

広域避難における集団避難戦略の検証

武田 芽依^{1,2}

¹筑波大学

大西 正輝^{2,1}

²産業技術総合研究所

1. はじめに

日本は自然災害が頻発する国であり、特に地震による被害が顕著である。そのため近年では自然災害の被害を最小限にするために、避難誘導計画の策定と検証が重要視されている。我々はこれまでに“閉鎖空間”を対象として、避難誘導計画の検証に着手してきた [1]。しかし災害の規模や特性に応じてより広範な領域での避難計画が必要不可欠であることは明瞭である。本研究では、“広域空間”での避難に焦点を当て、都市の複雑性や特性に対する効果的な対策の検討を行う。広域避難誘導では、経路の指定や通路の封鎖などの直接的な誘導とは異なり、避難者を間接的に誘導する必要がある。これは避難時における避難者の歩行自由度が増加すると考えられるため、自身の観察や群衆に影響されて、与えられた誘導とは異なる方向に移動（追従）する可能性が生じる。避難誘導において追従行動が発生すると、誘導が守られないため、群衆事故などの2次災害が発生する可能性がある。従来の研究では、避難者が誘導を厳守する（追従行動がない）という仮定のもと、安全性や効率性などの指標を用いて、避難計画を評価してきたが、誘導に従わない可能性を考慮した分析は、我々の知る限り多くはない。

そこで本研究では、広域避難誘導の中でも避難所の割り当て問題に着目し、避難時における追従行動を考慮した新たな誘導の評価指標を提案する。広域避難における避難所の割り当ては、避難者の出発地および避難所が複数箇所存在するため、全ての組み合わせを評価することは困難である。そこで我々は、群衆シミュレーションと最適化アルゴリズムを用いて、少ない計算コストで効率的に最適解を探索する。

2. 関連研究

広域空間における避難所の割り当て問題は、これまで数多くの研究が実施されてきた [2,3]。既存研究では、各避難所の最大収容人数および対応半径を制約として、避難所設立時のコストや避難時の移動距離および時間の最小化を目的としている。しかしこれらの研究のほとんどは、避難における集団の心理や行動特性を考慮していない。実際の避難における人間の心理は非常に複雑で、群衆に追従して非合理的な選択をしてしまう傾向がある。そのため、避難誘導計画の検証時において、追従行動が発生する可能性は考慮すべき重要な要素である。

3. 追従行動を考慮した誘導の評価指標

本研究では“他の群衆によって本来向かうべき方向とは異なる方向に追従する力”を評価指標として定義する。この指標は一定の時間間隔ごとに各避難者に対して、“他の群衆に属する避難者の判定”と“移動方向の類似性の評価”の2つの観点から算出される。ここでは、避難者は自身が向かう避難所（目的地）が既知であるとして、途中で目的地の変更は行わないものとする。本研究で使用される変数は以下の通りである。

- g_i : 避難者 i が向かう避難所,
- \mathbf{v}_i : 避難者 i の速度ベクトル ($\mathbf{v}_i(t+1) - \mathbf{v}_i(t)$),
- \mathbf{x}_{ij} : 避難者 i と避難者 j からなるベクトル ($\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)$),
- C_i : 避難者 i に対する他の群衆に属する避難者の集合,
- m_{sl} : 避難所 l の最大収容人数,
- $s_l(t)$: 時刻 t における避難所 l の収容人数,
- y_{kl} : 出発地 (区画) k が避難所 l を選択するか否か (選択する場合は 1, それ以外は 0),
- S_k : 区画 k が対応されている避難所の集合.

$$\forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j:$$

$$g_i \neq g_j \quad (1)$$

$$\|\mathbf{x}_{ij}\| \leq d_{th} \quad (2)$$

$$\cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{x}_{ij}}{\|\mathbf{v}_i\| \|\mathbf{x}_{ij}\|} \right) \leq \frac{\theta_{th}}{2} \quad (3)$$

式 (1) から (3) は避難者 i に対して、他の群衆に属する避難者の判定方法を定式化した。ここで N は総避難者数、 d_{th} および θ_{th} は群衆を集合とみなす距離と視野角の閾値を表す。各避難者に対して、式 (1) から (3) の全ての要素を満たす避難者を他の群衆に属する避難者とし、その集合を C_i と定義する。

3.1 移動方向の類似性の評価

ここでは、前節で定義した他の群衆に属する避難者を用いて、他の群衆から力を受けた際の移動方向と本来の移動方向の類似性の評価方法について述べる。

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{x}_{ig_i}\|^2} + \sum_{j \in C_i} \frac{\mathbf{v}_j}{\|\mathbf{x}_{ij}\|^2} \quad C_i = \{j | j \in C_i, j \neq i\} \quad (4)$$

避難者 i が他の群衆から力を受けた際の方向ベクトルを式 (4) の合成ベクトル \mathbf{u}_i で表す。

そしてベクトルの類似性を測る手法であるコサイン類似度を用いて、避難者 i の速度ベクトル \mathbf{v}_i と合成ベクトル \mathbf{u}_i の類似性を評価する。本研究では、非負の評価を確保するため、値に対して -1 を乗じ、その結果に 1 を加算する。

$$\cos(\mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i) = -\frac{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{u}_i}{\|\mathbf{v}_i\| \|\mathbf{u}_i\|} + 1 \quad (0 \leq \cos(\mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i) \leq 2) \quad (5)$$

速度ベクトルと合成ベクトルの類似性が低い場合、避難者 i は本来向かうべき方向とは異なる方向の力を他の群衆から受けるため、追従する力が大きく働くと考えられる ($\cos(\mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i)$ は 2 に近づく)。避難誘導において、各避難者が高い追従力を有する場合は初期に与えられた誘導を厳守する確率が低下することを意味する。そのため、望ましい誘導シナリオは、総避難時間における避難者全体の追従する力が小さいシナリオである。これは提案する指標と結びつけると、コサイン類似度の値が小さいほど望ましい誘導であると言える。

以上より、各シナリオにおける評価指標の値は 30 秒毎に以下の式で定義する。

$$E = \sum_{t=0}^T \sum_i^N \cos(\mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i) \quad t = 0, 30, 60, \dots, T \quad (6)$$

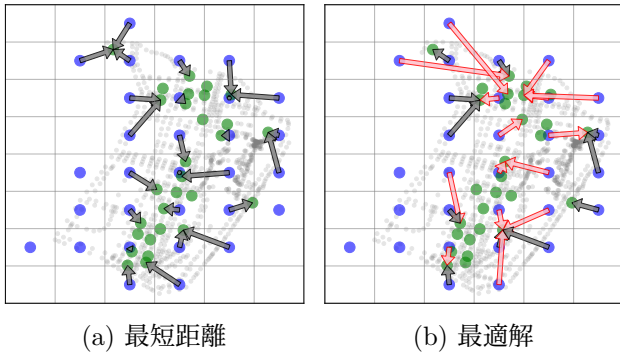


図 1: 区画と避難所の組み合わせ. 青点: 区画の中心, 緑点: 避難所の位置, 灰点: ノードの位置. (b) の赤矢印は最短距離と異なる組み合わせ. 避難者が存在しない区画は最適化の対象外.

4. 検証方法

本研究では避難所の割り当て問題に対して, 群衆シミュレーションと最適化アルゴリズムを用いて検証を行う. ここでは, 広範囲に分布する避難者を仮想的な格子状の区画に分割し, 各区画ごとに避難所を割り当てることで, 集団単位での避難戦略を検討する. “群衆シミュレーションによる目的関数の算出”と“最適化アルゴリズムによる目的関数の評価”の2つの処理を評価回数分繰り返すことで, 式(6)が最小となる区画の割り当て方法を探る. また, 評価指標の最小化を考える上で, 各避難所の収容人数と対応距離の2つの制約を考慮する. 以上をまとめると, 本研究で考える問題は単目的最適化問題として以下の式で定義される.

$$f = \min \sum_{t=0}^T \sum_i^N \cos(\mathbf{v}_i, \mathbf{u}_i)$$

$$\text{subject to } s_l(t) \leq m_{s_l} \quad \text{for } l = 1, 2, \dots, M, t = 0, 30, \dots, T$$

$$S_k : \sum_{l=1}^M y_{kl} = 5, \min \sum_{l=1}^M \|\mathbf{x}_{kl}\| \cdot y_{kl} \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, A \quad (7)$$

ここで, M は避難所の数, A は区画の数を表し, 近傍の5つの避難所への避難を考慮する. 本研究では群衆シミュレータとしてCrowdWalkを用いる. また, 最適化アルゴリズムとしてTPEを用いる. TPEはベイズ最適化の一つであり, 条件付き確率密度関数のモデル化によって候補点を選択するため, 探索空間が複雑かつ計算コストが高い場合でも優れた性能を発揮する.

5. ケーススタディ

問題設定を一般社団法人大手町・丸の内・有楽町地区まちづくり協議会および三菱地所株式会社と協力して考え, 東京駅周辺(大手町, 丸の内, 有楽町)に対して, 避難シミュレーションを実行した.

5.1 地理データとパラメータ設定

本研究では, OpenStreetMap のデータを用いて, シミュレータのマップ環境を構築した. 東京駅周辺を300m四方のメッシュを用いて, 30個の区画に分割した. また, 2021年09月04日(土曜日)の12時に取得されたGPSデータを避難者の初期人口分布として用いた. さらに, 防災ホームページを参照して, 29箇所の避難所の位置をシミュレータ上に実装した. 単目的最適化を解くためのTPEの実装にはOptunaを使用し, 5つのseedで評価予

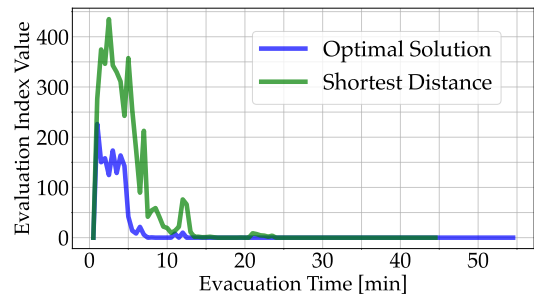


図 2: 経過時間ごとの評価指標値

算1,000回の実験を行った. 提案手法における閾値 d_{th} , θ_{th} はそれぞれ 40 [m], 180 [deg] に設定した.

6. 実験結果

本研究では最短距離による割り当てを基準とし, 最適化によって得られた解の評価を行う. 図1は最短距離の避難所を選択するシナリオ(図1.(a))と最適化により最も良い評価値を示すシナリオ(図1.(b))における区画と避難所の組み合わせを示す. また, 図2は経過時間ごとの目的関数値を示す. 最適解を最短距離と比較すると, 全体の目的関数値が減少している. すなわち, 最短経路の避難に比べて, 追従行動の発生が少ないシナリオを探ることができた. また, 最短距離では避難開始直後に指標が急増していることがわかる. 図1.(a)より最短経路における東京駅周辺の南側の区画の割り当てを見ると, 各区画がそれぞれ異なった目的地を選択している. さらに, 矢印の長さ(区画と避難所との距離)が同程度であることから, 違う目的地に行く集団とのすれ違い(対交流)が複数箇所発生している可能性がある. 図1.(b)のように離れた区画同士が同じ目的地を選択することにより, 対交流の発生を抑えることができると考えられる. 図2の横軸(経過時間)を見ると, 最短経路のシナリオは44分で全ての避難者が避難を完了しているのに対して, 最適解のシナリオは54分であることから, 混乱は少なくなるものの従来使用されている指標は低下することが明らかとなった.

7. まとめ

本研究では, 避難時における追従行動を考慮した新たな誘導の評価指標を提案した. 広域避難誘導の一つである, 避難所の割り当て問題に対して, 群衆シミュレーションと最適化アルゴリズムを用いて, 追従行動が少ない誘導方法を導出した. 初期人口分布として用いたGPSデータは東京駅周辺の南側に初期点が多く発生する状態であったが, 異なる初期人口分布を用いて分析を行う必要がある.

参考文献

- [1] 武田芽依, 大西正輝. 多目的ベイズ最適化による地下動線を活用した避難誘導の検証. 第85回全国大会講演論文集, Vol. 2023, No. 1, pp. 649–650, 2023.
- [2] Guangchun Zhong, Guofang Zhai, Kai Shang, and Wei Chen. A two-stage hierarchical model for spatial location and evacuation allocation problem of urban earthquake shelters: a case study in central urban area of yangbi county, yunnan province, china. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 13, No. 1, pp. 1721–1761, 2022.
- [3] Kazuhito Umeki, Tomoki Tanaka, Yugo Nakamura, Manato Fujimoto, Teruhiro Mizumoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Large-scale evacuation shelter selection method through iterations of pedestrian simulations with dynamic congestion reproduction. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 89387–89401, 2022.