であると判断した．

反応様式は後述の3パターンを容易した．各被験者は3パターン全てを体験する．パターンを提示する順序は，順番効果を相殺するように被験者ごとに入れ替える．

次に，体験した3つの反応様式について，その印象を3パターン内の相対的順位付け方式で評価することを被験者に指示する．評価する印象は“ロボットの振る舞いに意図を感じる度合い”，“ロボットの振る舞いの面白さ”，“ロボットの振る舞いの可愛らしさ”である．評価回答は，Fig.9.6に示すアンケート回答板の該当する長方形の中に，反応様式の番号を付けた磁石を置くことで行う．磁石ならば，後から印象の評価を考え直して，置き換えることが容易であるので用いる．

相対的順位方式を採用した理由は，“ロボットのぬいぐるみの外見自体が可愛い”など，実験の剰余変数（実験対象ではないもの）が印象に対してオフセット効果を与えることが予想されたため，それを統制するためである．

行動カテゴリの定義

被験者の働きかけ行動の定義

被験者の働きかけ行動を次の4つとした．ロボットは0.1[s]ごとに外界をセン

※ロボットの動き（90秒間）が終わったら、ロボットの各反応パターンから感じたことを、それぞれの項目について、相対的に順位をつけてください。

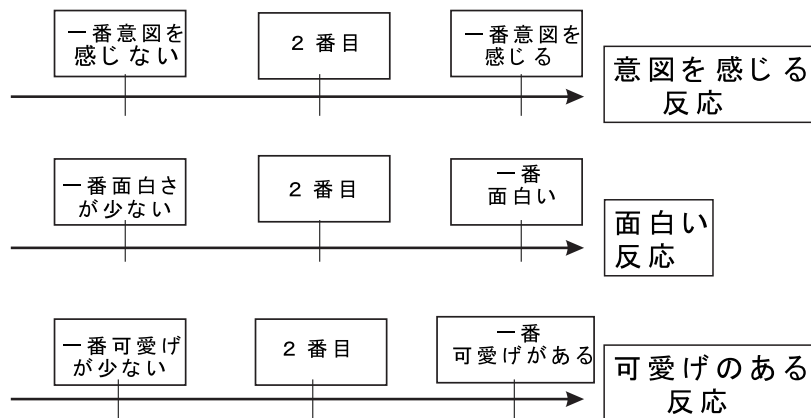


FIGURE 9.6: IMPRESSION ANSWER SHEET

シングシ，下記の判定手順にて被験者の行動を判定するものとする。

- A1) 声かけ行動: ロボットの耳部の音量センサによって、頭部付近の音量がある閾値を超えたことが観測された場合は、被験者がロボットに対して“声かけ行動”を行っているものと判定する。音量の閾値は、実験前に各被験者に“声かけ”をしてもらい、実験室環境の雑音レベルと意図的声かけ音量レベルを峻別するように調整した。
- A2) 額接触行動: “声かけ行動”と判定されない場合で、額部の圧力センシング領域で接触圧が $10[\text{kPa}]$ 以上の部分が検知された場合は、被験者がロボットに対して“額接触行動”を行っているものと判定する。
- A3) 揺さぶり行動: “額接触行動”と判定されない場合で、ロボットの胴体に設置した加速度センサによって、ロボット胴体の前後左右面上でのジャークが $40[m/s^3]$ 超えた場合は、被験者がロボットに対して“揺さぶり行動”を行っているものと判定する。
- A4) 行動的沈黙: “揺さぶり行動”と判定されない状態が $4.0[s]$ つづいた場合は、被験者が行動的に沈黙している、つまり意図的に何もしていないと判断する。
- A') 行動の隙間: “行動的沈黙”と判定されていない場合。つまり、被験者が $4.0[s]$ 未満の間、上記の行動をいずれも起こしていない状態で、行動の隙間と考え

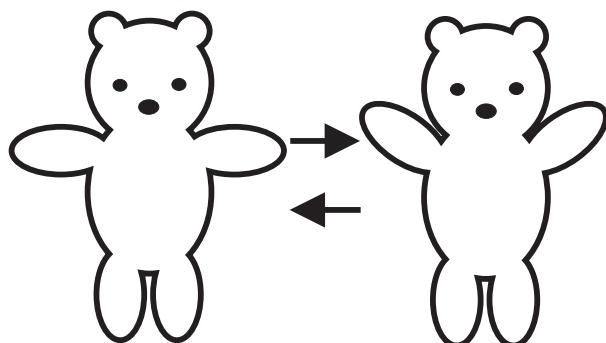


FIGURE 9.7: ROBOT REACTION BEHAVIOR: TYPE B1 *Raise Arms*

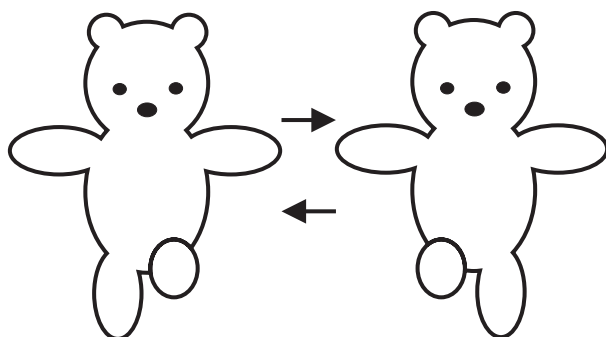


FIGURE 9.8: ROBOT REACTION BEHAVIOR: TYPE B2 *Move Legs*

られるもの．この場合は，ロボットは反応選択手続きに入らず，被験者の行動変化を待つ．

ロボットの対人行動

ロボットの反応行動は次の4つを用意した．

- B1) 両腕挙げ行動: 1.0[s] 間，両腕を上部に挙げる行動．(Fig.9.7 参照).
- B2) 足ばたつかせ行動: 1.0[s] 間，両足を交互に左右2回づつ (周期=0.5[s]) 上げ下げする行動．(Fig.9.8 参照)
- B3) 手足縮こまり行動: 1.0[s] 間，両腕と両足を胴体の前に回し込み，縮こまる行動．(Fig.9.9 参照)

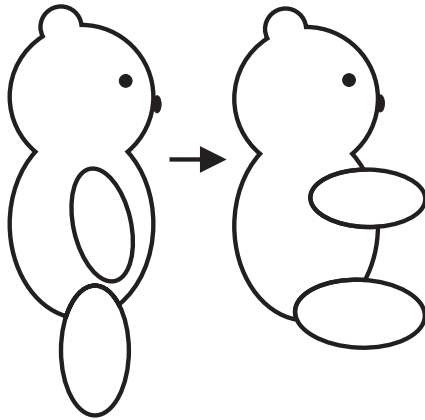


FIGURE 9.9: ROBOT REACTION BEHAVIOR: TYPE B3 *Curl*

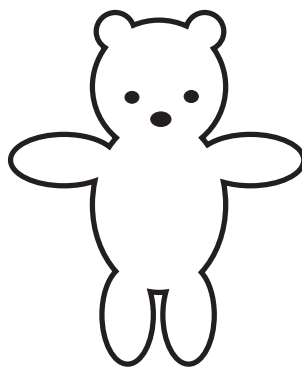


FIGURE 9.10: ROBOT REACTION BEHAVIOR: TYPE B4 *No reaction*

TABLE 9.3: RESPONSE PROBABILITY TABLE OF NON-RANDOM 1-TO-1 REACTION PATTERN $R1$ ($\hat{D} = \hat{C} = 1$)

Human \ Robot	B1 <i>Raise</i> Arms	B2 <i>Move</i> Legs	B3 <i>Curl</i>	B4 <i>No</i> Reaction
A1 (Call)	1	0	0	0
A2 (Touch)	0	1	0	0
A3 (Shake)	0	0	1	0
A4 (No Action)	0	0	0	1

B4) 無反応: ロボットは脱力状態で動作せず。(Fig.9.10 参照)

ロボット動作設定で注意しなければならないことは、ロボットの動作自体が特定の印象や意味を含む可能性である。そこで B1~B3 の行動は、なるべく意味中立的なものにするべく、短いものとし、出力するトルクも同一値のものにした。

ロボットの対人行動様式

被験者が“行動保留”の状態である場合は、ロボットのアクチュエータは脱力しており、関節角の保持トルクも無い状態にある。被験者が働きかけ行動 A1~A4 を行ったと判定した場合、ロボットは反応行動を選択する。

反応様式パターンは、各入力 A_i に対して各反応行動 B_j が選択される確率として定義した。実験に用いる反応様式パターンは、次の3種類である。Table 9.3, 9.4, 9.5 に、その確率分布を示す。

R1) 定型1対1反応様式: Table 9.3 に示すように、入力に対して1対1対応の出力を選択し実行する。

R2) 中庸的反応様式: Table 9.4 に示すように、ある入力に対して特定の2つの反応行動を半々の確率でランダムに選択し行う。

R3) 非情報伝達反応様式: Table 9.5 に示すように、どの入力に対しても差別なく、4つの反応の中から1つを一様な確率で選択する。つまり、人間の入力選択はロボットの反応決定に何も影響を与えていない。

TABLE 9.4: RESPONSE PROBABILITY TABLE OF SEMI-RANDOM REACTION PATTERN $R2$ ($\hat{D} = \hat{C} = 0.5$)

Human \ Robot	B1 <i>Raise</i> Arms	B2 <i>Move</i> Legs	B3 <i>Curl</i>	B4 <i>No</i> Reaction
A1 (Call)	0.5	0.5	0	0
A2 (Touch)	0	0.5	0.5	0
A3 (Shake)	0	0	0.5	0.5
A4 (No Action)	0.5	0	0	0.5

TABLE 9.5: RESPONSE PROBABILITY TABLE OF FULL-RANDOM REACTION PATTERN $R3$ ($\hat{D} = \hat{C} = 0$)

Human \ Robot	B1 <i>Raise</i> Arms	B2 <i>Move</i> Legs	B3 <i>Curl</i>	B4 <i>No</i> Reaction
A1 (Call)	0.25	0.25	0.25	0.25
A2 (Touch)	0.25	0.25	0.25	0.25
A3 (Shake)	0.25	0.25	0.25	0.25
A4 (No Action)	0.25	0.25	0.25	0.25

TABLE 9.6: OBSERVED DISTINGUISHABILITY AND CONTROLLABILITY BETWEEN SUBJECT'S ACTION AND ROBOT'S REACTION

Reaction Pattern	R1		R2		R3	
	Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev
N	54.4	4.8	53.7	3.6	54.4	5.5
I [bit]	4.1	0.34	2.0	0.30	0.35	0.11
D	1.0	0.0	0.54	0.04	0.11	0.06
C	1.0	0.0	0.49	0.04	0.08	0.02

この反応様式の情報理論的特徴を数量的に表現したい．それには観測データから計算される識別率と可制御率を用いるのが適当である．しかしこれらの値は，被験者のそのセッションでの行動選択の分布とロボットの反応選択分布に依存し，毎回ある程度変化する．従って観測値では同一内容を同一値で表せない．

そこで識別率と可制御率の“実験前最尤値”を用いる．実験前最尤値とは，実験前の知識で推定できる一番もっともらしい値の意味である．

この実験の場合，各被験者の行動選択の特性について知識は実験前には無いので，被験者は全ての行動 A1～A4 を等頻度で行うと仮定するのが最も自然で尤もらしい．実験前最尤値とは，その場合の識別率と可制御率の期待値である．識別率と可制御率の最尤値を \hat{D}, \hat{C} と表記する．

反応様式 R1 では $\hat{D} = \hat{C} = 1$ である．反応様式 R2 では $\hat{D} = \hat{C} = 0.5$ である．反応様式 R3 では $\hat{D} = \hat{C} = 0$ である．

9.3.3 実験結果

情報理論的特徴量の結果

まず，実験でのインタラクションの情報理論的特徴を確認する．観測データより算出した，ダイアド総数および情報伝達量，情報伝達効率の平均と標本標準偏差を Table 9.6 に示す．ダイアド総数は予想の 30 回より多く，90[s] に平均で 54 回も行われた．つまりダイアドは平均して 1.7[s] に 1 回の頻度で行われたことになる．これは新奇なロボットを手渡された被験者の好奇心の高さを反映であると考えられる．ダイアド総数が予想より多い分には分析上問題はない．一方，情報伝達効

TABLE 9.7: OBSERVED DISTINGUISHABILITY AND CONTROLLABILITY BETWEEN ROBOT'S REACTION TO SUBJECT'S NEXT ACTION

Reaction Pattern	R1		R2		R3	
	Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev
I [bit]	0.35	0.13	0.27	0.10	0.31	0.14
D	0.20	0.07	0.14	0.05	0.17	0.08
C	0.20	0.07	0.20	0.11	0.19	0.08

率は実験前最尤推定値と観測値が充分近いことが判る。

また、ロボットの反応と、被験者の次の行動との間の情報伝達効率を計算すると、Table 9.7の様に小さい値が得られる。これは、ロボットの反応が、被験者に次の行動に強く影響していないことを意味する。つまり、本実験でのインタラクションは長い構造を持つ行動連鎖は現れず、人からロボットへのダイアドの集まりで成り立っていることが判る。

印象評定回答の結果

次に、印象に関する結果を述べる。

印象評定の結果は相対的順位評価データであるので、統計検定はノンパラメトリックな手法を用いる。反応様式間の回答の分布の偏りの差の有意性については、Mann-Whitney の U 検定を用いる。回答分布の分散についても検定を行いたいが、これについては適当な検定手法がない。

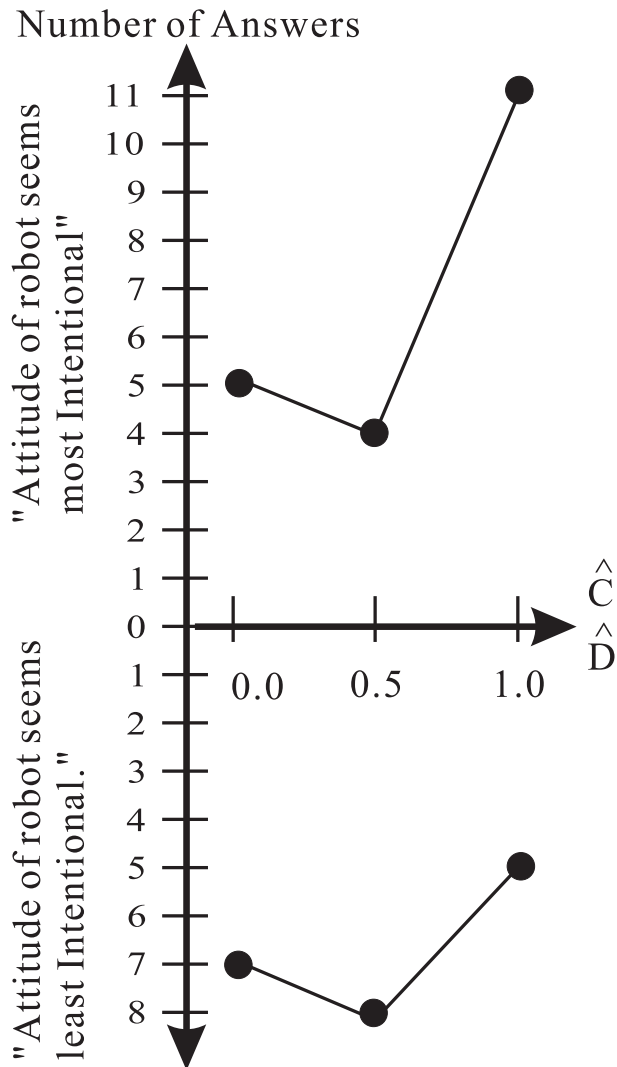
1) ロボットの意図の印象

“ロボットの意図を感じる度合い” についての結果を Fig.9.11 に示す。

情報伝達効率 (\hat{D} , \hat{C}) が高いほど、より強くロボットの意図を被験者が感じる傾向があることが判る。反応様式 R1 ($\hat{D} = \hat{C} = 1$) と R2 ($\hat{D} = \hat{C} = 0.5$) の差について、有意水準 10%にて有意差が認められる。

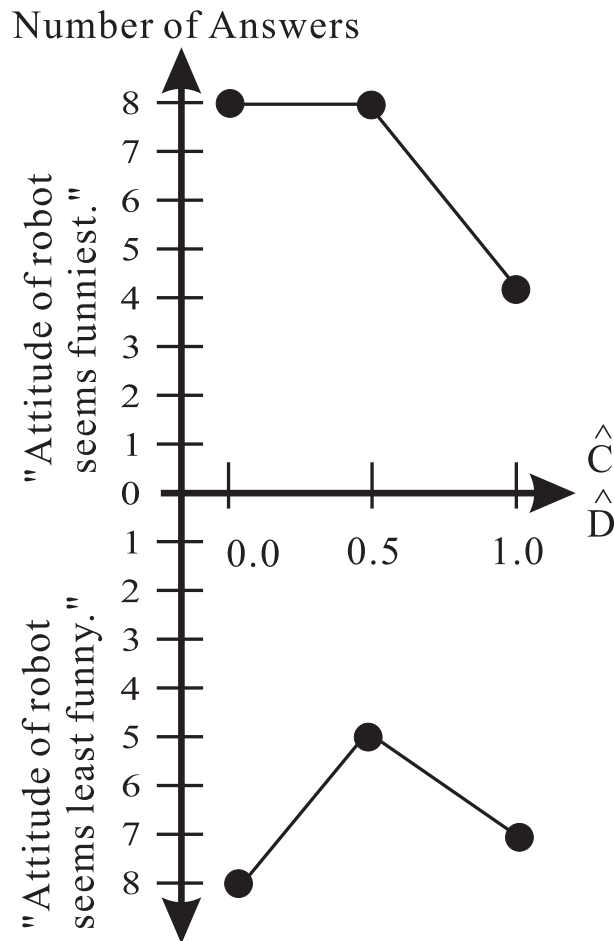
2) ロボットの面白さ印象

“ロボットの面白さ印象の強度” の 3 つの反応様式での順位を Fig.9.12 に示す。情報伝達効率が高い場合は面白さの評価はやや低い。しかし有意差があるとは



Non-random 1-to-1 behavioral reaction pattern of the robot ($\hat{C} = \hat{D} = 1$) produced stronger impression of existence of the robot's intention significantly comparing to semi-random reaction pattern of $\hat{C} = \hat{D} = 0.5$.

FIGURE 9.11: MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATOR OF INFORMATION TRANSFER EFFICIENCIES ($\hat{C} = \hat{D}$) VS. INTENSITY OF IMPRESSION OF EXISTENCE OF THE ROBOT'S INTENTION



Eight subjects judged the full-random reaction pattern ($\hat{C} = \hat{D} = 0$) is the funniest among the 3 reaction pattern. Other 8 subjects, however, judged ($\hat{C} = \hat{D} = 0$) pattern is the least funny. The non-random 1-to1 reaction ($\hat{C} = \hat{D} = 1$) acquired rather less funny judges. Comparing to them, the semi-random ($\hat{C} = \hat{D} = 0.5$) acquired relatively strong funny impression.

FIGURE 9.12: MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATOR OF INFORMATION TRANSFER EFFICIENCIES ($\hat{C} = \hat{D}$) VS. INTENSITY OF FUNNY IMPRESSION

言えなかった。情報伝達効率が0の反応様式は、最も高い面白いと感じる評価と、逆に最も低いと感じる評価に、二分した。相対的に面白さの評価が良いのは、中庸的な情報伝達効率の反応様式 R2 である。

3) ロボットの可愛らしさ印象

“ロボットの可愛らしさ印象の強度”の3つの反応様式での順位を Fig.9.13 に示す。

情報伝達効率が低い反応様式 (R3) の方が可愛いと感じる人と、逆に情報伝達効率が高い方 (R1) が可愛いと感じる人に2分された評価結果となった。

この2分の仕方は、被験者の社会的属性に対してははっきりしている。

被験者の中のデザイナーは5名全員が、情報伝達効率が高い方が低い方より可愛いと答えた。また、女子事務職は5名全員が、デザイナーらとは逆に、情報伝達効率が低い方が高い方よりも可愛いと答えている。

但し、被験者数が少なく、被験者母集団の特定の職場の人間で構成されているから、この職業差と印象評価傾向の差の相関を意味のあるものと評価することはできない。Fig.9.14 に掲げた、女性事務職・デザイナー・男性管理職の被験者11人による、実験後の自由回答から検討しても、特にこの相関を根拠付ける回答は無い。

学生では意見が分裂している。男子学生8名の回答結果は、3名が情報伝達効率が高い方が低い方より可愛いと答え、5名が逆であった。女子学生2名は、1名が高い方が低い方より可愛いと答え、もう1名は逆の意見であった。

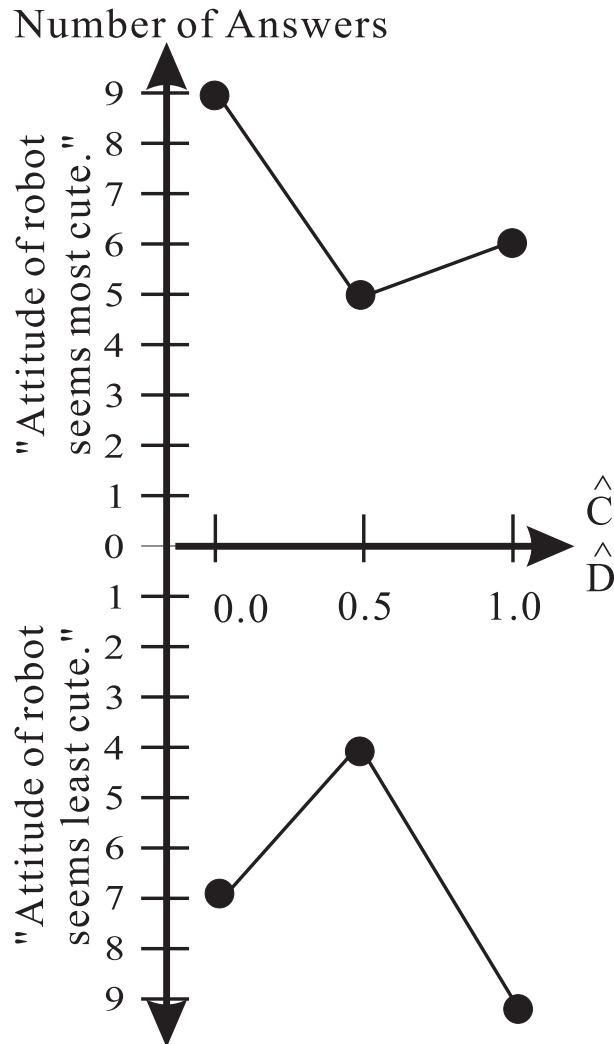
中庸的な情報伝達効率の反応様式 R2 では、評価も中庸的で“2番目に可愛い”が多かった。

9.3.4 考察

被験者の注目したもの: 印象形成の要因

ロボットに対して感じる印象は、必ずしもロボット行動の情報伝達的特性だけではなく、ロボットの仕草や触れ合いの力強さなどにも影響される。本実験では、それらの剰余変数は固定し、反応様式だけを変化させて比較することで、剰余変数の無効力化を計ったが、その成否を調べる必要がある。

Fig.9.14 に、被験者中11人の自由回答の一部を掲げる。これを見る限り、実験者の狙い通り、反応様式の差に被験者が関心を持つことが多かったことが判る。



The judge of cuteness was divided into two tendencies; 1) 9 subjects felt more cuteness on the full-random reaction pattern ($\hat{C} = \hat{D} = 0$), 2) 6 subject felt more cuteness on the non-random 1-to-1 reaction pattern ($\hat{C} = \hat{D} = 1$).

FIGURE 9.13: MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATOR OF INFORMATION TRANSFER EFFICIENCIES ($\hat{C} = \hat{D}$) VS. INTENSITY OF CUTENESS IMPRESSION

太字が被験者による自由回答．細字は実験者による注．

被験者 1, 男性デザイナー．(可愛らしさ評定: R1 > R2 > R3)

最初に動いたときの驚きが大きすぎたせいか, 2 回目以降では面白いと感じなくなりました．特に, 2 回目 (R3) はいかみも機械という動きのような印象を受けました．ぬいぐるみのかっこうだけに, 余計強く感じた．ある刺激に対する反応が毎回同じよりは, 予期しない動作をした方がいいと思います．

被験者 2, 女性事務職 (可愛らしさ評定: R3 > R2 > R1)

(自由回答なし)

被験者 3, 女性事務職 (可愛らしさ評定: R3 > R2 > R1)

最初の回 (R2) と 2 番目 (R3) は, 差がなし? 2 番目 (R3) は, たくさんの種類．(ロボットの反応行動の種類が増えたように思えた．)

被験者 4, 女性事務職 (可愛らしさ評定: R3 > R1 > R2)

手を挙げるのがよい．鳴いて欲しい．(印象評定は) 適当に決めた．

被験者 5, 男性デザイナー (可愛らしさ評定: R1 > R2 > R3)

パターンの組み合わせ? (入力と出力との対応のパターンのこと) 1 入力に一定のパターン (かと思った)．(パターンを) もっとたくさん, 3 つ以上欲しいな．(3 つのセッションの違いは反射ルールの違いと思った様である．)

被験者 6, 男性デザイナー (可愛らしさ評定: R2 > R1 > R3)

不明, わかりにくい．リアクションの意図不明．(ロボットの反応に意味を求めている．)

被験者 7, 女性事務職 (可愛らしさ評定: R3 > R1 > R2)

違いわからず．最初 (R1) が良かった．(1 番意図を感じ, 可愛げがある．2 番目に面白いと答えている．)

被験者 8, 女性事務職 (可愛らしさ評定: R3 > R2 > R1)

1 番目 (R2) 画一的? 2 番目 (R1) 1 の後で反応が少ない．3 番目 (R3) (他の 2 例とは) 違う．面白い．(セッションの違いである, 反応の画一性の差には気がついていてるが, R1 が, 反応が少ないものと感じられたようだ．)

被験者 9, 男性デザイナー (可愛らしさ評定: R1 > R2 > R3)

子供と違う．(ロボットの振る舞いや心理が人間の子供とは違うの意．) 近いと納得．(ロボットの挙動が人間の子供に近いとロボットを理解・納得できるの意．) 足 いや．いやがっている．(足の動きにいやがっているという意味を感じた．)

被験者 10, 男性事務職 (可愛らしさ評定: R2 > R1 > R3)

1 番目 (R3) 画一的? 2 番目 (R1) ワンパターン キカイ．3 番目 (R2) 折衷．(正しい観察である)

被験者 11, 女性デザイナー (可愛らしさ評定: R1 > R2 > R3)

顔の向きが良くない．目が合わせられない．立ったりは? (「立ったりはしないのか」の意) 手足の入力が欲しい．

FIGURE 9.14: FREE ANSWERS FROM 5 FEMALE OFFICE WORKERS AND 5 INDUSTRIAL DESIGNERS

従って、本実験結果に現れた印象評価の差は、もっぱらロボットの反応様式の差に起因するものと考えてよい。

意図の存在感

ロボットの反応様式から感じる意図の存在感の強さは、情報伝達効率が1の場合に有意に大きかった。つまり、個々の働きかけに対して安定した反応を返す反応様式は、ロボットの意図を感じさせる効果があると言える。これは仮説1を支持する。

面白さ

インタラクションの面白さは、定型的でマンネリな反応様式より、ランダム性がある反応様式の方がよいという傾向があった。しかし、完全にランダムで情報伝達がなければ面白さは損なわれる。これは仮説2にそぐう。

この実験場面においては、面白さを最大化するには、適度なランダムさが良いことが判る。面白さ演出の戦略としてはやや自明な結果とも思えるが、本実験結果では有意性を保証するには至っていない。

いわゆるペットロボットやゲームなどの一般のエンタテインメント装置における面白さ演出のためには、この反応様式の情動的な制御という戦略だけではなく、動作自体の面白さやインタラクションの文脈展開なども、動員され制御されるだろう。これらを複合的にかつ協調的に用いるための理論の構築が将来課題として残った。

可愛らしさ

インタラクションから感じる可愛らしさは、仮説3では、従順が可愛いと感じるという片側だけの予想だったが、本実験結果では評価が二分された。だっ子のようなランダムな反応様式を好む被験者と、従順なペットのような情報伝達効率が高い反応様式を好む被験者に分かれた。

また、その評価の分裂に被験者の職業属性(女性事務職/デザイナー)が一部において呼応していた。しかし現段階では、被験者がどの属性なら印象把握はどうかなるとは特に言えない。ただし、印象把握の仕方と被験者の属性や性格や気分が相関することは充分考えられる。従って将来は、この現象を追究して相関関係を

明らかにしていくことで，人間とロボットとのインタラクションの様子や人間の感想などから，その人の性格や気分や属性を知る手がかりにすることが可能になるかもしれない．

この結果から，従順性とランダム性を，ユーザの性格やインタラクションの場面に応じて調整するのが理想的と言える．実際盲導犬は，人間を誘導している時は極めて従順に情報伝達効率が高い行動を行っている．しかし家でくつろいでいるときは，飼い主にじゃれて，情報伝達効率は中間的な値に下がる．このように場の雰囲気を読み取り反応様式を調節できる能力は，人間との社会関係を安定させ深化させる機能を果たしている．

9.4 結論

本論文では，人とロボットの行動インタラクションにおいて，人間がロボットから感じる印象がインタラクションの情報伝達効率に相関関係を持つことを，実験で明らかにした．

今回の実験結果では，ロボットの行動に意図を感じる度合いは，情報伝達効率が高いほど強い傾向があった．また，インタラクションから感じる面白さは，情報伝達効率が中庸な場合が最も強いことが判った．インタラクションから感じる可愛らしさは，情報伝達効率が高いほど強く感じる人と，逆に低いほど強く感じる人に二分される結果となった．

今回の実験では，対人行動物は人間の働きかけ行動への反応として行動を発生させていた．つまり情報の流れが一方通行であった．今後の研究においては，対人行動物が対人反応としてだけでなく，環境の変化に対して反応したり，自発的に働きかけ行うことをも含める情報の相互交流の実験を行い，対人行動物の人間への作用の幅を広げていきたい．

さらに次の段階として，情報伝達効率を適切に制御する方法の開発も求められている．すなわち対人行動物が，場面と文脈に応じて，人間の働きかけに対し素直に安定した反応を示して意図の強さや忠実さを演出するべきか，あるいは逆にランダム性のある反応を起こして人間の好奇心を刺激するべきかを，自律的に判断し制御することに，挑戦してみたい．具体的には，場面や文脈を反映する情報として，時刻・場所・人間の行動の活発度などを手がかりに用いる．また，情報伝達効率の適切さを評価する情報としては，人間から対人行動物への働きかけ行動の種別・内容などが用いられるだろう．そしてこれらの情報に応じて，対人行動物が，場面場面に応じてそれにふさわしい情報伝達効率を学習し，人間とインタ

ラクションを行うという着想である。

まだ原理の着想の初歩段階ではあるが，この情報伝達効率の学習と制御が，コンパニオンアニマルが飼い主に馴れる現象を模倣するものになればと期待している．そして，コンパニオンアニマルのように，人と円滑な行動インタラクションを行い，適時適所にて自発的に人間に働きかける対人行動物の実現を目指していきたい．

第 V 部

結論編

第10章 結論

10.1 総括

10.1.1 課題と解法設定

本研究は，人間に対して非言語コミュニケーションを行う人工物（対人行動物）に関して，その対人表現を法則化及び体系化することを課題とした．これによって，従来の「アプリケーション個別対応」と「設計者主観による表現設計」という，*ad hoc*な表現設計方法での限界であったハードウェア・アプリケーションへの特化を克服し，対人行動物による表現の自律生成を可能にすることを目指した．

表現の原理は，人間と緊密かつ円滑にインタラクションを行える存在であるペット動物を規範とした．即ち，ペット動物の対人コミュニケーション能力を動物行動学や身体表現学の理論を基に，ロボットに移植し，その効果を実験で検証した．

10.1.2 試みたロボットの対人表現の総括

本論文で試みたロボットの対人表現を Table 10.1 にまとめる．

本論文では，ロボットの対人表現を，一方的（モナッド）表現，ダイアドでの表現，ダイアドの繰り返しでの表現と，インタラクションの回数で分類した．それぞれのレベルにおける結果を順次検討する．

一方的表現のまとめ

一方的表現ではロボットの内的状態が表現出来ることを期待し，内的状態の表現でも基本的な表現として，擬似呼吸鼓動による生命感・切迫感の表現と，身体動作による基本情動の表現を試みた．

呼吸鼓動運動については，運動のリズム構造の，本物の呼吸鼓動運動のリズム

TABLE 10.1: 本論文の知見・結果の一覧表

表現の構造	相互作用の次数	表現のチャンネル	印象原因	表現内容	通用性	解明度
一方的表現	モナド	呼吸鼓動	リズム・速さ	内的状態	普遍的	数值的・決定的
		身体運動	ラバン特徴量			
反応表現	ダイアド	接触反応	反応性・エネルギーの流れの向き	対外的意味	場面依存	傾向が判った
繰り返し反応	ダイアドの繰り返し	反応アルゴリズム	情報伝達効率	特性・性格	個人依存	いくつかの関係を発見

パターンとの類似性が生き物らしさを支配し，運動周期の短さが切迫印象を支配することが解った．身体動作による表現は，ラバンの身体表現理論を用いてロボットの身体動作の物理的・幾何的特徴と，身体動作の印象との関係構造を明らかにした．これによって，ロボットの身体動作を人間に見せた場合に，人間に与える印象をあらかじめ見積もることができる．これはロボット自身による自動振り付けの実現に大きな貢献をする知見である．

呼吸鼓動運動表現・身体動作表現の両者の実験結果についての特徴は以下のとおりである．

1. 印象の原因となる要素が具体的で構造が単純であった．(例えば，呼吸の周期や，踊りの運動エネルギーなど．)
2. 印象原因と印象内容との関係は，ダーウィンの表現の原理など，比較的単純な関係で説明できた．特に呼吸鼓動での表現の法則は線形に近く，数式によって表現することができた．
3. 印象演出の再現性は，比較的高かった．

ダイアド表現のまとめ

ダイアド表現ではロボットの人間に対する社会关系的感情が表現出来ることを期待し，オオカミの親和感表現原理を規範として，ロボットの人間に対する親和感の表現を試みた．オオカミの親和感表現は，相手の接触に対して力学的に受容的に反応することであった．この原理をロボットの対人反応行動に適用したとこ

る，人間に親しみを表現することが出来た．

ここでの実験結果の特徴は以下のとおりである．

1. 印象の原因は，ロボットの反応性と，人とロボットとの接触時のエネルギーの流れの方向であった．
2. 印象原因と親和感演出との関係は，オオカミの親和感表現原理と同じものであった．但し，印象原因を数量化し印象強度との関係を数理的に論じるまでは至っていない．
3. 印象演出の再現性は，一方的表現と比較すると個人差が生じる余地があるものの，統計的に有意な傾向としては発見することができた．

ダイアドの繰り返しによる表現のまとめ

ダイアドの繰り返しによる表現では，ロボットの行動アルゴリズムの情報理論的特徴によって，個性・特性が表現出来ることを期待し，ロボットの行動の意図の存在感・面白さ・可愛らしさについて，情報伝達効率との相関関係を計測した．

実験では，情報伝達効率を大中小 (1, 0.5, 0) の三段階の対人反応行動選択アルゴリズムを用意し，それらによってロボットを制御して被験者とのインタラクションを行い，主観的印象をアンケートで調査した．情報伝達効率が高い反応アルゴリズムでは，ロボットの行動に意図を感じさせる効果があることが解った．情報伝達効率が中程度のアルゴリズムは，面白いという評価を最も獲得していた．可愛いという評価は，被験者によって情報伝達効率が高い方がいい人と，逆に情報伝達効率が高い方がいい人に分かれた．この意見の分裂は，被験者の属性と一部関連があった．つまり被験者個々の性格と，ロボットのアルゴリズムの相性に，可愛いらしさ判定が依存していた可能性がある．

ここでの実験結果の特徴は以下のとおりである．

1. ロボットの情報伝達効率が印象の原因になり得た．
2. 印象原因と印象内容との関係は，ロボットの行動の意図の存在感については比較的明快な関係が得られたが，その他については被験者によって印象把握の傾向が分裂することが多かった．

10.1.3 インタラクションの複雑度の違いに関する比較考察

上記のように、インタラクションの次数が上がるにつれ、印象原因と印象内容・強度との関係の被験者間の再現性が弱まる傾向があった。つまり、低次の一方的表現では万人共通の表現法則であったが、高次のインタラクションになるに従い個人差が大きくなった。

個人差の原因は判然としないが、被験者の社会的属性との関連が見られたことから推測すると、被験者の個性とロボットの行動特性との相性によって生じている可能性がある。

従って高次のインタラクションでの対人心理作用研究には、個人差をなくし万人共通の表現法則の追究とは別に、ユーザの個性をロボットが検知し、それと相性のよい行動特性に自己修正する手段の追究が研究課題として存在することが判った。

10.1.4 研究課題と成果との呼応

1.2章「研究目的」で掲げた研究課題に対して、研究成果がどのように応えているか述べる。

普遍性のある表現の法則の追究 これに関しては、高次のインタラクションでは再現性の問題が生じたとはいえ、全般的には、印象の原因と印象内容の関係を特定し実験にて検証できた。従来手法のように ad hoc な表現設計と比較すれば十分な進歩である。

印象の原因を探し出すために、動物行動学や身体表現学の知見を用いた。敢えて、人間同士のコミュニケーション学の知見ではなく、単純なペット動物の非言語コミュニケーションの知見を援用し、問題の簡単化を計った。非言語は非言語ゆえの表現の制限を持つことになるが、親しみの表現や面白さの演出など今までの研究の対象となっていなかった新しい内容の表現であり、これからの人間と接する機械・システムに広く応用できる表現手法であると考える。

表現法則間の構造の明確化 本研究は、体系化の軸としてインタラクションの次数を用いた。この分類によって、Table 10.1に見るように、表現形態と表現内容のレベルとの構造化が出来た。

従来の体系化にて、試みられていたコミュニケーションのチャンネルやモダリティによる分類では、インタラクションの次数が明示的ではない。だが、

実験で見たように，ロボットの面白さなどの印象は，高次のインタラクションにおいて生じるものであるから，やはりインタラクションの次数は分類の主要な要素とするべきである．

10.2 将来課題

次の課題が残された．

対人心理効果の個人差の問題 実験では大多数の被験者が一致した傾向を，統計検定を用いてその有意性を検定し，有意な法則として採用していた．しかしそれにもかかわらず，多数派の意見とは全く逆の印象回答を寄せる被験者はしばしば存在した．

これら個人差には，1) 表現という物理的現象の見え方・形容に関する個人差と，2) 表現に対する好き嫌い・相性など主観的判断の個人差の，2種類があった．

1) 見え方の個人差に対しては，顔表情と声を同時に使うなど，複数の表現を併用することで，印象解釈の材料を豊富にし印象判断を安定化させることで，軽減や解消が可能だと考える．

2) 相性の個人差は解消できるものではない．むしろ，対人行動物が，ユーザの相性に合わせることが望ましい．本論文では，対人行動物の行動特性のパラメータとして，情報伝達効率や接触に対する受容/反発特性を試みた．(またこれらの他にも対人行動物の行動特性を特徴付けるパラメータがあるだろう．) 対人行動物が，これらのパラメータを，ユーザの性格や気分・インタラクションの場面に対して，最も相応しいものに自己制御することが望ましい．

この制御のためには，人間からのフィードバック情報が必要である．筆者は，例えば，人間が対人行動物を気に入っているならば，接触や声をかける頻度が多くなったり，やさしく撫でる頻度が高くなるなど，相性の善し悪しが反映しそうな人間行動を用いることを考えている．

各知見の統合問題 本論文では，モナッド・ダイアド・ダイアドの繰り返しと3つのレベルで，各個に仮説を立て実験を行い知見を得た．しかし，これら3つのレベルの知見を一緒に統合して使うためには，まだ議論を要する．

例えば，ダイアドで特定の意味を表現する反応の様式を挙げたが，人間とのインタラクションで毎回その反応様式を採用していると，マンネリでつまらないという印象を与える恐れがある．

この他に、モナッド表現実行中に人間が働きかけてきた場合は、モナッド表現を中断してダイアドを起こすべきかなど、問題がある。

筆者の推測としては、次数の高いインタラクションでの表現が、低次の表現に対して、解釈が優先されると思われる。即ち、モナッドの途中でうち切ってダイアドを行った場合、モナッドをうち切ったことは解釈の対象にはされず、いかにダイアドを行ったが解釈の対象となるだろう。同様にトライアドの解釈はダイアドの解釈に優先すると思われる。この推測の検証は、実験を待たなければならない。

他の行動パラメータによる表現 本論文で取り上げられなかった、しかし解釈の対象となる行動のパラメータも多く残されている。ペットについては亀山 [88] の指摘したとおり、ペットの反応の時間遅れ、行動の強さ、ペットのいる場所などが、飼い主への信号となっている。

対人行動物の行動におけるこれらのパラメータを制御することは容易と思われる。実験して決着をつけるべき問題である。

インタラクションの次数の軸方向にも問題の広がりがある。高次のインタラクションでの表現を数理化して理論付けることは難しい。しかし、高次のインタラクションは、高度な論理能力を持つ人間同士の間だけに発生するものであって、人と対人行動物のインタラクションに適應するには複雑すぎると考える。動物のインタラクションは、おおよそトライアド程度で説明がつく。人間と機械とのインタラクションの低次なものが多い。もちろん時として、例えば ATM でお金を振り込む操作というインタラクションなどは、高次のポリアドとなることがある。しかし、このような作業的インタラクションは、当面は社会的コミュニケーションから除外するのだから妥当であろう。

自律化 本論文では「特定の表現行動が特定の心理効果を与える」という対応法則を列挙してきた。

しかし、対人行動物を行動させる時には、この逆写像である「特定の心理効果を与えるための表現行動」を探すことが問題となる。

この逆写像は一般に一意ではない。例えば喜びを表現するには複数の手段がある。たとえ身体運動で表現すると決めても、喜びを感じさせる振り付けは幾通りもあるだろう。それら表現の候補の中から、乱数などを用いて表現を選んで行うという戦略もありえる。しかしその結果は、現在の自動作曲アルゴリズムが作る曲のように、確かに雰囲気は表現目標と合っているが、どこかしら奇妙に感じられるものになると、筆者は予想している。このように自動作曲の研究 [138] 類似する点が多いので、そちらに参考を取りながら研究

を進めてみたい。究極的には、動物の何気ない振る舞いや、絵画やアニメーションなどの作成技法などを、分析的な立場から説明する理論を構築したいと考えている。

参考文献

- [1] Lon Barfield: *The User Interface : Concepts & Design*, Addison-Welsey Pub. Co., 1993.
ユーザーインターフェースに関する一般的な教科書。問題設定が上手く，観点が面白い。
- [2] Byron Reeves & Clifford Nass: *The media equation — How people treat computers, television and new media like real people and places*, CSLI Publications, 1996.
人間がコンピュータやテレビ番組内の登場人物など人間以外の対象に対して，人間に対するような行動を行う現象 (media equation) についての，さまざまな理論と実験報告。Media equation 発生の条件はかなり緩く，“本能的・自動的に起こる”・“対象物が線描画のアニメーションのキャラクタのように素朴であっても，人間のように見なすことは起こり得る”としている。人間と対応するコンピュータの個性を考える際，dominance (会話主導権を確保しようとする性向) と friendliness (愛想) を，性格を特徴付ける2大要素としている。これを，本論文の接触反応の実験結果と比較する。また，人間は普段とは異なるものを得ることを好むという“gain theory”は，本論文の情報伝達効率と印象との相関実験と比較しえる。
- [3] Tomomasa Sato, Taketoshi Mori: “*Robotic Room: Its concept and realization*,” *Intelligent Autonomous Systems (IAS-5)*, pp.415–422, IOS Press, 1998.
部屋型ロボット Robotic Room の実現の報告。
- [4] Mark Torrance: “Advances in Human-Computer Interaction: The Intelligent Room,” *Working Notes of the CHI 95 Research Symposium*, <http://www.ai.mit.edu/projects/hci/papers.html>, 1995.
部屋型ロボット Interigent Room の報告。

<ペットの対人効果>

- [5] “特集 もっと知りたいAAT” 「季刊 Relatio」, リレーションズ, Vol.1, 1998. 動物介在療法 (Animal Assisted Therapy, AAT) についての, 当事者による報告特集. なお, この雑誌は, 現在はチクサン社から出版されている.
- [6] Ralph Holcomb, Connie Jendro, Barbara Weber & Ursula Nahan: “高齢男性の鬱病治療に鳥を用いた研究” 「季刊 Relatio」, リレーションズ, Vol.4, pp.78 — 82, 1999. (原文: “Use of an aviary to relieve depression in elderly males,” it Anthrozoös, Vol.10, No.1, Delta Society, 1997.)
高齢男性を2週間, 小鳥の様子を眺められたり, 触れられたり出来る環境に置くと, 鳥によく触った人ほど鬱症状の軽減が見られた.
- [7] Deborah Adams: “スピーチセラピーにおける動物介在療法の効果: 症例研究” 「季刊 Relatio」, リレーションズ, Vol.4, pp.92 — 95, 1999. (原文: “Clinical notes: Animal-assisted enhancement of speech therapy: A case study,” it Anthrozoös, Vol.10, No.1, Delta Society, 1997.)
脳梗塞によって失行症 (言いたいことがあっても, 言葉にすることができない症状) となった女性の元に, 2頭のイヌを連れてきてインタラク션을させ, 治療者がイヌを指して「あれは何ですか」などとイヌを題材にした質問を行うと, 1言だけの返答の数が増え, 言語活動の改善が見られた.
- [8] Jennifer Limond, John Bradshaw & K.F. Magnus Cormack: “セラピードッグが学習障害児の行動に及ぼす影響について” 「季刊 Relatio」, チクサン, Vol.5, pp.78 — 84, 2000. (原文: “Behavior of children with learning disabilities interacting with a therapy dog,” it Anthrozoös, Vol.10, No.2-3, Delta Society, 1997.)
ダウン症候群の子供 (総数9名) に, 本物のイヌ, またはイヌのぬいぐるみと7分間のインタラク션을行わせた. 本物のイヌの方が, 子供の注意を引きやすく, また子供の言語活動を積極化させる効果があった.
- [9] 浅倉 繁春: 「動物たちの世界 — 飼育日誌より」, 東海大学出版会, 1977. 動物の「ひとづけ」現象 (人間に育てられた動物が, 人間にはなつき, 同種の動物に馴染まないこと) についての考察がある.

<呼吸及び鼓動に関する知識>

- [10] Desmond Morris: *Manwatching*, Elsevier Publishing Projects, 1977. (モリス: 「マンウォッチング」, 小学館, 1991.)
“ウォッチング”という流行語を生み出した, 人間の非言語コミュニケーション

ン要素の網羅的研究読本．非言語的社会信号のことなら何でも実験をしているという，大変な本である．何でも鼓動・呼吸についても言及がある．

- [11] 本川達雄: 「ゾウの時間ネズミの時間」, 中央公論社, 1995 .
動物のスケール効果について述べてある．時間が体重の 1/4 乗に比例する法則を多面的に説明している．
- [12] 中澤誠: 「CD による聴診トレーニング 小児心音編」, 南江堂, 1994 .
実際の心音のサンプルを集めた CD .
- [13] 宮崎和子: 「内科 I」, 中央法規, 1994 .
生理量などについて基本的な知識がまとめられている．
- [14] 波多野誼余夫編: 「音楽と認知」, 東京大学出版会, 1987 .
リズムの認知についての理論がある．
- [15] 芥川 也寸志: 「音楽の基礎」, 岩波書店, 1971.
リズムの認知についての理論がある．
- [16] 中村敏枝: “ “間” の解明”, 辻編, 「感性の科学」, サイエンス社, pp.83-87, 1997.

<非言語コミュニケーション>

- [17] C. Darwin: *On the Expression of the Emotions in Man and Animals*, John Murray, 1872. (浜中浜太郎訳: 「人及び動物の表情について」, 岩波文庫, 1931)
表現に関して最も基本的な理論である．この書で述べられている表現の 3 原理は, 動物行動学ではティンバーゲンやモルトン, またラバン派やフロイトなども用いている．現在は, 英書は Chicago University Press から出版されていて, K. Lorenz が序文を書いている．日本語の方は, 岩波文庫が復刻版を出すかもしれないが, 今のところ絶版であり, 大学図書館から借りるしかない．
- [18] M.D. Hauser: *The Evolution of Communication*, MIT Press, 1996.
動物全般のコミュニケーションの理論書．ダーウィン, ティンバーゲンからの発展がまとめられている．
- [19] 小嶋 秀夫, 三宅 和夫: 「発達心理学」, 放送大学教材 58755-1-9811, 1998.
Bridges の, 成長に伴う情動の分化の理論が詳しく説明されている．この図式に従えば, 幼い時は人間も情動の種類が少なく, Darwin[17] の理論が成り立つと考えられる．

- [20] 遠藤俊彦: 「喜怒哀楽の起源」, 岩波書店, 1996.
情動研究の発展に関する解説書 .
- [21] 吉川 左紀子: “表情は何を伝えるのか — メディアとしての表情”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.376—388, 共立出版, 2000 .
相手の表情によって, “話しかけ易さ” が変化するという実験報告 .
- [22] Mark L. Knapp, Judith A. Hall: *Nonverbal Communication in Human Interaction (4th Edition)*, Harcourt Brace, 1997.
- [23] C. F. Hockett: *The Origin of Speech, Scientific American*, Vol.203, NO.3, pp.88–110, 1960.

< 身体動作と心理 >

- [24] 三嶋 博之, 高瀬 弘樹, 鈴木 健太郎: “運動制御の生態学的基盤”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, p.17, 共立出版, 2000 .
身体は多自由度でありすぎるため, その制御は“鍵盤支配型モデル”では無理があるという“自由度の問題 (Bernstein 問題)” から, 解決として von Holst の磁石効果 (動きのつられ) を説明 .
- [25] 舞踊教育研究会編: 「舞踊学講義」, 大修館書店, 1991.
ラバン, デルサルト, ダルクローズの3つの Movement System について解説がある .
- [26] 世阿弥: “花鏡”, 1424 初稿, 1431 完成 . (表章 校注・訳, 「日本古典文学全集 51 連歌論集 能楽論集 俳論集」, 小学館, 1973 .)
能楽論・稽古論を論じた書 . Movement System と呼び得る“手体風智”・“舞体風智”の概念が解説されている . 後進の指導のために書き残したため, 芸術関係の書物にしては内容が具体的で, 議論の構造化がなされている . “初心忘るべからず”の言葉でも有名 .
- [27] 渡辺守章: “理論と実践 — 世阿弥の思考” 「舞台芸術論」, 第 13 章, pp.261–284, 放送大学教材 57129–1–9611, 放送大学教育振興会, 1996 .
世阿弥 “花鏡” の述べられた理論の解説 .

- [28] 斎藤秀雄: 「指揮法教程」, 音楽之友社, 1956 .
有名な指揮法の教育法 “サイトウ・メソッド” の原典 . 指揮の身体運動の分類を精緻に行っている .
- [29] Rudolf Laban: *The Mastery of Movement*, Macdonald & Evans, 1960. (ラバン: 「身体運動の習得」, 白水社)
ラバンが自分のエフォート理論等を用いて, 舞踊の演出について述べた本 . 初学者には難解である .
- [30] Valerie Preston-Dunlop: *Rudolf Laban : An Extraordinary Life*, Dance Books, 1998.
ラバンの詳細な伝記 . この本におけるエフォートの定義やラバノテーションの詳細は, 現代のそれとは異なる . ラバン理論の着想, 具体化, 改良の歴史を辿れる .
- [31] 木村はるみ, 東原芳美: “運動記述に関する研究 (その1) ダンス・ノートーションとダンス・リテラシー”, 山梨大学教育学部研究報告, 第44号, pp/158—164, 1993.
舞踊を紙に記録することの必要性とその歴史の概説 . メジャーな記譜法である Labanotation, Benesh Notation, Eshkol-Wachmann Nonation, などの実例が掲載されている .
- [32] I. Bartenieff, D. Lewis: *Body Movement — Coping with the environment*, Gordon & Breach Publishers, 1980.
ラバンの弟子のバルテニエフが書いた, ラバン動作解析理論の教科書 . ラバン理論は時代と共に改良・変化しているが, この本の内容は比較的オーソドックスなヴァージョンと言える . 内容は, エフォートやシェイプなどの概念説明と, 人体動作の解釈事例の研究である . バルテニエフ自身, Bartenieff Fundamentals という, 価値のある理論体系を持っているはずだが, この本にはあまり書かれていない .
- [33] J. Kestenberg Amighi, et al.: *The Meaning of Movement*, Gordon & Breach Publishers, 1999.
Kestenberg 理論の集大成 . ラバンとフロイトの理論が結合して, 動きのリズムの意味などを導いている . 私としては, この理論を用いた身体運動の分析は, 大体は正しいと思えるが, 精度や分解能や再現性は疑問である . 著者は Janet Kestenberg であり, 理論を作った故 Judith Kestenberg の娘であるか .

- [34] Susan Loman & Hillary Merman: “The KMP: A Tool for Dance/Movement Therapy,” *American Journal of Dance Therapy*, Vol.18, NO.1, Spring/Summer 1996.
Kestenberg[33]の本が出版される前まで，役に立った KMP (Kestenberg Movement Profile) の解説論文．
- [35] Ann Hutchinson Guest: *Labanotation — The system of analyzing and recording movement (3rd Edition)*, Routledge/Theatre Arts Books, 1977.
ラバノテーション舞踊記譜法の，最も詳しいかつ標準的な解説書．
- [36] Ann Hutchinson Guest: *Your Move: A New Approach to the Study of Movement and Dance*, Gordon & Breach Publisher, 1983.
大部分がラバノテーションの解説書である．付録に，Ann Hutchinson Guest オリジナルの Motif Description (Motif Writing) という，ラバノテーションを若干抽象化した踊りの説明が少しある．しかし不十分・不完全である．私は Motif Writing については，留学した牧田佳子さんに直接教えてもらって，その全容を知った．なお，本書は，Gordon & Breach Publisher (<http://www.gbhap.com>) に直接注文しないと取り寄せられない．
- [37] 新垣 武士，星野 聖: “CG を用いた沖縄舞踊の運動特性と主観的印象の関連性の定量化”，電子情報通信学会技術研究報告 (信学技報)，HIP2000-22, pp.25-29, 2000.
沖縄舞踊の動作の力学的幾何的特徴と印象との相関関係を，主成分分析や重回帰分析などを用いて行ったもの．力学的幾何的特徴として，指先軌道の重心，軌道の広がり，軌道の歪度等を取り上げ，SD 尺度法により定量化した印象との相関関係を計算している．しかし，結果がなぜそうなるのか理由が乏しい．これにはやはり，ダーウィン等から演繹する必要がある．
- [38] M. Hattori, et al.: “An analysis of the Bunraku puppet’s motions based on the phase correspondence of the puppet’s motion axis,” *Proceedings of IEEE System, Man and Cybernetics (SMC '99)*, pp.II-1041-1046, 1999.
文楽人形の身体動作表現を力学的な観点から解析的な方法で分析しようとした研究．しかし，微妙な感情の違いを，複雑な数式で分析しようとしていて，明快な結論を得るには至っていない．
- [39] 照屋, 服部, 田所, 高森: “文楽人形の動作表現の解析とそのモデル化”，「第一回日本機械学会ロボメカ・シンポジア講演論文集」, 1996.
文楽人間の表現 [38] の日本語報告．

- [40] Pixar Animation Studios: *Luxo Jr.*, 1988.
電気スタンドの親子が登場する有名なCGアニメーション。人間の真似をするためであっても、必ずしも人体と同じ機構を持たなくてもよいことの好例。このアニメの場合、Bartenieffの身体動作の進化段階的分類で言えばspinal(背骨の)運動のレベルで、人間の動きを模倣している。
- [41] 「別冊太陽」“特集・人形愛”，1999年8月号，平凡社，1999。
R. フォコン，辻村ジュサブロー，四谷シモン，与勇輝など，有名な人形作家の作品紹介とインタビュー。動かない身体の芸術世界だが，かといって，人形に表情がないわけではない。（あえて表情を無くすこともできる。）
- [42] D. Marr: *Vision: A computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, Freeman, W.H. and Company, 1982. (乾 敏郎，安藤 広志 訳: 「ビジョン — 視覚の計算理論と脳内表現」，産業図書，1987)
マーの有名な本「一般化円柱」の理論を用いれば，人間の振る舞いを認知する場合，はじめから枝葉末節を意識するのではなく，全体を大づかみに認知することが予想できる。身体動作を見る時に，まず大づかみに全体を見ようとするという過程は，ラバンのshape理論と一致する。

<ロボット・CG・おもちゃ等の対人行動物>

- [43] 森下 みさ子: 「おもちゃ革命 — 手遊びおもちゃから電子おもちゃへ」，岩波書店，1996。
電子化という発達によって，おもちゃはどのように変わり，あるいは変わらなかったかの議論。
- [44] 荒俣 宏: 「大東亞科學綺譚」，筑摩書房，1991。
西村真琴のロボット“学天則”の解説。
- [45] 出雲 たけこ: “人間とロボットの仲 — 多様なイメージの中から見えてくるあやうさ”『日本ロボット学会誌』，Vol.16, No.3, pp.285-287, 1998。
一般の人々に対して行ったアンケートで，“ロボット”という言葉のイメージ，どんなロボットが欲しい，その価格はいくらまでなら買う，など興味深い調査結果を出している。提言が為されているが，一般の人々の“ロボット”に対するニーズは，ロボットの道具として捉えて人間を物質的に豊かにすることではなく，ロボットに人間の心を豊かにする相性のいい存在となることにあるとしている。

- [46] 人間共存型ロボット研究専門委員会 (日本ロボット学会) : “人間共存型ロボットシステムにおける技術課題”, Vol.16, No.3, pp.288–294, 1998.
 ロボットが人間と日常生活空間を共に分け合いながら働くための課題として, 物理的親和性 (安全性), 情動的親和性 (認識, 通信), 情緒的親和性 (感情表現, 感情認識), 環境・経済的親和性 (使用環境, 価格) を挙げている.
- [47] 手塚 治虫, 加藤 一郎, 内山 勝, 広瀬 茂男, 細田 裕司, 大島 正毅, 下山 直子: “〔座談会〕鉄腕アトムの世界とロボット技術”〔特集〕ロボットとイメージネーションの世界「日本ロボット学会誌」, Vol.4, No.3, pp.100–105, 1986.
 1986年3月に行われた, 手塚治虫とロボット研究者らとの座談会. 介護ロボットの話がすでに出ている. 手塚治虫は「機械というものは, 案外エロチックなんです. 動きなんか」と言っている. このような対人心理的作用能力がないと, 人間に使ってもらえる機械になれないのではないかと談話がまとまった.
- [48] 加藤 一郎: 「ロボットと人間」, NHK 市民大学 1987年10月–12月期テキスト, 日本放送出版協会, 1987.
 古代からつくば科学万博までのロボット研究を見渡し, 人間とロボットの社会的関係についても, その将来について「ロボットはサービス産業に進出する」と予言・提言している.
- [49] “Saturday “X” Nikkei — ペットロボはお好き? ”, 日本経済新聞, 33面, 1998年11月21日.
 Tiger Electronics 社の Furby, ソニーのオープン R (AIBO の前身), オムロンのタマ, 松下電器産業の「タマちゃん」など, ペットロボットの紹介.
- [50] “特集 感性ロボット登場! ”, 「Trigger」, 99年5月号, 日刊工業新聞社, 1999.
 菅野らの WABIAN-RII と Wendy, ソニーの「オープン R」, ホンダの P3 などの紹介と, 研究者らの弁がまとめられている.
- [51] NTT インターコミュニケーション・センター: 「共生する/進化するロボット展パンフレット」, 1999年1月29日~3月22日.
 Microsoft の Actimates, 高橋士郎のバボット, ATR 知能映像通信研究所の MiMIC などが展示実演された.
- [52] 「~ロボット工学セミナー<シンポジウム>~ アミューズメントロボット テキスト」, 日本ロボット学会, 1999年5月19日.
 セガ・エンタープライゼスの植村氏による遊園地などの動く人形の現状と提案, ムームーの森川氏による“育てゲー”の概説や製品「がんばれ森川君2号」

の解説，富士通研究所の村上氏による CG 仮想生命体「フィンフィン」の説明など．このシンポジウムの解説は國井 [54] 参照．

- [53] TEO World Tour, <http://www.teo-world.com/>, 1996 — .
富士通主導で企画された，CG 仮想生命体の棲む星 TEO ワールドの Web ページ．この仮想生命体がどのようなインタラクションを行うかについて説明がある．國井 [54] によれば，ルールベースと感情モデルによる動機付けらしい．
- [54] 國井 康晴: “シンポジウム「アミューズメントロボット」” 『日本ロボット学会誌』, Vol.18, No.2, [特集] 21 世紀の玩具とロボティクス, pp.177–180, 2000.
アミューズメントロボットシンポジウムの総括記事．
- [55] 安川 祐介: “パソコンを楽しくするマスコットロボット” 『日本ロボット学会誌』, Vol.18, No.2, [特集] 21 世紀の玩具とロボティクス, pp.190–191, 2000.
富士通の“タッチおじさんロボット”や“ハローキティのパソコンフレンズ”の説明．行動はダイアドベースである．ロボットの行動のきっかけは，メール着信，スケジュールアラーム，ユーザの活動が長くなった時の休憩提案，おしゃべり遊びなど，現在，思いつくパソコン用マスコットロボットのアイデアを全て実現している．
- [56] 藤田 善弘: “パーソナルロボット R100” 『日本ロボット学会誌』, Vol.18, No.2, [特集] 21 世紀の玩具とロボティクス, pp.198–199, 2000.
NEC の作ったロシア人形のマトリョーシカ風の外観を持つ同居型移動ロボット．音声認識が可能で，人間の命令を受けて家電を操作するという仕事を持つ．また，自律的にうろついたり，人間の側に近寄ったりする．また，自分を叩いた人物に対して嫌いになったりする感情モデルを持っている．この何気ない移動や対人好き嫌い度などに見るように，設計に社会行動指向があつて面白い．
- [57] 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, [特集] 21 世紀の玩具とロボティクス, pp.192–194, 2000.
松下電器産業のねこ型ロボット“たま”．“高齢者コミュニケーション支援システム”とあるように，独居老人と支援施設との定期的な連絡を行うためのインターフェースとして，この猫のぬいぐるみ型のロボットを用いている．ペットロボットの研究の中では最も実を取っている研究．
- [58] 寺田 郁二: “水中アニマトロニクスシステムの試み” 『日本ロボット学会誌』, Vol.18, No.2, [特集] 21 世紀の玩具とロボティクス, pp.195–197, 2000.

三菱重工業の魚そっくりの外観・運動を行う魚ロボットの報告・モナッドペットロボットの白眉である。

- [59] 井口 信洋, 内山 純, 木村 裕美, 濱島 幸生: 「パフォーマンス・ロボットの開発」, 「日本ロボット学会誌」, Vol.6, NO.5, pp.397-404, 1988.

1980年代の「未来っぽい」「ロボットっぽい」外観をしたロボットの開発の技術報告。アクチュエータに形状記憶合金を用いて動作を滑らかにしたという点を「技術報告」している。

当時は、ハードサイエンスの内容を入れないと、学会誌採録は難しかったのではないだろうか。しかし、SIGGRAPHなどのCGの学会では、CGをアートの観点から語らなければ技術的なニーズが見えない段階までもはや来ている。ロボットの学界のやがてそうなるだろう。

印象や心理効果について、対人行動が主目的のロボットは「ぼけ老人お相手ロボット」に使えるのではないかと、述べている。

- [60] 松浦 壮一, 藤城 智子, 山本 一道, 井口 信洋: “ダンスロボットの開発とその主観的評価”, 「日本ロボット学会誌」, Vol.9, NO.2, pp.177-183, 1991.

自動ダンス人形のデザインと印象を、因子分析を用いて分析した。遂に、ロボットの動作の感性的効果が科学的なテーマとしてロボット学会誌に採録されたという、記念すべき論文である。

- [61] 池浦, 中里, 猪岡: “人間の舞踊動作に基づくダンシングロボットの動作計画”, 「日本ロボット学会誌」, Vol.15, NO.6, pp.927-933, 1997.

一般に、ロボットやCGの人工の舞踊動作体は、実際の動物・人間にくらべて、運動自由度が少ない。従って、人工舞踊動作体は、動物・人間の踊りを近似することしか出来ない。では、何を優先して近似を行えば、印象的にも近いものが得られるか論じた論文。結果は、手足の重心の誤差を少なくするように、人間の舞踊データに追従するのが一番よい。

- [62] 池浦, 大塚, 猪岡: “皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察”, 「日本人間工学会誌」, Vol.31, NO.5, pp.355-358, 1995.

人間の身近で動くロボットが人間に与える心理作用の客観的計測と、ロボット運動の物理量との相関分析。

- [63] 柴田, 猪岡: “評定尺度法によるロボット運動の心理的評価”, 「日本人間工学会誌」, Vol.31, NO.2, pp.151-159, 1995

人間の身近で動くロボットが人間に与える心理作用の主観的計測、ロボット運動の物理量との相関分析。

- [64] 溝口, 名須川, 森, 佐藤: “人間共棲ロボットにおける行動を介した安心感の創出”, 「日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス '97 講演会予稿集」, pp.561-562, 1997.
人間の身近で動くロボット (コップを差し出すアーム・ロボット) が人間に与える心理作用の主観的計測．ロボットの運動軌道と, 人間のパーソナル・スペースとの関係から論じている．
- [65] 尾形 哲也, 菅野 重樹: “身体性に基づくロボットと人間とのコミュニケーション”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.195 — 207, 共立出版, 2000 .
空腹度合いなどの内部状態を持つロボットと, 人とのインタラクション．外見は武骨であっても, カラクリや行動発生の因果関係が動物類似であることで, 機械の擬動物化を目指す．しかし, 生き物らしさの演出について理論を立てられるまでには至っていない．教師無し学習の手法を用いて, 外界の認識のカテゴリライズにも取り組んでいる．
- [66] 池邊, 河野, 和気, 上窪, 岩沢, 西村: “感情表現を用いた対話システム EDS の開発 (2) ~ 感情表現とシステム評価 ~” 「情報処理学会研究報告」, pp.49-56, 2000-HI-89, 2000.
NEC で開発した, パソコン画面上の人間型 CG キャラクター EDS (Emotional Dialogue System) の技術についての報告．人間に話しかける際の「提案感情」と, 人間の応答を受けた後の「反応感情」を分けている．これはトライアド型のインタラクションの典型である．
- [67] 任天堂: 「ピカチュウげんきでちゅう」の Web ページ, http://www.nintendo.co.jp/n01/n64/software/nus_p_npgj/index.html, 1998 .
音声認識が出来るゲーム機で, 動物型 CG (ピカチュウ) と音声通じてインタラクションするゲームの商品解説．ユーザが声をかけピカチュウが反応するダイアド型や, 場所に応じてピカチュウが勝手に遊ぶ自律モナッド型, ピカチュウが他の CG エージェントとインタラクションを行うマルチエージェント型など, 多彩なインタラクションを用意している．
- [68] ソニーコンピュータエンターテインメント: 「どこでもいっしょ」の Web ページ, <http://www.scei.co.jp/sd2/dokoitsu/index.html>, 1999.
ゲーム内容の紹介．人工無能式のゲームであることが判る．
- [69] Naoko Tosa, Ryohei Nakatsu: “The esthetics of artificial life — Human-like communication character, “MIC” & Feeling improvisation character “MUSE”

”, *Artificial Life V (Proceedings of the fifth international workshop on the synthesis and simulation of living systems)*, pp.143 — 151, MIT Press, 1996. ニューロベイビーの後継システム MIC や、音楽をインタラクションに取り入れた MUSE の説明。MIC は、CG で出来た子供のキャラクタで、人間の発音音量を入力とし、ニューラルネットを介して MIC の喜怒哀楽の感情状態を決定するシステム。研究の芸術指向が強く、作品として作ったという感じである。そのため、インタラクションにもっともらしさが少ない。

- [70] Bruce Blumberg: “Old Tricks, New Dogs: Ethology and Interactive Creatures”, MIT Media Laboratory Ph.D Thesis, 1997.

実環境と仮想環境が混合した環境で人間と共存し、人とインタラクションを行う CG 犬 “Silas” の研究の学位論文。CG 犬の行動の長さ・強さ・因果関係の正しさなどの適正化学習アルゴリズムは、動物行動学 (Ethology) から学び、CG の振り付けは昔のディズニーアニメーション (‘Old Tricks’) から学んだという。しかし、知能の研究に偏っているためか「ピカチュウげんきでちゅう」[67] ほどには活発でなく、愛嬌も少ない。CG 犬の知能の研究に偏りすぎではないだろうか。動物行動学をフォークル [95] の話に近い視点から利用している。私なら、ロボットを人間がどう思うか、どうすればそれを制御できるか、考えてみたくなる。http:// www.media. mit.edu/ ~ bruce/ から入手可能。

- [71] 岡田 美智男: “社会的な相互行為とそのリアリティを支えるもの”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.200 — 232, 共立出版, 2000。

相手が話しかけているのに返事をしないと気まずいという“応答責任”から解きほぐして、機械が社会的な存在になるための条件の議論に至る。互いにおしゃべりをする CG エージェント “トーキング・アイ” と、人と音声インタラクションするロボット “む〜” の説明あり。

- [72] 岡田 美智男: “おしゃべりをする仮想生物 トーキング・アイ”, bit Vol.30, No.12, pp.19 — 26, 1998.

“トーキング・アイ” のより詳しい説明と、筆者の今後の構想。会話の楽しさを感じられるシステムの実現への指向が強い。

- [73] 渡辺 富夫: “身体的コミュニケーションにおけるエンタテインメント”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.246 — 256, 共立出版, 2000。

身体運動情報も実体感をもって伝達できるように、遠隔地の人の振る舞いを再

現するロボットを組み込んだ，テレ・コミュニケーションシステム “InterRobot” が登場する．

- [74] 藤田 雅博: “ペット型ロボットの感性表現”，「日本ロボット学会誌」，Vol.17, NO.7, pp.947–951, 1999.
ブームを起こした犬型ロボット AIBO の概説．欲求などの内部状態や行動生起について述べられている．
- [75] 柴田 崇徳: “人と機械の身体的インタラクションを通じた主観的価値の創造”，岡田 美智男，三嶋 博之，佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」，pp.195 — 207, 共立出版，2000．
著者のアザラシロボット “ぱろ” や猫ロボット “たま” の実験事例を引きつつ，人間とロボットの感情的なインタラクションを提唱．行動生起アルゴリズムは，他と同じく欲求や人からの行動に対する反射ルールによって組まれる．ロボットが人間に撫でられることを褒美の教師信号，叩かれることを罰の教師信号としてインタラクションでの学習を目指す．
- [76] J. Bates, “The Role of Emotion in Believable Agents,” *Communications of the ACM*, pp.122–125, 1994.
CG で作った仮想動物において，それらしく (believable) 見える原因についての考察．
- [77] 浅見 行弘: “フラワーロック，ミュージカン”，「計測と制御」，Vol.30, No.3, pp.231–233, 1991.
タカラの，音に反応して動くおもちゃのシリーズの “のらくろロック”，“フラワーロック”，“ミュージカン” の開発者による解説．なぜヒットしたのかについても考察あり．
- [78] 株式会社バンダイ・株式会社ウイズ・横井 昭裕: “仮想生命体の育成シミュレーション装置”，公開特許公報 (A)，特開平 10–232595，出願日: 1997 年 5 月 30 日．
“たまごっち” の特許．特許の構成は，たまごっちのハードウェア，アルゴリズムをほぼそのまま叙述する形式となっている．特許というより，製品仕様か，たまごっち裏技本という感がある．審査請求の状況は “未請求” であることから，防御的特許の性格が見て取れる．実際 “たまごっち” は「ネコの飼える電子手帳」などの従来類似品との技術上の差が小さく，特許係争になったというニュースがあったが，ブームの退潮の後，どうなったのか寡聞にして聞かない．

- [79] 伊藤 昭: “コミュニケーションは心 — “心の理論” と他者理解のモデル”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.269 — 283, 共立出版, 2000 .
対面する人間の視線を見地し, 自己の視線を制御してアイコンタクトを計る “共同注意ロボット Infanoid” の説明がある .
- [80] 小林, 原: “顔ロボットにおける 6 基本表情の動的実時間表出”, 「日本ロボット学会誌」, Vol. 14, NO. 5, pp.677-685, 1996.
顔ロボットで表情を作り表現する研究 . ロボット学会で, 非言語表現の研究というところから, まず原先生の顔ロボットと見つけよう . 長年の蓄積からか, 実験手法などもこなれている .
- [81] 福士 幸弘: “ファービーフレンドの製作” 「トランジスタ技術」, 2000 年 11 月号, pp.319-328, CQ 出版社, 2000.
Furby を改造した事例 . センサの方式や, Furby の状態遷移図が載っている .
- [82] 中島 千明: “アミューズメントパークのロボット” , 「日本ロボット学会誌」, Vol.16, No.3, pp.311-312, 1998.
株式会社ココロ社の、人間型ロボットの解説。要は、動くマネキンである。人間の身体動作を計測して、ロボットがその振りをデッド・コピーする。

<機械の「人間らしさ」についての議論>

- [83] 坂村 健: “電腦とロボット” 【特集】ロボットとイメージの世界「日本ロボット学会誌」, pp.74 — 78, Vol.4, No.3, 1986.
人間か機械かを見分ける方法としてチューリング・テストというものがあるが, 1960 年代に MIT のワイゼンバウムが作ったおしゃべりソフトウェア ELIZA は, しばしばこれに合格し人間と判定された . ただし, 話題の進行が奇妙なので, 話し相手の人間は次第にいらだってくる . ELIZA の発言アルゴリズムは, ほぼダイアド・ベースであるので, 大したものである .
- [84] 藤野 博: “コンピュータはセラピストになれるか? — ELIZA と感情移入をめぐる考察”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.257 — 268, 共立出版, 2000 .
いわゆる “人工無能 (Chatbot)” とよばれる擬似対話プログラムに, 人間らしさを感じてしまう現象 (ELIZA 現象) を, デイヴィッドソン “好意の原理” などの説を取り上げて説明 .

- [85] 山本 吉伸: “擬似対人行動 — 誘発の条件”, 「認知科学」Vol.1 NO.2, pp.95–99, 共立出版, (1994).
機械に対して返事をしてしまうなどの“擬似対人行動”が発生する条件を論じている.
- [86] 山本 吉伸: “擬人化”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.286 — 294, 共立出版, 2000 .
“友達に置き換わるようなプログラムは実現可能か?”として, たまごっちゃん, 富士通のフィンフィンを論じる. また, 擬人化プログラムがはじめは面白くてもだんだんつまらなく煩わしくなってくる経時変化の強さも指摘している.
- [87] 竹内 勇武: “ロボットと人間の社会的インタラクションを考える”【特集】感性とロボット, 日本ロボット学会誌, pp.952 — 955, Vol.17, No.7, 1999.
ロボットからサービスを受けた人間はサービスに対する恩義 (indebteness) を, ロボット自体に対して感じるか, ロボットを作った人・設置した人に対して感じるかの, 二者択一をしている. ロボットが自律的であると, ロボット自体に対して恩義を感じるようになる, という議論.

< 動物行動学全般 >

- [88] 亀山 未帆: “人がペットの「心」を推論する課程 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.
飼い主がペットの何を見てペットの内面を推察しているか, 飼い主にアンケート調査して調べたもの. そのデータはペットロボットの実現に対して極めて重要であるが, 予稿集には若干しか載っていない.
- [89] Marian Dawkins: *Through our eyes only?*, W.H.Freeman/Spektrum Akademischer Verlag, 1993. (マリアン・ドーキンス: 「動物たちの心の世界」, 青土社, 1995.)
行動不確かさの論文 [110][111] の著者が書いた, 動物の感情・心の存在に関する一般的な議論の本. 賢いハンスの現象や, その他動物の心や知恵を感じさせる現象の例を取り上げて, そのカラクリを冷静に解き明かそうとしている.
- [90] K. Lorenz: *Er redete mit dem Vieh, den Vögeln und den Fischen*, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH, 1949. (コンラート・ローレンツ: 「ソロモンの指輪」, 早川書房, 1987.)
原題名は “He told with the beasts, the birds and the fishes.” という意味で, ソロモン王が, 動物と会話が出来る指輪を持っていたという伝説にちなむ. マ

リアン・ドーキンス [89] に比べると，動物の擬人化を気軽に行っているように感じるが，紹介されている事例がローレンツの体験談であるので，内容の信用はおける．動物は何を入力として意識し，飼い主に適応するように学習しているのか考えるとき，必要な書．

- [91] 松下 将人，太田 光明，増井 光子: “人あるいは環境評価に対するコンパニオンアニマルの影響 — イヌを含む写真と含まない写真による視覚的検討 — ”，「第6回ヒトと動物の関係学会学術大会予稿集」，p.29, 2000.
副題のとおり，ベンチに人が座っている風景などの人物がいる写真において，イヌが付け加わった場合と，人だけの場合などの印象を比較した．この実験は細心の注意を要した．まず「写真の中に動物がいれば印象は良くなるか/悪くなるか」という趣旨を被験者に悟られないようにしなければならない．そこで，筆者らの所属（麻生大学獣医学部）は伏せて，無関係な高校に依頼して，その生徒 733 人を被験者にして行った．アンケートも「尊敬できる/軽蔑する」や「かたい/やわらかい」などのダミー設問を混ぜた．結果は，動物のいる風景の方が，場面を明るく心地よい雰囲気に見せる効果があると出た．
- [92] K. Lorenz: “Die angeborenen Formen möglicher Erfahrung,” *Zs. Tierpsychol.*, Vol.5, pp.235–409, 1943.
目の位置が低いなど顔の外見が幼児的であるならば，見る者の養育本能行動が解発されるという実験報告．常識的結果であるが，実験についての詳細不明．原本は得にくいので，[93] 参照のこと．
- [93] Tinbergen: *The Study of Instinct*, Clarendon Press, 1951. (ティンベルゲン，“本能の研究”，三共出版，1957．絶版)
ティンバーゲンの手なる，動物の行動が単純な構造の刺激（解発因）によって引き起こされていることを，例を挙げながら論じた本．イトヨという魚の縄張り維持攻撃などが好例である．社会的行動にまつわる本能に関しては，Lorenz[92] の外見から感じる可愛らしさの説が説明されている．この説は，戦前，戦時中のドイツ語文献なので，本書に頼るしかない．本書も古い本であるので，ラマルキズム（後天的に獲得した形質は遺伝するという説）が参考に登り，改訂時に慌てて否定している．日本語訳書は入手困難であるが，東京大学図書館の書庫にはあった．
- [94] M.W. Fox: *Concepts in Ethology*, University of Minnesota Press, 1974. (フォックス: 今泉訳, 「行動学の可能性」, 思索社)
犬科研究で有名な，Fox が書いた犬の行動の動物行動学的分析．接触反応実験の仮説の根拠として使用．

- [95] Bruce Fogle: ヒトと動物の関係学会講演会，1999年9月20日．
 ペットの心理学や動物の飼い方について，邦訳が20～30冊も出ている獣医師による講演．当初は，ペットの飼い方についての一般的な話を行う予定であったが，聴衆が専門的な人々ばかりなので，学術的な内容に切り替え，イヌやネコの知能・性質，社会の中での役割の変化などを分析した．
- [96] W. Etkin: *Social Behavior From Fish To Man*, University of Chicago Press, 1967. (エトキン: 河合・大沢訳, 「動物の社会行動」, 思索社, 1980).
 動物の社会行動に関する，図版も多く非常によくまとまった教科書．宥和行動についても若干の言及がある．

< 行動の定量的分析法 >

- [97] Albert Mehrabian: *Nonverbal Communication*, Aldine-Atherton, 1972.
 人間の行動・姿勢・発言・表情を，徹底的に量として測ることで，非言語コミュニケーションのメカニズムを解こうとしている．実験事例あり．英書は絶版．邦訳は晶文社から出ているらしいが未見．
- [98] P.W. Colgan: *Quantitative Ethology*, Wiley-Interscience, 1978.
 動物行動学の計算手法の教科書．若干古いですが，数学に凝っていて，情報理論の計算方法について最も深く解説している．1970年代の動物行動学界では数理的な手法の開発に関心が持たれていた．この後の教科書では本書ほどの数学的言及はない．従って本書の存在は貴重であるが絶版である．筆者はamazon.comで注文して古本を入手した．
- [99] P. Martin & P. Bateson: *Measuring Behavior*, Cambridge University Press, 1990. (マーティン・ベイトソン「行動研究入門」, 東海大学出版会)
 マーティン & ベイトソンの教科書．行動研究について極めて重要な内容を含んでいるが，薄い本なので詳しい手法は書いていない．行動の持続，離散時間観測などわかりやすく詳しい説明がある．
- [100] David Scheskin: *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*, CRC Press, 1996.
 統計検定手法の百科事典．
- [101] 伊藤，粕谷，藤田: 「動物行動学のための統計学」, 東海大学出版会, 1984.
 数理手法に関する教科書．情報分析も取り扱う．Martin & Bateson[99]を補完する．

- [102] P.N. Lehner: *Handbook of ethological methods*, Cambridge University Press, 1996.
レナーの教科書。情報は新しく広い。分析手法の解説は詳しいが Colgan[98] ほどではない。新しいのに既に絶版であるらしい。
- [103] H.F. Harlow & R.R. Zimmermann: “Affectional responses in the infant monkey,” *Science*, Vol.130, pp.421–32, 1959.
子供のサルが，布の外皮を持つ母親サル人形に抱きつくことを実験で示した，有名な論文。連関度の定義の仕方などを参考にした。
- [104] R.A. Hinde & S. Atkinson: “Assessing the role of social partners in maintaining mutual proximity, as exemplified by mother–infant relations in rhesus monkeys,” *Animal Behaviour*, Vol.18, pp.169–176. 1970.
どちらが積極的に触ったかの回数で，子の自立の過程を分析した。個体間の連関度についての，情報理論分析以外の手段の好例。
- [105] T.H. Clutton–Brock, F.E. Guinness & S.D. Albon: *Red deer. Behavior and Ecology of Two Sexes*, University of Chicago Press, 1982.
連関度の計算いろいろ。一緒に見かけた回数や，どのグループに位置が近いかなどを用いる。筆者未見，Martin & Bateson[99] 参照。
- [106] H. Dingle: “A statistical and information analysis of aggressive communication in the mantis shrimp *gonodactylus bredini* manning,” *Animal Behaviour*, Vol.17, pp.561–575, 1969.
個体間の優位 Dominance の成立過程を，エントロピや情報伝達量の時系列変化で分析。トライアドにも言及しているが，案の定サンプル数が少なく検定できないので放棄している。
- [107] J.B. Steinberg & R.C. Conant: “An Informational analysis of the inter–male behaviour of the grasshopper *chortophaga viridifasciata*,” *Animal Behavior*, Vol.22, pp.617–627, 1974.
バッタのインタラクションの分析。情報伝達効率をも用いる。送信者と受信者の主導権の分析 (ダイアド 2ヶ)。
- [108] J.S. Watson: “The perception of contingency as a determinant of social responsiveness,” *Origins of the Infant’s Social Responsiveness*, Halsted Press Division of Wiley, 1977.
幼児の随伴性探知実験の論文。(筆者は未見だが，相場 [109] に説明がある)

- [109] 相場覚, “放送大学教材 心理学入門”, 放送大学教育振興会, 1997.
J. S. Watson[108] の論文が要約されている.
- [110] R. Dawkins & M. Dawkins: “Decisions and the uncertainty of behaviour,” *Behaviour*, Vol. 45, pp.83–103, 1973.
ヒヨコの水飲み行動の遷移に関して, 情報分析し, 行動不確かさが多い遷移過程では決断が行われているとする. カテゴリとして状態 (姿勢) を設定しているのが上手く, 従って状態の自己への遷移を認めていない. 状態の持続時間は長短を無視している. また, 1 個体内についてであり, インタラクションではない.
- [111] R. Dawkins & M. Dawkins: “Hierarchical organization and postural facilitation: rules for grooming in flies,” *Animal Behaviour*, Vol.24, pp.739–755, 1976.
ハエの行動遷移について. 行動互換性を初めて論じた論文であり重要. PPSH 分析の結果は見るべきものがある. しかし, インタラクションの話ではないので, 本論文とは関係が薄い. やはり個体内の意志決定にこだわっている.
- [112] J.C. Fentress & F.P. Stilwell: “Grammar of a movement sequence in inbred mice,” *Nature*, Vol.244, pp.52–53, 1973.
マウスのグルーミング行動を情報分析. ドーキンス流に持続時間を無視すると, 情報が落ちることを指摘. 個々の動作ではなく, 複数の動作の繰り返し過程をカテゴリとすることで, より多くの情報を導き出している. なお “静止” の行動を認めている.
- [113] C. Robson: *Experiment, Design, and Statistics in Psychology*, Penguin Books, 1973.
Lehner[102] の本で統計数値表を引用している. 絶版.
- [114] O.E. クラップ: 「過剰と退屈」, 勁草書房, 1988.
退屈を説明する理論. オーバーロードの退屈と, アンダーロードの退屈.
- [115] 多賀 巖太郎: “赤ちゃんの発達のダイナミクス”, 岡田 美智男, 三嶋 博之, 佐々木 正人 編: 「bit 別冊 身体性とコンピュータ」, pp.134 — 135, 共立出版, 2000.
赤ちゃんに同じ模様を何度も見せると, 注視時間が短くなるという “馴化・脱馴化” 現象の説明.
- [116] B.K. Gilbert & J.P. Hailman: “Uncertainty of leadership–rank in fallow deer,” *Nature*, Vol.209, NO.5027, pp.1041–1042, 1966.

群の中での率先度 (リーダーシップランク) を外界刺激に対する反応の素早さ (反応潜在時間) で評価. 率先度の高い個体は, 率先度のばらつきが少ない.

- [117] E.O. Wilson: “Chemical communication among workers of the fire ant *solenopsis saevissima* (Fr. Smith), 2. An Information analysis of the odour trail,” *Animal Behaviour*, Vol.10, pp.148–164, 1962.

アリの道たどりについての情報伝達の分析. 方向選択のエントロピが登場して面白い.

- [118] B.A. Hazlett & W.H. Bossert: “A statistical analysis of the aggressive communications systems of some hermit Crabs,” *Animal Behaviour*, Vol. 13, pp.357–373, 1965.

ヤドカリの個体間の攻撃意志表現行動で, どの程度相手に伝わっているのかを, 定量的かつ情報理論的分析. 自乗値や, 情報伝達量を用いている. 時系列変化までは行っていない. 突出欄問題で Fagen に引用されている.

- [119] B.A. Hazlett & G.F. Estabrook: “Examination of agonistic behavior by character analysis I. The spider crab *microphrys bicornutus*,” *Behaviour*, Vol.48, pp.131–144, 1974.

カニの競合的インタラクションの情報分析. 行動選択に対して, 静的特徴 (性別・体の大きさ・照明の明るさ・空腹度) は比較的影響が小さく, 相手のとった行動の方が大きく影響する. つまり記号としての行動が情報伝達の主役であるということ. なお, *Behaviour* 誌は東京大学では文学部図書館にしか揃えられていない...

- [120] B. Hazlett: “Patterns of information flow in the hermit crab *calcinus tibicen*,” *Animal Behaviour*, Vol.28, pp.1024–1032, 1980.

Hazlett のヤドカリ研究の集大成.

- [121] R.M. Fagen & N.J. Mankovich: “Two-act transitions, partitioned contingency tables, and the ‘significant cells’ problem,” *Animal Behaviour*, Vol.28, pp.1017–1023, 1980.

分割表 (contingency tables) に記入したダイアド (または2行動の遷移) の計算に関する論文. Hazlett の1965を引用. 突出欄問題も扱うが, どうということはない. 他の教科書で十分.

- [122] R.M. Fagen & R.N. Goldman: “Behavioural catalogue analysis methods,” *Animal Behaviour*, Vol.25, pp.261–274, 1977.

観測のための行動モデルが, 真の行動モデルをどの程度カバーしているかを

論じる。時間カバレッジ・情報カバレッジなど面白い指標が出ているが、これらは解析が難しいと、放棄している。筆者には AIC で対処すればよいと思われる。

- [123] Duncan Watson: “Kangaroos at play: play behaviour in the Macropodoidea,” M. Bekoff & J. Byers (Edit.) *Animal Play*, pp.61–96, Cambridge, 1998.

カンガルーの遊び行動の多くの研究報告をまとめたもの。動物の遊びにはどのような類型があるのかがわかる。

- [124] 佐藤 学: 「教育の方法」, 放送大学教材, 放送大学教育振興会, 1995.

授業での教師と生徒との会話インタラクションの定量的分析。5[s]ごとにサンプリングして、発言権の遷移から教育効果を論じている。生徒が教師の“じゃあ”という発言の前に正解を言っていることを見破る話など、飼い馴れアルゴリズムにも関連する。

< 飼い馴れアルゴリズムに関連する諸理論 >

- [125] 数学セミナー編集部編: 「数学 100 の発見」, 日本評論社, 1998。

ボルツマンやシャノンがエントロピを数式化するまでの過程の簡単な説明がある。

- [126] G.A. Miller & W.G. Madow: “On the maximum likelihood estimate of the Shannon–Wiener measure of information,” *Air Force Cambridge Research Center Technical Report*, AFCRC–TR–54–75, 1954.

実験データから求めたエントロピは推定値であり、それは過小評価である。その補正を述べた論文。筆者未見であるが Colgan[98] に詳しく説明されている。

- [127] E.C. Pielou: “Shannon’s formula as a measure of specific diversity: its use and misuse,” *The American Naturalist*, Vol.100, NO.914, pp.463–465, 1966.

Miller & Madow [126] と同じく、エントロピの推定誤差についての短い注意喚起レター。ボルツマンエントロピが、最も正当なエントロピ計算法として登場する。内容は Colgan の本で代用できる。

- [128] G.P. Barsharin: “On a statistical estimate for the entropy of a sequence of independent random variables,” *Theory of probability and its applications*, Vol.4, pp.333–336, 1959.

Miller & Madow [126] と同じく、エントロピの推定誤差について。筆者未見であるが Colgan[98] に詳しく説明されている。原文ロシア語。

- [129] H. Akaike: “Information theory and an extension of the maximum likelihood principle,” *Second International Symposium on Information theory*, pp.267–281, Akademiai Kiado, 1973.

赤池情報量統計学の原著．坂本 [130] の詳しい教科書を参照．情報量というと，我々はすぐ bit という単位を用いたくなるが，これは事象が半丁の 2 項分岐で分類されること仮定しているのので，一般の事例に対しても自然な設定とは言い難い．情報量を自然対数を用いて算出した場合は nat という単位になるが，なんとも半端な数であり，これが意味するところは謎であった．この論文によると，データをモデルに当てはめて分類する場合，1[nat] の分解能が向上できるならモデルのパラメータを 1 つ増やしてもよいということの意味すると判る．

- [130] 坂本 慶行, 石黒 真木夫, 北川 源四郎: 「情報量統計学」, 共立出版, 1983. 入力された信号を, どのようにカテゴライズすべきかについて, 参考になる理論・アルゴリズムが書かれている．赤池情報量統計学では, 平均対数尤度をテラー展開して, 3 次項以下を無視しているのので, それに基づく誤差が生じることがある．このような実際的な注意点にも説明がある．

- [131] R. Riedl: *Biologie der Erkenntnis*, Verlag Paul Parey, 1981.(リードル: 「認識の生物学」, 思索社, 1990.)

外界の認識し適応する知能の進化について論じた本．より高次の認識を行うアルゴリズムへの進化について述べてあるが, 思弁に頼っていて具体的ではない．

- [132] Grey Walter: “A machine that learns,” *Scientific American*, Vol.185, No.2, pp.60–63, 1951.

“ウィーンの亀ロボット” の論文．光や障害物に対する亀の反射的行動を模倣する亀型ロボットを作っている．これは Brooks [134] の Subsumption Architecture, と同内容で, しかも 40 年も早い．なのに余り知られていないのは, 早すぎたのであろうか．それともロボット工学者たちが不勉強だったのか．反射行動でロボットの行動アルゴリズムを組むことがそれほど思い付きにくいこととは思えないし, また初期のロボット工学者の多くは, 動物行動学も参考にしてははずであるが．どうもよくわからない．

- [133] Owen Holland: “Grey Walter: the pioneer of real artificial life,” *Artificial Life V (Proceedings of the fifth international workshop on the synthesis and simulation of living systems)*, pp.34 — 41, MIT Press, 1996.

Walter の先駆性を指摘する論文。わざわざ，“ウィーン の 亀 ロボット” を再現した。

- [134] R. Brooks: “A robust layered control system for a mobile robot,” IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-2, NO.1, pp.14-23, 1986 .
反射によるロボットの行動制御 (サブサンプリングアーキテクチャ) を提唱して有名な論文。従来の人工知能では難問であった問題のいくつかは、これでも簡単に解けたので話題を読んだ。しかし Walter[132] がある以上、新しいとは言えない [133]。私が思うに、反射程度のアルゴリズムでも、ロボットが、一見すると賢く融通の利く、つまり生き物らしさを感じさせる振る舞いを行ったことがセンセーションであったかと思える。
- [135] カール・セイガン: 「異星人との知的交信 — ビュラカン会議全記録」, 河出書房新社, 1976.
予備知識がない相手 (この場合, 遠い星雲の知的生物) に解いてもらうための, 電波信号の設計の話。原本は筆者未見, 金子 [136] 参照のこと。
- [136] 金子 努: 「宇宙観の歴史と人間」, 放送大学教材 86616-1-9511, 放送大学教育振興会, 1995.
セイガン [135] の要約。
- [137] Luc Steel: “The origins of Syntax in Visually Grounded Robotic Agents,” IJCAI '97, pp.1632-1642, 1997.
画像処理能力を持つ 2 つのロボットが, 互いに観察内容について会話をし, 記号と意味を摺り合わせていくという実験。しかし, “何を記号化するか” などについて, 人間の努力で誘導されている部分が多い。
- [138] Iannis Xenakis : *Formalized Music : Thought and Mathematics in Music*, Pendragon Press, 1990.
確率音楽で有名なクセナキスの理論書。自動作曲アルゴリズムには古今東西いろいろあるが, クセナキスの手法はその数学的精緻さと旧来の調性音楽理論からの独立性が強く, ロボットの自動振り付けの参考になる。

< 心理実験の手法 >

- [139] 利島 保, 生和 秀敏 編: 「心理学のための実験マニュアル — 入門から基礎・発展へ」, 北大路書房, 1997.
- [140] 東京大学教養学部統計学教室: 「統計学入門」, 東京大学出版会, 1991.

< 本実験に実施に関する技術 >

- [141] 松井, 原, 中垣: *Euslisp Reference Manual*, 1995.
ロボット制御用 Lisp のマニュアル . 行動譜処理の用いた .
- [142] 新井 民夫: “ロボットプログラミング” , 日本ロボット学会編「ロボット工学ハンドブック」, pp.537–546, 1990.
ロボット言語の解説 . この時点では , ロボット言語は産業用ロボットの作業動作の記述に用いられているだけである . ロボット言語の分類は , 単純な動作から複雑な構造をもつ動作の記述への軸 , つまり行動記述の構造化の度合いで分けている .
- [143] 高木 克幸: 「表現する移動ロボットの開発」, 東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1996.
本論文で用いた舞踊ロボットの製作 , 表現実験をまとめた論文 .

< 自著および本研究関連報告 >

- [144] 中田 亨, 高 大成, 森 武俊, 佐藤 知正: “人とロボットのインタラクションによる情報伝達効率と印象の定量的関係理解” 「日本機械学会関東学生会第 39 回卒業研究発表講演前刷集」, pp.1–2, 2000.
- [145] 佐藤, 中田, 森: “ペットロボット演出工学” , 「第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集」, Vol.3, pp.1111–1114, 1999.
- [146] 中田 亨, 佐藤 知正, 森 武俊, 溝口 博: “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.
- [147] 中田, 佐藤, 森, 溝口: “人間共棲ロボットの親和的対人行動” , 「第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集」, pp.267–268, 1995.
本論文の , 対人接触反応行動による表現に関する速報である .
- [148] 中田, 高, 森, 佐藤: “人とロボットの交流における行動エントロピと心理要素” , 「第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集」, Vol.3, pp.1117–1118, 1999.
呼吸鼓動ロボットの反応インタラクション実験の速報 .
- [149] T. Nakata, T. Sato & T. Mori, “Expression of Emotion and Intention by Robot Body Movement,” *Intelligent Autonomous Systems 5*, IOS Press, pp.352–359, 1998.
接触反応表現と身体運動表現についての国際会議での発表 .

- [150] T.NAKATA, T. SATO & T. MORI: “Producing Animal-likeness on Artifacts and Analyzing its Effect on Human Behavioral Attitudes” , *Proceedings of International Conference of Robotics and Systems '99 (IROS'99)*, pp.549–554, 1999.
一方的表現に関する実験の国際会議での発表 .
- [151] T. Nakata, T. Sato, H. Mizoguchi, T. Mori: “Synthesis of Robot–Human Expressive Behavior for Human–Robot Symbiosis,” *Proceedings of International Conference of Robotics and Systems '99 (IROS '96)*, pp.1608–1613, 1996.
接触反応表現の国際会議での発表 .
- [152] H. Mizoguchi, et al.: “Realization of Expressive Mobile Robot,” *Proceedings of IEEE Robotics and Automations '97*, pp.581–586, 1997.
本論文で用いた白い身体表現ロボットの初期の実験報告 .
- [153] 安田 悦子: 「ロボットの行動による表情表出とその蓄積に関する研究」, 東京工科大学機械制御工学科卒業論文, 1997.

付録編

付録A Mann-Whitney のU検定

A.1 原理

A.1.1 Mann-Whitney のU検定の対象となるデータ

実験にて、2つの事例に関するデータが得られたとする。

例えば、A氏とB氏のパチンコの獲得景品金額を比較する。

A氏の獲得金額が、式A.1のようであったとしよう。

$$A = \{9, 3, 7, 9, 10, 6, 5\} \quad (\text{A.1})$$

$$A \text{ のデータ個数 : } N_A = 7 \quad (\text{A.2})$$

またB氏のそれが、式A.3であったとする。

$$B = \{3, 5, 2, 1, 1\} \quad (\text{A.3})$$

$$B \text{ のデータ個数 : } N_B = 5 \quad (\text{A.4})$$

この金額データは、比率尺度の性質を有している。つまり、データ中の“10”を“5”の2倍であると考え方には意味がある。しかし、データの分布に正規性と等分散性の性質があるかは疑わしい。パチンコ台は“フィーバー”機能があって、希に異常に高額な賞金が出る仕掛けになっているから、パチンコの賞金の分布は正規分布ではないだろう。

従って、パラメトリックな検定手法（この場合はt検定）は用いられない。ノンパラメトリックな検定を用いることになる。

上記で、Aの獲得金額とBの獲得金額の間には対応関係はないものとする。つまり、1番目同士の組(9,3)や、2番目同士の組(3,5)など対にしても意味がない場合であるとする。

もし、同じ日に同じ台でプレイした等で、条件が同じであり、データを対にすることに意味がある場合は、Wilcoxonの符号化順位検定を用いるべきである。

またAとBでデータの個数が異なるが、Mann-WhitneyのU検定ではこれは構わない。

さて、AとBを眺めてみると、Aの方がBよりも高いの獲得賞金を得ているように感じられる。実際、Aの獲得金額の中央値は7であるのに対して、Bの獲得金額の中央値は2である。

そこで、

$$H_1 = \text{“Aの方がBよりも大きい獲得金額を得る傾向がある”} \quad (\text{A.5})$$

という仮説 H_1 を立てる。これを対立仮説 (alternative hypothesis) という H_1 の否定を取って、

$$H_0 = \text{“Aの方がBよりも大きい獲得金額を得る傾向など無い”} \quad (\text{A.6})$$

という仮説 H_0 を立てる。これを帰無仮説 (null hypothesis) という。

A.1.2 統計検定の一般的解説と注意

その他の検定手法でも共通であるが、統計検定の考え方とは、一旦帰無仮説が正しいと認めて、観測データのような偏りが発生する確率を計算する。その確率があまりに小さく、あらかじめ決めて置いた閾値(これを「有意水準」という)より小さい場合にのみ、観測データは非常に希な偏り方をしていると認定する。従って、帰無仮説を信じるには無理があるとし、対立仮説を採用する方が妥当であると結論する。

丁度、刑事裁判で弁護士が弁証する時、一旦検察側の仮説に立って事件を再現し説明する中で、検察側の仮説の無理を指摘する論法と同じである。

ではまず、有意水準を決定しよう。有意水準と検定手法の選定は、一番最初にしなければならない。また、一度決めたら(自分の希望する結果にならなかったと

場合でも) 変更してはならない。さもないと, その研究者は, 自分に都合の悪いものは再検査し, 自分に都合のいいものは安易に了承していることになるから, 実験結果に自分の希望を添加していることになる。

有意水準の設定は, 厳密な検証実験では 0.1%, 強い傾向のみを有意と認めたいのなら 1%, 弱い傾向もある程度認めたいのなら 5%, 探索的実験段階などでかなり弱い傾向も含めて傾向の存在を知りたいのであれば 10%とするのが, 慣例になっている。

また, 両側検定と片側検定の 2 種類がある。もし, 実験データが特定の方向に偏るという理由を実験者が持っている場合 (例えば, 予備実験で傾向を発見したとか, 理屈上特定の方向に偏らざるを得ないと分かっているとか) は, 片側検定を用いてよい。しかし, 一般には両側検定を用いること。

データ数が多ければ, 実験対象が本当に持っている傾向は, 厳密な検証 (つまり小さい有意水準) であっても, その存在が認められる。

だが, 厳密な検証が全面的に良いと言うわけではない。例えば, 人間個々人の好みなど, 本質的にノイズを含むデータなどがある。このような分析対象を, 厳密な検証に耐えるようにデータ数を増やそうすることは, 実行不可能で非現実的な場合がある。逆に, 純理工学系の実験でノイズが少ないデータの場合は, 厳密検証を目指すともいえるだろう。いずれにせよ, データの性質をよく考えて, 有意水準を決定することが肝心である。

有意水準は傾向の再現性と関係するが, 傾向の強さとは関係しない。傾向の強さの示す場合に有意水準を用いる研究者は非常に多いが, これは間違いである。傾向の強さを示すには, 平均値や相関係数などデータの実態に密着した量で語るべきである。

A.1.3 計算の考え方と手順

さて, 例題に戻る。

有意水準は 5%とする。カードの枚数が少ないのであまりに厳密な検定は出来ないし, 10%は探索実験用であるので用いない。

帰無仮説 H_0 を認めた上で, A の獲得金額の中央値が, B の獲得金額の中央値を上回る確率を求めたい。

そこでまず, A と B のデータを, 式 A.7 のように, 1 つの “井” C に混ぜ合わせる。

TABLE A.1: RANKING OF DATA IN C

Data	9	3	7	9	10	6	5	3	5	2	1	1
Rank	2.5	8.5	4	2.5	1	5	6.5	8.5	6.5	10	11.5	11.5
Belongs to	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B
Duplication	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2

$$C = A + B = \{9, 3, 7, 9, 10, 6, 5, 3, 5, 2, 1, 1\} \quad (\text{A.7})$$

この集合 C から，A は 7 個，B は 5 個のデータを無作為に選ぶとする．（「無作為」こそが帰無仮説の主張するところである．）その場合において，A の獲得金額の中央値が，B の獲得金額の中央値を上回る確率を計算すればよい．これは順列組み合わせの問題である．

しかしその計算は手間が非常にかかる．そこで少ない計算量でこの問題を解くために，Mann-Whitney の U 検定が登場する．

Mann-Whitney の U 検定では，各データについて順位をつける．大きい順でも小さい順でも結果は同じになるので構わない．具体的には Table A.1 のように順位を付ける．同じ値のデータが複数ある場合は順位を平均化する．

次にこの順位付けをもとに，AB 双方の“順位和” R_A, R_B を計算する．“順位和”とは，AB それぞれが持つデータの順位の合計である．

注：この順位和 R_A, R_B は，Wilcoxon の符号化順位検定でも，同様に算出して用いる．

$$R_A = \sum_A (\text{Rank of Data}) = 2.5 + 8.5 + 4 + 2.5 + 1 + 5 + 6.5 = 30 \quad (\text{A.8})$$

$$R_B = \sum_B (\text{Rank of Data}) = 8.5 + 6.5 + 10 + 11.5 + 11.5 = 48 \quad (\text{A.9})$$

なお，

$$R_A + R_B = (N_A + N_B)(N_A + N_B + 1)/2 \quad (\text{A.10})$$

という関係があるので，検算に用いる．

以下，統計量 U を算出する．

$$U_A = N_A N_B + \frac{N_B(N_B + 1)}{2} - R_B \quad (\text{A.11})$$

$$U_B = N_B N_A + \frac{N_A(N_A + 1)}{2} - R_A \quad (\text{A.12})$$

$$U = \min(U_A, U_B) \quad (\text{A.13})$$

統計量 U 自体で，検定臨界数値表の値と比較して検定結果を知ることが出来る．しかし，実際は U を用いることは少ない．理由の 1 つは，数値表にも限りがあり， $N_A > 20$, *or* $N_B > 20$ の場合は， U の臨界値が掲載されていない場合が多い．もう一つの理由は，データの中に同一順位のものがある場合は， U を補正をしなければならないからである．これは非常に手間がかかる．

このような理由により，統計量 U をさらに加工した統計量 z を算出し，この大小をもって有意性の判定に用いる．なお，統計学の慣例で， z とは正規分布に変換した統計量（通称 “z-score”）のことを指す．この場合の z も， U を正規化したものである．

z の計算の前に，同一順位の補正項 D を計算しておく．

まず，各順位での重複数 d_i を以下のように決める．

$$d_i = (\text{順位 } i \text{ であるデータの個数}) \quad (\text{A.14})$$

すなわち本例題の場合， $d_1 = 1$, $d_{2.5} = 2$, $d_4 = 1$, $d_5 = 1$, $d_{6.5} = 2$, $d_{8.5} = 2$, $d_{10} = 1$, $d_{11.5} = 2$ である．これを元に， D を算定する．

$$D = \sum_{i:\text{allrank}} d_i(d_i^2 - 1) = 0 + 6 + 0 + 0 + 6 + 6 + 0 + 6 = 24 \quad (\text{A.15})$$

最後に z を計算する．

TABLE A.2: CRITICAL VALUE OF Z-SCORE

Significance Level	10%	5%	1%	0.1%
Two-tailed Value $S.L. = 2P(0 \text{ to } z)$	1.64	1.96	2.58	3.29
One-tailed Value $S.L. = P(-\infty \text{ to } z)$	1.28	1.64	2.32	3.09

'Z-score' is another name of normal distribution variable.

Therefore you can easily make this table from the famous table of normal distribution.

Adopted from Ito[101] and Sheskin[100].

$$z = \frac{U - N_A N_B / 2 - 1/2}{\sqrt{N_A N_B (N_A + N_B + 1) / 12 - \frac{D N_A N_B}{12(N_A + N_B)(N_A + N_B + 1)}}} \quad (\text{A.16})$$

本例題の場合, $z = -2.63$ である. z は正規分布に従うため正負に意味はない. そこで, $|z|$ として正の側に統一しておく.

正規分布 $|z|$ の臨界値表 A.2 を見ると, 両側検定で有意水準 5% の臨界値は 1.96 である. $|z|$ の臨界値より $|z|$ の観測値が大きければ, 帰無仮説 H_0 は棄却すべきと判断される. この場合, $|z| = 2.63 > 1.96$ であるから, 帰無仮説 H_0 を棄却すべきであり, 対立仮説 H_1 が採択される.

従って, A 氏の方が B 氏より高額 of 賞金を得る傾向があると判定される.

A.2 Mann-Whitney の U 検定プログラムソースコード

```

1: // Mann-Whitney の U 検定プログラム
2: // 1998 年 11 月 1 日 中田 亨 作成
3: // (c) Toru NAKATA, 1998.
4: // このプログラムは, Mann-Whitney の U 検定を行うものです
5: // アルゴリズムの詳細は
6: // 伊藤ら「動物行動学のための統計学」(東海大学出版会)1984 年
7: // を参考にして作りました。(本掲載のプログラムではありません)
8: // プログラムの作業内容は, データの大きい順に, 順位を計算し、
9: // 本の理屈に従って, "正規化された統計量 z(下記では zz)" を計算します。
10: // 最後にこの統計量 z が, 有意性をどの程度もつかを判定します。
11: // デバッグしたい場合は, printf のコメントアウトをはずしてみてください。
12:
13:
14: #include <stdio.h>
15: #include <stdlib.h>
16: #include <math.h>
17:
18: void main()
19: {
20:     int n,m;           //データの数。場合 1 のと、比較群の。
21:     float data[30]; //場合 1 の観測データ
22:     float ref[30];  //比較する観測データ
23:     int i=0,j=0;
24:     float r1= 0.0, r2 = 0.0;

```



```

25:     float u1 = 0.0, u2 = 0.0, uu = 0.0; //U検定量がらみ
26:     float zz = 0.0; //正規統計量Z
27:     float tempzz = 0;
28:     float gt[60]; //順位計算作業用、データ格納場所
29:     float swap;
30:     float gtg[60]; //順位計算作業用、群番号格納場所
31:     long nowrank = 1;
32:     long lastrank;
33:     long surank[60];
34:     long dup[60]; //同一順位問題解決部、作業変数
35:     long AA = 0;
36:     long tempdup;
37:     long temprank;
38:     float gtrank[60];
39:
40:     for(i = 0; i < 30; i++) {
41:         ref[i] = 0;
42:     }
43:     for(i = 0; i < 60; i++) {
44:         dup[i] = 1;
45:         gtrank[i] = 0;
46:     }
47:
48:     printf("Mann-Whitney のU検定プログラム\n");
49:     printf("Copyright (C) by Toru NAKATA, 1998.\n\n");
50:     printf(" 選んで下さい\n");
51:     printf(" 1 : ある観測データが、ゼロだけのデータとの比較\n");
52:     printf(" 2 : 2つの場合のデータの比較\n >> ? ");
53:     j = 0;
54:     scanf("%d",&j);
55:     if(j < 1 || j > 2) exit(0);
56:
57:     //ひとつのデータ集まりと、ゼロとの比較
58:     if(j == 1) {
59:         printf("これから入力するデータと、同じ個数のゼロの集まりのデータと比較
します\n");
60:         printf("観測データをいれてください。99 入力で入力終わり\n");
61:         //データ入力部
62:         i = 0;
63:         while(1){
64:             printf("Data No.%d = ? ",(i+1));
65:             scanf("%f",&(data[i]));
66:             if(data[i] == 99.0) break;
67:             i++;

```

```

68:     if(i > 30) {
69:         printf("Too much Data!");
70:         exit(0);
71:     }
72: }
73: n = i;
74: m = n;
75:
76: //入力されたデータの表示
77: printf("Data num = %d.\n",n);
78: for(i = 0; i < n; i++) printf("%3.1f, ", data[i]);
79: printf("\n");
80: }
81:
82: //二つの場合の比較
83: if(j == 2) {
84:     printf("第1の場合の観測データをいれてください。99 入力で入力終わり
\n");
85:     //データ入力部
86:     i= 0;
87:     while(1){
88:         printf("Data No.%d = ? ",(i+1));
89:         scanf("%f",&(data[i]));
90:         if(data[i] == 99.0) break;
91:         i++;
92:         if(i > 30) {
93:             printf("Too much Data!");
94:             exit(0);
95:         }
96:     }
97:     n = i;
98:
99:     printf("第2の場合の観測データをいれてください。99 入力で入力終わり
\n");
100:    //データ入力部
101:    i= 0;
102:    while(1){
103:        printf("Data No.%d = ? ",(i+1));
104:        scanf("%f",&(ref[i]));
105:        if(ref[i] == 99) break;
106:        i++;
107:        if(i > 30) {
108:            printf("Too much Data!");
109:            exit(0);

```

```

110:     }
111: }
112: m = i;
113:
114: //入力されたデータの表示
115: printf("第1の場合 Data num = %d.\n",n);
116: for(i = 0; i < n; i++) printf("%3.1f, ", data[i]);
117: printf("\n");
118: printf("第2の場合 Data num = %d.\n",m);
119: for(i = 0; i < m; i++) printf("%3.1f, ", ref[i]);
120: printf("\n");
121:
122: }
123:
124:
125: //入力されたデータの格納
126: for(i = 0; i < n; i++){
127:     gt[i] =data[i];//入力されたデータ
128:     gtg[i] = 1.0;    //データグループ番号1
129: }
130: for(i = 0; i < m; i++){
131:     gt[i + n] = ref[i];//比較対照のデータ
132:     gtg[i + n] = 0.0;    //データグループ番号0
133: }
134:
135: //おバカソート。gtを並べ替える
136: for(i = 0; i < n + m -1; i++){
137:     if(gt[i] < gt[i+1]){
138:         swap = gt[i];
139:         gt[i] = gt[i+1];
140:         gt[i+1] = swap;
141:         swap = gtg[i];
142:         gtg[i] = gtg[i+1];
143:         gtg[i+1] = swap;
144:         i = -1;
145:     }
146: }
147:
148: /**
149:     for(i = 0; i < n + m; i++){
150:         printf("%d: %d %d\n", i,gt[i],gtg[i]);
151:     }
152: **/
153:

```

```

154: //単純な順位つけ。「素のランク」で surank
155:     nowrank = 1;
156:     for(i = 0; i < n + m; i++){
157:         surank[i] = nowrank;
158:         if(i < n + m - 1 && gt[i] > gt[i+1]) nowrank++;
159:         if(i < n + m - 1 && gt[i] == gt[i+1]) dup[nowrank]++;//重複も数
えておく
160:     }
161:     lastrank = nowrank;
162:
163: /**
164:     for(i = 0; i < n + m; i++){
165:         printf("%2d %2d (%2d): %f %f\n",
166:             i+1, surank[i], dup[surank[i]],gt[i],gtg[i]);
167:     }
168: **/
169:
170: //同一順位の補正用の準備計算
171: AA = 0;
172:     for(i = 0; i < n + m;){
173:         tempdup = dup[surank[i]];
174:         temprank = i + 1;
175:
176:         for(j = 0; j < tempdup; j++){
177:             gtrank[i] += temprank + j;
178:         }
179:         gtrank[i] /= tempdup;//平均化した順位
180:
181:         for(j = 0; j < tempdup; j++){
182:             gtrank[i + j] = gtrank[i];
183:         }
184:
185:         AA += tempdup * (tempdup * tempdup - 1);//AA の計算
186:
187:         i += tempdup;
188:     }
189:
190: /**
191:     for(i = 0; i < n + m; i++){
192:         printf("%4.1f (%2d): %f %f\n",
193:             gtrank[i], dup[surank[i]],gt[i],gtg[i]);
194:     }
195: **/
196:

```

```

197:     for(i = 0; i < n + m; i++){
198:         if(gtg[i] == 1.0) r1 += gtrank[i];
199:         else r2 += gtrank[i];
200:     }
201:
202: /**
203:     printf("r1 = %4.1f, r2 = %4.1f\n",r1,r2);
204: **/
205:
206:     u1 = (float) (n * m + 0.5 * m * (m +1) -r2);
207:     u2 = (float) (n * m + 0.5 * n * (n +1) -r1);
208:
209: /**
210:     printf("u1 = %4.1f, u2 = %4.1f\n",u1,u2);
211: **/
212:
213:     //u1 と u2 で、小さい方を uu とする。( U 統計量 )
214:     if(u1 < u2) uu = u1;
215:     else uu = u2;
216:
217: /**
218:     printf("U = %f, A = %d\n",uu, AA);
219: **/
220:
221:     zz = (float) (uu - n * m * 0.5 -0.5);
222:     tempzz = (float) (n * m * (n + m +1) / 12);
223:     tempzz -= n * m * AA / (12 * (n + m) * (n + m + 1)); //同一順位の影
響の補正
224:     tempzz = (float) (sqrt(tempzz));
225:     zz /= tempzz; //Z 統計量の完成
226:     printf("統計量 Z = %f\n",zz);
227:
228:     if(zz < 0) zz = -zz;
229:     printf("abs(Z) = %f\n",zz);
230:
231:     //有意性の判定
232:     if(zz > 3.29)     printf("revel 0.1% 両側 OK\n");
233:     else if(zz > 2.58) printf("revel  1% 両側 OK\n");
234:     else if(zz > 1.96) printf("revel  5% 両側 OK\n");
235:     else if(zz > 1.64) printf("revel 10% 両側 OK\n");
236:     else printf("両側検定では有意とはいえませんでした。 \n");
237:
238:     if(zz > 3.09)     printf("revel 0.1% 片側 OK\n");
239:     else if(zz > 2.32) printf("revel  1% 片側 OK\n");

```

```
240:     else if(zz > 1.64) printf("revel  5%% 片側 OK\n");
241:     else if(zz > 1.28) printf("revel 10%% 片側 OK\n");
242:     else printf("有意とはいえませんでした。 \n");
243:
244:     printf("type 99 to quit\n");
245:     scanf("%d",&i);
246:
247:     exit(0);
248: }
```

著者紹介



著者近影

中田 亨 (Toru NAKATA)

1972年 横浜市に生まれる .

1991年 東京大学教養学部理科一類に入学

1995年 卒業論文“抑揚情報による相槌のモデル化の研究”
(指導教官 Nigel Ward 助教授, 東京大学工学部機械情報工学科)

1995年 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士課程に入学

1996–97年 University of California at Santa Barbara, Graduate Course of Mechanical and Environmental Engineering へ留学 .

1997年 修士論文“人間共棲のためのロボットの対人表現行動の理論と生成”
(指導教官 佐藤知正教授, 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻)

1997年 東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程に進学

1998–2001年 日本学術振興会特別研究員 (DC-1)

2001年 産業経済省産業技術総合研究所に入所予定

所属学会・団体：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，日本動物行動学会，日本ダンスセラピー協会，Delta Society (米国の人と動物の関係に関する親睦と研究の団体).

索引

- 0 次コミュニケーション, 20
- Actimates, 39
- AIBO, 36
- ELIZA, 42
- Furby, 42, 43
- Infanoid, 42
- InterRobot, 45
- MIC, 41
- Movement System (舞踊学用語の), 85
- My Interactive Pooh, 40
- PostPet, 37
- R-100, 40
- Silas, 45
- subsumption architecture, 34
- TEL-DA, 40
- WAMOEBEA-2, 41
- あやつり人形型, 24
- インタラクション, 19
- インタラクションのカオス利用型, 23
- インタラクションの次数, 19
- インタラクションの陳腐化対策, 23
- エージェント, 17
- 改造遊戯型, 24
- 外乱利用型, 23
- かじかじハム太郎, 34
- カメラロボット, 34
- カラクリ人形, 32
- 擬動物化, 34
- 教師付き学習, 22
- クアドアド, 19
- 行動レパートリ, 22
- 情報源借用型, 24
- 進化適合, 50
- 人工無能, 42
- 水中アニマトロニクスシステム, 33
- ステージ遷移型, 24
- 性差, 27
- ダイアド, 19
- 対人行動物, 17
- 台本交換型, 24
- タッチおじさんロボット, 40
- たまごっち, 38
- たま (柴田の), 44
- たま (松下電器産業の), 40
- チェス指し人形, 45
- 動物らしさ, 32

トライアド, 19

ぬいぐるみ, 31

のらくろロック, 34

ピカチュウげんきでちゅう, 45
表現, 49

フィンフィン, 45

フラワーロック, 34

ぶるぶるミニうさぎ, 32

文化差, 27

ポリアド, 19

みつけてハムスター, 34

ミュージカン, 34

む~, 45

モナッド, 20

乱数関数内蔵型, 23

履歴効果型, 24

連関度, 138