

群集流の相転移検知に基づく 適応型ロボットナビゲーション基盤の構築

加藤 由花 (東京女子大学), 片桐 孝洋 (名古屋大学), 大島 聡史 (九州大学), 伊藤 愛菜 (東京女子大学), 舟木 詩織 (東京女子大学)

JHPCN 公募型共同研究 (研究期間：2026年4月～2027年3月)

1 背景と課題

駅や商業施設などの混雑環境を自律移動するサービスロボットにとって、周囲の歩行者の状態は常に一定ではない。

群集の状態は密度や流速の変化に伴い、物理学における相転移のように動的に遷移する。



従来のDRL (Deep Reinforcement Learning: 深層強化学習) ナビゲーションは特定の固定された群集モデルを前提とし、こうした動的な相の変化に対応できない。

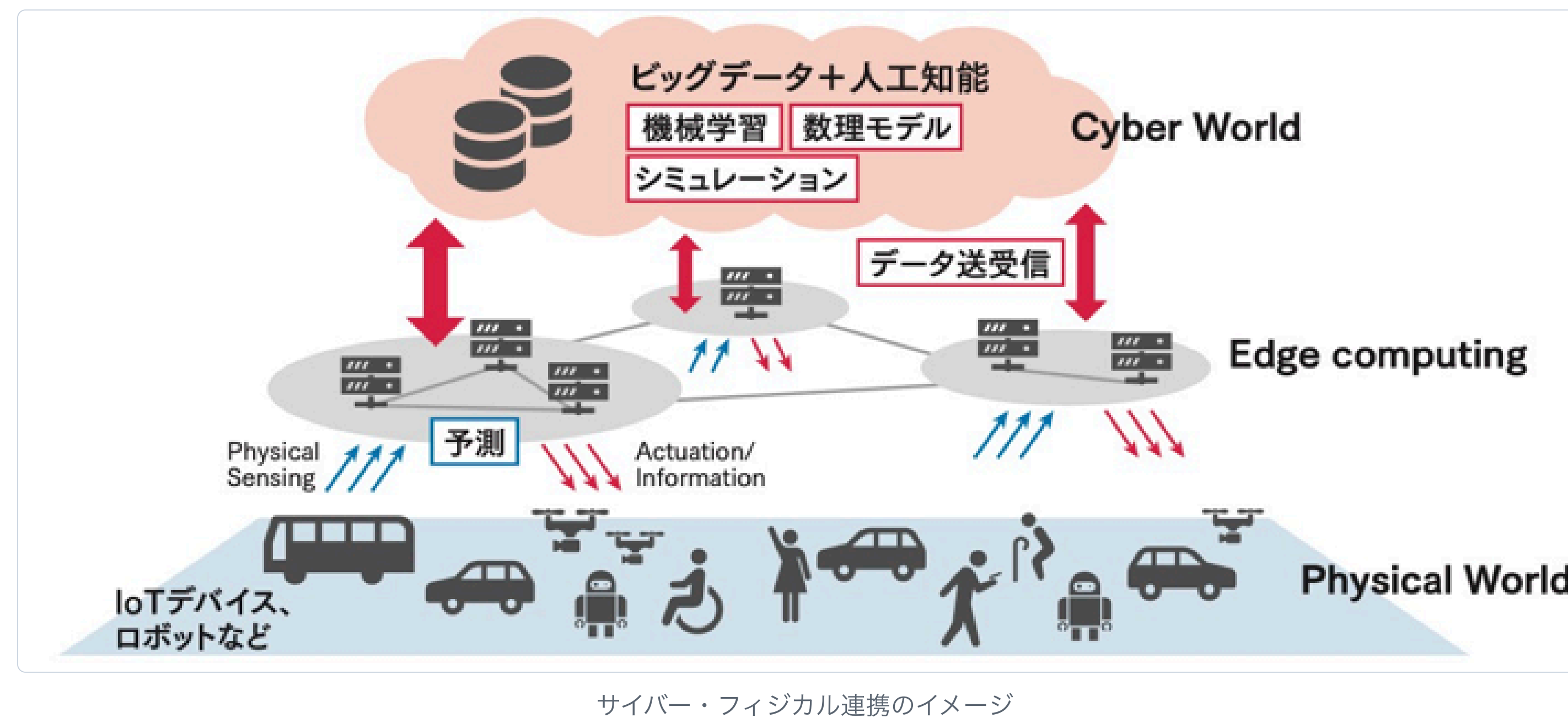
従来手法 単一の固定群集モデルを前提。環境が大きく変化すると対応が困難となり破綻する。

本研究 センシング結果で群集相を検知。モデルを動的に切り替え 環境変化に頑健で柔軟な自律移動を実現。

→ 群集の状態変化を相転移として捉えて検知し、各相に対応する事前学習済みモデルを動的に切り替える適応型ナビゲーション基盤を構築する。

2 研究目的・学際融合の意義

- サイバー空間 (群集シミュレーション・DRL学習) とフィジカル空間 (相転移検知・経路生成) の協調系として経路生成を捉える。
- ロボティクス × データ科学 × 高性能計算 (HPC) が密接に関連する融合領域を創生 → 公募型共同研究として実施する意義。
- 長時間のGPU学習が必要なDRLにスパコンを活用し、**フィジカルAIにおける新たなスパコン・GPU利活用研究分野**を開拓。



3 適応型ナビゲーション基盤の全体像

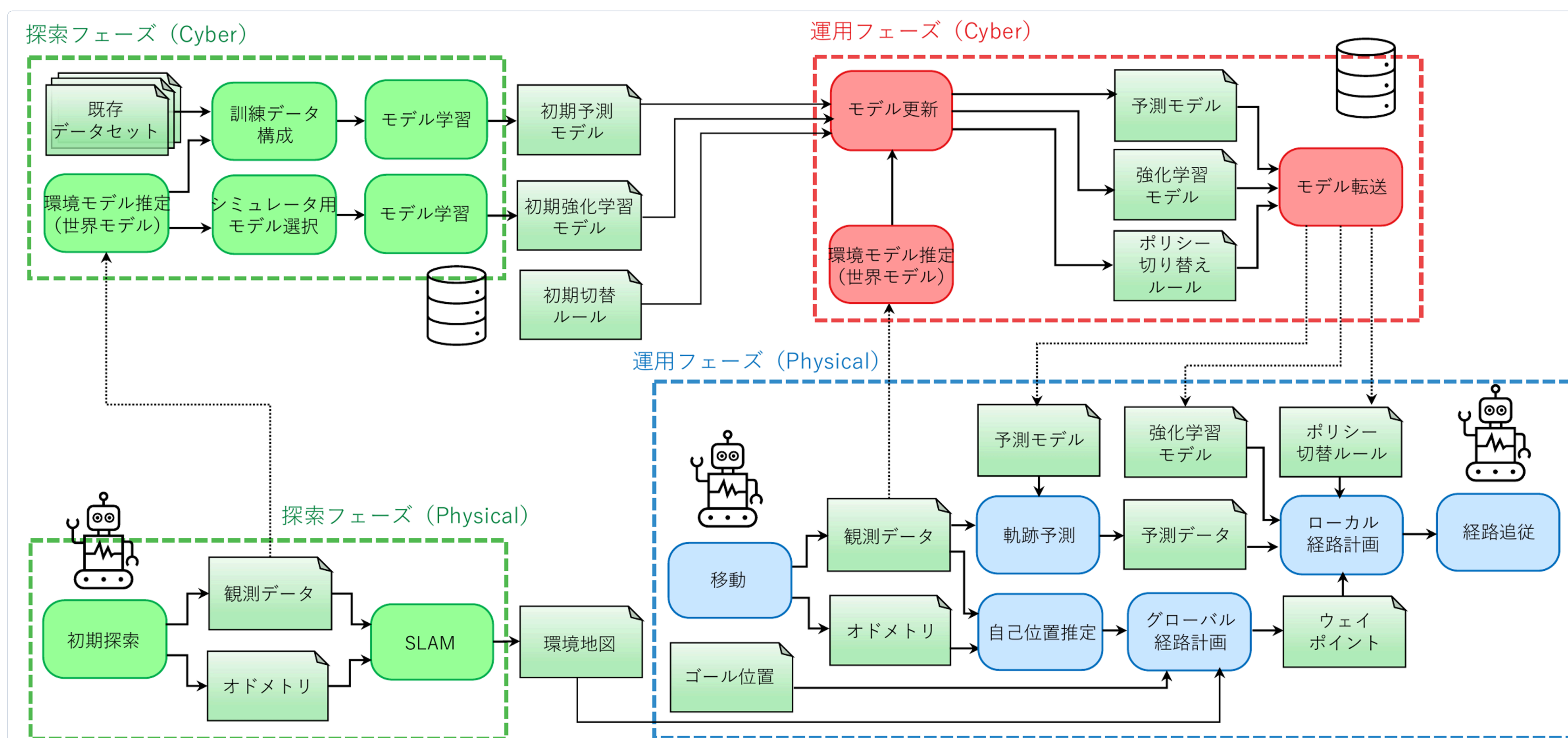
ロボットは環境側の事前知識を一切持たず、自身のセンサーのみから環境情報を取得する。基盤利用を2フェーズに分けて考える。

- 探索フェーズ:** 未知環境で探索し、少量データから初期モデルを構築。
- 運用フェーズ:** サービス運用中に、非同期で適応的にモデルを更新・転送。

2つのループの協調

- リアルタイムループ (Physical) = 低遅延な相適合モデル選択
- 非同期更新ループ (Cyber) = GPUによる継続的な再学習

→ Sim-to-Real Gap を動的に解消し、再学習コストを排除。



ナビゲーション基盤の全体像 (探索/運用フェーズ × Cyber/Physical)

3 研究計画

群集相の推定から、相に応じた群集モデル・DRLモデルの構築、相転移トリガーによる動的切替、運用中の非同期更新まで、5つのサブ課題で基盤を実現する。

- 群集相推定手法の開発** ROS2 GPU
オンボードセンサー (LiDAR・カメラ) から密度・速度ベクトル相関・挙動の乱雑さを抽出。VAEを用いた環境分類手法 [1] を拡張し、現在の群集相を判定する分類器を構築。
- 群集相に対応した群集モデルの構築**
SFM・ORCA等とその拡張をベースに、Free Flow/Congested/Jamming の3種類の群集モデルを構築。実環境の歩行軌跡データで妥当性を検証 [2]。
- 群集相に対応したナビゲーションモデルの事前学習** GPU
DQN・PPO等により、相ごとに最適化した3種類のDRLモデルを学習 (目的速度維持/歩行者流追従/衝突回避・デッドロック防止)。
- 相転移トリガーによる動的モデル切り替え** ROS2
観測データから相転移を検出した際にDRLモデルを切り替える機能を実装 [3]。再学習せず **低遅延・高精度** に適応。
- ナビゲーションモデルの非同期更新の検討** GPU
運用中に蓄積した環境データで群集挙動を再モデリングし、**非同期にDRLを再学習**してバックグラウンドでモデルを更新・転送。

4 使用計算資源

計算資源	規模	用途 (研究計画)
玄界 ノードグループB (九州大学・共有)	2,000 ノード時間 (予定)	(1) 分類器の開発 (3) DRLモデル学習 効率的なGPU活用法の開発
不老・武 Type II サブシステム (名古屋大学)	915 ノード時間 (予定)	(5) DRLモデル再学習 効率的なGPU活用法の開発

5 まとめと期待効果

- 群集流の相転移検知に基づく適応型ロボットナビゲーション基盤を構築。
- 再学習コストの排除・計算リソース最適化・継続的モデル更新を実現。
- フィジカルAIにおけるスパコン/GPU利活用手法を確立し、HPCと機械学習・ロボティクスの融合を推進。

応用先: 駅・空港・商業施設・病院など、混雑が動的に変化する実環境での自律移動ロボット。

相転移検知 DRL動的切替 Sim-to-Real サイバー・フィジカル協調

学際融合 (ロボティクス × データ科学 × HPC)