千葉工業大学

修士学位論文

進行方向の計算回数削減による ソーシャルフォースモデルを用いた 人流シミュレーションの高速化

2024年3月

所属専攻　　：情報科学専攻

学生番号・氏名：2281011番

片寄 颯人

指導教員　　：前川 仁孝　教授

修士論文要旨

専　攻	学生番号	氏　　名
情報科学	2281011	片寄 颯人

論文題目

進行方向の計算回数削減による
ソーシャルフォースモデルを用いた
人流シミュレーションの高速化

キーワード　マルチエージェントシミュレーション，人流シミュレーション

論文要旨

本論文は，ソーシャルフォースモデル (SFM) を用いた人流シミュレーションを高速化することを目的とする．SFM は，時間ステップごとに各エージェントの運動方程式を解くことで，人々の流れを解析する手法あり，必要に応じて視野などのパラメータを追加できることから広く利用されている．SFM の運動方程式は，目的地に向かう力，周囲のエージェントを避ける力，障害物を避ける力の合力を用いてエージェントの移動を決定する．SFM を用いた人流シミュレーションは，解析人数や壁などの障害物数が増えるほど，解析時間が膨大になるため，高速化が求められている．そこで，本論文では，SFM を用いた人流シミュレーションを高速化するために，エージェント間距離の計算回数を削減する手法および進行方向の計算回数を削減する手法を提案する．エージェント間距離の計算回数を削減する手法は，視野を用いた SFM におけるエージェントの進行方向と視野角の関係性を利用することで，視野外に存在するエージェントに対するエージェント距離の計算回数を削減する．本提案手法は，従来のセル分割法に対して解析時間が最大 1.25 倍高速化することを確認した．進行方向の計算回数を削減する手法は，目的地や障害物の座標が変わらない特徴を利用し，解析領域を格子状に分割した格子領域ごとに進行方向をあらかじめ計算することで解析中の進行方向の計算回数を削減する．本提案手法は，従来のセル分割法に対して，許容できる誤差の範囲で解析時間が最大 1.80 倍高速化することを確認した．(662 文字)

千葉工業大学大学院情報科学研究科

◎要旨は 600 字程度

Summary of Master's Thesis

Course	Student No.	SURNAME, Firstname
Information and Computer Science	2281011	KATAYOSE Hayato

Title
Reducing The Number of Traveling Direction Calculations to Speed up for Pedestrian Simulation with Social Force Model

Keywords Multi Agent Simulation,Pedestrian Simulation,Social Force Model

Summary

The purpose of this paper is to speed up pedestrian simulation with the Social Force Model(SFM).The SFM is a method to simulate human behavior based on motion equations. The motion equation of the SFM uses the resultant forces of the force to go to the destination, the force from surrounding agents, and the force avoiding the obstructions to determine the agent's movement. Pedestrian simulation with SFM is required to speed up because analysis time increase as the number of agents and obstacles. Therefore, This paper proposes a speedup method by reducing the number of distance calculations between agents and a speedup method by reducing the number of traveling direction calculations. The proposed method of reducing the number of distance calculations between agents reduces distance calculations between agents using the moving direction of the agent and the field of view. As a result of the evaluation, the proposed method gives us about 1.25 times speedup. The proposed method reduces the number of calculations of the agent's traveling direction during analysis by dividing the analysis region into a grid and calculating the direction of travel for each grid region in advance. As a result of the evaluation, the proposed method gives us about 1.80 times speedup within an acceptable error range. (209 words)

The contents of English summary should be written in about 200 words.

目 次

図一覧 **iv**

表一覧 **vii**

第 1 章　はじめに **1**

1.1　人流シミュレーションの背景と需要 1
1.2　ソーシャルフォースモデル 1
1.3　SFM の高速化技法 2
1.4　提案手法 3
1.5　本論文の構成 3

第 2 章　人流シミュレーション **4**

2.1　ソーシャルフォースモデル (SFM) 5
2.2　周囲のエージェントから受ける力 8
2.3　周囲の壁から受ける力 10
2.4　経由地の設定 11
2.5　視野のパラメータ 12

第 3 章　一般的な SFM の高速技法 **14**

3.1　モデルの簡易化 14
3.2　エージェント間の距離の計算回数削減 14
3.2.1　セル分割法 15
3.3　単位時間あたりの計算回数を多くする手法 18
3.4　経路選択の判定回数削減 (工事中) 20

第 4 章　エージェント間距離の削減手法 **21**

4.1　近似領域の選択方法 22
4.1.1　パターン 1（セル分割法） 23
4.1.2　パターン 2 23

4.1.3 パターン 3 24
4.1.4 パターン 4 26
4.1.5 パターン 5 27
4.1.6 パターン 6 29
4.2 評価 30
4.2.1 エージェント間距離の計算回数 30
4.2.2 シミュレーションの実行時間の測定 32
4.2.3 シミュレーション精度の測定 33
4.3 本章のまとめ 34

第 5 章 格子分割による進行方向ベクトル計算の削減手法 35
5.1 格子分割を用いた進行方向計算手法 35
5.1.1 格子ごとの進行方向ベクトル e の計算方法 35
5.1.2 格子ごとの障害物を避ける力 F_{iW} の計算方法 37
5.1.3 個別に進行方向を計算する格子の判定 40
5.1.4 進行方向を個別に計算する格子の設定方法 41
5.2 評価 43
5.2.1 進行方向計算の計算回数 46
5.2.2 シミュレーションの実行時間の測定 50
5.2.3 避難シミュレーションに対する提案手法の有効性 53
5.3 本章のまとめ (工事中) 55

第 6 章 おわりに 56

謝辞 57

参考文献 58

付 録 A プログラムの説明 63
A.1 データ構造 63
A.2 プログラムのファイル構造 65
A.3 実行方法 66
A.4 測定条件の変更方法 67
A.5 初期配置のデータの作成方法 68
A.5.1 GIMP を用いた初期配置の作成方法 68

A.5.2　GIMP を用いた C 言語の出力方法 69
A.6　プログラム実行時の出力フォーマット　. 70

図 目 次

2–1 人流シミュレーションの活用例 4
2–2 SFM を用いた人流シミュレーションのフローチャート 7
2–3 他のエージェントから受ける力の範囲を限定するときの例 8
2–4 SFM における周囲のエージェントから受ける力の計算 9
2–5 障害物を粒子として計算する例 10
2–6 周囲の壁から受ける力の計算のフローチャート 11
2–7 SFM でスタック現象が起きる例 12
2–8 経由地を設定する SFM の例 12
2–9 教室からの避難シミュレーションにおける経由地の設定 13
2–10 視野を用いた SFM の影響範囲 13

3–1 一次元モデルの例 15
3–2 アーチ現象の例 15
3–3 セル分割法を用いた例 16
3–4 連結リスト法を用いたセル分割法の例 17
3–5 ハッシュを用いたセル分割法の例 17
3–6 SFM の並列化可能な処理 18
3–7 3 スレッドでの並列化の例 19
3–8 MPI を用いた SFM の領域分割の例 19

4–1 影響範囲の例 21
4–2 視野を用いた SFM にセル分割法を適用した例 22
4–3 進行方向ごとの近似領域 23
4–4 パターン 1 を用いたエージェント 4 の近似領域 23
4–5 パターン 2 を用いたエージェント 4 の近似領域 24
4–6 パターン 3 を用いた近似領域の削減例 25
4–7 パターン 3 を用いたエージェント 4 の近似領域 25
4–8 パターン 4 を用いた近似領域の削減例 26

4–9 パターン 4 を用いたエージェント 4 の近似領域 27
4–10 パターン 5 を用いた近似領域の削減例 28
4–11 パターン 5 を用いたエージェント 4 の近似領域 28
4–12 エージェントの初期配置 31
4–13 パターン 1（セル分割法）に対する高速化率 33

5–1 提案手法の解析全体のフローチャート 36
5–2 提案する格子分割の例 36
5–3 経由地がある場合の進行方向の例 37
5–4 格子分割した障害物を避ける力 F_{iW} の例 38
5–5 格子分割の前処理のフローチャート 39
5–6 提案手法の運動方程式計算のフローチャート 40
5–7 格子の進行方向とエージェントの進行方向で誤差が出る場合 41
5–8 近傍格子を個別計算の格子に設定する例 41
5–9 エージェントの初期配置 44
5–10 通路幅 2m の初期配置 45
5–11 通路幅 5m の初期配置 45
5–12 通路幅 10m の初期配置 45
5–13 通路幅 20m の初期配置 45
5–14 通路幅 2m(壁粒子数 2 倍) の初期配置 45
5–15 通路幅 2m(壁粒子数 3 倍) の初期配置 45
5–16 通路幅 2m の格子サイズごとの計算回数 46
5–17 通路幅 5m の格子サイズごとの計算回数 46
5–18 通路幅 10m の格子サイズごとの計算回数 46
5–19 通路幅 20m の格子サイズごとの計算回数 46
5–20 通路幅 2m(壁粒子 2 倍) の格子サイズごとの計算回数 48
5–21 通路幅 2m(壁粒子 3 倍) の格子サイズごとの計算回数 48
5–22 通路幅 2m の格子サイズごとの解析時間 51
5–23 通路幅 5m の格子サイズごとの解析時間 51
5–24 通路幅 10m の格子サイズごとの解析時間 51
5–25 通路幅 20m の格子サイズごとの解析時間 51
5–26 通路幅 2m(粒子数 2 倍) の格子サイズごとの解析時間 51
5–27 通路幅 3m(粒子数 3 倍) の格子サイズごとの解析時間 51
5–28 通路幅を変えたときの高速化率 52

5–29 壁粒子数を変えたときの高速化率 52
5–30 教室の初期配置 53
5–31 演習室の初期配置 53
5–32 教室の配置における格子サイズごとの解析時間 54
5–33 演習室の配置における格子サイズごとの解析時間 54
5–34 教室の配置における格子サイズごとの最大誤差 54
5–35 演習室の配置における格子サイズごとの最大誤差 54

A–1 GIMP の出力ファイル形式の選択 69
A–2 GIMP の C 言語出力画面 69

表 目 次

2–1 SFM のパラメータ 6

4–1 パターン 2，3 の進行方向判定条件 24
4–2 パターン 4 の進行方向判定条件 26
4–3 パターン 5 の進行方向判定条件 27
4–4 パターン 6 の進行方向判定条件 29
4–5 測定条件 30
4–6 エージェント間距離の計算回数 [10^{10} 回] 31
4–7 解析時間 [s] 32

5–1 評価環境 43
5–2 測定条件 44
5–3 壁の厚さを変えたときの初期配置のパラメータ 44
5–4 各通路幅の格子サイズごとの計算回数の削減率 [%] 47
5–5 各通路幅の格子サイズごとの計算回数の削減率 [%] 48
5–6 各通路幅の格子サイズごとの計算回数の削減率 [%] 49
5–7 各配置の詳細 53

A–1 本論文中の評価で使用した初期配置 66
A–3 測定条件のパラメータ変数 67
A–2 既存手法と提案手法の切り替え方法 67
A–4 動作確認済み環境 68
A–5 各要素の設定方法 68
A–6 出力の設定方法 70

第1章
はじめに

1.1　人流シミュレーションの背景と需要

駅や商業施設，イベント会場などのように人が多く集まる場所では，利便性や災害時の逃げ遅れ防止などの安全性の観点から混雑や滞留の対策が重要である[(1)(2)]．混雑や滞留の対策や避難時間の予測には，人流シミュレーションが用いられている[(3)(4)(5)(6)(7)]．人流シミュレーションは，コンピュータ上で人を運動方程式に基づいて動くエージェントとして解析する手法である．人流シミュレーションの歩行者の再現(歩行者モデル)には，ネットワークモデルやフロアフィールドモデル[(8)(9)(10)]，ソーシャルフォースモデル(SFM)[(11)]などが提案されている．歩行者モデルのなかでも，SFMは，高密度時においても高い精度で解析ができることが報告されており[(?)]，解析用途に応じたパラメータを追加できるため，避難シミュレーションや交通シミュレーション，感染シミュレーションなどの解析に広く用いられている[(12)(13)(14)(15)(16)]．

1.2　ソーシャルフォースモデル

SFMは，社会心理学的な要素と物理学的な要素で成り立つ運動方程式をエージェントごとに計算することで，人流の動きを解析する手法である．SFMの社会心理学的な要素は，周辺に存在する人を避ける動きである．また，SFMの物理学的な要素は，他の人と衝突した際に生じる動きである．SFMの運動方程式は，目的地に向かう力，周囲のエージェントを避ける力，障害物を避ける力の合力を算出し，エージェントの進行方向や速度を計算する．SFMは，解析用途に応じてパラメータを追加することで，シミュレーション精度を高めることができる．例えば，避難時の人の流れを解析する際は，視野を再現するパラメータを追加し，SFMのシミュレーション精度を向上することが有効であると知られている[(17)(18)(19)(20)(21)(22)]．SFMの運動方程式の計算は，時間ステップごとにすべてのエージェントに対して計算するため，エージェント数の増加に応じて解析時間が膨大になることから高速化が求められて

いる．

1.3 SFM の高速化技法

一般的な SFM の高速化技法として，単位時間あたりの計算回数の増加や，モデルの単純化，エージェント間距離の計算回数の削減が行われている．

SFM の単位時間あたりの計算回数を多くする手法には，GPU(Graphics Processing Unit) や MPI(Message Passing Interface) を用いた並列処理を用いることが一般的である [23][24] [25][26][27][28] [29][30]．SFM は，エージェントごとの運動方程式の計算に並列性があるため，高い並列性を得ることができる．GPU を用いた並列化手法は，エージェントごとに必要な進行方向の計算を複数スレッドで並列に計算する．

モデルの単純化は，計算負荷が高い SFM の運動方程式の計算を一次元に簡易化することで，解析時間を削減する手法である [31][32][33]．SFM の一次元化手法は，許容できる範囲の誤差で避難完了時間を解析できるが，出口付近などの滞留の再現度が低いことが報告されている [33]．このため，本手法は，主に避難完了時間や人の流量を解析するために，よく用いられている [34][35][36]．

エージェント間距離の計算回数の削減には，影響半径の設定や，セル分割法が提案されている [37][38]．影響半径は，エージェント間の距離が大きくなるほど相互作用力が大きくなることを利用し，相互作用力が 0 に近似可能な距離を設定する．影響半径を設定することで，影響半径外のエージェントに対する相互作用力が計算不要となる [39]．セル分割法は，解析領域を格子状のセルに分割し，周囲のエージェントに対する影響範囲内外の判定をセル単位で実行する手法である．影響範囲内外の判定には，エージェント間距離の計算が必要となるため複数のエージェントに対する判定処理をまとめて実行することで，エージェント間距離の計算回数を削減する．セル分割法は，エージェント間距離の計算回数を削減できるが，解析中のメモリ使用量が多いことが報告されている（参考文献）．このため，セル分割法のメモリ使用量を削減するために，連結リスト法 [40][?][?] やハッシュ法 [41] などの実装方法が一般的に用いられる．連結リスト法は，セルごとに連結リストを用いてエージェントの情報を保持することにより，エージェントの存在しないセルのメモリ使用量を削減できる．ハッシュ法は，配列を用いて各セルに存在するエージェントの情報を保持する手法である．セル分割法を用いる場合は，アーキテクチャや実装するモデルに応じて，実行速度やメモリ量の制限が異なるため，解析対象や解析に用いるアーキテクチャに応じて使い分ける必要がある．

1.4　提案手法

避難時を再現する人流シミュレーションは，解析人数や経由地や障害物の数が多い傾向があるため，エージェント間の距離や障害物を避ける力の計算回数が多くなり，エージェントの進行方向の計算に時間がかかる．そこで，本論文では，SFM を用いた人流シミュレーションを高速化するために，エージェント間距離の計算回数を削減する手法および進行方向の計算回数を削減する手法を提案する．

エージェント間距離の計算回数を削減する手法は，視野を用いた SFM の影響範囲に合わせてセル分割法のセルを選択することで，セル分割法よりもエージェント間距離の計算を削減する．視野を用いた SFM の影響範囲に合わせたセルの選択は，エージェントの座標や視野角，進行方向などといった複数の選択方法が考えられる．このため，本論文では，セルの選択方法を 6 パターン設定し，各手法の有効性を評価する．

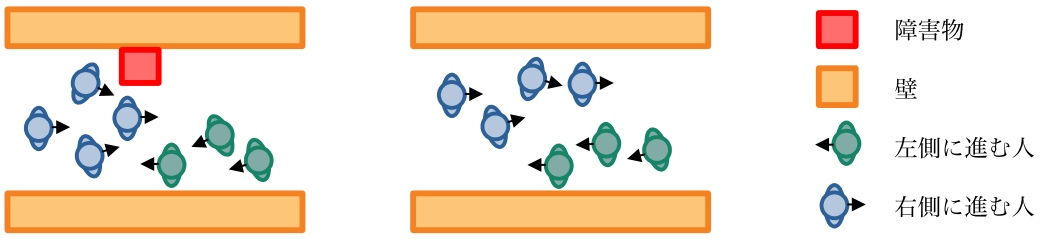
進行方向の計算回数を削減する手法は，目的地や障害物の座標が解析中に変わらない特徴を利用し，解析領域を格子状に分割した格子領域ごとに進行方向をあらかじめ計算することで解析中の計算回数を削減する．目的地までのベクトルと障害物を生じる力は，目的地や障害物の座標に応じて決まるため，本手法では，解析前に格子状に分割し，各格子の進行方向をメモリに格納する．本手法は，メモリに格納した進行方向を解析中に参照することで，解析中の進行方向の計算回数を削減する．

1.5　本論文の構成

以下の章では，第 2 章で SFM を用いた人流シミュレーションの計算方法について述べる．次に，第 3 章では，一般的な SFM の高速化技法について述べる．そして，第 4 章と第 5 章でエージェント間距離の計算回数削減手法および進行方向ベクトルと障害物を避ける力の計算回数削減手法について述べ，人流シミュレーションに有効であるかを評価するために，人流シミュレーションの実行時間および計算回数について評価し，最後に第 6 章で総括する．

第2章
人流シミュレーション

人流シミュレーションは，コンピュータ上で人の動きを再現する手法であり，図 2–1 に人流シミュレーションの例を示す．図 2–1 中の青色の丸は右側に進む人，緑色の丸は左側に進む人，黄色の四角は壁，青色の四角は障害物である．赤色の障害物は，自動販売機やゴミ箱などの移動が可能である設置物である．図 2–1 の例では，通路が赤色の障害物によって通路が狭くなっているため，人の滞留や混雑が起きているため，赤色の障害物を撤去することで滞留や混雑を防ぐことができる．図 2–1 のような混雑や滞留を発見するためには，実際に多くの人で実験する必要があるため，時間や費用がかかる．一方で，人流シミュレーションは，コンピュータ上で再現できることから，実際に多くの人を用いて実験するよりも，必要な時間や金額を抑えることが可能である．このように，人流シミュレーションの目的は，人の滞留や混雑が起きないように対策することである．このため，人流シミュレーションは，大規模なイベントを企画する企業や大規模や施設を設計，建築する建設業などで活用されている（参考文献）．人流シミュレーションを活用することで，事前に人の流れを予測することが可能になり，地震や火災などの有事のときに，非常灯や看板の配置，警備員の配置などを最適化できるため，適切な誘導が可能になる．人流シミュレーションのなかでも，歩行者の再現には，視野などのパラメータなどを組み込むことができるソーシャルフォースモデル (SFM) が広く用いられている．本章では，SFM の理論と計算方法，パラメータの追加方法などについて述べる．



(a)人の滞留が起きるとき　(b)人が滞留が起きないとき

図 2–1 ： 人流シミュレーションの活用例

2.1　ソーシャルフォースモデル (SFM)

SFM は，人間の社会心理学的な要素と物理的な力を結びつけた動力学モデルであり，近傍のエージェントや壁といった障害物から受ける力によってエージェントの進行方向や速度を解く．本手法は，心理的変数が組み込まれているため，災害時の避難シミュレーションによく用いられる [42][43].

SFM の解析空間は，二次元連続空間モデルが用いられる．二次元連続空間モデルは，解析領域を分割せずに (x, y) の連続した座標で解析する手法である．図**??**に図**??**の例を二次元連続座標で考えた例を示す．図**??**中の矢印は座標の x と y を示している．SFM は，図**??**のフロアフィールドモデルのように格子上のエージェント数に制限がなく，エージェントの位置を座標で考えるため，人流の再現度が高い．SFM におけるエージェント移動は，目的地へ進む力と他のエージェントから受ける力，壁などの障害物から受ける力を用いる運動方程式を用いて求める．式 (2–1) に SFM の運動方程式を示す.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{t_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \tag{2–1}$$

式 (2–1) 中の総和の記号 $\sum_{j(\neq i)} f_{ij}$ は，エージェント i 以外のすべてのエージェント j の総和をとることを意味する．同様に，$\sum_W f_{iW}$ は，すべての壁 W の総和をとることを意味する．式 (2–1) 中の m_i はエージェント i の体重，$v_i^0(t)$ はエージェントの希望速度，$e_i^0(t)$ は，目的地までの単位ベクトル，$v_i(t)$ は現在の速度ベクトル，t_i は時定数である．式 (2–1) の第一項はエージェントが目的地へ進む力，第二項は他のエージェントから受ける力 f_{ij}，第三項は壁などの障害物から受ける力 f_{iW} の合力である．f_{ij} と f_{iW} は，式 (2–2) と式 (2–3) を用いて導出する.

$$f_{ij} = \ \{A_i exp[\tfrac{r_{ij}-d_{ij}}{B_i}] + kg(r_{ij}-d_{ij})\}n_{ij} + \kappa g(r_{ij}-d_{ij})\Delta v_{ij}^t t_{ij} \tag{2–2}$$

$$f_{iW} = \{A_i exp[\frac{r_i - d_{iW}}{B_i}] + kg(r_i - d_{iW})\}n_{iW} + \kappa g(r_i - d_{iW})(v_i t_{iW})t_{iW} \tag{2–3}$$

表 2–1 に式 (2–2)，(2–3) 中の変数を示す．衝突時関数 $g(x)$ はエージェント同士や壁などに衝突したときに値をとる関数である．式 (2–4) に衝突時関数 $g(x)$ の条件式を示す.

$$g(x) = \begin{cases} 1 & (x < 0) \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{2–4}$$

表 2–1 ： SFM のパラメータ

d_{ij}	エージェント間の距離
t_{ij}	エージェント i とエージェント j の衝突面の垂直ベクトル
n_{ij}	エージェント i とエージェント j の衝突面の法線ベクトル
r_i	エージェント i の体の半径
r_{ij}	エージェント i とエージェント j の体の半径の和
t_{iW}	エージェント i と壁 W の衝突面の垂直ベクトル
n_{iW}	エージェント i とエージェント W の衝突面の法線ベクトル
A_i	エージェント i のインタラクション作用
B_i	エージェント i の反発作用
k	衝突時の反発力係数
κ	衝突時の摩擦力係数
Δv_{ij}	エージェント i とエージェント j の接線速度の差
$g(x)$	衝突時関数

SFM の衝突時の計算は，条件式である式 (2–4) を用いることで，衝突時のみ計算できる．SFM を用いる人流シミュレーションのフローチャートを図 2–2 に示す．図 2–2 中の目的地へ進む力の計算は，式 (2–1) 中の第一項を用いて算出する．また，他のエージェントから受ける力の計算は，式 (2–2) を用いて算出する．そして，壁などの障害物から受ける力の計算は，式 (2–3) を用いて算出する．SFM を用いた人流シミュレーションは，図 2–2 に示すように，式 (2–1) の運動方程式を積分することで，新しい時間のエージェントの位置と速度を求めることができる．

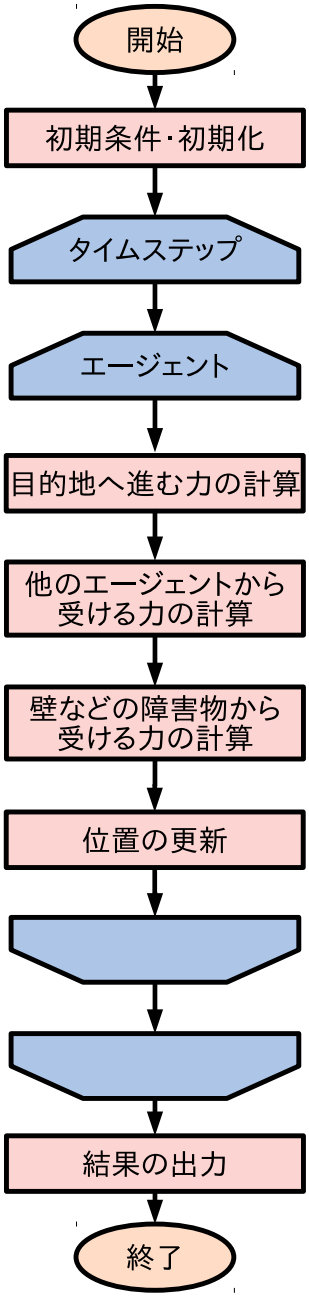


図 2–2 ： SFM を用いた人流シミュレーションのフローチャート

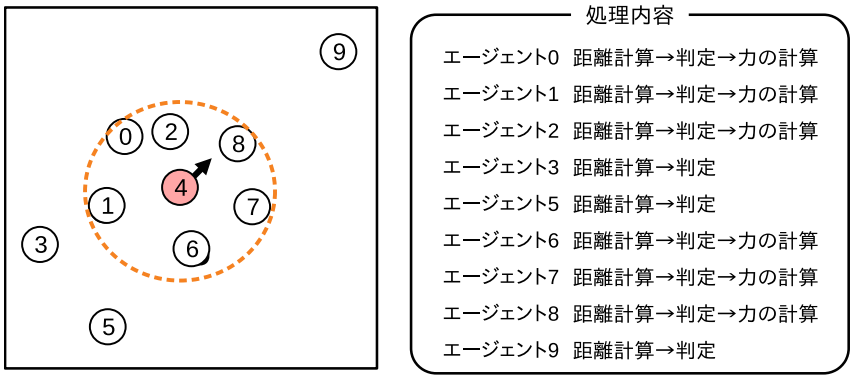


図 2–3 ： 他のエージェントから受ける力の範囲を限定するときの例

2.2　周囲のエージェントから受ける力

他のエージェントから受ける力は，解析領域全体に存在する他のエージェントから受ける．このため，SFM は，解析する人数が増えると他のエージェントから受ける力の計算時間が長くなる．他のエージェントから受ける力の計算負荷を削減するために，SFM を用いる人流シミュレーションでは，他のエージェントから受ける力を計算する範囲を限定することが多い [23][24]．他のエージェントから受ける力を計算する範囲を限定することで，遠くに存在するエージェントから受ける力を 0 に近似することができる． 図 4–1 に他のエージェントから受ける力の計算範囲の例を示す．図 4–1 の赤丸は他のエージェントから受ける力を計算するエージェント，黒丸はエージェント 4 が計算するときの他のエージェント，オレンジ色の点線は他のエージェントから受ける力の範囲を示す．図 4–1 のエージェント 4 は，オレンジ色の点線内に存在するエージェント 0，1，2，6，7，10 の合計 5 人から力を受ける．本論文では，近くのエージェントから受ける力の範囲を限定する SFM を前提として述べる．近くのエージェントから受ける力の範囲は，図 4–1 のように，計算するエージェントの半径数メートルの範囲である．このため，SFM では，他のエージェントが近くのエージェントから受ける力の範囲に存在するか判定が必要である．この範囲に存在するかの判定は，エージェント i とエージェント j とのエージェント間の距離 d_{ij} の算出が必要である．本論文では，式 (2–5) を用いてエージェント間の距離 d_{ij} を求め，他のエージェントから受ける力の範囲内であるかどうか判定する．

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{2–5}$$

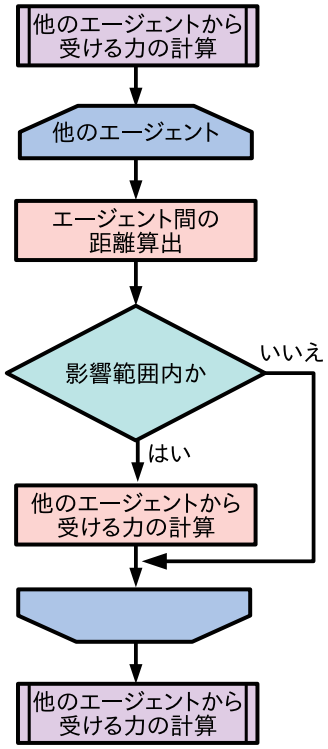


図 2–4 ： SFM における周囲のエージェントから受ける力の計算

式 (2–5) 中の x_i と y_i はエージェント i の座標 (x_i, y_i)，x_j と y_j はエージェント j の座標 (x_j, y_j) である．エージェント i は，式 (2–5) で求めたエージェント距離 d_ij が他のエージェントから受ける力の範囲内であれば，エージェント j から式 (2–2) を用いて算出した力を受ける．他のエージェントから受ける力の範囲の半径を R としたとき，エージェント i の他のエージェント j が範囲内にいるかどうかの判定式を式 (2–6) に示す．

$$R \geq d_{ij} \tag{2–6}$$

エージェント i は，式 (2–6) の条件を満たす他のエージェント j から式 (2–2) で求まる力を受ける．他のエージェントから受ける力の範囲を限定する SFM のフローチャートを図 2–4 に示す．図 2–4 のフローチャートでは，各エージェントに対しエージェント間の距離を計算し，範囲内であるか判定することで，他のエージェントから受ける力の範囲を限定する．

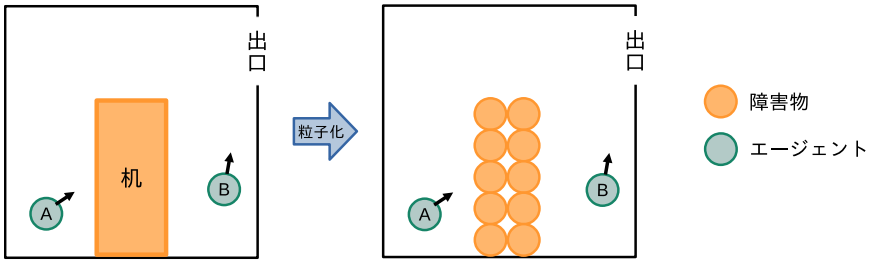


図 2–5 ： 障害物を粒子として計算する例

2.3　周囲の壁から受ける力

周囲の壁から受ける力は，エージェントの周囲の障害物を避けるために受ける力である．SFM を用いた人流シミュレーションは，壁や机などの障害物を粒子として計算することが一般的である（参考文献）．図 2–5 に壁を粒子化した例を示す．図 2–5 中の緑色の丸はエージェント，黄色の丸は壁粒子である．図 2–5 のように，障害物を粒子化して解析する場合は，机や壁などの障害物を粒子のかたまりとして離散化する．エージェントは，影響範囲に存在する各粒子から力を受ける．このため，エージェントの周囲の障害物を避ける力は，障害物の粒子の増加に応じて障害物を避ける力の計算回数が増加する傾向がある．図 2–6 に周囲の壁粒子から受ける力の計算するフローチャートを示す．図 2–6 に示すように，壁粒子から受ける力の計算は，計算対象であるエージェン i と壁粒子の中心座標間の距離 d_{iW} が影響範囲内であれば，エージェント i が受ける力を算出する．

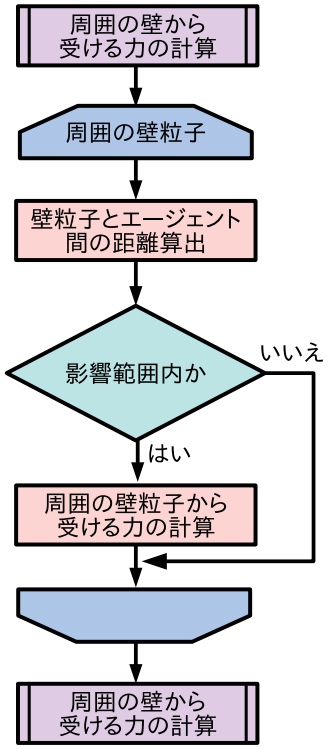


図 2–6 ： 周囲の壁から受ける力の計算のフローチャート

2.4　経由地の設定

SFM は，エージェントと目的地の間に障害物が存在するとスタック現象が発生することが報告されている（参考文献）．スタック現象は，エージェントが動かなくなる現象のことであり，障害物から受ける力と目的地に向かう力の関係により生じる．図 2–7 に SFM でスタック現象が生じる例を示す．図 2–7 中の緑色の丸はエージェント，矢印はエージェントの進行方向，オレンジ色の四角は机などの障害物である．図 2–7 中のエージェント A とエージェント B は解析領域右上の出口に向かうため，エージェント A が机などの障害物に向かって進む．この場合は，エージェント A が机に向かって進み続けることや机の上を歩くなどの想定しない動きをすることがある．このため，障害物が多く存在するような解析では，出口 (目的地) だけでなく，目的地までの道のりを示す経由地を設定することで，エージェントのスタック現象や想定しない動きを防ぐことができる．図 2–8 に経由地を設定する例を示す．図 2–8 中の緑色の丸はエージェント，四角は障害物，青色の四角は経由地，赤色の

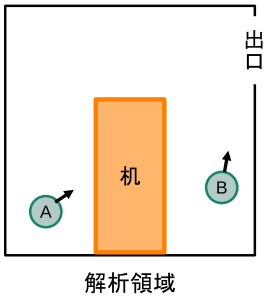


図 2–7 ： SFM でスタック現象が起きる例

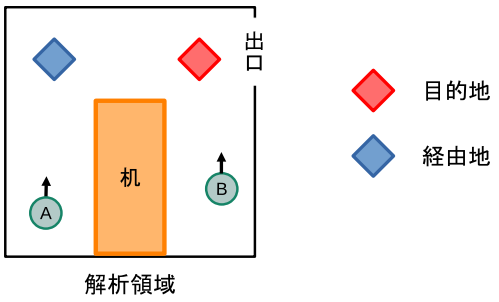


図 2–8 ： 経由地を設定する SFM の例

四角は目的地を示す．図 2–8 の例では，エージェント A は，経由地を通ったあとに目的地に進むため，図 2–7 のように机に進むことが防げる．教室などの障害物多い解析では，図 2–9 に示すように，複数の経由地を設定する必要がある．図 2–9 の例では，エージェントは一番近くの経由地から目的地までの道のりを辿る．目的地までの道のりを決定する手法は，ダイクストラ法などのグラフ理論で用いられる手法が使われることが多い [44][45]．

2.5　視野のパラメータ

SFM は，視野（参考文献）やグループ特性，車椅子などといった解析対象に応じてパラメータを組み込むことが可能である．SFM の追加できるパラメータのなかでも，視野パラメータは，人間の視野を再現できることから幅広く利用されている（参考文献）．視野を用いた SFM は，エージェントの影響範囲を扇状の範囲に限定することで，人間の視野を再現できる．図 2–10 に視野を用いた SFM の影響範囲の例を示す．図 2–10 中の白色の丸はエージェント，白色の丸の数字はエージェント番号，

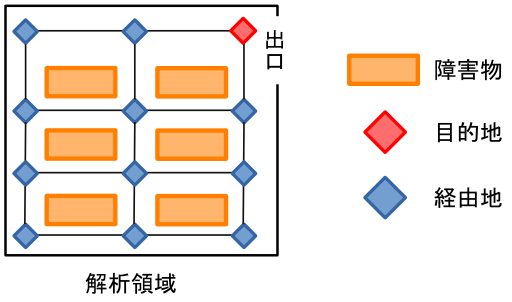


図 2–9 ： 教室からの避難シミュレーションにおける経由地の設定

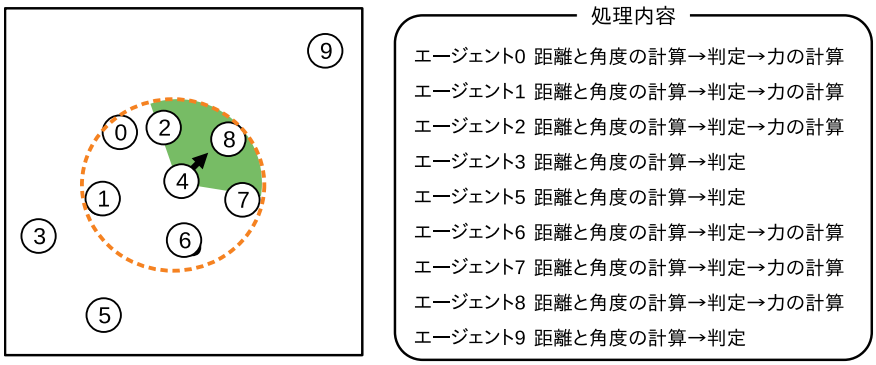


図 2–10 ： 視野を用いた SFM の影響範囲

黒色の矢印はエージェント 4 の進行方向，緑色の範囲はエージェント 4 の影響範囲，オレンジ色の丸は従来の SFM の影響範囲を示す．図 2–10 に示すように，エージェント 4 は，影響範囲が緑色の視野範囲に存在するエージェント 2，8 から力を受ける．周囲のエージェントが視野範囲に存在するかの判定は，エージェント間の距離 d_{ij} とエージェント間の角度の計算が必要となる．エージェント間の距離 d_{ij} は，式 (2–5) を用いて算出する．エージェント間の角度は，エージェント i の座標，エージェント i の進行方向ベクトル e，エージェント j の座標の 3 点のなす角 θ_{ij} である．3 点のなす角 θ_{ij} が視野角 $\frac{1}{2}\theta_{view}$ 以下かつエージェント間距離 d_{ij} が影響半径 R 以下である条件を満たす場合は，周囲のエージェント j がエージェント i の視野範囲に存在するため，エージェント j から受ける力を計算する．

第3章
一般的なSFMの高速技法

SFM を用いた人流シミュレーションは，解析人数が多くなるほど計算負荷が膨大になるため，解析に時間がかかる．SFM の解析時間を削減するために，モデルの単純化（参考文献）やエージェント間距離の計算回数削減手法（参考文献），単位時間あたりの計算回数の増加手法 （参考文献），経路選択時の判定回数の削減手法 (参考文献) などが提案されている．本章では，SFM の各高速化手法について述べる．

3.1　モデルの簡易化

SFM の簡易化手法は，SFM の計算負荷を削減するために，エージェント同士や壁や机などの障害物から受ける力，進行方向を単純化する手法である．SFM の簡易化手法の一つに一次元歩行者モデルがある（参考文献）．一次元歩行者モデルは，エージェントの動きを x や y のみにする手法である．図 3–1 に避難シミュレーション時の SFM と一次元歩行者モデルの例を示す．図 3–1 中の (a) は SFM などの二次元連続空間モデルを示し，(b) は一次元連続歩行者モデルの例を示す．一次元歩行者モデルは，図 3–1 のように，エージェントの動きを算出する式を一次元に変更することで，計算負荷を削減できる．本手法は，人の流れ (流量) を解析する場合では，高速かつ許容できる誤差の範囲で解析できることが報告されている（参考文献）．一方で，一次元でエージェントの動きを再現するため，人の押し合いや図 3–2 のようなアーチ現象などを再現できない．このため，人の押し合いやアーチ現象を再現したい場合には，一次元歩行者モデルなどのモデルを簡易化しない高速化技法を用いることが望ましい．

3.2　エージェント間の距離の計算回数削減

SFM は，解析人数が増加するほど周囲のエージェントから受ける力の計算に必要な周囲のエージェントが影響範囲内外かの判定の回数が増加する．周囲のエージェントが影響範囲内外かの判定は，ルートなどを用いてエージェント間距離 d_{ij} を求め

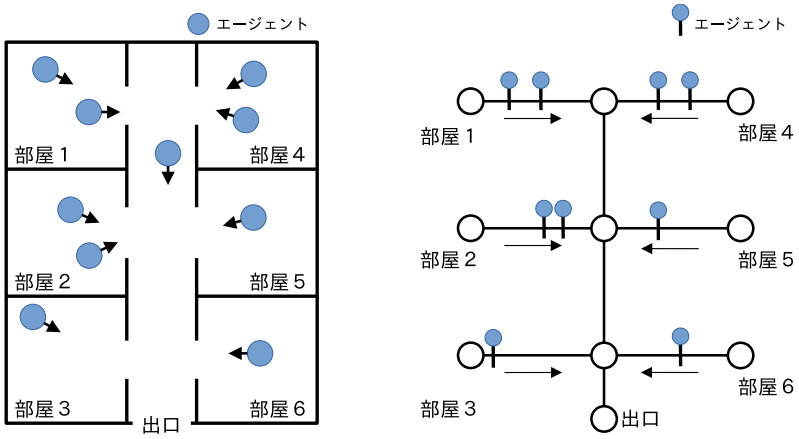


図 3–1 ： 一次元モデルの例

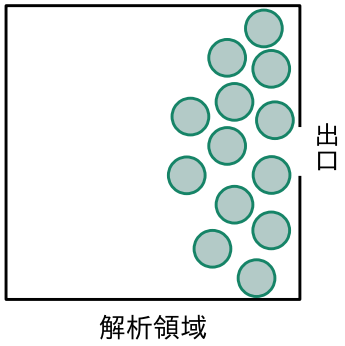


図 3–2 ： アーチ現象の例

る必要があるため，特にエージェント間距離 d_{ij} の計算に時間がかかる．このため，SFM を用いた人流シミュレーションの解析時間を削減するためには，エージェント間距離 d_{ij} の計算回数を削減することが有効である．エージェント間距離の計算回数削減手法にセル分割法や視野パラメータを用いた削減手法がある．

3.2.1　セル分割法

セル分割法は，水や空気などの動きを解析できる MPS 法 [46] や銀河系などの圧縮性流体に用いられる SPH 法 [47] などの粒子法によく用いられている．粒子法は，近傍の粒子と相互作用する力を計算し，粒子の行動を決定する．このため，セル分割法は，粒子法と同じように近傍のエージェントとの相互作用力を計算する SFM に対

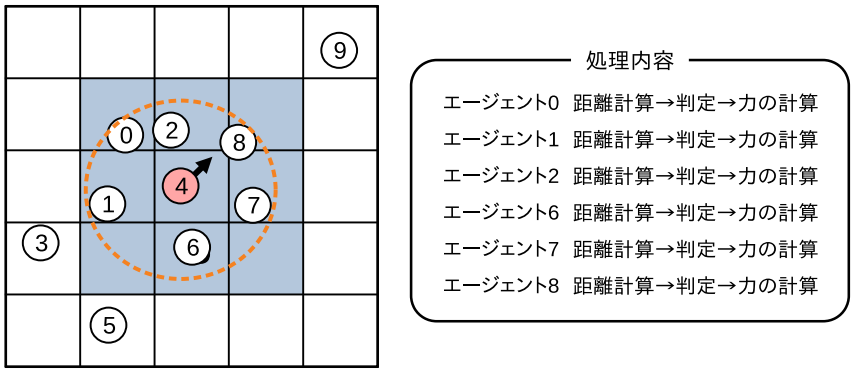


図 3–3 ： セル分割法を用いた例

しても用いられる．本手法は，解析領域を格子上のセルに分割し，計算するエージェントの存在するセルと近傍のセルに存在するエージェントに対して他のエージェントから受ける力の範囲であるか判定し，範囲内であれば他のエージェントから受ける力を計算する手法である．図 3–3 にセル分割法を用いる SFM の例を示す．図 3–3 中の赤丸は他のエージェントから受ける力の計算をするエージェント，黒丸は他のエージェント，四角は解析領域を格子状に分割したセルである．この例では，エージェント 4 の行動を更新する際に青色のセル内に存在するエージェントのみを参照するため，エージェント番号 3，5，9 の計算を削減できる．このとき，視野を用いる SFM は，速度計算するエージェントの進行方向前方に存在するエージェント情報を用いて計算するため，エージェントの進行方向後方のセルに存在するエージェント情報は不要になる，このため，視野を用いる SFM では，視野を考慮し，参照するセルを視野範囲に近づけることで，計算回数を減らすことができる．セル分割法の実装方法は，連結リスト法やハッシュ法などがよく用いられる（参考文献）．

連結リスト法は，単方向リストを用いたセル分割法である．図 3–4 に連結リスト法を用いたセル分割法の例を示す．図 3–4 中の左側にある四角は解析領域，解析領域内の格子はセル分割法の格子，各格子内の左下に記された番号は格子の番号，白色の丸はエージェント，丸の中の番号は，エージェント番号を示す．また，図中の左側は，連結リスト法のデータ構造を示しており，青色の四角は各格子の先頭，緑色の四角はエージェントのノードを示す．図 3–4 のように，各エージェントは，同じ格子に存在する他のエージェントのインデックス番号を保持することで，単方向のリストを作成する．各格子内の最後のエージェントは，最後のエージェントを示す-1 を保持する．周囲のエージェントを参照するときは，周囲のセルの先頭から終端のエージェントを辿ることで，周囲のセルに存在するエージェントを絞ることが

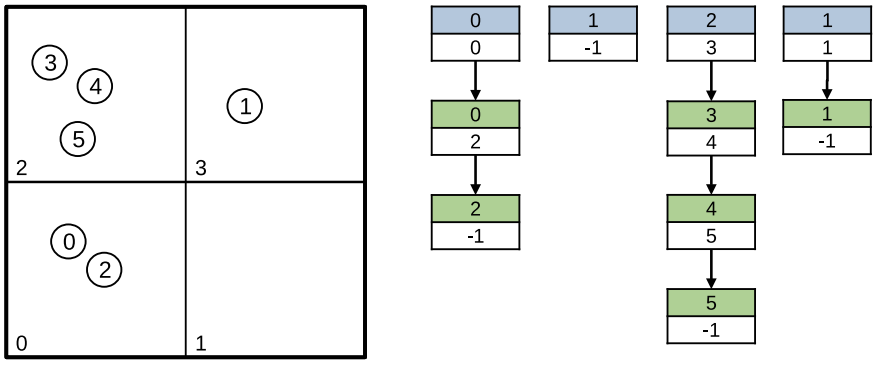


図 3–4 ： 連結リスト法を用いたセル分割法の例

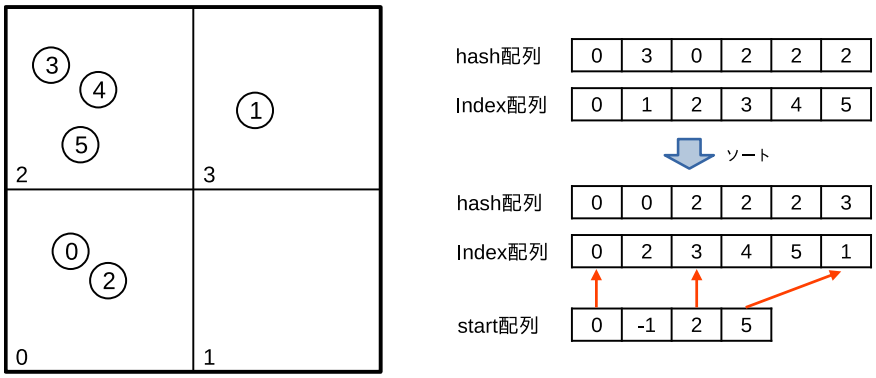


図 3–5 ： ハッシュを用いたセル分割法の例

できる．

ハッシュ法は，3 つの配列を用いてセル分割法を実装する方法である．ハッシュ法の配列は，hash 配列と index 配列，start 配列の 3 つで構成される．hash 配列は，エージェントの所属するセルの番号を保持する．また，index 配列は，エージェントのインデックス番号を保持する．start 配列は，各セルの始点を示すインデックスを保持する．図 3–5 にハッシュ法を用いたセル分割法を示す．図 3–5 中の右側に示す四角は，各配列を示す．図 3–5 に示すように，ハッシュ法は，index 配列に各エージェントのインデックス番号，hash 配列に各エージェントのセル番号を格納する．次に，hash 配列と index 配列を hash 配列の値を用いて昇順にソートを行う．ソート後は，start 配列に各セルの hash 配列の始点を格納する．エージェントが存在しないセルは，hash 配列の値に-1 を格納する．周囲のエージェントを参照するときは，start 配列から参照するセルの始点を取得し，hash 配列のセル番号が変わるまで繰り返すことで，周囲のエージェントを絞ることができる．

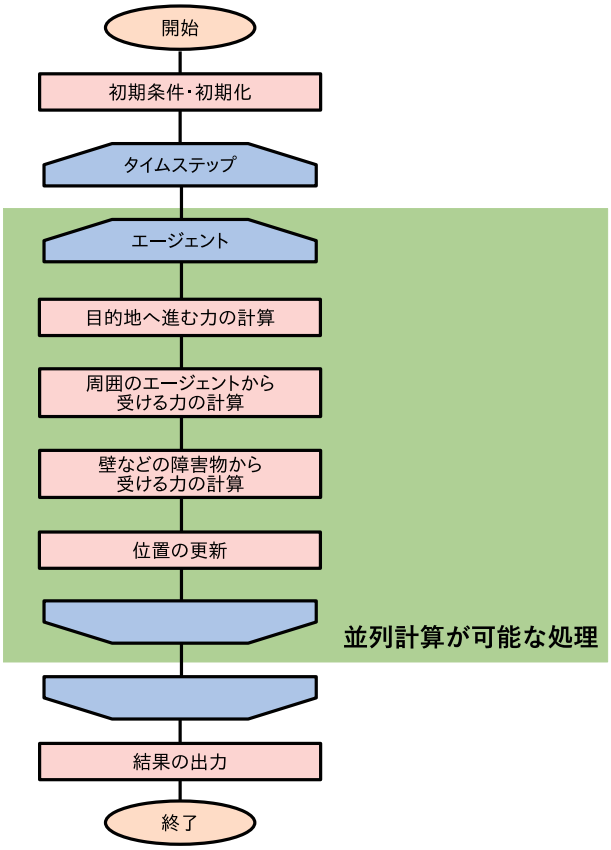


図 3–6 ： SFM の並列化可能な処理

3.3　単位時間あたりの計算回数を多くする手法

SFM は，エージェントごとの計算に並列性があるため，高い並列性を得ることが可能である．図 3–6 に SFM の並列に計算できる処理を示したフローチャートを示す．図 3–6 中の緑色の四角は並列計算が可能な処理である．図 3–6 に示すように，SFM は，エージェントごとの進行方向を決定するための計算を並列に処理することができる．SFM を並列に実行するためには，GPU(Graphics Processing Unit) や MPI(Messaage Passing Intereface) を用いた手法が用いられている．GPU を用いた SFM は，エージェントごとの計算をスレッドごとに並列に計算する方法が一般的である [23][24]．図 3–7 に 3 スレッドで並列化した SFM の例を示す．図 3–7 中の緑色の丸はスレッド 1 が計算するエージェント，赤色の丸はスレッド 2 が計算するエージェント，青色の丸はスレッド 3 が計算するエージェントである．図 3–7 に示すように，GPU などを用いた並列化手法は，それぞれのスレッドが担当するエージェント数が等しくなるように，各スレッドで分割し，エージェントの進行方向を計算する．MPI

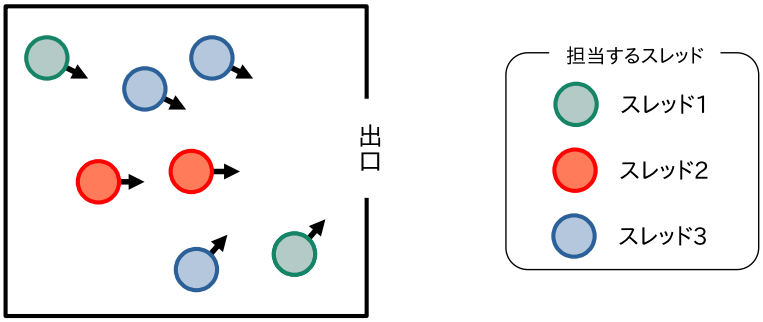


図 3–7 ： 3 スレッドでの並列化の例

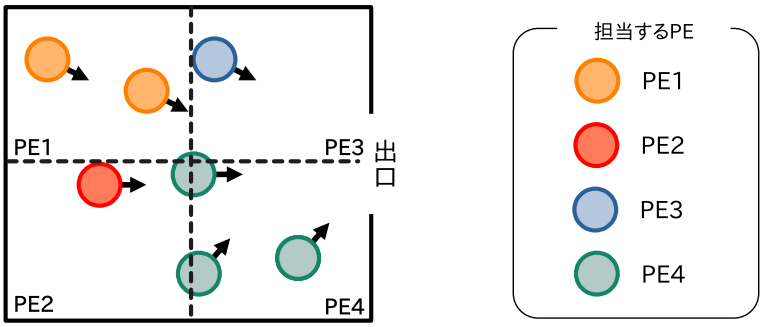


図 3–8 ： MPI を用いた SFM の領域分割の例

を用いた並列化手法は，主に分散メモリ環境に用いられているため，各プロセッサ間の通信時間が余計に時間がかかる．このため，MPI を用いた SFM では，各プロセッサ間の通信回数を削減するために，各プロセッサの担当するエージェントを解析領域ごとに決定することが一般的である．図 3–8 に MPI を用いた SFM の領域分割の例を示す．図 3–8 中の黄色の丸はプロセッサ (PE)1 が担当するエージェント，赤色の丸は PE2 が担当するエージェント，青色の丸は PE3 が担当するエージェント，緑色の丸は PE4 が担当するエージェントである．図 3–8 のように，MPI を用いた SFM は，各 PE に担当する領域に存在するエージェントの進行方向を計算する．

3.4　経路選択の判定回数削減 (工事中)

SFM を用いた避難シミュレーションでは，エージェントが出口までに避難できるようにダイクストラ法などを用いて次に進む経由地を決定する．避難シミュレーションは，火災や震災などの被害状況に応じて避難経路が変わるため，解析中に何度も経路を決定する判定が必要になる．経路選択の判定は，ダイクストラ法などのグラフ理論に用いられる手法を使用するため，経由地数が多くなるほど判定に時間がかかる．このため，経路選択の判定回数を削減する手法に，経路グラフの簡易化や，○○の手法が提案されている．

経由地グラフの簡易化は，解析する規模が大きくなるほど，経由地数が多くなるため，

第4章
エージェント間距離の削減手法

SFM の運動方程式では，エージェント間距離が大きいほどエージェント間に働く相互作用力が小さくなる．このため，SFM では，影響半径 R_c を用いてエージェント間距離の計算回数を削減するのが一般的である．図 4–1 にエージェント 4 の影響半径の例を示す．また図 4–2 に図 4–1 にセル分割法を用いた例を示す． 図 4–1 および図 4–2 中の◯はエージェントであり，オレンジ色の点線で囲まれた領域がエージェント 4 の影響範囲である．また図 4–2 中の四角はセル分割法の格子，青色の四角はセル分割法における周辺のエージェントが影響範囲内かの判定に用いるセルである．影響半径 R_c は影響範囲の半径であり，影響範囲外から受ける力を 0 とすることで，運動方程式を計算する際に演算を省略することができる．一方，視野を用いた SFM では，視野範囲外の相互作用力を 0 とする．図 4–1 の例で，エージェント 4 が図中矢印の方向に移動する際には，エージェント 4 の視野は，図中の緑色の領域のように設定され，視野 $\subseteq$ 影響範囲のような関係となる．

SFM で用いられるエージェント間距離の計算回数削減手法は，影響範囲が円形であることを前提としており，影響範囲が視野のように扇形の場合を想定していない．例えば，図 4–1 のエージェント配置では，半径 R_c 内の白い領域に存在する 5 つのエージェントが視野外にあるにも関わらず，これらのエージェントに対するエージェント間距離の計算が必要となる．人の視野角 θ は π 以下であるため，視野を用いた

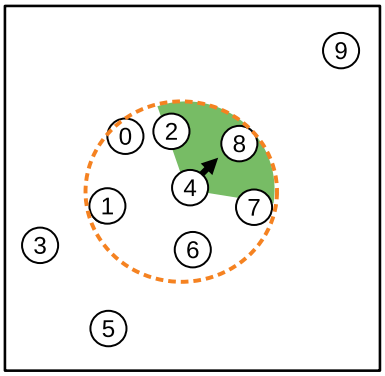


図 4–1 ： 影響範囲の例

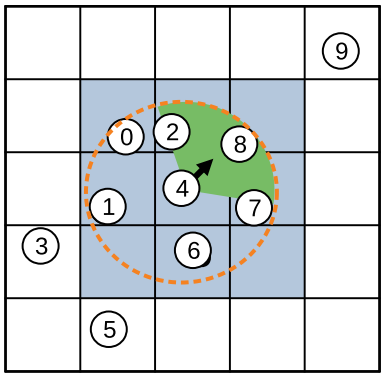


図 4–2 ： 視野を用いた SFM にセル分割法を適用した例

SFM に一般的な SFM のエージェント間距離の計算回数削減手法を用いると，影響範囲を円形に絞り込みをした上で，扇形に絞り込みを行う操作が必要となる．このため，視野範囲外となる半径 R_c 内のエージェントが多く存在するほど，相互作用力を 0 として計算するエージェントに対するエージェント間距離の計算回数が増える．そこで，本論文では，視野形状である扇形に近似した領域を設定し，近似領域外のエージェントに対するエージェント間距離の計算回数を削減することで，視野を用いた SFM を高速化する．

4.1　近似領域の選択方法

提案手法では，近似領域の算出に必要な計算時間を最小限に抑えるために，長方形で視野範囲を近似する．これに合わせて，視野範囲はエージェントの進行方向前方に存在するため，エージェントの進行方向を長方形の辺数に合わせて上下左右の 4 パターンに分類し，エージェントの進行方向に応じた近似領域を設定する．図 4–3 に上下左右の 4 パターンの近似領域を示す．図 4–3 中の◯はエージェント，矢印は進行方向，格子はセル分割法のセル，青い四角は，各進行方向ごとの近似領域である．図 4–3 の近似領域の選択方法は，エージェントの座標や進行方向などといった複数の選択方法が考えられる．エージェントの進行方向の分類方法によりシミュレーション時間が変化する可能性があるため，本論文では，既存手法であるセル分割法を含む 6 パターン実装し，その有効性を評価する．提案手法であるパターン 2〜6 は，いずれの手法もパターン 1 のセル分割法の考え方を基にしており，時間ステップごとに影響範囲の近似領域を設定した上で，近似領域内で影響範囲内となるエージェントを相互作用力を計算する対象として設定する．

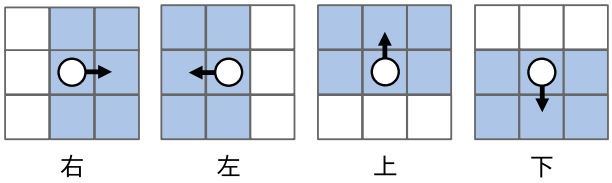


図 4–3 ： 進行方向ごとの近似領域

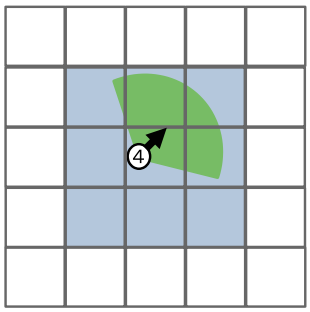


図 4–4 ： パターン 1 を用いたエージェント 4 の近似領域

4.1.1　パターン 1（セル分割法）

パターン 1 は，一般的なセル分割法 [37]，[38] によるエージェント間距離の計算回数を削減する．図 4–4 に図 4–1 中のエージェント 4 にパターン 1 を用いて近似領域を設定した例を示す．セル分割法は，図 4–4 のように解析領域を格子状に分割し，影響半径 R_c の円内に重なるセルを近似領域とする手法である．本手法は，分割するセルのサイズを影響半径と同じ距離に設定することで，近似領域をエージェントの近傍 9 セルに限定することができる．本例では，エージェント 4 の近傍 9 セルは黄色のセルであり，それ以外のセルに属するエージェント 3，5，9 に対するエージェント間距離の計算を削減できる．なお，セル分割法は相互作用力を計算する範囲を円形で想定した手法であるため，近似領域が正方形となることから，パターン 1 の実装では進行方向の推測は行わない．また，本論文では，セル分割法のなかでもメモリ使用量を抑えることができると知られている連結リスト法 [40]，[48] を用いる．

4.1.2　パターン 2

パターン 2 は，エージェントの進行方向を表す単位ベクトル e_i を参照することで，パターン 1 の近似領域を視野範囲に近づける手法である [49]．表 4–1 にパターン 2 の

表 4–1 ： パターン 2，3 の進行方向判定条件

	右	左	上	下
条件 1	$\frac{1}{\sqrt{2}} < e_x \leq 1$	$-1 \leq e_x < \frac{-1}{\sqrt{2}}$	$\frac{-1}{\sqrt{2}} < e_x < \frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{-1}{2} < e_x < \frac{1}{2}$
条件 2	$\frac{-1}{2} < e_y < \frac{1}{2}$	$\frac{-1}{2} < e_y < \frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} < e_y \leq 1$	$-1 \leq e_y < \frac{-1}{\sqrt{2}}$

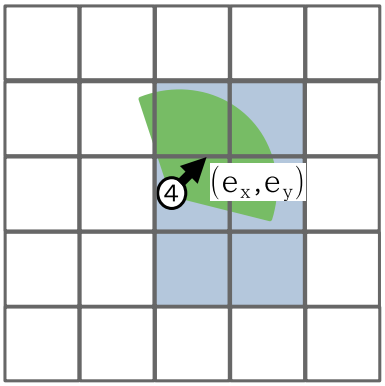


図 4–5 ： パターン 2 を用いたエージェント 4 の近似領域

近似領域を選択するための条件を示す．表 4–1 中の条件 1 と条件 2 の両方を満たす進行方向から近似領域を選択する．本手法は，表 4–1 の条件に基づいて単位ベクトル e_i が示す進行方向を上下左右を $\frac{1}{2}\pi$ の均等な角度で分割し，セル分割法の近似領域から図 4–3 のように進行方向の反対側にある 3 セルを除外する．図 4–5 に図 4–1 の例におけるエージェント 4 の近似領域をパターン 2 を用いて選択した例を示す．図 4–5 の例では，エージェントの進行方向は右と判定され，図 4–3 に示す右方向の青いセルを近似領域に設定する．このため，白色のセルに存在するエージェントに対する距離計算を削減できる．パターン 2 は，進行方向を必ず上下左右のいずれかに設定するため，常に近似領域が 6 セルとなり，セル分割法の 9 セルに比べて近似領域の面積を $\frac{2}{3}$ に削減できる．一方で，図 4–5 のように視野範囲全体が近似領域内に含まれる保障がないため，本来相互作用力の計算が必要なエージェントに対する計算を削減し，誤差が発生する可能性がある．

4.1.3　パターン 3

パターン 3 は，パターン 2 で発生する誤差を防ぐために，近似領域外に視野範囲が存在しないかを判定する処理を追加し，セル分割法と同じ精度を保つ手法である[49]．本手法は，表 4–1 を用いてパターン 2 の近似領域を導出したのち，視野の座標

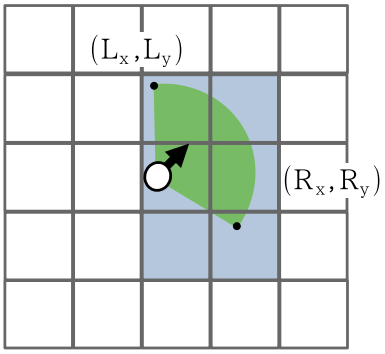


図 4–6 ： パターン 3 を用いた近似領域の削減例

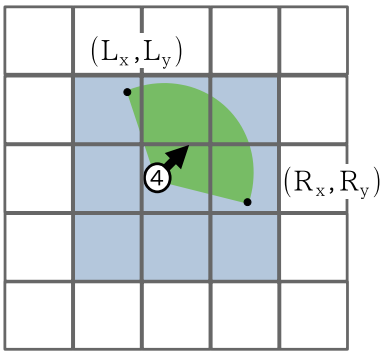


図 4–7 ： パターン 3 を用いたエージェント 4 の近似領域

(L_x, L_y)，(R_x, R_y) が近似領域内のセルであればパターン 2 の近似領域を用いて相互作用力を計算し，そうでなければパターン 1 の近似領域を用いて相互作用力を計算する．図 4–6 にパターン 3 を用いて近似領域を削減できる例を示す．図 4–6 中の緑色の視野領域上に存在する黒点は，視野の座標である (L_x, L_y) と (R_x, R_y) を示す．図 4–6 の例では，表 4–1 中の進行方向が右の条件を満たし，視野の座標 (L_x, L_y) と (R_x, R_y) が青色の近似領域内であるため，図 4–3 に示す右方向の青いセルが近似領域になり，セル分割法よりも近似領域を削減できる．一方で，図 4–1 中のエージェント 4 にパターン 3 の条件を適用した場合は，図 4–7 のように，視野の座標 (L_x, L_y) が図 4–3 の青いセル以外に存在するため，近似領域がパターン 1 と同様に近傍 9 セルとなる．エージェントの座標は時間ステップごとに変化するため，パターン 3 を用いると，進行方向が変化しないエージェントに対してもすべての時間ステップでパターン 1 よりもエージェント間距離の計算を削減できるとは限らない．一方で，パターン 3 は，パターン 1 のセル分割法と同じ精度のシミュレーション結果を得るこ

表 4–2 ： パターン 4 の進行方向判定条件

	右	左	上	下
条件 1	$R_x \geq A_x$	$R_x < A_x$	$R_y \geq A_y$	$R_y < A_y$
条件 2	$L_x \geq A_x$	$L_x < A_x$	$L_y \geq A_y$	$L_y < A_y$

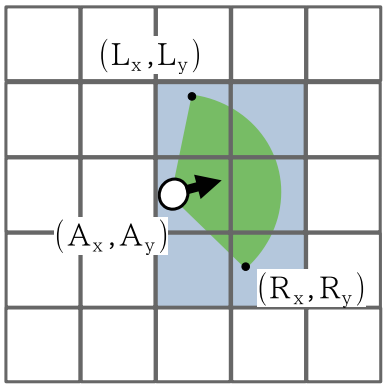


図 4–8 ： パターン 4 を用いた近似領域の削減例

とができる．

4.1.4　パターン 4

パターン 4 は，視野の左右両端の座標 (L_x, L_y)，(R_x, R_y) を用いて近似領域を設定する手法である．視野範囲は進行方向の前方に存在するため，視野の左右両端の座標はエージェント座標から見て必ず進行方向側となる．この特性を利用し，パターン 4 では，表 4–2 に示すように，エージェント座標 (A_x, A_y) と視野座標 (R_x, R_y)，(L_x, L_y) の大小関係を用いて進行方向を判定する．本手法の表 4–2 に満たない場合は，パターン 1 と同様に近傍 9 セルを近似領域にする．図 4–8 にパターン 4 を用いた近傍領域の削減例を示す．図 4–8 の例では，エージェント座標 (A_x, A_y) と視野座標 (R_x, R_y)，(L_x, L_y) が表 4–2 中の条件である $R_x \geq A_x$ および $L_x \geq A_x$ が成り立つため，進行方向が右と判定され，図 4–3 の右方向の青いセルが近似領域となる．図 4–9 に図 4–1 中のエージェント 4 にパターン 4 を用いて近似領域を決定した例を示す．図 4–9 の例は，表 4–2 中の判定条件を満たす進行方向がないため，パターン 1 と同様に近傍 9 セルを近傍領域とする．

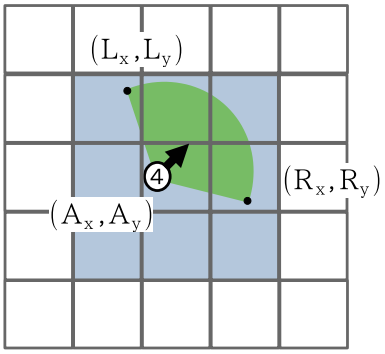


図 4–9 ： パターン 4 を用いたエージェント 4 の近似領域

表 4–3 ： パターン 5 の進行方向判定条件

	右	左	上	下
条件 1	$R_x \geq x_1$	$R_x < x_2$	$R_y \geq y_1$	$R_y < y_2$
条件 2	$L_x \geq x_1$	$L_x < x_2$	$L_y \geq y_1$	$L_y < y_2$

4.1.5　パターン 5

パターン 5 は，セル分割法のセル座標と視野範囲の左右両端の座標 (L_x, L_y)，(R_x, R_y) を用いて近似領域を設定する手法である．本手法は，運動方程式を算出するエージェントが所属するセルの左上座標 (x_1, y_2) および右下座標 (x_2, y_1) を用いて，図 4–3 の 4 パターンの水色の領域内に視野が収まっているかを判定する．表 4–3 にセルの左上座標 (x_1, y_2) および右下座標 (x_2, y_1) を用いたパターン 5 の判定条件を示す．また，図 4–10 にパターン 5 を用いた場合の近似領域を削減する例を示す．図 4–10 の例では，表 4–3 中の $R_x \geq x_1$ および $L_x \geq x_1$ が成り立つため，進行方向は右と分類される．このため，図 4–10 の例では，近似領域は図中の青いセルとなる．図 4–11 に図 4–1 中のエージェント 4 にパターン 5 を用いて近似領域を選択した例を示す．図 4–11 の例では，$R_y \geq y_1$ および $L_y \geq y_2$ が成り立つため，進行方向は上と分類される．本手法は，エージェントのセル上の位置に応じて進行方向を分類するため，ベクトル e_i の表す進行方向が同じエージェントでもエージェント座標に応じて異なる方向に分類される可能性がある．本手法も表 4–3 のいずれの条件にも当てはまらない場合は，パターン 1（セル分割法）と同様に近傍 9 セルを近似領域とする．

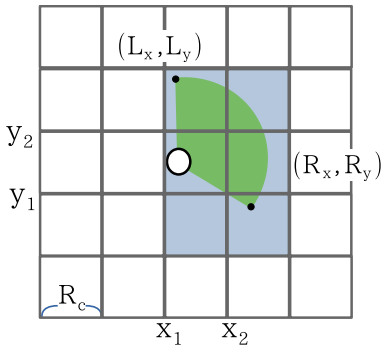


図 4–10 ： パターン 5 を用いた近似領域の削減例

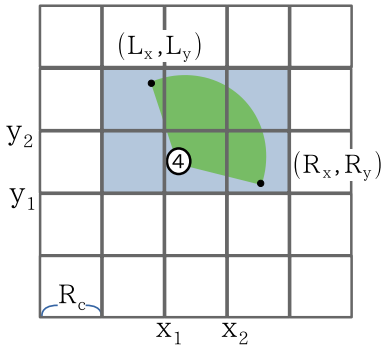


図 4–11 ： パターン 5 を用いたエージェント 4 の近似領域

表 4–4 ： パターン 6 の進行方向判定条件

右	左	上	下
$\cos(\frac{1}{2}\theta_{view}) \leq e_y$	$e_y \leq -\cos(\frac{1}{2}\theta_{view})$	$\sin(\frac{1}{2}(\pi - \theta_{view})) \leq e_x$	$e_x \leq \sin(\frac{1}{2}(\pi - \theta_{view}))$

4.1.6　パターン 6

パターン 6 は，パターン 2 で設定した上下左右の角度範囲を，シミュレーション誤差の出ない範囲で設定する手法である．パターン 6 では，図 4–3 中の水色の領域である近似領域内に視野範囲がすべて収まる進行方向を静的に計算し，エージェントの進行方向を表すベクトル e_i の閾値を定める．視野角を θ_{view} とおくと，エージェント座標がどの位置であっても上方向と判定される進行方向の角度は $\frac{1}{2}(\pi - \theta_{view})$ から $\frac{1}{2}(\pi + \theta_{view})$ の間であり，これを用いて進行方向ベクトル $e_i = (e_x, e_y)$ の範囲が $\sin(\frac{1}{2}(\pi - \theta_{view})) \leq e_x$ という条件を設定できる．表 4–4 にパターン 6 の進行方向判定条件を示す．パターン 6 は，パターン 3〜6 のように視野座標 (R_x, R_y) および (L_x, L_y) を算出する必要がないため，他の分類条件よりも高速に進行方向を分類することができる．一方で，進行方向が特定の方向である場合は，エージェント座標に関係なくパターン 1（セル分割法）と同じ近似領域を設定するため，エージェント間距離の計算回数は，パターン 1 に次いで多くなると考えられる．

表 4–5 ： 測定条件

A_i	2000N
B_i	0.08m
k	$1.2 \times 10^5 kgs^{-2}$
κ	$2.4 \times 10^5 kgm^{-1}s^{-2}$
v_i^0	1.4m/s
m_i	80kg
τ_i	0.5
r_i	0.25m
視野角	$\frac{2}{3}\pi$
視野距離	20m
タイムステップ数	25000

4.2　評価

視野を用いた SFM に対するエージェント間距離の計算回数削減手法の有効性を確認するために，既存手法であるセル分割法を用いたパターン 1 および提案手法であるパターン 2〜6 を用いて人流シミュレーションを行う．評価環境は，CPU が Intel Xeon CPU E5-2687w v2，メモリが 64GB，OS が Linux 4.12.9 であり，プログラムのコンパイルには gcc 7.2.0 で-O3 オプションを設定する．また，本評価では，視野を用いた SFM で期待される押し合い圧し合いを行う群衆の行動を再現するために，エージェントの初期配置および目的地を図 4–12 のように設定し，表 4–5 を用いて運動方程式を計算する．表 4–5 のパラメータは文献 [50] を参考に設定したものであり，これを踏まえてセル分割法のセルサイズは視野範囲に合わせて 20m とする．本測定では，図 4–12 の緑色の範囲内にエージェントをランダムに生成し，各エージェントの目的地を解析領域上で初期配置と点対称となる座標に設定することで，解析領域の中央でエージェントが密集した状態を作る．

4.2.1　エージェント間距離の計算回数

表 4–6 に，エージェント間距離の計算回数および削減率を示す．表中の括弧内の数値は，削減率であり，パターン n のエージェント間距離の計算回数 C_n とパターン 1（セル分割法）のエージェント間距離の計算回数 C_1 より式（4–1）のように求

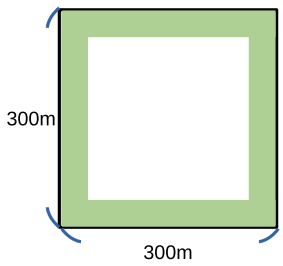


図 4–12 ： エージェントの初期配置

表 4–6 ： エージェント間距離の計算回数 [10^{10} 回]

人数	パターン 1	パターン 2	パターン 3	パターン 4	パターン 5	パターン 6
3000	5.1	**3.9** (**24.5**%)	4.0 (22.9%)	4.4 (15.3%)	4.1 (20.7%)	4.4 (15.2%)
5000	14.4	**10.9** (**23.8**%)	11.1 (22.6%)	12.2 (15.2%)	11.4 (20.5%)	12.2 (15.1%)
7500	33.1	**25.2** (**23.9**%)	25.8 (22.2%)	28.3 (14.6%)	26.7 (19.4%)	28.3 (14.6%)

める．

$$\text{削減率 [\%]} = (1 - \frac{C_n}{C_1}) \times 100 \tag{4–1}$$

表 4–6 より，パターン 2〜6 はセル分割法よりもエージェント間距離の計算回数が少なく，最も高い削減率が得られたのはパターン 2 であることが確認できる．パターン 2 は近似領域が視野範囲全体を含まない可能性のある手法であるが，セル分割法と同じ解析精度の手法に限定しても，パターン 2 と同じ手順で進行方向を判定したパターン 3 が最も高い削減率である．パターン 3 で高い削減率が得られたのは，エージェントの初期配置を図 4–12 のように設定したことにより，表 4–1 で削減可能な角度の範囲の広さが削減率に強く影響したためであると考えられる．本測定条件では，初期のエージェントの進行方向がすべて異なり，時間経過による進行方向の変化も少ない．実問題のシミュレーションでは，エージェントが同一の目的地を目指すものが多く，進行方向が一定の方向に偏ることが多いため，解析対象に応じて表 1 から適切なパターンを選択する必要があると考えられる．横方向や縦方向に進むエージェントが多い問題では，パターン 3 の近似領域を用いることで，より多くのエー

表 4–7 ： 解析時間 [s]

人数	パターン 1	パターン 2	パターン 3	パターン 4	パターン 5	パターン 6
3000	2636	**2123**	2140	2307	2184	2292
5000	7435	**5941**	6016	6463	6162	6453
7500	17198	**13730**	13985	15048	14931	15036

ジェント間距離の計算回数が削減できる．一方で，斜め方向に進むエージェントが多い問題では，パターン 3 を用いた場合に近似領域を削減できないため，進行方向の角度に応じで使用するパターンを決定することが有効であると考えられる．同様に，削減率が最も低いパターン 6 は，表 4–4 の条件を満たさない角度が最も広いため，パターン 1（セル分割法）と同じ近似領域を用いることが多く，高い削減率が得られなかったと考えられる．

また，各パターンの削減率は，エージェント数によらず一定であることが分かる．これは，パターン 2 が周囲のエージェント情報を参照せずに近似領域を設定するためである．エージェント数や，エージェントの密度が変化してもエージェントごとの近似領域の面積は変わらない．加えて，解析領域中央付近でエージェントが密集するように条件を設定しており，エージェント間距離の計算はほとんどが密集状態で実行されるものである．一方，密集領域以外では，近似領域から除外した領域のエージェント数が少なくなりやすい．これに伴い，すべての視野に対して近傍領域の面積の約 3 割を削減するパターン 2 で表 4–6 の削減率が 3 割未満となり，近傍領域の面積の削減率とエージェント間距離の演算回数の削減率に差が生じた．

4.2.2　シミュレーションの実行時間の測定

第 4.2.1 節より，提案手法であるパターン 2〜6 を用いることで，パターン 1（セル分割法）よりもエージェント間距離の計算回数が削減できることが確認できた．一方で，提案手法はパターン 1 が必要としない進行方向を求める処理を実行するため，進行方向を求める処理の分だけ実行時間は増加する．このため，進行方向を求めるために必要な時間を考慮してもエージェント間距離の計算回数削減による高速化が有効であることを確認する．表 4–7 にシミュレーションの実行時間を，図 4–13 に式

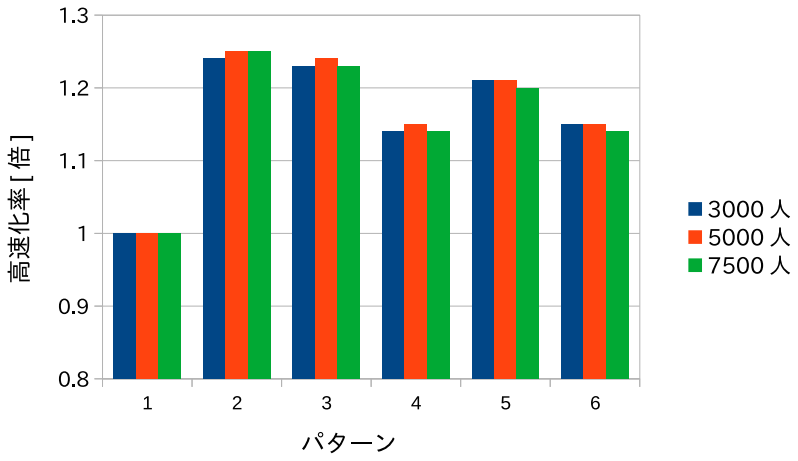


図 4–13 ： パターン 1（セル分割法）に対する高速化率

（4–2）より算出した高速化率を示す.

$$\text{高速化率 [倍]} = \frac{\text{パターン 1 の実行時間 [s]}}{\text{パターン } n \text{ の実行時間 [s]}} \tag{4–2}$$

表 4–7，図 4–13 より，提案手法であるパターン 2〜6 は，すべてのパターンにおいてパターン 1（セル分割法）よりも 1.14 倍から 1.25 倍高速であり，従来手法よりも解析時間が 1.3 割から 2.0 割削減できることが確認できる．また，すべてのパターンにおいて削減率に応じた高速化率が得られており，進行方向を求める処理を追加したことによる処理時間の時間増加は小さいといえる．これを踏まえると，パターン 2 とパターン 3 の高速化率の差は，本来計算が必要なエージェント間距離の計算の有無によるものであると考えられる．つまり，パターン 3 はパターン 2 の処理に加えて視野の座標を求め，厳密に視野範囲を予測しているが，追加の処理による実行時間の増加は小さいといえる．

4.2.3　シミュレーション精度の測定

提案手法のうち最も高速な手法はパターン 2 であるが，パターン 2 は他の手法と異なり視野範囲の一部が近似領域外となることを許容する．つまり，提案手法のうちパターン 2 のみ，パターン 1（セル分割法）のシミュレーションと比べてシミュレーション誤差が生じる手法となる．このため，パターン 1 のシミュレーション結果とパターン 2 のシミュレーション結果を比較し，シミュレーション精度を確かめ

る．誤差は，パターン 1 とパターン 2 が算出した時間ステップごとに各エージェントの座標を出力し，2 手法の同時刻・同エージェント同士によるエージェント間距離の最大値とした．本測定条件下のパターン 2 の誤差は，エージェント数によらず約 3.2cm であった．これは，解析領域全体や人の大きさを踏まえると小さな数値であり，シミュレーション結果として十分に実用的であると考えられる．誤差を小さな数値で抑えることができたのは，SFM ではエージェントが目的地に向かう特性から，時間ステップごとの位置座標に応じて進行方向が更新され，細かな誤差が発生してもそれを蓄積しにくいためであると考えられる．加えて，パターン 2 が相互作用力の計算を省略したのは視界の隅にあたる領域であり，パターン 2 を用いても人の行動を自然に再現できると考えられる．

4.3　本章のまとめ

本論文では，視野を用いた SFM を高速化するために，エージェント間距離の計算回数を削減する手法を提案し，その有効性を評価した．評価の結果，提案手法は，エージェントが交差するように移動する問題において，十分に許容可能な誤差の範囲で約 1.25 倍の高速化率が得られることを確認した．提案手法を用いた人流シミュレーションは，従来手法よりも解析時間を最大 2 割削減できるため，解析に必要な電力コストを解析時間に応じて削減できる可能性があり，これは建物の設計に必要な開発コストの削減にもつながると考えられる．また，本測定の提案手法で発生した誤差より大きい誤差を許容することができる場合，近似領域の視野範囲に対する近似制度を高めることが可能であり，エージェント間距離の計算回数の削減量を増やすことができると期待できる．このため，精度低下を許容できる問題に対しては，さらなる高速化が見込めるといえる．さらに，提案手法を用いた人流シミュレーションは，エージェントごとに独立して計算できる並列性があるため，CPU や GPU を用いて並列処理することで高速に解析できると考えられる．特に GPU を用いた人流シミュレーションは，GPU 上でエージェントごとに視野領域の内外判定を計算し，進行方向を計算することが一般的である [23]，[24]．GPU を用いた解析は，条件分岐により，実行効率が落ちることが知られている．このため，提案手法を GPU 上で実装する場合は，同じ処理をまとめて計算するなどの条件分岐を削減する工夫が必要であると考えられる．

第5章
格子分割による進行方向ベクトル計算の削減手法

SFM の運動方程式は，エージェントの位置が変わるたびに，目的地までのベクトルを表す e や周囲のエージェントを避ける力 f_{ij}，障害物を避ける力 f_{iW} の再計算が必要となる．周囲のエージェントを避ける力 f_{ij} の計算は，時間ステップごとにすべてのエージェントの位置が変化するため，解析中のみに計算が可能である．一方，ベクトル e や障害物を避ける力 f_{iW} は，エージェントの位置に応じて決定し，壁や机などの障害物の座標が固定であることから，解析前に計算が可能である．

そこで，本論文では，格子状に分割した領域ごとにベクトル e と障害物を避ける力 f_{iW} をあらかじめ計算することで，解析中の進行方向の再計算を削減する．

5.1 格子分割を用いた進行方向計算手法

本手法は，解析領域を格子状に分割し，格子ごとに進行方向ベクトル e や障害物を避ける力 f_{iW} をあらかじめ計算する．進行方向ベクトル e は，式 (2–1) に示す SFM の運動方程式から $v_i^0(t)$ が係数である．一方で，障害物から受ける力 f_{iW} は，式 (2–1) に示すように，式の第 3 項である．このため，進行方向ベクトル e と障害物を避ける力 f_{iW} は，別々の配列に格納する必要がある．図 5–1 に格子分割を用いた進行方向ベクトル計算の削減手法のフローチャートを示す．図 5–1 中の前処理は，提案手法に必要である格子ごとの進行方向や壁を避ける力を算出する．図 5–1 中の運動方程式を用いた計算は，エージェントの進行方向を計算する処理であり，エージェントの進行方向ベクトル e や障害物を避ける力 f_{iW} を前処理で算出した値を参照する．

5.1.1 格子ごとの進行方向ベクトル e の計算方法

進行方向ベクトル e は，目的地に進むベクトルであり，エージェントの座標から目的地の座標までのベクトルである．このため，ベクトル e は解析領域を格子状に分

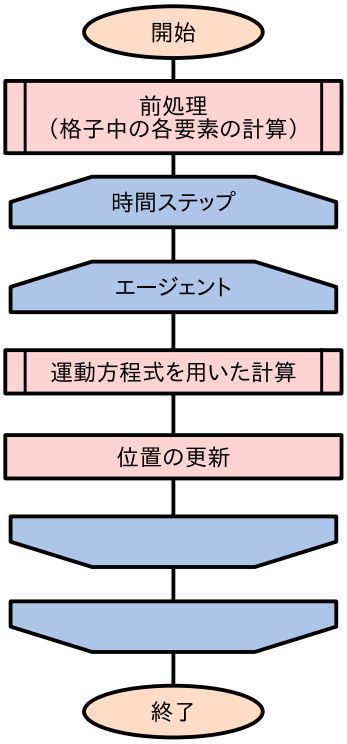


図 5–1 ： 提案手法の解析全体のフローチャート

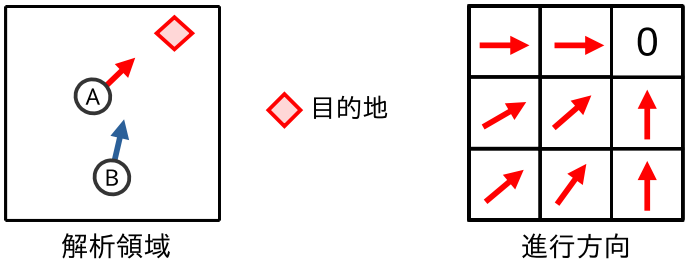


図 5–2 ： 提案する格子分割の例

割した領域ごとの中心座標から目的地の座標までのベクトルを計算することで，解析前に計算が可能となる．図 5–2 に格子分割した進行方向の例を示す． 図 5–2 中の○はエージェントであり，エージェント A，B が 1 つの目的地に向かう様子である．図中のエージェント B は，エージェント A の位置に移動したとき，エージェント A と同じ進行方向になる．このため，解析領域を分割し，格子ごとに進行方向を算出することで，解析中の進行方向の再計算が削減できる．目的地と障害物が含まれる格子は，エージェントが正しく目的地に進むようにするために，0 ベクトルを格納

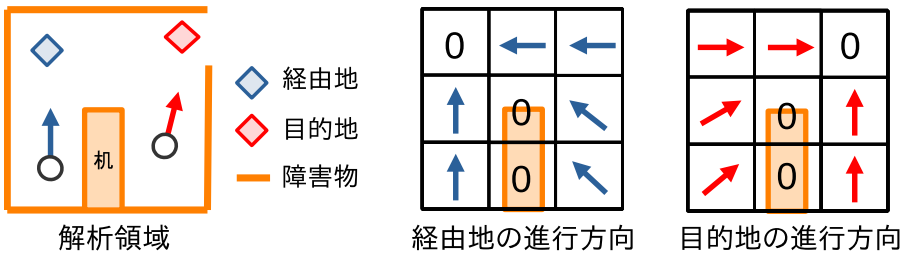


図 5–3 ： 経由地がある場合の進行方向の例

する．0 ベクトルが格納された格子中に存在するエージェントは，改めて個別に進行方向ベクトル e を計算する．格子ごとの進行方向は，格子の中心座標から目的地までのベクトル e を求め，配列に格納する．目的地の他に経由地が複数存在する場合，進行方向は，経由地ごとに異なるため，経由地ごとに違う配列に格納する必要がある．図 5–3 に経由地が複数存在する例を示す．図 5–3 中の右図は経由地の進行方向，左図は目的地の進行方向，青色の矢印は経由地に進む進行方向，青矢印は目的地の進行方向，0 は進行方向を個別計算するための 0 ベクトル，オレンジ色の四角は机などの障害物を示す．図 5–3 のように，経由地と目的地の進行方向は，それぞれの座標が異なるため，ベクトル e も大きく異なることから，それぞれ別の配列で保持する必要がある．式 (5–1) に進行方向ベクトル e を格納するための配列の要素数を算出する式を示す．

$$\text{進行方向の格子の要素数 [個]} = \left(\frac{\text{解析領域 [m]}}{\text{格子サイズ [m]}}\right)^2 \times 2 \times \text{経由地数 [個]} \qquad (5\text{–}1)$$

式 (5–1) のように，進行方向を格納する配列は，解析領域の大きさや格子サイズの小ささ，経由地数の大きさに応じて要素数が増加する．また，進行方向を格納する配列の前処理にかかる時間は，配列の要素数に応じて格子ごとの進行方向計算回数が増加するため，配列の大きさに応じて増加する．

5.1.2　格子ごとの障害物を避ける力 F_{iW} の計算方法

障害物を避ける力 F_{iW} は，エージェントの座標と障害物の座標に応じて変化する．障害物は，机や壁などの固定された物であるため，座標が変化しない．このため，障害物を避ける力 F_{iW} は，解析領域を格子状に分割した領域ごとの中心座標と障害物の座標から解析前にあらかじめ計算が可能となる．図 5–4 に格子分割した障害物を避ける力 F_{iW} を示す．図 5–4 中の四角は解析領域を格子状に分割した格子，黒点

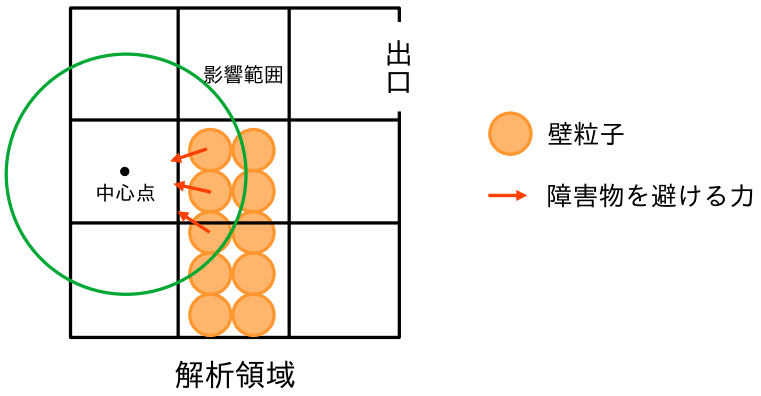


図 5–4 ： 格子分割した障害物を避ける力 F_{iW} の例

は格子の中心点，緑色の丸は格子の中心点からの影響範囲，オレンジ色の丸は壁粒子，赤色の矢印は黒点の中心点が受ける障害物を避ける力 f_{iW} である．図 5–4 の例は，黒点が存在する格子が受ける障害物を避ける力 f_{iW} を示しており，黒点の中心点から緑色の範囲に存在する壁粒子から力を受ける．各格子は，図 5–4 のように格子の中心点の座標を用いて障害物を避ける力を計算する．壁を避ける力 F_{iw} を格納する配列は，経由地が変わっても変化しないため，解析領域全体で一つとなる．式 (5–2) に障害物を避ける力 F_{iW} を格納する配列の要素数を示す．

$$\text{障害物を避ける力を格納する格子の要素数 [個]} = \left(\frac{\text{解析領域 [m]}}{\text{格子サイズ [m]}}\right)^2 \times 2 \quad (5\text{–}2)$$

式 (5–2) に示すように，障害物を避ける力を格納する配列の要素数は，解析領域と格子サイズに応じて決まり，解析領域を格子サイズで割った値の二乗が配列の要素数となり，障害物を避ける力 F_{iW} が x と y 方向に存在するため，要素を 2 倍した値が障害物を避ける力 F_{iW} を格納する配列の総要素数になる．図 5–6 に格子分割を用いた進行方向の計算回数削減手法の前処理のフローチャートを示す．図 5–6 中の F_{iW} 配列は障害物を避ける力 F_{iW} を格納する配列，進行方向配列は進行方向ベクトル e を格納する配列，F_{iW} の x インデックスと y インデックスは F_{iW} 配列に格納するためのインデックスであり，すべての要素に値を格納するためのループである．同様に，進行方向配列の x インデックスと y インデックスは進行方向ベクトル e を配列に格納するためのインデックスであり，すべての要素に値を格納するためのループである．進行方向ベクトル e は，経由地ごとに異なるため，経由地数分のループが前処理に必要となる．

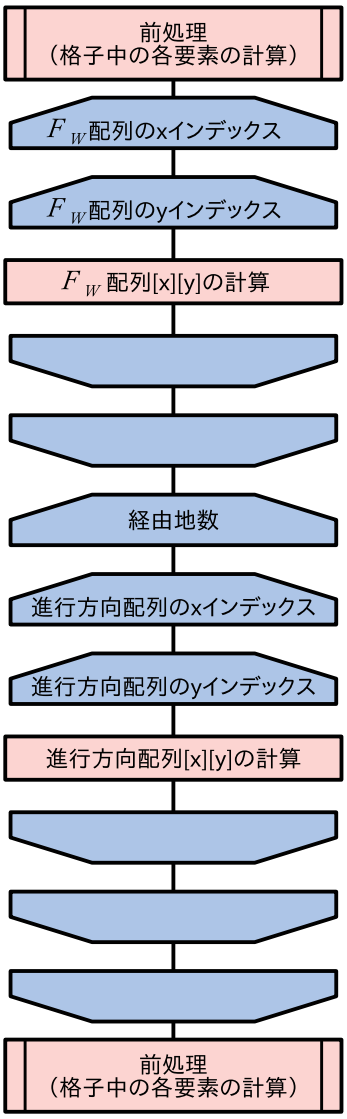


図 5–5 ： 格子分割の前処理のフローチャート

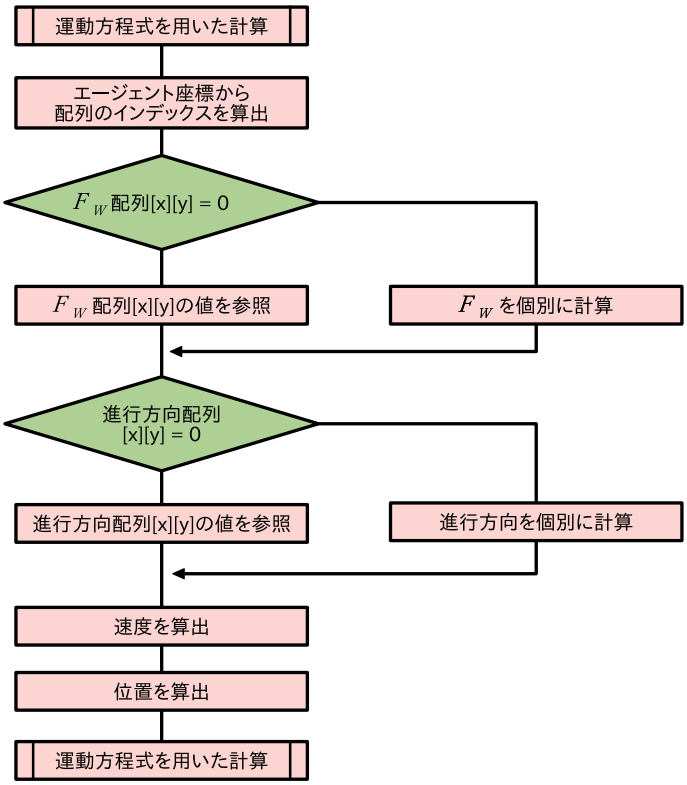


図 5–6 ： 提案手法の運動方程式計算のフローチャート

5.1.3　個別に進行方向を計算する格子の判定

格子分割を用いた進行方向の計算回数削減手法は，精度の大幅な低下を防ぐために，図 5–3 のように目的地や障害物が含まれる格子とその周辺の格子に存在するエージェントを個別に進行方向を計算するように設定する．個別に進行方向する格子には，x と y の両方のベクトルに 0 が格納されているため，解析中にエージェントが存在する格子に 0 ベクトルが格納されているか判定が必要となる．図 5–6 に進行方向ベクトル e および障害物を避ける力 F_{iW} の解析中に個別計算するかどうかの判定のフローチャートを示す．図 5–6 が示すフローチャートは，図 5–1 中の解析中の運動方程式を用いた計算であり，エージェントの進行方向を求めるための計算である．図 5–6 中の F_{iW} 配列は障害物を避ける力 F_{iW} を格納する配列，進行方向配列は進行方向ベクトル e を格納する配列である．図 5–6 に示すように，格子分割を用いた進行方向の計算回数削減手法は，エージェントの座標から参照する配列の要素を求め，0 ベクトルが格納されていない場合に配列中の値を参照し，0 ベクトルが格納されている場合に個別計算を行うことで解析中の計算回数を削減する．

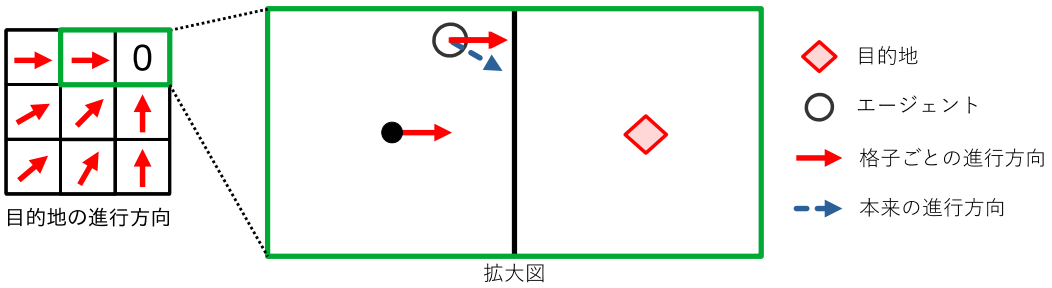


図 5–7 ： 格子の進行方向とエージェントの進行方向で誤差が出る場合

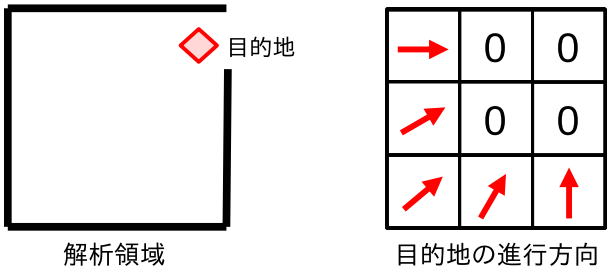


図 5–8 ： 近傍格子を個別計算の格子に設定する例

5.1.4　進行方向を個別に計算する格子の設定方法

提案手法は，図 5–3 のように格子ごとに中心座標から目的地や経由地までの進行方向を決定するため，格子が大きくなるほど，エージェントの進行方向と格子の進行方向で誤差が生じる．図 5–7 にエージェントの進行方向と格子の進行方向で誤差が生じる例を示す．図 5–7 中の緑色の四角は解析領域の緑色の範囲を拡大したもの，右側の目的地の進行方向は図 5–2 の目的地の進行方向，赤色のひし形は目的地，赤色の矢印は進行方向，白色の丸はエージェント，青色の矢印は既存手法で求めたエージェントの進行方向である．図 5–7 のように，提案手法を用いた進行方向は，格子ごとの中心座標から目的地の座標に向かうベクトルを算出するため，図中の赤色の矢印のように表せる．一方で，SFM の運動方程式を用いて計算したエージェントの進行方向は，エージェントの座標から目的地の座標に向かうベクトルであるため，図中の青色の矢印のように表せる．図 5–7 中のエージェントは，格子のサイズが大きいことや格子の端にいるために，本来の進行方向と大きく誤差が生じることがわかる．このため，本提案手法は，個別に進行方向を計算する格子の設定方法を目的地や障害物が存在する格子と近傍の格子にすることで，エージェントの進行方向に大きな誤差が生じないように対策する．図 5–8 に近傍の格子を個別計算の格子に設定

する例を示す．図 5–8 中の左側の四角は解析領域を示しており，左の四角は格子ごとの目的地に向かう進行方向，格子内の 0 は，個別でエージェントの進行方向を計算する格子である．図 5–8 のように，提案手法は，目的地や障害物を含む格子とその近傍の格子を個別計算することで，図 5–7 のようなエージェントの進行方向の誤差が発生することを防ぐ．

表 5–1 ： 評価環境

CPU	Intel Xeon CPU E5-2667w v2
メモリ	32GB
OS	Linux 6.5.8
コンパイラ	gcc 13.2.0
最適化オプション	-O3

5.2　評価

SFM を用いた人流シミュレーションに対する格子分割を用いた進行方向の計算回数削減手法の有効性を確認するために，既存手法であるセル分割法と提案手法を用いて人流シミュレーション評価環境は，表 5–1 に示すマシンである．本評価では，表 5–2 に示すパラメータを用いて SFM の運動方程式を計算する．本評価では，避難時のシミュレーションを再現するために，エージェント数よりも壁粒子が多い配置にエージェントを一方向に進むような解析を行う．図 5–9 に本評価に用いるエージェントの初期配置を示す．図 5–9 中の黄色の四角は障害物 (壁)，赤色のひし形は目的地，緑色の四角はエージェントの初期配置位置である．図 5–9 のエージェントは，緑色の範囲内から赤色の目的地まで進むように設定する．本評価では，格子サイズごとの計算回数の削減率や，解析時間の有効性を評価するために，図 5–9 に示す配置の壁の間隔や粒子数を変えた複数パターンを用いる．図 5–10 と図 5–11，図 5–12，図 5–13 に評価で用いる図 5–9 のエージェントの初期配置の壁間隔を変えた配置を示す．また，図 5–14，図 5–15 に通路幅 2m のときの配置 (図 5–10) の壁粒子をそれぞれ 2 倍，3 倍にした配置を示す．図中の黒丸は壁粒子，紫色の丸はエージェント，青色の丸は目的地である．図に示す配置のエージェントは 40 人，壁粒子は 592 個，経由地は 1 個，解析領域は $50m \times 50m$ である．また，壁粒子を変えた配置 (図 5–14，図 5–15) の壁粒子数は表 5–3 に示す通りである．図中のすべてのエージェントは，青色の丸が示す目的地に向かうように設定する．測定する格子サイズは，解析領域の一辺 (50m) を半分ずつ割った値を用いる．

表 5–2 ： 測定条件

A_i	2000N
B_i	0.08m
k	$1.2 \times 10^5 kgs^{-2}$
κ	$2.4 \times 10^5 kgm^{-1}s^{-2}$
v_i^0	1.4m/s
m_i	80kg
τ_i	0.5
r_i	0.25m
相互作用範囲	5m

表 5–3 ： 壁の厚さを変えたときの初期配置のパラメータ

	壁粒子数 [個]	エージェント数 [人]	経由地数 [個]
厚さ 1 倍	592	40	1
厚さ 2 倍	1184	40	1
厚さ 3 倍	1776	40	1

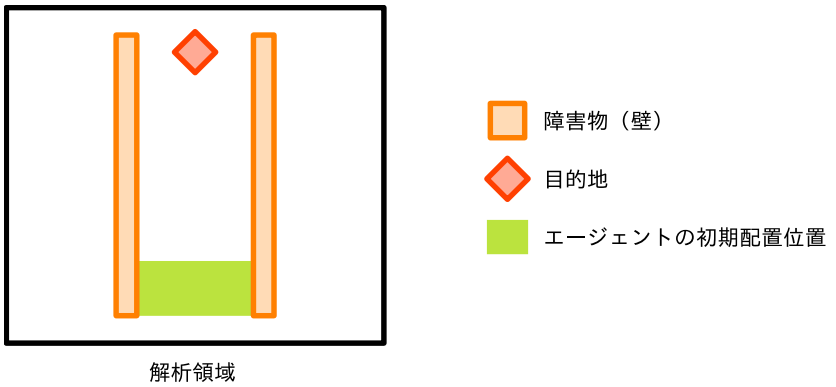


図 5–9 ： エージェントの初期配置

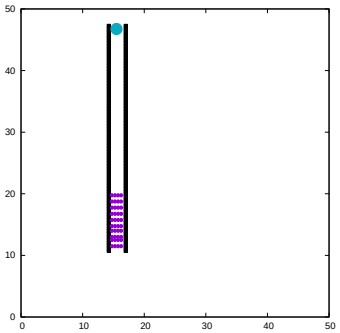


図 5–10 ： 通路幅 2m の初期配置

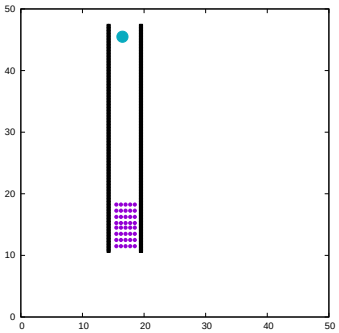


図 5–11 ： 通路幅 5m の初期配置

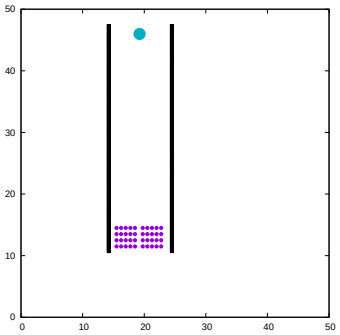


図 5–12 ： 通路幅 10m の初期配置

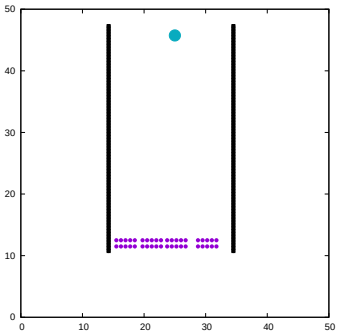


図 5–13 ： 通路幅 20m の初期配置

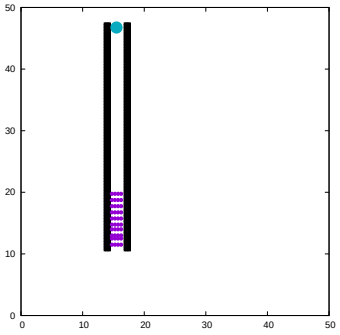


図 5–14 ： 通路幅 2m(壁粒子数 2 倍) の初期配置

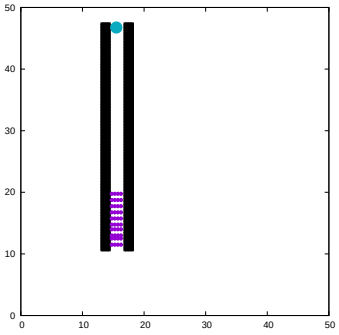


図 5–15 ： 通路幅 2m(壁粒子数 3 倍) の初期配置

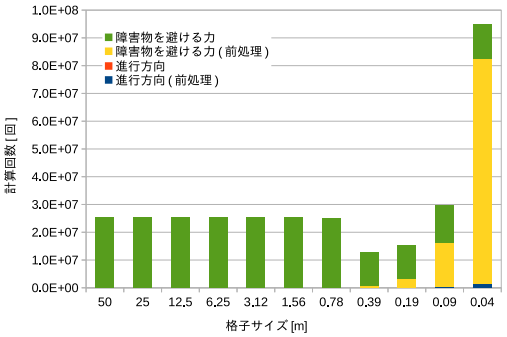


図 5–16 ： 通路幅 2m の格子サイズごとの計算回数

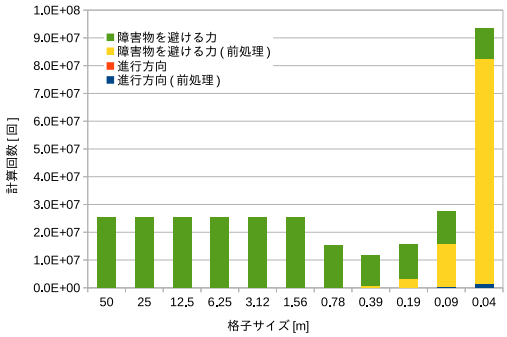


図 5–17 ： 通路幅 5m の格子サイズごとの計算回数

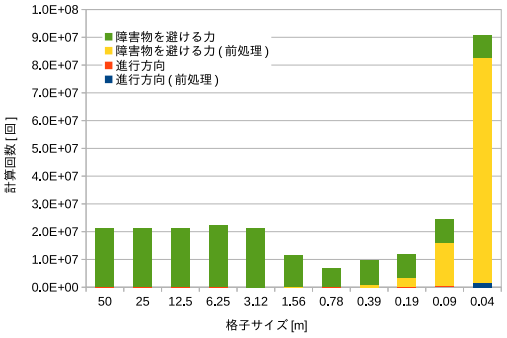


図 5–18 ： 通路幅 10m の格子サイズごとの計算回数

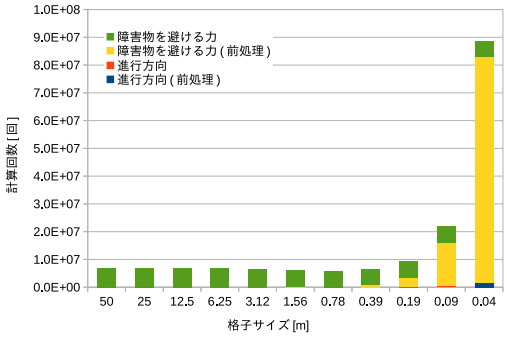


図 5–19 ： 通路幅 20m の格子サイズごとの計算回数

5.2.1　進行方向計算の計算回数

本測定では，格子分割を用いた進行方向の計算回数削減手法の有効性を評価するために，既存手法であるセル分割法と格子分割を用いた進行方向の計算回数削減手法の計算回数を測定する．測定する計算は，エージェントの進行方向の決定に必要なエージェントの進行方向ベクトル e と障害物を避ける力 F_{iW} であり，前処理と解析中の回数である．図 5–16，図 5–17，図 5–18，図 5–19 に各配置における計算回数を示す．また，表 5–5 に各配置における削減率を示す．表 5–5 に示す削減率は，式 (5–3) のように，セル分割法の各計算の総和 C_e と提案手法の各計算の総和 C_p を用いて算出する．

$$\text{削減率 } [\%] = \left(1 - \frac{C_p}{C_e}\right) \times 100 \tag{5–3}$$

図 5–16 から図 5–19 より，提案手法は，セル分割法よりも進行方向の計算回数が削減できる格子サイズがあることが確認できる．また，すべての配置において格子サ

表 5–4 ： 各通路幅の格子サイズごとの計算回数の削減率 [%]

	通路幅 2m	通路幅 5m	通路幅 10m	通路幅 20m
50.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.08	0.07	1.03	0.03
6.25	0.23	0.25	-3.04	-0.93
3.12	0.15	0.22	-0.12	1.57
1.56	0.19	0.10	37.69	6.44
0.78	0.50	33.86	**54.81**	**8.25**
0.39	**43.85**	**45.48**	44.98	1.60
0.19	34.61	32.68	35.66	-23.33
0.09	-13.93	-6.88	-12.48	-137.22
0.04	-235.83	-225.08	-267.49	-738.82

イズが小さくなるほど，前処理の計算が占める割合が高くなることがわかる．これは，格子サイズが小さくなるほど，あらかじめ計算する進行方向を保持する格子の要素数が多くなるため，前処理の計算回数が増えるためであると考えられる．一方で，進行方向ベクトル e の計算は，各計算回数に対しての割合が低い．これは，解析中の進行方向ベクトル e の計算回数が最大でエージェント数とタイムステップ数の積であることから，障害物を避ける力の計算回数よりも低いためであると考えられる．表 5–5 より，提案手法がセル分割法に対して計算回数が削減できる格子サイズは，通路幅 2m で 0.39m から 0.19m，通路幅 5m で 0.78m から 0.19m，通路幅 10m で 1.56m から 0.19m，通路幅 20m で 3.12m から 0.78m であり，通路幅が広くなるほど削減できる格子サイズの大きさが大きくなる．これは，通路幅が広くなるほど，エージェントが通る場所の格子内に壁粒子が含まれにくくなるため，あらかじめ計算した進行方向を用いることができるからであると考えれれる．[**炭治郎柄の図を使って説明しても良い**] 各通路幅の削減率は，表 5–5 より，通路幅 2m で最大 43.85%，通路幅 5m で最大 45.48%，通路幅 10m で最大 54.81%，通路幅 20m で最大 8.25%である．通路幅 20m の最大の削減率は，最大約 8%であり，他の通路幅の最大削減率 (約 50%前後) と比べて低いことがわかる．これは，図 5–16 から図 5–19 より，通路幅 2m から 10m のセル分割法の計算回数が約 2000 万回から約 3000 万回の間であるのに対して，通路幅 20m のときのセル分割法の計算回数が約 500 万回であり，通路幅 20m の計算回数が少なく，削減率が低くなったためであると考えられる．また，通路幅

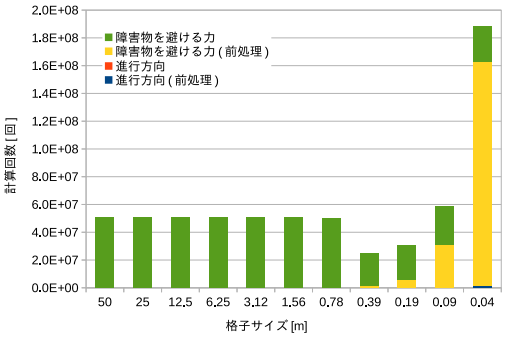


図 5–20 ： 通路幅 2m(壁粒子 2 倍) の格子サイズごとの計算回数

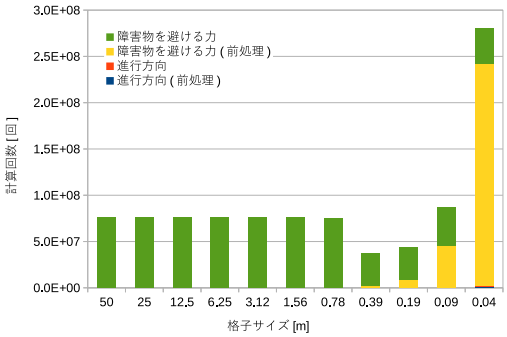


図 5–21 ： 通路幅 2m(壁粒子 3 倍) の格子サイズごとの計算回数

表 5–5 ： 各通路幅の格子サイズごとの計算回数の削減率 [%]

	通路幅 2m	通路幅 5m	通路幅 10m	通路幅 20m
50.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.08	0.07	1.03	0.03
6.25	0.23	0.25	-3.04	-0.93
3.12	0.15	0.22	-0.12	1.57
1.56	0.19	0.10	37.69	6.44
0.78	0.50	33.86	**54.81**	**8.25**
0.39	**43.85**	**45.48**	44.98	1.60
0.19	34.61	32.68	35.66	-23.33
0.09	-13.93	-6.88	-12.48	-137.22
0.04	-235.83	-225.08	-267.49	-738.82

20m における既存手法の計算回数が少ない理由は，本評価で用いたパラメータの影響範囲が 5m であり，図 5–13 に示すように，エージェントが通る場所が通路幅 20m であるため，エージェントの障害物を避ける力の影響範囲に壁粒子が存在しないことが多く，障害物を避ける力の計算回数が他の通路幅と比べて少ない結果が得られたと考えられる．図 5–17 から図 5–19 より，前処理中の計算回数が占める割合は，どの通路幅の配置においても同様の傾向である結果が得られた．これは，本評価に用いる配置の経由地数と解析領域が同じであるため，式 (5–1) や式 (5–2) に示す前処理に必要な要素数が同じであり，壁粒子数が同じであることから，通路幅が変わっても同様の傾向が得られたと考えられる．

表 5–6 ： 各通路幅の格子サイズごとの計算回数の削減率 [%]

	壁粒子 (1 倍)	壁粒子 (2 倍)	壁粒子 (3 倍)
50.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.08	0.00	0.03
6.25	0.23	0.03	0.08
3.12	0.15	0.02	0.00
1.56	0.19	0.05	0.11
0.78	0.50	0.21	0.29
0.39	**43.85**	**47.00**	**48.46**
0.19	34.61	36.81	39.93
0.09	-13.93	-14.68	-13.39
0.04	-235.83	-251.21	-255.13

図 5–20，図 5–21 より，提案手法は，壁粒子数が増加した場合においても図 5–16 と同様に格子サイズ 0.39m から 0.19m の間で削減できることが確認できる．図 5–20，図 5–21 の結果から式 (5–3) を用いて算出した各配置の削減率を表 5–6 に示す．表 5–6 中の太字の数値は，各配置の削減率の最大値を示す．表 5–6 より，壁粒子数が多くなるほど，計算回数の削減率の最大値が高くなることがわかる．これは，壁粒子の密度が高くなるほど，既存手法であるセル分割法の計算回数が増加するため，提案手法の削減できる計算回数が多くなるためであると考えられる．

5.2.2　シミュレーションの実行時間の測定

5.2.1 節より，提案手法を用いることで，既存手法であるセル分割法よりも進行方向の計算回数を削減できることが確認できた．一方で，提案手法は，解析前にあらかじめ各格子の進行方向を計算するため，解析前の前処理の実行時間は増加する．このため，あらかじめ計算するために必要な時間を考慮しても格子分割を用いた進行方向の計算回数削減による高速化が有効であることを確認する．図 5–22，図 5–23，図 5–24，図 5–25 に通路幅ごとのシミュレーション実行時間を，図 5–28 に式 (5–4) を用いて算出した高速化率を示す．また，図 5–26，図 5–27 に通路幅 2m のときの粒子数を 2 倍，3 倍にした配置のシミュレーション実行時間を，図 5–29 に高速化率を示す．

$$\text{高速化率 [倍]} = \frac{\text{セル分割法の実行時間 [s]}}{\text{提案手法の実行時間 [s]}} \tag{5–4}$$

図 5–22，図 5–23，図 5–24，図 5–25，図 5–28 より，提案手法は，セル分割法よりも最大△△倍高速であり，従来手法よりも解析時間が最大〇〇割削減できることが確認できる．また，格子サイズが小さくなるほど，前処理の計算にかかる時間の割合が多くなり，通路幅 2m では 0.09m，通路幅 5m では 0.09m，通路幅 10m では 0.19m，通路幅 20m では 0.39m 以下の格子サイズで，従来手法よりも遅くなることが確認できる．前処理時間にかかる時間は，5.2.1 節で示した前処理中の計算回数が占める割合の傾向と同様であることがわかる．従来手法よりも高速に解析できる提案手法の格子サイズは，通路幅 2m で 0.39m から 0.19m，通路幅 5m で 0.78m から 0.19m，通路幅 10m で 1.56m から 0.19m，通路幅 20m で 6.25m から 0.39m であり，通路幅が広くなるほど，従来手法よりも高速に解析できる格子サイズが多くなることがわかる．これをふまえると，従来手法よりも高速に解析できる提案手法の格子サイズは，エージェントが通る場所の障害物と障害物の間の距離に応じて変わることが考えられる．[**壁粒子数を変えた時のシミュレーション実行時間と高速化率について述べる !!!**]

図 5–26，図 5–27，図 5–29 より，提案手法のセル分割法に対する高速化率は，壁粒子数 1 倍のときで最大〇〇倍，壁粒子数 2 倍のときで最大〇〇倍，壁粒子数 3 倍のときで最大〇〇倍であり，壁粒子数が増えるほど高速化率の最大値が高くなることが確認できる．これは，壁粒子を増やす方法が壁粒子の密度が高くなるような設定をしているため，密度が高くなるほど，5.2.1 節で示した計算回数が削減でき，解析時間の短縮に繋がったと考えられる．

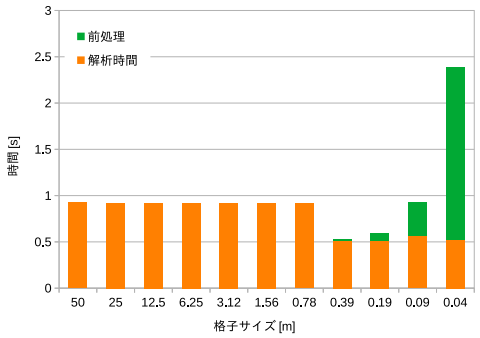


図 5–22 ： 通路幅 2m の格子サイズごとの解析時間

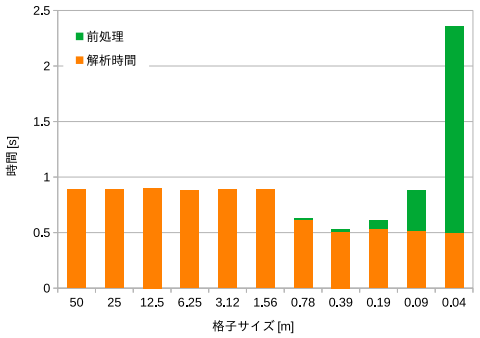


図 5–23 ： 通路幅 5m の格子サイズごとの解析時間

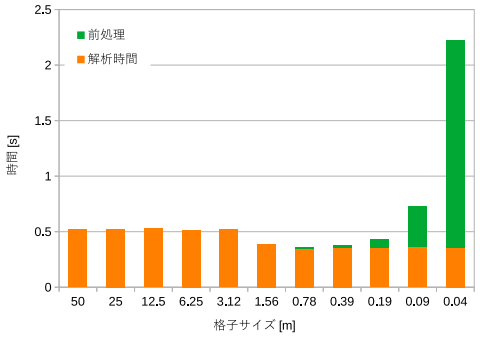


図 5–24 ： 通路幅 10m の格子サイズごとの解析時間

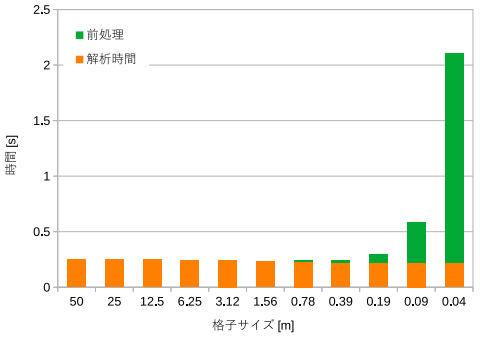


図 5–25 ： 通路幅 20m の格子サイズごとの解析時間

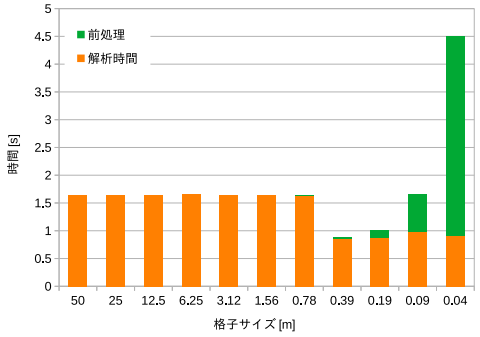


図 5–26 ： 通路幅 2m(粒子数 2 倍) の格子サイズごとの解析時間

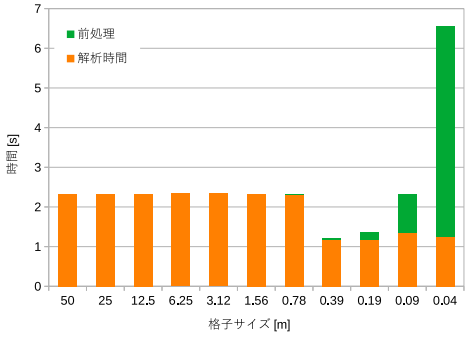


図 5–27 ： 通路幅 3m(粒子数 3 倍) の格子サイズごとの解析時間

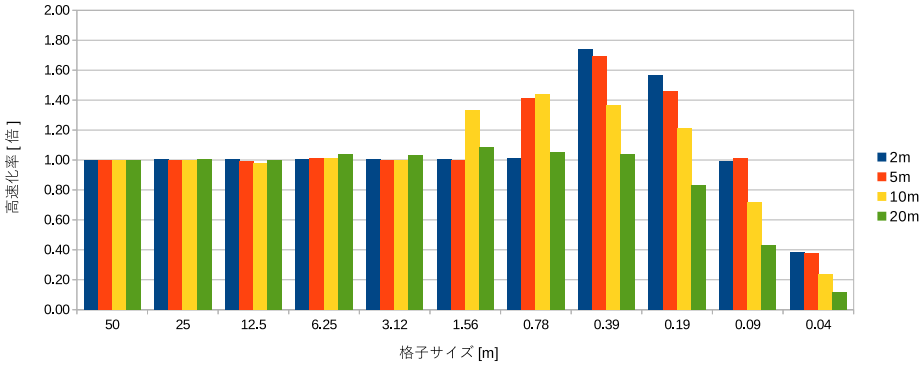


図 5–28 ： 通路幅を変えたときの高速化率

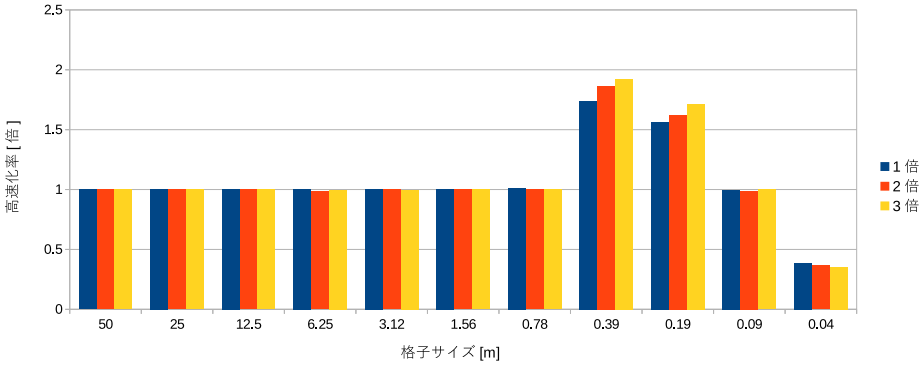


図 5–29 ： 壁粒子数を変えたときの高速化率

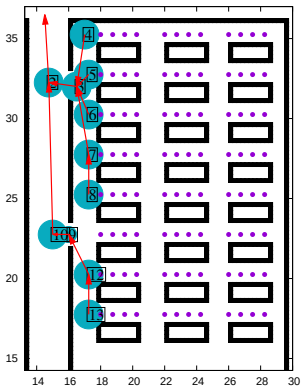


図 5–30 ： 教室の初期配置

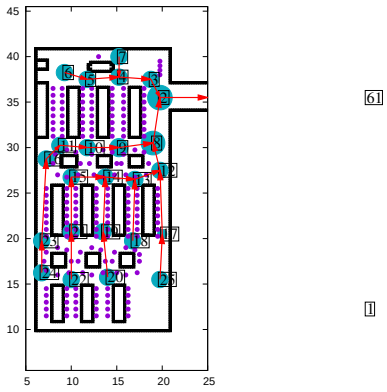


図 5–31 ： 演習室の初期配置

表 5–7 ： 各配置の詳細

	教室	演習室
エージェント数 [人]	96	204
壁粒子数 [個]	1037	1454
経由地数 [個]	12	26
解析領域	$50m \times 50m$	$50m \times 50m$

5.2.3　避難シミュレーションに対する提案手法の有効性

本節では，実問題に対する提案手法の有効性を示すために，実際の状況下で避難シミュレーションを行い，シミュレーション実行時間とシミュレーション精度を確かめる．本評価に用いるエージェントの初期配置は，図 5–30，図 5–31 に示すように，大学の演習室や教室の避難時の配置で設定する．図 5–30，図 5–31 の黒点は壁粒子，紫色の点はエージェント，青色の丸は経由地の座標およびゴール判定の大きさ，赤色の矢印は経由地のグラフを示す．それぞれの配置のエージェントや壁，経由地は，表 5–7 に示すような数で配置する．本測定では，パラメータを表 5–2 で設定し，すべてのエージェントが部屋から避難できるまでを刻み値 0.001 で解析する．図 5–32 に教室を再現した配置の格子サイズごとのシミュレーション実行時間を，図 5–33 に演習室を再現した配置の格子サイズごとのシミュレーション実行時間を示す．

図 5–32，図 5–33 より，セル分割法のシミュレーション実行時間は，教室を再現した配置で **6.0 秒**，演習室を再現した配置で **24.5 秒**である．また，提案手法のシミュレーション実行時間は，格子サイズ 0.19m のとき，教室を再現した配置で **3.5 秒**，演習室を再現した配置で **15.5 秒**である．提案手法の高速化率は，教室を再現した配置

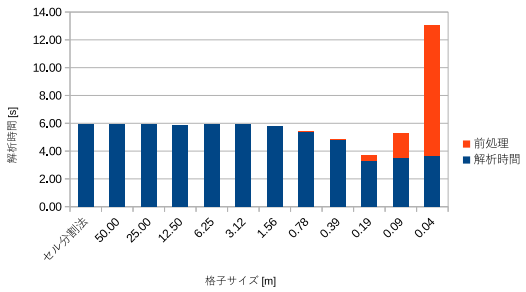


図 5–32 ： 教室の配置における格子サイズごとの解析時間

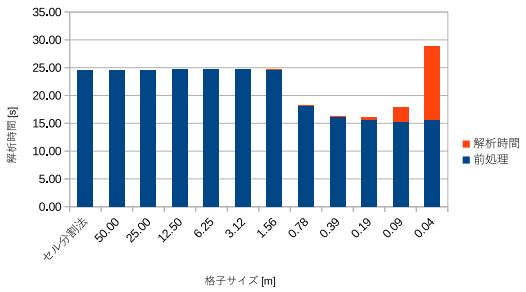


図 5–33 ： 演習室の配置における格子サイズごとの解析時間

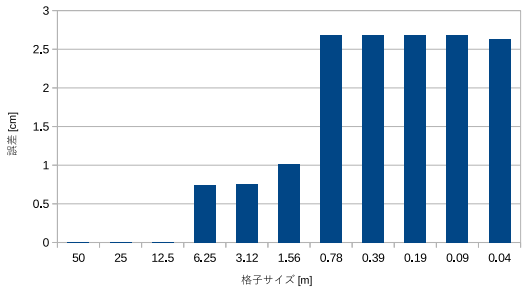


図 5–34 ： 教室の配置における格子サイズごとの最大誤差

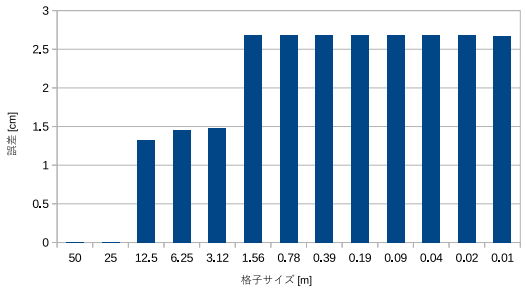


図 5–35 ： 演習室の配置における格子サイズごとの最大誤差

で最大 1.6 倍，演習室を再現した配置で最大 1.5 倍である．このため，提案手法は避難シミュレーションにおいても，セル分割法よりも高速に解析できることがわかる．

本測定の精度は，エージェントの座標誤差と，避難完了時間の誤差を用いて評価する．エージェントの座標誤差は，提案手法とセル分割法が算出した時間ステップごとに各エージェントの座標を出力し，2 手法の同時刻・同エージェントどうしによるエージェント間距離である．また，避難完了時間の誤差は，セル分割法と提案手法が解析した避難を完了した時間を出力し，(5–5) を用いて算出する．

$$\text{避難完了時間の誤差 [\%]} = \left| \frac{C_{time} - T_{time}}{C_{time}} \right| \times 100 \qquad (5\text{–}5)$$

(5–5) 中の C_{time} はセル分割法の避難完了時間であり，T_{time} は提案手法の避難完了時間である．図 5–34 に教室を再現した配置の格子サイズごとの座標誤差，図 5–35 に演習室を再現した配置の格子サイズごとの座標誤差を示す．図 5–34，図 5–35 より，本測定条件下の提案手法の座標誤差は，教室を再現した配置で最大 **2.6cm**，演習室を再現した配置で最大 **2.6cm** である．両方の配置で誤差が横ばいである理由は，目的地や障害物が含まれる格子では，進行方向を簡易化せずにエージェントごとに個

別で計算しているため，格子サイズが大きくなるほど生じる誤差を抑えることができたためであると考えられる．また，提案手法の生じる誤差は，両方の配置で解析領域が $50m \times 50m$，人の大きさが $0.25m$ であることを踏まえると小さな値であり，実用的であると考えられる．本測定条件下のセル分割法の避難完了時間は，教室を再現した配置で○○**秒**，演習室を再現した配置で○○**秒**である．また，本測定条件下の格子サイズ $0.19m$ の提案手法の避難完了時間は，教室を再現した配置で○○**秒**，演習室を再現した配置で○○**秒**である．本測定条件下の提案手法の避難完了時間の誤差は，教室を再現した配置で○○%，演習室を再現した配置で○○%である．この誤差は，関連研究 [?][**一次元化の参考文献**] と比較すると小さな値であり，提案手法が避難シミュレーションにおいても実用的な誤差であることがわかる．

5.3　本章のまとめ (工事中)

工事中.

第6章
おわりに

\(^o^)/

謝辞

aa aa
(?)

2023 年 12 月 25 日

参考文献

(1) NHK 首都圏ナビ群衆事故のリスクは?韓国ソウル転倒事故「立ったまま圧死か」, 入手先 <https://www.nhk.or.jp/shutoken/newsup/20221031c.html> (2023-2-26).

(2) WEB, N. N. 明石 歩道事故から 21 年「群衆雪崩」再現 安全対策に, 入手先 <https://www3.nhk.or.jp/kansai-news/20220721/2000064071.html> (2023-2-26).

(3) 北上靖大, 森俊勝, 坂平文博, 志村泰知, 杉浦哲平： 都市課題の改善に向けたマルチエージェント・シミュレーションの活用, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol. 133, No. 9, pp. 1640–1644 (2013).

(4) NTT データ理数システム人流シミュレーションによるオリンピック開催時の駅の混雑分析事例, 入手先 <https://www.msiism.jp/article/taguchi-olympic-human-flow-simulation.html> (2021-04-21).

(5) 大西正輝, 山下倫央, 星川哲也, 佐藤和人： 人の流れの計測とシミュレーションによる避難誘導方法の伝承 – 新国立劇場における避難体験オペラコンサートを例に –, 人工知能学会第二種研究会資料, Vol. 2015, No. KST-26, p. 06 (2015).

(6) 株式会社ホロラボホロラボが鹿島の BIM データを活用した避難シミュレーションの Microsoft HoloLens 2 版開発を支援, 入手先 <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000056.
(2023-02-20).

(7) 大成建設株式会社人流シミュレーションシステム「T-MultiAgent JINRYU」を開発, 入手先 <https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2020/200428_4912.html> (2023-02-20).

(8) 丸山大地, 高橋達二： 渋滞学における高密度を避けるフロアフィールドモデル, 第 76 回全国大会講演論文集, Vol. 2014, No. 1, pp. 211–212 (2014).

(9) Kirchner, A., Nishinari, K. and Schadschneider, A.: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics., Physical review.

E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics, Vol. 67 5 Pt 2, pp. 56–122 (2003).

(10) Nishinari, K., Kirchner, A., Namazi, A. and Schadschneider, A.: Extended Floor Field CA Model for Evacuation Dynamics, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E87-D (2003).

(11) Helbing, D. and Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics, Physical review E, Vol. 51, No. 5, p. 4282 (1995).

(12) 福士雄太，白井英之： マルチエージェントを用いた並列パンデミックシミュレーション，IPSJ SIG Technical Report, Vol. 2015-ICS-178, No. 13, pp. 1–7 (2015).

(13) 牧野嶋文泰，大石祐介，今村文彦，古村考志：大規模避難シミュレーションによる臨海都市部の津波避難リスク分析と低減方策の検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)， Vol. 74, No. 2, pp. 409–414 (2018).

(14) Makinoshima, F., Imamura, F. and Abe, Y.: Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 83, pp. 36–50 (2018).

(15) Dulam, R., Lalith, M., Hori, M., Ichimura, T. and Tanaka, S.: Development of an HPC Enhanced Multi Agent Simulation Code for Tsunami Evacuation, 土木学会論文集 A2(応用力学)， Vol. 68, No. 2, pp. 513–521 (2012).

(16) 東京大学社会連携部門群集マネジメント研究会： 群集マネジメント総論 理論と実践，東京大学出版会 (2020).

(17) Joselli, M. and Clua, E.: A Flocking Boids Simulation and Optimization Structure for Mobile Multicore Architectures (2013).

(18) 森　文哉，飯島　正： データ駆動屋内避難シミュレーションのための避難者モデルの構築，情報システム学会　全国大会論文集， Vol. 14, pp. S2–B1 (2018).

(19) Zhang, H., Liu, H., Qin, X. and Liu, B.: Modified two-layer social force model for emergency earthquake evacuation, Physica A Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 492, pp. 1107–1119 (2018).

(20) Liu, H., Xu, B., Lu, D. and Zhang, G.: A path planning approach for crowd evacuation in buildings based on improved artificial bee colony algorithm, Appl. Soft Comput., Vol. 68, pp. 360–376 (2018).

(21) 前川廣太郎，播磨大輝，延原肇： 学生のグループ特性を考慮した群衆歩行シミュレーションと教室配置最適化への応用，情報処理学会論文誌， Vol. 57, pp. 1040–1048 (2016).

(22) 磯崎勝吾， 中辻隆： Social force model を基にした歩行者の避難シミュレーションモデルに関する研究，平成 21 年度土木学会北海道支部論文報告集第，No. 66 (2009).

(23) Chisholm, R., Maddock, S. and Richmond, P.: Improved GPU near neighbours performance for multi-agent simulations, Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 137, pp. 53–64 (2020).

(24) Li, X., Cai, W. and Turner, S. J.: Efficient Neighbor Searching for Agent-Based Simulation on GPU, 2014 IEEE/ACM 18th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, pp. 87–96 (2014).

(25) Pham, N. Q. A., Fan, R. and Cai, W.: Optimizing Agent-Based Simulations for the GPU, 2018 International Conference on High Performance Computing Simulation (HPCS), ieeexplore.ieee.org, pp. 171–179 (2018).

(26) Richmond and Romano: A high performance framework for agent based pedestrian dynamics on gpu hardware, Proceedings of EUROSIS ESM (2008).

(27) Xiaosong, L., Wentong, C. and John, T. S.: Efficient Neighbor Searching for Agent-Based Simulation on gpu hardware, 2014 IEEE/ACM 18th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, pp. 87–96 (2014).

(28) Richmond, P., Walker, D., Coakly, S. and Romano, D.: High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU, Briefings in Bioinformatics, Vol. 2, No. 3, pp. 334–347 (2009).

(29) 牧野嶋文泰，今村文彦： マルチエージェント津波避難シミュレーションの高速化と市街地スケール計算での評価，情報処理学会第 79 回論文集， Vol. 1, pp. 217–218 (2017).

(30) 浅野俊幸，廣川雄一，西川憲明： 群集流動マルチエージェントシミュレーションのための並列処理実装手法の検討，第 18 回情報科学技術フォーラム論文集，Vol. 2, pp. 291–294 (2019).

(31) 岡田崇，山下倫央，野田五十樹ほか： 歩行者シミュレータ NetMAS を用いた網羅的分析，研究報告知能システム (ICS)， Vol. 2012, No. 5, pp. 1–6 (2012).

(32) 副田俊介，山下倫央，野田五十樹： ネットワーク型マルチエージェント人流シミュレータのモデル化とパラメータ調整，人工知能学会全国大会論文集 第 23 回 (2009)，一般社団法人 人工知能学会，pp. 1D2OS610–1D2OS610 (2009).

(33) 倫央山下，俊介副田，正輝大西，育士依田，五十樹野田： 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用，情報処理学会論文誌， Vol. 53, No. 7, pp. 1732–1744 (2012).

(34) Yamashita, T., Soeda, S. and Noda, I.: Evacuation Planning Assist System with Network Model-Based Pedestrian Simulator, Principles of Practice in Multi-Agent Systems, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, pp. 649–656 (2009).

(35) 山下倫央， 岡田崇，野田五十樹： 都市エリアにおける大規模誘導に向けた歩行者マクロモデルの提案，人工知能学会全国大会論文集 第 26 回 (2012)，一般社団法人 人工知能学会，pp. 3F2OS107–3F2OS107 (2012).

(36) 泉野桂一朗，山下倫央，野田五十樹： 時間的制御を組み込んだ歩行者移動のシミュレーションによる効率評価，人工知能学会全国大会論文集 第 28 回 (2014)，一般社団法人 人工知能学会，pp. 4N11–4N11 (2014).

(37) Oguchi, K., Shibuta, Y. and Suzuki, T.: Accelerating Molecular Dynamics Simulation Performed on GPU, Journal of the Japan Institute of Metals and Materials, Vol. 76, No. 7, pp. 462–467 (2012).

(38) 茂渡悠介，酒井幹夫，越塚誠一，山田祥徳： GPU による離散要素法シミュレーションの高速化，粉体工学会誌， Vol. 45, No. 11, pp. 758–765 (2008).

(39) 中村紀香，大代浩一朗，石坂空大，伊藤 尚： 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，IEICE Conferences

Archives, Vol. IEICE-121, No. IEICE-CAS-196,IEICE-NLP-197, pp. IEICE–CAS–51,IEICE–NLP–51–IEICE–CAS–56,IEICE–NLP–56 (2021).

(40) Allen, M. P. and Tildesley, D. J.: Computer simulation of liquids, Oxford university press (2017).

(41) Green, S.: Particle simulation using cuda, NVIDIA Whitepaper, Vol. December 2010 (2010).

(42) 磯崎勝吾,　中辻隆： Social force model を基にした歩行者の避難シミュレーションモデルに関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 66 (2009).

(43)　安藤歩： ソーシャルフォースモデルを用いた教室内における避難行動シミュレーション，東京都立大学都市教養学部都市教養学科卒業論文.

(44) 長名優子，牧石大輝： マルチエージェントを用いた大学等を対象とした避難シミュレーションシステムの高速化，第 75 回全国大会講演論文集，Vol. 2, pp. 387–388 (2013).

(45) Khamis, N., Selamat, H., Yusof, R. and Ismail, F. S.: Magnetic Force Model Approach with Path Finding Feature for an Improved Crowd Movement Simulation (2017).

(46) 後藤仁志，堀智恵実五十里洋行，KHAYYER, A.： GPU による粒子法半陰解法アルゴリズムの高速化，土木学会論文集 B，Vol. 66, No. 2, pp. 217–222 (2010).

(47) Hu, X. and Adams, N.: An incompressible multi-phase SPH method, Journal of Computational Physics, Vol. 227, No. 1, pp. 264–278 (2007).

(48) 平林久義，佐藤雅弘： 線形リストを用いた粒子法の近傍粒子探索，日本計算工学会論文集，Vol. 2010, pp. 20100001–20100001 (2010).

(49) 片寄颯人，中村あすか，富永博文，前川仁孝： 視野を考慮した探索範囲削減による人流シミュレーションの高速化，IEICE Conferences Archives, Vol. 2, pp. 371–372 (2021).

(50) Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic, Nature, Vol. 407, No. 6803, pp. 487–490 (2000).

付 録 A
プログラムの説明

本論文の実装では，SFM を用いた人流シミュレーションを C 言語を用いて実装する．本実装は，関連文献を参考に作成した．本章では，本論文で使用したプログラムのデータ構造やファイル構造，実行方法，測定条件の変更方法，入出力ファイルについて述べる．

A.1　データ構造

エージェントのデータ構造は，agent_t の構造体名で構造体配列として保持する．agent_t の構造体中のメンバを下記に示す．

エージェントの構造体

```
typedef struct{
    int num;
    double x, y;
    double gx, gy;
    int r_num;
    struct route_t *goal_p;
}agent_t;
```

agent_t 中の num のメンバはエージェントの番号，x と y のメンバはエージェントの座標，gx と gy のメンバは目的地の座標，r_num のメンバは経由地の番号，*goal_p のメンバはエージェントが向かう経由地のポインタを示す．経由地のデータ構造造は，route_t の構造体名で構造体配列として保持する．route_t の構造体中のメンバを下記に示す．

経由地の構造体

```
typedef struct{
    int num;
    double x, y;
    double rad:
    int next_num;
    struct route_t *next;
    double **ex, **ey;
}route_t;
```

route_t 中の num のメンバは経由地の番号，x と y のメンバは経由地の座標，rad のメンバは経由地のゴール判定の半径，next_num のメンバは，次の経由地番号，*next のメンバは次の経由地のポインタ，**ex と**ey のメンバは，格子分割を用いた場合の前処理で算出した経由地までの進行方向を保持する配列である．

壁粒子のデータ構造は，wall_t の構造体名で単方向リストとして保持する．本論文は，壁を複数の粒子として実装しているため，壁粒子から受ける力の計算にセル分割法を用いる．壁粒子は，解析開始から終了まで固定されているため，座標が変化しない．このため，壁粒子のセル分割法のデータ構造は，シミュレーション開始の一回のみの生成となるため，連結リスト法で実装する．下記に壁粒子の構造体を示す．

壁粒子の構造体

```
typedef struct {
    double x, y;
    struct wall_t *np;
}wall_t;
```

wall_t 中の x と y のメンバは壁粒子の座標，*np のメンバは次の壁粒子のポインタを示す．下記にエージェントのセル分割法に用いるハッシュ法の構造体 cell_t のメンバを示す．

セル分割法 (ハッシュ法) の構造体

```
typedef struct {
    int *hash;
    int *index;
    int *start;
}cell_t;
```

構造体 cell_t 中の*hash のメンバはハッシュ法のハッシュ配列，*index のメンバはハッシュ法のインデックス配列，*start のメンバはハッシュ法のスタート配列である．エージェントのセル分割法は，時間ステップごとにエージェントの座標が変わるため，時間ステップごとに再構築する必要がある．このため，再構築する速度や保守性の観点からセル分割法の中でもハッシュ法を構造体としてデータを保持する．

A.2　プログラムのファイル構造

SFM を用いた人流シミュレーションのファイル構造を下記に示す．

プログラムのファイル構造

```
sfm_program
├── sfm.c
└── inputwall
    ├── pc_3.c
    ├── kyositu.c
    ├── haba2.c
    ├── haba5.c
    ├── haba10.c
    └── haba20.c
```

sfm.c は，SFM を用いた人流シミュレーションのプログラムであり，C 言語で記述されている．inputwall 内に存在する C 言語のファイルは，sfm.c で用いるエージェントや壁，経由地の初期配置が記述されたコードである．表 A–1 に本論文中の評価で使用した初期配置のファイル名を示す．表 A–1 に示すファイルは，sfm.c 中にインクルードすることで使用することができる．

表 A–1 ： 本論文中の評価で使用した初期配置

配置名	ファイル名
演習室	pc_3.c
教室	kyositu.c
演習室 (dense)	pc_3_dense.c
演習室 (sparse)	pc_3_sparse.c
演習室 (sparse&wide)	pc_3_sparse_wide.c
通路 (幅 2m)	haba2.c
通路 (幅 5m)	haba5.c
通路 (幅 10m)	haba10.c
通路 (幅 20m)	haba20.c

A.3　実行方法

SFM を実装したプログラムのコンパイルは下記のコマンドの通りである．

コンパイル方法

```
gcc [ファイル名] -lm -O3 ‘pkg-config –cflags –libs glib-2.0‘
```

本プログラムの入力データは，GIMP を用いて C 言語に出力したものであり，プログラム上で処理するために glib.h をインクルードする必要がある．glib.h をインクルードするためには，コンパイル時に ‘pkg-config –cflags –libs glib-2.0‘を追記することが必要である．

コンパイルして生成されたファイルは，次のコマンドで実行することができる．

実行方法

```
./[実行ファイル名] [実行ステップ数] [格子サイズ]
```

第 2 引数は，実行ステップ数で解析したいステップ数を入力する必要がある．第 3 引数は，提案手法の格子サイズを入力する必要がある．既存手法で実行する場合は，第 3 引数を使うことがないが仮に入力が求められる．既存のセル分割法と提案手法は．一つのファイルで構成されており，切り替えるために，#DEFINE で定義された変数 (KIZON) が使用されている．表 A–2 に既存手法と提案手法を切り替えるための変数 (KIZON) の状態を示す．

表 A–3 ： 測定条件のパラメータ変数

変数名	内容
A_I	A_i
B_I	B_i
K	k
KAPPA	κ
V_0	v_i^0
M_I	m_i
TAU	τ_i
R_I	r_i
H	刻み値
MAX_SPEED	最大歩行速度
NEIGHBOR_RADIUS	エージェントの影響半径

表 A–2 ： 既存手法と提案手法の切り替え方法

#DEFINE KIZON	既存手法 (セル分割法) で実行
//#DEFINE KIZON	格子分割を用いた進行方向計算の削減手法で実行

表 A–2 に示すように，提案手法で実行する場合は，#DEFINE KIZON をコメントアウトする必要がある．

A.4 測定条件の変更方法

本節では，測定条件のパラメータの変更方法について述べる．測定条件のパラメータは，C 言語中の#DEFINE を用いた変数で設定できる．表 A–3 にそれぞれの変数とパラメータ内容について示す．表 A–3 中のパラメータの初期設定は，表 4–5 と同じ値である．

表 A–4 ： 動作確認済み環境

CPU	Intel Core CPU i5-8259U
メモリ	16GB
OS	Linux 6.5.9
GIMP バージョン	2.10.34

表 A–5 ： 各要素の設定方法

要素名	R	G	B
エージェント	240.0	初期経由地番号	-
壁粒子	0.0	-	-
経由地番号	24.0	経由地番号	次の経由地番号

A.5　初期配置のデータの作成方法

初期配置データの作成方法は，画像編集ソフト GIMP を用いて作成することができる．表 A–4 に本論文で作成したときに動作確認した環境を示す．また，本節で述べるデータの作成方法は，表 A–4 の環境下での作成方法である．

A.5.1　GIMP を用いた初期配置の作成方法

GIMP 画像中の 1 ピクセルの大きさは，プログラム中の変数 GRID_SIZE と同じである．変数 GRID_SIZE は，初期の設定で 0.25m であるため，4 ピクセルで 1m の大きさとなる．1 ピクセルは，RGB と A と呼ばれる 4 要素で構成され，R が赤，G が緑，B が青，A が透過度を示す．本プログラムでは，1 ピクセル中の RGB(RGB225 形式) を用いてエージェントと壁，経由地を判定する．表 A–5 に各要素の設定方法を示す．表 A–5 中のハイフンは，プログラム中で使用しない値である．エージェントの R(赤) に 240.0，G(緑) にエージェントが向かう経由地番号を設定する．エージェントの G(緑) に設定した経由地番号は，プログラム実行時に存在しない場合，エラーとして入力時に中断するため，注意が必要である．壁粒子は，R(赤) に 0.0 を設定する．壁粒子は，解析中動くこともなく，プログラム中で座標の情報のみを使用する．このため，壁粒子の G(緑) と B(青) は，任意の値を設定する．経由地は，R(赤) に 24.0，G(緑) に経由地の番号，B(青) に次進む経由地番号を設定する．

図 A–1 ： GIMP の出力ファイル形式の選択

図 A–2 ： GIMP の C 言語出力画面

A.5.2　GIMP を用いた C 言語の出力方法

A.5.1 節の設定方法で初期配置した場合は，sfm.c を用いたプログラムで使用するために，C 言語で出力する必要がある．C 言語で出よくするためには，図 A–1 に示すように GIMP のエクスポート機能を用いたときに，C ソースコードを出力ファイル形式に設定する必要がある．C ソースコードをファイル形式に設定後は，図 A–2 に示すようなダイアログが表示されるため，図 A–2 と同じようにチェックボックスを付けて保存する．保存後は，sfm.c 中に保存した C 言語ファイルをインクルードすることで使用することができる．

表 A–6 ： 出力の設定方法

出力形式	出力方法
EPS 形式	プログラム中で「#DEFINE EPS」と記述する.
GIF 形式	プログラム中で「#DEFINE GIF」と記述する.

A.6　プログラム実行時の出力フォーマット

本プログラムを実行したときは，下記のような数字が出力される.

プログラム終了時の出力結果

[格子サイズ],[前処理の時間],[解析時間],[エージェント間距離の計算回数],[壁を避ける力の計算回数]

また，本プログラムは解析中の様子や初期配置を出力することが可能である．本プログラムは，画像を出力するために，gnuplot を使用しており，使用バージョンが 5.4 である．表 A–6 に解析中の様子を GIF 形式で出力する方法や初期配置を EPS 形式で出力する方法を示す．それぞれの出力方法を設定した場合は，プログラム終了時に test.gif や test.eps のファイル名で出力される.