

## 危険度と混雑度を考慮した粘菌アルゴリズムによる分散避難経路の探索

Dispersed Evacuation Routes Search Using Polycephalum Algorithm  
Considering Risk and Congestion水越 摂奈<sup>†</sup>  
Setsuna Mizukoshi伏見 卓恭<sup>†</sup>  
Takayasu Fushimi大野 由美子<sup>†</sup>  
Yumiko Ohno

## 1. はじめに

日本は、地震や台風、集中豪雨といった自然災害が頻発する国であり、特に南海トラフ巨大地震のような大規模災害の発生が危惧されている。こうした状況下において、住民の生命を守るための迅速かつ安全な避難計画の策定は極めて重要な国家的課題である。そのため、大規模自然災害への備えとして、実用的かつ信頼性の高い避難計画の重要性が増している。特に、災害発生時には想定外の事態が起こり得るため、単一の最適経路だけでなく、状況に応じて選択できる多様な避難経路の確保が求められる。また、子連れやペットとの避難などの避難者の状況に合わせたルートの提示が求められる。しかし、従来の経路探索手法では、主に距離を基準とした単一経路の提示に留まり、避難経路の安全性の考慮や避難者集中による混雑といった複合的な要因を考慮した複数経路の導出は困難であった [1]。

本研究の目的は、生物の性質にヒントを得た粘菌アルゴリズムを応用し、この課題を解決することにある。粘菌アルゴリズムは、ネットワークから複数の効率的な経路を自律的に発見する特性を持ち、分散型経路探索に適している [2]。本研究の独自性は経路評価の指標として、物理的「距離」、ハザードマップに基づく「危険度（浸水・土砂災害）」、避難者の流れが引き起こす「混雑度」という、3つのリスクを統合した点にある。この多角的な評価指標を用いることで、単に短いだけでなく、安全かつ混雑を避けるという、質の高いバリエーションに富んだ避難経路群を生成する。これにより、地域防災計画における、より現実的で効果的な避難誘導策の基礎資料を提供することを目指す。

## 2. 提案手法

本研究では、災害時の避難経路の多様性と安全性を両立するため、粘菌アルゴリズムに基づいた経路生成手法を拡張し、ハザードマップに基づく危険度および、ステップ媒介中心性 [3] に基づく混雑度を考慮した新たな導電率モデルを導入する。以下に、まず基本となる粘菌アルゴリズムを概説し、その後、提案手法による拡張について述べる。

## 2.1. 粘菌アルゴリズム

粘菌アルゴリズムは、Physarum polycephalum による自己組織的ネットワーク形成過程を数理モデル化した経路最適化手法である。ネットワーク上のエッジ  $e = (i, j)$  に対し、時間発展とともに導電率  $D_{ij}$  を更新し、最終的に高導電率の経路を抽出する。ノード  $i$  の圧力  $p_i$  を定義し、オームの法則に基づく流量  $Q_{ij}$  は以下で与えられる：

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{l_{ij}}(p_i - p_j).$$

ここで、 $l_{ij}$  はエッジ  $(i, j)$  の長さを表す。電荷保存則に基づき、ソースノードとシンクノード以外のノードにおける流入・流出は保存されると仮定し、全体の電位分布  $\mathbf{p}$  は以下の線形方程式の解として求められる： $\mathbf{L}\mathbf{p} = \mathbf{b}$ 。ここで、 $\mathbf{L}$  はラプラシアン行列、 $\mathbf{b}$  はソースとシンクを反映した電流源ベクトルである。導電率  $D_{ij}$  は時間発展により以下のように更新される：

$$\frac{dD_{ij}}{dt} = f(|Q_{ij}|) - \delta D_{ij}$$

ここで、 $f(\cdot)$  は流量に基づく強化関数、 $\delta > 0$  は減衰係数である。

## 2.2. 危険度と混雑度を考慮した導電率モデル

避難経路策定にあたり、単純な距離だけでなく、以下の2要因も考慮する：

- 危険度  $h_{ij}$ ：ハザードマップなどから得られる災害リスク指標。高いほど危険。
- 混雑度  $c_{ij}$ ：ステップ媒介中心性に基づき、エッジ  $(i, j)$  を通過する避難者数の期待値として計算。

これらを考慮し、提案手法では導電率を以下のように定義する：

$$\frac{D_{ij}}{\lambda_1 l_{ij} + \lambda_2 h_{ij} + \lambda_3 c_{ij}}.$$

ここで、 $\lambda$  はそれぞれ距離、危険度、混雑度の考慮度合いを調整するハイパーパラメータである。これにより、危険地帯や混雑地帯を回避しつつ、分散的な複数経路を導出可能となり、災害リスクと混雑リスクの双方を回避する柔軟な避難ネットワーク形成が可能となる。

<sup>†</sup>東京工科大学コンピュータサイエンス学部



図1: 条件ごとの探索経路

### 3. 評価実験

#### 3.1. データセット

道路ネットワークはOpenStreetMap (OSM)より、八王子市の歩行者用道路ネットワークを取得し、無向グラフとして利用した。エッジには実際の距離を属性として付与した。ハザード情報は国土数値情報提供のポリゴンデータ2種(「土砂災害警戒区域等」および「洪水浸水想定区域(想定最大規模)」)を用いた。これに基づき、各ノードの危険度を算定した。混雑度指標には提案手法における混雑度 $c_{ij}$ の基盤データとして、エッジごとのステップ媒介中心性の計算結果を利用した。

#### 3.2. 実験設定

提案手法の有効性を多角的に評価するため、重み付け $\lambda$ の値を変更した以下の4つの条件で比較実験を行った。これにより、各要因が経路選択に与える影響を分析する。なお、本稿では、提案手法のモデルにおいて、 $\lambda_1$ を距離、 $\lambda_2$ を危険度、 $\lambda_3$ を混雑度の重みとして記述する。

- 条件1 (距離優先):  $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = \lambda_3 = 0$
- 条件2 (危険度優先):  $\lambda_2 = 1, \lambda_1 = \lambda_3 = 0$
- 条件3 (混雑度優先):  $\lambda_3 = 1, \lambda_1 = \lambda_2 = 0$
- 条件4 (総合評価):  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$

これら4つの条件に基づき経路生成を行い、その結果を比較することで提案手法の有効性を検証する。

#### 3.3. 評価指標

3.2節で設定した各条件で生成された避難経路を、総距離、平均危険度、平均混雑度、管の平均太さの4つの指標を用いて定量的に評価、比較する。

総距離、平均危険度、平均混雑度の3指標は、その数値が小さいほど優れた経路であることを示す。一方で、管の平均太さはその数値が大きいほど評価が高い経路となる。平均危険度および平均混雑度は共に0以上1以下の範囲で値をとる。

#### 3.4. 実験結果

図1は水色が総合、白が距離と危険度、黄色が混雑度を優先とした経路を示している。4条件の比較から、距離優先経路(危険度優先と同

表1: 条件ごとの探索経路の評価値

	優先項目			
	距離	危険度	混雑度	総合
経路長 (m) ↓	7077.4	7077.4	8758.9	8436.7
危険度平均 ↓	0.0342	0.0342	0.0642	0.1424
混雑度平均 ↓	0.7823	0.7823	0.6874	0.9560
管の平均太さ ↑	0.6827	0.6827	0.6731	0.7392

一)は最短だが混雑し、混雑度優先経路は大きく迂回した結果が示された。

特筆すべきは総合評価経路である。表1より、本経路は管の太さでは最高値を示した。一方、危険度と混雑度の指標では全経路中の最大値となっている。これは提案モデルが3要素のコストの総和を最小化することを目的としているため、単一の評価観点では最適化されていないという意味である。

今回の結果では、対象地域の性質上、距離優先と危険度の経路が一致したが、すべての地域でこのようになるわけではない。

### 4. おわりに

本研究では、粘菌アルゴリズムに道路の危険度と混雑度を導入し、避難経路を最適化する手法を提案した。距離、危険度、混雑度のいずれか一つを優先した単一目的の経路との比較実験により、提案手法が各経路の欠点を避け、安全性と移動効率を両立した、実践的な避難経路網を生成できる有効性を示した。

今後の課題は、 $\lambda$ の値を細かく変化させた際に、得られる経路の評価値が比例した値になることを確認することである。さらに、距離、危険度、混雑度の分布を調整し、特定の重みが支配的にならない「最適なバランス」を求めることである。

### 参考文献

- [1] 浅田智裕, 杉浦聡志: 複数の避難手段を考慮した最適浸水一次避難計画手法の開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol. 78, No. 5, pp. 141–151 (2023).
- [2] Tero, A., Kobayashi, R. and Nakagaki, T.: A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold, Journal of Theoretical Biology, Vol. 244, No. 4, pp. 553–564 (2007).
- [3] 鈴木優伽, 斉藤和巳, ステップ分解型媒介中心性による道路網の混雑度分布の分析, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と問題解決, Vol. 11, No. 2, pp. 87–98 (2018).