

特集 「HAI: ヒューマンエージェントインタラクションの最先端」

適応のためのインタラクション設計

Interaction Design for Adaptation

岡 夏樹
Natsuki Oka

京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
Department of Information Science, Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology.
nat@kit.ac.jp, <http://www-vox.dj.kit.ac.jp/oka/>

山田 誠二
Seiji Yamada

国立情報学研究所
National Institute of Informatics.
seiji@nii.ac.jp, <http://ymd.ex.nii.ac.jp/lab/seiji/>

Keywords: adaptation, agent, robot, HAI, mother-child interaction.

1. はじめに

人間とエージェント間のインタラクションHAI (Human-Agent Interaction) では、ユーザへのカスタマイズや、インタラクションの効率向上のために、エージェントが人間に適応することが望ましい。一方、人間は不可避免地にエージェントに適応してしまう存在である。つまり、エージェントとのインタラクションにより、人間はエージェントをモデル化し、それに対する教示の方法を適応的に修正していく。我々は、このように両者が相互適応 (mutual adaptation) [Komatsu 05, 山田 06b] する系の設計を、HAIにおける最重要課題の一つと考え、本稿で議論する。

この相互適応系において、エージェントは教師あり学習^{*1}により分類学習や行動学習を行うが、その状況で教師になるのは、まさにユーザである人間である。よって、HAIにおけるエージェントの学習では、実際の人間、それもエージェントの行動、学習についての事前知識をもっていない一般の人間が教師となるような枠組みで、機械学習を考える必要がある。

さらに、両者の適応を最適に引き出すためには、エージェントの学習アルゴリズムの設計だけに留まらず、人間とエージェント間のインタラクションのあり方全体の設計を考えることが重要である。人間にとって負荷がかからない範囲で人間の適応を最大化することで、この相互適応系はインタラクションを継続し、互いが相手によく適応し協調タスクを達成できる。

このようなインタラクションの設計は、人間とエージェントの適応を促進することを目標とするため、我々は、その研究領域、インタラクション設計からのアプローチを、IDEA (Interaction Design for Adaptation) と呼

び、これまで議論を展開してきた [山田 02, 山田 03, 山田 05]。IDEA について、エージェントの行動モデルを中心としたよりフォーマルな議論は、解説 [山田 05] に譲るとし、本稿では、まず2章において、重要な点でHAIと共通する性質をもつ我々が考える、母子間インタラクションに関する知見を紹介し、続いて3章で、それらの知見を参考にしながら相互適応系のインタラクション設計の指針を簡潔にまとめる。

2. 母子間インタラクションからの知見

IDEA では、適応能力の非常に高い人間と低いエージェントの間のインタラクションを設計する。そのような認知能力に相当の差をもつ二者が相互適応するインタラクションとしては、母子間インタラクションが典型的であるが、発達心理学や認知科学の分野の研究の進展により、興味深い知見が蓄積されてきている。本章では、インタラクション設計のヒントとして、近年の母子間コミュニケーション研究からの知見を紹介する。

2.1 時間的随伴性の検出

随伴性とは、自分の振舞いと、それに伴う外的世界 (人も含む) の変化とのつながりのことである。Trevarthenらは、養育者のライブ映像と録画映像に対する乳児の反応を比較する手法により、生後2か月未満の乳児でも、自分の行動に対する相手の行動の時間的随伴性に対して敏感であることを示した [Trevarthen 93]。

また、Watsonらにより、乳児と養育者との間でしばしば観察されるゲームのようなやり取り (一連の行動パターンの繰返し) において、乳児は自分の行動と養育者の行動の間に時間的随伴性を検出すると、微笑やクーイングで喜びを表現し、それを観察した養育者はゲームを演じ続けることが報告されている [Watson 72]。

正高 [正高 93] は、乳児が乳首を吸う行動パターンと、母親が優しく乳児を揺さぶるパターンが互いに随伴して

*1 本稿では、強化学習や模倣学習も含めて広い意味で教師が存在する学習を“教師あり学習”と呼ぶ。

生起することを示し、さらに、母親が揺さぶりを与えないようにすると、刺激をもらうタイミングより少し遅れ気味に乳児が声を出すことを報告した。また、正高は、乳児が言語的音声を出したときと非言語的音声を出したときとを比較すると、養育者は言語的音声を出した乳児のほうを“かわいい”と感じ、このような乳児に対して随伴的応答を高い頻度で与えるため、結果として乳児の言語的発声が強化されることを示した。

以上のような随伴性の検出能力と、それと対になった、母親の行動特性とは、乳児が学習に必要なデータを社会的インタラクションを通じて得るための、極めて巧みな仕組みの一例となっており、インタラクション設計にも応用可能であろう。

2.2 発達の足場の提供

乳幼児と養育者の間のコミュニケーション過程においては、乳幼児が養育者に対して学習・適応していくだけでなく、養育者の側も、知らず知らずに乳幼児の能力に応じた振舞いをし、発達の足場 (scaffolds) を提供することが知られている。HAIにおいても、人がエージェントに、思わず適応の足場を提供してしまうようにインタラクションを設計することができれば、エージェントの適応が容易になる。

例えば、大人はよく乳幼児のまねをするが、その子どもがやるよりも発達的に少し進んだやり方でまねをすることが多い (子どもの誤りや不備を訂正した模倣 (拡充模倣) もしばしば見られる)。Vygotsky は、援助なしで子どもが達成できることと、大人の援助があれば達成できることとの差の領域の設定が学習において重要であるとし、この領域を“発達の最近接領域” (zone of proximal development) と呼んだ [Vygotsky 78]。

また、養育者は乳児が見たり触ったりしている対象物に焦点を合わせた言葉をかける (supported joint engagement) ことが多い。これは言葉の学習の際に考慮すべき情報の範囲を絞り込むことに大いに役立っていると考えられ、共同注意をまだ自発的に成立させることができない乳幼児が言葉を学習するための有効な支援になっていると思われる。また、養育者が音や動きで対象物を目立たせることも、よく行われる。

一方、乳幼児に向けられた発話 (infant-directed speech) の特徴として、声の調子が高くなる、韻律の変化が豊か、大部分が短く単純で繰返しが多いなどが知られているが、これは人の声への選択的注意を助け、話者の情動の識別や、重要な部分への注目を可能にし、言葉の意味の獲得を容易にしていると考えられる。発話だけでなく、行動も乳幼児に向けられる場合には、誇張、引伸ばし、繰返しが多いなどの特徴をもつことが知られており、ハビチュエーションの防止、インタラクションへの巻き込みなどの点で効果があると思われる。

大人は乳幼児の行為が (意図的でなくても) 意図的で

あると解釈する、ないしは意図を明確化して認識する傾向があり、それが乳幼児の発達を促している主張されることがある。この主張は検証されているわけではないが、インタラクション設計にとって有益なヒントを提供すると考えられる。これと関連して、下條 [下條 88] は、次のように、“〇〇として扱う”ことの効果を指摘している。親は子を、理解する存在として、理解できる存在として、あるいは、語りかける相手として、語りかけてくる相手として扱うが、これは、初めのうちは誤解であるといえる。しかし、このような誤解によってさらに強いコミュニケーションへと動機づけられ、結果的にこれが発達を促し誤解でなくなる。

Bruner は、もののやり取り遊びにおいて、初めは母親主導であったものが、しだいに子どもが主導権をとれるようになってくる様子を観察した [Bruner 83]。インタラクション設計においても、このような主導権の移行を考慮することは有効であろう。

2.3 ブートストラッピング

認知発達の特徴の一つは、以下に例を示すように、新たに得られた能力を使って次の段階の学習を進めるというブートストラッピング (bootstrapping) プロセスになっていることであり、これはインタラクション設計において大いに参考になるだろう。

生後5週目までの新生児においては、母親の声が微笑を誘発するが、6週目を過ぎると、人の顔を見せたほうが微笑を誘発しやすくなる。また、Morton らによると [Morton 91]、生まれた直後の新生児には、顔様の図形が周辺視野に動いていったときにそれを追視する傾向があり、これは大脳皮質によらない本能的な反射の働き (CONSPEC) によるとしている。一方、2か月児になると顔様の図形が静止していても注視するようになり、これは大脳皮質における経験に基づく学習 (CONLEARN) の結果だとしている。

ここで注目すべきは、CONSPEC の働きにより、CONLEARN での学習に必要な訓練例 (人の顔) が視野の中心に提供されるという巧みなしくみになっていることである。また、微笑を誘発する機構の切換え (声刺激に反応する機構から顔刺激に反応する機構へ) により、母親とのインタラクションの維持に有効であると思われる微笑の生成を、発達段階に応じて的確に行うことができるようになっている点も注目に値する。

2.4 共同注意

共同注意 (joint attention) とは、“自己-他者-もの”という3項関係の中で、ある対象への注意を他者との間で共有する活動である。最初は、母親が子どもの視線を追うことにより共同注意が成立するが、しだいに、母親が注視しているところに子どもが注意を向けることができるようになる。共同注意が成立することにより、重要

な対象に焦点を当てた効率的な学習が可能になるため、共同注意の成立は、その後の学習の基盤として重要である。

共同注意を実現するには、他者の注意方向を視線・顔の向き・指さしなどの社会的手がかり (social cue) から読み取り、他者が注意を向けている対象を同定することが必要である。赤ちゃんは生後6か月から8か月頃になると、相手の指さしに反応してさされた方向を見るようになる。12か月までに母親が視野内の目標を見た場合の視線追従が可能になり、18か月までに視野外の目標への視線追従が可能になる。また、12か月前後には、自ら指さして、離れたところのものを相手に示すことが始まる。子どもの指さしは母親の反応 (特に指さした対象のラベリング) を引き出すことが知られている。

麻生は、アイコンタクトには、(暗黙であるにせよ) 互いに見て目が合っていることの相互理解が伴い、共同注意においても、指さしに対して視線でそれを追う、または、声で応えることにより、共同注意が成立していることの相互理解が伴うことを指摘している [麻生 02]。同様に、相づちにより、AがBの話の聞いていることの相互理解が生まれると考えられるが、このような相互理解を成立させることは、インタラクション設計におけるサブゴールの一つであると考えられる。

2.5 意図理解に基づく学習

Meltzoff は、生後18か月の幼児が他者の意図を理解して模倣する能力があることを明らかにした [Meltzoff 95]。Meltzoff は、幼児らが見たことがないような道具 (例えば、立方体の積木二つを棒でつないだダンベル形のもの) を用意し、大人がその道具を意図的に操作しようとして何度も失敗する (ダンベルの例では、立方体を引っ張ってはさうとするがはずせない) ところを幼児に見せた。すると、その様子を見た幼児は、大人が意図どおりに操作することができたところを見せた幼児と同程度の高い割合で、大人が意図した操作を完遂した (ダンベルの例では、立方体を引っ張ってはさうした)。

また、Tomasello らは、24か月児が、大人の意図を特定してそれを言葉の意味の学習に利用できることを示した [Tomasello 94]。この実験では、まず、大人が24か月児に新奇な動詞を使って新奇な動作を行おうとしていることを宣言し (例えば、「今から僕がビッグバードに plunk するよ!」)、次に「ほら!」と言いながら意図した動作を行う。さらに「おっと!」と言いながら偶発的な動作を行う。すると、子どもは、動詞を (偶発的な動作でなく) 大人が意図した動作に結びつけて覚えた。

以上のような意図理解やそれに基づく学習を HAI において実現できれば、家事を見まねで覚えるが、誤って皿を落としてしまった場合はまねをしないロボットや、ドライバが意図的にルートを逸れたかどうかを判断して学習するカーナビゲーションシステムなどに応用できるだろう [櫻井 04]。

3. インタラクション設計の対象と設計指針

本章では前章の知見を踏まえ、相互適応系のインタラクション設計の指針を簡潔にまとめる。IDEA におけるインタラクション設計、あるいは、HAI 設計では、以下の各項目の設計を行う。これらからわかるように、インタラクション設計の直接的対象は、人間以外のエージェントであり、人間は設計対象としない。つまり、人間には制約を与えない人間中心 (human-centered) な設計となっている。以下に、それぞれの設計の内容と具体的な設計指針をあげる。

3.1 エージェントの行動の設計

HAI では、人間がエージェントの行動を観察して、エージェントをモデル化する。よって、人間の適応を促進するためには、人間がモデル化しやすいエージェントの行動を設計する必要がある。

- 決定論的な行動：確率的な行動は、人間にはモデル化しにくいので、エージェントの行動は決定論的であることが望ましい。
- 親和性の高い行動：人間は、エージェントの外見をもとに行動モデルをつくる傾向が強い [Yamada 04]。よって、外見から想定される行動にできるだけ矛盾しない、外見との親和性の高い行動を設計することが重要である。
- 人間の動きを連想しやすい動作：擬人化された外見をもたない移動ロボットにおいても、人間の動きを連想しやすいモーションはマインド伝達に有効であることが、小林らにより報告されている [小林 06]。
- 随伴性の高い行動：人間の行動に対して随伴性が高い行動をエージェントがとることができれば、それは人間からエージェントへの働きかけを促進し、インタラクションデータに基づくエージェントの適応を進めることにつながる。

3.2 エージェントの学習の設計

エージェントは人間の振舞い方を学習し、適応する必要がある。この場合、本当の人間が教師になるため、通常の教師あり機械学習とは異なり、以下のような条件を満たすことが望ましい。

- 少ない訓練例：人間が教師なので、一般の機械学習のように、訓練例が豊富にあることは仮定できない。学習結果の精度よりも、できるだけ少ない訓練例で学習できるアルゴリズムが必要である。
- 学習の透明性：人間に学習過程が理解しやすいようなエージェントの学習アルゴリズムが必要である。徐々にエージェントが学習していくプロセスを人間が把握できることで、インタラクションを継続できる [Thomaz 05]。

- 人間からの評価の伝達：エージェントが間違っただけの行動をしたときには、すぐさま誤っていることを伝える、また、今まさに選択しようとしている行動に対する評価を伝えることが有効である [Thomaz 05].

3.3 エージェントの外見の設計

人間が行うエージェントのモデル化は、エージェントの外見に強く影響される。よって、人間によるエージェントのモデル化、つまり人間の適応を促進、制御するために、エージェントの外見の設計は重要である。

- 擬人化による親和性：日常生活において、クッションに話しかける人は少ないが、ぬいぐるみに話しかける人は珍しくないことからわかるように、人間は、物質としては同じであっても、擬人化された対象とはインタラクションしやすい [Ono 00]. 人間が“親しみやすい”、“興味をもつ”外見を設計することは、人間のもつ第一印象、つまり最初のインタラクションにとって重要である。また、インタラクションを通じたエージェント側の適応が進むためにも、インタラクションしたくなる外見は重要である [Bickmore 01].

また、人間に似た外見による擬人化のみならず、犬に似た外見による擬犬化により、人間の適応を促進した研究 [Yamada 04] もある。この研究では、古典的条件付けを行って学習する犬型ペットロボット AIBO を人間がしつけるときに、犬にとって自然な無条件刺激を設計することで、しつけを促進している (図 1)。

- エージェントの外見と機能の対応：人間は、エージェントの外見からエージェントの機能モデルを獲得する。そして、その機能モデルは、実際のエージェントの機能とギャップをもつ場合が多いが、このギャップは、適応ギャップ [山田 06b] と呼ばれる。エージェントの外見の設計においては、そのエージェントがもつ機能との対応を考慮することが必要である。具体的には、エージェントがどのようなセンサを使って、どのような情報をセンシングしているか、また、どのような動作ができるかが明示的にわかる外見のデザインがよい。例えば、目に模したカメラ、

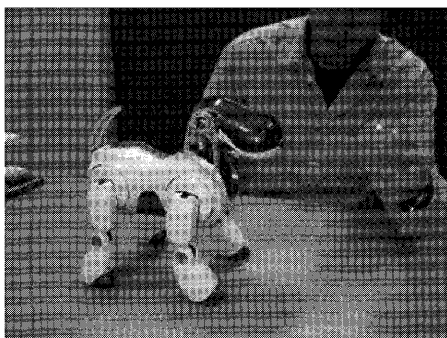


図 1 AIBO をしつける

耳に似たマイク、そして車輪が装備されている外見から、視覚、聴覚、移動能力を備えていることが推測される。

3.4 エージェントが表出する情報の設計

外見以外にも、エージェントから人間に明示的に表出する情報により、人間の適応を促進することができる。

- 内部状態の表出：エージェントがどのような情報を受け付け、何を理解しているか、何に注目しているか、また、どのような処理をしている最中か、などの推定しにくい内部状態は、エージェントの表情、視線、動作、単純な信号などの直感的に把握できる自然な表現で、タイミング良く表出されることが望ましい。
- 表出する情報表現の適切さ：エージェントが内部状態を表出する場合に、どのような表現でその情報を表出すべきかが問題となる。基本的には、表出する情報とエージェントの外見（あるいは、それをもとに構成されるモデル）の関係により適切な表現が決まるべきである [Yamada 06a].

3.5 インタラクション環境の設計

人とエージェントが社会的インタラクションを通して相互に適切に適応するためには、両者が存在する環境の設計の妥当性を考慮する必要がある。我々は、人とエージェントが存在する環境が、双方にとって、生態学的に妥当である（生きていくうえで役に立つ能力を使えるような設定になっている）ことが望ましいと考える。次の例で具体的に考えてみよう。

“人-エージェント-環境”の3項間インタラクションを考える。エージェントとして物理的なロボットを用いる場合と、図 2 に示すように、仮想的なエージェントと仮想環境との間に（仮想的な）物理的インタラクションをもたせ、その仮想環境を共有した人との間に社会的インタラクションをもたせる場合 [櫻井 04] とを比較してみよう。

表 1 に示すように、実世界は人にとっては生態学的に妥当な環境であるが、エージェントにとっては、パターン認識技術や制御技術の現状からすると得意な環境では

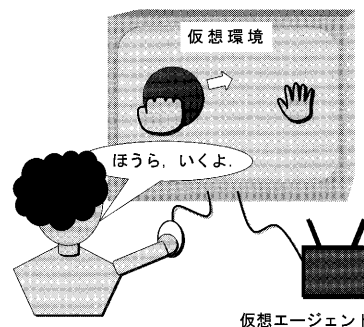


図 2 仮想環境を用いた3項間インタラクション

表1 インタラクシオン環境の生態学的妥当性の比較

	実世界	仮想世界
人間にとっての生態学的妥当性	◎	○
エージェントにとっての生態学的妥当性	×	○

なく^{*2}, これを意識したインタラクシオン設計が必要であると考えられる。これに対して, 仮想世界は, 両者にとって許容できる環境であると考えられる。

3.6 相互適応の設計

相互適応の定義は, [山田 05, 山田 06b] に譲るとして, ここでは簡単な例を使って, 人間とエージェントが相手に適応すべきか否かについて考察してみる。

掃除ロボットが机で仕事をしている人のところに掃除をしようとしてやってきた場面を考えよう。互いに相手に合わせようとする, 次のようにすれ違いが起こる。

ロボット: 人が机で仕事をしているので掃除は後にしよう

人: ロボットが掃除に来たので席を立とう

これを避ける方法は次の (1) または (2) のように両者が相手を読むレベルに 1 レベルだけ差をつけることである [長田 06]。 (1) 片方は上記のように相手に合わせ, もう一方は相手のことは全く考慮しないようにする。 (2) 片方は上記のように相手に合わせ, もう一方が相手の適応のしかたを予想して行動する。すなわち, 人が相手の適応のしかたを予想して「ロボットは掃除を後にしようとするはずなので仕事を続けよう」とするか, または, ロボットが相手の適応のしかたを予想して「人は席を立つはずなので掃除をしよう」とする。

長田らは, 相手の読みのレベルに応じて自分が相手を読むレベルを調整するアルゴリズムを提案し, エージェントどうしの協調ゲームにおいて有効であることを実験的に示した [長田 06] が, ここでは, 以下のように, 簡単な数式を用いて相互適応の設計指針を見通し良く示す。

一般的に, 何か選択肢がある状況で, A, B の二者の選択が食い違って合わないことが互いにわかった場合, A は確率 p で B に合わせる。B は確率 q で A に合わせるとしよう。すると, この二者の選択がうまくかみ合う確率 s は,

$$s = p(1-q) + (1-p)q = p + q - 2pq$$

となる (図 3 参照)。

片方だけ (ここでは A としよう) が, 相手の適応のしかたを読んで自分の適応のしかたを決めるとすると

$$\partial s / \partial p = 1 - 2q$$

であるから, $q = 1/2$ なら, p に無関係に s は一定で $1/2$ となる。 $q < 1/2$ なら, s は p に対して単調増加するので, $p = 1$ で最大 $1 - q$ となる。 $q > 1/2$ なら, s は p で単調減少するので, $p = 0$ で最大 q となる。

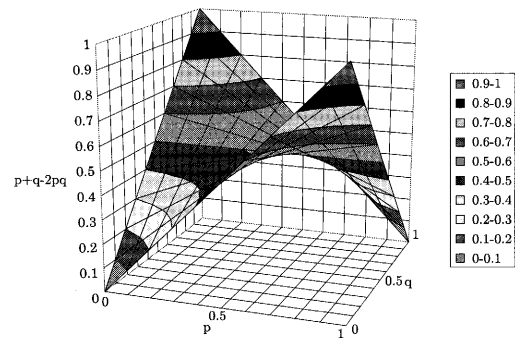


図3 相互適応が成功する確率

以上の考察から明らかなように, エージェントが適応する確率 q がわかれば, 人はそれに応じて最適な戦略 $p = 1$ または $p = 0$ を採ることができる。エージェントが常に適応する, または, 全く適応しないことがわかった場合は, s を 1 にできる。逆に, 人の変わり方が予測できるなら, エージェントはそれに応じて自分が変わるかどうかを決めればよい。いずれにせよ, 人もエージェントも, ある状況で適応するかしないか, どちらかに決めべきであり, また, それが相手にわかるようにすべきであるといえる。自らの理解のレベルを相手に表出することが適切な相互適応を進めることは, [小松 03] においても実験的に示されている。

コンピュータ上のプルダウンメニューが使用頻度により適応的に変化した結果, 使いたいメニューがいつもの場所に見つからず当惑することがある ([山田 06b] も参照)。これは, 人がメニューの位置を記憶してしまうという適応をすることを無視した設計になっており, さらに, システム側の変化のしかたが人には予測できないからであろう。一方, 仮名漢字変換も同様に使用頻度により適応するが, この適応が裏目に出ることは少ない。これは, 人が変換の候補順位までは記憶しないことが多いからであろう。

なお, 人とエージェントの能力の違いにより, 人の自然な適応が裏目に出る場合もある。例えば, 騒音のある環境下において, 話者が反射的に, 大きい声でゆっくりしゃべるといった適応をしてしまうことが知られている (Lombard 効果)。この適応により, 聞き手が人間の場合はその発話が聞き取りやすくなるが, 音声認識システムにとっては, 訓練データによりつくったテンプレートからは異なった音声を処理しなければならないため発話認識率が低下することが知られている [Junqua 93]。こうした自然な適応によるコミュニケーション阻害への対処は, 人間-エージェント間の円滑なコミュニケーション実現に向けての重要な研究課題の一つであるといえよう。

4. ま と め

本稿では, 一般の人間が教師となるという特徴をもつ, 人間とエージェントの相互適応系の設計について論じ

*2 ラットに対して臭覚刺激でなく視覚刺激を用いるようなものである。

た。このような系の設計においては、エージェントの学習アルゴリズムの設計だけに留まらず、人間とエージェント間のインタラクションのあり方全体の設計を考えることが重要である。本稿では、このような相互適応系の設計の参考になるとと思われる、母子間インタラクションについての近年の研究からの知見を紹介し、続いて、インタラクション設計の対象を列挙し、設計指針をまとめた。

この分野は、まだ主に実験室内での課題に対して実験的な設計が行われ、個々の設計事例におけるインタラクションの評価・分析が個別に行われている段階であるが、今後、こうした活動からの知見の集積を通じて一般的に適用できる設計指針が整備され、実用的な HAI システムの構築につながることを期待したい。

謝 辞

日頃から本稿の内容に関連する研究の議論に参加いただいている、IAEA 研究会のメンバに感謝します。

◇ 参 考 文 献 ◇

[麻生 02] 麻生 武: 乳幼児の心理: コミュニケーションと自我の発達, サイエンス社 (2002)

[Bickmore 01] Bickmore, T. and Cassell, J.: Relational agents: A model and implementation of building user trust, *Proc. Conf. Human Factors in Computing Systems (CHI2001)*, pp. 396-403 (2001)

[Bremner 97] Bremner, G., Slater, A. and Butterworth, G., eds.: *Infant Development: Recent Advances*, Psychology Press (1997)

[Bruner 83] Bruner, J.: *Child's Talk: Learning to Use Language*, Norton (1983)

[Junqua 93] Junqua, J.: The Lombard reflex and its role on human listeners and automatic speech recognizers, *J. Acoustic. Soc. Am.*, Vol. 93, No. 1, pp. 510-524 (1993)

[小林 06] 小林一樹, 山田誠二: 擬人化したモーションによるロボットのマインド表出, *人工知能学会論文誌*, Vol. 21, No. 4, pp. 380-387 (2006)

[小松 03] 小松孝徳, 鈴木健太郎, 植田一博, 開 一夫, 岡 夏樹: パラ言語情報を利用した相互適応的な意味獲得プロセスの実験的分析, *認知科学*, Vol. 10, No. 1, pp. 121-138 (2003)

[Komatsu 05] Komatsu, T., Utsunomiya, A., Suzuki, K., Ueda, K., Hiraki, K. and Oka, N.: Experiments toward a mutual adaptive speech interface that adopts the cognitive features humans use for communication and induces and exploits users' adaptation, *Int. J. Human-Computer Interaction*, Vol. 18, No. 3, pp. 243-268 (2005)

[正高 93] 正高信男: 0 歳児がことばを獲得するとき, 中公新書 (1993)

[Meltzoff 95] Meltzoff, A. N.: Understanding the intentions of others: Re-enactment of intended acts by 18-month-old children, *Developmental Psychology*, Vol. 31, pp. 838-850 (1995)

[Morton 91] Morton, J. and Johnson, M. H.: CONSPEC and CONLEARN: A two-process theory of infant face recognition, *Psychological Review*, Vol. 98, pp. 164-181 (1991)

[長田 06] 長田悠吾, 石川 悟, 大森隆司, 森川幸治: 他者意図の推定に基づく協調行動の計算モデル化: 他者の推定レベルに合わせた行動決定方式の選択, *人工知能学会第 20 回全国大会予稿集 CD-ROM*, 1B4-2 (2006)

[Ono 00] Ono, T. and Imai, M.: Reading a robot's mind: A model of utterance understanding based on the theory of mind mechanism, *Proc. 17th National Conf. Artificial Intelligence*, pp. 142-148 (2000)

[櫻井 04] 櫻井晴章, 岡 夏樹: 随伴する発話の韻律情報に基づく動作意図の理解, *情報科学技術レターズ*, pp. 107-109 (2004)

[下條 88] 下條信輔: まなごしの誕生: 赤ちゃん学革命, 新曜社 (1988)

[Thomaz 05] Thomaz, A. L. and Breazeal, C.: Socially guided machine learning: Designing an algorithm to learn from real-time human interaction, *Proc. NIPS 2005 workshop Robot Learning in Unstructured Environments* (2005)

[Tomasello 94] Tomasello, M. and Barton, M.: Learning words in non-ostensive contexts, *Developmental Psychology*, Vol. 30, pp. 639-650 (1994)

[Trevvarthen 93] Trevarthen, C.: The self born in intersubjectivity: The psychology of an infant communicating, Neisser, U., ed., *The Perceived Self: Ecological and Interpersonal Sources of Self-knowledge*, Cambridge University Press (1993)

[Vygotsky 78] Vygotsky, L. S.: *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*, Harvard University Press (1978)

[Watson 72] Watson, J. S.: Smiling, cooing, and "the game", *Merrill-Palmer Quarterly*, Vol. 18, pp. 323-339 (1972)

[山田 02] 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, pp. 658-664 (2002)

[山田 03] 山田誠二, 角所 考: ユーザ-システム間の適応のためのヒューマンコンピュータインタラクションのデザイン, *システム制御情報学会誌*, Vol. 47, No. 4, pp. 197-202 (2003)

[Yamada 04] Yamada, S. and Yamaguchi, T.: Training AIBO like a dog, *13th IEEE Int. Workshop Robot-Human Interaction*, pp. 431-436 (2004)

[山田 05] 山田誠二, 角所 考: IDEA: 適応のためのインタラクション設計, *日本知能情報ファジィ学会誌*, Vol. 17, No. 3, pp. 279-288 (2005)

[Yamada 06a] Yamada, S. and Komatsu, T.: Designing simple and effective expression of robot's primitive minds to a Human, *Proc. 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS-2006)* (2006), to appear

[山田 06b] 山田誠二, 角所 考, 小松孝徳: 人間とエージェントの相互適応と適応ギャップ, *人工知能学会誌*, Vol. 21, No. 6, to appear (2006)

2006 年 9 月 3 日 受理

著 者 紹 介



岡 夏樹 (正会員)

1979 年東京大学工学部計数工学科卒業。(株)鳥津製作所, 東京大学に勤務後, 松下電器産業(株)に入社。(財)新世代コンピュータ技術開発機構研究員などを経て, 2003 年京都工芸繊維大学教授, 現在に至る。工学博士。学習, 発達, インタラクションを中心とした認知モデル構築とその工学的実現に関心があり, 自然な日常的インタラクションを通して言語獲得するシステムの構築を目指している。日本認知科学会, 情報処理学会各会員。



山田 誠二 (正会員)

1984 年大阪大学基礎工学部卒業。1989 年同大学院博士課程修了。工学博士。同年大阪大学基礎工学部助手。1991 年同大学産業科学研究科講師。1996 年東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授。2002 年国立情報学研究所教授, 現在に至る。人工知能, 特に, ヒューマンエージェントインタラクション, 知的 Web に興味をもつ。情報処理学会, 日本ロボット学会, 電子情報通信学会, AAAI, IEEE, ACM 各会員。