

人とロボットの相互適応は意思疎通の成立を促進するか： 「手さし」によるロボットから人への意図伝達場面における 実験的検討

Does mutual adaptation of a human and a robot promote communication? :
An experimental study on reaching out robot's hand for communicating its intention

高岡勇紀 尾関 基行 岡 夏樹
TAKAOKA Yuki OZEKI Motoyuki OKA Natsuki

京都工芸繊維大学
Kyoto Institute of Technology

An infant cannot convey needs, such as “milk” or “sleep”, well at first. However, he or she comes to be able to convey the needs well as it grows up. It is thought that mutual adaptation between infants and their caregivers occurs during their growth. Similarly, when a way of conveying intentions from a robot to a human is not determined, does their mutual adaptation promote communication? We take a task, in which a robot tries to convey its intention to a human, as an object of study. We compare three cases: a human adapts to a robot (case 1), a robot adapts to a human (case 2), and a robot and a human adapt to each other (case 3). The experimental results suggested that success probability of intentions conveyance decreases in order of case 1, case 2 and case 3. Additionally, we have found that the robot in case 3 gives higher anthropomorphic impression than other cases.

1. はじめに

エージェントが人とのより自然なインタラクションを行うために、状況に応じて適切な行動を選択し、実行できることが大切である。特に人との直接インタラクションを行う場合、状況や過去の経験から学習し、人に適応していくことが大切である。しかし、人はエージェントよりも高い適応能力を持つので、エージェントが人に適応すると同時に人もエージェントに適応してしまう。HAI (Human-Agent Interaction) においてこの相互適応現象は重要な課題の一つと考えられ、この現象を考慮したエージェントの学習、行動決定を行うインタラクションの設計をすることが重要と考える。

HAI において相互適応を考慮するために様々な研究がされている。これらの研究は方向性の違いにより大きく2つに分けることができる。一つはエージェントの言動によって人の適応を変化させようとする研究である。小松らは人間どうしのインタラクションの観察結果に基づき、意味獲得モデルを構築した [Komatsu 05]。人との間での相互適応を実現するために、人の適応の仕方を推定し、推定したものと人の発話の韻律情報を利用することでこのモデルを構築している。また、岡らは適応のためのインタラクションを設計するうえで参考になるものとして、母子間のインタラクションを挙げている [岡 06]。母子間インタラクションでは乳幼児が養育者に対し適応するだけでなく、養育者側も乳幼児の能力に応じた振る舞いを行うようになる。この認知能力に相当の差がある2者のインタラクションは人とエージェント間のインタラクションを設計するうえでヒントになると述べている。このように、人とインタラクションを行うとき、人の適応をエージェントの言動によって適切な適応に変化させることも、相互適応を考慮したインタラクション設計を考える上で重要である。

もう一つは人の適応を推測し、ロボットの適応を変化させることで人とのより自然なインタラクションにつなげようとする

研究である。長田らは行動決定過程として、他者意図の推定に基づく行動決定 (レベル 1) だけではなく、自身の意図を変更しないこと (レベル 0) と、「他者による自己の意図の推定」の推定 (レベル 2) を組み合わせ、これらを適切に選択するメタ戦略モデルを提案している [長田 10]。

本研究では人とのインタラクションにおいて、このロボット側の適応を調節する研究に着目し、相互適応を考慮したインタラクション設計を行うことを目指す。長田らはそれぞれのレベルにおいて他者のレベルを想定している。しかし、実際にロボットが人とインタラクションを行うとき、人のレベルを推定することは難しい。そこで、我々はロボットの行動決定のための推測レベルを次のように定義した。

レベル 0 : 自身の意図を伝えるために決められた行動をとる。

レベル 1 : 相手の行動から相手の判断基準を推定し、自身の行動を推定した相手の判断基準に従って決定する。

レベル 2 : レベル 1 同様、自身の行動を推定した相手の判断基準に従って決定する。レベル 2 ではさらに実行した行動に対する相手の学習内容を推定し、自身の行動決定に反映させる。

ロボットがインタラクション中に自身の推測レベルを変化させることで相互適応現象を考慮した学習ができると考えた。

そこで本研究の目的は推測レベルごとに人の適応 (印象) に変化があるか、学習がどのように進むか、実験を行い確かめることとした。実験場面としてロボットの行動による人への意図伝達場面を想定し、インタラクション中のロボットの推測レベルを固定にした。この実験結果をインタラクション中にロボットの推測レベルをどのように変化させるかを決定するための判断材料の一つとしたい。

2. 実験

本実験は、ロボットが被験者に「手さし」行動により意図を正確に伝えられるよう、被験者とのインタラクションを通して学習できるか確かめることを目的とする。

連絡先: 〒 606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町 1
京都工芸繊維大学 工芸科学研究科 情報工学専攻
インタラクティブ知能研究室, takaoka@ii.is.kit.ac.jp

2.1 実験タスク

ロボットが被験者に対し伝えたい意図として以下の3つの意図を用意する。

- ・リンゴをロボットの近くにおいてほしい (以下意図 A)
- ・リンゴを被験者に渡したい (以下意図 B)
- ・リンゴを目の前から除けてほしい (以下意図 C)

実験はすべて「ロボットは被験者に3つの意図のうち1つを選択し、被験者に伝えようとする」という設定で行う。被験者にはあらかじめ、ロボットが伝えようとする意図は上記の3つであることを伝えておく。

ロボットは3つの意図から1つ意図を決定し、「リンゴ」に手を伸ばす。このとき、3つのパラメータを変化させる。

- ・手をリンゴへ伸ばすときの手のひらの向き (以下手の向き)
- ・手を伸ばしたまま腕を上下に振るときの振幅 (以下上下振幅)
- ・手を伸ばしたまま頭を左右に振るときの振幅 (以下左右振幅)

本実験では手をリンゴへ伸ばしてから、腕を上下に振ると同時に頭を左右へ動かすまでを「手さし」とする。手さし行動のパラメータ (行動パラメータ) は (手の向き, 上下振幅, 左右振幅) を組とする。

被験者はロボットの手さしを観察し、その行動が3つの意図のうちどの意図からの行動かを推測する。被験者は推測した意図に沿うように、リンゴを動かす。ロボットによる被験者の行動認識はリンゴの位置で認識する。被験者の行動パターンは次の3つを基本とする。ロボットの行動が意図 A によるものと推測した場合は位置 A に、意図 B によるものと推測した場合は位置 B に、意図 C によるものと推測した場合は位置 C にリンゴを置く。他にリンゴを初期位置に戻す行動 (図 2 の⑦で説明する) がある。実験風景を図 1 に示す。

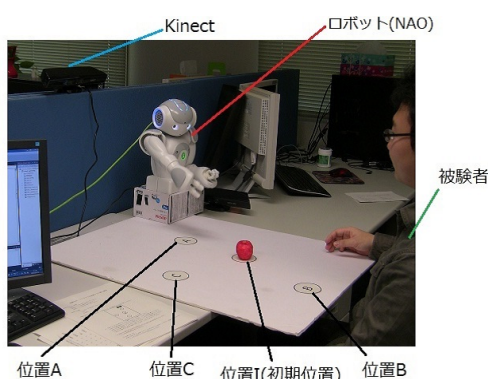


図 1: 実験風景

2.2 学習及び実験の流れ

本研究では意図ごとに行動パラメータ (手の向き, 上下振幅, 左右振幅) の3次元正規分布を仮定する。人とのインタラクションを通して、分布を更新し、各意図を伝えるための行動として適切な行動パラメータを学習する。分布の更新にはベイズ推定を用いる。実験で得られたデータからベイズ推定により分布の更新 (学習) を行う。各意図ごとの事前分布における平均値には事前に行った予備実験の結果を用いた。予備実験ではロ

ボットの行動パラメータをランダムに決定し、3つの意図のうちどの意図を表しているかを被験者に解答してもらった。

実験の流れを図 2 に示す。以下の説明における番号は図の番号と一致している。

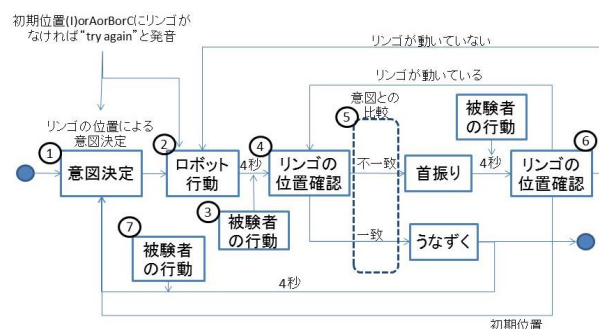


図 2: 実験流れ図

- ①意図決定 : リンゴの位置を認識し、リンゴが初期位置にある場合は3つの意図から、位置 A,B,C のいずれかにある場合は、その位置が表す意図を除く残り2つの意図からランダムにロボットの意図を1つ決定する。
- ②ロボットの行動 : 2.3 節で説明する実験設定に従って行動パラメータを決定し、手さしを実行する。
- ③被験者の行動 : ロボットの行動を被験者が観察する。被験者は観察したロボットの行動がどの意図によるものか推測し、推測した意図を表す位置にリンゴを移動する。被験者へはどの意図か判別できなかった場合は、リンゴを動かさなくてもよいとあらかじめ伝えた。
- ④リンゴの位置確認 : ロボットの行動から4秒後リンゴの位置をロボットが認識する。リンゴが動いている場合、止まるまで待機し、その後もう一度認識する。
- ⑤意図との比較 : ロボットの意図とリンゴの位置を比較する。一致している場合、ロボットはうなずく。異なる場合は首を横に振る。
- ⑥リンゴの位置確認 : 首振り後、被験者の行動認識のためリンゴの位置を確認する。リンゴが動いていない場合は再度行動決定を行う (②へ)。リンゴが位置 A,B,C のいずれかに動いている場合はロボットの意図と比較する (⑤へ)。リンゴが初期位置に戻された場合は①にもどる。
- ⑦被験者の行動 : 被験者へは「ロボットの行動に対する自分の行動が正しかったと感じた時点でリンゴを初期位置に戻してください」とあらかじめ伝えた。ロボットのうなずきにより、被験者が正しかったと感じた場合は初期位置にリンゴを戻し、正しかったと感じなければ、リンゴをそのままにすると考えられる。

2.3 実験設定

今回の実験は3つの設定で実験する。各実験設定はそれぞれ推測レベルと対応している。

2.3.1 実験1：人だけが適応（推測レベル0）

実験1ではロボットの各意図を表す行動パラメータを固定する（学習なし）。各意図を表す行動パラメータは予備実験で得られた平均値を利用する。ロボットの行動パターンを固定することで、意図をどの程度伝えられるようになるか実験により確認する。

2.3.2 実験2：ロボットだけが適応（推測レベル1）

実験2ではロボットの各意図を表す行動パラメータを変化させる（学習あり）。各意図ごとに分布を用意し、得られたデータにより学習（分布更新）する。初期分布の平均値には予備実験で得られた平均値を利用する。ただし実験2では、被験者がロボットの行動を観察し、最初にリングを置いた位置が表す意図の分布を更新する。すなわち、ロボットは自身の意図と被験者の行動を比較せず必ずうなづく。

2.3.3 実験3：相互適応（推測レベル2）

実験3では実験2同様、ロボットの各意図を表す行動パラメータを変化させる（学習あり）。初期分布の平均値には予備実験で得られた平均値を利用する。被験者の行動がロボットの意図と一致している場合は、その意図を表す行動として実行した行動に近い行動が選択されやすくなるよう学習を行う。異なっていた場合は首を振り、分布をずらす。例として、ロボットが意図Aを被験者に伝える場合を考える。意図Aを表す行動パラメータの分布に従って行動パラメータを決定する（このパラメータの組を行動Pとする）。行動Pを実行し、それを見た被験者がりんごを位置Bに移動した場合、ロボットは自身の意図と異なる行動を被験者がとったことにより首を振る。ここで今回の実験設定において推測レベル2を適応させるために一つの仮説を立てる。

仮説：ロボットの首振りを観察した被験者は常に、直前のロボットの手さし行動に対する自身の行動が間違っていたと学習する

先の例では、被験者はロボットの首振りを観察するとき、「行動Pは意図Bを表すものではない」と学習すると仮定する。この場面におけるロボットの学習は意図Bを表すための行動として、行動Pに近い行動が選択されないように意図Bの分布の平均値を変更した。

2.4 実験結果と考察

今回は工学系の大学生5名に対し実験1を、工学系の大学生6名に対し実験2を、工学系の大学生5名に対し実験3を行った。

2.4.1 実験3における発話内容の考察

実験3（推測レベル2）では、仮説を検証するために思考した内容を発話するよう指示した。ロボットが首を振った時の被験者の発話を調べた。ロボットが首を振ったとき、「違うのか」「じゃあこっちな」等のリングを置いた位置とロボットの意図が違うことを認識していることを表す発話があるもしくは無言でもリングを違う位置に動かした場合が多くみられた。このことから、仮説は概ね正しいと判断した。

例外として、被験者がリングを動かすより前に首を振る場面があった。初期位置にリングが置かれたままでも一定時間が経つとロボットは自身の意図を表す位置にリングがないと判断し首を振る。この場面でロボットは仮説に基づく学習を行っていないため、仮説の検証には影響しないと考えられる。

今回の実験では、被験者にロボットの変化する行動パラメータは何かを伝えていない。被験者の発話内容からロボットの意図を判断するために着目している点として、ロボットの目線、

行動の速さ、反応までの時間が挙げられる。実験においてこれらはすべて固定にしていたため、実際には違いはないが被験者によって感じる方向や速さ、時間の長さが異なることがわかった。したがって、今回の実験で用いた3つの値（手の向き、上下振幅、左右振幅）以外の値についても学習により変化させることでより自然なインタラクションにつながる可能性がある。

2.4.2 正当数による比較

各被験者に対し、ロボットが意図を伝える回数は15回とした。意図伝達成功の割合を測る指標として、正答数を定義する。ロボットの意図と被験者の第一印象（ロボットの行動を見て被験者が1回目にりんごを動かした位置）が一致していることを正答とし、実験回数15回中の後半7回における正答数を比較した。各実験ごとの平均値を図3に示す。実験回数は15回であったが、前半8回についてはどの条件においても、正答することが難しく、正答数の差が小さいため比較の対象から除外した。この正答数において、分散分析を実施したところ、

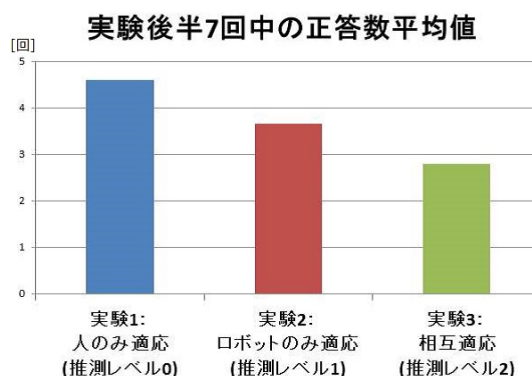


図3: 実験後半7回中の正答数平均値

条件の効果は認められなかった ($F(2, 13) = 1.22, p = 0.33$)。これは被験者が5,6名と少なかったために有意差がでなかった可能性が高いと考えており、今後被験者数を増やして、図3のグラフに表れている差が有意であることを確認する計画である。以上のことから、今回の実験タスクを達成するためには各意図を表す行動を固定にする方がロボット側が適応（学習）するよりも人にとってわかりやすく意図の判断が容易になる可能性がある。今回の実験では伝える意図を3つに固定していたため被験者が覚える必要のある行動パターンは3つのみであった。そのことに気が付いた被験者にとってロボットの意図を判断することは容易だったのではないかと考えられる。しかしながら、人の生活空間でロボットが活躍する場面において、ロボットが人に伝えたい意図はより多く、より複雑になることが予想される。ロボットの行動パターンが増えるため、ロボットの意図を判断することが難しくなる可能性がある。人とインタラクションする上で人の記憶による心理的負担を考慮し、個人適応によりその負担を減らしていく必要はあると考える。

2.4.3 アンケートによる印象評価

今回の実験では被験者に対し、実験終了時にロボットの印象を評価するために、5段階評価（1～5）のアンケートを行った。アンケートはBartneckらが提案した、ロボットに対する人の印象評価のためのアンケートに基づいて作成した[Bartneck 09]。本研究では、人らしさ（5項目）、好ましさ（5項目）、知能があるか（5項目）の3つの指標を評価するための項目を採用し、被験者にアンケートの意図を隠すため、関係のない項目5

つを追加し、ランダムに並べ替えた。アンケートの結果を図4に示す。

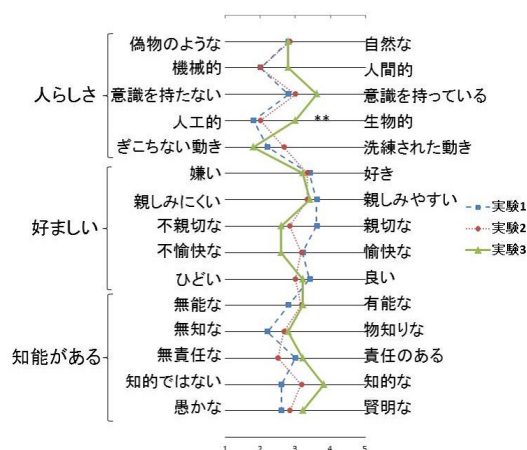


図 4: アンケート結果 (実験 1,2,3 の比較)

分散分析の結果、人らしさにおける生物学的か人工的かの項目において条件の効果は有意であった ($F(2, 13) = 9.75, p = 0.003$)。LSD 法を用いた多重比較によれば、実験ごとの平均の大小関係は「実験 1=実験 2 < 実験 3」であった ($Mse = 0.21, 1\%$ 水準)。その他の項目において条件の効果は認められなかった。しかし、各実験における平均値を見ると、人らしさの 5 つの項目すべてにおいて実験 2 の値が実験 1 の値と等しいかそれ以上の値となること、好ましいの 5 つの項目すべてにおいて実験 1 の値が実験 2 の値を上回ることが示唆されている。また、知能があるかの 5 つの項目すべてにおいて実験 3 の値が実験 1, 2 の値を上回る可能性が示唆された。

また、実験 3 の被験者には実験前にも同様のアンケートを実施した。実験前と実験後のアンケート結果を図 5 に示す。分散分析の結果、人らしさにおける機械的か人間的かの項目

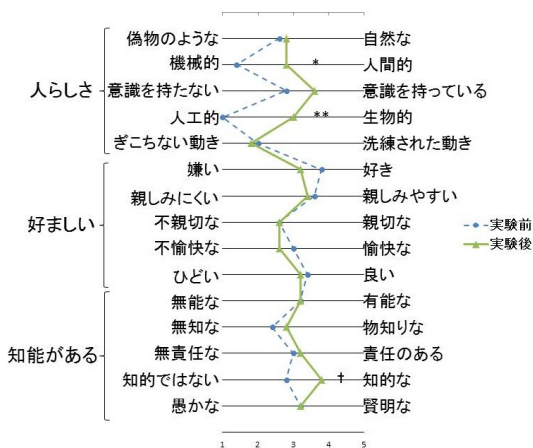


図 5: 実験 3 アンケート結果 (実験前と実験後の比較)

($F(1, 4) = 12.25, p = 0.02$) 及び人工的か生物学的かの項目 ($F(1, 4) = 40, p = 0.003$) において、実験前よりも実験後が有意に高かった。また、知能があるかにおける知的か知的でないかの項目において実験前よりも実験後が有意に高い傾向にあった。その他の項目において条件の効果は認められなかつ

た。しかし、平均値を比べると好ましいの 5 つの項目すべてにおいて実験前の値が実験後の値と等しいかそれ以上の値となること、知能があるかの 5 つの項目すべてにおいて実験後の値が実験前の値と等しいかそれ以上の値となることが示唆されている。

アンケートの結果から人らしさの項目において、実験 3 のロボットは実験 1, 2 のロボットに比べ生物学的な印象を与えることが分かった。実験 3 では実験 1 と異なりロボットの手さし行動は変化し、実験 2 と異なりロボットの反応は肯定と否定の両方を行う。これらが生物学的であると評価されたと考えられる。決まった行動を繰り返すのではなく、様々な行動をするロボットがより人らしい印象を与えることができる。これが実験前の動かないロボットとインタラクションを行った後との比較における人らしさの 2 つの項目の差につながったと考えられる。

3. まとめ

本研究では、人とロボットのインタラクションにおける相互適応現象は意思疎通の成立を促進するかというテーマについて、人のみ適応する場合 (推測レベル 0)、ロボットのみ適応する場合 (推測レベル 1)、人とロボットの双方が適応する場合 (推測レベル 2) の 3 つの場合を比較した。ロボットがインタラクション中に自身の推測レベルを変化させることで相互適応現象を考慮した学習ができると考えた。そこでまず推測レベルごとに人の適応 (印象) に変化があるか、学習がどのように進むか、実験を行い確かめた。実験ではロボットが自身の意図を人に伝える場面を想定し、ロボットの学習には多変量正規分布のベイズ推定を用いた。実験の結果、人への意図伝達の成功率がレベル 0、レベル 1、レベル 2 の順に高くなる可能性があることが示唆された。また、レベル 2 のロボットの方が他のレベルのロボットに比べ、より人らしい印象を与えることが分かった。今後の展望として、1) 人によって感じ方が異なる可能性のある固定した値を変化させることによる人の適応の違いを確かめる、2) 人の反応に応じてロボットの推測レベルを最適なものに变化させる、これら 2 点を考えている。

参考文献

- [Komatsu 05] Takanori Komatsu, Atushi Ustumomiya, Kentaro Suzuki, Kazuhiro Ueda, Kazuo Hiraki, Natsuki Oka: Experiments Toward a Mutual Adaptive Speech Interface That Adopts the Cognitive Features Humans Use for Communication and Induces and Exploits Users' Adaptations, International Journal of Human-Computer Interaction, Vol.18, No.3, pp.243-268, 2005.
- [岡 06] 岡 夏樹, 山田 誠二: 適応のためのインタラクション設計, 人工知能学会誌, Vol.21, No.6, pp.642-647, 2006.
- [長田 10] 長田 悠吾, 石川 悟, 大森 隆司, 森川幸治: 意図推定に基づく行動決定戦略の動的選択による協調行動の計算モデル化, 認知科学, Vol.17, No.2, pp.270-286, 2010.
- [Bartneck 09] C. Bartneck, Dana Kulić, Elizabeth Croft, Susana Zoghbi: Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots, International Journal of Social Robotics, Vol.1, No.1, pp.71-81, 2009.