

対話型ロボットによる小学校での長期相互作用の試み

神田 崇行 *1 佐藤 瑠美 *1 *2 才脇 直樹 *1 *2 石黒 浩 *1 *3

A longitudinal field trial for human-robot interaction in an elementary school

Takayuki Kanda *1 Rumi Sato *1 *2 Naoki Saiwaki *1 *2 Hiroshi Ishiguro *1 *3

Abstract – It is believed that interactive robots participating in human social activities should have fundamental ability to socially communicate with humans. In this paper, we propose a real-world approach toward development of such a robot and demonstrate potentials of current interactive robots for establishing social relationships with humans in our daily lives. The developed robot, Robovie, is able to interact with children as children do, call children by their name using wireless ID tags, and adapt its interactive behaviors for each child based on pseudo learning mechanism. As a result of a field trial experiment, which was carried out at an elementary school for two months, Robovie established friendly relationships with several children and simultaneously successfully estimated friendships among children by observing their interaction. We believe the ability to maintain friendly relationships with humans and to identify friendships among humans is essential to behaving socially.

Keywords : social robot, human-robot interaction, field trial, longitudinal interaction, friendship estimation

1. はじめに

近年のロボット工学の発展により、Aiboのようなペットロボットや人間型の対話ロボットが次々に開発されている。これらのロボットは従来の産業用のロボットのような特定のタスクを実行するためのロボットと異なり、人との相互作用機能を主体としたロボットである。この相互作用機能をもとに、人間の日常生活に参加し、様々な役割を果たすようになることが期待されている。つまり、このような日常生活型のロボットは「ものを運ぶ」といった物理的な支援のみでなく、「道を教える」といった情報面での支援や、相互作用機能そのものからもたらされる「癒し」のような情緒面での支援も行うようになって考えられる^[1]。

しかし、このような相互作用型のロボットが社会に参加するために必要な人々と社会的に関わるための機能はまだ十分に研究されていない。人は互いにかかわりあうことで社会的になると言われるように、ロボットも人々とのかわり合いのなかで社会的になる可能性が高いと我々は考える。これまでに人と相互作用するロボットの研究開発が行われてきたが(図1の実線)、これらの研究は主に実験室の中での限られた人

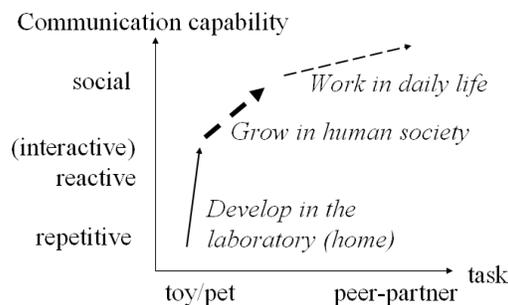


図1 社会的ロボットへの実社会アプローチ
Fig. 1 Real world approach for social robots

との対話を行うものであった。我々は、むしろロボットの社会的能力の拡張と言う視点から考えた場合には、実験室を出て実際に人間社会の中でロボットを活動させる中で、必要なロボットの社会的能力を見つけ出し、拡張してゆくという「実社会アプローチ」が重要であると考えている(図1の太破線)。対話型ロボットは小学校での英語教育といった対話タスクに試験的に用いられてはいるものの、いまだ対話型ロボットの能力は実際に人に有用なタスクを行うには不十分である。しかし、たとえ人々への貢献が小さい中でも、ロボットを社会の中で活動させてゆくことで、徐々にロボットの社会的能力を拡張し、ロボットが実行できるタスクを増加させてゆくことが我々のねらいである。このアプローチの中で、人々のロボットに対する態度、ロボットの人間社会への参加の可能性、そして、ロボットが

*1: ATR 知能ロボティクス研究所

*2: 奈良女子大学

*3: 大阪大学

*1: ATR Intelligent Robotics & Communication Labs.

*2: Nara Women's University

*3: Osaka University

社会的であるための能力の獲得のための研究を行うことを試みる．この実社会アプローチは人間が社会的能力を獲得する成長過程に対応付けることもできる．つまり，人間の場合でも幼いうちは家の中で基本的な行動能力を獲得し，そして学校生活の中で社会的能力を獲得し，様々な能力を身につけた後に実社会で活躍するようになる（図1の細破線）．

これまでも，対話型のロボットに社会性を持たせる研究が行われている．特に，ロボットが人間の意図を読み取る能力に関連して，人間が他者の意図を読み取る基本的な能力である共同注意機構が注目されてきた．ロボットにこのような意図理解能力を持たせる研究としては Scassellati らの開発したヒューマノイドロボット Cog^[2] や小嶋らの Infanoid^[3] がよく知られている．これらのロボットは人間の視線の先を追従することで人が注視する対象物をロボットも注視することができる．つまり，これらのロボットは人間の意図を行動から推定することを目指している．

しかし，これらの従来研究はいずれも人とロボットとの一対一の関係を対象としたものである．これまでに多数の人とロボットとの間で生じる社会的な行動をとりあつかうような研究は少ない．我々は，ロボットが真に社会的であるためには複数の人々とかかわり合い，さらには人々間の社会的な関係も理解することがロボットにとって必要であると考え^[4]．同様の試みとしては，仲川らの自閉症の治療を目指した小型ロボットと複数の子供たちとの長期的な関わり合いが報告されている^[5]．

本稿では，人々と社会的に関ることが出来る自律対話ロボットに向けた我々のアプローチを報告する．開発した人間型対話ロボット Robovie は音声に手や頭部によるゼスチャを交えて，また搭載された多様なセンサを用いて自律的に人々と相互作用する．ロボットは人々を相互作用に引き込み，人々にロボットの前の自主的な集団行動を生じさせ，結果として相互作用集団の各個人を同時に識別することによって集団内の人間関係を同定する．さらに，子供たちがロボットに興味を持ち続けるような長期的な関係構築のためのメカニズムを持つ．小学校で行った二ヶ月の実験の結果，ロボットは子供たちと友好的な相互作用を続け，同時に子ども同士の友達関係の推定の基礎的な性能を示したことが見出された．また，長期的な相互作用の分析からの発見は子供たちと相互作用型のロボットとの友好的な関係構築の手がかりとなるものであると考えられる．

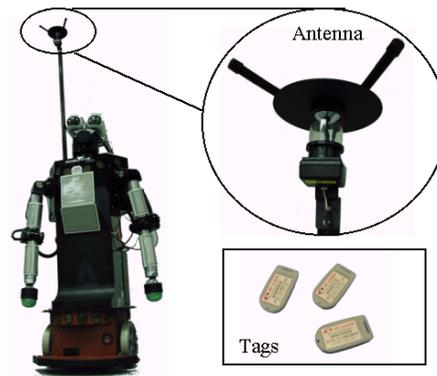


図2 Robovie と無線タグ
Fig.2 Robovie and wireless tags

2. 自律型対話ロボット Robovie

2.1 ハードウェア

図2に本研究に用いた人間型対話ロボット Robovie を示す^[6]．Robovie は人間に似た表現能力と認識能力を持つという特徴がある．4自由度の腕，3自由度の頭部，各2自由度の眼球部（カメラ内部の可動部）により人間とのコミュニケーションに用いることのできる様々なゼスチャが可能である．また，マイクロフォン，接触センサ，超音波センサ，ステレオカメラ，全方位視覚センサ，といった多様なセンサにより，自律的に人間と相互作用することが可能である．さらに，コンピュータやモータ制御ボードといった制御機器およびバッテリーを全て内蔵している．

2.2 無線タグによる個人識別

多数の人を同時に個人同定するために，このロボットに無線タグシステムを搭載した^[7]．図2右下にタグと名札への取り付け例を示す．名札の大きさは約5[cm]であり子供でも容易に持ち運ぶことができる．このタグは303[MHz]の周波数でID情報を一定の時間間隔で発信し，ロボット本体に取り付けた読みとりシステムがこの信号を受信することでロボット制御システムに個人のIDが通知される．ロボットに取り付けた場合の読み取り可能な範囲は約2[m]であり，受信感度を8段階で動的に調整することでタグまでの大まかな距離も検出可能である．また，同時に最大400個までのタグが認識可能である．ただし，タグが同時に複数個ロボットからおおむね等距離に存在する際には，複数個のタグの検出は可能であるが，どのタグがどの位置にあるかといった区別は出来無い．

2.3 長期的な相互作用のための対話機能

1) 基本設計

Robovie は一貫して矛盾しないような対話ビヘービアを継続するためのソフトウェアメカニズムを持つ^[8]．このメカニズム上に実装される自律対話行動の設計の

根底にあるのは、「ロボットは自律的に小さい子供のするようなコミュニケーションを行い、さらに相互作用を持続させる」というアイデアである。たとえば、握手、抱擁、じゃんけん、体操のまね、挨拶、歌を歌う、簡単な話しかけ、といった約70の対話ビヘービアが実装されている。また、頭をかく、腕を組むといった約20の待機行動、歩き回るといった約10の移動ビヘービアも実装されている。合計で100種類のビヘービアが用意され、これらのビヘービアのなかで合計で300種類の発話と50単語の音声認識が可能である。

これらのビヘービアは次のようなシンプルなルールに従って出現する。ロボットは時に「触ってね、遊ぼうよ」と呼びかけて相互作用の開始のきっかけをつくる。また、子供たちが反応しないときには待機行動や移動行動を行う。一度子供たちがロボットの呼びかけに反応すると、反応がある限りロボットは握手やじゃんけんといった対話行動を続ける。子供たちが反応をやめると、ロボットも対話行動をやめて「バイバイ」といって待機行動や移動行動を再開する。

2) 長期的に持続する相互作用のための設計

さらに、我々は個人識別機能を長期的な相互作用のために利用した。最初のアイデアは「名前を呼ぶこと」である。いくつかの対話ビヘービアにおいてロボットは一定距離以内の子供たちの名前を呼ぶ。たとえば、ある対話行動において、ロボットは近くの子供の名前を呼んで「ヤマダくん、遊ぼうよ」といった発話を行う。このような行動は子供たちをロボットの近くに來させるのに有効であることが見出されている^[7]。

次の利用方法は、見かけ上の学習である。具体的には、子供がロボットと相互作用をすればするほど、ロボットはより多くの種類のビヘービアをこの子供に示すようになる。たとえば、ロボットとまだ遊んだことのない子供には10種類のビヘービアしか示されないが、180分以上ロボットと対話した子供には100種類のビヘービアを示すようになる。このように、個々の子供の経験に応じてロボットは徐々に対話パターンを変化させることで、ロボットはまるで何か相互作用から学習しているかのように振舞う。このような見かけ上の学習機構はしばしばAiboのような対話型ペットロボットで用いられている。

3番目のアイデアは、対話した子供にロボットが秘密を教えることである。ロボットとある子供との対話時間が、秘密の事柄それぞれに対してあらかじめ定められた一定の閾値を超えるとロボットはその秘密をその子供に話すようになる。言い替えると、積算対話時間が秘密ごとに決った時間 n を越えた子供はどの子供もその秘密を教えらる。つまり、ロボットとよく相互作用する子供はさらにロボットと相互作用するよう

に動機付けられる。秘密の事柄は、「Robovieはお話するのが好きだよ(120分以上対話した子供に対してロボットとはこれを話す)」「Robovieは寒いのが嫌い(180分)」「Robovieは先生が好きだよ(420分)」「Robovieは阪神タイガースが好きだよ(540分)」といった内容である。

3. 相互作用の観察からの人間関係推定

3.1 友達関係の推定に関する心理学的研究

人間の行動は友達関係のような社会的関係に大きく影響される。これまでの心理学分野での研究から子供たちの集団行動と人間関係の間の関係が研究されてきた。例えば、協調的な行動がソシオメトリックテスト(後述)の肯定的な指名と、また乱暴な遊びが否定的な指名の頻度が相関関係にある^[9]。また、周囲の子供たちから友達だと思ってもらえない、つまり拒否される子供には攻撃的行動(悪口を言ったり、叩く、蹴るといった行動)が多く現れる、といった社会的地位と行動の間にも相関関係があることが知られている^[12]。我々はこのように集団行動の観察に基き人間関係をロボットが自動的に認識することが可能であると考ええる。

特に、我々は複数の人々の関係の推定の第一段階として、1対1の関係(たとえば友達関係)の推定に注目する。なぜなら、様々な1対1の関係が重なりあうことで人間関係に関する社会的ネットワークが構築されるからである。実際、心理学分野での研究にしばしば用いられるソシオメトリックテストは1対1の関係を基に社会的ネットワークを調査するための質問紙法である。回答の際には、人々が直接的に好きな/嫌いな人の名前を記入する。この結果を分析することによって、人々の社会的地位を、人気がある、平均的、孤立している、拒否されている、といった分類をすることができる^{[10],[11]}。このように人々の間の1対1の関係は大規模な社会的ネットワークのもっとも基礎となるものであり、まず人間関係を推定する上で最初に推定が試みられるべき要素である。

3.2 ロボットからの友達関係推定モデル

一般に、人々の間の社会的関係は同伴行動、対人距離、対話の際の表情、といった集団行動に影響を与える。例えば、人間は仲の良い人と伴って行動するが、嫌いな人には必要がなければ近づかないものである。特に、自律対話ロボットは主に自発的で友好的な行動を生じさせる^[4]。図3はこのような友達関係推定に関するモデルである。人々の間の友達関係は同伴行動や対話の際の顔の表情、距離などの行動に影響を及ぼすと考えられる。またこれは一緒に働く、嫌っているとといった人間関係も行動に影響する。ここで、ロボットの前で生じる行動の大半が友好的な行動であるという

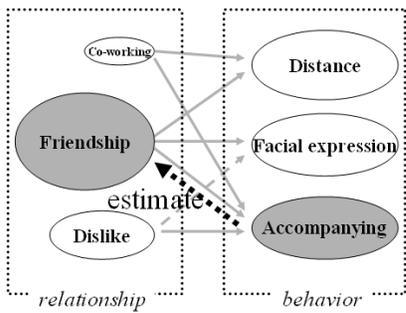


図3 友達関係推定のモデル
Fig.3 Estimation model for friendship

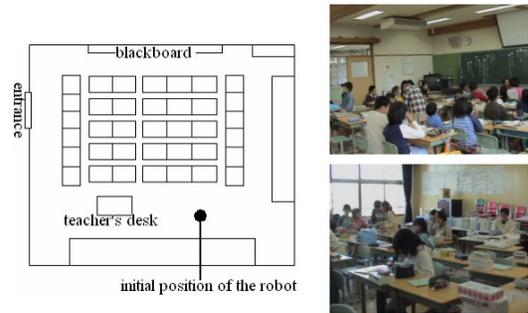


図4 実験環境
Fig.4 Environment settings

前提の下では、友達関係は同伴行動といった単純な集団行動を観察することで推定が可能であると考えられる。なお、本研究では友達関係の推定という目的のために、子供の間での行動や子供からロボットへの行動といった詳細な観察や区別は行わず、むしろロボットの周囲に生じる子供の間の人間関係が友好的なものが主体かどうか注目する。

そこで、ロボットは無線タグによって同時に個人識別することによって判別する同伴行動によって友達関係を推定する。ロボットは無線 ID タグの情報から常にロボットの近傍の人々の ID を取得しており、半径 1 ~ 2m 以内の人々を認識可能である。ここで、ロボットの近傍に滞在している人を広い意味でロボットと対話しているとみなす。このとき、ロボットは常に人 A のロボットとの対話時間（つまり、近傍滞在時間）(T_A)、また人 A と人 B が同時にロボットと対話していた時間（つまり、近傍同時滞在時間）(T_{AB} 、ただしこれは T_{BA} と等しい) を積算することができる。ここで、人 A と人 B との推定友達関係 ($Friend(A \rightarrow B)$) を以下のように定義する：

$$Friend(A \rightarrow B) = if(T_{AB}/T_A > T_{TH}) \quad (1)$$

$$T_A = \sum if(observe(A) \text{ and } (S_t \leq S_{TH})) \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$T_{AB} = \sum if(observe(A) \text{ and } observe(B) \text{ and } (S_t \leq S_{TH})) \cdot \Delta t \quad (3)$$

なお $observe(A)$ は単位時間 Δt 秒間に一度でもロボットが人 A の ID を観測している時に真となる関数であり、 $if()$ は括弧内が真のときに 1、それ以外は 0 となる関数である。また、 T_{TH} は同時滞在時間に関する閾値である。さらに、我々は S_{TH} なる閾値を設けた。これに伴って、式 (2)(3) に示すように時刻 t においてロボットの周囲の人数 S_t が S_{TH} 以下の場合にのみ T_A と T_{AB} を積算する。これは、ロボットの周囲の滞在人数が多ければ多いほど、複数の友達グループや無関係の他人が同時に滞在してしまい、友達関係推定に影響する可能性があるため、これを取り除くための閾値

表 1 子供の特性についての質問内容とその結果

Table 1 Questionnaire for attribution

質問	結果
Q.1: ロボットと友達になれそうか?	avg. 3.89 (s.d. 0.84)
Q.2: ロボットの仕組みを知りたいか?	avg. 4.38 (s.d. 0.83)
Q.3: 日頃、屋外で遊ぶか、屋内で遊ぶか?	屋外: 26 屋内: 11

(Q.1, Q.2 は 5 をポジティブとする 5 段階尺度の結果)

である。

4. 小学校での長期相互作用実験

開発したロボット Robovie を用いて小学校で二ヶ月間のフィールド実験を行った。本章では実験結果とそこから得られた知見について報告する。

4.1 方法

実験は奈良女子大学附属小学校において行われた。5 年生のあるクラスに属する生徒 37 名 (男子 18 名、女子 19 名) が実験に参加した。二ヶ月の実験期間中に、合計で 32 日間実験が行われた (期間中に 40 日の登校日があったが、そのうちの 8 日は学校行事のために実験が行われなかった)。ロボットは教室の中に置かれ (図 4)、子供たちは昼食後の約 30 分間の休憩時間の間自由にロボットと相互作用した。

子供たちはロボットと相互作用する際に無線タグの埋め込まれた名札を身につけるように求められた。ロボットは相互作用の際に認識したタグを記録することで、個々の子供たちの対話時間を記録した。この記録は事後に相互作用の分析と、友達関係推定に用いられた。また、実験開始前に質問紙調査によって子供それぞれに、友達の名前を 5 名まで列挙してもらうように求めた。また、ロボットへの興味などに関する質問紙 (表 1) への回答を求めた。

4.2 長期的な相互作用に関する結果

図 5 に子供たちのロボットとの相互作用の移り変わりを示す。縦向き点線は二ヶ月間の間の 9 週間の各週を示す。この 9 週間を過去の類似研究 [7] を参考に 3

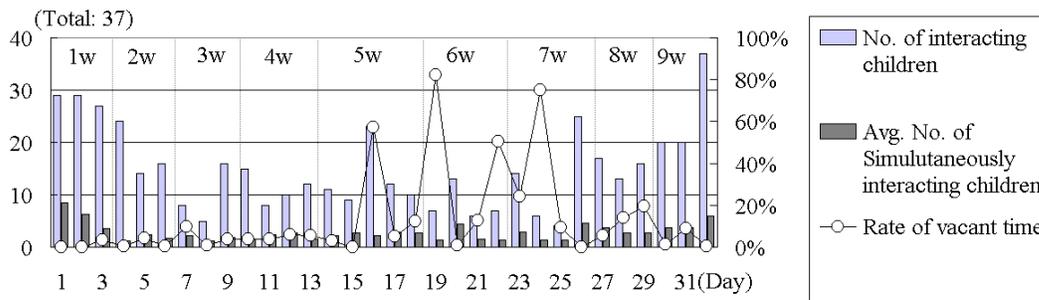


図 5 子供たちとロボットとの相互作用の遷移
Fig. 5 Transition of the interaction between children and the robot

つの主要なフェーズに分類することで二ヶ月間の相互作用の移り変わりを記述する。

第 1 フェーズ (1st-2nd week): 混雑期

初日と二日目に子供たちはロボットの周りに密集した(図 6-a)。初日の最大時には 17 人の子供がロボットの周りに同時に滞在した。第 1 週から 2 週目の間、ロボットはまだ目新しく、ロボットの周りには常に誰かが滞在し、ロボットの空き時間(誰もロボットと相互作用していない時間)はほぼ 0 であったが、ロボットの周りに集まった子供の数は徐々に減少していった。この期間に以下のような興味深いシーンが見られた:

- 多くの子供たちはロボットが子どもたちの名前を呼ぶ行動に興味を示した
- 数人の子供がロボットに名前を読んでもらおうと名札をロボットのカメラに向けて示した(図 6-c)。
- 「抱擁」ビヘービアは人気であった(図 6-d)。

第 2 フェーズ (3rd-7th week): 安定期

この期間中、毎日約 10 人の子供がロボットの周りを訪れ、その一部の子供たちがロボットと相互作用した。雨が降った日には、日ごろ外で遊んでいる子供たちがロボットと相互作用したため、結果としてロボットと対話した子供の人数が増加した。この 5 週間の間にロボットと対話した子供の数は徐々に減少するとともに、空き時間が増加した。ロボットの「秘密を話す」ビヘービアは第 4 週に初めてあらわれ、子供たちの間で流行した(図 7-a)。この期間の間に、以下のような興味深いシーンが見られた:

- 子供 A は「秘密を話す」ビヘービアを観察し、それを友達に「ロボットが、もっと遊んだら秘密を教えてあげるよ、と言ったよ」と話した。
- 子供 B はロボットに「秘密を教えて」と言った。
- 子供 C はロボットに秘密を伝えて頼んだが、ロボットは話さなかった。子供 D はそれを見ていて以前聞いたロボットの秘密を子供 C に話した。

ロボットは「見かけ上の学習」機構によって徐々に新しいビヘービアを実行するようになり、これは子供た



図 6 第 1-2 週の実験風景
Fig. 6 Experiment scenes (1st-2nd week)



図 7 第 3-7 週の実験風景
Fig. 7 Experiment scenes(3rd-7th week)

ちの注意を集めた:

- ロボットの目が隠されたときに(図 7-b)、ロボットはそれを払いのけて「見えない」と言う新しいビヘービアが出現するようになった。この新しいビヘービアはとても人気であり、多くの子供たちがロボットの目を隠そうとするようになった
- ロボットは歌を歌うようになり、それを見た子供たちは一緒に歌を歌うようになった



図8 第8-9週の実験風景
Fig.8 Experiment scenes (8th-9th week)

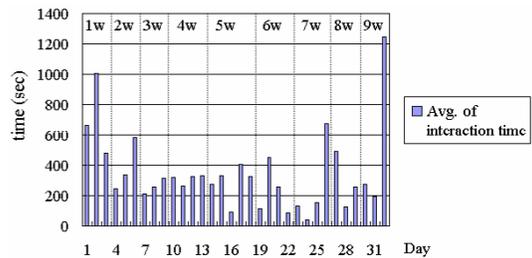


図9 「半数以上」群のロボットとの相互作用時間
Fig.9 Average interaction time of "more than half" group

第3フェーズ (8th-9th week): 別離期

ロボットの周囲を訪れる子供たちの数はこの2週間間に増加したが、ロボットと実際に相互作用した子供の数は増えなかった。実験観察者が子供たちの様子を観察した限り、多くの子供たちは単にロボットの周囲を訪れ、相互作用を少しの間観察していた。8週目の冒頭に教室の担任の先生が「ロボットが9週目の終わりにいなくなる」と伝えたため、これが子供たちの行動に影響した可能性があるといえる。

「秘密を話す」行動は子供たちの間で良く知られるようになった。多くの子供たちはロボットに秘密を話すように求めることに夢中になった。ロボットから聞いた秘密を子供たちは黒板に列挙したりもした(図8-a)。ロボットが「Robovieは担任の先生が好きだよ」と言う秘密を話した時の影響がもっとも大きく、ロボットがこれを話した直後に何人かの子供が教室を飛び出してこれを先生に伝えに行った。

最後の日には子供たちがロボットのお別れ会を開いた。お別れ会では、子供たちは一列になってロボットと一人ずつ遊んだ(図8-b)。

ロボットと長期にわたって相互作用した子供

この3つのフェーズをより詳細に分析するために、我々は子供たちをロボットとの対話量に基づき二つのグループに分類した。「半数以上」群にはロボットと32日の実験期間のうちの16日より多くロボットと対話した子供たち10名(男子4名、女子6名)を、「半数以下」群にはロボットと16日以下の対話日数であった残りの子供たち27名(男子14名、女子13名)を分類した。図9には「半数以上」群の相互作用時間の平均を、図10には「半数以下」群の平均を示す。

グラフの比較から、ロボットとより長期間にわたって相互作用した「半数以上」群の子供たちは2ヶ月間継続してロボットと対話していたものの、「半数以下」群の子供たちは主に第1フェーズと第3フェーズでロボットと対話していたことが分かる。つまり、「半数以上」群の子供たちはロボットと友好的な関係を構築し、ロボットと遊び続けたため、結果としてほぼ常に誰かがロボットと対話していた、と言える。

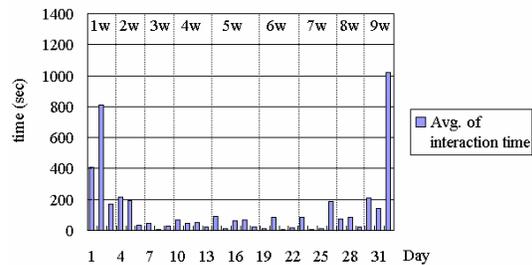


図10 「半数以下」群のロボットとの相互作用時間
Fig.10 Average interaction time of "less than half" group

4.3 子供たちの特性の相互作用への影響

さらに、子供たちの特性(興味や動機など)がロボットとの相互作用にどのように影響したのかを分析した。表1は子供の特性に関する質問紙調査の結果である。この質問紙はこの3つの質問からなる(Q.1とQ.2には5段階尺度法が用いられた)。

ロボットとの対話時間とQ.1、Q.2とのピアソン積率相関を計算した(なお、データ数が37であるため、絶対値0.3246以上の相関値が統計的に有意となる)。結果として、友達としての対話動機(Q.1)は対話時間と正の有意な相関があったものの、機械興味は(Q.2)有意な負の相関があることが見出された。性別の影響と対話機会の影響(Q.3)に関しては分散分析による比較を行ったところ、対話機会(Q.3: 日ごろ屋外で遊ぶタイプか屋内で遊ぶタイプか)に関して有意差が見られた($F(1, 35) = 4.39, p < .05$)。つまり、日ごろ屋内で遊ぶと答えた子供たちはロボットとより長く遊ぶ傾向があった。性別に関しては有意差は見られなかった($F(1, 35) = 2.37, p = .13$)。表2にこれらの相関(Q.1、Q.2)と分散分析(性別とQ.3)の結果を示す。

一方、性別による興味の違いを検証した。表3は質問紙調査の各質問の回答に対して、男女間での分散分析を行った結果である。Q.1とQ.2では男女間において $p < .05$ で有意差が認められた。Q.1では女子の方が高い得点をつけ、Q.2では男子の方が高い得点をつ

表 2 子供の特性とロボットとの相互作用の相関

Table 2 Correlation between attributions and interaction

	相関 / 検定結果
性別	有意でない
友達動機 (Q.1)	0.35 *
機械的興味 (Q.2)	-0.40 *
対話機会 (Q.3)	有意 *

(*は $p < .05$ を示す)

表 3 男女間での分散分析の結果

Table 3 ANOVA result for gender comparison

	Q.1	Q.2
男子	3.61	4.67
女子	4.16	4.11
F 値	4.24*	4.68*

表 4 相互作用時間に関する重回帰分析

Table 4 Multiple regression analysis for interacting time

特性	項	偏回帰係数	値
性別	A_g	α_g	-0.003
友達動機 (Q.1)	A_f	α_f	0.315
機械的興味 (Q.2)	A_m	α_m	-0.331
対話機会 (Q.3)	A_c	α_c	0.232

けた。以上の結果より、男子はロボットのことを「もの」「機械」として捉える傾向にある。それに対し、女子は今回実験に用いたロボットを「人に近い(感情移入しうる、没入感を得ることのできる)存在」として捉える傾向にあるといえる。

興味や性別の影響の大きさを検証するために、ロボットとの対話時間に関してこれらの属性との重回帰分析を行った。推定対象の計算式は以下である：

$$T = \alpha_g \cdot A_g + \alpha_f \cdot A_f + \alpha_m \cdot A_m + \alpha_c \cdot A_c + C$$

上式において T はロボットとの対話時間を、 $A_g, A_f, A_m,$ と A_c は表 4 に示すように子供の各属性についての係数値を表す。 C は余りとなる定数である。重回帰分析の結果得られた標準偏回帰係数を同じく表 4 の右側に示す。重相関係数は 0.567 であったことから 32% の対話時間がこの重回帰式から説明されたと言える。また、この式の有意性は分散分析により示された ($F(4, 32) = 3.79, p < .05$)。

これらの実験結果から、ロボットを機械的ツールではなく対等な友達とみなす動機が子供たちにロボットとの相互作用を維持させる手助けをしていたといえる。

4.4 友達関係推定についての実験結果

第 3.2 節で提案したメカニズムに従って、子供たちの間の友達関係をロボットとの相互作用の際の集団行動から推定し、この推定が実際の友達関係とどの程度一致しているかを分析した。子供たち間の友達関係の数はとりうる全ての関係数に対して相対的に少ない

表 5 友達関係推定の結果

Table 5 Estimation results with various parameter settings

被覆率 信頼度		T_{TH}					
		0.3	0.2	0.1	0.05	0.01	0.001
S_{TH}	2	0.01	0.01	0.04	0.11	0.23	0.24
		1.00	0.50	0.36	0.41	0.28	0.26
	5	0.00	0.00	0.07	0.23	0.67	0.81
		-	-	0.88	0.44	0.24	0.19
	10	0.00	0.00	0.00	0.22	0.78	0.94
		-	-	-	0.47	0.20	0.17

(-) はこの推定で友達関係が一つも推定されず、信頼度が計算出来なかったことを意味する)

ため、実験結果の分析は推定された関係の適切さ(信頼性:reliability と被覆率:coverage)によって行った^[13]。これは、web 検索のような情報検索技術の評価(precision と recall) と類似している。被覆率は推定結果が全ての正答のうちのどれ程の正答を推定に含んでいるかを示し、信頼性はこの推定がどの程度正答を含んでいるかを示す。一般に信頼性と被覆率はトレードオフの関係になると考えられる。つまり、より多くの正答を推定しようとした場合(被覆率が大きい)には誤った推定も多くなる(信頼性が低い)。信頼性と被覆率は以下のように定義される：

$$\text{信頼性} = \frac{\text{推定された友達関係の正答数}}{\text{推定された友達関係の総数}}$$

$$\text{被覆率} = \frac{\text{推定された友達関係の正答数}}{\text{正しい友達関係の総数}}$$

表 5 および図 11 に閾値 (S_{TH} と T_{TH}) を変化させながら行った推定の結果を示す。図 11 において *random* とはすべての関係が友達であるとみなす無作為な推定の結果である。総計 1332 関係中の 212 が友達関係であるから、このような推定の信頼性は 15.9% である。つまり、*random* に示される結果は提案する推定手法の性能の下限を示すといえる。なお、「正答」および「正しい友達関係」とは質問紙調査により得られた友達関係を意味する。この質問紙調査による主観報告も真の友達関係を必ずしも表さないため推定が完全に主観報告と一致することは困難であるが、人間の心の中を覗くことは出来無いため真の友達関係を調査することもやはり難しい。

図中の他の系列は S_{TH} を変化させた場合の推定結果の推移を表す。各系列において個々の点は異なる T_{TH} に対応する。明らかに、信頼性と被覆率の間には T_{TH} によってコントロールされるトレードオフがある。 S_{TH} はトレードオフに対しては影響が少なく、本実験では、 $S_{TH} = 2$ は小さい被覆率に関しては信頼度の高い推定を行うものの、全般には $S_{TH} = 10$ と $S_{TH} = 5$ が良い推定結果を示した。以上の結果から、

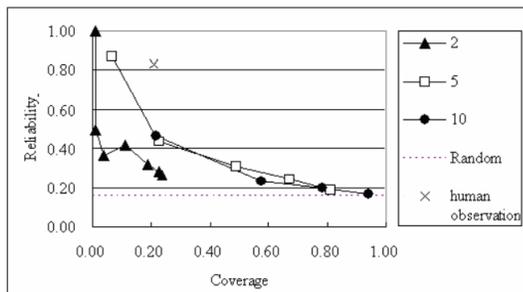


図 11 友達関係推定の実験結果

Fig. 11 Illustration of estimation results

提案手法により全体のたとえば 10% の友達関係の推定は約 80% 信頼性で実現され, 30% の友達関係はほぼ 40% の信頼性で実現された。

5. 考察

5.1 長期的に継続する相互作用のための設計の効果

実験結果からロボットは 2ヶ月に渡り主にロボットを友達とみなした子供たちと相互作用を続けたことが分かった。さらに, 2.3 節に示したビヘービア設計の影響を, 実験の際の子供たちの行動やコメントを分析することにより調査した。

1) 名前を呼ぶこと

従来研究^[7]の場合と同様に, 多くの子供たちはこのビヘービアに興味深いと思ったようである。実験開始すぐ, ロボットが名前を呼ぶということを発見した子どもたちは, 何とかして自分の名前を呼んでもらおうと試行錯誤を繰り返していた。どうすれば呼んでもらえるのかを友達と相談したり, 名札をロボットの目のカメラのところ近くに近づけてみたり, 名前をロボットの前で言ってロボットに覚えさせようとしている様子も見られた。このような様子から, 我々はこの名前を呼ぶことがロボットにとって社会的な相互作用のきっかけとなる主要な機能ではないかと考える。

2) 見かけ上の学習

一部の子供たちはロボットのビヘービアの種類が増加してきたことに気がついた。以下はある子供の感想文の一部である:「私は, ロボビーと遊んでとても楽しいです。最近『パトロール』と言います。それで, どこへパトロールをしに行くのかなと思いました。また『ロボビーって可愛い』とも言って私は『可愛いよ』と言います。また, アルプス一万尺・いないいないバニーなどしてくれます。『痛い…痛い』と言っているときもあります。そして『お腹空いた』と言っていて食べ物といえば電気なのだと思います。」と, 滞在時間の増加にもなって増えていくビヘービアの虜になって長期間遊んだ子がいた。さらに, 「いろいろな言葉

をしやべってくれておもしろかったです。たとえば, 『しゅわっち』とか言ったり (K 君がそう言っていました) …」のような感想からもわかるように, 友達との間で発見したビヘービアについて話題になることもあった。また「どんどん言葉が多くなって話しやすくなりました。」と感じた子どももいた。

初めの 1~2 週間目に遊び続けた子どもたちは, ビヘービアが増えていくこと気づいたようだったが, 最初の頃にロボットと遊ぶのをやめてしまった子どもたちはその後あまりロボットと対話しなかったため, このメカニズムの影響が少なかった。ある子供は「おしゃべりはできるけど, 同じことを言うのでちょっとつまんなかったです。」とコメントした。また, ビヘービアを増やしていくタイミングがその子の興味をそそるタイミングより遅くなってしまうと「最近同じ動作ばかりで飽きてきました。」という子どもも出てきていた。このメカニズムは長期的に相互作用を持続することには影響したものの, ビヘービアの増加に関してはより適切な調整方法を見出す必要があるようである。

3) 秘密を教える

ロボットは「秘密を教える」行動を, 「見かけ上の学習」機構に従って実行した。つまり, より長時間ロボットと対話した子供は, より多くの秘密の事柄をロボットに教えてもらえるように設計されていた。実験開始後 4 週目からこの「秘密を教える」ビヘービアが出現するようになってきた。人どうしの相互作用においても, 相手が秘密を教えてくれるということは自分がその相手に認められたような気がして嬉しいものである。この「秘密を教える」ビヘービアは「名前を呼ぶ」ビヘービアと同様に人気を集めたのは, このような理由からかもしれない。最初に出現する秘密ビヘービアは「さん, Robovie の秘密, 仲良くなったら教えてあげるね。」というものである。この発話を聞いて, それまでロボットに対して遊んであげている, 相手をしてあげているといった支配的な態度を取っていた子どもが, ロボットに対して「お願い, 秘密を教えて!」というように下手に出るような様子も見られた。このきっかけによって, 人がロボットに対して態度を変化させているのも興味深い。

「Robovie は, 誰が何回きてるかわからないはずなのに『仲良くなったら』と言っていて, 実際に何回も遊んでいる人には教えていて, もしかしたら自分の中ではこの人は毎日きてくれるとかわかってるのかなと思いました。」や「毎日良く遊んでいる人には, ロボビーの秘密とかも教えていました。僕は雨の日しか遊ばなかったのだから, 秘密は教えてもらえませんでした。5 つまで分かっている人もあります。」といった子どもたちの感想から「たくさん遊ぶと秘密を少しずつ教え

てくれる」という仕組みには子どもたちは気づいていたようである。

数人の子供たちはロボットから教えてもらった秘密の事柄の数を競い合った。ある子供は「私は秘密を調べるために Robovie と遊んだ」と答えた。2ヶ月の実験期間の終わりごろには、ロボットとよく遊んだ子供たちがそれまでにロボットから聞き出した秘密をみんなで総合させて、それを黒板に書き上げている様子が見られた。このような出来事は「秘密を教える」ことが、少なくともロボットとよく遊ぶ子供たちの注意を引き、相互作用を持続することに有用であることを示唆していると言える。

5.2 子供の特性の影響

個々の子供の特性も相互作用に影響した。「ロボットと友達になることができそう」という意欲をはじめに持っていた子どもは長時間または長期間ロボットの前に滞在する傾向にあるということがわかった。ただし、男女間でロボットに対して持つ興味(男子...機械的な部分, 女子...情緒的な部分)は異なる傾向もあるが、長期間遊んだ子は性別の違いよりもむしろ「友達になることができそう」と思っていた傾向にあることがわかった。つまり、ロボットと友達になりたいと思い、またロボットの機構に興味を持たなかった子供たちは、ロボットと長期的に友好的な相互作用を持続する傾向にあった。この結果は、ロボットを単なる機械ではなく対等で友好的な関係を築くような対象であると感じさせることの重要性を示唆しているともいえる。

実際、ロボットと長期間遊んだ子供は「(ロボットが)人間と同じように寂しがったり喋ってほしがったりしています。」「ロボビーはロボットだけど、いつも見ていると人間のような存在です。」「私が慣れたからかもしれないけれど、人間と同じ感じがして、友達と一緒にいるみたいです。」という感想を述べている。

5.3 類似の実験研究との比較

同じ人間型対話ロボットを用いた実験として、和歌山大学附属小学校にて「ロボットの語学教育への適用の試み」が行われている^[7]。この実験では、1年生と6年生の子どもたちがそれぞれ2週間、ロボット Robovie との相互作用を行った。その結果の一つとして「ロボットは子供たちと対話的な関係を構築したものの、平均的には1週間以上はこの関係が続かなかった」と報告されている。

一方、今回の実験では図5に示すように2週間を過ぎた後も一部の子ども達によって長期的な相互作用が行われ、ロボットの空き時間も少く、ほぼ常に誰かがロボットと相互作用していたことがわかった。このように以前の実験と今回の実験のロボットに関する大きな相違点として、以下の3点が挙げられる。

1) ロボットが話す言語

以前の実験ではロボットは語学教育への適用を試みていたため英語のみを話していた。しかもネイティブの発音であったため子ども達にはロボットの話している内容が理解されにくかった。この点がロボットと子どもの相互作用を妨げている可能性がある。これに対して今回はロボットは日本語で話したため、ロボットの話している内容が子どもたちに理解され、以前の実験時に比べて相互作用が円滑に行われ長期的な関係を築くことにつながったと考えられる。

2) 実装したビヘービア

実装したビヘービアについては、以前の実験でも「名前を呼ぶビヘービア」は実装されていて、今回と同様に、子どもたちをロボットとの対話に引き込む効果があったことを報告している。今回はこれに加えて、滞在時間によるビヘービアの追加を行ったり、秘密の暴露をしたりするビヘービアを加えることによって、子どもたちはさらにロボットとの対話に引き込まれ長期的な相互作用を行った。

3) ロボットを設置した場所

前の実験を行った小学校は、教室と廊下の間に壁が存在せず、廊下が半ばオープンスペースの空間になっていた。3クラスをつなぐ廊下に同一のハードウェア、ソフトウェアを持つロボットを2台置いた。これに対し、今回の実験では壁で囲まれた教室内に1台のロボットを置いた。1つの教室に1台のロボットを置いたことで、ロボットに対する愛着がより湧きやすかったようだ。例えば教室にやって来る見学者や他のクラスの生徒にロボットの紹介をしていた。また、「ロボビー係」を自主的につくり、毎日ロボットの準備の手伝いをした。運動会が終わり、何日か経ってロボットロボビーが5年組に来ました。その日から約2ヶ月間5年星組の一人となることになりました。」という子どもの感想からもわかるように「私達のクラスのロボット」という意識が高まっていた。その様子はまるで教室で飼っている動物のようであった。そのようなクラス内の意識もあったせいも、一部の子どもたちがロボットの「世話」をしているようにも見えた。

5.4 友達関係の推定

友達関係の推定の結果、ロボットは質問紙から得られた友達関係全体の30%の友達関係を推定した場合は約50%の信頼性があり、全体の10%の友達関係を推定した場合には約80%の信頼性が得ることができた。さらに、被覆率は約80%という高いところまで得ることができた。この結果は、我々の従来研究における予備的検討^[13]の約2倍の性能である。これは、二ヶ月にわたってロボットが子供たちとの相互作用を持続させた結果、得られた相互作用に関するデータ量が増加

したことが影響したと考えられる。つまり, Robovie が子供たちとの相互作用をより長期的に持続したことにより, 友達関係の推定性能も向上した。

しかし推定の性能は十分に高いものであるとは言えない。今後のロボットによる友達関係の推定性能改善のために, 人間が観察によって友達関係を推定する場合との比較をおこなった。実験では, 実験観察者がロボットと子供たちの安全を確保するためにロボットの背後約 1m の所に常に待機していた(ただし, ロボットと子どもたちとの相互作用の手助けや指示は一切行わない)。この実験観察者が観察に基づいた友達関係の推定を行ったところ, 実験観察者は 54 の友達関係を推定した。そのうちの 45 の関係は質問紙調査の結果と一致した。つまり, 被覆率は 21.2% という低い値であったものの, 信頼度は 83.3% という高い値を得た(図 11 に human observation として示す)。我々は, このような人間による推定結果をロボットからの推定性能の実現すべき上限であると考える。

現在のロボットの推定能力は人間による推定に比べてまだまだ低い。このような結果となる理由に, 実験観察者は子供たちの中の「やり取り」を見聞きしていることが考えられる。たとえば, 誰と誰がどのような話をしているか, 仲良く話しているのか, けんかしているのか, といった単純な同伴行動以上の手がかりの影響は大きい。今後, 3.2 節で提案したモデルのように, ロボットが音声や表情などからその人の感情を読み取って利用できるようになれば, 友達関係の推定性能はさらに向上するのではないかと考えられる。

一方, 精度が低いなかでもこのようにロボットを使った友達関係の推定をすることの意義は大きい。一つの意義は, ロボットが社会の中で適応的に人間関係を認識する可能性が示されたことである。つまり, 周囲に存在する人が変わり, あるいはロボットが異なる人の集団の中に参加した場合にも, ロボットは推定した友達関係を基に周囲の人と関わりを持つことができる。また, もう一つの意義は, 自動化による規模の拡張可能性である。近年のセンシング技術の向上により空間的・時間的に大規模な人間の行動が, 精度は人間には及ばないものの, 自動的に観察できるようになってきた。これは, コンピュータが, 人間ほど知的ではないけれども, その高速な計算や大規模なデータ管理, データ転送能力と言った人間にはできないことを実現することで人間社会を変えて来たように, ロボットからの自動的な友達関係推定も新しい研究, 技術の可能性へとつながるものであると我々は考える。

6. 結論

本稿では, 人間型対話ロボット Robovie を用いた小学校での長期相互作用実験の試みについて報告した。Robovie は無線タグによる個人識別機能をもとに, 子供たちの名前を呼び, また見かけ上の学習といった機構により対話ビヘービアを個人に適応させる機構を持つ。このロボットを小学校の教室において二ヶ月間昼休みに自由に子供たちと相互作用をさせたところ, ロボットを友達だとみなした一部の子供たちとは長期的に相互作用を続け, 友好的な関係を築くことができた。また, 長期的に相互作用を続けたことにより, ロボットは子供たちとの間の友達関係をより安定して推定することができた。

ロボットが長期的に子供たちと相互作用を続けることは, ロボットが社会のなかで有用な役割りをもって活動しつづける上でかかせない本質的な能力である。たとえば, 我々が過去に試みたロボットの英語教育への適用の試み^[7]においてもロボットは 1 週間を過ぎたころから飽きられはじめたが, もし相互作用を真に長期に渡って続けることができれば実用的なレベルの効果をもたらすことも可能になると考えられる。これ以外にも, 長期的な相互作用が可能になると, これは多くの倫理的な問題も含むが, たとえば子供たちの遊び相手になりながら教室のなかで子供たちとの人間関係に影響を与え, いじめ問題を緩和するといった将来的なロボットの可能性が現実的になると考えられる。このように, 我々は, 本稿で示したようにロボットが友好的な関係を築き, そして人々との関係を理解することは, ロボットが社会的な存在として人々に受け入れられるための基本機能となってゆくと考えられる。

謝辞

本研究は独立行政法人情報通信研究機構の研究委託「超高速知能ネットワーク社会に向けた新しいインタラクティブ・メディアの研究開発」により実施したものである。本研究を実施するにあたりご協力いただいた奈良女子大学附属小学校の先生および生徒の皆様方に感謝します。

参考文献

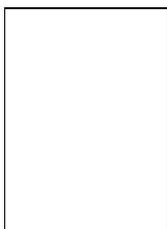
- [1] T. Shibata, K. Tanie, Physical and affective interaction between human and mental commit robot, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and automation*, pp. 2572-2577, 2001.
- [2] B. Scassellati, Investigating Models of Social Development Using a Humanoid Robot, *Biorobotics*, MIT Press (2000).
- [3] 小嶋秀樹, 高田明, 社会的相互行為への発達のアプローチ — 社会のなかで発達するロボットの可能性, *人工知能学会誌*, Vol.16, No.6, pp.812-818, (2001).

- [4] T. Kanda, and H. Ishiguro, Friendship estimation model for social robots to understand human relationships, *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN2004)*, (2004).
- [5] 仲川こころ, 小杉大輔, 安田有里子, 小嶋秀樹, Keepon: 子どもからの自発的な関わりを引き出すぬいぐるみロボット, 人工知能学会研究会資料 *SIG-SLUD 2004* 年6月, pp.7-14, (2004).
- [6] 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, 電子情報通信学会論文誌 *D-I*, Vol.J85-D-I, No.4, pp.380-389, Apr. (2002).
- [7] 神田崇行, 平野貴幸, ダニエル イートン, 石黒浩, 日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp.636-647, (2004).
- [8] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, T. Ono and K. Mase, A constructive approach for developing interactive humanoid robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1265-1270, (2002)
- [9] G. W. Ladd, J. M. Price, and C. H. Hart, Preschooler's behavioral orientations and patterns of peer contact: predictive of peer status? In Asher S. R. & J. D. Coie (Eds). *Peer rejection in childhood*, 90-115. Cambridge Univ. Pr. (1990)
- [10] S. R. McConnell, and S. L. Odom, Sociometrics: Peer-referenced measures and the assessment of social competence. In P.S.Strain, M.J.Guralnick, & H.M.Walker (Eds), *Children's social behavior: Development, assessment, and modification*, 215-284, Orlando: Academic Press, (1986)
- [11] S. R. Asher and S. Hymel, Children's social competence in peer relations: Sociometric and behavioral assessment. In J. D. Wine & M. D. Smye (Eds.), *Social competence*, pp.125-157, New York: Guilford, (1981)
- [12] J. D. Coie and J. B. Kupersmidt, A behavioral analysis of emerging social status in boys' groups. *Child Development*, Vol. 54, pp. 1400-1416, (1983).
- [13] 神田崇行, 石黒浩, 対話型ヒューマノイドロボットからの日常生活の中の友達関係の推定, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.8, pp.2098-2104, (2004).

(2002年1月1日受付, 1月1日再受付)

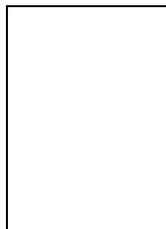
著者紹介

神田 崇行 (正会員)



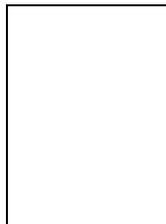
1998年京都大学工学部情報工学科卒業。2000年同大学大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程修了。2003年同専攻博士課程修了。博士(情報学)。現在, ATR 知能ロボティクス研究所研究員。ヒューマンロボットインタラクションに興味を持つ。(HI学会入会申込中)

佐藤 瑠美



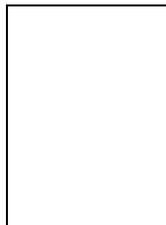
2004年3月まで, 奈良女子大学生生活環境学部生活環境学科在学, ATR 知能ロボティクス研究所実習生。同学部を卒業し, 2004年4月より株式会社阪急百貨店に入社。

才脇 直樹



平成3年3月, 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年4月, 同博士後期課程へ進学し, 平成5年4月, 同中退。同年5月, 大阪大学基礎工学部助手。平成9年4月改組により大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系助手。平成10年3月工学博士(大阪大学), 平成14年ロンドン大学脳認知発達研究所, 平成15年スタンフォード大学電子音楽音響研究所各客員研究員, 現在, 奈良女子大学生生活環境学部助教授, ATR 知能ロボティクス研究所客員研究員, 立命館大学COE推進機構客員助教授, 大阪産業創造館服コンピュータラボ研究員など。触感の再現と認知, 質感を表現するCG, ロボットと人間のインタラクション, 音楽情報処理などに関連する研究に従事。情報処理学会, システム制御情報学会, 日本認知科学会各会員

石黒 浩



1991年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程修了。工学博士。同年山梨大学工学部情報工学科助手, 1992年大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994年京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻助教授。2001年, 和歌山大学システム工学部情報通信システム学科教授。現在, 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授, ATR 知能ロボティクス研究所第二研究室客員室長。視覚移動ロボット, 能動視覚, パノラマ視覚, 分散視覚に興味を持つ。