

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04597

研究課題名（和文）自然な密緩和を目指した室内レイアウト設計のための歩行者シミュレータ

研究課題名（英文）Pedestrian simulator for indoor layout designs aiming at natural dense relaxation

研究代表者

伊藤 尚（Ito, Nao）

富山高等専門学校・電子情報工学科・准教授

研究者番号：30635214

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、パーソナルスペースの急縮を考慮した群集歩行モデルを構築した。このモデルにおいて群集が膠着状態に陥るデッドロック発生が問題となったため、ポテンシャル法を導入することでこの問題を解決した。これにより、デッドロックを回避しつつ被験者実験における障害物設置特性が再現可能となった。このモデルを用いて、流動係数が高くなるような複数障害物の設置位置を遺伝的アルゴリズムにより設計することができた。すなわち、本研究のモデルを用いることで、特定の目的に即した屋内レイアウトが設計可能となった。従って、商業施設等において自然に密を緩和するような店内レイアウトシミュレータが実現可能であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、デッドロックを回避しつつ被験者実験における障害物設置特性が再現可能な群集歩行モデルを提案したこと、本研究の提案モデルと遺伝的アルゴリズムを用いることで特定の目的に即した屋内レイアウトが設計可能であることを示唆したこと、これらにより、不特定多数が集まる商業施設等において、建物の構造と屋内レイアウトを同時に議論・設計することが可能となった。建造前に施設の避難容易性を評価することが可能となるであろうことを示した本研究の意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a crowd walking model in consideration of shrink of personal space. In this model, because the deadlock which means that the crowd can not move anymore is caused, we solved this problem by proposing a new model which is introduced the potential method. In this new model, we reproduced the obstacle setting characteristic of pedestrian flow in the real experiment without deadlock. By using this model and the genetic algorithm, we designed the setting position of plural obstacles that the flow coefficient becomes high. Namely, by using the proposal model in this study, it has become possible to design indoor layouts with specific purposes. Therefore, it is suggested that an indoor layout simulator using our model can naturally mitigate dense crowd in commercial facilities.

研究分野：マルチエージェントシミュレーション

キーワード：群集歩行 Social Force Model ポテンシャル法 パーソナルスペース レイアウトシミュレータ

1. 研究開始当初の背景

過去の震災から、屋内施設での円滑な避難行動が重要視されている。出口付近に障害物を設置することで群集の流動を円滑にする方法が知られているが、数理モデルによる裏付けはなかった。本研究者は2014年にマルチエージェントシミュレーションを用いて、障害物の設置が避難完了時間に与える影響を調査し、適切な障害物設置により群集流動が速くなることを明らかにした。また、2015年から2017年にかけて、避難シミュレーションに品質工学を応用し、エージェントの最適パラメータ設計手法を確立。さらに2018年から2020年には、避難者のパーソナルスペース急縮を仮定したモデルを提案し、出口付近の障害物設置が流動係数に与える影響を調査し、最適障害物設置位置の非対称性をシミュレーションで再現した。2020年の新型コロナウイルス感染拡大を受け、平常時の商業施設で自然な密緩和を目的とした店内レイアウトシミュレータ開発を着想した。

2. 研究の目的

先述した自然な密緩和を目指した室内レイアウトを設計するための歩行者シミュレータの実現可能性と有効性を示すことが本研究の目的である。具体的には、パーソナルスペースの急縮の精緻化とパラメータの同定およびモデルの評価、ポテンシャル法を導入したモデルの高度化、提案モデルと遺伝的アルゴリズムを用いた室内レイアウトの設計を行う。

3. 研究の方法

パーソナルスペースの急縮ルールの精緻化とパラメータの同定およびモデルの評価

Social Force モデルは壁などの障害物から受ける力、他のエージェント、移動目標から受ける力の3種類の力の相互作用から運動方程式を立て、その運動方程式を解くことによってエージェントの移動方向や歩行速度を求める力学モデルである。3種類の力の様子を図1に示す。図1において二重円はエージェントを表しており、3種類の力はそれぞれ(1)壁から受ける力、(2)他のエージェントから受ける力、(3)移動方向へ向かう力である。エージェント*i*における運動方程式は(1)式で表される。

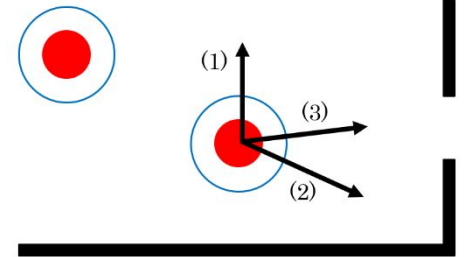


図1 Social Force モデルにおけるエージェントに働く力

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (1)$$

(1)式において、 m_i はエージェント*i*の質量、 v_i^0 はエージェント*i*の目標速度、 τ は推進力係数、 $e_i^0(t)$ は移動目標方向へのベクトルである。また f_{ij} はエージェント*i*がエージェント*j*から受ける斥力、 f_{iW} はエージェント*i*が壁*W*から受ける斥力である。

本研究者は、Social Force モデルだけでは、障害物を設置した際の群集歩行特性を上手く再現出来ないことを明らかにし、パーソナルスペースの急縮ルールを導入したモデルを提案してきた。本研究では、パーソナルスペース急縮ルールを精緻化するために3種類のモデルを提案し、どのモデルが最も被験者実験における群集歩行特性の再現性が高いかを検証する。3種類のモデルは、縮小確率がエージェントと出口までの距離に応じるもの（以下、Model 1）、エージェントの速度の絶対値に応じるもの（以下、Model 2）、エージェント周りの人口密度に応じるもの（以下、Model 3）である。それぞれの Model のパーソナルスペースが縮

小する確率を(2)～(4)式に示す．ここで， d_{ei} はエージェント i と出口までの距離， $|v_i|$ はエージェント i の速度の絶対値， k_i はエージェント i 周りの人口密度であり， $\gamma_e, \alpha_d, \beta_d, \gamma_v, \alpha_v, \beta_v, \gamma_k, \alpha_k, \beta_k$ は正の定数である．各モデルの障害物に対する実現現象再現性を検証するために被験者実験の流動係数とシミュレーションの流動係数を比較する．流動係数とは，単位幅あたりの空間を単位時間あたりに通過する人数である．流動係数 q は以下の式で与えられる．(5)式において，最初の避難者が出口を通過した時刻を t_{first} ，最後の避難者が出口を通過した時刻を t_{last} ，出口幅を w としている．

$$E_e(d_{ei}) = \frac{\gamma_e}{1 + \exp[(d_{ei} - \beta_d)\alpha_d]} \quad (2), \quad E_v(|v_i|) = \frac{\gamma_v}{1 + \exp[(|v_i| - \beta_v)\alpha_v]} \quad (3)$$

$$E_k(k_i) = \frac{\gamma_k}{1 + \exp[(-k_i + \beta_k)\alpha_k]} \quad (4), \quad q = \frac{N}{w(t_{\text{last}} - t_{\text{first}})} \quad (5)$$

次に，シミュレーション空間を図2に示す．図2において，赤丸が障害物を，黄緑の長方形が出口を示している．シミュレーション空間のサイズは縦が4 m，横が8 mとなっており，障害物は左側の壁から右方向に0.75 m，中心から下方向に向かって0.25 mに設置される．これは被験者実験に合わせた設計となっている．

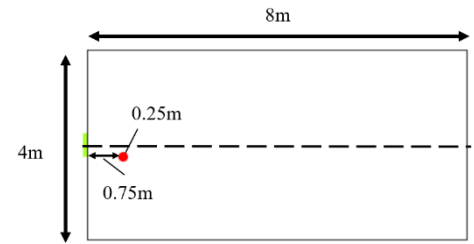


図2 シミュレーション空間の概略

ポテンシャル法を導入したモデルの高度化

後述する結果の通り， のモデルは障害物を多数配置した場合

にエージェントが膠着状態に陥るデッドロックが頻繁に発生することが明らかとなった．そのため，本研究ではポテンシャル法を導入する．ポテンシャル法とは，障害物と出口の座標にポテンシャル関数と呼ばれる関数を定義し，その関数の勾配から移動方向ベクトルを算出する手法であり，主にロボットの障害物回避に用いられるアルゴリズムである．ポテンシャル法にもデッドロックに陥る特異点が存在するが，Social Forceモデルと併用することで互いの特異点を相補的に消失させることができると考えた．

ポテンシャル法において，障害物に対しては正に無限大，出口に対しては負に無限大に発散するような滑らかな関数を定義する．障害物に定義する関数は障害物からの斥力であり，出口に定義する関数は引力である．式(6)，(7)にポテンシャル関数を，式(8)にポテンシャル場を示す．これらの式において (x, y) がエージェント i の座標， (x_o, y_o) が障害物の座標， (x_d, y_d) が出口の座標を表している．また w_o, w_d はそれぞれポテンシャルの重みである．そして，式(9)のように，ポテンシャルによってエージェント i に働く力 $-\nabla P_i(x, y)$ を(1)式の運動方程式に加える．

$$P_o(x, y) = \frac{1}{\sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}} \quad (6)$$

$$P_d(x, y) = -\frac{1}{\sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2}} \quad (7)$$

$$P_i(x, y) = \sum_o (w_o P_o) + w_d P_d \quad (8)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} - \nabla P_i(x, y) \quad (9)$$

提案モデルと遺伝的アルゴリズムを用いた室内レイアウト設計

次に、ここまで得られたモデルとパラメータを用いて複数障害物の最適設置方法を検討する。図3のようにモデル化した避難空間を格子状に区切り、各格子点に障害物を設置するか否かを個体の遺伝子とする。流動係数に比例した適応度を定義し遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithms, 以下 GA）を用いて最適化する。交叉方法として一点交叉を用い、個体の選択にはエリート選択法を用い、適応度は10回のシミュレーションを行ったときの平均流動係数とする。

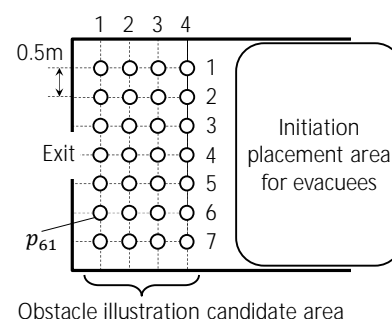


図3 障害物設置候補地

4. 研究成果

パーソナルスペースの急縮ルールの精緻化とパラメータの同定およびモデルの評価

図4に障害物がない場合に各手法100回の平均流動係数の比較を示す。縦軸は平均流動係数を、エラーバーは標準偏差を示している。パーソナルスペースの縮小を考慮しない Social Force モデルを Model 0 とし、被験者実験によって得られた結果をオレンジの線で示している。

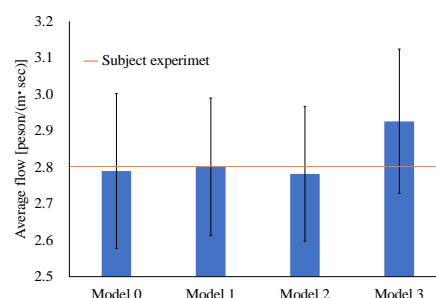


図4 障害物がない場合の各手法における平均流動係数の比較

図4および図5から、Social Force モデル（Model 0）は障害物がない場合は被験者実験に近い結果が得られるのに対し、障害物がある場合では被験者実験から乖離があることが読み取れる。Model 1～3 を比較すると、障害物がない場合および障害物がある場合ともに、Model 1 の平均流動係数が最も被験者実験の結果に近くなった。そのため、以降では Model 1, すなわち、パーソナルスペースがエージェントと出口までの距離に応じて確率的に縮小するモデルを採用する。

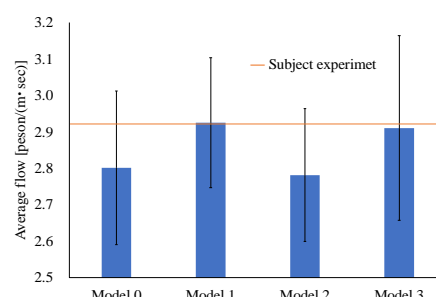


図5 障害物がある場合の各手法における平均流動係数の比較

次に、複数障害物の最適設置位置を検討する前段階として、障害物を複数配置した場合の挙動を確認した。具体的には、図3の障害物設置候補地全てに障害物を設置しシミュレーションを行い、デッドロックに陥る回数を記録した。結果は次節に示す。

ポテンシャル法を導入したモデルの高度化

と同様のシミュレーション条件で障害物を設置する場合としない場合でそれぞれ100回ずつシミュレーションを行い、平均流動係数を被験者実験と比較した結果を図6に示す。ポテンシャルの重み w_o , w_d は、被験者実験の結果に近づくように調整し、それぞれ 0.02 と 0.01 とした。図6より、ポテンシャル法を導入しても被験者実験の結果を大きく損なわないことが分かる。

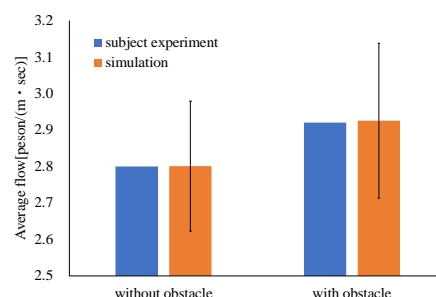


図6 ポテンシャル法を導入したモデルと被験者実験の平均流動係数の比較

次に，提案手法のデッドロック回避性を評価した．図3の障害物設置候補地全てに障害物を配置し，既存手法と提案手法で100回のシミュレーション中にデッドロックに陥る回数を記録した．結果を図7に示す．図7において，左から順に Social Force モデルにパーソナルスペース急縮ルールを導入したモデル，Social Force モデルにポテンシャル法を導入したモデル，Social Force モデルにパーソナルスペース急縮ルールとポテンシャル法を導入したモデルである．先に述べた通り，Social Force モデルにパーソナルスペース急縮ルールを導入したモデルでは全てのシミュレーションにおいてデッドロックが発生した．Social Force モデルにポテンシャル法を導入したモデルでは，2つの手法のデッドロックに陥る均衡点が異なるため，ある程度デッドロックを回避することが出来ているが，100回中31回デッドロックが発生した．それに対し，Social Force モデルにパーソナルスペース急縮ルールとポテンシャル法を導入したモデルではデッドロックが発生しなかった．これは，Social Force モデルとポテンシャル法の均衡点が異なることに加え，パーソナルスペースの急縮がモデルに非線形で複雑なダイナミクスを与えたためデッドロックの発生を回避することが出来たものと考えられる．このように，より現実の挙動に即した群集歩行モデルには Social Force モデルにポテンシャル法とパーソナルスペースの急縮を考慮する必要があることが明らかとなった．

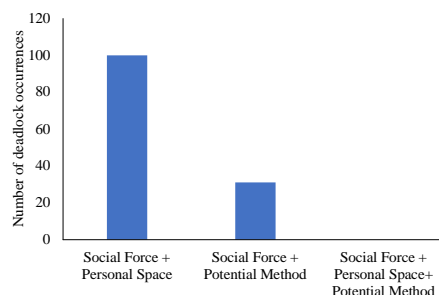


図7 それぞれの手法におけるデッドロック発生回数の比較

提案モデルと GA を用いた室内レイアウト設計

遺伝的アルゴリズムを用いて設計された障害物配置を図8に，図8の配置での流動係数と障害物を設置しないとき，1つ設置したとき，2つ設置したときの流動係数を比較した結果を図9に示す．障害物1つ及び障害物を2つ設置した場合の設置個所は，平均流動係数が最も高くなる配置を採用した．図9において，遺伝的アルゴリズムで設計した障害物配置でのシミュレーションの平均流動係数は他の配置に比べて高くなった．

これより，GAを用いることによって避難を円滑にする障害物配置を設計することができると言える．すなわち，提案モデルと GA を用いた室内レイアウトシミュレータの実現可能性が示唆された．

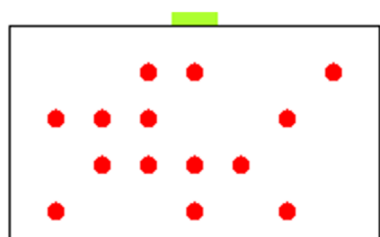


図8 GA で設計された障害物配置

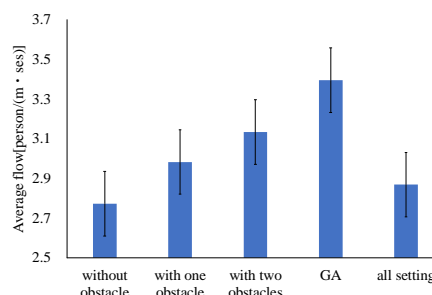


図9 流動係数の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 深川 農, 運上 和也, 伊藤 尚
2. 発表標題 PFの状態遷移モデル改良によるUWB屋内位置推定精度の向上
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報, vol. 122, no. 75, CAS2022-14, pp. 72-77
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 按田 郁巳, 中島 健, 伊藤 尚
2. 発表標題 飲食店利用を考慮したCOVID-19感染シミュレーションモデルに関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報, vol. 122, no. 219, CAS2022-19, pp. 1-5
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 健, 按田 郁巳, 伊藤 尚
2. 発表標題 MASによるCOVID-19感染シミュレーションを用いた休校措置期間の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報, vol. 122, no. 253, CAS2022-37, pp. 2-6
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木 詩麻, 森澤 哲成, 伊藤 尚
2. 発表標題 コンパクトシティ政策を導入した土地利用シミュレーションに関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 ICD/CAS研究会 504
4. 発表年 2022年

1．発表者名 森澤 哲成，高木 詩麻，伊藤 尚
2．発表標題 拡張Lengnick経済モデルに関する研究
3．学会等名 電子情報通信学会 ICD/CAS研究会 505
4．発表年 2022年

1．発表者名 高木 詩麻，森澤 哲成，伊藤 尚
2．発表標題 交通行動が居住地選択に及ぼす影響に関するシミュレーション分析
3．学会等名 電子情報通信学会 信学技報，vol. 122，no. 360，CAS2022-81，pp. 95-98
4．発表年 2023年

1．発表者名 石坂 空大，中田 竣也，伊藤 尚
2．発表標題 ネットワークモデルによる屋内避難シミュレーションへのIoT屋内避難誘導システムの導入
3．学会等名 電子情報通信学会 信学技報，vol. 122，no. 396，CAS2022-99，pp. 18-22
4．発表年 2023年

1．発表者名 中田 竣也，石坂 空大，伊藤 尚
2．発表標題 Social Forceモデルにおける流動係数の長期的安定性の評価
3．学会等名 電子情報通信学会 総合大会 A-1-11
4．発表年 2023年

1．発表者名 中村紀香，大代浩一朗，石坂空大，伊藤尚
2．発表標題 Social Forceモデルによる避難シミュレーションへのパーソナルスペース縮小の導入
3．学会等名 電子情報通信学会 信学技報，CAS2021-26，pp.51-56，2021．
4．発表年 2021年

1．発表者名 大代浩一朗，中村紀香，石坂空大，伊藤尚
2．発表標題 IoT屋内避難誘導システム評価のためのマルチエージェントシミュレーション
3．学会等名 電子情報通信学会 信学技報，CAS2021-27，pp.57-61，2021．
4．発表年 2021年

1．発表者名 村上彰洋，伊藤尚
2．発表標題 マルチエージェントシミュレーションを用いた地域間所得格差に関する研究
3．学会等名 電子情報通信学会 信学技報，CAS2021-72，pp.84-88，2022．
4．発表年 2022年

1．発表者名 高木詩麻，伊藤尚
2．発表標題 公共財ゲームにおけるメタ規範の導入と戦略進化シミュレーション
3．学会等名 電子情報通信学会 ICD/CAS研究会，P1-2，2021．
4．発表年 2021年

1. 発表者名 中島健, 伊藤尚, 運上和也
2. 発表標題 ローカルネットワークにおけるIoT屋内避難誘導システムの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会 ICD/CAS研究会, P1-7, 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 按田郁巳, 伊藤尚
2. 発表標題 要請遵守意識を考慮したCOVID-19感染シミュレーションモデルの構築
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報, CAS2021-86, pp.65-70, 2022.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石坂空大, 大代浩一朗, 中村紀香, 伊藤尚
2. 発表標題 ネットワークモデルを用いた屋内避難シミュレーションの高速化と粒子モデルとの比較
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報, CAS2021-87, pp.71-74, 2022.
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------