

時空間多次元集合データ解析技術による集団最適誘導

本稿では人や車などの流れに関するリアルタイム観測データから、近未来の混雑・渋滞リスクを予測し、これを回避する集団最適誘導策をオンラインで自動的に導出する技術の取り組みについて紹介します。機械学習技術を活用したシミュレーションにより、不測の事態にも対応可能な集団最適誘導策を導出する技術の確立により、快適で安心・安全な社会インフラの実現をめざします。

な や ふとし†1 みやもと まさる†2

納谷 太 / 宮本 勝

う え だ な の り†1

上田 修功

NTTコミュニケーション科学基礎研究所^{†1}
NTTサービスエボリューション研究所^{†2}

時空間多次元集合データ解析技術から集団最適誘導技術へ

センシング技術の向上とスマートフォンアプリやIoT (Internet of Things) デバイスの急速な普及に伴い、車や物の動き、人の行動や、環境の変化などに関する多種多様なデータがいたるところで計測されています。このように収集・蓄積された多種多様かつ膨大なデータの組合せから、その中に潜む本質的かつ有用な情報を抽出し、適切に活用することは非常に困難な課題です。NTTでは、IoT向けのAI (人工知能) 技術として、実空間やサイバー空間において収集・蓄積された多種多様なデータから、森羅万象 (物、人、環境) における情報を読み解き、瞬時に検知・分析・予測し、実世界にフィードバックする「Ambient-AI」の研究開発を進めています⁽¹⁾。

Ambient-AIを支える要素技術の1つとして、複数の属性を含む多次元データから、データ間の時空間的な関係性をモデル化し、事象の発生個所と時期を予測する時空間多次元集合データ解析技術を構築してきました^{(2), (3)}。時空間多次元集合データ解析技術はデータの「時間」「空間」「多次元」「集

合」の4要素を考慮し、近未来の事象を予見・洞察することをめざしています。「集合」という要素は、メッシュ当りの人口や車両数などのように、個々を識別できない、集合としての集計データのみからでも、時空間的な人や車などの流れを推定することを意図したものです。

本稿では本技術をさらに発展させ、リアルタイムに観測された人や車などの流れに関する実空間の情報を、サイバー空間であるシミュレーション環境の中にオンラインで取り込んでその時空間的な特徴をモデル化し、直近に発生し得る混雑・渋滞リスクを瞬時に予測し、さらにこれを回避するように集団を先行的かつ最適に誘導する技術⁽⁴⁾の実現に向けた、最新の研究開発の取り組みについて紹介します。

学習型マルチエージェントシミュレーション

人、車、動物、昆虫などの自律的な行動主体 (= エージェント) の個々の振る舞いや、それらを取り巻く環境とのミクロな相互作用をモデル化し、複数のエージェント間および環境との相互作用から発現するマクロな現象を分析・予測する手法として、マルチエー

ジェントシミュレーション (MAS : Multi-Agent Simulation) が広く活用されています。MASを用いた解析手法は、従来より複雑系と呼ばれる分野において、社会を構成する人や、脳内ネットワークを構成する神経細胞、気象現象を引き起こす大気中の分子・原子など、個々のミクロな挙動は理解し記述できても、社会活動、脳内活動、気象現象など全体としてのマクロな挙動を個々の要素の挙動に分解できないような大規模なシステムを分析するうえで広く研究されてきました。近年ではセンサネットワーク、スマートグリッド、高度道路交通システムへの適用や、災害時での避難誘導シミュレーションなどに活用されています。

例として、スタジアム内にいる数万人にもおよぶ観客を退場させる誘導シーンを考えます。この場合、個々の観客がエージェントであり、それぞれが現在いる場所からスタジアムの出口を経由して退場し、目的とする駅に向かって移動します。観客の移動においては、個々の観客の老若男女などの属性に関連した平均的な歩行速度 (例えば時速 4 km/h) があり、さらに歩行する道の混雑状況 (群集密度) に比例して歩行速度が減衰するモデルが一般的

に用いられます。雑踏警備の手引き⁽⁵⁾などでは、群集密度が1.2人/m²以上になると追い越しが困難になり歩行速度が低下しはじめ、4人/m²以上になると停止するとされています。群集密度はサービスレベルともいわれ⁽⁶⁾、安全基準を満たすサービスレベルが確保できるように、誘導動線における道幅や空間、群集の流量が算定されます。

従来のMASを用いた解析では、歩行速度などのパラメータや誘導経路や群集流量などの誘導策を人手で設計し、これをシミュレーションして誘導策の効果を事前に評価する方法が一般的であり、実際の群集警備においても活用されています(図1(a))。しかし、これらのパラメータや誘導策は事前に決められた少数の組合せに限定されており、現実の人の動きや誘導オペレーションによる観測結果とは必ずしも一致するものではありません。

しかし、IoTやセンシング技術が急速に進歩しつつある昨今では、局所的ではあるものの、実世界における人の流れや混雑状況について、監視カメラやGPS、Wi-Fi、ビーコンなどのさまざまな測位手段でリアルタイムに計測することが可能です。NTT研究所では、リアルタイムに観測された人の流れなどに関する実空間の事象をサイバー空間にあるシミュレーション環境に写し取り、モデル化したパラメータを観測データに基づいて自動学習し、事象の時空間的な発展を予測する学習型MASの構築を進めています(図1(b))。学習型MASを活用することにより、直近の混雑リスクを予測し、それを回避する集団最適誘導策をオンラインで随時自動的に導出し、警備員など

による誘導を支援する技術の確立をめざしています。

直近混雑リスク予測と集団最適誘導策の自動導出

直近混雑リスク予測の例を図2に示します。各種センサでリアルタイムに観測され、シミュレーション環境に取り込まれた人流データのうち、例えば直近の過去15分間のデータを活用し、その後の時空間的な挙動をシミュレーションします。前述の時空間多次元集合データ解析技術を組み合わせることにより、5分後、10分後、20分後の直近の未来における時空間的な混雑リスクを高精度に予測します。図2では、近隣駅からスタジアムに向かう観客の人流に関し、特にスタジアムの北側にある入口周辺の混雑が20分後に発生することを予測しています。

次に、この混雑リスクを解消する誘導策候補を計算機内で自動生成し、最

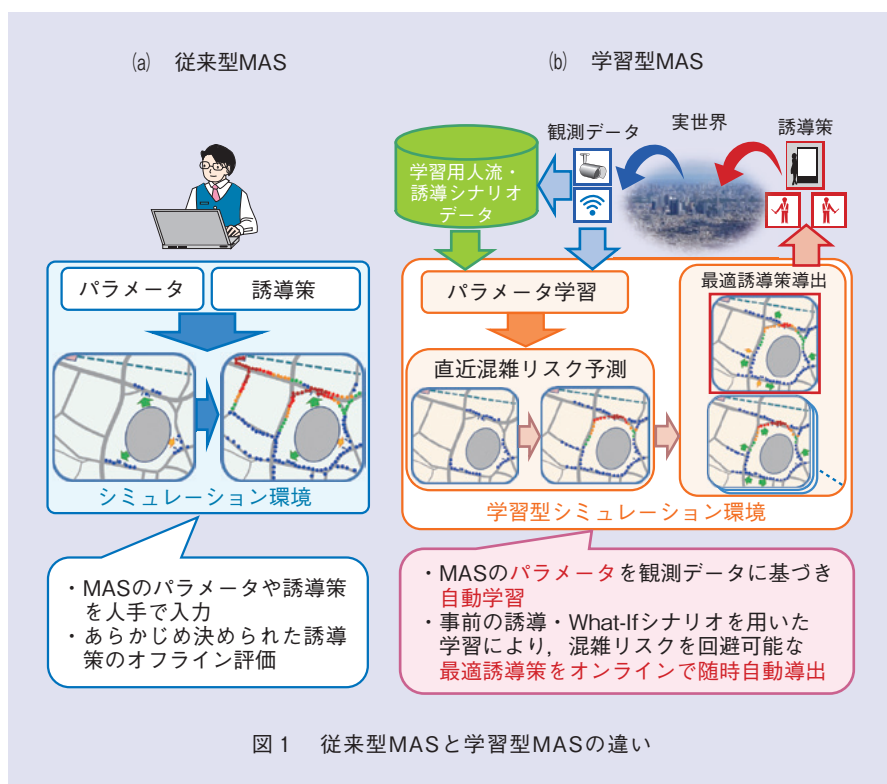


図1 従来型MASと学習型MASの違い

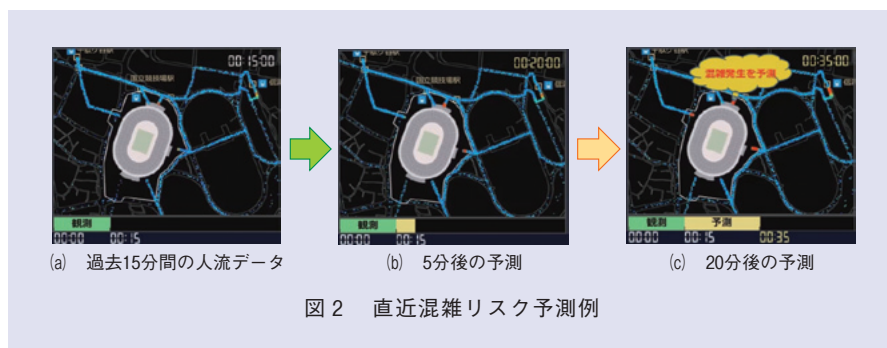


図2 直近混雑リスク予測例

適誘導策を探索します(図3)。誘導策は、この例では、スタジアムの入口6カ所について、1つ以上の入口を一時的に閉鎖し、別の入口に向かわせるようなことを想定します(図3の誘導策B)。どのタイミングで、どの入口をどのくらいの時間閉鎖するのか、もしくは1つの入口を完全に、もしくは部分的に閉鎖するのかなどを考慮すると、その組合せの数は膨大になります。膨大な誘導策候補の中でも、誘導効果のない候補や、現場で実際にオペレーション不可能な候補、もしくは混乱をきたすような候補について効率的に絞り込みをし、最適な誘導策を瞬時に探索します。最適性の基準については、全観客がスタジアム内に到着完了するまでの所要時間を最短にする、あるいは、観客が混雑して停滞する時間やエリアを最少にするなどの基準が考えられます。しかし、どの誘導策が最適基準値を与えるのかを直接的に評価することは困難であり、膨大な探索空間を網羅的に探索することも非現実的で

す。このような問題を解決する手法として、ベイズ最適化という機械学習の手法を用い、少数の探索結果から有望な候補を効率的に探索し、最適な誘導策を導出します。例えば図3の探索結果からは、25分時点で2カ所の入口を閉鎖する誘導策を導出し(図4)、警備スタッフに提示することにより観客の誘導を行います。誘導により観客の挙動は変化しますが、必ずしもすべての観客が誘導に従うとは限りません。このため、常に観測を行い、新たな混雑リスクの発生が予測された場合、同様に最適誘導策の探索を行い、群集を誘導するといった一連のフィードバックループを繰り返します。

競技場周辺の入退場シーンでの適用例

8万人の観客がスタジアムに入場するシーンでの最適誘導の有無によるシミュレーション比較結果を図5に示します。図5(a)は、スタジアムへの観客が駅から来始めて1時間20分

後時点の人流を示しますが、誘導なし(図5(a)左)では、スタジアム北側に周辺駅が集中しているため、駅に近い入口で混雑が発生し、滞留して前に進むことのできない観客の待機列が一般道にはみ出しています。一方、誘導あり(図5(a)中央)では、北側の入口をところどころ封鎖することにより特定の入口への混雑集中を回避しており、待機列が一般道に発生することは抑制されています。誘導ありでは図5(b)中央に示すように約2時間で全観客がスタジアム内に到着できるのに対し、誘導なし(図5(b)左)では混雑の自然解消に時間を要し、全員到着までにさらに1時間程度かかる結果となりました。図5(a)、(b)右下には、横軸を時間、縦軸を待機人数としたグラフを示しますが、誘導ありの場合には待機人数が少なく抑えられていることが分かります。特に夏の炎天下で開催されるイベントにおいては、待機人数の削減は重要な課題であり、提案手法の効果が期待されます。

次に、8万人の観客がスタジアムから周辺駅に向かう退場シーンを考えます。ここで、通常の誘導計画の事前検討では想定しないような、不測の事態



図3 誘導策候補の自動生成と最適誘導策の探索



図4 自動導出された最適誘導策



(a) 1時間20分後



(b) 約2時間後

図5 入場シーンでの最適誘導策によるシミュレーション結果

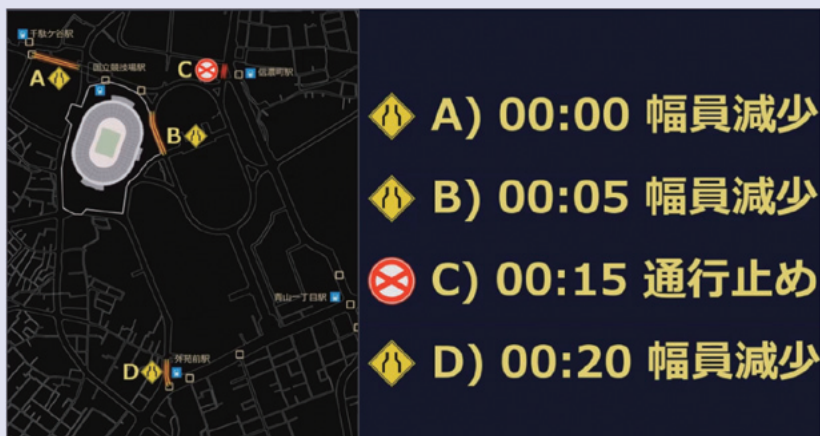


図6 退場シーンでのWhat-If シナリオ

急車両搬入などの幅員（道路の道幅）の減少（A, B, D）や、事故等による通行止め（C）が発生したとします（図6）。このような状況下においても、提案手法によって最適な誘導策の導出が可能か否かをシミュレーションした結果を図7に示します。

図7(a)の退場開始後20分では4カ所でアクシデントが発生しており、誘導の有無によらず人流の状況は変わらず、地図右上に発生した通行止めの影響から赤い混雑箇所が発生し始めています。図7(b)の30分後では、誘導ありの場合には上記通行止めの影響による混雑を回避する迂回路への誘導により混雑が解消され、図7(d)の2時間後には全観客が目的の駅に到達できていることが分かります。一方、誘導なしの場合には、図7(c)の1時間20分後の時点で至るところで混雑が発生し、図7(d)の2時間後においても混雑が解消されず、誘導ありに比べて30分以上の所要時間と多数の待機人数が発生する結果となります。提案技術では、あらかじめ想定したアクシデントのみならず、不測の事態が複合的かつ連続的に発生した場合においても、その都度直近の混雑を予測し、最適な誘導策を随時自動的に導出することが可能です。

今後の展開

本稿で紹介した人流シミュレーションは、あくまで過去の駅利用者数などの統計から生成した擬似データに基づくものですが、NTTではリアルなイベント会場やスタジアムなどでの人流の実測と、実測データに基づく学習型シミュレーション環境の構築を進めて

（アクシデント）が退場開始から20分の間に立て続けに4カ所で発生する

シナリオを考えてみます。駅へ向かう人流と駅から出てくる人流の交錯、救

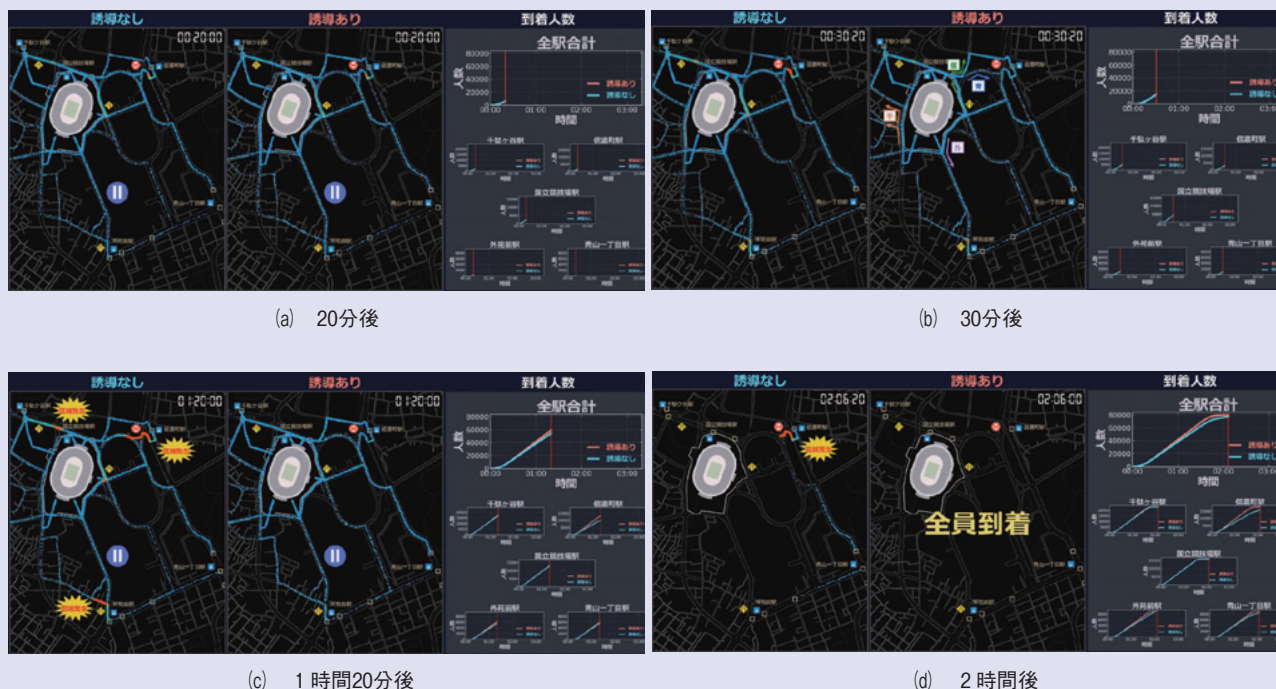


図7 退場シーンでの最適誘導策によるシミュレーション結果

います。また、本技術は、人流のみならず、交通流や物流、通信トラフィックなど、さまざまな社会インフラにおける「流れ」のリスク予測およびインフラの最適制御への適用も期待されます。今後2020年に向けて、大規模なイベント会場および駅、道路網などを包含周辺エリアでの流れの計測、およびシミュレーションの精緻化を進め、不測の事態にも対処可能な集団最適誘導技術の実現に向けて研究開発を進めていきます。

■参考文献

- (1) 山田・高橋・納谷・池邊・古川：“NTTグループにおけるAI研究の取り組みと方向性,” NTT技術ジャーナル, Vol.28, No.2, pp.8-13, 2016.
- (2) 納谷・澤田：“多次元複合データ分析から時空間多次元集合データ解析技術へ,” NTT技術ジャーナル, Vol.27, No.12, pp.15-19, 2015.
- (3) N. Ueda, F. Naya, H. Shimizu, T. Iwata, M. Okawa, and H. Sawada: “Real-time and Proactive Navigation via Spatio-temporal

Prediction,” Proc. of the First International Workshop on Smart Cities: People, Technology and Data, in conjunction with UbiComp2015, pp.1559-1566, Osaka, Japan, Sept. 2015.

- (4) 上田：“時空間予測技術に基づく先行的集団最良誘導,” 応用統計学 (招待論文), Vol.45, No.3, pp.89-104, 2016.
- (5) <http://www.police.pref.hyogo.lg.jp/sonota/zattou.htm>
- (6) フルーイン：“歩行者の空間一理論とデザイン,” 鹿島出版会, 1974.



(左から) 納谷 太/ 宮本 勝/
上田 修功

IoTとAIを組み合わせた革新技術の創出と実環境での実証を進め、社会課題の解決に貢献する技術の確立をめざします。ご意見、ご要望をお待ちしています。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
協創情報研究部
TEL 0774-93-5272
FAX 0774-93-5155
E-mail naya.futoshi@lab.ntt.co.jp