

データ駆動群衆シミュレーションに基づく移動ロボットのためのモビリティ基盤

代表研究者

加藤 由花

東京女子大学 現代教養学部・情報数理科学科 教授

1 研究の目的

少子高齢化、労働人口の減少などを背景に、人に寄り添うロボット、人の作業を助けるロボットなど、人を支援/代替する人共存型ロボット技術への期待が高まっている。特に、移動機構（モビリティ）を有するロボットは、運搬、介助、案内・誘導など、多くのサービスへの展開が期待されている。ここでは、人の存在を前提とした空間における、対人安全性と作業性のバランスを考慮したモビリティ技術が必要になる。近年、IoT/AI 技術の進展により、人移動を含む作業環境側の状態を機械学習手法等で推定・予測することで、モビリティ機能を強化する試みが活発に行われている。しかし、制約のない環境で動作するサービスロボットには、多様性（コンテキスト依存）と不確実性（実世界性）という根源的な課題が存在し、十分なデータが集まらない、多様な環境に適用できないという問題が存在する。また、モデルは常に不完全であり、真の最適モデルを得ることはできないという問題もある。

これらの課題の解決を目指して、本研究では、人・ロボット共存社会を実現するために、対人安全性と作業性のバランスを考慮した自律移動ロボットのためのモビリティ基盤技術の研究開発を行った。モビリティは多くのロボットサービスにとって必要不可欠な機能であるが、人の存在する作業空間では、人との近接関係を具体的に考慮した基盤技術は未だ確立されていない。本研究では、群衆シミュレーションと機械学習を併用することでロボット制御機能をクラウド（サイバー）側に構築し、これをロボット（フィジカル）側に転移することで、実世界での予測誤差やエラーに頑健であり、柔軟な知能を持つ自律移動ロボットシステムを実現することを目指した。特に、環境ごとに観測される人移動データを用いて群衆モデルやロボットの行動方を環境に適応させるデータ駆動群衆シミュレーションを中核に据え、多様な環境に適用可能なモビリティ基盤の確立を目的とした。

2 問題の設定

本研究では、モビリティ基盤の開発を目的に、以下の2つの研究課題を設定した：(1) 環境を規定・制限できない状況において、どのように適応的に環境モデル（人移動モデル）を構築するか；(2) 不確実性を伴う人移動の予測結果を、いかにロボットの経路生成に組み込むか。これらの課題を解決できれば、適応的にモデルを更新することで多様な環境での人移動を精度とともに予測し、その結果を経路計画に利用することで、対人安全性と作業性のバランスを考慮したモビリティ基盤を構築できる。

これらの課題を解決するために、具体的な研究項目として以下の4つを設定した：(研究項目 A) 環境モデル推定手法の開発；(研究項目 B) ロボット経路生成手法の開発；(研究項目 C) 人移動軌跡予測モデルの構築；(研究項目 D) サイバーフィジカル連携基盤の構築。モビリティ基盤の全体像と各研究項目との関係を図1に示す。

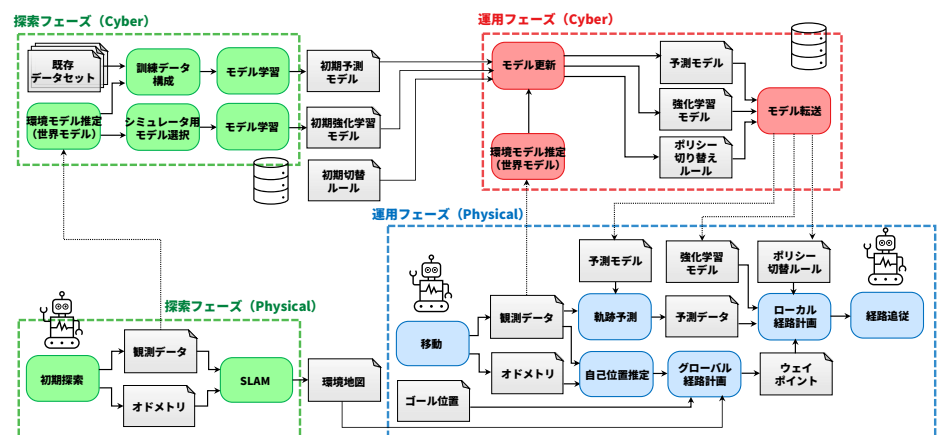


図1 モビリティ基盤の全体像と各研究項目の関係[1].

3 研究成果

3-1 研究項目 A：環境モデル推定手法の開発

研究項目 A では、センシング結果から、群衆の動きや地理的形状に関する特徴抽出を行うことで、時空間を複数のカテゴリに分類する手法を開発した[2][3]。ここでは、環境の特徴表現として、歩行者の移動軌跡や速度を 1 枚の画像として視覚的に表現する手法、およびこの画像を入力データとし、変分オートエンコーダにより特徴抽出を行った結果をクラスタリングすることで、環境を複数のカテゴリに分類する手法を提案した。特徴画像は、歩行者の位置座標、移動速度、移動方向を表現する画像を、ある時間間隔分重ね合わせることで生成する。透過画像を用いることで、重ね合わせによる濃淡（密度）を表現し、カラーマッピングにより色を変化させることで値の大きさを視覚化している。これにより、ロボットの配備環境の特徴表現が可能になった。特徴画像生成のイメージを図 2 に、手法全体の概要を図 3 に示す。

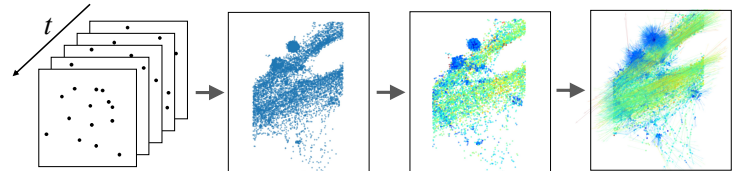


図 2 特徴画像生成のイメージ[1].

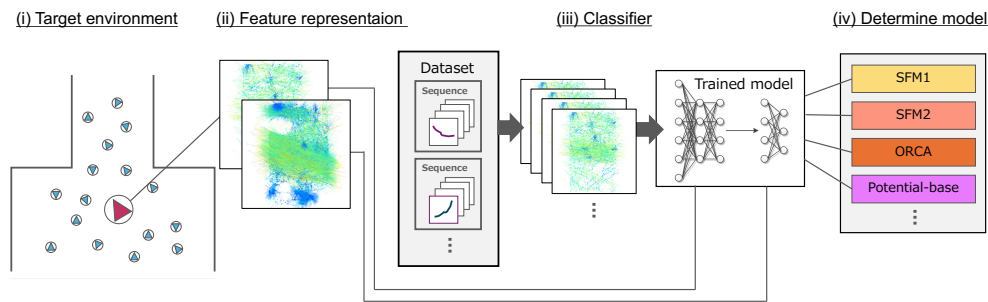


図 3 環境モデル推定手法の概要[2].

文献[2][3]では、提案手法の有効性を検証するために、大規模歩行者移動軌跡データセット（ATC pedestrian tracking dataset）を用いた評価実験を行い、本手法により視覚的に類似した特徴画像が同一のカテゴリに分類されること、すなわち群衆の移動傾向を考慮した分類が実現できることを確認した。さらに、得られた分類結果から各カテゴリの代表的な特徴を抽出し、密度・滞留・速度の組み合わせによる 4 種類のシナリオとして整理することで、カテゴリと群衆モデルを対応付ける枠組みを示した。この結果は、環境に応じたモデルの構築、群衆モデル（データ駆動群衆シミュレーションで用いる群衆の遷移モデル）の選択、ポリシー切り替えルールにおける環境適応の入力に利用される。

3-2 研究項目 B：ロボット経路生成手法の開発

研究項目 B では、環境に応じて適切な行動を生成するロボット経路生成手法を開発した。ここでは、環境に適した群衆モデルを選択・評価するための適正度評価手法と、強化学習に基づく経路探索手法の 2 つの観点から研究を進めた。

（1）群衆モデル適正度評価手法

研究項目 A で、環境をカテゴリに分類し、カテゴリごとに適切な群衆モデルを選択するためには、「ある環境に対してある群衆モデルがどの程度適しているか」を定量的に評価する尺度が不可欠である。そこで本研究では、実世界のデータセットから抽出した歩行者の移動軌跡と、同等の仮想環境で実施した群衆シミュレーションの結果とを比較することで、群衆モデルの適正度を評価する手法を提案した[4][5]。

具体的には、群衆の移動傾向全体に対して、そのばらつき度合いを確率分布で表現し、データセット（これを真値とする）およびシミュレーション結果（データセットの環境を模擬した結果）におけるこれらの分

布間の類似度を評価尺度として用いる手法を提案した。手法の概要を図4に示す。確率分布の表現方法としては、混合ガウス分布、およびサンプル値の離散分布を用い、分布間の類似度の比較にはKullback-Leibler 情報量 (KL 情報量) を用いている。前述したATCショッピングモールにおいて収集された大規模な歩行者移動軌跡データセットを用いた評価実験を行い、提案手法での評価結果と視覚的な良し悪しの評価結果との間に相関があることを確認した。

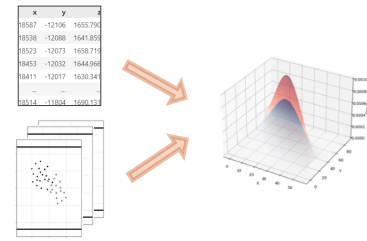


図4 手法の概要.

(2) 強化学習に基づく経路探索手法

経路生成については、変化する環境の一例として、移動するゴールに向かい群衆内を自律移動するロボットの経路生成手法の開発に取り組んだ。具体的には、ロボット周辺の群衆を構成する妨害歩行者（動的障害物）を回避しながら、ターゲット歩行者（移動するゴール）に到達するための方策を、深層強化学習 (DRL) により獲得する手法を提案した[6]。ここでは、各妨害歩行者の将来の位置を、カルマンフィルタ（ベイズフィルタ）を用いて確率分布（多変量ガウス分布）として推定し、これを座標ごとに予測期間分足し合わせ、妨害歩行者数により正規化した値を衝突コストとする。その後、この衝突コストを強化学習の報酬関数に組み込み学習を行う。

シミュレーション環境（強化学習用 Python ライブラリである Gymnasium を用いて構築、学習アルゴリズムの実装には Stable Baseline3 を利用）による評価実験を行い、提案手法は、衝突コストを考慮しない手法と比較してターゲット歩行者への到達率が高くなることを示した。つまり、提案手法により適切な方策の獲得が可能になったと考えられる。本結果より、歩行者の将来軌跡の予測が経路生成に重要な役割を果たすことが明らかになった。

3-3 研究項目 C：人移動軌跡予測モデルの構築

研究項目 C では、群衆環境における歩行者の将来の移動軌跡を予測するモデルを構築した。ロボットの安全な移動には、歩行者の将来の動きをある程度予測することが重要であるが、歩行者の軌跡予測には歩行者同士の社会的相互作用に加え、静的障害物や通行可能領域といった環境コンテキストを統合的に考慮する必要があり、予測が困難である。グラフ畳み込みに基づく Social Spatio-Temporal Graph Convolutional Neural Network (Social-STGCNN) [7] は、時空間グラフにより歩行者間の社会的相互作用を効率的にモデル化できる一方、環境情報を考慮しないため、予測軌跡が物理的制約と整合しないという問題があった。

本研究では、この問題を解決するために、グラフベースの計算効率を維持しつつ環境情報を統合し、社会的相互作用と環境制約を同時に考慮する歩行者軌跡予測手法を提案した[8]。手法の概要を図5に示す。提案手法は Social-STGCNN をベースとした上で、(1) 社会的相互作用のモデル化；(2) 環境情報統合；(3) 低次元表現に基づく予測の多様化；(4) 環境制約学習、の4つのモジュールから構成される。環境情報統合機能では、各歩行者周辺の局所環境 (32×32 ピクセル) とシーン全体の構造 (8×8 グリッド) から環境特徴を抽出し、Multi-Head Cross-Attention (4 ヘッド) により社会的特徴と動的に統合する。これにより、各歩行者が大域的なシーンのうち自身に関連する部分のみを選択的に取り込めるようにした。予測の多様化については、将来軌跡の支配的な変動が低次元の部分空間で表現できると仮定し、特異値分解 (SVD) により軌跡を低次元表現へ圧縮したうえで、k-means 法により代表的な軌跡パターン (適応的アンカー) を生成する。各アンカーは、固有の移動傾向に整合した多様な予測候補を生成する。環境制約学習 (ECAM) は、障害物領域を認識するための MapNCE 損失 (対照学習) と、衝突した予測サンプルを真値に引き寄せる EnvCol 損失により、訓練時のみ環境制約を学習することで、推論時の計算オーバーヘッドを抑える設計にした。

歩行者軌跡予測のベンチマークである ETH/UCY データセット (ETH, HOTEL, UNIV, ZARA01, ZARA02 の5シーン、観測8フレーム=3.2秒/予測12フレーム=4.8秒) を用いて評価実験を行った。評価指標には、予測期間全体の平均予測誤差である Average Displacement Error (ADE)、最終到達位置の予測誤差である Final Displacement Error (FDE)、環境整合性を定量化する障害物衝突率 (COL)、および実用性を測る推論時間を用い、Social-LSTM[9]、Social-STGCNN、提案手法を比較した。その結果、提案手法は FDE においてベースである Social-STGCNN と比べ 38.3% の改善 (0.81→0.50) を達成し、全シーンで最良の FDE 性能を示した。これは、環境情報の統合により最終到達位置の環境整合性が向上し、MapNCE 損失によって歩行可能領域を正確に学習できたためと考えられる。一方で、環境制約を重視した結果として中間時刻で真値から乖離し、予測

期間全体の平均予測誤差 (ADE : 0.48→0.65) や障害物衝突率 (COL : 平均 4.97%→17.34%) が悪化するトレードオフも確認された。特に、廊下や交差流が複雑に入り組む UNIV シーンでは衝突率が高く (50.98%), 環境情報の統合だけでは構造の複雑な環境への対応が不十分であることが示された。推論時間は Social-STGCNN (1.02 ms/サンプル) より増加したものの, Social-LSTM (38.69 ms) より短く (提案手法 26.64 ms), 実用的な計算効率を維持していることを確認した。

本研究項目により, 環境情報を統合した軌跡予測の有効性を実証し, 研究項目 B (経路生成) と連携可能な予測モデルの基礎を構築した。

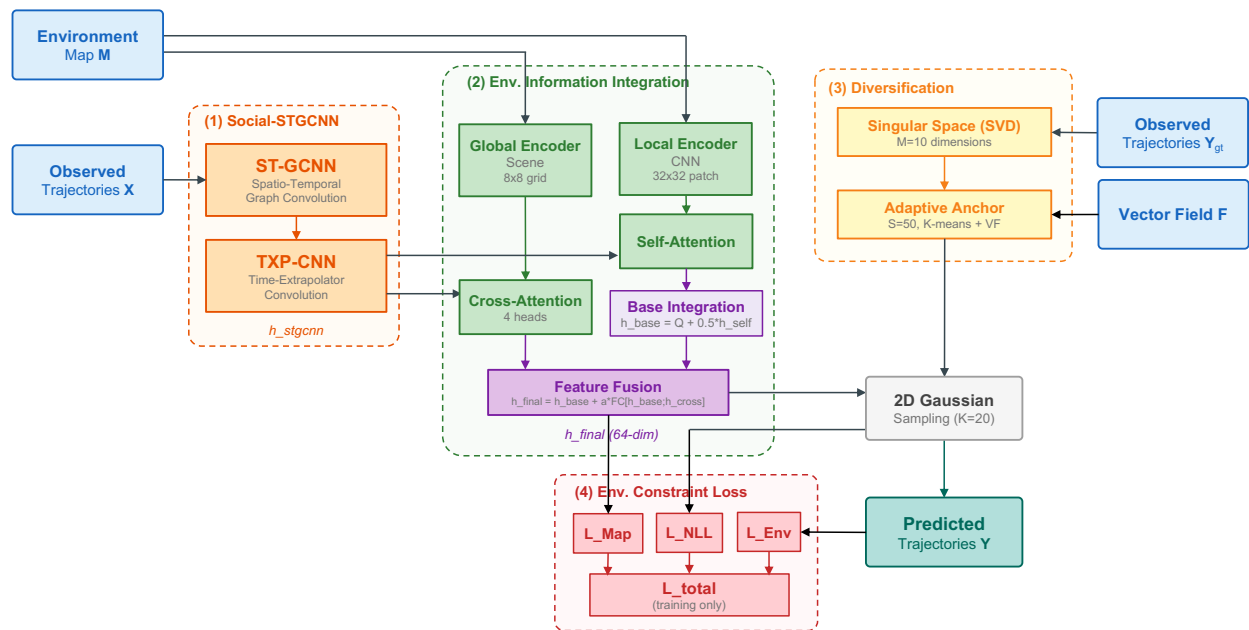


図5 社会的相互作用と環境情報を統合した軌跡予測手法の概要[8].

3-4 研究項目 D : サイバーフィジカル連携基盤の構築

研究項目 D では, 研究項目 A~C を統合し, クラウド (サイバー) 側とロボット (フィジカル) 側を連携させるモビリティ基盤を設計した。管理モジュールの設計については, 研究協力者と連携し, クラウドと IoT を統合するシステム基盤である Logical IoT Cloud (LIC) に関する研究を進めた[10][11]。LIC は, 物理センサ・アクチュエータを論理的に抽象化した Logical Sensor (LS)・Logical Actuator (LA) を提供する基盤であり, サイバーフィジカルシステムにおける制御機能の連携枠組みとなる。

特に本研究では, LA に関する制御コマンドのスケジューリングとトランザクション管理の方式を設計した[10]。LA は通常, 一つの IoT アプリケーションに占有されるため, 複数アプリケーションからのアクセスを調停する管理機能が必要になる。LIC では, (1) トランザクションモード, (2) パススルーモード, (3) エミュレーションモードの 3 つの動作モードを備えることで, 複数の IoT アプリケーションが論理アクチュエータを介した物理アクチュエータへ効率的にアクセスできる仕組みを実現した。このアーキテクチャは, クラウド上で構築したロボット制御機能をフィジカル側へ転送・反映する際の管理基盤として位置づけられる。LIC のアーキテクチャを図 6 に示す。

実験と評価については, ROS2 (Robot Operating System 2) ベースで開発可能なロボットプラットフォーム (カチャカ) を用いた実験を計画し, 物理ロボッ

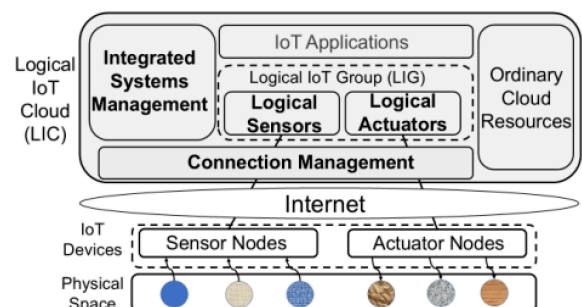


図6 Logical IoT Cloud のアーキテクチャ。

トの構築を行った。LICについても、実験室内にGPUサーバ環境を構築し、Kubernetesをベースとした分散処理システムの実装を完了した。さらに、要素技術間のデータの流れについても整理を行った。研究項目Aで生成される環境カテゴリと特徴表現は、研究項目Bにおける群衆モデル選択(適正度評価)の入力となり、さらに研究項目Cの軌跡予測モデルを環境へ適応させる際の手がかりとして利用される。研究項目B・Cで構築された群衆モデルおよび予測モデルは、クラウド上で学習・更新され、ロボット側に転送されて経路生成に利用される。

本研究期間内では、リアルタイムでの一気通貫の連携実験までは到達しなかったが、モビリティ基盤を構成する各要素技術の研究開発と、それらを統合するサイバーフィジカル連携基盤の設計・構築(実装)を完成させ、全体としてデータ駆動群衆シミュレーションに基づくモビリティ基盤の枠組みを確立した。

4 今後の予定

本研究では、データ駆動群衆シミュレーションに基づくモビリティ基盤を構成する要素技術として、環境モデル推定(研究項目A)、群衆モデル適正度評価と強化学習に基づく経路生成(研究項目B)、環境情報を統合した人移動軌跡予測(研究項目C)、およびサイバーフィジカル連携基盤(研究項目D)の研究開発を行い、それぞれについて有効性を検証した。一方で、研究項目Aの環境分類結果を研究項目B・Cの適応的なモデル選択・更新に組み込み、さらにその予測結果を経路生成に取り込むリアルタイム連携については、設計・部分実装の段階にとどまった。

今後は、当初の目標であるサイバーフィジカル連携によるロボットの実時間知的制御を実現するため、各要素技術の統合とリアルタイム連携を進める予定である。具体的には、カチャカを用いた実機環境において、環境分類に基づく群衆モデル選択、環境適応的な軌跡予測、強化学習に基づく経路生成を一気通貫で動作させ、実環境での予測誤差やエラーに頑健なモビリティ基盤を検証する。また、本研究の成果を活用し、公共施設での構内誘導、店舗案内、買い物支援など、人の存在を前提とした作業空間における多様なロボットサービスへの展開を図り、人・ロボット共存社会の実現を目指していく。

【参考文献】

- [1] 加藤由花: データ駆動群衆シミュレーションに基づく移動ロボットのためのモビリティ基盤, 電気学会産業応用部門大会, 5-S2-5, 2025 (8).
- [2] Saki Nakazawa and Yuka Kato: Environment Classification Method Using Autoencoder to Select Appropriate Crowd Model for Robot Simulation, Proc. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2024), pp. 1877-1882, 2024 (8).
- [3] Saki Nakazawa and Yuka Kato: Evaluation of an Environment Classification Method for Optimal Crowd Model Selection in Autonomous Mobile Robot Simulations, Proc. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2025), pp. 491-496, 2025 (1).
- [4] Rio Nishida and Yuka Kato: A Crowd Model Evaluation Method for Autonomous Mobile Robot Simulator, Proc. International Conference on Human System Interaction (HSI 2024), pp. 1-6, 2024 (7).
- [5] Rio Nishida and Yuka Kato: Evaluation of Crowd Model Suitability for Mobile Robot Simulation, Proc. IEEE/IFAC International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT 2025), pp. 1-6, 2025 (7).
- [6] 舟木詩織, 加藤由花: 移動するゴールを追跡する自律移動ロボットのための深層強化学習に基づく経路探索, 情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会, ITS-105, pp. 1-7, 2026 (5).
- [7] Abdualлах Mohamed et al.: Social-STGCNN: A Social Spatio-Temporal Graph Convolutional Neural Network for Human Trajectory Prediction, Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020), pp. 14424-14432, 2020.
- [8] Yuka Takahara and Yuka Kato: Spatio-Temporal Graph-Based Pedestrian Trajectory Prediction with Environmental Context Integration and Constraint Learning, Proc. IEEE/IFAC

- International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT 2026), 2026 (7). (to appear)
- [9] Alexandre Alahi et al.: Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces, Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016), pp. 961-971, 2016.
- [10] Takayuki Kushida and Yuka Kato: Scheduling and Transaction Management of Control Commands for Logical Actuators on Logical IoT Cloud, Proc. of IEEE International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud 2025), pp. 1-6, 2025 (11).
- [11] Takayuki Kushida and Yuka Kato: Integrated Architecture for Cloud and IoT with Logical Sensors and Actuators - Logical IoT Cloud, Artificial Intelligence and High Performance Computing in the Cloud, Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1220, Springer, pp. 117-136, 2025 (1).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
環境に適した群衆モデル選択のための歩行者移動傾向の可視化	情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会	2024 年 5 月
混雑度が移動ロボットシミュレータで利用する群衆モデル選択に与える影響度の評価	情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会	2024 年 5 月
A Crowd Model Evaluation Method for Autonomous Mobile Robot Simulator	Proc. of International Conference on Human System Interaction (HSI 2024)	2024 年 7 月
Environment Classification Method Using Autoencoder to Select Appropriate Crowd Model for Robot Simulation	Proc. of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2024)	2024 年 8 月
自律移動ロボットシミュレータにおける環境に適した群衆モデル選択のための環境分類手法の評価	情報処理学会マルチメディア通信と分散処理 (DPS) ワークショップ	2024 年 11 月
移動ロボットシミュレータで利用する群衆モデルの適正度評価	情報処理学会マルチメディア通信と分散処理 (DPS) ワークショップ	2024 年 11 月
Integrated Architecture for Cloud and IoT with Logical Sensors and Actuators - Logical IoT Cloud	Lecture Notes in Networks and Systems, Springer	2025 年 1 月
Evaluation of an Environment Classification Method for Optimal Crowd Model Selection in Autonomous Mobile Robot Simulations	Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2025)	2025 年 1 月
Evaluation of Crowd Model Suitability for Mobile Robot Simulation	Proc. of IEEE/IFAC International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT 2025)	2025 年 7 月
データ駆動群衆シミュレーションに基づく移動ロボットのためのモビリティ基盤	電気学会産業応用部門大会	2025 年 8 月
Scheduling and Transaction Management of Control Commands for Logical Actuators on Logical IoT Cloud	Proc. of IEEE International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud 2025)	2025 年 11 月
社会的相互作用と環境情報を統合したグラフ畳み込みネットワークに基づく歩行者移動軌跡予測	情報処理学会 ITS 研究フォーラム	2026 年 3 月
移動するゴールを追跡する自律移動ロボットのための深層強化学習に基づく経路探索	情報処理学会 ITS 研究フォーラム	2026 年 3 月
移動するゴールを追跡する自律移動ロボットのための深層強化学習に基づく経路探索	情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会	2026 年 5 月
Spatio-Temporal Graph-Based Pedestrian Trajectory Prediction with Environmental Context Integration and Constraint Learning	Proc. of IEEE/IFAC International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT 2026)	2026 年 7 月 (掲載予定)