

人間とペットロボットの相互適応 —AIBOをしつける—

山田 誠二[†] 山口 智浩^{††}

ペットロボットやお掃除ロボットが実際に一般家庭に広まる時代をむかえ、今後人間とロボットとが関わりをもつ状況が増えることが予想される。そのように、人間とロボットがインタラクションをもつとき、人間は不可避免的にロボットに適応し、ロボットも人間に対して適応することが期待される。本研究では、人間がペットロボットをしつけて、行動をコントロールできるようになる枠組みを提案し、そこにおける人間とロボットの相互適応のためのインタラクション設計について議論する。

Mutual Adaptation between a Human and a Pet Robot —Training AIBO—

SEIJI YAMADA[†] and TOMOHIRO YAMAGUCHI^{††}

This paper describes a framework for mutual adaptation between a human and a pet robot, and design of the human-agent interaction. In our work, a pet robot learns which behavior it should execute when some stimuli are given and a human user learns how to give commands to the robot through its various sensors. A pet robot utilizes a computational classical conditioning model for learning to interpret human commands. Finally we discuss heuristics to accelerate this mutual adaptation.

1. はじめに

SONY の AIBO に代表されるように、最近ペットロボットやホームロボットが一般家庭に普及しつつある。これらのロボットの目的は、エンタテインメント、癒し、部屋のお掃除など多岐にわたる。また、近年人や動物と同じような外見をもち、ユーザに対する支援や情報提示などのインタラクションをもつソフトウェアエージェントである擬人化エージェント (life-like agent) の研究が活発にされている⁴⁾。これらのロボットやソフトウェアエージェントと人間がインタラクションをもつときに重要なことは、人間はペットロボットをあたかも生物のように考えてモデル化して適応しようとし、ロボットやエージェント側も人間に対し適応することが求められることである。なお、人間とエージェントのインタラクションは、HAI(Human-Agent Interaction) と呼ばれる¹³⁾。

このような人間とロボット(エージェント)が、イ

ンタラクションを持つことにより、癒しや楽しみなどの対話的タスクを実現する状況において、相互に相手に適応する枠組みは、図 1 のように表せる。ここで、 I_{EH} , I_{EA} は、環境から人間、ロボットへの情報の流れ、 I_{HE} , I_{AE} は、人間、エージェントから環境への情報の流れである。また、 L_E^H , L_E^A は、人間による環境への適応、エージェントによる環境への適応である。このような人間とエージェントの環境への適応を促進するため、人間からエージェント、エージェントから人間への情報の流れをそれぞれ I_{HA} , I_{AH} で表し、これを上手く設計することを、適応のための HAI 設計と呼ぶ¹²⁾。なお、 I_{HA} , I_{AH} は、タスク達成には直接関与しないインタラクションである。

我々は、このような状況を人間とロボット(エージェント)との相互適応と呼び、人間と擬人化エージェントがお互いに相手の表情から内部状態を推定できるように学習していく、マインドマッピングの相互適応の枠組みを提案した。そして、相互読心ゲームという、人間とエージェントによる一種のゲームによるインタラクションを設計し、それを通じて相互適応を促進する研究を行ってきた⁹⁾⁸⁾。本研究では、そのような適応のための HAI 設計の考え方にに基づき、人間とペッ

[†] 国立情報学研究所 seiji@nii.ac.jp
National Institute of Informatics

^{††} 奈良工業高等専門学校 情報工学科
Nara National College of Technology

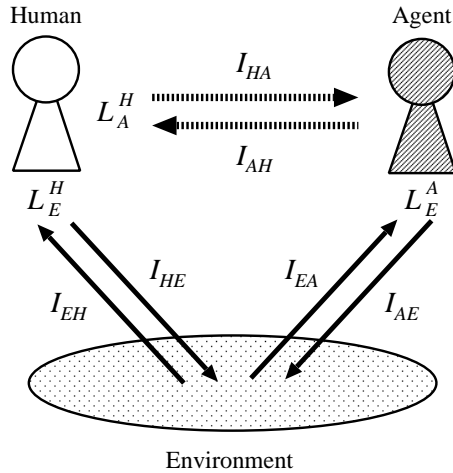


図 1 対話的タスクにおける適応のための HAI 設計

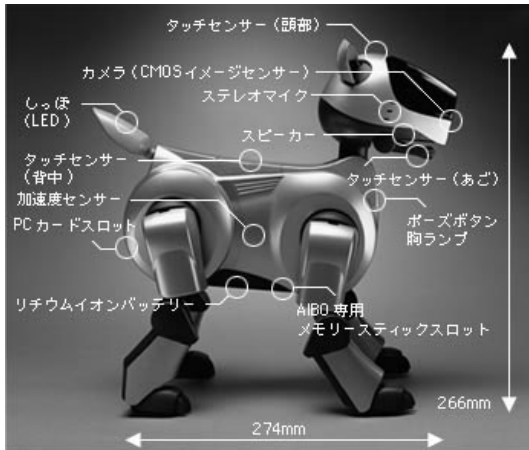


図 2 AIBO(ERS-210A) の各部名称¹⁾

トロボット間の相互適応の枠組みを提案し、その相互適応を促進するような HAI 設計を議論する。

2. ペットロボット：AIBO

ここでは、ペットロボット AIBO の機能を簡単に説明する。AIBO は、SONY が製作販売している犬型のペットロボットである¹⁾。本研究では、AIBO シリーズの中でも OPEN-R プログラミング環境の公開されている機種 ERS-210A を用いる。図 2 に AIBO(ERS-210A) の外観と各部の名称を示す。なお、動作時間は、約 1.5 時間、重量は約 1.5kg である。その他の AIBO(ERS-210A) のスペックを表 1 に示す。

AIBO のプログラミングは、公開されているオブジェクト指向開発環境 OPEN-R SDK⁶⁾ により、エージェントと呼ばれるモジュール間通信を基にして、AIBO

表 1 AIBO のスペック

| 可動部 | 計 20 自由度 | センサ |
|-----|-------------|-------------------|
| 口 | 1 自由度 | 10 万画素 CMOS カメラ |
| 頭 | 3 自由度 | ステレオマイクホン |
| 脚部 | 3 自由度 × 4 脚 | 温度センサ |
| 耳 | 1 自由度 × 2 | 赤外線方式測距センサ |
| 尻尾 | 2 自由度 | 加速度センサ |
| | | 感圧センサ |
| | | スイッチ [頭部, 背中, 脚部] |
| | | 振動センサ |

の様々な制御が可能である。具体的には、C++ のソースを gcc でコンパイルすることにより、Linux, Windows 環境でプログラム開発が可能である。なお、本研究では、プログラミング開発の効率を配慮し、ホスト PC 上で Ruby を用いてプログラミングを行い、TCP/IP で AIBO 上の OPEN-R と通信して、AIBO を操作する方法を採用する。

3. 対話的タスク：人間による AIBO の簡単な操作

ここでの人間と AIBO が一緒に行う対話的タスクは、人間による AIBO の操作である。人間にとって AIBO と遊んでいるうちに、だんだんと簡単な指令で AIBO を操作できるようになることは楽しいことであり、被験者実験の動機付けとして有効である。また、本当の犬をしつけることとのアナロジーもあり、犬のしつけにおいて人間がとる行動の偏りを利用して、適応のための HAI 設計を上手く実現することが期待される。また、AIBO にとっても人間の指示に的確に反応するようになることは、ユーザカスタマイズの意味で重要な人間への適応となる。

なお、現時点で考えている、具体的な AIBO の操作は「AIBO に指令を出して、ある目標地点まで移動して、そこで何らかの芸をする」という単純なものである。しかし、この対話的タスクをゼロから教示・学習して、実現することはそうそう簡単ではないだろう。

それから、人間が AIBO に与える指令は「非接触な指令」という制約を設ける。後述するように、AIBO に組み込まれている無条件刺激を接触するものに限定することで、人間は、あらかじめ組み込まれた無条件刺激で AIBO をコントロールすることはできなくなり、条件付けなどの何らかの学習を実現させようとする動機付けが生じる。

4. エージェントの適応：ペットロボットの行動学習

ペットロボットは、人間から与えられたコマンド (刺



図3 3つのクリッカー

激)に対して、何らかの意味のある行動をとるように学習する必要がある。これは、本物の犬においては、一種の訓練に対応する。

4.1 犬のしつけ方

犬のトレーニング方法、しつけ方には、いくつかの方法があるが、比較的手続きの整理されたものとして、クリッカートレーニング¹⁰⁾¹¹⁾がある。このトレーニング方法は、握ると「カチッ」とクリック音を発するクリッカー(図3参照)と呼ばれる道具を用いて、まず犬に、クリック音と聞かせると同時に餌を同時に与えることを何度も繰り返し、クリック音と報酬を関連づけさせる。そして、後は、餌を与えなくともクリック音を報酬として与えることで、徐々にオペラント条件付け(強化したい行動に報酬を与えることによる強化学習)、あるいは、古典的条件付けを行っていき、簡単な動きから複雑な動きをしつけていくトレーニング方法である。このクリッカーにより、犬だけでなく、馬や猫も訓練可能である。

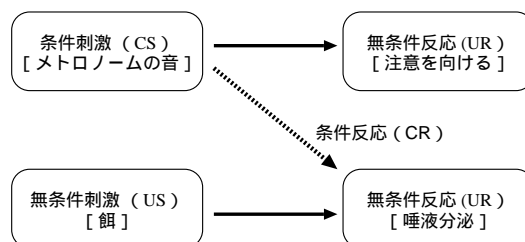
このクリッカートレーニングによる学習過程を、オペラント条件付け、つまり強化学習とみると、クリッカートレーニングは、反応形成(shaping)を実際に犬で実現していると考えられている。反応形成とは、オペラント条件付けにおいて、簡単なタスクから徐々に難しいタスクを学習させていくというサブゴールを与えながらの学習誘導方法で、ロボットの学習にも応用されている³⁾⁷⁾。

このように、条件付けにより犬をしつけることは、自然に行われており、次節で詳述するように、本研究における犬型ペットロボット AIBO の訓練において、ロボットの学習アルゴリズムとして古典的条件付けを用いる。

4.2 古典的条件付け

本研究で我々がペットロボットの学習アルゴリズムとして、古典的条件付け(classical conditioning)を用いる。古典的条件付けを採用した理由は、以下のものである。

- 本物の犬の学習に類似した学習が実現できる。よって、人間も本物の犬に接するように、ペット



—————▶ 生得的な無条件反応の伝達

.....▶ 学習された条件反応の伝達

図4 古典的条件付け

ロボットに接することによる学習の高速化が期待できる。

- 被験者実験を行うため、高速に学習する必要がある。オペラント条件付けでは、学習初期に多くの試行錯誤が必要であり、十分高速に学習できない可能性が高い(ただし、反応形成により改善可能。)
- 手続きが単純なため、実験結果を解析しやすい。古典的条件付けは、パブロフの犬の実験で有名であるが、その枠組みは、図4のようになっている。図中で、各刺激、反応の下の□で囲ったものが、パブロフの実験における具体的な設定である。

この枠組みにおいて、エージェント(犬)は、最初条件刺激(CS)「メトロノームの音」を与えられても、その無条件反応(UR)である「注意を向ける」しか行わない。この初期段階では、「メトロノームの音」と「唾液分泌」は全く関連づけられていないので、「メトロノームの音」を聞いても、「唾液分泌」はされない。しかし、条件刺激「メトロノームの音」と無条件刺激(US)「餌」を同時にエージェントに与え、無条件刺激「餌」に対応する無条件反応(UR)「唾液分泌」を実行させることを何度も繰り返すと、本来関連のない条件刺激「メトロノームの音」と無条件刺激「唾液分泌」が関連づけられ、最後には、無条件刺激「餌」が与えられなくとも、条件刺激「メトロノームの音」が与えられただけで、学習により関連づけられた反応「唾液分泌」が行われるようになる。このように、条件刺激に関連づけられた反応を条件反応という。

4.3 条件づけの計算モデル

このような古典的条件付けを実現する計算モデルは、Sutton&Barto, Temporal Difference などいくつも提案されている²⁾が、いずれのモデルも、古典的条件付けのさまざまな特性を説明するためには、一長一短あることが報告されている²⁾。本研究で我々は、比較的特性がよくシンプルなモデルである Klopff のモ

デル⁵⁾を採用する。しかし、古典的条件付けの厳密な再現が本研究の目的ではないため、モデルの選択にはこだわらない。

以下に、Klopf のモデルを示す。ここで、時刻 t の UR, CR は、 $y(t)$ の値により決まる。式 (1) で、 x_i は、個々の CS を表し、 w_i はそれぞれの CS に対する重みである。 $y(t)$ は、式 (1) にあるように、全ての CS の重み付総和で決定される。また、重み w_i は、式 (2) のように更新される。

式 (3) により、重み w_i を更新する $\Delta w_i(t)$ が計算される。この式は、入力 Δx_i と出力 $\Delta y(t)$ が最近 τ 時間において同時に変化したときに、重みが更新されるようになっている。なお、 c_j は、学習率である。

$$y(t) = \sum_{i=1}^n w_i(t)x_i(t) \quad (1)$$

$$w_i(t) = w_i(t-1) + \Delta w_i(t) \quad (2)$$

$$\Delta w_i(t) = \Delta y(t) \sum_{j=1}^{\tau} c_j |w_i(t-j)| \Delta x_i(t-j) \quad (3)$$

この Klopf のモデルを用いて、AIBO は古典的条件付けにより、人間の指示に対する適切な行動を学習し、人間に適応していく。

次に無条件刺激/反応、条件刺激/反応としてどのようなものを用意するかを考える。

4.4 無条件刺激と無条件反応

ここでは、無条件刺激 US とそれに対する無条件反応 UR として、以下のものを考えている。これらは、「ある目標地点まで移動して、そこで何らかの芸をする」というタスク達成のために、十分な行動のバリエーションを持っていると考えられる。なお、適応のための HAI 設計に必要な無条件刺激と反応については、後で議論する。

- US1: おしりをたたく → UR1: 前進する
- US2: 腰を押さえる → UR2: お座りする
- US3: 片方の前足を持ち上げる → UR3: その前足が上がる
- US4: 頭を撫でる → UR4: 嬉しそうな音を出す

4.5 条件刺激と条件反応

ロボットがどの刺激を条件刺激として、古典的条件付けによる学習を行うかは、特定しない。この選択は、前述の計算モデルの重みの更新式により、選択されるものである。また、条件反応は、無条件反応から選択される。

つまり本研究では、潜在的には、AIBO のもつ全てのセンサから得られる値を先の計算モデルの x とする。

5. 人間の適応

人間は、タスク達成のために、ペットロボットに対し、以下のようなさまざまな選択や探索を行い、ロボットに適応する必要がある。

- 古典的条件付けを実行しなければならない。
- 何が無条件刺激なのかを調べる。
- 何が条件刺激なのかを調べる。
- どの条件刺激を与えるかの選択。
- どの無条件反応と関連づけるかの選択。

人間とロボットの相互適応が上手くいくには、人間に特定の知識がなくても、ペットロボットと触れ合うことにより、自然に効率的に上記の適応を実現していくことが望まれる。そのためには、人間とロボット間にどのようなインタラクションを設計すればよいかを考えるのが、本研究の目的である。

6. 条件付けの例

ここで、AIBO の条件付けの具体的な例を示しておく。この例では、無条件刺激として「おしりをたたく」、無条件反応として「前進する」、そして、条件刺激として「ボールを見せる」という組み合わせで、古典的条件付けを行ったと想定している。

図 5 が、おしりをたたいて無条件刺激を与えている様子である。そして、その刺激の結果、対応する無条件反応である「前進する」という行動が実行されたのが、図 6 である。

図 7 で、条件刺激である「ボールを見せる」を与えているが、この時点では、無条件反応と関連づけられていないので、AIBO は反応しない。そして、ボールを見せながら、おしりをたたくという、図 8 のような条件付けを何度も繰り返すことにより、最終的には、図 7 の「ボールを見せる」だけで、非接触で、AIBO を「前進」させることが可能になる。このような条件付けを組み合わせることで、「AIBO に指令を出して、ある目標地点まで移動して、そこで何らかの芸をする」というタスクが実現されると考えている。

7. 適応のための HAI 設計

人間とペットロボットの相互適応において、人間もロボットも適応にはかなりのコストがかかる。現実的な時間内で、相互適応を達成するためには、人間とロボット間に自然かつ有効なインタラクションを設計して、それにより相互適応を促進する必要がある。本節では、そのような適応のための HAI 設計について議論する。



図 5 AIBO の無条件刺激



図 6 AIBO の無条件反応



図 7 AIBO の条件刺激



図 8 AIBO の古典的条件付け

7.1 人間の適応を促進するインタラクション

§5 で述べたように、このタスクにおいて、人間はさまざまな適応を実行しなければならない。その適応を促進するために、1 における I_{AH} として、人間とペットロボット間でどのような情報のやりとりを行えばよいかを考える。

- 擬犬化の利用：AIBO は犬の外見を持っており、人間が AIBO に接するとき、不可避免的にそれを犬としてモデル化し、適応しようとする。これを“擬犬化”と呼ぶ。この擬犬化を利用し、人間の適応を促進する HAI として以下のもの考えている。

- AIBO のセンサをすべて使うのではなく、犬のセンサに類似したセンサーのみを選択的に利用する（人間による無条件刺激、条件刺激の探索を加速。）
- 無条件刺激と無条件反応のペアを、本物の犬に類似したものに作る（人間による無条件刺激と無条件反応の探索を加速。）

- 有効なセンサへの自然な（無条件）反応：選択的に利用されるセンサの値の変化に対して、頭をふる、吠えるなどの自然な反応を実装してやる。例えば、ボールを顔の前で動かすと、それを追従するように首を微妙にふるなど。これにより、人間によるペットロボットの有効なセンサの特定を加速化できる。

- 多様な遊び行動系列の自律的実行：遊び行動とは、人間からの指示なしでロボットが自律的に実行する行動とする。人間による刺激がないときにも、遊び行動を常に行い、その中で US と UR のペアを実行し、人間に見せることで、ペットロボットに組み込まれた US と UR のペアを人間が発見することを促進することが可能になる。

7.2 ロボットの適応を促進するインタラクション
次に、図 1 における I_{HA} 、つまりペットロボット側の適応を促進する HAI について考える。本研究の場合、ペットロボットが行う古典的条件付けに必要な人間からロボットへの刺激以外の情報である I_{HA} を考える。基本的には、人間に AIBO のしつけ方に関する制約を与えたくないで、AIBO 側に人間からの I_{HA} を誘発するようなメカニズムを組み込む必要があるが、現状では明確なアイデアがないので、今後の課題としたい。

8. まとめと今後

本稿では、人間とペットロボットが相互に適応して、人間が簡単な指令をロボットを操作できるようになる相互適応の枠組みを提案した。そして、その枠組みにおいて、相互適応を促進するための、人間とロボット間のインタラクション設計について考察した。ペットロボットは、古典的条件付けにより、本当の犬に近い形で、人間の命令を学習していく。また、人間は、犬の

しつけのアナロジーを使って、ペットロボットに適応していくことができる。

今後は、ここで提案した枠組みを AIBO 上に実装し、被験者実験により、相互適応を促進するインタラクション設計の有効性を実験的に検証する予定である。

参 考 文 献

- 1) AIBO Official Site.
<http://www.jp.aibo.com/>.
 - 2) C. Balkenius and J. Morn. Computational models of classical conditioning: a comparative study. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, 1998.
 - 3) M. Dorigo and M. Colombetti. *Robot Shaping: An Experiment in Behavior Engineering*. MIT Press/Bradford Books, 1998.
 - 4) 石塚満. マルチモーダル擬人化エージェントシステム. システム/制御/情報, Vol. 44, No. 3, pp. 128–135, 2000.
 - 5) A. H. Klopff. A neuronal model of classical conditioning. *Psychobiology*, Vol. 16, No. 2, pp. 85–123, 1988.
 - 6) OPEN-R プログラミング SIG 著. C++で AIBO を自在に動かす – OPEN-R プログラミング入門 –. インプレス, 2002.
 - 7) T. S. Peterson, N. E. Owens, and J. L. Carroll. Towards automatic shaping in robot navigation. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001.
 - 8) S. Yamada and T. Yamaguchi. Mutual adaptation to mind mapping in human-agent interaction. In *IEEE International Workshop on Robot-Human Interaction*, pp. 105–110, 2002.
 - 9) S. Yamada and T. Yamaguchi. Mutual learning of mind reading between a human and a life-like agent. In *The Fifth Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents*, pp. 138–150, 2002.
 - 10) クリッカートレーニング Web サイト.
<http://www.karenpryor.com/>.
 - 11) 犬のしつけをまじめに考える Web サイト.
<http://www.dogparty.net/>.
 - 12) 山田誠二, 角所考. 適応としての HAI. 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 6, 2002.
 - 13) 山田誠二, 角所考, 新田克己. 特集: HAI ヒューマンエージェントインタラクション. 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 6, 2002.
-