

複雑ネットワークを用いた 新しい群集シミュレーション手法

山出真也[†] 白山晋^{††}

群集シミュレーションは、多粒子近似のような粒子系の方法やセル・オートマトンのような空間中心の方法で行われることが多い。粒子系の方法の多くは、粒子数の増加にともない計算量が膨大なものになる。また、計算パラメータ依存性も大きいことが知られている。このため、空間中心の方法に推移している。一方、空間中心の方法では、移動制約のため、現実には生じる群集行動のパターンを再現することが難しいとされる。また、複雑な空間の境界形状を扱うことが難しい空間中心の方法にネットワーク構造を導入することによって、従来の空間中心の方法に比べ移動制約が少なく、複雑な境界形状に柔軟に対応できる新しい方法を提案する。2つの数値実験によって、従来の方法では捉えることが難しかった群集行動の多様なパターンが得られることを示す。

A New Method of Crowd Simulation using Complex Networks

SHINYA YAMADE[†] SUSUMU SHIRAYAMA^{††}

Considerable research has been done on the topic of crowd simulation using different models. The typical models of crowd behavior are based on molecular dynamics methods, or cellular automata. Recently, the latter model is mainly used because the former model has problems of complexity, and of parameter-dependence. However, the cellular automata-model includes constraint of movement. It is shown that the constraint causes problems in reproducing realistic patterns of crowd behavior. In addition, the cellular-automata model has difficulty in adapting a complex space. To solve such problems, we introduce network structure to the cellular automata-model. The result of simulations indicates that our model is a good tool to reproduce many patterns of crowd behavior.

1. はじめに

群集事故の調査、大規模施設での安全性の検討等の要請から、群集行動の分析が行われている。近年、分析対象となる空間が大規模化に伴い、分析に群集シミュレーションが用いられている¹⁾。シミュレーションで用いられる群集行動モデルには、粒子系の方法と、空間中心の方法があり、より複雑な群集行動の再現や、行動制御の可能性が模索されている。

群集シミュレーションにおいては、パラメータを変更しながら現実的なパターンを見つけ出し、数値解に対し評価を行うという手法がとられることが多い。一般的には、粒子系の方が多くのパターンを生じるが、パラメータ空間の自由度が大きく、パターンが複雑になるため、有用なパターンを捉えることは難しい。空間中心の方法では、移動制約の問題のために、生じる

パターンは少ないが、粒子系の方法に比べ推移則が簡潔で、効率性、拡張性に優れる。近年の群集シミュレーションの多くは空間中心の方法を採用している。

本稿では、空間中心の方法にネットワーク構造を導入することで、移動制約が少なく、複雑な境界形状に対応できる新しい方法を提案する。また、群集行動のパターンを表出させる可視化法を検討する。

提案手法によって群集シミュレーションを行い、多様な群集行動のパターンの表出、及び生じうる群集動線を顕在化する可能性について言及する。

2. 関連研究

以下、既存のシミュレーション手法について述べる。

2.1 粒子系の方法

粒子系の方法においては、図1に示すように、エージェントは他の全てのエージェントとの相互作用と環境からの影響により、決められた推移則に従って連続的に移動する。また、エージェント同士、あるいは境界との衝突を考慮する必要がある。

Helbing らによって提案された Social Force Model²⁾などがその代表例である。

*[†] 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻
Department of Environmental and Ocean Engineering, School of Engineering,
The University of Tokyo

^{††} 東京大学人工物工学センター
Research into Artifacts, Center for Engineering, The University of Tokyo

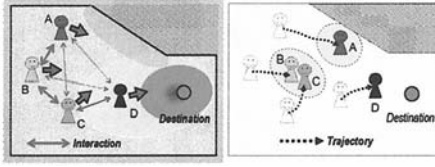


図1 粒子系の方法の概念図

2.2 空間中心の方法

空間中心の方法は、各エージェントの移動と相互作用の記述を簡便にする方法である。エージェントはある推移則に従って格子(セル)上を移動する(図2)。

代表的なモデルに、Bursteddeらによって提案されたFloor Field Model³⁾がある。またエージェント同士の衝突の処理方法が問題となる。Kirchnerらは、摩擦パラメータ μ によってこの問題を解決している⁴⁾。

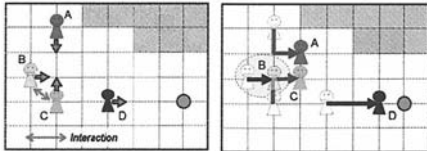


図2 空間中心の方法の概念図

2.3 既存手法の課題

粒子系の方法については、複雑な局所ルールに起因する計算量の問題や、エージェント数が増えた場合の挙動がカオスになる可能性があることなどが問題とされている。加えて、計算パラメータ依存性が高く、表出するパターンと現実との比較が困難である。

空間中心の方法においては、エージェントの移動がセル上に制約されるため、パターンの再現が難しいこと、複雑な空間の境界形状を扱うことが難しいことなどが問題点として指摘されている。

特にエージェントの移動制約の問題は大きい。空間中心の方法では、この問題を解決するためにRCA⁵⁾などの方法が提案されているが、解決に至っていない。

3. 提案手法

本稿では、空間中心の方法の問題を解決するようなモデルの提案を行う。具体的には、空間中心の方法にネットワーク構造を導入するものである。

提案手法は、移動空間のネットワークによる離散化、ネットワーク上でのエージェントの移動モデル、群集行動パターンの可視化の3つからなる。以下に、それぞれを説明する。

3.1 移動空間のネットワークによる離散化

はじめに、対象となる領域にノードとリンクを配置し、エージェントの移動領域を、生成手法と統計的指標で特徴付けられるネットワークにより構成する。

ネットワークの統計的指標としては、平均次数 $\langle k \rangle$ 、次数分散 σ_k^2 、平均リンク長さ $\langle \Delta l \rangle$ を用いる。

提案するネットワーク生成法は後述する二つである。その際、ノードの配置はエージェントの排除体積、リンクは1ステップでの移動距離を考慮して決定する。

3.1.1 ネットワークモデルによるネットワーク生成

本項では、ネットワークモデルによるネットワーク生成について述べる。

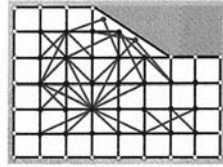


図3 ネットワークモデルによるネットワーク生成

はじめに、基準となるネットワークを格子に基づいて生成する(基準ネットワークと呼ぶ)。次に必要な領域にノードを加え、ネットワークモデルによりリンク構造を改変することでネットワークを生成する(図3)。

ネットワークモデルとしては、修正WSモデル、Sandarらのモデル⁶⁾、PAWSモデルの3つを用いる。

3.1.2 前進先端法によるネットワーク生成

前進先端法(Advancing Front Method: AFM)は、要素形成の先端を境界から領域内部へと順次前進させていく方法で、最終的には全ての領域を要素で埋め尽くす。(図4に第一段階を模式的に示す)。本稿では、Peraireらのアルゴリズム⁷⁾を用いる。生成したネットワークを基準ネットワークとする。また3.1.1項の3つのネットワークモデルによりリンクを追加し、それぞれAFM-WSモデル、AFM-Sandarモデル、AFM-PAWSモデルとする。

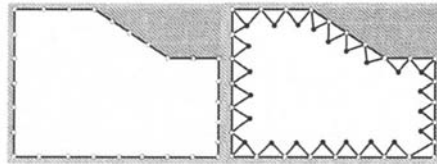


図4 AFMによる基準ネットワークの生成

3.2 ネットワーク上の移動モデル

エージェントは、リンクを経由しノード上を移動する。その際の移動モデルとして、Bursteddeらの提案したFloor Field Model³⁾をネットワークに拡張する。

はじめに、各ノードにフロアフィールド(FF)とい

う状態量を持たせる。エージェントは自分の近傍のノードの FF 値により、確率的に移動するノードを決定する。FF は、人間の最短距離を通ろうとする性質をモデル化する静的 FF と、群集中の人間の『他人の行動に追従する』性質をモデル化する動的 FF からなる。

静的 FF の例は、目的地までの距離である。エージェントは、静的 FF が減少するノードに移動しやすいモデルにする。また、エージェントが 1 ステップ前にいたノードに足跡を残すことで、追従行動のモデル化を行う。これが動的 FF である。エージェントは足跡の多いノードへ移動しやすいものとする。

ノード v_i の静的 FF を S_i 、動的 FF を D_i とする。各ノードが移動先として選ばれる確率は、 N を正規化定数、 k_s 、 k_D を定数として、式(1)で表される。

$$p_i = N \exp(k_D D_i) \exp(k_S S_i) \quad (1)$$

また、空間中心の方法では、各ステップで複数のエージェントが同一のノードに移動するという問題が生じる。本稿では、Kirchner らの提案した摩擦パラメータ⁹⁾によってこの問題を解決する。

3.3 拡張ピクセル露光法による可視化

本稿では、ピクセル露光法(Pixel Exposure Method : PEM)⁹⁾をエージェントの移動軌跡の可視化に用いる。(拡張ピクセル露光法 : EPEM と呼ぶ)。

エージェントに RGB 値を与え、図 5 のようにピクセル空間にエージェントの移動軌跡を投影する。

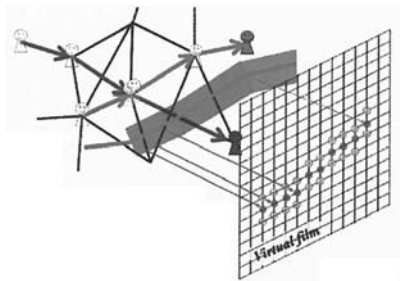


図5 拡張ピクセル露光法の概念図

後述するように、エージェントは流入部等によって色分けされる。同一種のエージェントの移動軌跡が重なる部分は、そのエージェントの色によってパターンが顕在化し、異種のエージェントの移動軌跡が重なった場合には、重なった部分のピクセルの色はそれぞれの RGB 値を足し合わせたものとなる。

4. 数値実験と考察

数値実験の結果は 10 回の試行の平均である(可視化

を除く)。また、試行毎にネットワークも生成している。

4.1 群集流動シミュレーション

はじめに、提案手法の有効性を確認するために、群集流動シミュレーションを行う。

12m×6m の通路を模した 30×15 のセル空間を対象領域とし、対象領域の左右から流動係数 0.6 (人/m・s) でエージェントを流入させ、領域の逆側の端を目的地として移動させる。評価関数として領域を通過した通算エージェント数を用いる。

特徴的であったネットワークでの実験結果を図 6 に示す。横軸はステップ数、縦軸は評価関数の値である。

ネットワーク構造を導入した結果、 $\langle k \rangle$ と $\langle \Delta t \rangle$ が大きいほどエージェントのすり抜けが起ること、また、 va がすり抜けの程度に影響を与えているということもわかった。さらに、AFM をベースとした場合には、格子をベースとした場合と比べ通過エージェント数が減衰しないという特徴が見られた。

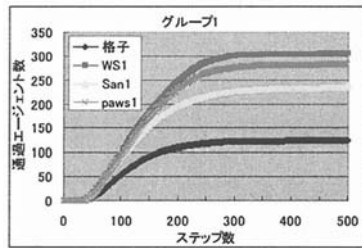


図6 群集流動シミュレーションの結果

次に群集行動のパターンによる分析について述べる。AFM でのシミュレーション結果を、EPEM を用いて可視化し、群集行動の特徴であるレーン形成や渋滞が発生することを確認した(図 7)。また、格子ベースのネットワークではレーンの持続時間が短く、AFM ベースではレーンが長時間持続することがわかった。

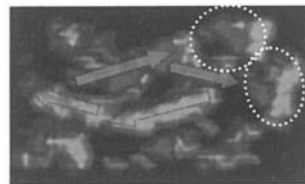


図7 EPEMによる可視化

4.2 明石群集雪崩事故の再現シミュレーション

提案手法の実空間領域への適用例として、2001年にJR 朝霧駅歩道橋上にて発生した群集雪崩事故の再現を試みる。伊藤らに従い⁹⁾、歩道橋の一部の L 字型領域をネットワークによって離散化する。図 8 に移動領域を示す。

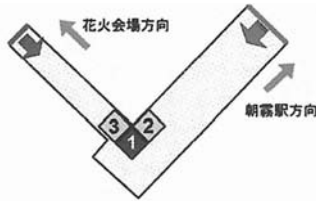


図8 移動領域

エージェントは、図8の赤と青で示す部分から流動係数0.4 (人/m・s) で流入させる。また、伊藤らにない、本研究においても、Floor Field Modelの静的FFに“イン=アウト行動”⁹⁾を導入する。

また、シミュレーションの評価関数として、群集密度の高かったとされる領域 R_1 , R_2 , R_3 (図14の曲がり角の部分1,2,3) において、群集密度を表す評価関数であるエージェント密度を算出した。

図9に、修正WSモデルにおいてネットワークの統計的指標を変化させた場合の、領域1でのエージェント密度の時間変化を示す。

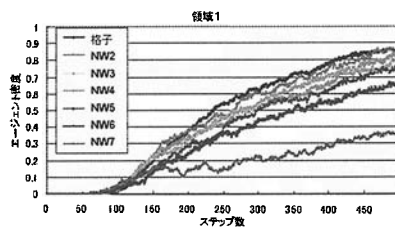


図9 領域1におけるエージェント密度の時間変化

領域1でのエージェント密度の時間変化を調べると、ほぼ全ての場合に群集密度の危険値⁹⁾を超えている。また他の領域での結果と合わせて、領域2での群集密度上昇が領域1,3へ波及したとする伊藤らの結果と一致した。

図10, 11に、正方格子とAFMの可視化結果を示す。

AFMの場合は、エージェントがクラスタを形成し通路の内側を移動している様子が確認できる。このクラスタは、図11の曲がり角の部分に現れているように、エージェントの渋滞の原因となっている。

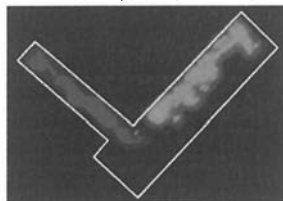


図10 パターンの変化 (格子)

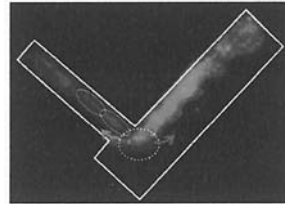


図11 パターンの変化 (AFM)

5. まとめ

本研究では、群集シミュレーションに対して、空間分割の方法にネットワーク構造を導入し、多様な群集行動のパターンを効率的に表出させる方法を提案した。

提案手法は、空間のネットワークによる離散化、ネットワーク上での移動モデル、拡張ピクセル露光法による群集行動のパターンの可視化の3つからなる。

提案手法に基づき、群集流動シミュレーションを行い、従来の方法では難しかった群集行動パターンを再現できることを示した。

参考文献

- 1) Helbing, D., Farkas, I., and Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, Vol.407, 2000 pp.487-490
- 2) Helbing, D. and Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Phys. Rev. E* 51, 1995, pp. 4282-4286
- 3) Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. and Zittartz, J.: Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton, *Physica A*, Vol.295, 2001, pp. 507-525
- 4) Kirchner, A., Nishinari, K., and Schadschneider, A.: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics, *Phys. Rev. E* 67, 2003, 056122
- 5) Yamamoto, K., Kokubo, S., and Nishinari, K.: Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA), *Physica A*, Vol.379, 2007, pp.654-660
- 6) Sandar, L.M., Warren, C.P., Sokolov, I.M., Simon, C. and Koopman, J.: Percolation on heterogeneous networks as a model for epidemics, *Mathematical Biosciences*, Vol.180, 2002, p.293
- 7) Peraire, M., Vahdati, M., Morgan, K., and Zienkiewicz, O. C.: Adaptive remeshing for compressible flow computations, *Journal of Computational Physics*, 72, 1987, pp.449-466
- 8) Shirayama, S. and Ohta, T.: A Visualization of a Vector-field by a Homogenized Nascent-particles Tracking, *Journal of Visualization* Vol.4, No.2, 2001, pp.185-196
- 9) 伊藤悠太郎, 鈴木智彦: エージェントアプローチによる群集流動のシミュレーション分析 - 明石歩道橋事故の再現を通じて -, 第4回 KK-MAS コンペティション報告集, 2004