研究論文：論文

人の感性を考慮したインタラクシオンロボットの行動生成

(第2報 ロボットの行動生成アルゴリズムについて)

森善一*, 太田浩司**, 中村達也*

*東京都立大学工学研究科, ** (株) デンソー

Motion Generation of Interactive Robot Considering KANSEI of Human

(Motion Algorithm for Robot that does not tire Human)

Yoshikazu MORI*, Koji OTA** and Tatsuya NAKAMURA*

* Tokyo Metropolitan University, 1 -1, Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo, 192 -0397, Japan

**DENSO CORPORATION, 1-1, Showa-Chou, Kariya, Aichi, 448 -8661, Japan

Abstract: In this paper, we quantitatively analyze the KANSEI of human from many other angles for the purpose of generating the motion algorithm for a robot that does not tire a human. A red ball and a blue ball are displayed on a simulation screen. A person moves the red ball with a mouse and a computer moves the blue one. By using this model, we analyze the relationship between the boredom and the information transfer efficiency. Three reaction patterns of the blue ball are prepared, and the information transfer efficiencies are 1.0, 0.5 and 0.0. Next we discuss a motion algorithm for the robot based on the theory of socion proposed in the field of the sociopsychology. The motion is generated from a logistic map. Finally, considering the application to a real robot, the difference of the impression between the simulation and the actual robot is proved by an omni-directional robot.

Keywords: Interactive Robot, Information Transfer Efficiency, Logistic Map

1.はじめに

ここ数年、自律型ロボットの新しい応用分野として Robot Entertainment という領域が確立されつつある。介護ロボットや危険作業ロボットのような自律型ロボットは、誤認識などが致命的な問題となるため、実用化のために達成しなければならない技術的ハードルが高かった。そこで、そのようなことが問題とならないロボットのエンターテインメント化が提案されてきたのである。その一つに AIBO に代表されるペットロボットが挙げられる[注 1]。しかしながら、今のペットロボットは“飽きられる”という宿命を負っている[注 2]。飽きられない何かがペットロボットに付加されない限り、その永続性は望めない。このような背景の中、ペットロボットの愛着に着目した研究が鈴木らによって行われている[注 3]。彼ら是对話型 G A を用い、動作を学習するシステムを構築することで、ユーザーにロボットに対する愛着感を持たせることを考えた。また、抱きかかえによって人になじむ動作の実現を目指すことで愛着をもたせようという試みや[注 4]、ペットロボットとの触れ合いに着目した研究もある[注 5-6]。さらに、脳波により人の満足感を計測し、それに適応した行動をとるロボットの研究も行われている[注 7]。人の“飽き”に直接かかわる研究としては、行動のレパートリーを増やしたり、行動にランダム性を付加したりして、退屈を防ぐ

方策をとるという研究もある[注 1]。しかしながら、“飽き”に関して、その理論的説明は未だ不十分であると言える。

そこで本論文では、飽き難いロボットの行動を生成するための第一歩として、人とロボットとのインタラクシオン実験を通して人の感性について多角的、定量的に分析することを目的とする。インタラクシオンを数理的に分析していけば機械にも人を飽きさせないことができると筆者らは考えている。そして、本研究の成果は、現存するペットロボットに付加することにより、飽き難く、面白いロボットにすることを望めるのみならず、将来、人と共存するロボットの行動アルゴリズムを探す手がかりとなることを期待している。

第1報では、複雑さと飽きの関係、人と人とのインタラクシオンを通じて自然に生成される行動の分析、およびロボットが人に与える印象の違いについて議論した。本報では、第2章において、後追い行動や逃げ行動などの人間らしい行動要素を備えたロボットと人間とのインタラクト中の情報伝達効率の違いが、人にどのような印象を与えるのかを理論的に解析する。第3章では、ロジスティック写像を用いたロボットの行動生成アルゴリズムについて検討を行う。第4章では、実機への適用を視野に入れ、シミュレーションと実機の印象の違いを全方向移動ロボットにより調べる。最後に第5章において、まとめと今後の展望について述べる。

図1：シミュレーション画面

2. 異なる情報伝達効率に対する印象の違い

本研究では、図1のようなコンピュータシミュレーションを用いて実験を行う。被験者は画面上の赤いボールをマウスで自由に動かすことができ、青いボールは、赤いボールの動きに応じてコンピュータによりさまざまな行動を起こす。画面の大きさは、幅 1000[pixel]、高さ 700[pixel]とした。またサンプリング時間は 50[ms] に設定している。

本章では、青ボール（ロボット）の行動をある数種類に限定した場合に、赤いボール（人）の行動に対して、青いボールが毎回同じ反応パターンを起こす場合と、全くランダムに反応パターンが選択される場合、およびその中間の反応をする場合では、人はどのような印象を持つのかについて調べる。これらの反応様式の違いは、情報伝達効率の違いとして表現することができる。中田らは動物行動学的なアプローチから、ダイアドインタラクションを用いた方法を示している[注 8]。中田らは、手足の動作するぬいぐるみ型の対人接触インタラクションロボットを用いて、情報伝達効率の違いが人に与える“ロボットの意図の印象”、“ロボットの面白さの印象”、“ロボットの可愛らしさの印象”について考察を行っている。ここで、情報伝達効率とは、先動者と後動者の行動に対する影響を表すもので、識別率と可制御率とからなる。前者は、一方の行動の違いが他者の行動に反映される割合を表し、後者は、一方の行動選択を他者が制御できる割合を表す。

本研究においても同様の手法を用いて、動きのインタラクションにおける情報伝達効率の違いが、人の印象形成にどのように関わっているのかを調べた。ただし、本研究の目的は“飽き”と“人の感性”の関係を調べることであるため、評価項目についても、次の9個（複雑さ、面白さ、飽き難さ、動物らしさ、愛着を感じるか、親しみやすさ、従順さ、恐さ、窮屈さ）とし、飽きるまでのインタラクト時間の計測も行った。

ロボットの反応行動の定義としては、逃げ、後追い、無干渉行動、無行動の4種類を用意した。無干渉行動にはランダム行動を用いた。反応様式は次の3種類とした。

- (R1) 1対1反応（情報伝達効率=1）：ロボットの行動が、被験者に意図できる形で表れる反応。
- (R2) 中庸的反応（情報伝達効率=0.5）ロボットの行動が、

表1：観測データから算出した識別率と可制御率

Reaction pattern	R1		R2		R3	
	Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev
N	67.3	22.2	100.4	60.8	83.4	42.5
I [bit]	1.79	0.108	0.99	0.044	0.14	0.076
D	1.0	0.0	0.58	0.044	0.082	0.042
C	1.0	0.0	0.51	0.022	0.074	0.039

図2：各反応様式における印象と検定結果

被験者にある程度意図できる形で現れる反応。

(R3) 非情報伝達反応（情報伝達効率=0）ロボットの行動が全く意図できず、予測できない反応。

(R1)では、人が近づくとロボットは離れ、離れると逆に近づいてくる。また止まっているとロボットも動きをやめ、ある程度の距離以上離れると、ロボットはランダム行動を開始する。(R2),(R3)では、それらの行動の生起確率がそれぞれ異なる。

被験者は、(R1)~(R3)の青ボールの反応様式のすべてとインタラクトし、最後に上記の9つの評価項目のそれぞれに対し、(R1)~(R3)のどれが最もふさわしいかという点で、対応づけを行う。例えば、“単純な”については、“一番複雑でない”、“二番目”、“一番複雑と感じる”が選択項目となる。ただし、該当が無い場合には、“適当に決めた”にマークをつけてもらった。実験中、ロボット側は0.2[s]ごとに被験者の動きをセンシングし、ダイアド回数等の人の行動を記録している。実験の被験者は、10代男子大学生4人、20代男子大学生20人、20代女子大学生1人、30代男子社会人2人、および20代男子社会人、50代男子社会人、30代女子社会人1人ずつの合計30人である。

表1は、被験者10人から得られた情報理論的特徴を示している。ただし、同表で示されたNはダイアド回数、Iは人とロボットの間の行動インタラクションで伝達した情報量、Dは識別率、Cは可制御率である。D,Cの平均値については、(R1)~(R3)のそれぞれの項目において、実験前の最尤値(1, 0.5, 0)とそれぞれ類似した結果を得ることができており、実験が正しく行われていることを確認できる（付録参照）。

アンケートによる結果は、“一番複雑でない”等の相対評価であるので、その統計検定にはノンパラメトリック検定法の一つであるMann-WhitneyのU検定を用いて、回答の分布のもつ偏りの有意性について調べた。その印象の違いをまとめ

図3：ソシオン理論に基づくダイアド

たものが図2である。同図では、四角で囲まれた評価項目に対する結果が示されている。検定の結果、有意性が示されたときには、各パターンに対して不等号を記し、その傍に有意水準を記した。例えば、“複雑さ”については、(R2)は(R1)より複雑で、その差については、有意水準1%で有意差が認められたことを表している。図2の項目のほかに“恐い”、“窮屈な”についても調べたが、前者は“適当に決めた”と答えた被験者が8人おり、また後者については、5%までの有意水準に該当する結果が得られなかったため、結果を示さなかった。また、各パターンに対するインタラクト時間については、(R1)=82.1[s]、(R2)=100.2[s]、(R3)=91.7[s]であり、これを被験者ごとに正規化した場合は、(R1)=0.315、(R2)=0.354、(R3)=0.332であった。

本実験における結果を考察すると次のようになる。

- (1) 対象があまり従順すぎると、人はつまらなさ、飽きやすさ等を感じ、その対象に良い印象をもたない (R1: 情報伝達効率=1 の場合)。
- (2) 対象と意思の疎通が全くできない場合、人は、複雑な、面白い、飽き難い、という印象をもつ。しかしその反面で、この行動には、愛着を感じる、親しみがある、等の心のふれあいを感じさせる要素はない。したがって、短期的な“飽き”とは関係があるが、長期的なそれを起こさせるには不十分であると考えられる (R3: 情報伝達効率=0 の場合)。
- (3) 対象と意思疎通が完全ではなく、ある程度のランダム性がある場合、人はその行動に、面白さ、飽き難さ、動物らしさ、に加えて、愛着を感じる、親しみやすい、等の印象、すなわち生命を感じていると言える。これは我々が人やペットとふれあうときに感じる印象と通じる。またこのときのインタラクト時間がもっとも長かった (R2: 情報伝達効率=0.5 の場合)。

これらの考察のうち、飽きの長期、短期性の認識や、生命感と飽き難さについての項目(2),(3)については、中田らの論文[注8]にはない新しい知見である。

3 ロジスティック写像を用いたロボットの行動生成

本章では、インタラクションのモデル化を行い、そのアルゴリズムをロボットに組み込むことにより、飽きを生じにくくする行動アルゴリズムの生成について議論する。

最近、社会心理学の分野において、インタラクションのモデル化を行うための一手法として、ソシオン理論[注9-10]が提案されている。

図4：ボールの位置の時間応答

ソシオン理論とは、一人一人の人間をソシオンという社会関係を形成する素子と捉えることで、関係を単純化させ、数式化するものである。その様子を図3に示す。二者関係の場合は、AはAというソシオンの中に W_{aa} 、 W_{ab} という荷重をもっており、BはBというソシオンの中に W_{bb} 、 W_{ba} という荷重をもっている。 W_{aa} はAの自己評価であり、 W_{ab} は自己Aから他者Bへの情緒的評価である。同様に、 W_{bb} はBの自己評価であり、 W_{ba} は他者Bから自己Aへの情緒的評価である。これらのパラメータを組み合わせることで漸化式を作ることにより、インタラクションにおけるA,Bの情緒的評価を推定することができる。

本研究では、このソシオン理論を用いて、Aを人、Bをロボットと捉え、図1と同様のシミュレーション環境により実験を行った。ただし今回の実験では、人とロボットの行動を横方向の1自由度に限定した。Aを赤ボール、Bを青ボールとし、 W_{ab} と W_{ba} をシミュレーション画面におけるそれぞれの位置を示す変数に置き換え、両者の行動を可視化した。シミュレーション画面において、人はマウスにより W_{ab} すなわち人が持つロボットに対する情緒的評価を変化させることができ、またロボット側は、人の行動を通して受ける人に対する情緒的評価 W_{ba} を漸化式から求める。両者はある距離だけ離れた位置からスタートし、ロボットは W_{ba} の大きさが正なら人に好意を持っているとみなし人のほうへ近づき、逆に負なら人から遠ざかるという行動をとる。

最初に、このモデルに対して、藤沢らが提案している式(1)に示す漸化式により、 W_{ba} を決定した。

$$W_{ba}(t+1) = W_{ba}(t) + \frac{1}{W_{bb}}(W_{ab}(t) - W_{ba}(t)) + \varepsilon \quad (1)$$

ただし、 ε は、ゆらぎを与える乱数であり、 W_{bb} は定数としている。このとき、 ε を無視し、 W_{ab} を固定とすると、 W_{ba} は、

$$W_{ba} < 0.5 \quad (2)$$

の条件のもとで、極値 W_{ab} をとる。したがって、人とロボットとは同一の行動をとり、人がロボットに近づくとロボットも人に近づき、逆に人が遠ざかるとロボットも遠ざかるという行動が現れる。これは、“相手が好意を抱いてくれるなら、

自分も相手に対して好意を抱く”という、我々の直感とも一致する自然な行動と言える。また、 W_{bb} が大きいと応答性が悪くなるが、これについても、“自己評価が大きい人は、他人の行動を気にしない”というアナロジーとなっており興味深い。

しかしながら、これだけでは動作が単純であり、すぐに飽きが起こる。そこで、筆者らは、両者が離れているときにはロボットはランダムに動き、人が近づくとつれロボットの動きは収束していき、やがて、式(1)で生成される行動と同様の行動を発生させる行動生成アルゴリズムについて思考した。これは、ある程度遠くにいる人に対して我々は無関心だが、その人が近づいてくると関心がそちらへ向いていくという感覚と対応している。その行動生成のために筆者らが注目したのが、ロジスティック写像である。

ロジスティック写像は、式(3)に示されるものであり、定数 a が 4 のときに x の点列がカオスに対応する非周期的振動状態となることはよく知られている。ここで、 a の値が 0 から 3 までは、 x は安定な不動点に収束し、その後、 a の増加にともない 2 周期、4 周期というように周期倍分岐が起こり、 $a=3.57$ 付近以降ではカオス解が発生する場合が生じる。また、 a が 4 を超えると、 x の点列は $-\infty$ へ発散する。

$$x(t+1) = a x(t)(1-x(t)) \quad (3)$$

この性質を利用し、本研究では、式(4)のようなソシオンの漸化式を立てた。ロボットの行動は、この内部モデルに基づいて決定される。

$$W_{ba}(t+1) = \frac{1}{W_{bb}} W_{ba}(t)(W_{ab}(t) - W_{ba}(t)) \quad (4)$$

式(1)と式(4)を比べると、

$$\frac{1}{W_{bb}} (W_{ab}(t) - W_{ba}(t)) \quad (5)$$

という項が互いに含まれており、定常状態では人が近づくとロボットも近づくと式(1)と同様の 2 者間のインタラクト行動が発生する。このとき W_{ab} を固定とすると、 W_{ba} の極値は、

$$W_{ab} - W_{bb} \quad (6)$$

となる。また、式(3)と式(4)を比べると、式の形が同じなので、定数をうまく選ぶことにより、ランダムな動作（正確にはカオス状態であるが、シミュレーションにおいて視覚的にはランダムと区別がつかない）を発生させることができる。ここで注意することは、式(3)では、 a の値を変化させていたが、式(4)では a と対応する項 $(1/W_{bb})$ の値を一定にし、代わりに式(3)では定数である 1 と対応する項 (W_{ab}) を変化させている点である。このようにすることにより、所望の行動を生成することができる。 W_{bb} の値については、その値が 0.25 より小さいと W_{ba} の値は発散するが、0.25 以上では、その値が大きいほど、 W_{ab} の変化に対する反応は小さくなっていく。

図 5：全方向移動ロボット

これは藤沢らのモデルと類似した性質と言える。

定数 W_{bb} の値を 0.25、 W_{ab} と W_{ba} の初期値をそれぞれ 1 および 0.1 として、適当な速度で人（赤ボール）をロボット（青ボール）に近づけた時の両者の時間応答をプロットしたものが図 4 である。ロボットは、始めはランダムに動いているように見えるが、やがて人が近づくとつれ、周期的な動作に移り、最終的には振動をやめ、一定の値に収束しながら人に近づいていく様子が分かる。その後、人が遠ざかるにつれロボットも遠ざかり、やがてまた振動を始める。

本章で提案するロボットの行動と飽きの関係を検証するために、被験者として、20 代男子大学生 23 人、10 代と 30 代の男子大学生 1 人ずつ、20 代女子大学生 1 人、30 代男子社会人 2 人、30 代と 40 代の女子社会人 1 人ずつの合計 30 人に対して実験を行った。被験者にはシミュレーション環境の説明後、“飽きるまでロボットと遊んでください”と伝え、そのときの被験者の行動とインタラクト時間を計測した。その結果、インタラクト時間は平均で 157.0[s]（標準偏差 92.1[s]）であり、1 自由度しかもたない単純なシミュレーションにもかかわらず、ただ 1 つの式(4)から十分に複雑な行動を生起できたと言える。

また実験を通して分かったことは、このボールを生き物のように感じているかどうかインタラクト時間の長さに影響を与えていることである。人の位置次第では、ロボットの位置を決定する数値は発散するため、ロボットはある地点で静止し、人とのインタラクションがなくなってしまうこととなる。その場合はリセットをかけ、その後、飽きるまでインタラクト行動を起こしてもらおうのだが、そのとき、ロボットが“死んだ”と解釈している被験者は比較的長いインタラクト時間を持ち、一方“シミュレーションのバグ”と解釈した被験者は比較的早く飽きを感じていることが、アンケートの結果より分かった。

4. シミュレーションと実機との印象の違い

これまでの議論は、実機における実験の困難さから、コンピュータシミュレーションを用いて行ってきたが、最後に実機への適応を念頭に入れ、シミュレーションと実機との印象

図6：人とロボットの動作軌跡

の違いを調べる。同様の研究は、森ら[注11]によっても行われており、その結果、“インタラクションを含んだ動作による印象は、CGと実機ではまったく異なるわけではない”という結論を得ている。

本実験における実験装置は、全方向移動ロボット、被験者の動作指示器、画像処理装置から構成される。使用したコンピュータはCeleron 350MHzであり、OSにはRT-Linuxを使用した。また、パソコンにはI/Oボード(岡崎産業(株)製、Ritech Interface Board)と画像処理ボード((株)日立製作所製、IP5005)が挿入されている。ロボットは、3つの小回転盤付きモータにより、ロボット本体の中心にある球を回転させることで、ホロノミックな全方向移動が可能である[注12]。ロボットの写真を図5に示す。ロボットは、直径160[mm]の大円盤をベースにしており、高さは45[mm]である。ロボットは全方向移動が可能なので、シミュレーションの動作を忠実に再現できるという利点がある。また、被験者の動作指示器は、伏せた紙コップの中央に発光ダイオードを取り付けたシンプルな装置である。

実験では、動作指示器とロボットに取り付けられた発光ダイオードの位置をカメラで読み取り、ビジュアルサーボをかけることにより、人とロボットとの動きによるインタラクションを実現することができる。なお、カメラのサンプリングタイムは200[ms]とし、I/Oボードのサンプリングタイムは10[ms]とした。

本実験装置により、ロボットを動かしたときに感じる印象が、シミュレーションの印象とどのように異なっているかを調べるために、ロボットの後追い行動に対して、7段階評価(1=非常に異なる, 2=とても異なる, 3=やや異なる, 4=いずれでもない, 5=やや同じ, 6=とても同じ, 7=非常に同じ)でアンケートを行い、同時に自由回答も行った。このときの人とロボットの動作例は、図6に示すとおりである。このとき、ロボットは、80×80[cm]の平面内を約14[s]で移動している。なお、シミュレーションでは、ロボットと動作指示器の真上

図7：シミュレーションと実際のロボットとの印象の違い

からの相対的な大きさ、およびシミュレーション環境内でのロボットの動作速度を実際のものとほぼ同一に設定した。

アンケートは、ロボットとシミュレーションに対して、“全体の印象”の違いと、“動作自体の印象”の違いに分けて行った。被験者は、20代男子大学生24人、20代女子大学生2人、20代、30代、40代、50代男子社会人1人ずつの合計30人である。その結果をまとめたものが図7である。同図のデータには、やや偏りがあると思われるが、それを検定するために、標本の分布を正規分布と仮定し、 χ^2 適合度検定を行った。なお、正規分布を仮定した理由は、ロボットとシミュレーションの動きの比較自体が不適当な場合、“4=いずれでもない”に多くのマークが付き、また、“1=非常に異なる”や“7=非常に同じ”などにはあまりマークがつかず、その間にマークが集中すると仮定したからである。帰無仮説を、 H_0 :データは正規分布に従う、としたときに、“全体の印象”および“動作自体の印象”は共に、1%の有意水準で H_0 を棄却することができた。よって、データには偏りがあると考えてよい。

図7における“全体の印象”は、“同じである”という答えと、“異なる”という答えがほぼ同数であった。印象が違うと答えた人の多くは、“実機の方が、シミュレーションよりも、リアルで面白く、興味深かった”，と自由回答で答えている。一方、“動作自体”の印象の違いは、実機の応答性等のハードウェアについての問題があるため、やや同じ(5段階目)が最も多い結果となったが、全体的に同じような印象を感じていることが自由回答の結果からも分かった。

さらに、動作自体の印象をより客観的に調べるため、次のような実験を行った。まず、被験者30人中の25名に、以下の項目について、シミュレーションと実機の印象をそれぞれ7段階で評価してもらう。評価項目は、1.速い-遅い、2.のびのびした-窮屈な、3.ぎくしゃくした-なめらかな、4.力強い-弱々しい、5.急な-緩やかな、6.直線的な-曲線的な、7.動的な-静的な、8.規則的な-不規則的な、の8つとした。次に、各項目に対するシミュレーションと実機の評価の差分をとり、それぞれに対してt検定を行った。その結果、2と3以外の項目については1%の危険率で“シミュレーションと実機の印象に違いはない”という帰無仮説を採択することができた。また、2と3の項目については、単にハードウェアの動作の

不十分さを示しているだけであると考察できる。以上の実験からも、シミュレーションと実機は、動作に関して同様の印象を被験者に与えることが確認された。

もちろん、これだけの実験からシミュレーションの妥当性を結論づけることはできないが、今後、後追い行動以外の行動についても調べ、妥当性を検討していく予定である。また、本研究では実機に全方向移動ロボットを用いたが、他の車輪型移動ロボットや、歩行ロボット等に対しても、後追い、逃げ、無干渉等の行動は容易に実装することができると考えられる。

5. おわりに

本研究では、人とロボットとのインタラクションの定量的な分析を行った。インタラクト中の情報伝達効率を0, 0.5, 1に取った場合、情報伝達効率が0.5のときに、人はその物体により強い愛着を持ち、また生命を感じるという印象を持つということが分かった。

また本研究では、ソシオン理論をベースにロジスティック画像を用いて、ロボットの行動生成アルゴリズムについての検討を行った。最後に、シミュレーションの妥当性を確かめるために全方向移動ロボットを用いて、シミュレーションと実機の印象の違いを調べた。

今後、本研究で示した行動生成アルゴリズムをさまざまなロボットに適用し、印象の相違について検討していく予定である。そして最終的には“飽きないロボット”の実機の製作を行っていきたいと考えている。

注

- 1) 藤田：ペット型ロボットの感性表現, 日本ロボット学会誌, 17, 7, 947-951, 1999
- 2) 佐藤, 中田, 森：ペットロボット演出工学, 日本ロボット学会学術講演会, 1111-1114, 1999
- 3) 鈴木：ユーザの愛着獲得のための対話型GAによるロボットの行動生成, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-76-114(1)-(2), 1999
- 4) 星野, 稲葉, 井上：抱きかかえが可能な人型ロボットにおける人になじむ動作の実現, 日本ロボット学会学術講演会, 759-760, 1997
- 5) 東田, 清水, 沖, 中野, 柴田：さわり心地を重視したアザラシ型メンタルコミットロボット, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-80-116(1)-(2), 2000
- 6) 柴田：人の心を癒すメンタルコミットロボット, 日本ロボット学会誌, 17, 7, 943-946, 1999
- 7) 松永, 中沢：人間の満足感を理解して適応した行動をとるロボットの研究, 日本ロボット学会誌, 18, 8, 1149-1158, 2000
- 8) 中田, 高, 森, 佐藤：人とロボットのインタラクションにおける生成印象と情報伝達の相関分析, 日本ロボット学会誌, 19, 5, 667-675, 2001

9) 藤澤：ソシオン理論のコア, 北大路書房, 1997

10) 雨宮：相互作用で解く心と社会, 関西大学出版部, 2001

11) 森, 高松, 中田, 佐藤：ロボットの動作による印象形成の比較～実機とコンピュータグラフィックスの比較～, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2A1-H7(1)-(2), 2001

12) 井出, 松好, 足立, 増田：球体駆動機構を用いた移動ロボットの研究, 日本ロボット学会学術講演会, 247-248, 2001

付 録

ここでは、中田らの論文の中で用いられている情報伝達効率の定義とその計算法を示す[注8]。

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 の生起後、後動者が後発の行動 B_j を生起したとき、 (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なされたか否かを、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 式の情報理論の計算手法で定量化できる。ただし、 f_{ij} は、ダイアド (A_i, B_j) が起こった回数であり、 $0 \log_2 0 = 0$ とする。

$$f_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}, \quad f_j = \sum_{i=1}^m f_{ij} \quad (\text{A.1})$$

$$N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (\text{A.2})$$

$$H_A = \log_2 N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m f_i \log_2 f_i \quad (\text{A.3})$$

$$H_B = \log_2 N - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n f_j \log_2 f_j \quad (\text{A.4})$$

$$H_{AB} = \log_2 N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \log_2 f_{ij} \quad (\text{A.5})$$

$$I = H_A + H_B - H_{AB} \quad (\text{A.6})$$

$$D = \frac{I}{H_A}, \quad C = \frac{I}{H_B} \quad (\text{A.7})$$

なお、動物行動学の用語では、 H_A を先動者の行動不確かさ、 H_B を後動者の行動不確かさ、 H_{AB} を両者間のダイアドの行動不確かさ、 I を両者間の行動インタラクションで伝達した情報量[bit]と呼ぶ。また D は先動者の行動の違いが後動者の行動選択に反映される度合いを示すので、“後動者の識別率(Distinguishability)”と呼ばれ、 C は後動者の行動選択を先動者が制御できる度合いを示すので、“後動者の可制御率(Controllability)”と呼ばれる量である。この D と C を共に情報伝達効率と呼ぶ。先動者の行動が後動者の行動選択に影響しない場合には、 D と 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には、 D と C はほぼ1と計算される。