

令和 7 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22H00211

研究課題名（和文）歩車共存空間で生きるスモールモビリティのための移動知能創成

研究課題名（英文）Design of Mobility Intelligence for Small Mobility in Shared Space

研究代表者

鈴木 達也（Suzuki, Tatsuya）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50235967

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自律移動ロボットと歩行者のインタラクションにおいて歩行者の迷いの低減を目的とした速度制御手法を提案し、その有効性を実験的に検証した。提案手法は歩行者の確率的な判断モデルを予測モデルとして組み込み、歩行者の判断エントロピー低減を評価関数に組み込んだモデル予測型の速度制御器となっている。歩行者の判断エントロピー低減を明示的に考慮することで、判断エントロピーを考慮しない場合と比較して歩行者の迷いや不安感を有意に低減させることに成功した。さらに、自律移動ロボットのある程度の加減速は意図を歩行者に明確に伝達するという意味において、歩行者の迷いを低減させる効果があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自律移動ロボットは、レイアウト変更などに柔軟に対応できる経路変更能力を有しており、人との共存空間での協調的な走行が可能であるといった利点を有する。一方で、自律移動ロボットが人と環境を共有する際には、周囲の歩行者の動きだけでなく内部状態を考慮した衝突回避が望まれる。本研究では、周辺歩行者の判断の迷いをエントロピーとして定量化し、自律移動ロボットが判断エントロピーの低減を明示的に考慮することで、周辺歩行者の迷いや不安感を有意に低減させることに成功した。本成果は、自律移動ロボットによる「人への配慮」の実現可能性を示唆するものであり、今後の自律移動ロボット社会的受容性向上に貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a speed control method aimed at reducing pedestrian confusion during interactions between Autonomous Mobile Robots and pedestrians, and experimentally verified its effectiveness. The proposed method has an architecture of the model predictive speed controller that incorporates a pedestrian's probabilistic decision model as a prediction model and incorporates the reduction of pedestrian's decision entropy into the cost function. By explicitly considering the reduction of pedestrian's decision entropy, we succeeded in significantly reducing pedestrian's confusion and anxiety compared to not considering reduction of decision entropy. Furthermore, it was suggested that a certain degree of acceleration and deceleration of the AMR is effective in reducing pedestrian's confusion in the sense that it clearly communicates the AMR's intentions to pedestrians.

研究分野：制御システム

キーワード：自律移動ロボット インタラクション 判断エントロピー モデル予測制御 他者への配慮

1. 研究開始当初の背景

新たな都市空間設計において、歩車共存空間の重要性が注目されている。これまでの自動車中心の交通環境設計から歩行者や交通弱者への配慮を意識した交通環境設計への大きなマインドチェンジであり、脱炭素社会実現の観点からもこの取り組みは今後加速すると思われる。一方で、そういった歩車共存空間における移動手段として、自動車や自転車、歩行等の選択肢のみではなく、比較的低速（おおよそ 20km/h 以下）で小型の移動体（スモールモビリティ）が注目を集めている。特に、高齢者や女性、観光客、さらには小型の物流等に新たな選択肢を与え、移動の拡充を通してコミュニティにさらなる活力をもたらすキープレーヤーとして大きな期待を集めている。こういったスモールモビリティは、操作者が必ずしもスキルを持ったオペレータではないこと、また無人物流への展開を考えると、自律的な移動知能を搭載することが強く求められ、しかもその知能は、歩車共存空間という特殊な空間で歩行者と違和感なく合意形成し、所定の移動目的を達成するものでなければならない。こういった合意形成を実現する知能は、認知科学的には利他的行動と利己的行動の絶妙なバランスの上に成り立つと考えられ、周辺歩行者に対して十分な配慮（思いやり）をしつつ、かつ自身の移動目的を達成できる、「合意形成型の移動知能」を実現できるかどうかは鍵となる。

一方で、人と共生する AI の研究も盛んにおこなわれているが、上記のような歩車共存空間で AI を活用する場合、AI の説明可能性は極めて重要となる。加えて、合意形成の成否は相手の振る舞いに大きく依存するため、適切な学習データの設計が極めて難しい。この点がデータセントリックな深層学習のみによる AI では不十分とされる理由であり、何らかの知能アーキテクチャを明示的に描く必要がある。以上を勘案すると、近未来の歩車共存空間をより豊かなものとするために、利他的でかつ利己的な「合意形成」の概念を明示的に組み込んだ新たな移動知能アーキテクチャの創出が不可欠であることに疑いの余地はない。

2. 研究の目的

歩車共存空間という近未来の交通空間で周辺歩行者に配慮しつつ、所定の移動目的を達成する知能を、ここでは「合意形成型の移動知能」と定め、その設計・実装はどうあるべきかを明らかにすることが、本研究の核心をなす学術的問いである。こういった知能は、Alpha Go のようにゲームで敵を倒すための知能とは明らかに性質を異にするものであり、そもそも利他的行動と利己的行動のバランスをとって人と合意を形成する知能はどうあるべきか、という極めて挑戦的な学術的問いにつながる。本研究では、学術的問いとして定めた、合意形成型の移動知能のためのアーキテクチャを、認知科学的知見を制御工学的的方法論へと還元する視座から新たに創出し、それを支える卓越した要素技術群を開発する。その後、単なる学術的成果のみに留めることなく、将来的な企業との連携を意識しながら実証実験の道筋を立てる。具体的には、(a) 歩行者の（判断）モデルの構築とオンライン学習、(b) 判断エントロピー最小化による移動知能アーキテクチャの創出、(c) 歩行者の高精度な属性検出と気づきの推定、(d) 認知科学的仮説構築とメンタルモデルによる検証、(e) 各成果の統合実装と検証の各研究項目に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では、当該分野で活躍の第一線の研究者を結集して「2. 研究の目的」で述べた各研究項目に取り組んだ。詳細は以下の通りである。

(a) 歩行者の（判断）モデルの構築とオンライン学習

周辺他者、例えば他車両や歩行者の行動は自車両の行動の影響を受ける。すなわち、他者の行動を適切に予測するためには、自車両とのインタラクションを考慮した他者の行動モデルが必要となる。ここで行動モデルとしては、研究代表者らがこれまで取り組んできた連続・離散混在型のハイブリッドな動的システムモデルを用いる（図 1）。ハイブリッド動的システムモデルはかなり複雑な挙動を表現可能であることが知られているが、行動モデリングへの応用を考えた際、行動における判断が離散論理的、動作が連続的な動的挙

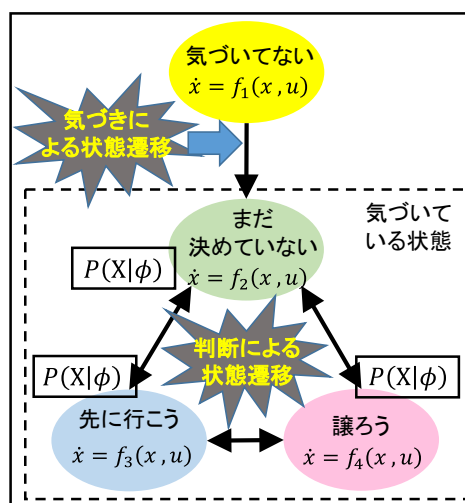


図 1 歩行者の行動モデル

動とそれぞれみなせることから、ハイブリッド動的システムモデルによる行動表現は判断と動作を統一的な数理構造で表現したモデルと言える。この点がニューラルネットワークと比べたときのハイブリッド動的システムモデルの大きな特長である。また本研究では、判断モデル、すなわち離散状態に確率測度を埋め込むことによって、判断のあいまいさを定量的に表現するモデルへと拡張する。さらには、ハイブリッド動的システムモデルのオンライン同定手法を新たに考案する。

(b) 判断エントロピー最小化による移動知能アーキテクチャの創出

図2に提案する移動知能のアーキテクチャを示す。このアーキテクチャの大きな特徴は、インタラクティブな他者の行動予測に基づく実時間での制約付き最適化による行動決定であり、この考え方は制御工学におけるモデル

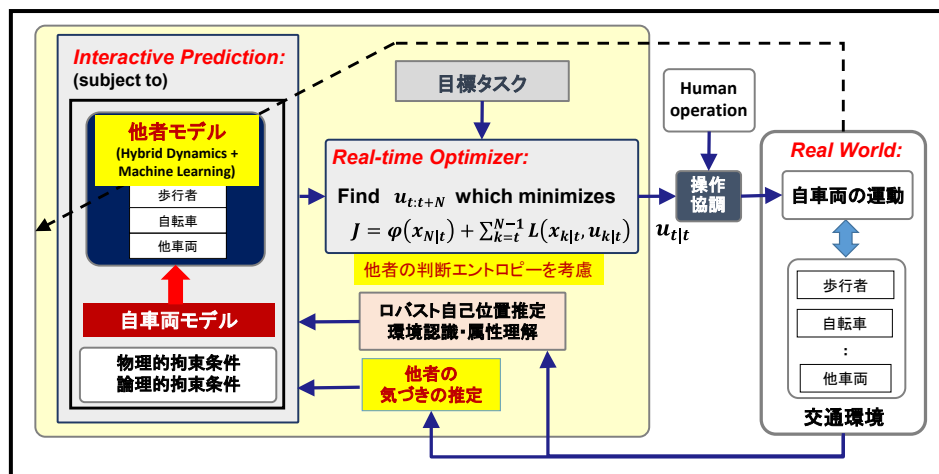


図2 合意形成型移動知能アーキテクチャ

予測制御の考え方の自然な拡張と言える。一般に、モデル予測制御を移動体に活用する際は、基本的な走行性能と様々な安全性指標からなる評価関数のもとで行動を決定することに主眼が置かれる。一方、「2. 研究の目的」で述べた他者との合意形成に関しては、その設計指針は未だ議論の真ただ中であり、本研究では、「他者が持つ判断のあいまいさ（エントロピー）」を最小化するように自己の行動を決定することこそが配慮（利他的行動）であり、他者との迅速な合意形成につながる、との認知科学的着想のもと、評価関数に判断のエントロピーを組み込むことを考える。具体的には判断モデルに付与する確率測度を softmax 関数で記述することで解析的にあいまいさを取り扱うことが可能となり、最適化問題へと帰着できる。モデル予測制御のような実時間最適化ベースの考え方を移動体に適用する場合、100[msec]以内での処理が求められるが、本研究では、連続変形法やサンプルベースアプローチを状況に応じて自律的かつ相補的に使い分ける手法を新たに考案する。

(c) 歩行者の高精度な属性検出と気づきの推定

周辺歩行者との合意形成を実現する前提として、周辺歩行者が自車両に気づいているかどうかの検出・推定は重要な技術の一つとなる。本研究では、画像認識に基づく詳細な歩行者属性検出とそれを活用した周辺歩行者の気づきの推定を行う（図1における「他者の気づきの推定」）。具体的には、アイコンタクトや体の向き、頭部変位といった各種特徴量を活用し、これらの特徴量をシーンごとに適切に使い分けることで、気づき推定の精度を大幅に向上させる。さらにはこれらの特徴量の時系列情報にも注目することで、動的なインタラクション下でも適用可能な気づきの推定メカニズムを創出する。

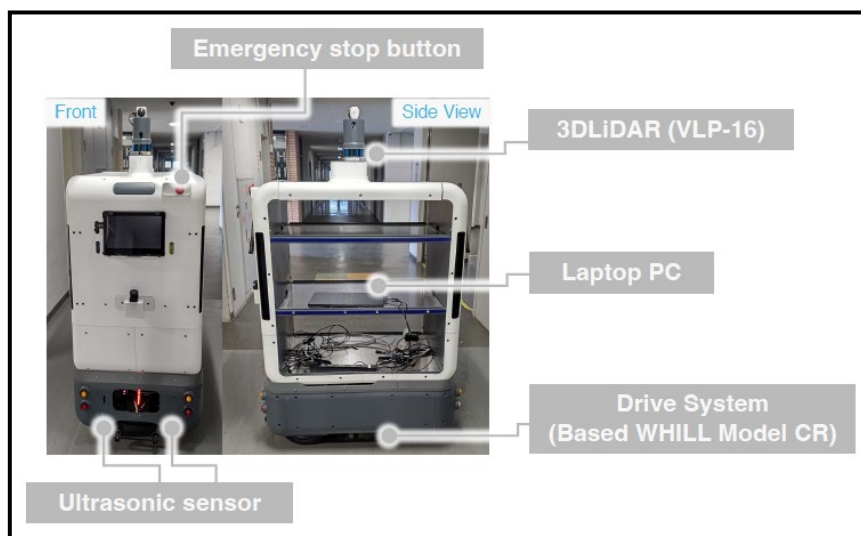


図3 実験用自律移動ロボット

復路の両方向で実験を行った。実験は 5 人の被験者に対して実験条件を変えながら合計 384 回行った。本実験は名古屋大学工学部倫理部会の審査を受け、承認を得て実施した（承認番号:23-22）。また、実験参加者には事前に実験参加に関する同意を得た。さらに、安全面への配慮として、AMR には超音波センサーと LiDAR による近距離物体検知および緊急停止機能を実装しており、被験者には万が一の場合に備えて AMR の緊急停止ボタンの位置と使用方法についても説明を行った上で実施した。

【アンケート項目】

1 回の交差ごとに端末を用いて被験者に行ったアンケートの質問内容を以下に示す。なお、アンケートの回答は(1)全く同意できない(2)同意できない(3)どちらでもない(4)同意できる(5)非常に同意できる の賛同具合による 1~5 の 5 段階から選択する方式とした。

明確性

- Q1. ロボットの動きは明確であった (clear)
- Q2. どちらが先に行くべきか迷った (hesitation)

安全性

- Q3. ロボットの挙動は安全だと感じた (safe)
- Q4. ロボットに不安を感じた (anxious)

協調性

- Q5. ロボットの挙動は自分に対し協力的だと思った (cooperative)
- Q6. ロボットに妨害されたと感じた (obstructed)

挙動の滑らかさ

- Q7. ロボットの挙動は滑らかだった (smooth)
- Q8. ロボットの挙動は急激であると感じた (abrupt)

【アンケート評価による検証】

判断エントロピー項の導入の有無が歩行者の心理状態に与える影響を評価した。図 5 に示すアンケート結果から、歩行者の判断エントロピー低減を考慮した速度計画 (with entropy) は、考慮しない場合 (without entropy) と比較して、歩行者のわかりやすさを向上、や迷いを低減させることが確認された (Q1、Q2 ; Q1 は増加、Q2 は低下 ; $p < 0.01$)。さらに、判断エントロピー項の導入により AMR の挙動の安全性、及び協調性に関する評価 (Q3、Q5) は向上し、不安感や妨害度に関する評価 (Q4、Q6) は減少したため、Q1 から Q6 のいずれにおいても歩行者側から良い評価を得ることができたと言える。一方、AMR の挙動の滑らかさに関する評価 (Q7) は減少し、急激さに関する評価 (Q8) は増加しているが、これはエントロピー項の導入により歩行者の迷いを減らすために積極的に加減速を用いるためである。以上より、人間共存環境下での移動ロボットの制御において、適度な加減速を伴う動作の明確性が、歩行者の心理的安全性を高め、結果としてロボットの社会的受容性を向上させる可能性を示唆している。

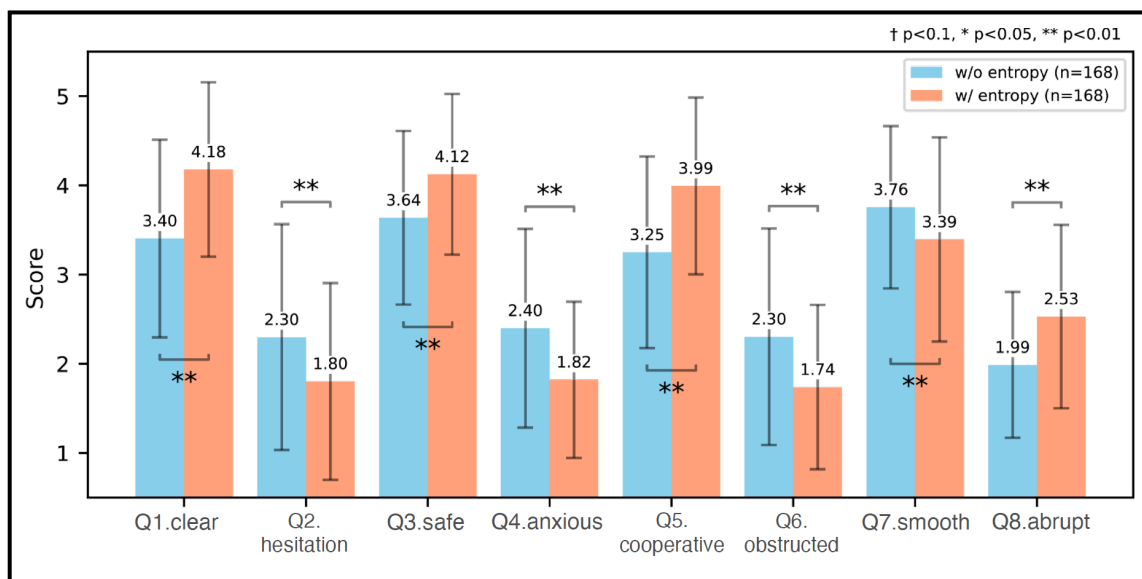


図 5 エントロピー低減制御に対するアンケート評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mishra, N. , Yamaguchi, T. , Okuda, H. , Suzuki, T.	4. 巻 56
2. 論文標題 Combination of Reinforcement Learning Models Towards considerate motion planning for multiple pedestrians	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IFAC-Papers OnLine	6. 最初と最後の頁 3616-3621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2023.10.1523	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Honda, K. , Okuda, H. , Suzuki, T. , Ito, A.	4. 巻 25
2. 論文標題 Connection of nonlinear model predictive controllers for smooth task switching in autonomous driving	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 1805-1822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asjc.2892	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ムラリーダラン アルン、奥田裕之、鈴木達也	4. 巻 59
2. 論文標題 モデル予測制御による歩行者への配慮を意識した自動運転の設計	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 472-483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.59.472	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimoto, T. , Yamazuchi, T. , Okuda, H. , Suzuki, T., Wakisaka, R. , Ban, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Bayesian Network Model of Decision-Making for Pedestrians' Crossing Behavior Considering Gaze Information at Unsignalized Intersection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings	6. 最初と最後の頁 4408-4415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITSC57777.2023.10421888	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 奥田裕之, 鈴木達也	4. 巻 67
2. 論文標題 航空機生産現場における荷物搬送 AMR の人間中心設計	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム・制御・情報	6. 最初と最後の頁 60-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asaya Shimojo, Yuki Ninomiya, Kazuhisa Miwa, Hitoshi Terai, Shota Matsubayashi, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki	4. 巻 89
2. 論文標題 How impressions of other drivers affect one's behavior when merging lanes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transportation research part F: traffic psychology and behaviour	6. 最初と最後の頁 236-248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trf.2022.06.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 西本 宇志, 奥田 裕之, 鈴木 達也, 西澤 智恵子, 山口 拓真, 伴 和徳
2. 発表標題 接近する車両の列に対する歩行者の横断判断の解析
3. 学会等名 自動車技術会学術講演会2024秋季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉浦健太郎, 青木瑞穂, 奥田裕之, 鈴木達也
2. 発表標題 共有移動空間における移動ロボットによる歩行者行動の可制御性評価
3. 学会等名 第 66 回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kosuke Suzuki, Takuma Yamaguchi, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Indication of interaction plans based on model predictive interaction control: Cooperation between AMRs and pedestrians using eHMI
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Nishimoto, Takuma Yamaguchi, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, Kentaro Haraguchi, Ryo Wakisaka, Kazunori Ban
2. 発表標題 Modelling and Analysis for Interactive Crossing Decision of Pedestrian at Non-signalized Intersection
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 情報処理装置、情報処理方法、及び情報処理プログラム（インタラクティブ・マルチシミュレータ）	発明者 伴和徳, 山口拓真, 脇坂龍, 小林栄介, 奥田裕之, 鈴木達也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-159153	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 周囲の人を所望の行動に誘導する手法	発明者 奥田裕之, 鈴木達也, 杉浦健太郎, 東條惇, 高島亨, 丸山俊	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-190109	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三輪 和久 (Miwa Kazuhisa) (90219832)	名古屋大学・情報学研究科・教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	奥田 裕之 (Okuda Hiroyuki) (90456690)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関