

## 大規模イベントにおける分散退場オペレーション多目的最適化

丹羽 了<sup>1,2</sup>鷹見峻希<sup>1,2</sup>重中秀介<sup>1,2</sup>大西正輝<sup>2,1</sup><sup>1</sup>筑波大学<sup>2</sup>産業技術総合研究所

## 1. はじめに

COVID-19の流行に伴い、大規模イベントでは混雑や感染リスクを低減するために分散退場が実施されている。分散退場ではイベント主催者が座席をいくつかのグループに分割し、それぞれの退場開始時間を指定する。既に小規模な会場における分散退場オペレーションの定量的な評価 [1] は行われているが、大規模な会場における例は少ない。本研究では、群衆シミュレーションと多目的最適化による、許容退場時間に応じた分散退場オペレーションの決定手法を提案する。許容退場時間とは、イベント会場の都合などにより制限された状況で、退場にかかることができる時間である。手順としては、群衆シミュレーションを用いて大規模イベントにおける分散退場を再現し、退場完了時間と歩行者間の接触回数から求めた混雑度の2つの目的関数でオペレーションを多目的最適化する。そして、イベント主催者は求められたパレート解から、許容退場時間の調節も含めて、最適なオペレーションを検討・決定することができる。実験では、東京ドームを舞台に、3つの許容退場時間に対して、提案手法を用いて図1のように座席エリアを分割した場合の最適なオペレーションを導く。

## 2. 最適な分散退場オペレーション決定手法

本節では、群衆シミュレーションと多目的最適化による、許容退場時間に応じた分散退場オペレーションの決定手法を説明する。最初に、検証するオペレーションと許容退場時間を設定する。次に、混雑度と退場完了時間がトレードオフの関係をもつことを仮定して、多目的最適化を行いパレート解を得る。そして、トレードオフの関係をもつ2つの目的関数のうちの1つを固定することで、パレート解の中から最適なオペレーションを求める。

## 2.1 多目的最適化

2つの目的関数の多目的最適化は以下で定義される。

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} f(\mathbf{x}) := (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})) \quad (1)$$

$f(\mathbf{x})$  は目的関数、 $\mathbf{x}$  は決定変数ベクトルを表す。目的関数  $f(\mathbf{x})$  を求めるための準備として、決定変数  $\mathbf{x}$  を平均とする混合ガウス分布の和で算出される出発人数分布  $p(\mathbf{x})$  を求め、群衆シミュレータに入力し時間と歩行者の座標を得る。得られた時間と座標から目的関数の退場完了時間  $f_1(\mathbf{x})$  と歩行者間の接触回数  $f_2(\mathbf{x})$  を算出する。

## 2.2 目的関数

退場完了時間  $f_1(\mathbf{x})$  は以下で定義する。

$$f_1(\mathbf{x}) = T_l - T_s \quad (2)$$

ここで、 $T_l$  は最後の歩行者の目的地への到着時間、 $T_s$  はシミュレーションの開始時間を表す。

接触回数  $f_2(\mathbf{x})$  は以下で定義する。

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{t=T_s}^{T_l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{i-1} \begin{cases} 1 & (\text{if } d_{i,j}^t < 2.0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (3)$$

Multiobjective Optimization for Exit Operations to Reduce Congestion at a Large-scale Event: R. Niwa, S. Takami, S. Shigenaka, M. Onishi

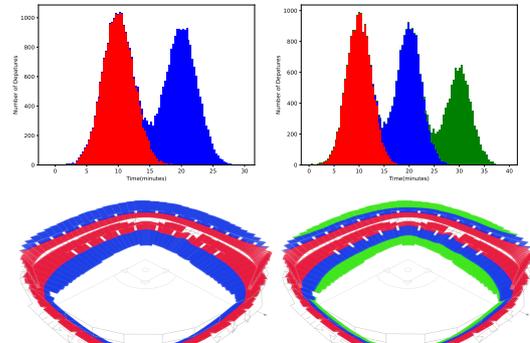


図1: 検証する分散退場オペレーション。左図は2分割、右図は3分割の出発人数分布の例(上)、下図はグループの分け方を示す。赤青緑がグループABCを表す。

$N$  は観客数、 $d_{i,j}^t$  は時間  $t$  における歩行者  $i$  と  $j$  のユークリッド距離であり、シミュレーションで算出される歩行者の座標から求める。接触回数は観客の距離が  $2[m]$  以内の時に加算される。 $2[m]$  は厚生労働省が示した飛沫感染防止のために取るべき距離である [2]。退場完了時間と接触回数はイベントを開催する際に発生するリスクをイベント主催者視点で考えるための評価指標である。

## 2.3 出発人数分布

決定変数  $\mathbf{x}$  からオペレーションを表す1秒あたりの出発人数分布を生成する。人の流れは混合ガウス分布によって近似できることがわかっているため [3]、出発人数分布  $p(\mathbf{x})$  を以下のように仮定する。

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K N(x_k, \sigma^2) \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_K) \quad (5)$$

ここで、 $K$  はグループの分割数、 $x_k$  はグループ  $k$  の決定変数、 $N(x_k, \sigma^2)$  は平均  $x_k$ 、標準偏差  $\sigma$  のガウス分布である。標準的な観客は指示後5分以内に出発すると想定して、標準偏差  $\sigma$  は150に設定した。

## 2.4 群衆シミュレーション

出発人数分布  $p(\mathbf{x})$  から決まる出発時間を群衆シミュレータに入力し、退場完了時間と毎秒の歩行者の座標を得る。シミュレータはCrowdWalkを用いる [4]。CrowdWalkはマップを設定し、歩行者情報(出発場所、出発時間、目的地)を入力すると歩行者の軌跡を再現できる。得られた退場完了時間と毎秒の歩行者の座標は目的関数を算出するために用いられる。

## 2.5 最適なオペレーションの決定

退場完了時間と接触回数の2つの目的関数はトレードオフの関係にあると考えられるため、時間をかければかけるほど混雑を減らし接触回数を低減できる。多目的最適化を解くことにより求められるパレート解が分かるとき、許容退場時間を決めることで、それを満たすオペレーションと接触回数を知ることができる。

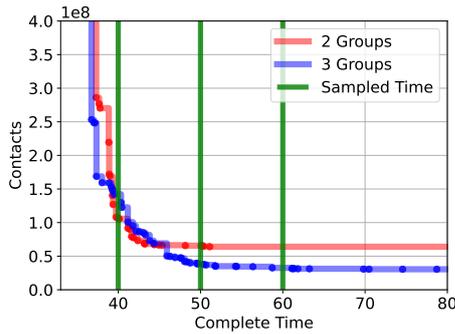


図 2: エリア分割数別のパレートフロントと許容退場時間

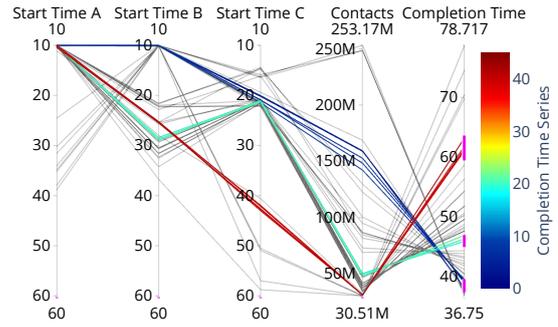


図 3: 3 分割の平行コーディネートプロット

### 3. 実験設定

実環境を想定したシミュレーション実験を行い、以下について議論する。

- (i) 分割数による分散退場の効果の違い
- (ii) 許容退場時間による最適なオペレーションの違い

また、最適化手法は NSGA-II を採用し、2 分割、3 分割をそれぞれ 1,000 回 (世代数 20, 個体数 50) 計 2,000 回の評価を行った。以下では、実験におけるシミュレーション設定と評価するオペレーションについて説明する。

#### 3.1 シミュレーション設定

CrowdWalk でシミュレーションする際に必要な実験設定について説明する。マップは東京ドームを再現したものをを用いる。歩行者情報のうち、出発場所は東京ドームをホーム側 (2F・4F)、アウェイ側 (2F・4F) の 4 エリア内でシードを固定してランダムに配置する。観客数は 4 万人とした。

#### 3.2 評価するオペレーション

評価するオペレーションは図 1 で示した 2 分割、3 分割の 2 種類である。この内、2 分割のオペレーションは東京ドームで実際に用いられている。

### 4. 結果・考察

図 2, 3 は実験の結果得られたパレートフロントとパラレルコーディネートプロットである。ここでは、許容退場時間が 40, 50, 60 分以内の場合について議論する。

#### 4.1 分割数による分散退場の効果の違い

図 2 は、横軸が退場完了時間  $f_1(x)$ 、縦軸が接触回数  $f_2(x)$  のグラフであり、2 分割、3 分割のそれぞれのパレートフロントを示す。緑線が示す許容退場時間が長いほど、混雑をより低減することが可能である。時間を十分にかけられる場合、3 分割は 2 分割より接触回数を低減できているが、現実問題として、イベント主催者には退場時間をできるだけ短く、混雑も少なくしたいという要求がある。要求する退場時間が 40 分のときは、3 分割よりも 2 分割が混雑を低減できている。

#### 4.2 許容退場時間による最適なオペレーションの違い

図 3 に 3 分割の 45 個のパレート解をパラレルコーディネートプロットで示す。縦軸は左から順に 3 つの決定変数 (グループ A・B・C の平均出発時間) と 2 つの目的関数 (接触回数, 退場完了時間) を表す。一つの線は一つの解を表し、色付き線は許容退場時間付近の傾向を示す。青線で示される退場完了時間が 40 分のあたりでは、A と B は決定変数のとりうる範囲の最小値の 10 分、C も比較的早い時間の 20 分である。そのため、詰込み型

のオペレーションが有効といえる。効率性のみを評価指標とした場合、移動開始時間を分散させずに一斉に移動するのが良いと報告されており [5]、本研究においても退場完了時間を重視する場合、分散時間を短くするオペレーションが良い結果を示している。水色線で示される退場完了時間が 50 分のあたりでは、A が 10 分、B が 30 分、C が 20 分であることから、A-C-B の順番が有効である。一方で、赤線で示される退場完了時間が 60 分のあたりでは、A が 10 分、B が 25 分、C が 40 分であることから、A-B-C の順番が有効である。このように、分割数を増やすと許容退場時間によって最適なオペレーションにおけるグループの順番と時間が異なることから、オペレーションの実行が難しくなることも分かった。

### 5. おわりに

群衆シミュレーションを用いて分散退場のオペレーションを多目的最適化し、許容退場時間から最適なオペレーションを求める手法を提案した。実験では、3 つの許容退場時間について最適なオペレーションを求め、分割数による分散退場の効果の違いと許容退場時間による最適なオペレーションの違いを示した。また、現実的な退場時間で混雑を少なくし、オペレーションが複雑になりすぎないという観点で、2 分割の採用が望ましいことも分かった。今後はグループの分け方についても検証予定である。

### 参考文献

- [1] H. Murakami et al. A system for efficient egress scheduling during mass events and small-scale experimental demonstration. *Royal Society open science*, 2020.
- [2] 厚生労働省労働基準局安全衛生部長. 新型コロナウイルス感染症の大規模な感染拡大防止に向けた職場における対応について (要請), 2020.
- [3] M. Onishi. Analysis and visualization of large-scale pedestrian flow in normal and disaster situations. *ITE trans. media technol. appl.*, 2015.
- [4] T. Yamashita et al. Implementation of simulation environment for exhaustive analysis of Huge-Scale pedestrian flow. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 2013.
- [5] M. Haghani et al. Simulating pre-evacuation times using hazard-based duration models: Is waiting strategy more efficient than instant response? *Safety science*, 2019.