

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：94301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21680022

研究課題名（和文） 振る舞い時空間モデル化と情報量モデルに基づく
ロボットと人間との自然な相互作用研究課題名（英文） Natural human-robot interaction based on modeling behavior
and information exchange

研究代表者

神田 崇行（KANDA TAKAYUKI）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・知能ロボティクス研究所・研究員

研究者番号：90374107

研究成果の概要（和文）：自然な対話を行うロボットの実現に向けた研究を進めた。自然な振る舞いの研究については、立ち位置のとりかたなどのロボットの自然な振る舞いのモデル化を進め、モノと一緒に見る、というインタラクションの計算モデルを明らかにした。振る舞いの流れの制御に関して、ユーザの認知負荷（情報を処理する負荷量）という視点から物事をとらえることにより、ロボットが移動していることが、好ましい話速に与える影響について明らかにした。人らしく対話するロボットが、人でもモノでも無い新たな存在となりつつあることが明らかになってきた。

研究成果の概要（英文）：We conducted studies toward realizing a robot that naturally interact with people. We developed a computational model of robot behavior that leads to feelings of "being together" using the robot's body position and orientation, in which people's proxemic behavior in joint attention situations is reproduced by detecting a partner's attention shift and appropriately adjust its body position and orientation in establishing joint attention with the partner. Further, we investigated the influence of a robot's speech rate, in which we found that participants prefer slower speech rate in a situation where the robot and participants talk while walking. Finally, in a study for analyzing users' interaction with a robot, we found that they often behave in a social way similar to what they do to other people, though they attributed less moral responsibility to the robot. It indicates that people perceive a robot as a new category beyond neither humans nor inanimate object.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2011年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
年度			
年度			
総計	20,700,000	6,210,000	26,910,000

研究分野：知覚情報処理・知能ロボティクス

科研費の分科・細目：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

日常生活の中で人間のパートナーとして活動するロボットが期待されている。我が国の進んだロボット技術が応用される好機であるが、その実現のためには人間との自然な関わり合い（インタラクション）が必要である。人間型ロボットは、その身体を活用して人間同士が行うような自然なインタラクションを行う可能性を持つ。その活用のための、ヒューマン・ロボット・インタラクション (Human-Robot Interaction) の研究に、米国のMITやCMU, Stanfordをはじめ国内外の大学・研究機関が盛んに取り組んでいる。

関連の研究動向の主要な流れの1つは、人間が行う振る舞いのロボットでの再現である。表情による感情表出や視線による意図伝達、共同注意といった振る舞いがこれまでに研究された。もう1つの主要な流れは、ロボットの受け入れられる社会的過程のモデル化である。例えば、Sonyの開発したAIBOも一過性のものとして飽きられた。人々がどのようにロボットに興味を持ち、利用するのか、そして、どうなると飽きてしまうのか、といった視点から、実フィールドでの長期的なインタラクションなどが研究されている。これらのヒューマン・ロボット・インタラクションの研究は、ロボットに自然な対話機構を実現することで、人間の内部にどのようなメカニズムが存在するのかを構成的に検証する、という人間理解に関する基礎研究と工学分野での応用研究の両面を併せ持つ研究となっている。

本研究の着想に至るまでに、当初は、実際の場面でロボットがどのように受け入れられるのかの研究を進め、小学校で英語を話すロボットと子供達との関わり合いや2ヶ月にわたる縦断的なフィールド実験を行い、ロボットの利用可能性を明らかにしたが、一方で興味と飽きという課題が顕在化した。モーションキャプチャシステムを用いて、身体動作計測に基づくインタラクションの評価や精緻な身体動作のモデル化といった、自然なインタラクションのための研究を進めてきた。これらの取り組みの中から、ロボットが伝える情報量とタイミングに注目することで、自然な振る舞いに関するモデルの各要素を体系立てて統合し、ロボットの受け入れに重要な興味と飽きの問題も含めたより高次のモデルとする可能性が見えてきている。

2. 研究の目的

ロボットが、人間の話すことばや振る舞いを認識し、人間のように流暢にことばを話し、

人間の行うゼスチャに似た直感的なゼスチャを行うことができる日が近づきつつある。これらのロボットの認知・行動能力が人間に十分に近づいたとき、ロボットはどのように自然に人間に情報を伝えるべきだろうか？そして、自然に人々と会話するロボットが実現されれば、人々は人工物であるロボットと、まるで人々と関わり合うかのように自然に関わり合うのだろうか？本研究ではこれらの疑問に答えるべく、センサ情報処理よりも、むしろ高次の情報処理に着目して、自然な対話を行うロボットの基本メカニズムを研究する。具体的には以下の課題に取り組んだ。

研究課題1. 振る舞いの時空間モデルの構築
人間の振る舞いの精緻な観測をすることで、ロボットの自然な振る舞いの時空間モデルを構築する。

研究課題2. 情報量と認知時間のモデル化に基づく振る舞いの流れの制御

情報伝達の側面に注目し、より高次のモデル化を行う。発話と振る舞いが伝える情報量と、人々が理解にかかる認知時間の関係から、「いつ、どのような振る舞いをするべきか」に関する統合的なモデル化を進め、ロボットが振る舞いの流れを制御できるようにする。

研究課題3. 自然なロボットの評価

人間が「自然さ」を感じてロボットを対話相手と見なすためにどの程度の性能を必要としているのか、その定義を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、人々と自然に関わり合うロボットを実現するために、モーションキャプチャなどを利用して人間の振る舞いを精緻にモデル化し、ロボットに自然な振る舞いを再現する。情報伝達の側面については、発話と振る舞いが伝える情報量と、空間情報の処理に関わる人の認知時間のモデル化を進める。これらの知見を統合し、自然に人々と会話するロボットを実現し、人々が人工物であるロボットと、まるで人々と関わり合うかのように自然に関わり合うかを見いだす。

4. 研究成果

1年目には、自然な対話を行うロボットの基本メカニズムを明らかにするために、人間の振る舞いの精緻な観測等を行うことで、立ち位置のとりかたなどのロボットの自然な振る舞いのモデル化を進めた。2年目には、インタラクションの際の情報量の問題を扱い、話速と情報量、ユーザの認知負荷の関係を研究した。ロボットに対してはやや遅い話速が好まれること、歩いている場面ではさらに遅い話速が好まれることを見出した。3年目には、ロボットに対する社会的な振る舞い

とその背後の推論の関係を調査した。ロボットが、挨拶する、指を指す、といった人同士が行うような対話をしたときに、ユーザーは、人に対して行うのと同様の社会的振る舞いを見せること、一方で、ロボットが判断を誤る、といった事象が起きたときにはその責任をロボットに少しだけ帰属するなど、人とも無生物とも異なる推論が起きること、が分かった。

以下に、これらの研究のうちの主要な結果について、より詳細に報告する。

4.1 立ち位置のとり方のモデル化

自然な対話を行うロボットの基本メカニズムを明らかにするために、人間の振る舞いの精緻な観測等を行うことで、立ち位置のとりかたなどのロボットの自然な振る舞いのモデル化を進めた。

人同士のインタラクションを再現するためには複雑なモデルが必要となるが、これは一足飛びには実現できない。まず、主要要素をカバーするような、シンプルかつ基本的なモデルを提案する。そこで、なるべく基本的なモデルを実現するべく、人同士の相互作用場面の観察実験および観察実験に基づいたモデル化を行った。

物に注意を向けながら行う会話場面では、ロボットが対話相手と対話相手の注意対象に関して注意共有するための基礎となるモデルは同じであると考えている。そこで、本研究では、より自然に注意を共有する場面を観察しやすいと考えられる、2名の人が物について注意を共有しながら「話し合う」状況をモデル化のための観察実験として設定した。本実験には、5組の大学生(7名の男性、3名の女性、平均年齢21歳)が参加した。



図 1. モデル化のための観察実験

実験は、4枚のパネルがそれぞれ室内の異なる場所に置かれている状況で行われた。各組の参加者はお互いに話し合うように求められた。参加者同士が話し合いを通して意見をまとめるまでの一連の振る舞いを分析用にビデオカメラで記録し、分析した。対話相手の注意対象の変化に移動し対応できるロボットを実現するためには大きく分けて、対話相手の注意対象を認識するためと対話相手と非明示的に注意共有を行うための二つのモデルが必要となる。そのため、以下の項目の開始時間と終了時間を分析した。

- ・ 明示的に示された注意対象 (Attention target) : 2人がどの対象について話し合っているか?
- ・ 視線動作 (Gaze) : どの対象に頭部正面方向を向けているか?
- ・ 回転動作 (Turn) : 最終的にどの対象に身体正面方向を向けているか?
- ・ 接近動作 (Approach) : 最終的にどの対象に近づいたか?

これらの分析・観察結果を基に、本研究では、人の非明示的な振る舞いから人の注意を理解するための三つの手法を提案する。

(1) 注意対象の判定手法

・ 人の注意対象は、人の操作空間に入っている対象が何であるかによって判定できる。簡易的に、人の身体正面方向へのベクトルと、人の身体中心から各対象へのベクトルがなす角度が 90° 以内であるものを注意対象とした

(2) 注意対象変化の検知手法

・ 相手の下半身の移動が相手の注意対象の変化を示す。簡易的に、3秒間で人の1歩分の長さ 50 [cm] 以上身体の中心位置が移動した場合を下半身が移動し注意対象が変化し、3秒間で人の1歩分の長さ 50 [cm] 以上身体の中心位置が移動しない場合は、注意対象が固定されているとした。

(3) 注意対象の予測

・ 人の注意対象は、人の頭部正面方向から予測できる。簡易的に、人の頭部正面方向ベクトルと人の頭中心から対象へのベクトルがなす角度が 30° 以内である場合に、その対象を注意対象となると予測できるとした。

注意共有するための立ち位置モデルは、過去のモデルと分析結果に基づき改良し、提案する。分析結果から、(1) 対話相手との距離、(2) 注意対象との距離、(3) 対話相手の視野、(4) 話し手(ロボット)の視野、の四つの制約が存在すると考える。

(1) 対話相手との距離、

・ ロボットは対話相手に対して $1,200 \pm 100$ [mm] の距離を保って立つ。

(2) 注意対象との距離

・ ロボットは注意対象に対して $1,100 \pm 100$ [mm] の距離を保って立つ。

(3) 対話相手の視野

・ 対話相手の身体正面方向ベクトルと対話相手からロボットへ向けたベクトルがなす角度は 90° を超えない。

(4) 話し手(ロボット)の視野、

・ 注意対象が一つである場合：ロボットの体の向きは、ロボットの体の中心から注意対象へのベクトルに一致する。

・ 注意対象が複数ある場合：ロボットの体の

方向は、体を回転することなしにすべての注意対象を見ることのできる向きになる。まず、各注意対象とロボットの体中心を結ぶ各ベクトルの角度をすべて求める。最大となる角をつくる注意対象の組み合わせとなる二つのベクトルの中心のベクトルにロボットの体の向きは沿う。

また、過去の研究および今回の観察から、以下の制約を見出した。

- ・ ロボットの身体正面方向ベクトルとロボットから相手へ向けたベクトルがなす角度は 90° を超えない。
- ・ ロボットの身体正面方向ベクトルとロボットから注意対象へ向けたベクトルがなす角度は 75° を超えない。

このモデルを基にロボットに実装し、有効性の検証を行った。以下に示す3つの条件で実験を行った。

- ・ Stop (STP) condition: ロボットは対話相手の明示的な注意にのみ移動を伴わず対応する。対話相手の明示的な指示を受け取るとすぐに、ロボットは対話相手に身体を向けて説明を行う。
- ・ Explicit attention-shift (EXP) condition: ロボットは対話相手の明示的な注意にのみ身体的位置や向きを変化させ対応する。対話相手の明示的な指示を受け取るとすぐに、ロボットは提案モデルに従い対話相手および注意対象の位置に応じた立ち位置に移動する。移動終了後、ロボットは対話相手に説明を行う。
- ・ Implicit attention-shift (IMP) condition: ロボットは対話相手の非明示的および明示的な注意に身体的位置や向きを変化させ対応する。対話相手が明示的な指令を出す前にロボットは提案モデルに従い対話相手および注意対象の位置に応じた立ち位置へ移動する。対話相手の明示的な指示を受け取るとすぐにロボットは対話相手に説明を行う。

これら、3条件に対して、場所の適切さ、説明を始めるタイミングの適切さ、協力度について、質問紙による主観評価を行った。

検証実験の結果は、今回提案したモデルの有効性を示していた。参加者は、適切な立ち位置に立つIMPやEXP条件のロボットをSTP条件よりも高く評価していた。つまり、注意共有するための立ち位置モデルの有効性が示された。また同時に、注意モデルに関しても、その効果はある程度検証された。

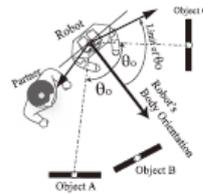


図2 システムの一例および、それを実装したロボットの動作

4.2 インタラクションにおける情報量

インタラクションの際の情報量と、情報が多くなる場合の対処方法について検討を進めた。情報が多くなりすぎた場合にどのような対処をすべきか、検討した結果、従来研究でとった間合いを増やす戦略よりも、話速を遅くする方が、一般的な対話でも違和感なく使えそうであることから、話速と情報量、について焦点を絞って研究を進めることにした。また、予備的検討を行う中で、情報量と言う言葉よりも、ユーザの認知負荷(情報を処理する負荷量)という視点から物事をとらえる方が理解がしやすいことに気がついた。また、認知負荷が高くなる実際的な場面について検討し、展示案内ロボットなどでよくある、一緒に歩きながら情報を話す場合と、立ち止まって話す場合について注目することにした。これらについて実験を行った。

本実験は2つの状況と4つの条件からなる。状況は人が静止して話を聞く場合と、ロボットと一緒に歩行しながら話を聞く場合、条件は発話速度の違いであり、速い、標準、比較的遅い、遅いの4条件である。日本語の標準的な速度を文献により調べ、それぞれの条件の速度を以下の4つの速度にした。

- ・ 速い(9.70 moras/sec): ロボットは人が話す範囲において最も速い速度で話す
- ・ 標準(7.87 moras/sec): ロボットは人が話す標準の速度で話す
- ・ 比較的遅い(6.93 moras/sec): ロボットは人が話す

標準速度と遅い速度の中間の速度で話す。

- ・ 遅い(5.72 moras/sec): ロボットは人が話す範囲において最も遅い速度で話す

静止時・歩行時のどちらも、発話速度の条

件は同じにしている。静止条件では、28人の日本人により行われた(男性17名, 女性11名, 平均年齢: 26.8歳)。また, 歩行条件では49人の日本人により行われた(男性25名, 女性24名, 平均年齢: 26.6歳)。図3にその実験の様子を示す。

我々は理解度, 被験者の発話速度に対する主観評価, ロボットに対する信頼性, ロボットの有能さの4種の測定方法を用いた。理解度は, ロボットが話した観光のプランから理解した情報について紙に書かせ, それを0点から10点で採点した。被験者の発話速度の主観評価は, 1点から7点で発話速度の総合的な良さについて評価した。また, 我々はロボットの印象は発話速度に影響されることが知られている(Buller et al. 1992; Simonds et al. 2006)。そのため, 有能さ, 信頼性について評価した。有能さは, 1点から7点, このロボットが観光のガイドとして有能であるかどうかを, 信頼性は, 1点から7点, このロボットの発話内容が信頼できるかどうかを評価した。

図4はその結果の一例である。青線が静止状態, 赤線が歩行状態を表している。これらの結果より, 静止時には, 比較的遅い発話速度が好まれ, 歩行時には出来る限り遅い発話速度が好まれることが分かった。

また, 歩行時には理解度は減るが, 信頼性や有能さが高く感じられることが分かった。この理解度の減少は, 認知負荷の上昇が要因と考えられる



図3 静止状態及び歩行状態における実験の様子。

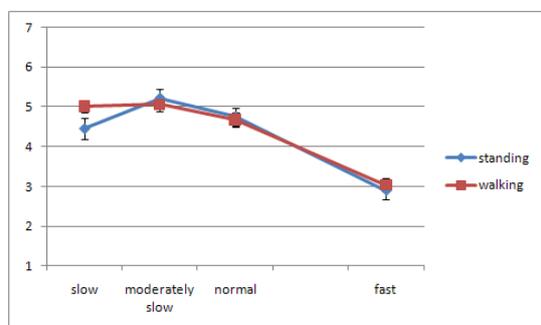


図4. 主観評価

4. 3 まとめ

本報告書で報告したように, この研究費においては, 人同士の対話に似た自然な対話を行うロボットの基本メカニズム, インタクションの際の情報量の問題を扱い, さらに, そのような人同士の対話に似た自然な対話を行うロボットに対する社会的な振る舞いと其の背後の推論の関係を調査した。これらの研究から, 振る舞いの自然さが増しつつあるロボットが, 人でもモノでも無い新たな存在となりつつあることが明らかになってきた。

また, これらの研究は, 査読付きジャーナル論文5件, 国際会議HRI2012でのBest paper award受賞, といった成果につながった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Michihiro Shimada, Takayuki Kanda, What is appropriate speech rate for a communication robot?, Interaction Studies, 査読有, Vol.13, No.3, 2013 (掲載予定)
- ② Christian Becker Asano, Takayuki Kanda, Carlos Toshinori Ishi, Hiroshi Ishiguro, Studying laughter in combination with two humanoid robots, AI & Society, 査読有, Vol. 26, No. 3, 2011, pp. 291-300
DOI:10.1007/s00146-010-0306-2
- ③ 山岡史享, 神田崇行, 石黒浩, 萩田紀博, 協調的移動に基づく対話ロボットによる注意共有の実現, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 28, No. 3, 2010, pp. 338-348
DOI: 10.7210/jrsj.28.338
- ④ 山岡史享, 神田崇行, 石黒浩, 萩田紀博, A Model of Proximity Control for Information-Presenting Robots, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, Vol.26, No.1, 2010, pp.187-195
DOI: 10.1109/TRO.2009.2035747
- ⑤ 神田崇行, ディラン・グラス, 塩見昌裕, 萩田紀博, Abstracting People's Trajectories for Social Robots to Proactively Approach Customers, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, Vol. 25, No. 6, 2009, pp.1382-1396
DOI: 10.1109/TRO.2009.2032969
- ⑥ 山岡史享, 神田崇行, 石黒浩, コミュニケーションロボットのためのモーション, 計測と制御, 査読無, Vol. 48, No. 6, 2009, pp. 452-457

[学会発表] (計 5 件)

- ① Takayuki Kanda, Michihiro Shimada, Satoshi Koizumi, Children learning with a social robot, 7th ACM/IEEE international conference on Human-Robot Interaction (HRI2012), 2012 年 3 月 7 日, Boston(USA)
- ② P. H. Kahn Jr., Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, Brian T. Gill, Jolina H. Ruckert, Solace Shen, Heather E. Gary, Aimee L. Reichert, Nathan G. Freier, Rachel L. Severson, Do People Hold a Humanoid Robot Morally Accountable for the Harm It Causes?, 7th ACM/IEEE international conference on Human-Robot Interaction (HRI2012), 2012 年 3 月 6 日, Boston (USA) (**Best paper award**)
- ③ Chao Shi, Michihiro Shimada, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, Norihiro Hagita, Spatial Formation Model for Initiating Conversation, Robotics Science and Systems Conference (RSS2011), 2011 年 6 月 28 日, Los Angeles (USA)
- ④ 神田崇行, 人とロボットとの自然なインタラクションに向けて, 関西大学第 15 回先端科学技術シンポジウム, 2011 年 1 月 14 日, 関西大学 (大阪府)
- ⑤ Takayuki Kanda, Natural Human-Robot Interaction, 2nd International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN), 2010 年 11 月 17 日 Darmstadt(Germany)

[図書] (計 2 件)

- ① Tatsuya Nomura, Tomohiro Suzuki, Takayuki Kanda, Sachie Yamada, Kensuke Kato, John Benjamins Pub Co, New Frontiers in Human-Robot Interaction 『Attitudes toward robots and factors influencing them』, 2011 年, pp.73-88
- ② Peter H. Kahn, Jr., Aimee L. Reichert, Brian T. Gill, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, John Benjamins Pub Co, New Frontiers in Human-Robot Interaction 『Validating characterizations of sociality in HRI: It's more than Psychometrics』, 2011年, pp.57-72

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 崇行 (TAKAYUKI KANDA)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・
知能ロボティクス研究所・研究員
研究者番号：90374107

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし