

センシングとシミュレーションによる街なか移動支援

○吉田孝志 前野義晴（日本電気株式会社）

Crowd movement support by sensing systems and simulation

*T. Yoshida and Y. Maeno (NEC Corporation)

概要ー センシング技術、シミュレーション、案内装置を組み合わせた街なか移動支援技術を開発している。街なかに配置したカメラ画像を用いて歩行者の流れを把握し、シミュレーションによって将来の状況を予測して誘導指示を算出し、電子案内板等の案内装置へ出力する。街づくり計画の立案やリアルタイムでの歩行者誘導に利用でき、集客施設、商業地、交通結節点等での安心・安全でバリアフリーな街づくりを支援する。この技術が利用可能な例として新国立競技場周辺地区での利用方法を示した。

キーワード：エージェントベースシミュレーション、群衆移動、サイネージ

1 はじめに

混雑した街なかでは事件や事故の危険が高まる。特に困難がしわ寄せされるのは高齢者や障がい者である。2020年の東京オリンピック・パラリンピックでは高齢者や障がい者を含む多数の土地勘のない訪問者が開催地を訪れると予想され、会場周辺や交通結節点などで発生する混雑への対処は重要な課題となる。

不特定多数の人たちが集まる街角や公共施設には安全・安心の確保のためにカメラが設置されていることが多く、カメラ映像を分析して群衆の混雑状況をリアルタイムで把握できる技術も実用化されている。こうしたデータは混雑した状況をコントロールして群衆の安全を確保する目的に活用することができる。本稿ではこれを可能にする、センシング技術、シミュレーション、案内装置を組み合わせた街なか移動支援技術とその利用方法について述べる。

2 街なか移動支援技術

2.1 システム構成

街なか移動支援技術では、センシング技術を用いて街なかでの現時点の歩行者の流れを把握し、このデータに基づくシミュレーションによって広範囲での群衆の状況を可視化・予測して誘導指示を算出し、指示内容を電子案内板等の案内装置へ出力して群衆を誘導する。

歩行者の流れの把握には群衆行動解析技術を用いる¹⁾。群衆行動解析技術は人の集まりを群衆のままに捉えて分析する技術である。人を個別にとらえるのではなく、群衆のカメラ映像をメッシュで分割し、メッシュ内に写っている人数を学習データに基づいて推定する。これにより従来の技術では解析が困難だった、混雑のために人の映像の重なりが大きくなるという状況であっても、人数を高精度で把握することができる。使用する映像には一定以上の精細度が求められるがカメラの機種には依存しないため、既設のカメラを分析に活用することができる。

群衆行動解析技術により把握した歩行者の流れのデータは群衆シミュレーションに入力し、混雑した状況をコントロールして群衆の安全を確保するためにはどのように街なかを誘導すれば良いかという指示内容を算出する。シミュレーションには後述のモデルを使用する。

シミュレーションにより算出した誘導指示の内容は街なかの要所に配置した電子案内板へ配信して案内サ

インとして表示する。電子案内板は屋外設置にも対応したディスプレイの機能とカメラの機能をあわせ持ち、映像による歩行者の流れの把握と情報の表示の両方に用いられる。サブディスプレイとして電子ペーパーを搭載すれば蓄電池の容量に応じて停電時でも長時間の表示が可能となる。また自動翻訳や音声合成の機能を搭載することができ、視覚障がい者や日本語以外の話者に向けての対話式ガイダンスにも対応する。誘導指示は電子案内板に対してだけでなく、街なかに配置した誘導員や個人所有のスマートフォン等へ配信することも可能である。

2.2 群衆シミュレーションモデル

街なか移動支援技術の群衆シミュレーションでは数km四方の広域的な市街地に位置する数万人の歩行者の移動を扱う。このため多様な移動速度の歩行者が混在していることによる追い越しの発生（混成流）や逆向きに移動する歩行者どうしの相互回避行動（対向流）の影響を反映する必要がある。一方で事件事故等の突発事象によって状況が変化した場合にはすみやかに再計算を行うことができるよう計算負荷を抑制する必要もある。

群衆移動を再現するモデルとしてセルオートマトンモデル、Social Forceモデル、Velocityベースモデル、連続体モデルなどが提案されているが²⁾、これらのモデルは建物内程度の広さでの適用を意図したものであるため、広域的な市街地で適用しようとするときと考慮しなければならない要素が多くなりすぎ、また計算負荷も過大になる。街なか移動支援技術では必要な精度を確保しつつ計算負荷を抑制できる群衆シミュレーションモデルを採用する。モデルの内容をODDプロトコル³⁾に準拠して以下に記述する。

目的

モデルの目的は、センシング技術により把握した街なかでの歩行者の流れのデータに基づいて、その後の群衆の移動を予測し、混雑した状況をコントロールするためにはどのように誘導すれば良いかという指示内容を算出することである。

エンティティ・状態変数・スケール

モデルでは歩道の長さ、幅、移動制約等の情報を含む歩道網の上に位置、移動速度、移動方向等の情報を

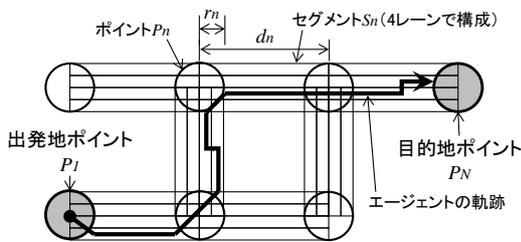


Fig. 1: モデルでの歩道網の表現と歩行者エージェントの軌跡の例

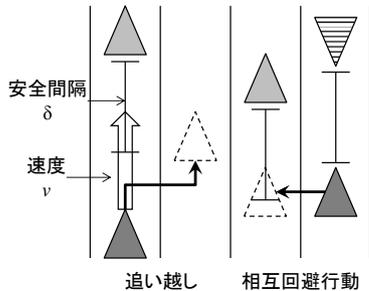


Fig. 2: モデルでの追い越しと相互回避行動の表現

を持った任意の個数の歩行者エージェントを配置し、一定の行動モデルに基づいて移動させる。

エージェントは1人もしくは1組（たとえば車いす利用者と介助者）の歩行者を表す。人数は10万人規模となる。モデル上の1メッシュは現実の数 m に相当するものとし、全体では数 km 四方の範囲を扱う。1ステップは現実の1秒とし、全体では数十分間から数時間の経過を再現する。

歩道網はポイントとセグメントとで表現される。ポイントは現実の歩道の分岐点や歩道が折れ曲がる点に対応する。ポイント P は地図上の任意の場所を作ることができ、半径 r を属性として持つ円として作られる。セグメントは現実の歩道に対応する。セグメント S はいずれかのポイントとポイントとを結ぶ直線として作られ、複数のレーン L から構成される。各レーンは1人の歩行者が通行可能な幅に対応し、現実の歩道では50 cm から1 m 程度の幅に相当する。セグメントは長さ d を属性として持つ。エージェントはポイントの内部またはレーンの中心線上にのみ位置することができるものとする。

エージェントには成人健常者、高齢者、車いす利用者などのクラスを設け、クラスによって移動速度や通行可能なセグメントを変える。移動速度などの行動特性は各種の先行研究⁴⁾を参考にして設定する。クラスに区分することで、健常者、高齢者、車いす利用者等の行動特性別に、それぞれの特性に合った移動経路を算出することが可能となる⁵⁾。

プロセスの全体とスケジューリング

エージェントは Fig. 1 に示すように出発地ポイント P_1 と目的地ポイント P_N を持つ。初期配置地点は P_1 の中心点であり、以降は S_1, P_2, S_2 の順で P_N へ向けて所定の移動速度で移動していく。 S_1 でエージェントが位置するレーン L_1 はランダムに決まり、以降の S_n で位置するレーン L_n は L_{n-1} に応じて決まる。 S_n 上では、エージェントは L_n の端点から r_n だけ進んだ地点を出発地点とし、後述する追い越しと相互回避行動

を行いつつ、もう一方の端点へ向けて移動する。

エージェントが P_n に到達すると P_{n+1} を選択する。ポイントには、そこに到達したエージェントが次にどのポイントへ進むかを指定するガイドを設定することができる。ガイドはエージェントのクラスによって異なる内容とすることもできる。ガイドは現実ではデジタルサイネージ等による誘導に相当する。エージェントは、 P_n にガイドが設定されていればそれに従い、設定されていなければ P_N への最短経路を P_{n+1} として選択する。 P_n 上では、エージェントは L_{n-1} の端点から r_n だけ手前の地点から、 L_n の端点から r_n だけ進んだ地点までの間を直線で移動する。

エージェントのセンシングと相互作用

歩行者の追い越しと相互回避行動は Fig. 2 に模式的に示す以下の方法で表現する。

- パラメータとして安全間隔 δ を定義する。エージェントがレーン上で速度 v で移動しているとき、進行方向前方の $\delta + v$ の範囲内に他のエージェントがいる場合、追い越しもしくは相互回避行動を行う。
- 前方のもっとも距離が近いエージェント $Front$ と進行方向が同じ場合は追い越しとなる。両隣のレーンの前方の $\delta + v$ の範囲内に他のエージェントがいるかをチェックし、いなければそのレーンに移る。どちらにもエージェントがいる場合は $Front$ との間に δ を置いて停止する。
- $Front$ と進行方向が逆の場合は相互回避行動となる。この場合、まずは追い越しの場合と同様にレーン変更ができるかを調べ、レーン変更ができない場合は δ の範囲内に他のエージェントがいたとしても左側のレーンに移る。個々のエージェントにこのような行動原理を持たせることで、現実の混雑している対面通行の歩道などで多くの場合に左側通行が形成される現象が再現される。

3 利用方法

3.1 新国立競技場ケース

街なか移動支援技術が利用可能な例として新国立競技場周辺地区を取り上げる (Fig. 3)。新国立競技場は2014年に閉鎖された国立霞ヶ丘陸上競技場の跡地に建設される競技場であり2020年東京オリンピック・パラリンピックのメイン会場となることが予定されている。オリンピック開催時の収容人数は6万8千人を想定しているが、イベントの種類によっては仮設席を設けることで8万人規模にも対応する。

新国立競技場への来場者の多くは鉄道・地下鉄を利用すると考えられ、都営地下鉄国立競技場駅 (s_1)、JR 信濃町駅 (s_2)、JR 千駄ヶ谷駅 (s_3)、都営地下鉄・東京メトロ青山一丁目駅 (s_4)、東京メトロ外苑前駅 (s_5)、東京メトロ北参道駅 (s_6) の近隣6か所の駅からのアクセスルートが想定されている。この中で最寄りの駅は国立競技場駅であるが、イベントの規模によっては混雑を避けるために出口を閉鎖することも検討されている。実際に閉鎖前の旧競技場では、大規模なコンサートの開催時等には周辺地域でしばしば非常な混雑が発生していた。

2020年東京オリンピック・パラリンピックでは高齢者や障がい者を含む多数の土地勘のない訪問者が会場



Fig. 3: 新国立競技場周辺地区におけるシミュレーションの例 (OpenStreetMap の地図データを使用)

周辺を訪れると予想されるため混雑への対処は重要な課題である。新国立競技場の設置者である日本スポーツ振興センターでは、2014年当時の建設計画において建物内から建物外への退場のシミュレーションを行っており、人的誘導を行うことで8万人の観客全員が約40分で各座席から敷地の外に退場できることを確認している⁶⁾。しかし建物と最寄り駅との間の混雑対策は検討が進んでいない。

混雑に対処する方法は、テーマパーク等の似たような混雑状況が日々繰り返して発生する環境下では日々の経験の蓄積から判断することも可能であるが、新国立競技場では2020年東京オリンピック・パラリンピックまでに開催される大規模イベントは限られており、またコンサートかスポーツの大会かといったイベントの種類によって客層も変わると考えられるため、そのような経験を蓄積できる機会は乏しいと考えられ、街なか移動支援技術の利用が有効な対策となる。

新国立競技場周辺地区での課題を解決するための街なか移動支援技術の利用例として、将来のある日に新国立競技場で8万人が来場するイベントが開催された場合を想定し、観客の退場を誘導して混雑をコントロールする方法を示す。

第1段階 来場状況を計測

第1段階では、近隣6か所の各駅の出口付近にカメラを設置して、当日のイベント開始前の多くの観客が来場する時間帯に各駅からの単位時間あたりの通行人数を群衆行動解析技術を用いて計測し、各駅からの来場数を推定する。

Table 1 に示す例では、単位時間あたりの通行人数が、国立競技場駅で毎分120人、信濃町駅で毎分80人、千駄ヶ谷駅で毎分100人、青山一丁目駅で毎分40人、外苑前駅で毎分40人、北参道駅で毎分20人と計測されたものとし、観客数8万人をこの比率で配分することで各駅からの来場数を推定している。

Table 1: 新国立競技場ケースにおける来場数の例

	カメラによる 計測数	各駅からの 来場数
s_1 (国立競技場駅)	120 人/分	24,000 人
s_2 (信濃町駅)	80 人/分	16,000 人
s_3 (千駄ヶ谷駅)	100 人/分	20,000 人
s_4 (青山一丁目駅)	40 人/分	8,000 人
s_5 (外苑前駅)	40 人/分	8,000 人
s_6 (北参道駅)	20 人/分	4,000 人

第2段階 退場シミュレーション

第2段階では、退場時の人の流れのシミュレーションを行う。このシミュレーションはイベントが行われている最中に管理センター等で行うことができる。

鉄道・地下鉄で来場した観客の多くは来場時と同じ駅を退場時も利用すると考えられるので、Table 1 で推定した各駅からの来場数と同数の観客がイベント終了後に建物内から各駅へ向かうものとしてシミュレーションを行う。シミュレーションによって多くの観客が集中して混雑が発生するポイントが特定される。Fig. 3 の例では新国立競技場駅から千駄ヶ谷駅周辺での混雑が予測されている。

混雑の程度が受忍できるレベルを超えると予測される場合には、退場する出口を変更したり隣の駅に誘導するといった代わりの誘導計画を作成し、繰り返しシミュレーションを行って満足できる代替案を決定する。各駅に誘導する観客の人数は駅 s_j に誘導する人数を x_j として以下の最適化問題を解くことで求められる。

$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} && f(\mathbf{x}) \\
 &\text{subject to} && \forall x_j \in \mathbb{N} \\
 & && \sum_j x_j = 80,000
 \end{aligned}$$

目的関数 $f(\mathbf{x})$ は、たとえば退場開始から60分以内

に駅まで到達できない観客の人数 $B(\boldsymbol{x})$ と、行き先変更によるペナルティの和とする。たとえば千駄ヶ谷駅から来場して千駄ヶ谷駅へ退場しようとしている観客を、同じ JR の路線にある信濃町駅に誘導しても観客の負担は小さいが、異なる路線にある外苑前駅に誘導すれば負担は大きくなる。したがって駅 s_i から来場した 1 人の観客を駅 s_j に誘導した場合のペナルティ p_{ij} を行き先変更による負担の程度に応じて定義し、そのように誘導する人数 w_{ij} との積を $B(\boldsymbol{x})$ に加算する。

$$f(\boldsymbol{x}) = B(\boldsymbol{x}) + \sum_{i,j} p_{ij} w_{ij}$$

第 3 段階 退場する観客を誘導

第 3 段階では、決定した誘導計画に基づいて、競技場の建物内や周辺地区の要所に配置した電子案内板や誘導員に誘導指示の内容を配信し観客を誘導する。

電子案内板は案内サインを表示する機能に加えてカメラの機能をあわせ持っているため、誘導計画の通りに観客を誘導できているかを随時確認することができる。計画通りの誘導ができていないと判断される場合には、適宜シミュレーションを行って誘導計画を変更し、新たな誘導指示の内容を電子案内板や誘導員に配信する。

3.2 利用による効果

このような形で街なか移動支援技術を活用することにより、集客施設や商業地では、来場数、天候、イベント開催等の状況に合わせて来場者を適切な経路へ誘導し、混雑を抑制あるいはにぎわいを創出する。交通結節点では、混雑時や運行支障時に、利用者を適切な経路へ誘導するとともに過度な流入を防ぎ混雑の深刻化を防止する。大規模災害時には、街なかの広範囲で群衆の状況を把握してすみやかに一時滞在施設等へ誘導するとともに誘導先の混雑状況も予測する。混雑や移動制約を回避できる移動経路を健常者、高齢者、車いす利用者等の行動特性別に算出することも可能である。

街づくり計画の立案時には、歩行者の人数や行動特性が異なるさまざまな状況を想定して、街なかでの歩行者誘導のシミュレーションを行うことで、混雑や危険が予測される地点やバリアフリー街づくり上の課題を特定することができる。

4 まとめ

センシング技術、シミュレーション、案内装置を組み合わせた街なか移動支援技術とその利用方法について述べた。

街なか移動支援技術では、センシング技術を用いて街なかでの現時点の歩行者の流れを把握し、このデータに基づくシミュレーションによって広範囲での群衆の状況を可視化・予測して誘導指示を算出し、指示内容を電子案内板等の案内装置へ出力して群衆を誘導する。この技術は街づくり計画の立案やリアルタイムでの歩行者誘導に利用でき、集客施設、商業地、交通結節点等での安心・安全でバリアフリーな街づくりを支援する。この技術が利用可能な例として新国立競技場周辺地区を取り上げ、8 万人が来場するイベントが開催された場合に観客の退場を誘導して混雑をコントロールする方法を示した。

今後は各地の商業地や観光地を対象とするケース分析を追加していくとともに、実際のイベント会場周辺にセンサーを設置して歩行者の行動データを収集し、これを活用してモデルを精緻化する等の活動を進めていく。

参考文献

- 1) 宮崎, 宮野, 池田, 大網: 群衆行動解析技術を用いた混雑推定システム, NEC 技報, 67-1, 82/85 (2014)
- 2) Duives, D. C., Daamen, W., and Hoogendoorn, S. P.: State-of-the-art crowd motion simulation models, Transportation Research part C: Emerging Technologies, 37, 193/209 (2013)
- 3) Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., and Railsback, S. F.: The ODD protocol: A review and first update, Ecological Modelling, 221(23), 2760/2768 (2010)
- 4) 兼田, 構造計画研究所創造工学部, 名古屋工業大学兼田研究室: artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション 原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまで, 構造計画研究所 (2010)
- 5) 吉田, 前野, 但野, 矢野, 湯本: 移動制約者の避難誘導最適化, Joint Agent Workshops and Symposium (JAWS) 2015 (2015)
- 6) 独立行政法人日本スポーツ振興センター: 新国立競技場基本設計説明書 (概要版) (2014)