

[研究助成 (A)]

人間と機械の相互影響度の計量にもとづく他者への配慮の実現

2241008



研究代表者 (助成金受領者)	名古屋大学 大学院工学研究科	准教授	奥 田 裕 之
共同研究者	名古屋大学 大学院	教 授	鈴 木 達 也
	名古屋大学 大学院	助 教	山 口 拓 真

[研究の目的]

近年、空港、駅、ショッピングモール、病院、さらには住宅街など、さまざまな公共空間や生活環境において、自律移動ロボット (Autonomous Mobile Robots: AMR) や電動車椅子、パーソナルモビリティなど、知能的に行動する移動体が急速に普及しつつある。これらの移動体は、移動手段としての利便性を提供するのみならず、物流、サービス、介護などの分野において人間の活動を支援・拡張する存在として期待されている。

しかしながら、これまでの移動体設計では、周囲の人間、すなわち歩行者や自転車、他の車両などを「移動する障害物」として捉え、主として衝突回避の観点からその動きを予測・制御するアプローチが一般的であった。これは、移動体を動かす移動知能が他者に対して常に保守的であり、人に優先度を与える、という意味では一つの方向性ではあるものの、人と人が通常行うような相互の譲り合いやネゴシエーション、または、相手を慮るような行動とは異なる。

これはある程度以上の交通密度において問題になる場合があり、移動体が単に人に譲るばかりでは、多数の人の中で移動が不可能になる場合がある。これは Freezing Robot Problem として知られ、近年問題になっている。たとえ安

全を重視した結果であっても、過度な保守性により移動体はその目的を達成できない場合、移動体のユーザビリティの低下を招く。

これに対して本研究では、人と機械が互いに影響を及ぼし合う存在であるという前提に立ち、機械の行動が周囲の人間にどのような心理的・行動的影響を与えるか、またその逆も含めて、相互の関係性を定量的に評価する指標を構築することを目指す。また、このような指標を確立することで、他者の存在や意図を配慮した協調的な行動計画が可能となり、周囲の人々にとってもより安心・快適な空間の創出が期待される。

[研究の内容、成果]

本研究では、その最終的な目標として **AMR** のふるまいが人間に「どのように影響するか」という影響度、すなわち“行動の相互作用の強さ”に焦点をあてる。

ただし、本研究ではその前段階として、より深く人の相互作用を研究するために、まずは AMR を用いず、人と人との相互作用を観測し、その影響度を計量する理論、方法について研究を行うことにした。その詳細な理由は後述する。また、当初、提案する可制御性を AMR の行動計画に適用するところまでを目的としていたが、その導出にはいくつかの解決すべき問題があり、

当初の予定より時間がかかったことにより、AMRの行動計画への応用よりも、今回の提案の中心的概念である可制御性の解析を中心に研究を行った。本研究では、下記の手順で研究を進めた。

- ① 人間同士の歩行インタラクションにおける「相互影響」を実験により観測した。実験では歩行者の挙動のみではなく、手持ち入力デバイスを用い、意図と判断のタイミングを観測した。
- ② 得られた歩行データをもとに、歩行者の判断、動作の数理モデル化を行った。
- ③ 得られた歩行者の行動モデルから、制御理論で用いられる可制御性の考え方を適用し、ある歩行者が他者に与える影響度を計量するための理論を確立した。
- ④ 観測データに対して可制御性を評価し、その物理的な意味やどのような状況で可制御性が大きく、あるいは小さくなるかを解析した。

【可誘導性の考え方】

本研究では、ある交通エージェント（歩行者や移動ロボット）が、周囲の歩行者に対して与える影響度を、行動モデルを通して評価する。これは、ある意味で、互いの相互影響の強さを表す指標となると考える。

例えば、図1のような歩行者と移動ロボットが交差するような環境を考える。このとき、一見歩行者Aは移動ロボット（AMR）に物理的に近いが、Aは速やかに通過するため、Aはロボットの挙動の影響を受けにくい。一方で、

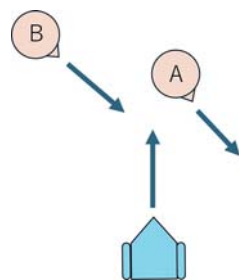


図1 移動ロボット（AMR）と歩行者の交差

Bはロボットの挙動変化の影響を大きく受けると考えられる。

この違いを定量化するためには、単に物理的な距離ではなく、ロボットの挙動変化に対して、歩行者がどのような応答（リアクション）をするか、その応答の大きさに着目して評価すべきと考えた。これを実現するために、

- ① 歩行者のインタラクティブな行動のデータ観測
- ② エージェントの挙動に対する歩行者の応答の数理モデル化
- ③ 得られた数理モデルからの可誘導性の導出

以下ではこれらの流れに沿って紹介する。

【インタラクティブな歩行行動の観測】

本研究では、歩行者の応答を観測するため、図2のような実験を実施し、歩行者対歩行者の相互影響のモデル化を行う。



図2 歩行者実験

本来であれば、ロボット等の将来的に制御したい対象に対して、応答する歩行者の行動を観測するのが望ましいが、まずは上記のように、安全を考慮して人対人の歩行行動を観測したデータを用いる。

人対人の行動観測を行う場合、その参加者間の対称性から、行動モデル推定を行う際には効率的にデータを用いることができる。例えば、A、Bの二者間実験であれば、1回の試行でAに対するBの応答、Bに対するAの応答、の2つの学習データを作成することができ、学習精度の向上が期待できる。

実験では、参加者に小型のハンドヘルドデバイスを持っていただき、実験を行った。手持ちデバイスには、ジョイスティックと、小型のLEDディスプレイが装着されており、実験では、歩行開始の直前に手持ちのディスプレイにより自分が歩行すべき開始点と目的地を指示することで、他者にはわからない形で目標経路を与え、自由歩行していただいた。

実際に歩く際の各歩行者について、モーションキャプチャシステムで頭部・背部の動き、ならびにジョイスティックによる判断入力 (Ahead, Behind, Undecided) を記録している。

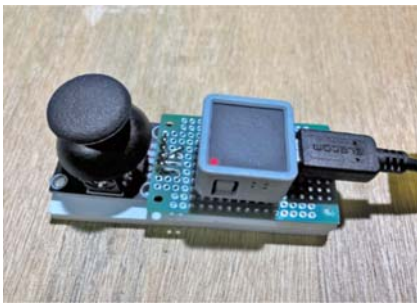


図3 実験参加者が持つ手持ちデバイス

この3種類の意図 (Ahead, Behind, Undecided) は、ある歩行者が他の歩行者のいずれかに対して、先行したい (Ahead)、相手に進路を譲りたい (Behind) と判断した時点で、ジョイスティックを前、あるいは後ろに入力していただく。Undecided はこれら2つの意図を持っていない状態、と定義している。歩行の観測データからこの意図ラベルを推定しなかった理由は、一般に人間は認知・判断をしたからといって、すぐさま行動にでない場合があるからであり、人間の内部的な意図を、できるだけそれに近いタイミングで直接観測するために、このデバイスを用いた。

【歩行者の行動モデルの構築】

次に、歩行者同士の相互影響を定量化するために、モデルの構築を行った。モデルとしては、人の判断と動作とを明示的に数理モデル化する、

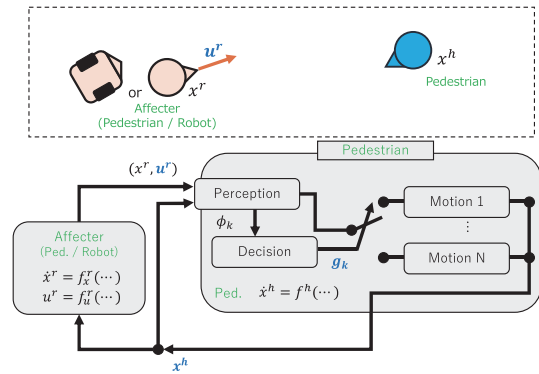


図4 周辺歩行者の行動のHDSモデル

ハイブリッドダイナミカルシステム (HDS) 表現を用いた (図4)。

まず判断モデルとしては、観測データをもとに、他の歩行者との相対関係を説明変数 (入力) とし、先述の3つの意図 (Ahead, Behind, Undecided) を結果編集 (出力) とした、ロジスティック回帰により判断モデルを構築した。

次に、上記で求めた判断確率を参照し、それぞれの意図に応じた速度を持つ動作モデルを構築した。これらの意図の推定確率を重みとする、各意図の速度を加重平均することで、歩行者の速度を予測する。

このようなモデルを用いて、各歩行者の観測点にて歩行者の意図を推定した結果を図5に示す。

ここで、図のカラーの点は、Ped. 0 が各データ点の位置に存在する際の、Ped. 1 の判断をモデルによって推定した結果である。各地点での Ped. 0 の歩行速度、方向がまちまちであるため、

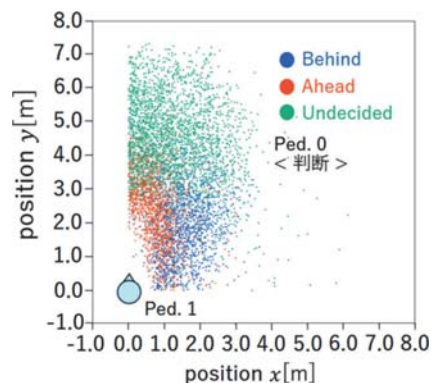


図5 判断モデルの推定結果

類似の位置でも色が異なるように見える点が混ざっているのに注意されたい。

ここでは動作（歩行速度）の予測結果は割愛するが、このときの判断モデルの推定精度はおよそ 80% 程度であった。

【可誘導性の定義と数理モデル化】

提案する可誘導性は、「あるエージェントの行動が、他者の判断や行動にどの程度影響を与えるか」を定量的に表現する概念であり、上記の場合、Ped. 0 の歩行速度の変化が、Ped. 1 の判断や動作にどの程度の影響を与えるか、を計量すれば良い。

そこで、Ped. 0 の速度を入力とみなし、下記の 2 つの指標を提案した。

- ・判断感度指標（Sensitivity）：他者の速度変化などの入力に対して、自分の判断確率（例：先に行く・後に行く）がどの程度変化するかをロジスティック回帰モデルの偏微分係数として評価したもの。
- ・可制御性指標（Controllability）：歩行者の状態空間モデルを構築し、相手の行動入力（速度など）が自分の状態（速度・位置）に与える影響度を、可制御性グラミアンの大きさを用いて定量化したもの。

正確な定義は、発表論文[1]に譲るが、これらにより、データに基づいて同定した他者の判断や動作の数理モデルをもとに、自ら（Ped. 0）の速度を変化させた場合に、他者（Ped. 1）の判断や、その状態をどの程度誘導することができるか、を定量化できた。

【可誘導性指標を用いた行動解析】

まず、上記で提案された判断感度について、左記の例における判断感度の分布を図 6 に示す。

図 5 と同様に各点は Ped. 0（行動を誘導する側）の観測された分布を示しており、その速度が変化したときの非誘導側（Ped. 1、座標原点に位置）が Behind と判断する確率への影響度の大きさを色で示している。赤色は判断感度が

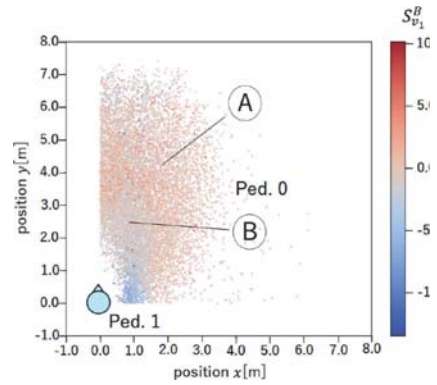


図 6 判断感度指標マップの例（Behind への影響）

正に大きい点であり、Ped. 0 が速度を増すと、Ped. 1 が Behind と判断する確率が増加することを示している。

A の領域は、図 5 では Undecided、つまり先に行くか後に行くか決めていない領域であるが、この領域は赤色となっており、Ped. 0 が加速することで、Ped. 1 を Behind、すなわち Ped. 0 に道を譲る判断へと誘導できることが定量的に示している。

一方で、B の領域は、非常に近いにもかかわらず、判断感度の大きさは淡色で示されており、Ped. 0 が加速、減速しても Ped. 1 の判断確率に大きな影響を与えないことがわかる。このとき、すでに Ped. 1 は、図 5 に示されるように Ahead と判断する確率が高い状態であり、このような状況に一度なると、Ped. 0 が加速しても Ped. 1 を Behind の判断をするように誘導ができないためである。

次に、可制御性指標を評価した結果を図 7 に

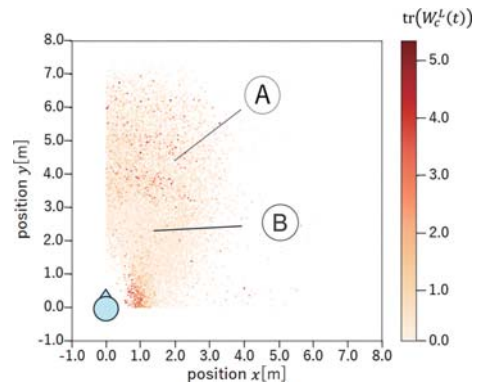


図 7 可制御性指標マップの例

示す。

図7のAの領域では、中間付近のBの領域に比べ可制御性が高いことがわかる。これは先述のように判断が影響されることで状態変化にもつながっていることが原因である。一方でBの領域は、Ped.1の判断が変化しない領域で、状態に関する可誘導性も低く出ることがわかった。

【まとめ】

観測データからシステム同定的に得られるHDS型の行動の数値モデルに対して、制御分野で用いられる可制御性の考え方にもとづいて、他者の挙動を誘導・制御できる量を定量化する2つの可誘導性指標を提案した。

得られた2つの可誘導性指標を解析した結果、歩行者の行動の定性的な分析と一致する結果が得られており、説明性の高いモデルを用いながら、歩行者間のインタラクションの強さを計量することができた。

本研究では最後にAMRの行動計画への応用を検討・準備した。たとえば、可誘導性が高く、かつ歩行者がUndecidedな状態であれば、AMRは積極的に先導的な行動を取ることで歩行者の判断を後押しできる。逆に可誘導性が低い場合には、AMRの挙動変化は他者に対して限定的な影響しか与えないため、無理にインタラクションを制御しようとせず、静的・受動的なふるまいを選択すべきであると考えられる。ただし、本研究期間内では移動ロボットへの実装までは達成できなかった。

今後の研究の展開としては、本研究期間内で達成できなかった移動ロボットの行動計画への

応用である。また、別の発展として、本研究では歩行者の1対1でのインタラクション強さの計量を行ったが、複数の歩行者が歩行する場合でも、同様に評価が可能であるのか、検証が必要である。

また、さらなる発展としては、本研究では空間における連続的な位置、速度等の物理情報をもとに可誘導性を定義したが、eHMI（外部ヒューマンマシンインタフェース、音声や画像提示、音声提示等）のように異なるモジュールを用いて人に対して働きかけるような場合にも、その働きかけでどのように判断や行動が変化するかを定量化できれば、同じ可誘導性の概念を導入することができる。

このように、情報提示による可誘導性を評価することで、移動ロボットが、人に情報提示をする際にも、不要なタイミングで提示することを抑止し、“人にわかりやすい提示のし方”を設計することにつながるのではないかと期待している。

【成果の発表、論文など】

1. Kentaro Sugiura, Hiroyuki Okuda, Mizuho Aoki, Kazuma Uchida, Tatsuya Suzuki: Inducibility Analysis of Pedestrian's Interactive Behavior, Proc. of IEEE/SICE Int'l Symp. on System Integration (SII), pp. 1-8, 2025
2. 杉浦健太郎, 奥田裕之, 鈴木達也, “可誘導性：歩行者間インタラクションにおける判断感度と可制御性に基づいた評価”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SSI2024), pp. 1-6, 2024

(SSI 最優秀論文賞受賞)