

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月30日現在

機関番号：32612

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2014～2018

課題番号：26118006

研究課題名（和文）人の適応性を支える環境知能システムの構築

研究課題名（英文）Research on ambient intelligence systems to support human-machine mutual-adaptation

研究代表者

今井 倫太（IMAI, MICHITA）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：60348828

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 85,700,000円

研究成果の概要（和文）：人工物に対して人が持つ他者モデルは複数のタイプがある。本研究は、人と人工物のインタラクションを、アンビエントモデル（部屋・建物）、身体化モデル（道具・車椅子・車・テレプレゼンスロボット）、他者モデル（自律ロボット）の三つに分類し設計論を明らかにした。他者モデルの研究では、人工物への他者モデルを人に抱かせる今性生成アーキテクチャならびに、二体のロボットが時間的にオーバーラップした行動を示すことの有効性を示した。身体化モデルの研究では、人に適応的に動く電動車椅子を構築した。アンビエントモデルの研究では、キャラクター性のあるエージェントを利用して、人との関係性に根ざしたサービスデザインを研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工知能が発展し、ロボットや自動運転など自律的に動いて人にサービスできる人工物が登場している。人工物自体は、コンピュータプログラムで動いているので心や感情といった物を持っていない。しかしながら、自律的に行動する物を見ると人はそこに、心や感情を想定して理解してしまう傾向がある。本研究では、人が人工物に抱く他者モデル（他者に対して抱く心的状態）と一致する振る舞いを人工物にさせること、また、人工物の振る舞いや人とのインタラクションの中で、使いやすくなる他者モデルを人に抱かせることを目標に研究を行なった。適正な他者モデルを人工物に与えることで人と人工知能システムの間での齟齬が発生し辛くなると考える。

研究成果の概要（英文）：There are multiple types of the mental model of others which humans have for understanding the behaviors of artifacts. This study classifies human-artifacts interactions into three models to investigate the designs: ambient model (room, building), embodied model (tool, wheelchair, car, telepresence robot), anthropomorphic model (autonomous robot). The research on the anthropomorphic model has shown the effectiveness of a behavior generation architecture that allows others to imagine the model of others for the artifact, as well as the benefit of a design that two robots show temporally overlapping behavior. In the research of the embodied model, we constructed an electric wheelchair that moves adaptively to people. In the study of the ambient model, we used a character-like agent to study service design based on human relationships.

研究分野：ヒューマンロボットインタラクション

キーワード：ヒューマンエージェントインタラクション 他者モデル 相互適応 擬人化

1. 研究開始当初の背景

人は、相手の心的状態を読み、適応的に行動し、相手と円滑にコミュニケーションを行う。動物に対しても同様であり、時として車やコンピュータといった道具に対しても、あたかも心を持つ物として扱うことがしばしば見受けられる[C. Nass, et. al '96]。相手の心的状態を読みながら行動する事は、人工物に対しても行われるのに対して、人工物側から人の心的状態を読み、それに答える方法については確立されていない。人と人工物の間で心的状態を読み合うインタラクションが実現されたとしたら、既存のユーザインタフェースの枠組みを越え、より円滑なコミュニケーションや、機器の操作環境が構築できると期待できる。

人と人工物のインタラクションの研究は、古くより行われ、80年代より国際会議 ACM CHI でコンピュータサイエンス・インタフェースデザイン・ヒューマンファクタ・認知科学といった観点から学際的に行われている。また、2006年より国際会議 IEEE/ACM HRI が始まり、ロボットと言った人に近い形で自律的に行動する人工物と人のインタラクションに関する研究が行われている。しかしながら、多くの研究は、コンピュータソフトウェアやロボットを使い易くするデザインに関して、ヒューマンファクタ（人への刺激と人の行動の対応関係）の観点からアプローチしている。人工物とのインタラクションを引き起こす人の心的状態を無視し、インタラクションを単純な入出力問題として外部から観測し、表層的に扱っているのが現状である。人工物に対する人の心的状態の変化や、人の心的状態を人工物が読む原理やモデルにまで迫る研究は皆無である。

本研究では、ヒューマンファクタの検証による単純な人工物のインタラクションデザインという枠組みから一歩踏み出し、人工物の振る舞いから人工物の意図や心的状態を人がどのように読むのか、また、人工物の側も、人の心的状態をセンサ情報から推測し、振る舞う方法について研究を行う。他者モデルを持ち、真の意味で人と円滑なコミュニケーションをとることのできる人工物の構築方法を探る。

研究代表者の今井および分担者の小野は、これまで、ロボットの心的状態を人に読ませ、ロボットとの円滑なコミュニケーションを実現する方法について研究を行ってきた。人が感じている感覚についてロボットが発話したり[M. Imai, et. al '03]、人が所有するパーソナルCG エージェントがロボット上のディスプレイに現れることでロボットに対する関係性を人に感じさせる手法を提案した[T. Ono, et. al '00]。関係性を基本としたインタラクションを通して、人は、ロボットの心的状態を自然と推測するようになり、ロボットの意図や状態を勘案しながら、コミュニケーションの文脈に相応しい行動をとるようになる。しかしながら、ロボットの心的な状態を人が読む条件を見つけ出したにすぎず、動的に進行するコミュニケーションにおける問題を扱っているわけではない。特に、ロボット側から人の心的状態を推定しておらず、真の意味で、相互に適応してコミュニケーションすることはできない。本提案課題では、タスクや役割の決まった自律ロボット・テレプレゼンスロボット・CG エージェント・電動車椅子・自律走行車を想定しつつ、人工物の側から人の心的状態を推定する方法および人に人工物の心的状態を推測させ、真に相互に適応し、持続的なコミュニケーションを実現する方法を研究する着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、人が他者の心的状態を読み行動するモデルを、実際に人工物に組み込み、改良する中で明らかにする。人工物に対して人がどのように振る舞うかを扱うモデルと、人の心的状態を人工物が読むために必要となるモデルの双方の側面を扱う。人工物には、人と同様に自律的に活動するものや、人と一体となり道具として働くもの、部屋や建物といった環境として人の活動を支援するものが考えられ、以下の三つの目標を掲げて研究を行う。

【目標 1】人工物のための他者モデルの研究：人にロボットの心的状態を読ませるためのロボットの振る舞い制御および人の心的状態をロボットが推定するための手法を研究する。人工物との発話のやり取りのタイミング、視線・ジェスチャの動き、コミュニケーションの際のお互いの立ち位置と言った非言語情報に着目し、ロボットの振る舞いと、人が読む心的状態の関係を明らかにする。さらに、人の心的状態をロボットが推定する上でロボットがセンシング可能な非言語情報を選定し、心的状態を推定する方法を研究する。

【目標 2】人工物の身体化モデルの研究：車やテレプレゼンスロボットでは、操作者が人工物と一体感を持つ事が重要である。特に、人工物側も自律的に判断し行動する場合には、操作者の操作に反しない範囲で行う必要がある。本研究では、人の操作から人の心的状態を適切に読み、人の意図に沿う形で行動をアシストする身体化モデルを考える。さらに、人が道具を他者として捉える状況も踏まえ、身体化モデルと他者モデルの関係を、人工物の操作の観点から明らかにし、人工物の設計論に取り込む方法も考える。

【目標 3】身体が不定なアンビエントモデルの研究：部屋や建物といった空間を、情報的に人をアシストする人工物と見立てインタラクティブなシステムを構築する場合、人が、空間に対してどのような他者モデル(アンビエントモデル)を持つかを明らかにすることは重要である。さまざまなメディア機器を介してインタラクションする空間に対して人が持つ他者モデル(アンビエントモデル)を調査し、空間が人にサービスするさいに最適な手法を研究する。さらに、

複数の異なるメディア機器を跨いで人とインタラクションするサービスを想定し、メディア機器間で同一のキャラクター性を持たせる方法を模索する。

3. 研究の方法

本研究は他者モデル・身体化モデル・アンビエントモデルに毎に研究目標を立て遂行する。

他者モデル： 人にロボットの心的状態を読ませるロボットの振る舞い制御および人の心的状態をロボットが推定する手法を研究する。人工物に他者モデルを人が抱きやすくするためのロボットの振る舞い生成の手法を、実際のロボットを用いて構築する。また、複数台のロボットがインタラクションしている様子を人が観測することで、他者モデルの立ち現れにどのような効果をもたらすかを明らかにする。実際に2体のロボットがインタラクションしている場面を構築し、参加者実験を行う。

身体化モデル： 電動車椅子を題材として研究する。搭乗者の意思に従いつつも、周囲の安全性を確保して自律的に制御する方法を扱う。車椅子側が、センサにより障害物を避け安全性を自律的に確保する場合、人の意思に従わない移動をしてしまう場合がある。人の操縦方法に対して異なる動きをする電動車椅子を用意し、比較実験を行うことで、車椅子の動きと人の心的状態の関係を調べる。研究は、B01 班の人=動物インタラクションの知見と照らし合わせながら行う。

アンビエントモデル： 明確な身体を持たない部屋・建物と人のインタラクションを円滑にすることのできる人工物の形態を他者モデルの観点から研究する。部屋全体からの音声のみの情報提示、部屋内を浮遊可能なCG キャラクタによる情報提示、身体を持つロボットによる情報提示、携帯端末を通じた情報提示とそれぞれ異なるメディア機器からの情報提示に対して、人が持つ他者モデルを調べると共に、相応しいサービスとの対応関係を明らかにする。

4. 研究成果

他者モデルの研究に関しては、人とのインタラクションにおいて人や周囲の出来事に対して随伴的に反応する今性生成アーキテクチャ(SB アーキテクチャならびに動力学モデル)を構築し、ロボットの他者モデルを人に抱かせる仕組みを構築することに成功した。さらに、二体のロボットが時間的にオーバーラップした行動を示すことでも同様の効果があることを示すことができ、今性のある行動が、他者の状態を読み合う関係に関与することを明らかにできた。また、ロボットが人の心的状態を推定し、人から見たロボットの他者モデルをロボットが推定した場合の効果を検証している。人とロボットが協調タスクを行う際に有効であることが評価実験で示されている。身体化モデルの研究では、搭乗者の状態を車椅子が推定する上で人の電動車椅子の操作方法および周囲の走行環境から人の状態を推定する手法を確立することができた。さらに、推定した状態を元に搭乗者へ個人適応する形で操作ゲインを変更し、安心感のある運転支援方法を提供している。人が反自律的に走行する車椅子を身体化し、操作できる手法を確立している。アンビエントモデルの研究では、キャラクター性のあるエージェントを利用する事で人との関係性の維持・更新・切り替えに基づく実世界サービスを実現するユーザインタフェースデザインを提案した。自律して人にサービスを提供する機器には、他者モデルを人に抱かせることのできるデザインが重要であり、他者モデルの同一性の見せ方を変更することで、人の機器からの情報の受け止め方が変わることを明らかにした。それぞれの内容を以下に説明する。

(1) 今性のある振る舞いを生成するSB アーキテクチャ

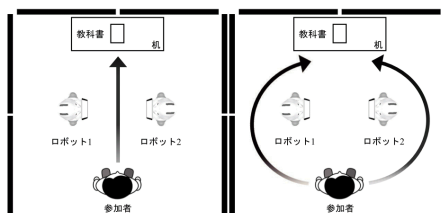
人型ロボットが心的状態を持つという印象を人に抱かせるために、今性のあるロボットの振る舞いを生成するアーキテクチャを提案した。今性のある振る舞いを生成させる場合、従来研究では、必要な振る舞い生成モジュールを多数結合させた複雑なアーキテクチャとなっていた。設計や改良にもコストのかかるものであった。SB アーキテクチャは、ロボットの振る舞いを、今性に寄与する不随意行動ならびに、コミュニケーションに寄与する随意行動の二つの階層構造にすることで、開発や更新コストを抑えつつ、周囲の出来事への随伴性を維持しつつ、コミュニケーションのための振る舞いを生成できるようになっている。特に、センサ入力と理想的な行動のセットを用意することでモデルを獲得させることができるようになっている。

SB アーキテクチャは、随意行動を優先度選択する階層と、選択された随意行動と不随意行動群を重み付け平均で統合することで振る舞いを生成する。振る舞いの優先度と重みは、センサ入力と理想行動のデータセットより学習可能である。

(2) 2体ロボットのコミュニケーションの時間的オーバーラップにより創発される他者モデルの効果

2体のロボット同士のコミュニケーションにおいて発話ならびにジェスチャの生成タイミングが、時間的にオーバーラップすることで、ロボットのコミュニケーションを観察している人がロボット間に会話の場が発生していると感じることが明らかになった。具体的には、オーバーラップが発生していない場合には、人はロボットの間をためらいも無く通ることができるのに対し、オーバーラップが発生している場合には、人は、ロボットの間を通らず、一方のロボットの

背後を通り、向こう側へ行くことが観測された。



上記の図は、実験条件を表している。二体のロボットのコミュニケーション行動がオーバーラップせず、交互に行われる場合は、人は、ロボットの間を通過して教科書を取りに行く(左図)。ロボットの行動がオーバーラップする場合は、人は、ロボットの間を避けて教科書を取りに行く(右図)。

(3) 人が想定するロボットの内部状態を利用した人とロボットの協調タスクの実現

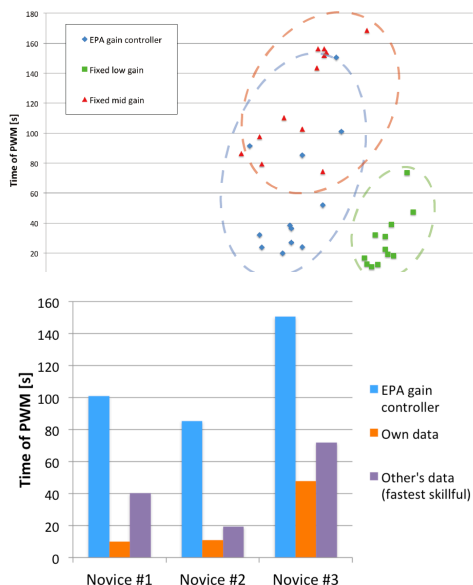
人とロボットが掃除をする場面を想定し、人がロボットを助ける条件について、人がロボットに対して想定する他者モデル(ロボット視点のタスク進展度)の観点から研究を行った。掃除場面の客観的進展度でロボットが助けを人に求めたとしても、人はロボットを助けないことが明らかになった。本研究では、ロボットの残りタスク遂行時間と人の残りタスク遂行時間を、人の主観的観点から比較することで、ロボットが人に助けを求めるタイミングを見積れるようになった。

(4) 環境内の機器の使用を支援するパーソナルアシストエージェント

本研究では、環境内に存在する家電や家具ごとにパーソナルエージェントが存在する場面を実現する SEIREI-Agent を構築した。SEIREI-Agent が複数の家電や家具に関するお知らせをプッシュ型インタラクションで与える影響を調査した。環境内の複数デバイスからプッシュ型インタラクションが発生する状況を想定した評価実験を実施し、移動型のエージェントや音声エージェントといった他のエージェントとの比較を行なった。実験結果より、SEIREI-Agent を使用することで複数の機器や家具による情報通知に対する実験参加者の違和感/困惑が軽減され、プッシュ型インタラクションが円滑化されることが示唆された。これは、ユーザが環境内の人工物に対して他者モデルを抱きやすくなった結果であると言える。

(5) 人の電動車椅子の操作方法と周囲状況に応じて適応的に操作ゲインを調整する適応的の車椅子の構築

公募研究(硯川)の研究より、人が車椅子の操作に困難さを感じている場合、ジョイスティックを小刻みに動かし速度調整する PWM 操作をすることが明らかになった。本研究では、人の車椅子の操作(PWM 操作かどうか)の判定ならびに、周囲の走行環境(通路の狭さ)より総合的に運転状況の困難さを判定する手法を構築した。さらに、人が感じている車椅子の操作のし易さに応じて適応的に、操作ゲインを調整する仕組みを開発した。個人の操作に適応させることで、個々人に設定された車椅子が最も乗りやすくなる適応機構を構築することができた。



左の上のグラフは、車椅子を走行させた各個人のラップタイム(実験コースの一周時間)と走行時に PWM 操作(操作者が操作が難しいと感じている場面)の出現時間を表している。低いゲインに固定された車椅子では、反応性が緩やかなので PWM 操作の出現は少ない一方で、速度が遅いのでラップ時間が長くなっている。高いゲイン固定では、車椅子の速度が速いのでラップタイムが早い一方で、PWM 操作が長く出現し、操作者が操作に困難さを感じている場面が多く発生してしまっている。提案手法(EPA ゲインコントローラ)は、PWM 操作の発生が抑えられつつ、ラップタイムも早く、操作者に適応的な操作環境を提供できていることが分かる。下のグラフは、EPA ゲインコントローラで獲得された自分のゲインモデルを用いた場合(オレンジ)、他人のゲインモデルを用いた場合(紫)の PWM 操作の発生時間の累積を表している。自分のゲインモデルを利用した場合 PWM 操作の時間が短くなっていることから、提案手法は、個人に適応した操作環境を実現できていることが分かる。

5 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 16 件)

- ① *Masahiko Osawa, Michita Imai: A Robot for Test Bed Aimed at Improving Telepresence System and Evasion from Discomfort Stimuli by Online Learning, *International Journal of Social Robotics*, pp.印刷中 (2019).(査読有)
- ② 松元崇裕,後藤充裕,石井亮,渡部智樹,山田智広,今井倫太: 複数ロボットとの位置関係がユーザの対話負荷に与える影響, *情報処理学会論文誌*, 60(2), pp.340-353 (2019.2). (査読有)
- ③ 水丸和樹, 坂本大介, 小野哲雄: 複数ロボットの発話の重なりによって創発する空間の知覚, *情報処理学会論文誌*, 59(12), pp.2279-2287 (2018.12). (査読有)
- ④ 春日遥, 棟方渚, 坂本大介, 小野哲雄: Human-Pet Interaction のなかの社会的ロボット: 家庭におけるフィールド調査, *情報処理学会論文誌*, 59(8), pp.1520-1531 (2018.8). (査読有)
- ⑤ *Ema, A., Osawa, H., Saijo, R., Kubo, A., Otani, T., Hattori, H., Akiya, N., Kanzaki, N., Kukita, M., Komatani, K. & Ichise, R.: Clarifying Privacy, Property, and Power: Case Study on Value Conflict Between Communities, *Proceedings of the IEEE*, 107(3), pp.1-7 (2018.7). (査読有)
- ⑥ *Yoichi Morales, Atsushi Watanabe, Florent Ferreri, Jani Even, Kazuhiko Shinozawa, Norihiro Hagita: Passenger discomfort map for autonomous navigation in a roboticwheelchair, *Robotics and Autonomous Systems*, 108, pp.13-26 (2018.5). (査読有)
- ⑦ *Takahashi, H., Ban, M., Osawa, H., Nakanishi, J., Sumioka, H. & Ishiguro, H.: Huggable Communication Medium Maintains Level of Trust during Conversation Game, *frontiers in Psychology*, 8(1862), pp.1862 (2017.10). (査読有)
- ⑧ *大澤博隆, 栢野航, 遠藤航, 三浦友博, 丹波正登, 守谷友里, 結城明, 長野正: 機能説明エージェントの実世界拡張トリガによる機能説明改善, *情報処理学会論文誌*, 57(4), pp.1128-1136 (2016.4). (査読有)
- ⑨ *大澤博隆: 相互取引における報酬遅延がもたらすエージェントの内部状態の複雑化, *情報処理学会論文誌*, 11(1), pp.AG-H_1-8 (2016.1). (査読有)
- ⑩ *棟方渚, 小野哲雄: CG キャラクタを操作するインタフェースデザインの類似性がユーザに与える影響, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 17(2), pp.171-177 (2015.5). (査読有)

〔学会発表〕 (計 59 件)

- ① *Fukuchi,Y., Osawa,M., Yamakawa,H., Takahashi,T., & Imai,M.: Bayesian Inference of Self-intention Attributed by Observer, *Proceedings of 6th International Conference on Human-Agent Interaction*, pp.3-10 (2018.12).(@Southampton, UK) (査読有)
- ② ©*Okuoka,K., Takimoto,Y., Osawa,M., & Imai,M.: Semi-Autonomous Telepresence Robot for Adaptively Switching Operation using Inhibition and Disinhibition Mechanism, *Proceedings of 6th International Conference on Human-Agent Interaction*, pp.167-175 (2018.12). (@Southampton, UK) (査読有)
- ③ *Matsumori,S., Fukuchi,Y., Osawa,M., & Imai,M. : Do Others Believe What I Believe? Estimating How Much Information is being Shared by Utterance Timing, *Proceedings of 6th International Conference on Human-Agent Interaction*, pp.301-309 (2018.12). (@Southampton, UK) (査読有)
- ④ ©*Matsumoto,T., Goto,M., Ishii,R., Watanabe,T., Yamada,T., & Imai,M.: Where Should Robots Talk?: Spatial Arrangement Study from a Participant Workload Perspective, *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp.270-278 (2018.3). (@Chicago, USA) (査読有)
- ⑤ *Takimoto,Y., Hasegawa,K., Sono,T., & Imai,M.: A Simple Bi-Layered Architecture to Enhance the Liveness of a Robot, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2017*, pp.2786-2792 (2017.9).(@Vancouver, Canada) (査読有)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① *今井倫太: 「インタラクションの認知科学」, 130 ページ, 新曜社 (2018.6).

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ <https://www.cognitive-interaction-design.org/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：小野 哲雄

ローマ字氏名：Tetsuo Ono

所属研究機関名：北海道大学

部局名：情報科学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：40343389

研究分担者氏名：篠沢 一彦

ローマ字氏名：Kazuhiko Shinozawa

所属研究機関名：株式会社国際電気通信基礎技術研究所

部局名：知能ロボティクス研究所

職名：連携研究員

研究者番号（8桁）：80395160

研究分担者氏名：大澤 博隆

ローマ字氏名：Hirotaka Osawa

所属研究機関名：筑波大学

部局名：システム情報系

職名：助教

研究者番号（8桁）：10589641

研究分担者氏名：長谷川 孔明

ローマ字氏名：Komei Hasegawa

所属研究機関名：豊橋技術科学大学

部局名：工学（系）研究科（研究院）

職名：助教

研究者番号（8桁）：30816210

(2) 研究協力者

無し

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。