

データ駆動型アプローチによる 群集マネジメントシステムの開発と応用



技術解説

安 福 健 祐*

Development and Application of a Data-Driven Crowd Management System

Key Words : Data-driven crowd management, Digital twin, Multi-agent simulation

はじめに

イベント会場、スタジアム、大規模商業施設など不特定多数の人が集まる場所において、群集の安全性確保と効率的な人流誘導は重要な課題である。従来、これらの群集マネジメントは経験則や熟練者の知識に基づいて行われてきたが、近年では、より科学的かつ定量的なアプローチによる計画立案と実行が求められている。特に、施設内の回遊性向上や出口付近の混雑緩和、緊急時の迅速な避難誘導など、様々な状況に対応するための効果的な手法の開発が期待されている。

群集のシミュレーション技術としては、マルチエージェントシミュレーションが有効な手法として知られており、大規模イベントにも応用され始めている。この技術は、個々の歩行者の意思決定や行動を表現することができ、群集全体の挙動を予測するのに適している。また、COVID-19 パンデミック下においては、ソーシャルディスタンスの確保など、より厳しい群集制御が求められるようになり、シミュレーションの重要性はさらに高まった。シミュレーション結果を効果的に活用するためには、様々なステークホルダー間での情報共有が重要であり、非専門家にもわかりやすい可視化手法が求められている。

また、群集の混雑状況を計測する技術も、カメラ

画像認識やスマートフォンの位置情報、IoT センサーなどの進展によって、リアルタイムでの把握が可能になっている。特に画像認識技術の飛躍的な進歩により、カメラ映像から人数や流動方向、密度などの基本的な情報を高精度に抽出できるようになった。これらの計測・観測技術により収集されたデータを基に、物理空間を仮想空間に再現する「デジタルツイン」技術が注目を集めている。デジタルツインは、実世界の様々な情報をサイバー空間に正確に再現することで、シミュレーションや分析を通じた問題解決を図る技術である。製造業や医療、都市計画など様々な分野で応用が進んでおり、群集マネジメントにおいても新たな可能性を開いている。

本稿では、データ駆動型アプローチによる群集マネジメントシステムについて、二つの事例を紹介する。一つは東京ドームシティを対象にしたAIカメラによる人流計測データを活用した群集流動予測システム^{1),2)}、もう一つはショッピングセンターの会員カード購入履歴データを活用した買い回り行動モデル³⁾である。これらの事例から、異なるデータソースを活用した群集行動モデリングの方法と効果について解説する。両事例は異なるアプローチを採用しているが、いずれもデータを基にした群集行動の理解と予測という共通の目的を持っており、データ駆動型アプローチの多様性と可能性を示している。



* Kensuke YASUFUKU

1976年6月生まれ
現在、大阪大学 D3センター
サイバーコミュニティ研究部門
准教授
博士（工学）
専門／建築計画
TEL：06-6879-7956
FAX：06-6879-7956
E-mail：yasufuku@arch.eng.osaka-u.ac.jp

データ駆動型群集マネジメントの基本概念

データ駆動型アプローチとは、実世界から収集された大量のデータを分析し、そこから得られた知見やパターンを基にしてモデリングや意思決定を行う手法である。従来の理論主導型アプローチが仮説や理論モデルから出発するのに対し、データ駆動型アプローチはまず実データの分析から始め、そこから帰納的にモデルを構築していく。

群集マネジメントの分野でも、従来は歩行者の基本的な物理挙動に関する理論モデル（Social Force Model など）に基づくシミュレーションが主流であった。これらのモデルは単純な状況では有効だが、複雑な環境や多様な目的を持つ人々の行動を正確に予測することは困難である。一方、実際の群集行動データから学習したモデルを構築することで、より現実に即したシミュレーションが可能になる。

群集行動データの収集方法としては、カメラ映像分析、スマートフォンやLiDAR（Light Detection and Ranging）技術を用いた位置情報データ、購入・利用履歴データなどがある。カメラ映像分析は最新のAI技術を用いた画像解析により、人数カウントだけでなく流動方向や密度の分布なども把握できるようになっている。スマートフォンなどの位置情報データは、GPSやWi-Fi、Bluetoothビーコンなどを利用して個々の移動軌跡を捕捉する。この方法は、サンプル数や位置精度向上が技術的課題となっている。LiDARを用いた計測は、センサーを施設内の複数箇所に設置することで、個人を特定せずに人の位置や動きを3次元空間で捉えることができる。一方で、導入コストが比較的高く、大規模施設全体をカバーするためには複数のセンサー設置と統合処理が必要となる。また、商業施設などでは、店舗の購入履歴やチケット利用情報から間接的に人々の行動パターンを経時的に推定することも可能になっている。

これらの方法は目的に応じて選択・組み合わせることで効果的なデータ収集が可能となる。例えば、カメラによる全体的な流動把握と位置情報による詳細な移動軌跡分析を組み合わせることで、マクロとミクロの両面からの分析が実現できる。また、購入履歴データと位置情報データを組み合わせることで、商業施設内の行動と購買行動の関連性を明らかにすることも可能である。

収集したデータから群集行動モデルを構築する主な方法としては、統計的モデリング、機械学習・AI、ハイブリッドアプローチがある。統計的モデリングは確率分布や遷移確率などを抽出して定式化するもので、店舗間の移動確率や滞留時間分布など基本的な行動のモデル化に適している。マルコフ連鎖モデルや時系列分析などがこれに該当し、実装が比較的容易で解釈しやすいのが特徴である。

機械学習・AIは複雑な非線形関係を捉えられるが、多くの学習データが必要である。ニューラルネットワークなどの技術を用いて、データから行動パターンを学習させるこの方法は、複雑な環境要因と行動の関係性を表現できる利点があるが、モデルのブラックボックス化という課題もある。近年は、深層強化学習を用いて環境との相互作用を学習する手法も提案されている。

ハイブリッドアプローチは理論とデータ分析を組み合わせるもので、例えば群集密度と歩行速度の関係は理論で、経路選択の嗜好性はデータから学習するなどの方法が効果的である。

本稿で紹介する東京ドームシティの事例ではハイブリッドアプローチを、ショッピングセンターの事例では主に統計的モデリングを採用している。両者は異なるデータソースと分析手法を用いているが、いずれも実際のデータに基づいて群集行動をモデル化し、シミュレーションに応用するという共通のアプローチを取っている。

デジタルツインによる統合プラットフォーム

デジタルツインとは、物理空間に実在する要素を仮想空間上で再現・モデル化する技術体系である。センサーデータに加え、設計情報や過去の運用データなど多様なデータを統合し、シミュレーションやAI分析を活用することで、対象の状態や挙動をリアルタイムに把握・予測することができる。

近年のDX推進を背景に、製造業での予知保全や生産最適化、スマートシティの創出、エネルギーマネジメント、医療など様々な分野で活用されている。群集マネジメントにおいても、デジタルツインはリアルタイムデータ連携、高精度な空間モデル、シミュレーション機能、直感的な可視化の四つの要素を統合することで、効果的なプラットフォームを提供する。リアルタイムデータ連携ではセンサーからのデータを反映し、高精度な空間モデルでは3次元形状や通行経路を再現する。シミュレーション機能では現在状態から近未来を予測し、直感的な可視化によって専門家以外も含めた情報共有を促進する。

これらの要素が連携することで、現実世界の状況を把握・分析・予測し、その結果をフィードバックする「サイバーフィジカルループ」が形成される。さらに、このループに人間の専門的判断を組み込ん

だ「ヒューマン・イン・ザ・ループ」の概念を導入することで、AIやシステムの予測結果を人間が評価し、経験や状況に応じた意思決定を行うことが可能になる。このようなシステムによって、技術的な予測の精度だけに依存せず、現場の状況や過去の知見、社会的・文化的要因なども考慮した、より実践的かつ柔軟な群集マネジメントが実現できる。

群集シミュレーションでは、個々の歩行者を自律的なエージェントとしてモデル化するマルチエージェントシミュレーションが広く用いられている。データ駆動型のマルチエージェントシミュレーションでは、実測データから抽出した行動パターンをエージェントの意思決定ロジックに組み込むことで、現実的なシミュレーションが可能になる。例えば分岐点での経路選択比率を実データから設定することで、全体の流動パターンをより正確に再現できる。

デジタルツインの運用では、センサーからデータを取得し、現在状態を反映して近未来を予測計算し、結果を可視化してアラートや対策提案を行う。そして再度データを取得して精度検証するサイクルを繰り返す。このプロセスによって状況変化に応じた適応的な予測と対応が実現する。技術的には、リアルタイム性と処理能力のバランスを考慮したエッジとクラウドの適切な組み合わせが重要となる。

事例研究 1：東京ドームシティにおける群集流動予測

東京ドームシティでは、デジタルツインを活用した群集マネジメントシステムの実証実験を行っている。施設全体を精密に再現した仮想空間上で、野球試合終了後の観客動向を予測・分析し、複数の公共交通機関（JR 水道橋駅、都営三田線水道橋駅、東京メトロ後楽園駅など）への分散を考慮した誘導計画の立案を支援している。マルチエージェントシミュレーションによって、局所的な混雑発生や密度に応じた歩行速度変化など、現実の群集特性を再現することを目指している。

この実証実験の特徴は、リアルタイムデータと過去データを組み合わせた予測シミュレーションを実現している点にある。特に試合終了後の観客流動は時間的・空間的に集中するため、効果的な群集マネジメントが重要な課題となっている。試合内容や天候、周辺イベントなど様々な要因によって流動パ

ーンが変化するため、リアルタイムの状況把握と予測が不可欠である。

デジタルツインの構築では、アーバンメッシュとナビゲーションメッシュを作成した。3次元地図データやオープンデータを組み合わせて視覚的な空間モデルを作り、現地調査と LiDAR スキャンにより精密な通行経路データを構築した（図 1 参照）。

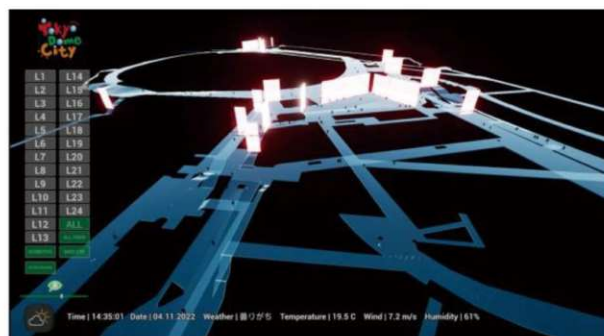


図 1 東京ドームシティの人流デジタルツイン

東京ドームから各駅に至る経路は、商業施設の歩行者デッキや歩道橋など複雑な立体構造を持っており、その正確な再現が重要である。特に水道橋駅西口の歩道橋や東口南歩道前などの重点箇所は、過去に混雑が発生している場所であり、詳細な空間形状と通行容量の正確なモデル化が行われた。

リアルタイムデータとしては、施設内の主要箇所に設置された AI カメラからの人流計測データを活用している。カメラ映像上で検知線や検知範囲を設定し、各地点間の人の流れを定量化している。カメラ画像からの人数カウントだけでなく、流動方向や密度の分布なども抽出し、群集状態の詳細な把握を可能にしている。また過去のイベント時の人流データも分析し、退場者数の推移や経路選択パターンをモデル化した。特に水道橋駅西口への主要ルート分岐点では、群集密度と歩行速度の関係性を詳細に調査し、イベント時特有の歩行特性をシミュレーションパラメータに反映させている。

調査では、緊急時とは異なる余裕のある対人距離の維持や、密度上昇に伴う歩行速度の変化など、イベント時特有の群集特性が明らかになった。これらの知見は、シミュレーションモデルのパラメータ調整に活用された。また、信号による横断歩道の開閉サイクルなど、群集流動に影響を与える環境要因も

モデルに組み込まれた。こうした詳細な調査とモデリングにより、より現実に即した群集シミュレーションが実現された (図2 参照)。

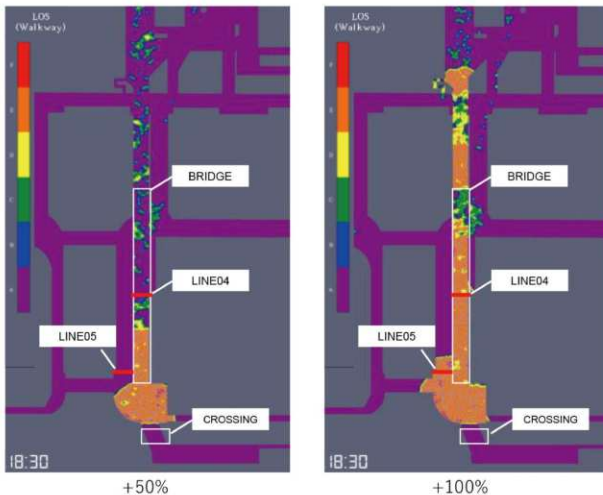


図2 マルチエージェントシミュレーション

リアルタイム予測システムの中核は、試合終了後の退場者数予測モデルである。当初は機械学習なども検討したが、運用安定性を重視して観客数と試合終了時間を主パラメータとする実績ベースの数理モデルを採用した。この選択により、高い予測精度と運用の确实性の両立が可能となった。また試合進行中からの予測を可能にするため、インギング情報やアウトカウントから残り時間を推定する機能も実装している。これにより、試合終了前から群集マネジメントの準備を開始することができ、より効果的な対応が可能となっている。

シミュレーションは5分間隔で実行され、15分間の予測計算を行う。この実行間隔は、計算サーバーの処理能力とリアルタイム性のバランスを考慮して設定されている。結果は管理者向けと来場者向けの二つのインターフェースで提供される。管理者向けシステムでは、重点箇所のサービス水準 (LOS: Level of Service) をアラート表示し、予測精度も即時検証できる。LOSは混雑度を表す国際的な指標であり、A (自由流) からF (極度の混雑) までの6段階で表現される。特に混雑度が高いE・Fレベルの発生が予測された場合は、警告表示により注意を喚起する仕組みとなっている (図3 参照)。

来場者向けには混雑予測情報を提供し、自主的な回避行動を促すとともに周辺商業施設への立ち寄り



図3 管理者向けシミュレーション可視化システム

も促進している。これにより、混雑の分散と経済活動の活性化という二つの目的を同時に達成することが期待されている。情報提供の方法としては、スマートフォンが活用され、直感的に理解できるビジュアルデザインが採用されている。

東京ドームシティの実証実験は、デジタルツインとAIカメラを活用したリアルタイム群集予測の実用可能性を示している。特に重要なのは、予測結果を群集誘導の意思決定に活用できる点であり、これにより従来の経験則に基づく対応から、より科学的・定量的なアプローチへの転換が期待される。また、来場者への情報提供を通じた自主的な混雑回避行動の促進という観点からも、新たな群集マネジメントの可能性を示している。

事例研究2: ショッピングセンターにおける購入履歴を活用した買い回り行動モデル

ショッピングセンター (SC) では、顧客の滞在時間を延ばし回遊性を高めることが売上向上に直結するため、効果的な空間構成やテナント配置が求められている。かつての商業施設における人流解析は限られた被験者による追跡調査が主流であったが、近年では会員カードの購入履歴など大量のデータを活用した分析が可能になっている。

本事例研究では、地上4階地下1階、店舗数232の大規模SCを対象に、会員カードの購入履歴データを活用した買い回り行動モデルを開発した。買い回り行動モデルは、入館時の店舗選択確率、店舗間の遷移確率、出口選択確率から構成される確率モデルとして定義している。

モデル構築には、月間約10万人の会員による30

～40万件の購入履歴を活用した。各会員が最初に購入した店舗から入館時の選択確率を算出し、同一来店日の複数購入記録から店舗間の遷移確率を算出した。この際、マルコフ過程（直前の店舗のみが次の選択に影響する特性）を仮定してモデル化している。

モデルの検証結果では、実際のデータでは1回の来店で平均2.64店舗を訪れるのに対し、モデルでは2.77店舗と高い再現性を示した。また同一店舗を複数回選択する確率も実データと90%以上一致している。店舗間遷移確率の分析からは、入館時から購入目的が明確な店舗と、買い回りの結果として選択される店舗群の特性差も明らかになった。また若年層向け服飾店エリアなど、複数店舗が一体となって機能しているゾーンの特性も把握できている。

構築した買い回り行動モデルは、マルチエージェントシミュレーションに実装された。シミュレーションではナビゲーションメッシュ上を各エージェントが移動し、買い回り行動モデルに基づいて目的店舗を選択・訪問する様子を再現している（図4参照）。シミュレーション結果と実測データの比較では、SC全体の滞留者数と退館者数については85%以上の精度で再現でき、各出口における退館者数分布も

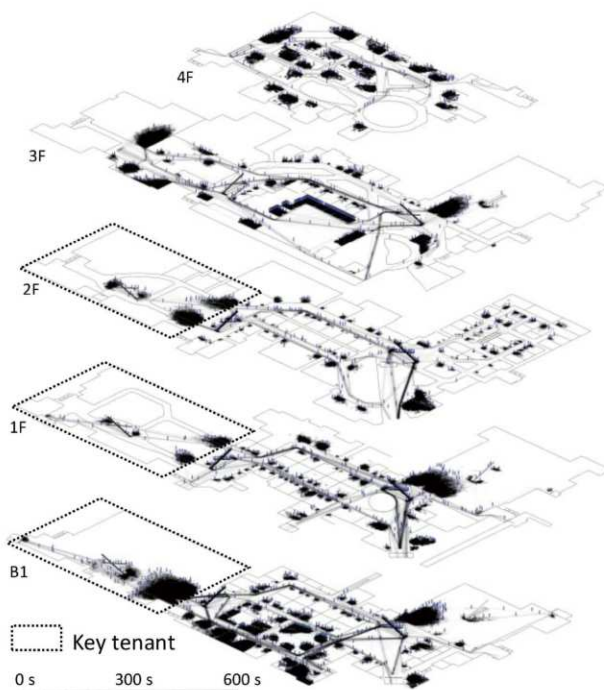


図4 買い回りシミュレーションの結果

相関係数0.949と高い精度を示した。

一方、館内の特定通路における通過人数については当初は再現性に課題があった。これは各エージェントがナビゲーションメッシュ上の最小コスト経路を選択するモデルでは、実際の回遊行動を十分に表現できないためである。そこで通路ごとに経路選択パラメータ（歩行速度の重み係数）を調整することで、通路通行量の相関係数を-0.24から0.81に大幅改善することができた。

このようにデータ駆動型の買い回り行動モデルとシミュレーションの組み合わせにより、商業施設における回遊性の評価や、施設設計・運営改善への活用可能性が示された。また、入館から退館までの一連の行動をモデル化する手法は、他の集客施設における群集マネジメントにも応用できる可能性がある。

おわりに

本稿では、データ駆動型アプローチによる群集マネジメントシステムの開発と応用について、東京ドームシティにおけるリアルタイムデータ活用事例と、ショッピングセンターにおける購入履歴データ活用事例を紹介した。異なるデータソースからの群集行動モデリングの方法論と有効性を示すとともに、デジタルツイン技術を活用した統合プラットフォームの構築について論じた。

データ駆動型群集マネジメントの利点は、リアルタイムデータと過去データの統合によるより精緻な予測、施設・イベント固有の特性を考慮したモデル構築、3D可視化による直感的な情報共有に集約される。これらの技術により、従来の経験則に頼った群集マネジメントから、より科学的・定量的なアプローチへの転換が進みつつある。

今後の課題としては、複数データソースの統合による予測精度の向上、機械学習技術の積極的活用による適応型モデルの開発などが挙げられる。これらの課題に取り組むことで、より安全で快適な群集マネジメントの実現が期待される。

本研究はJST未来社会創造事業JPMJMI20D1の助成を受けたものであり、記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高橋彰, 安福健祐, ムハンマド ヘガジー: 大規模イベント終了後の群集制御に関するマルチエージェントシミュレーションの適用性, 日本建築学会計画系論文集, 第 89 巻, 第 819 号, pp.808-817 (2024)
- 2) Kensuke Yasufuku, Akira Takahashi: Development of a Real-Time Crowd Flow Prediction and Visualization Platform for Crowd Management, Journal of Disaster Research, Vol.19, No.2, pp.248-255 (2024)
- 3) 安福健祐, 泉本淳一, 阿部浩和: 大規模商業施設におけるデータ駆動型買い回り行動モデルの開発, 日本建築学会計画系論文集, 第 86 巻, 第 783 号, pp.1358-1366 (2021)

