

個別要素法を用いた避難誘導シミュレーション

福田貴大¹、伊藤彰人²、辻内伸好²、堀井宏祐³

¹ 同志社大学 理工学研究科 機械工学専攻

² 同志社大学理工学部

³ 山梨大学 総合研究部

概要

災害時における建物内や地下街では、人々の避難により大変な混雑発生が予想され、そのような人々をいかに安全に出口まで誘導するかという問題は非常に重要である。本研究では、避難時に重要な役割を担う避難誘導灯に注目し、避難通路の混雑具合を時々刻々フィードバックして、避難誘導灯の避難指示方向を変化するという避難誘導アルゴリズムを構築した。その避難誘導アルゴリズムを用いて、避難シミュレーションを行った結果、全ての出口の避難状況をフィードバックした上で、最適な避難指示方向を表示する必要があることがわかった。

Evacuation Guidance Simulation using Distinct Element Method

Takahiro Fukuda¹, Akihito Ito², Nobutaka Tsujiuchi², Hirosuke Horii³

¹ Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

² Faculty of Science and Engineering, Doshisha University

³ Faculty of Engineering, University of Yamanashi

Abstract

In a building and an underground shopping area at the time of a disaster, occurrence of much congestion by evacuees is predicted. Therefore, the problem of how safely guide such people to an exit is very important. In this study, we focused on an evacuation guide lamp which play an important role during evacuation. Therefore, we constructed an evacuation guidance algorithm that changes an evacuation directive direction of the guide lamp by feeding back the congestion state of a passage every moment. As a result of the simulation using this algorithm, we were able to verify that it was necessary to display the most suitable evacuation directive direction after having fed back the evacuation situation of all exits.

1 はじめに

日本は世界でも有数の地震大国であり、2011年3月に発生した東日本大震災のような地震や災害が今後も発生する確率が高く、避難の重要性が注目されている。上記のような災害時における建物内や地下街では、人々の避難により出口に大変な混雑が発生すると予想され、避難者をいかに安全に出口まで誘導するかという問題は非常に重要である。そこで実際の避難を想定して行われる避難訓練が有効だと思われるが、人の多い地下街等にいる全ての人を対象に避難訓練を行うことは非常に困難である。そこで避難時に発生する混雑や衝突のような様々な現象を解明し、避難時の対策を

考えるために避難シミュレーションが必要となる。そこで本研究では避難時に必要不可欠な避難誘導灯に注目した。一般的な避難誘導灯の避難指示方向は常に一定の方向を示している静的なものであるため、緊急時に多くの人が同時に1つの出口に押し掛けることで混雑が生じてしまう。そこで避難通路の混雑具合を時々刻々フィードバックすることで、避難誘導灯の避難指示方向を変化させる避難誘導アルゴリズムを構築し、避難シミュレーションを行った。シミュレーションを行うにあたり個別要素法(DEM)を用いて避難者をモデル化し[1]、シミュレーションモデルを構築した。

2 シミュレーションモデルの構築

2.1 個別要素法

避難行動中に起こり得る複雑な状況の把握を定量的に可能にするため、個々の要素に着目して解析を行うことができる個別要素法(DEM)を採用し、避難者をモデル化した[1] [2]。DEMは、図1に示すように避難者間の力の伝達を接触点におけるバネとダッシュポットで行われるものとして、各要素についてそれぞれ独立な運動方程式を作り、現時点の各個体要素の位置を求める手法である。群集を構成する p 番目 ($p=1, 2, \dots, N; N$ は総人数) の個体の質量を m_p 、この個体の x, y 方向の変位をそれぞれ x_p, y_p とすると、運動方程式は以下のようになる。ただし本研究では、進行方向のベクトルの向きに人が向いて移動していると仮定している。従って、ベクトルの向きの変化には横方向の力のみで対応できると考え、モーメントに関する運動方程式は考慮しないものとする。

$$m_p \ddot{x}_p(t) = f_p^x(t) \quad (1)$$

$$m_p \ddot{y}_p(t) = f_p^y(t) \quad (2)$$

ここで、 $f_p^x(t)$ 、 $f_p^y(t)$ はそれぞれ第 p 要素に作用する x, y 方向の合力であり、要素を構成するバネ定数 k から成る弾性スプリングによる抗力、減衰係数 c から成る粘性スプリングによる抗力、および個体推進力から構成される。ここで個体推進力を各要素の歩行速度が一定になるまで受ける力と定義した[2]。

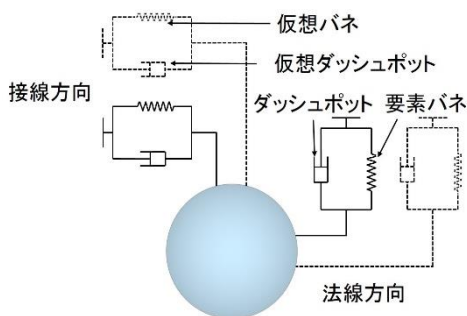


図1: DEMによる避難者のモデル化

2.2 仮想半径・仮想バネの導入

本研究では人のパーソナルスペースを表現するために図2に示すような仮想バネ・仮想半径を導入する[3] [4]。人は、物理的に接触する前に障害物を回避しようとする心理が働き、ある一定の距離を保とうとする。この心理的距離をここでは仮想半径と定義する。DEMの個体の動きを人の行動に近い状態にするために、この距離を0.8mと仮定して、人間相互の物理的な接触によって生ずるバネの他にこの心理的距離に対応した仮想バネを用い、仮想バネの影響を受ける領域を発現領域と定義し、その領域の範囲角度を視野角度と定義した[4]。

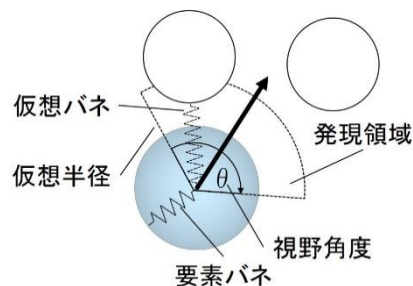


図2: 仮想半径・仮想バネ

3 避難誘導アルゴリズム

3.1 避難誘導アルゴリズムのシステム

本研究では、避難者のスムーズな移動のため、新たに避難誘導アルゴリズムを提案する。避難時の建物内には、一般的に非常口のマークや、避難経路を示す避難誘導灯が設置されている。しかし、これは常に一定の方向を示している静的なものであるため、緊急時に多くの人々が1つの出口に押し掛け、出口付近には混雑が生じる。そのため、避難者同士の衝突によりスムーズな移動は困難となると考えられる。このことから、避難状況をフィードバックしながら避難指示方向を切り替え、スムーズな避難誘導を行う避難誘導灯のアルゴリズムを構築する。まず図3(a)のような場合について説明する。粒子はまず避難誘導灯の方向へと進む。避難誘導灯の指示領域に入った粒子は避難誘導灯が出す指示に従い移動する(図3(a))。一般的な避難誘導灯の場合、指示する方向は一定の方向であるため、出口付近には渋滞が発生する(図3(b))。本研究で提案する避難誘導灯はこれらの渋滞を感知し、避難状況をフィードバックすることで避難指示方向を切り替え新たな出口方向に進むよう避難者に指示を与える。また通路に侵入する人の数に閾値を設け、その閾値を超えた場合は誘導灯の方向を変更し、混雑のない出口に導く。

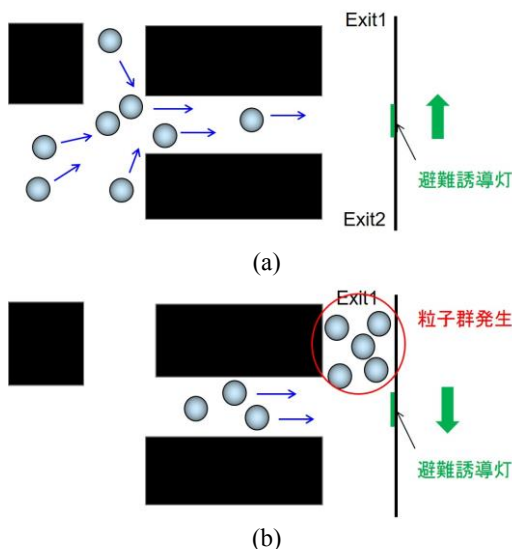


図3: 避難誘導アルゴリズム

3.2 避難誘導アルゴリズムを採用する領域

本研究では、どの粒子に対しても均一に避難誘導アルゴリズムの影響を与えるために、図4のような十字路の通路幅の領域を定めた。まず、粒子は初期位置から移動を行い、時間経過後、図の認識領域に存在するならば、その粒子に対して避難誘導アルゴリズムを採用するように設定した。今回行うシミュレーション内では、粒子が領域内に侵入してきた場合に、誘導灯の認識率を100%として誘導灯の避難指示方向に従うように設定した。

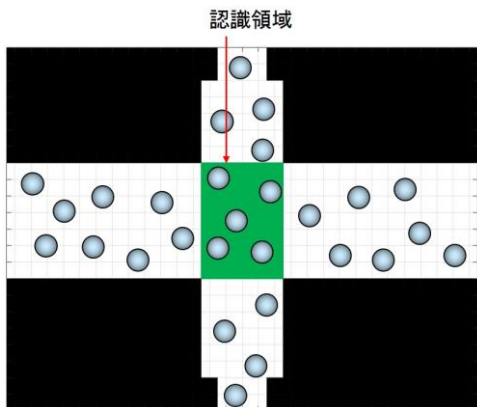


図4: 避難誘導アルゴリズム採用領域

3.3 閾値を求めるためのシミュレーション

3.1、3.2節で構築した避難誘導アルゴリズムをシミュレーションに組み込むにあたり、通路を通うことができる避難者の数つまり閾値を設定した。今回はその閾値を設定するにあたり、図5のような通路を想定して粒子数を75とし、一定の方向を指示し続ける一般的な避難誘導灯の場合と避難誘導アルゴリズムを適用した避難誘導灯の閾値を1~30の間で変えた場合で、各条件に対し初期配置のみを変え10回ずつシミュレーションを行った。横に長い通路の長さを13m、幅を3m、縦に長い通路の長さを10m、幅を2.5mの十字路で、出口の幅を1.3mとした。その他のパラメータを表1に示す。ここで要素バネ定数、要素減衰係数、仮想バネ定数、仮想減衰定数の値は試行錯誤で決定した。また混雑が発生する状況になるように出口をボトルネック形状にした。図6に各閾値に対して10回のシミュレーションの平均避難完了時間を標準偏差と共に示した。図6の一番左の赤いデータは一般的な避難誘導灯の場合のデータである。この結果より閾値が16の時の避難完了時間が最短になっていることがわかる。これは避難誘導灯の避難指示方向の切り替により、出口付近での混雑の発生が抑制されたからだと考えられる。また閾値が17以上になると平均避難完了時間が増加しているのは、本条件での出口付近の通路に存在する粒子が17を超えることが急減し、誘導灯の切り替えがなくなり、一般的な避難誘導灯の状態と変わらなくなるためであると考えられる。以上の結果から今回は閾値を16に設定した。

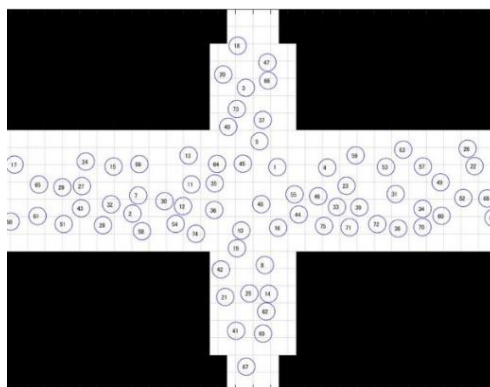


図5: 閾値を求めるためのシミュレーション概要図

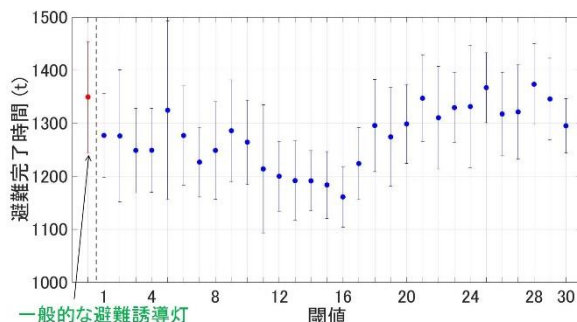


図6: 各閾値に対する平均避難完了時間

表1 シミュレーションに用いたパラメータ

粒子半径 $r(m)$	2.15×10^{-1}
仮想半径 $Alh(m)$	8.00×10^{-1}
質量 $m(kg)$	6.00×10^1
移動速度 $v(m/s)$	0.8 ~ 1.8
個体推進力 $Fg(N)$	1.74×10^2
計算時間間隔 $\Delta t(s)$	1.00×10^{-2}
視野角度 $\theta(^{\circ})$	100
要素バネ定数 (法線方向) $k^u(N/m)$	8.18×10^3
〃 (接線方向) $k^v(N/m)$	4.09×10^2
要素減衰定数 (法線方向) $c^u(Ns/m)$	1.10×10^3
〃 (接線方向) $c^v(Ns/m)$	2.47×10^2
仮想バネ定数 (法線方向) $k''(N/m)$	4.50×10^2
〃 (接線方向) $k''(N/m)$	2.71×10^0
仮想減衰定数 (法線方向) $c''(Ns/m)$	3.39×10^0
〃 (接線方向) $c''(Ns/m)$	2.63×10^1

4 避難シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

本研究では、3章で構築した避難誘導システムのアルゴリズムを用いて大規模な避難を想定した避難シミュレーションを行った。大規模な避難を想定した理由としては、今回構築した避難誘導アルゴリズムを大規模な避難へ適用した場合に生じる課題を明らかにするために実施した。シミュレーション概要図を図7に示す。横に長い通路の長さ

を28m、幅を3m、縦に長い通路の長さを10m、幅を2.5m、出口の幅を1.3mとした。粒子の数を250個とし、その他のパラメータは表1と同条件とした。壁のない空間に粒子をランダムに配置した初期配置を図8に示し、その状態から2つの誘導パターンでシミュレーションを行った。それらのパターンは一定の方向を指示し続ける一般的な避難誘導灯の場合 (Pattern A)と今回提案した避難誘導アルゴリズムが組み込まれた避難誘導灯が設置してある場合(Pattern B)である。Pattern Aの場合、粒子は一番近い出口に向かって避難するように設定した。Pattern Bの場合、全ての粒子が避難誘導灯の指示に従い、通路内の粒子数が閾値以下の場合には避難誘導灯の避難指示方向を両方にし、粒子が一番近い出口に向かって避難するように設定した。

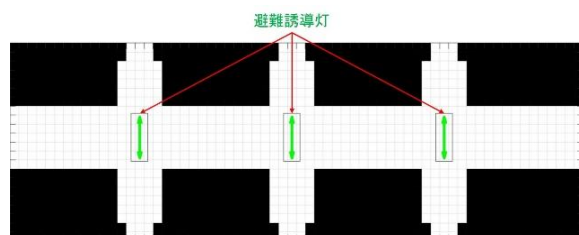


図7: シミュレーション概要図

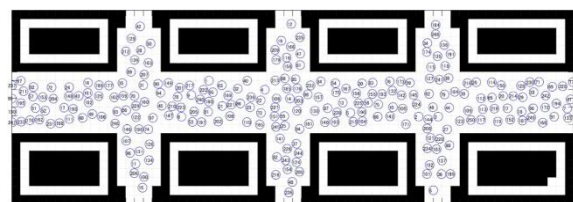
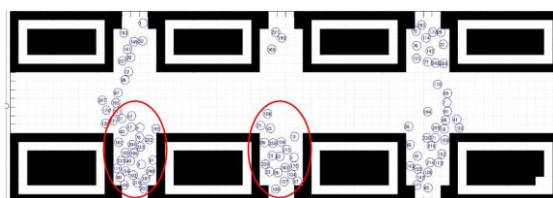


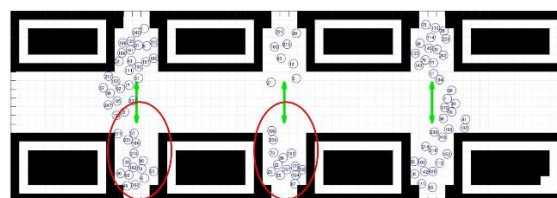
図8: 粒子初期配置図

4.2 シミュレーション結果と考察

時刻 $t = 6s$ の時の避難状況を図9に示す。赤丸で囲った通路の粒子数に注目すると、Pattern A の場合は上下の通路で粒子の数に偏りがあるのが確認できる。それに対し、Pattern B の場合は上下の通路の密度が均一に近い状態になっていることがわかる。そして Pattern B の方が避難を完了するまでの時間は短かった。しかし、図9(b)を見ると左右の十字路では出口に向かおうとする粒子による混雑が発生しているが、中央の十字路ではほぼ全ての粒子が混雑なく出口方向へ移動しようとしているのがわかる。今回構築した避難誘導アルゴリズムは近傍の2ヶ所の出口に振り分けるように設定していたが、シミュレーションの結果から全ての出口の避難状況をフィードバックし、避難指示方向を変えることができれば、より最適な避難誘導が実現できるのではないかと考えられる。また今後は複雑な通路になった場合に発生すると考えられる閾値の異なるような通路に対する最適な避難誘導の方法も検討する必要がある。



(a) Pattern A



(b) Pattern B

図9: $t = 6s$ の時の避難状況

5 まとめ

避難者が避難中に受ける様々な影響や現象を定量的に解明し、新たな避難誘導装置の開発等をするべく、個別要素法という計算手法を用いて避難シミュレーションモデルを構築した。そして避難時に重要な役割を担う避難誘導灯に注目し、時々刻々の通路の状況により避難指示方向を切り替える避難誘導アルゴリズムを提案し、シミュレーションを行った。その結果、全ての出口の避難状況をフィードバックした上で、最適な避難指示方向を表示する必要があることがわかった。また今回は全ての粒子が避難誘導灯の指示に従うと仮定しシミュレーションを行ったが、実際の避難では避難者はパニック状態であると予想され、全ての避難者が避難誘導灯を認識するとは考え辛い。よって今後は避難誘導灯の認識率をシミュレーションに組み込み、避難誘導灯がどのようなデザインや機能を持っていれば認識率が上がるのか等を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 棚橋 由彦,濱崎正一,熊川貴伯,'個別要素法による平面ひずみ圧縮下における粒状体のせん断帯形成過程の把握',長崎大学工学部研究報告 Vol.28(50),p97-102,1998
- [2] 清野純史,三浦房,瀧本浩一,土木学会論文集,No.537/I-35,p233-244,1996.
- [3] 川口寿裕,清水貴史,'群集避難に関する粒子シミュレーション',社会安全学研究(3),p75-84,2012
- [4] 原田英治,後藤仁志,丸山由太,'OV模型を採用したDEM型群衆避難行動モデルの提案',水工学論文集第51巻,p553-558,2007