

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」

ヒューマンロボットインタラクションにおける没入の実現

Achieving Immersion in Human-Robot Interaction

今井 倫太
Michita Imai

慶應義塾大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Keio University.
michita@ics.keio.ac.jp, <http://www.ayu.ics.keio.ac.jp/~michita>

Keywords: human-robot interaction, immersion in interaction, humanoid-robot, communication robot.

1. はじめに

HAI の分野の中で、身体をもち人間とインタラクションする代表としてロボットは欠かすことのできない存在である。ロボットと人間とのインタラクションは、HRI (Human-Robot Interaction) と呼ばれる。エージェントは、自律的に人間と相互作用できる機能をもつ人工物を幅広く含む概念であり、ロボットもエージェントの一種である。本稿では、コミュニケーションロボットに焦点を当て、身体をもつエージェントといった観点から、HAI について取り上げる。

コンピュータ上のエージェントと比べロボットの場合、周囲の環境が複雑なので、認識技術が主に取り上げられてきた。また、ロボットの体自体の機構や制御手法も主要なテーマである。しかし、人間とロボットのインタラクションを実現するうえでは、インタラクション自体にまつわる問題も積極的に扱う必要がある。

インタラクション自体にまつわる問題とは、人間とロボットのインタラクション自体が簡単に成立しないという問題である。通常、人間とロボットのインタラクションは、人間からの質問や命令にロボットが応答するように設計されていたり、ロボット側から人間に情報を与えたりするように設計されている [Asoh 01]。これらのインタラクションは、タスクに依存する形で設計されているといえる。また、近年では、コミュニケーションで人間を楽しませるロボットもあり、何らかのタスクを想定したものではない設計も見受けられる [Breazeal 02, 神田 02, PaPeRo]。しかし、人間とロボットのインタラクションは、多くの場合、人間がロボットとインタラクションすることを前提に設計されている。この前提は、ロボットの展示場や実験施設では成り立つが、将来ロボットが、公共の場で活躍し、人間に積極的に話しかける際には必ずしも成り立たない可能性がある。ロボットからのコミュニケーションの要求に人間が答えられない場合があるのである [今井 02]。

本稿では、人間が、ロボットとのインタラクションに没入する過程について解説する。人間とロボットのインタラクションが成立するかどうかは、ロボットとのインタラクションに人間が没入するかどうかにかかっている。没入とは、人間が、インタラクション自体に集中している状態を指す。人間は、ロボット自体を客観的に観察することが多く、ロボットとのインタラクションへの没入を実現することは、簡単なことではない。本稿では、人間とロボットのインタラクションをコミュニケーションへの没入という観点から解説し、インタラクションへの没入を実現する手法について紹介する。

2. インタラクションへの没入

公共の場でロボットが人間に話しかける場合に、人間が、ロボットとのインタラクションに自然と没入していくことは、滅多にないことである。特に、ロボットが人間に自発的に何かについて語ったとしても、人間は、ロボットの話す内容を真剣に受け止めない。ロボットの話に聞き耳をたてたとしてもである。ロボットの展示会場で、成人の人とロボットのインタラクションを観察していると、ロボットの話す内容を人間が真剣に受け止めない場面に頻繁に出くわす。

図1は、人間とロボットのインタラクションを、ロボットの発話を人間が真剣に捉えるかといった観点から分

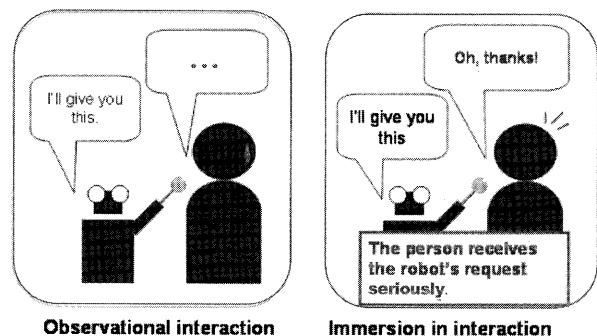


図1 人間とロボットのコミュニケーション

類したものである。図では、ロボットが人間にお菓子をあげている場面である。右図では、ロボットからの働きかけに対して真剣に「ありがとう」と人間が返答している。一方、左図の人は、何を返答してよいのかわからずに無言になってしまっている。人間が、ロボットとのインタラクションに没入しているのは、明らかに右側の図である。

しかし、展示会場でロボットが人間とコミュニケーションする場合の多くは、左図に見られる理想的ではないコミュニケーションである。一方で人間同士のコミュニケーションでは、比較的容易に理想的なコミュニケーションが確立される。

本稿では、ロボットとのコミュニケーションへと人間を引き込み、ロボットの発話を人間が真剣に捉えるようになる要件について考える。また、この要件を満たすロボットのコミュニケーション戦略を最後に述べる。

2.1 人間とロボットのインタラクション

人間は、ロボットから話しかけられても、なかなかロボットの発話に対して自然な受け答えをしてくれないことをすでに紹介した。では、なぜ人間は、ロボットとのインタラクションを真剣に受け止めないのであろうか？ 実は、ロボットとインタラクションする際に人間がとる視点に深く関わりがあるのである。

インタラクションの際の視点の問題を説明する前に、本節では、人間とロボットのコミュニケーションに視点が与える影響について調べた実験を紹介する [Ono 00]。この実験は、本稿の一つ前に掲載されている解説「インタラクションにおけるカップリングと知能」の 2 章でも、紹介されている ITACO システムである。具体的には、ロボットが人に唐突に依頼をした際に、ロボットの依頼が人間に伝わるかどうかを調べた実験である。結果を先に述べると、ロボットからの依頼を人間が真剣に受け止めるためには、互いの間に何らかの関係が成立している必要があるといったものであった。

以下、この実験について簡単に述べる。実験は、被験者の前に現れた移動ロボットが、「ゴミ箱をどけてください」と合成音声で被験者に依頼するものである (図 3)。

実験では、ロボットが人間の目の前に突然現れても人

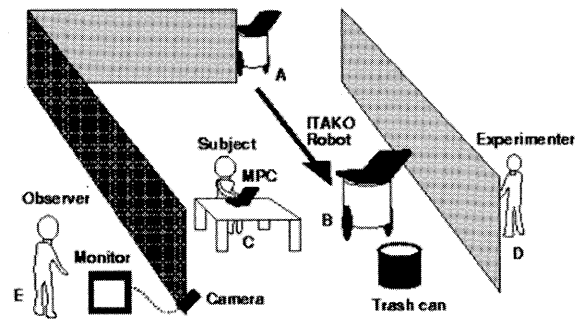


図 3 実験環境

間とロボット間に関係が形成されにくいことを考慮し、CG エージェントの利用を試みた。CG エージェントは、図 2 の左上の携帯端末上の CG キャラクタである。実験では、ロボットとのコミュニケーションが開始される前に、被験者に、携帯端末上の CG エージェントに餌を与えさせるなど CG エージェントに十分慣れ親しんでもらった。

人間とロボットの関係は、被験者が慣れ親しんだ CG エージェントを仲介役として形成される。図 2 の右下に示すとおり、実験で用いたロボットはディスプレイをもつ。ロボットが被験者に近づいたときには、このディスプレイに、携帯端末上に表示されている CG エージェントと同一のキャラクタが表示される。また、CG エージェントは、ロボットのディスプレイ上に表示されると同時に、携帯端末上のディスプレイに表示されなくなる。この一連のプロセスは、慣れ親しんだ CG エージェントが携帯端末からロボットへ移動したように被験者から見え、被験者とロボットが関わるきっかけを与える。

実験では、ロボット上のディスプレイへ CG エージェントが移動する場合としない場合を比較し、人間とロボット間に関係がロボットから人間への依頼に影響を与えるかどうかを調べた。

図 3 に実験環境を示す。被験者は、図中の C に座り、携帯端末上の CG エージェントとインタラクションするように教示される。ここで、被験者は、実験の目的が CG エージェントの評価であると指示されており、ロボットの存在はあらかじめ教えられていない。

被験者が CG キャラクタを操作しているときに、ロボットは、図中の A から B に移動し、被験者の前に突然現れる。ここで、CG エージェントは、携帯端末上から消えロボットのディスプレイに移動し表示される。また同時に、合成音声で、「ゴミ箱をどけてください」と人に依頼する。この実験は、CG エージェントがロボットに移動しない場合も行われた。

図 4 は、CG エージェントがロボット上に移動した場合の被験者の行動を示している。被験者は、CG エージェントが携帯端末上から消えた瞬間戸惑った。しかし、同じ CG エージェントがロボット上に表示されているの

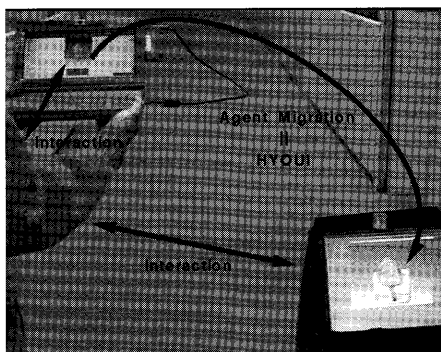


図 2 エージェントの移動による関係の移動



図4 ロボットの発話を理解できた被験者

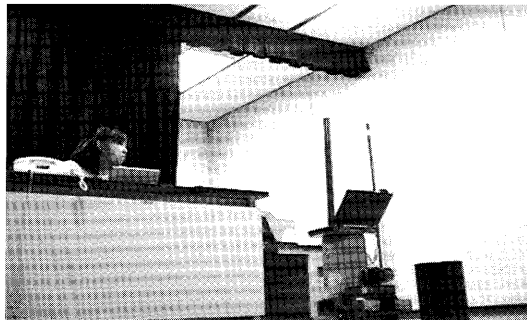


図5 ロボットの発話を理解できない被験者

で、「ゴミ箱をどけてください」とのロボットの依頼に素直に従い、ゴミ箱をどけた。この実験条件のもと、被験者10人のうち、8人がゴミ箱をどけた。

図5は、CGエージェントがロボット上に移動しない場合の被験者の行動を示している。被験者は、突然現れた見ず知らずのロボットを無視した。この実験条件の下、被験者10人のうち、9人がゴミ箱をどけなかった。

また、CGエージェントがロボット上に移動しなかった場合の実験では、たいへん興味深いアンケート結果が被験者から得られた。CGエージェントがロボット上に移動しなかった場合、被験者は、ロボットが何を言っているのか理解できていなかったのである。つまり、合成音声を理解できていなかったのである。一方、CGエージェントが移動した被験者は、ゴミ箱をどけたことから明らかなように、ロボットからの依頼を正確に理解していた。

以上の結果は、ロボットの発話を人間が理解するとき、ロボットの意図やロボットが知覚している環境に人間が注目している必要があることを示している。CGエージェントを介してロボットとの関係が構築された被験者は、ロボットの意図や知覚を推測しているので、聞き取りにくいロボットの音声の内容を理解することができたのである。一方で、ロボットとの関係が成立していない場合の被験者は、ロボットの発言を音声のみから聞き取ろうとするので、ロボットの発話を理解することができなかったのである。

2.2 インタラクションにおける人間の視点

前節で紹介した実験の結果を踏まえると、ロボットの

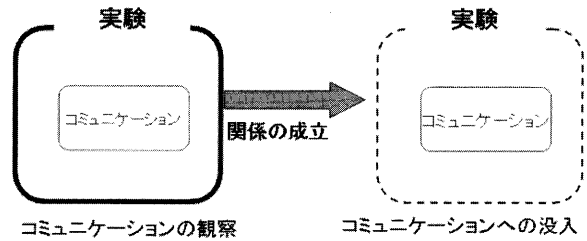


図6 視点の変化

発話を人間が真剣に聞くということは、ロボットの意図や知覚している状況を人間が推測することであるといえる。一方、ロボットと関係のない人間は、ロボットの行動自体を観察するだけで、意図や状況を推測することがないといえる。

図6は、関係の成立による人間の視点の変化を模式的に表したものである。関係が成立する前(図の左)では、人間が実験であることを意識してコミュニケーションしているのに対し、関係の成立後(図の右)では、実験を意識する視点が、ロボットの意図を読む視点へと移動しコミュニケーションへと没入していることを表している。

つまり、以上の実験は、人間とロボットのインタラクションを設計するうえで、ロボットの意図を読む視点へと人間の視点を変化させるインタラクションのデザインが必要であることを示している。

3. ロボットとのアイコンタクトの効果

前章の実験では、CGエージェントを介して人間とロボットの関係を築いた。しかし、CGエージェントの利用は特殊な例であり、一般的なロボットのデザインに利用することはできない。本章では、ロボットの意図を人間に推測させる要因の一つとして、人間が普段無意識に行っているアイコンタクトに注目する [Imai 01]。アイコンタクトは、自分が何かの意図をもって行動していることを他人に伝える効果があり、人間同士のコミュニケーションでの意思確認の基本となっている。つまり、アイコンタクトは、CGエージェントよりも一般的なデザインであるといえる。では、ロボットが人間とコミュニケーションする際にもアイコンタクトは有効に働くのであろうか。本章は、人間とロボットのアイコンタクトがコミュニケーションに与える影響について調べた実験について述べる。

実験では、図7に示すコミュニケーションロボット Robovie を用いた。Robovie は、人間との関係を構築するために Robovie の視線を人間に向け、アイコンタクトを行う。実験では、アイコンタクトによってロボットの意図を人間に感じ取らせ、ロボットが指さす対象を人間に気づかせることができるかどうかについて調べた。

実験では、20人の被験者を半数ずつ二つのグループ



図7 実験場面：
(左) 人間と Robovie がアイコンタクトしている。(中) ポスタへの共同注意の成立。(右) Robovie の腕を見る被験者

表1 実験結果：アイコンタクトの効果によってポスタを参照した被験者の数 ($U=5, p<0.01$)

	ポスタを見た	Robovie の腕を見た
アイコンタクトあり	10	0
アイコンタクトなし	1	9

に分けた。一つのグループ(実験群)は、被験者とアイコンタクトを行う Robovie を与えた。もう一つのグループ(対照群)には、アイコンタクトを行わない Robovie を与えた。また両方のグループに対して Robovie は、腕によって壁に貼られたポスタを指し示す。実験では、Robovie がポスタを指し示す際に、人間とアイコンタクトした場合としない場合で、被験者がどこを見たかを記録した。

実験は、以下の手順で行った。始めに、Robovie が被験者の前を通りすぎ、ポスタの前で止まる。ここで、被験者は、Robovie とポスタの両方を見ることができるところに立っている。次に、Robovie は、被験者のほうを振り返り、「これ見てね」と発話しながら、腕でポスタを指し示す。この時点で実験群の被験者には、Robovie が、被験者を見る動作とポスタを見る動作を繰り返す。対照群の被験者には、Robovie が顔を正面に向けたまま動かさない。

表1に実験結果を示す。被験者は、Robovie がアイコンタクトした場合(図7左)、ポスタへ視線を向けた(図7中央)。一方、Robovie がアイコンタクトを行わなかった場合、多くの被験者がポスタを見ずに Robovie の腕先を見た(図7右)。結果、Robovie の意図を人間に感じ取らせるためにはアイコンタクトが影響を与えることが確認された。ここで実験データに対して用いた検定は、Mann-Whitney 検定であり、 U 値および p 値は $U = 5, p < 0.01$ であった。

実験結果から、実世界の物体を Robovie が指し示していることに対照群の被験者は気づかなかったことがうかがえる。つまり、被験者は、Robovie のポスタを指し示そうとする意図を読んでいない。一方、アイコンタクトによって、被験者は、Robovie の意図に気づき、ポスタを見ることができた。つまり、実験結果は、人間とロボットのコミュニケーションでも、アイコンタクトが、ロボットの意図を人間に読ませるうえで重要な働きを示している。

4. コミュニケーションによる人間の引込み

前章で、ロボットの意図を人間に読ませる一般的なインタラクションのデザインとして、アイコンタクトの有効性について述べた。本章では、ロボットのコミュニケーションの内容自体によって、同様の効果を与える手法について述べる[今井 06]。

実験は、人間がロボットに対して共感したり、感覚を共有することにより、ロボットとのコミュニケーションへと没入するといった考えのもとに行われた。共感の誘発は、ロボットの話す内容を演出することで実現されている。

演出で扱うコミュニケーションは、クオリアを伝えるコミュニケーション(クオリア通信と呼ぶことにする)である。クオリアとは、哲学用語であり、感覚の主観的な質(痛みの質感、色の色覚)のことをいう。クオリアは、ある言葉で正確に表現できず、直接相手に伝えることができない。しかし、相手も同様の感覚をもつことは想定できるので、感覚に関係する言語表現を用いて、自分も同じ感覚をもっていることを相手に伝えることは可能である。つまり互いが同じ感覚をもつ大前提を利用して間接的にクオリアを伝えることができる。実験は、クオリア通信を用いて人間をロボットに共感させると、ロボットの意図を読む視点へと人間の視点が変わることを調べた。

実験の結果は、クオリア通信による演出が、人間の視点を変え、ロボットとのコミュニケーションへと人間を没入させることを示していた。また、被験者は、ロボットに対して共感しているときに、ロボットの行動や発言を真剣に受け止めインタラクションに集中し続けた。つまり、実験結果は、クオリア通信をベースとした行動をロボットに行わせることが、ロボットとのコミュニケーションへと人間を没入させるうえで重要であることがわかった。

図8は、人間がロボットに対して共感する過程を表している。図8では、人間がロボットに勧められて、お菓子を食べているところである。この場面で人間は、何のお菓子であるかといったお菓子自体の認識と、お菓子の味に対する感覚(クオリア)をもつことになる。さらに、ロボットがお菓子の味に関する発話「おいしいでしょ!」をすると、自分が感じている感覚と受け取った発話を結びつけることとなる。発話と感覚が結びつくことにより、人間は、ロボットが自分と同じ感覚をもっている(図8の「意図を読む」の矢印)と思うことになる。ここで、感覚に関する共感が発生するとともに、人間はロボットの知覚を推測するように自然と促される。最終的には、人間の視点がロボットの意図や知覚を推測するものへと変わり、コミュニケーションへの没入が自発的に起こる。

演出によるコミュニケーションの有効性を検証する実験は次のとおりであった。

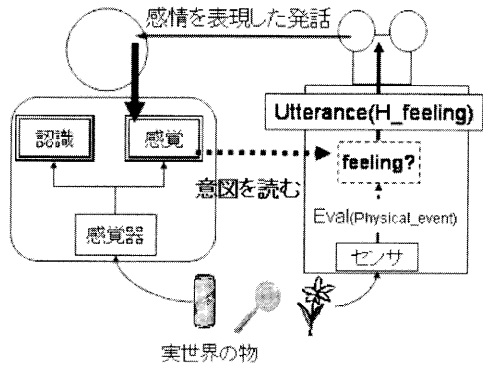


図8 人間とロボット間の感覚の共有

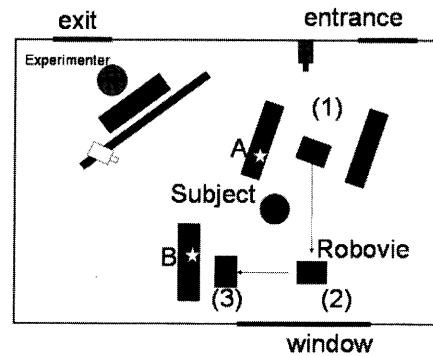


図9 実験環境

実験条件：実験では、被験者を実験群と対照群の二つに分け、それぞれに対して異なる実験条件を用意した。実験群には、ロボットが、感覚を表現する発話を与える。対照群の被験者に対しては、情報を表現する発話を与える。感覚を表現する発話は、共感を実現するために、インタラクションの各時点で人間が感じている感覚を表現したものとなっている。情報を表現する発話は、インタラクションの各時点で人間が注目しているものに対する情報を人間に提供する。感覚を表現する発話を与えられると被験者は、図8に示すとおり、発話を感覚へ結びつける。結果、人間はロボットの意図や知覚を推測し、感覚の共有が起こる。一方、情報を表現する発話を受け取ると、人間は、認識しているもの自体に発話を結びつける。人間の感覚と発話が結びつかないので、感覚の共有が起こらない。

実験環境：図9に実験環境を示す。図では、被験者、実験者の位置および、演出で用いられる実験小道具の位置(A, B)を示している。また、部屋の窓から見える景色も演出として用いられる。図中の番号(1)～(3)は、ロボットが演出時に立ち止まる位置を表している。

被験者：被験者は、21人の大学生である。被験者は、11人の実験群と10人の対照群に分けた。

実験結果：実験では、3通りの発話に対して被験者の行動を調べた。ロボットが人間にお菓子を上げた後に、「おいしいでしょ」と感覚を表現した発話をした場合と「キットカットだよ」と情報を表現する発話をした場合を比較した。結果は、実験群の被験者のほうがお菓子を食べた人数が多かった。一方で対照群の被験者は食べる者がほとんどいなかった(図10)。この結果には有意差($p < 0.05$)が見られた。また、外の景色がきれいだねというロボットの問いかけに対しては、対照群に比べ実験群のほうが同意した人数が多かった($p < 0.05$)。最後に、ロボットが部屋を退出する際に人間に「お土産を上げる」と発話した場合、対照群に比べ実験群のほうが多くの被験者がお土産をもって帰った($p < 0.1$)。

これらの結果は、人間がロボットも自分と同じ感覚をもっていると想像し、ロボットの意図や知覚する状況を推測するようになった結果、ロボットとのインタラクシ

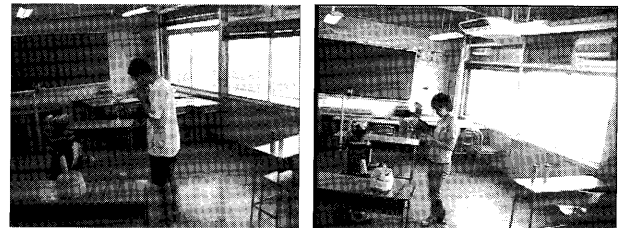


図10 感覚を表現する発話を与えられ、ロボットの発話を真剣に受け止めた結果、お菓子を食べた被験者(左)。情報を表現する発話を与えられ、コミュニケーションへと没入しなかった結果、お菓子を食べなかった被験者(右)

ョンへの没入が生じたといえる。特に、次の理由が、お土産をもって帰らなかった被験者から得られた。「これは、実験だから」、「お土産は、次の実験でも使うと思ったから」。これらの理由は、ロボットのコミュニケーションが実験であったということを想定していることを表している。つまり、対照群の被験者は、コミュニケーションを観察しており、没入していなかったことがわかる。

5. ま と め

本稿は、人間とロボットのインタラクションにおいて、ロボットとのコミュニケーションへと人間を没入させる際に必要となる要素について述べた。特に、公共の場でのインタラクションの実現に向け、人間を積極的にロボットとコミュニケーションさせるインタラクションのデザインに関して解説した。インタラクションへの没入を実現するインタラクションデザインとしては、ロボットの意図を人間に読ませることが重要である。具体的には、CG エージェントを用いる手法および、アイコンタクトを用いる手法、感覚に対する共感を用いる手法を紹介した。しかし、本稿で取り上げた手法は、どれも検証実験を行うために用意されたものであり、実際の人間とロボットのコミュニケーションを支援できるものではない。今後のコミュニケーションロボットの発展のためにも、本稿で述べた手法を発展させ、人間とコミュニケーションし続けるロボットの開発が望まれるところである。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Asoh 01] Asoh, H., Motomura, Y., Asano, F., Hara, I., Hayamizu, S., Itou, K., Kurita, T., Matsui, T., Vlassis, N., Bunschoten, R. and Kroese, B.: Jijo-2: An office robot that communicates and learns, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 16, pp. 46-55 (2001)
- [Breazeal 02] Breazeal, C. L.: *Designing Sociable Robots*, MIT Press (2002)
- [Imai 01] Imai, M., Ono, T. and Ishiguro, H.: Physical relation and expression: Joint attention for human robot interaction, *Proc. 10th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN2001)*, pp. 512-517 (2001)
- [今井 02] 今井倫太, 小野哲雄, 中津良平, 安西祐一郎: 協調伝達モデル: 関係性に基づくヒューマンロボットインタフェース, *信学論 (A)*, Vol. J85-A, No. 3, pp. 370-379 (2002)
- [今井 06] 今井倫太, 鳴海真里子: 人間の五感を利用したロボットとのコミュニケーションへの没入の実現, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 42, No. 4, pp. 342-350 (2006)
- [神田 02] 神田崇行, 石黒 浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平: 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット "Robovie" の開発, *信学論 (D-I)*, Vol. J85-D-I, No. 4, pp. 380-389 (2002)
- [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. AAAI-2000*, pp. 142-148 (2000)
- [PaPeRo] PaPeRo: <http://www.incx.nec.co.jp/robot/>

2006年9月2日 受理

—— 著 者 紹 介 ——



今井 倫太 (正会員)

1992年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1994年同大学院理工学研究科計算機科学専攻修士課程修了。同年、日本電信電話(株)入社。1997年ATR知能映像通信研究所へ出向。2002年慶應義塾大学大学院開放環境科学専攻博士課程修了。現在、慶應義塾大学理工学部情報工学科助教授および、ATR知能ロボティクス研究所客員研究員。ロボットとの対話、センサを用いた状況知覚に興味をもつ。IEEE, ACM, 情報処理学会, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, 認知科学会各会員。博士(工学)。