

# 思いやりを考慮したロボットと人のすれ違いにおける予測モデリング ー能動的推論に基づいたモデリングー

Modeling Human Prediction and Robot Compassion for Passing Behavior

ー Modeling Based on Active inference Framework ー

(キーワード：自律移動ロボット，驚き，能動的推論，思いやり)

(Keywords: Autonomous Mobile robot, Surprise, Active inference, Compassion)

岡田真範（東京大学），柳澤秀吉（東京大学）

## 1. 背景と目的

近年，人との共生空間で活動する，意図を持って自律的に行動可能な主体，「自律移動ロボット」の活躍が期待される．ロボットの行動設計において，挙動制御の機能向上と併せて，人と関わる以上，人の感性を考慮した設計も重要な視点となる．我々は人の予測をモデル化し，ロボットの挙動に対する予測不一致による驚きを人が主観評価する実験を実施し，ロボットの挙動の物理特性に関する予測モデル[1]を検証した．また，逆強化学習を用いてロボットのナビゲーション行動をモデル化し，人間と社会的に協調する行動設計のアプローチ[2]も主張されている．

一方で，人とロボットの身体性の違いに加え，実際には様々な形態のロボットが存在し，意図的な主体に対する普遍的な予測と行動のモデルの検討が課題となる．さらに，人にとって望ましいインタラクションに寄与する要素は，ロボットの挙動の危険性，自然さや人の行動の流暢性など複数考えられ，一つ一つのケースに対応するモデル化は網羅性を欠く．

我々は，人とロボットの「すれ違い」をインタラクションにおける象徴的なキースーンとみなし，意図的に行動可能な主体として，人とロボットの予測モデルを検討する対象として注目した．また，意図的に行動可能なエージェントの予測と行動の意思決定を統一的に説明する，モデリングの基本的な枠組みとして能動的推論[3]フレームワークに注目し，すれ違いにおける予測モデルとして参照し，ロボットの予測と行動の意思決定モデルに適用することを検討した．このモデリングにより，エージェントが『どうしてその行動の意思決定を下したか』を説明する内部状態を明らかにすることを試みる．自由エネルギー最小化原理[4]に基づく能動的推論の下では，エージェントの予測と行動の動機は『驚きを低減する』ことで説明され，人の予測をモデル化すると同時に，驚きを抑制するようにふるまうロボットの予測と行動の意思決定モデルを検討し，人が行動の意思決定を下した過程を内部状態によって観察することを可能とする．また，人にとって望ましいすれ違いに寄与する方策として，ロボットのモデルに，人の予測における望ましさを理解し，本来存在しない行動の動機を内包させることを考えた．

本研究では，人の予測モデルにおいて，将来達成されてい

ることが望ましいと考えていることを把握し，本来ロボット自身が目標とすることと併せて行動の動機とする「思いやり[5][6]」によって，ロボットと人がインタラクションした結果，思いやりを持たない場合と比較して驚きが少ないとの仮説を立てた．モデル化に際し，ロボットのモデルに思いやりを実装し，ロボットと人のすれ違いにおいて，人にとって望ましいインタラクションに寄与するかどうかを検証した．

## 2. ロボットと人のすれ違いにおける予測モデリング

我々は，ロボットと人のすれ違いにおける，両エージェントの予測と行動の意思決定モデルを能動的推論によってモデリングし，推論対象である隠れ原因と実際に知覚可能な観測との関係を示す同時確率分布として表現される，生成モデル[3]の構造を検討した．また，ロボットのナビゲーション行動を逆強化学習によって実現する先行研究[2]やロボットとの衝突危険に対する人の予測と知覚のモデル[7]と対応させ，モデルにおいて望ましい状況を示す分布*preference*を規定した．エージェントは，この*preference*に近づくように，かつ予測の不確実性を低減するように，生成モデルの下で外界を推論しながら行動選択する．

ここでは，単純な例として，人が『直進したい』『通路片側を好んで直進したい』という二例の*preference*を持つモデルをそれぞれ検討した．そして，それぞれロボットの予測の内部に『思いやりがない』『正しい思いやりがある』『人の*preference*を勘違いし，誤った思いやりがある』場合の三つの条件でモデルを用意した．

## 3. 予測モデルに基づいたすれ違いのシミュレーション

実際に正対位置に存在し通路上を互いに行き交うロボットと人のすれ違いのシミュレーションを行った．その結果，思いやりのある場合とそうでない場合について，すれ違いにおける人の驚きの低減具合や行動の流暢性を評価し，考察した．人にとって驚きが予測における期待と一致して減少した度合いを示す指標として*Affective Charge*（以下*AC*）[8]を採用し，実際の行動の流暢性として，軌道における進行方向の変化量に注目した．*AC*が高い場合，予測モデルにおいて望ましい状況が達成され，人が期待する通りに驚きが減少したと考えた．また，行動の選択可能性の確率のバラつきが小さ

いとき、迷いが少なく流暢に行動を選択できると考えた。

シミュレーションは各条件に対して50回試行し、すれ違い時の軌跡とそれに対応する人の内部状態を記録した。ロボットの正しい思いやりによってスムーズなすれ違いを行った場合の軌跡、ACおよび行動選択の可能性の確率の結果をそれぞれ図1、図2および図3に示す。また、思いやりがなくすれ違いにおいて滞りがある場合の軌跡、ACおよび行動選択の可能性の確率の結果をそれぞれ図4、図5および図6に示す。

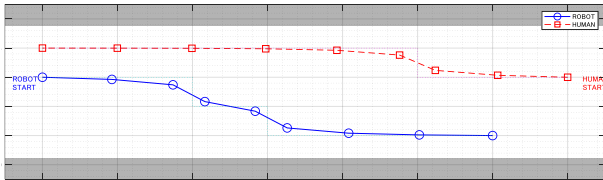


図1 正しい思いやりによるスムーズなすれ違いにおける軌跡

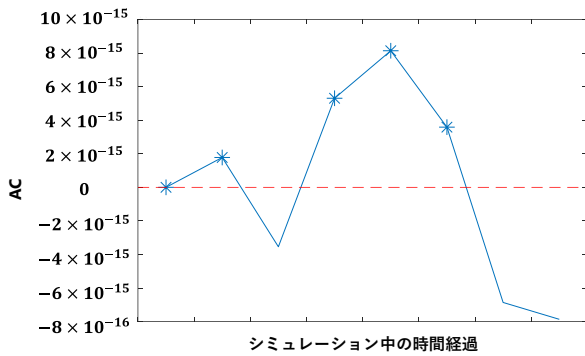


図2 正しい思いやりによるスムーズなすれ違いにおけるAC

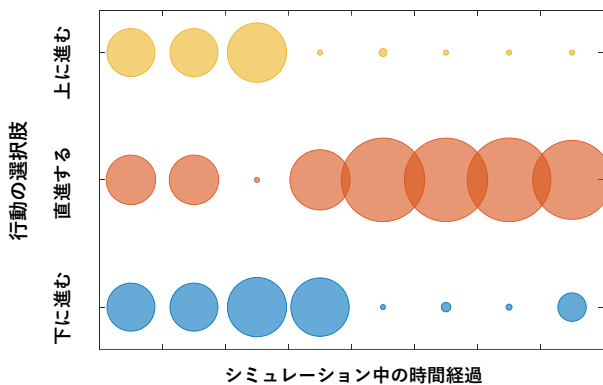


図3 正しい思いやりによるスムーズなすれ違いにおける行動選択可能性

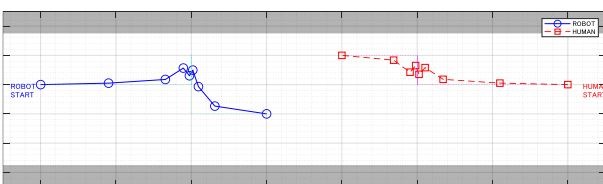


図4 思いやりがなく滞りのあるすれ違いにおける軌跡

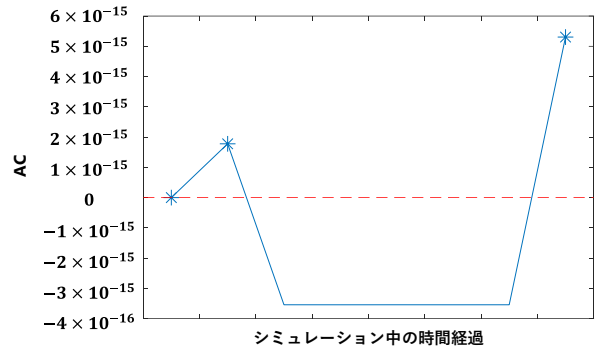


図5 思いやりがなく滞りのあるすれ違いにおけるAC

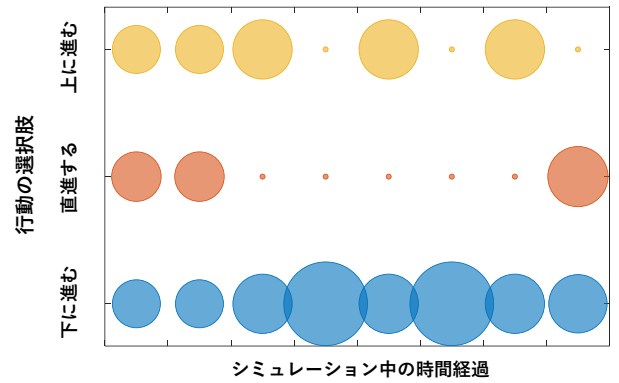


図6 思いやりがなく滞りのあるすれ違いにおける行動選択可能性

図1、4における行動の軌跡は、左から接近するロボットと右から接近する人のすれ違いの軌跡を示す。図2、4は軌跡の各時点におけるACを示す。図3、6のバブル図は、軌跡の各時点における行動の選択可能性の確率の大きさを示し、下から順にそれぞれ「下方向移動」「直進移動」「上方向移動」に関する確率について表す。

スムーズなすれ違いの方がACが持続的に正の値を取り、概して正の値を取った時点が多い。よって、予測において期待する通りに驚きが低減したと考えられる。また、行動の選択可能性に関する確率分布の変化は、各時点間の前後を比較したとき、スムーズなすれ違いの場合の方が、バラつきが小さい。よって、ロボットとのインタラクションを達成し、行動選択の迷いが低減したと考えられる。

次に、思いやりの条件毎のACおよび実際に挙動の流暢性を比較する。それぞれの条件に応じた、すれ違いを評価する指標を図7、図8に示す。

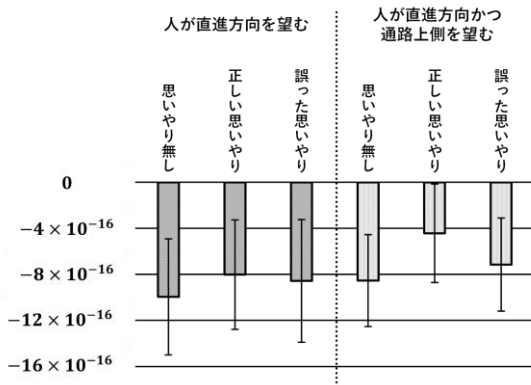


図7 思いやりに応じたすれ違いにおける驚きの減少の指標

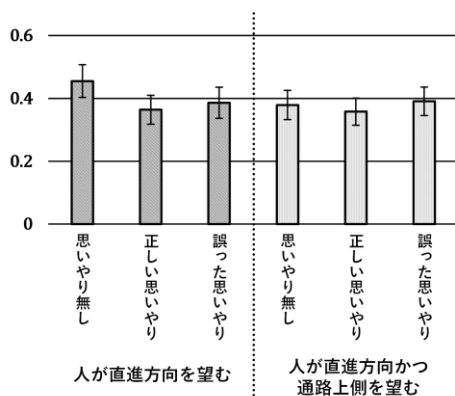


図8 思いやりに応じたすれ違いにおける実際の行動の流暢性

結果を比較すると、思いやりがある場合、滞りなく驚きを低減するすれ違いを達成する確率が高まり、実際の行動の流暢性が向上し、人にとって総じて望ましいすれ違いへの寄与が高まった。さらに、思いやりが誤っている場合でも、思いやりがない場合と比較して驚きの低減が確認でき、望ましいすれ違いに寄与する場があることが確認できた。

#### 4. おわりに

本研究において、ロボットと人のすれ違いにおける両エージェントの予測と意思決定モデルを検討し、また、ロボットの予測に、本来持ち合わせないはずの「人が望ましいと考える状況」を理解し、行動の動機として組み込む思いやりを内包させた。そして、モデルに従ったすれ違いシミュレーションによって、思いやりが、人の予測における驚きの低減の可能性を高めることに寄与することが明らかになった。また、思いやりの内容が、真に人が望むものと異なる場合も、思いやりがない場合と比較して、人の予測における驚きを低減する場があることが確認された。概して、ロボットが人に対する思いやりを持つことで、人にとって望ましいすれ違いの達成に寄与すると考えられる。

一方で、現在検討したモデルでは、他者の行動を推論する際、「相手の予測モデルにおいて相手が望ましいと推論した

行動選択」を推論していない。従って、相手と自身の望ましい行動を同時に推論する生成モデルに予測モデルを拡張し、それに応じて、能動的推論フレームワークにおける思いやりの実装を適切に変容する必要があると考えられる。また、思いやりが驚きを低減する仮説やシミュレーションの知見を検証する場として、ロボットと人のすれ違いを実際に経験・観測させる実証実験を計画する。このとき、人が主観的な立場で能動的にインタラクションする場合と、理想的なすれ違いを制御可能な第三者視点での実験系が考えられ、予備実験によって驚きの評価への影響を確認することが必要である。

#### 参考文献

- [1] 岡田真範, 柳澤秀吉. (2021). 自律移動ロボットの加速に対する人の予測モデリング -駆動力を潜在変数とした加速に対する予測と反応-. 第23回感性工学会大会.
- [2] Kretschmar, Henrik, Markus Spies, Christoph Sprunk, and Wolfram Burgard. 2016. "Socially Compliant Mobile Robot Navigation via Inverse Reinforcement Learning." *The International Journal of Robotics Research* 35 (11): 1289-1307..
- [3] Parr, T., Pezzulo, G., & Friston, K. J. (2022). *Active inference: The free energy principle in mind, brain, and behavior*. The MIT Press.
- [4] Friston, K., FitzGerald, T., Rigoli, F., Schwartenbeck, P., & Pezzulo, G. (2017). Active inference: a process theory. *Neural computation*, 29(1), 1-49.
- [5] Goetz, J. L., Keltner, D., & Simon-Thomas, E. (2010). Compassion: an evolutionary analysis and empirical review. *Psychological Bulletin*, 136(3), 351-374.
- [6] 渡邊淳司, 木村千里, 北川智利, 河邊隆寛, 横坂拓巳, 藤野正寛, 村田藍子. (2017). ウェルビーイングの設計論: 人がよりよく生きるための情報技術. ビー・エヌ・エヌ新社
- [7] 三浦乙利. (2022). 安心感の認識及びリスク行動のモデル化と自律機械の設計への応用に関する研究. 東京大学工学部機械工学科卒業論文.
- [8] Hesp, C., Smith, R., Parr, T., Allen, M., Friston, K. J., & Ramstead, M. J. D. (2021). Deeply Felt Affect: The Emergence of Valence in Deep Active Inference. *Neural Computation*, 33(2), 398-446