

群衆移動時の混雑抑制を目指した経路推薦手法に関する考察

若泉 亮汰[†] 横山 大作[†]

[†] 明治大学理工学研究科 〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区三田 1-1-1

E-mail: [†]{ce205043,dyokoyama}@meiji.ac.jp

あらまし 現在感染症対策としてソーシャルディスタンスの確保が重要視されている。このような世界における経路推薦では、人を目的地に早く到着させることだけでなく、群衆移動の中で混雑を発生させないということを考える必要がある。本研究では、混雑の発生を抑えるような経路選択・推薦の方法について、東京駅付近を舞台とした人流シミュレーションを用いた考察を行う。

実験の結果、前方の人口密度が高いとき、ただその場で待たせるという方法を取ると、スタート地点付近で渋滞が起り移動完了時間も増える様子が現れた。そこで、混雑を考慮した経路推薦の介入を行うと、移動完了時間は短くならないものの、高密度の累積時間が短くなり、混雑を迂回する様子が確認できた。

キーワード 混雑、シミュレーション、経路推薦

1 はじめに

都市圏での人混みや交通渋滞は大きな社会問題であり、人の移動時間の増加は大きな経済的損失につながる。それだけではなく、現在は感染症対策の観点からも、人の移動におけるソーシャルディスタンスの確保が最重要視される社会となった。このような社会での人の移動は、ただ早く目的地に到着するだけでなく、混雑を起こさないような人の移動を考える必要がある。

近年、スマートフォンの普及により、GoogleMap をはじめとするナビゲーションアプリを用いて、多くの人が経路を検索しその経路に従って移動している。そこで推薦される経路は地理情報をもとにした最短経路となっているため、全員がこの経路に従うと全員が主要な道を歩くことになり大混雑を引き起こすことになりかねない。

この問題を解決するために、各個人に適切な経路を推薦することを考える。このとき、時々刻々と変化する混雑情報を考慮した上で、どのような経路を推薦するのかが難しい。そして経路推薦の介入があったとしてもそのとおりに進むとは限らないという問題もある。

そこで、本研究では混雑の発生を抑えるような個人に対する経路推薦アルゴリズムの考察を行う。その中で、本研究ではマルチエージェントシミュレーションを用いる。

マルチエージェントシミュレーションとは、与えられたルールに基づいて自律的に行動するエージェントを単位として、相互作用する多数のエージェントの振る舞いを計算機上に再現する手法である。交通施策評価には、これまでシミュレーションが国や自治体を中心に施策評価などの実用面において活用されてきている[1]。本研究でも多数の人に介入して実験を行うのは困難であるため、シミュレーション環境を構築し、その中で群衆を移動させることで実験を行う。

この論文では、まず作成したシミュレーション構造を説明す

る。交通流シミュレーションを現実問題と対比させるためには、モデルの説明力が不可欠である。ここでは混雑の発生に主眼を置いているため、そのためのシミュレーション環境、エージェントアルゴリズムを説明する。そして東京駅から大手町駅の1起点・1終点の人の移動の移動シミュレーションを行い、人口密度の変動を観察し、アルゴリズムの特徴を論じる。

以下、2章では作成したシミュレーション環境と、そこで登場するエージェントアルゴリズムについて述べる。3章で東京駅周辺の群衆移動のシミュレーション実験、4章で実験結果の考察、5章で関連研究、6章でまとめと今後の展望を述べる。

2 シミュレーションの概要

2.1 問題設定

本研究では、群衆が移動する中で、その一人一人に経路推薦の介入を行うことによって全体の混雑を発生させないような経路推薦方法を求める目的としている。そこで必要になるシミュレーション環境では、一人一人の経路を把握することができて、その一人一人の経路に介入できるようなシミュレーションにする必要がある。そして、混雑状況について、エージェントが移動する中でどれくらい混雑を感じたのかを論じができる仕組みをもたせる必要がある。

そして、人間は必ずしも最短経路を進むとは限らず、経路推薦の介入があったとしても、必ずそのとおりに進むとは考えられない。したがって、エージェントの行動方針には何らかのランダム性をもたせる必要がある。

2.2 シミュレータの構造

交通流シミュレーションは、コンピュータ環境の急速な発達とともに水の流れやボックスとして捉えるマクロスコピックモデル(マクロモデル)[2][3]から、個々の挙動に着目するミクロスコピックモデル(ミクロモデル)[4][5][6]へと移行してきている。本研究では、移動するエージェント一人一人に混雑

を起こさせないような経路推薦の介入を行うことを想定している。そのため本シミュレーションでも人が混雑を回避するための経路変更などの細かな挙動を再現するため、ミクロモデルを採用している。

ミクロモデルにすることで、エージェント一人一人の経路や移動中のどの時間帯に混雑している場所を通ったかといった詳しい情報を手に入れる事ができる。

シミュレーションを考えるにあたり、まず、ミクロモデルとして、1エージェントを表現するクラスが必要となる。このクラスでは位置情報、移動速度といった基本的な情報の他に、どのような経路を進んできて、これからどのように進もうとしているのかの情報が経路推薦を考える上で必要となる。そして本研究では人口密度を重視するために、どれくらい混んでいる道を通っているかがわかるような要素が必要となる。

そして、混雑はこれらの人々の相互作用により発生するため、全体の混雑度をモニターするクラスが必要となる。以上の問題設定を解決するためのシミュレーション環境を設計する。

シミュレータは Python によって設計されており、主にエージェントを表現する People クラスとシミュレーション全体を管理する Field クラスの 2 クラス構成となっている。

マップはリンクとノードからなるグラフで構成されており、詳細は 3.1 に示している。Field クラスはマップを保持する。

エージェントの移動速度はフルーラインの式によって求める [7]。フルーラインの式とは人口密度と歩行速度の関係式で、 x を人口密度とすると、

$$v = 1.356 - 0.341x \quad (1)$$

で表される。フィールド上のエージェントはこの式に従って移動する。

エージェントはこれから進むルートを保持してそれに従って進む。ルートの選択方法や変更のタイミングは後述するエージェントの種類によって変わる。エージェントは自分が進んだルートや毎秒自分が位置するリンクの人口密度を記録しており、この値をもとに実験で混雑度の評価を行う。

2.3 確率経路選択エージェント

マルチエージェントシミュレーションにおける、交通利用者の利用経路推計として、利用者均衡配分法 [9][10] が多く用いられてきた。これはエージェントは各経路の所要時間を完全に知っており、常に最短経路を選択するということを仮定した上で、交通量を道路ネットワークに配分するものである。しかしながら、当然実際のエージェントは限られた情報しか持たず、常に最短ルートを選択するとは限らない。

そこで、本シミュレーションではより一般人の経路選択の方策らしいアルゴリズムとして確率的な経路選択を使う [8]。このアルゴリズムは分岐点でそれぞれの候補経路の最短ルートの比率から進む経路を選択する。つまり同じ距離の道があれば半分の確率になり、差がある場合はより短いルートを選びやすくなる。そしてある時間だけ（本シミュレーションでは 1 分から 5 分）その経路を進むと次の分岐点で再び確率選択を行う。こ

れにより、人間らしいランダム性が生まれる。

以後登場するアルゴリズムはこの確率経路選択アルゴリズムがベースとなっている。

2.4 待つエージェント

混雑を起こさないための方策として、最も単純な方法としてその場に待つという方策が考えられる。待つエージェントは前方のリンクの人口密度を毎秒観察していて、人口密度が $0.25[\text{人}/\text{m}^2]$ 以上の場合移動せずにその場にとどまる。この数値はソーシャルディスタンスを $2[\text{m}]$ に保つことを考えたときの数値であり、単純に $4[\text{m}]$ 四方にエージェントが 1 人であれば $2[\text{m}]$ に保つことからこの値となった。その他は確率選択エージェントと同じ仕組みである。

2.5 混雑を考慮するエージェント

このエージェントは全体の混雑情報を把握することができるエージェントである。そして、現在の混雑情報を元に最短経路を求める事ができる。混雑を考慮した上で最短ルート（移動時間が最小となるルート）探索アルゴリズムは A*アルゴリズムをベースに作られており、コストを混雑度から推定されるリンクを歩く速度とすることで求めることができる [8]。

このエージェントの方策は確率選択エージェントにおける分岐点での候補ルート検索時の探索を、混雑考慮の経路探索に置き換えたものである。すなわち人が多く、（混雑状況は時間とともに変化するため確実ではないが）移動に時間がかかるであろう方向は選ばれにくくなる方策となっている。これにより、混雑を避ける動きが期待される。

3 実験

3.1 シミュレーションの舞台

本研究では国土交通省が公開している歩行者移動支援サービスに関するデータサイトの歩行空間ネットワークデータ等（東京駅周辺）（2018 年 3 月版適用）を利用した¹。このデータは東京駅周辺の道路情報をノード情報とリンク情報の 2 つの csv



図 1 東京駅周辺マップ

1:「歩行者移動支援サービスに関するデータサイト」<https://www.hokouukan.go.jp/top.html>

ファイルで表しており、ノード数が 4161 個、リンク数が 4947 個から構成される。リンクデータ及びノードデータには、道路に関する様々な情報が記載されているが、本研究では id や隣接ノードといった基本的な情報のほか、人口密度を計算するため、リンクの長さと幅を使用した²。

図 1 の赤で強調されたノードは東京駅南口と大手町駅の位置である。本シミュレーションでは東京駅南口から大手町駅まで 1 起点・1 終点の群衆が移動する様子をシミュレーションする。

3.2 確率経路選択エージェント、待つエージェントの比較

最も単純な乗降客の動きを想定して、東京駅南口からエージェントを 1[s] 間に 5 人ずつ、合計 1000 人を大手町まで歩かせるシミュレーションを行う。まず確率選択エージェントと待つエージェントでのシミュレーションの移動完了時間や混み具合を比較する。

確率経路選択エージェントの移動の様子を図 2、待つエージェントの移動の様子を図 3 に示した。赤いリンクはエージェントがいるリンクを表しており、太さが人口密度を表している。両グラフとも左が 200[s] 時点での様子(すべてのエージェントが出現する時間)、右が 500[s] 時点での様子を表している。

図 3 の左のように、待つエージェントはスタート地点での大混雑が顕著に現れた。これは先に進めないエージェントが立ち止まっている状態で新たにエージェントが駅から出現するため起きる。

図 4 はエージェントの平均人口密度の比較である。エージェント N の平均人口密度とは、エージェント N がスタートから



図 2 確率経路選択エージェント 200-500s



図 3 待つエージェント 200-500s

2: データの詳細は「国土交通省 制作統括官付「歩行空間ネットワークデータ等整備仕様」を参照

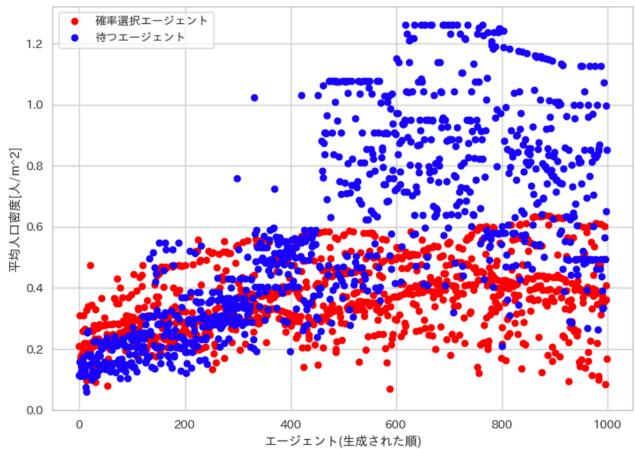


図 4 平均人口密度比較

ゴールまでの毎秒で自身の位置するリンクの人口密度を記録しておき、スタートからゴールまでの混雑を平均したものである。図 4 では 1000 人のエージェントを生成された順番に x 軸上に並べた平均人口密度をグラフ化した。

この図から確率選択エージェント(赤)の平均人口密度は出現した順番にほとんど関係ない値を取ることがわかる。これに対し、待つエージェント(青)は最初に生成されたエージェントの平均人口密度は比較的低くなっているものの、後から生成された待つエージェントの平均人口密度は高くなっていることが読み取れる。

3.3 3 種類のエージェントの比較

混雑を考慮するエージェントも 3.2 と同様に 1000 人生成し移動させる実験を行った。

図 5 は 4 種類のエージェントの平均人口密度の比較である(待つエージェント(スタート補正)は 3.4 で説明する)。平均人口密度が小さい順にエージェントがソートされている。

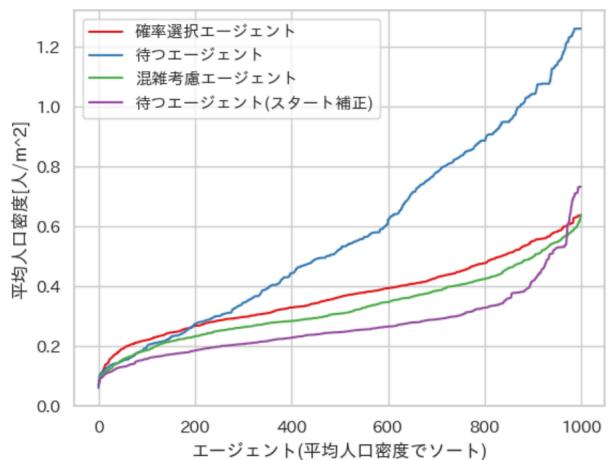


図 5 人口密度比較

図 5 から、まず待つエージェントの平均人口密度は高くなっていることがわかる。次に、確率選択エージェントと混雑考慮エージェントを比較すると、同じようなグラフの形を取り、混雑考慮エージェントのほうが低くなっていることがわかる。

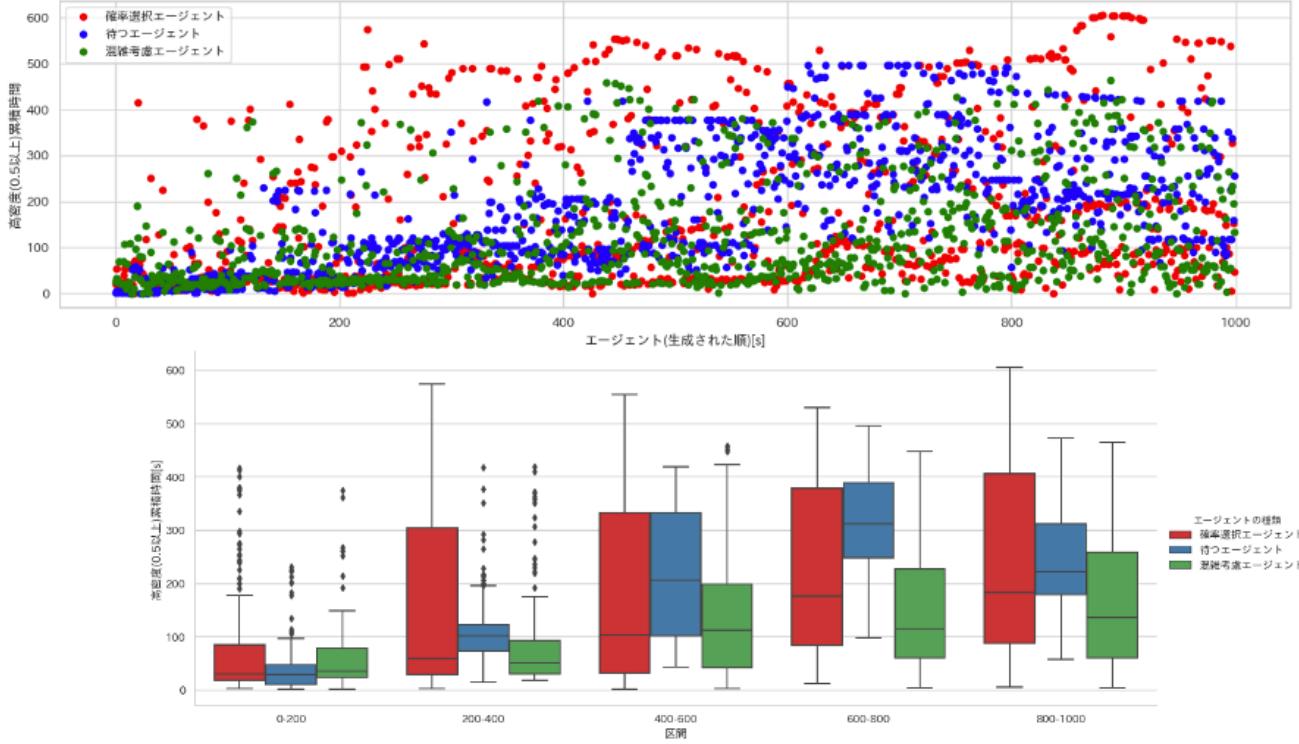


図 6 高密度 (0.5 以上) 累積時間の分布及び箱ひげ図

図 7 は 3 種類のエージェントの移動完了時間 (スタートからゴールまで) の比較である。図 5 と同様に、移動完了時間が小さい順にエージェントがソートされている。

まず、待つエージェントは全体的に移動完了時間が長くなっていることが読み取れる。そして、確率選択エージェントと混雑考慮エージェントの移動完了時間はほとんど変わらないという結果になった。

最後に、3 種類のエージェントがどのくらいの時間、混雑度の高い場所にいたのかを集計した。図 6 の上のグラフは各エージェントが高密度 (ここでは人口密度 $0.5[\text{人}/\text{m}^2]$ 以上) のリンクにどれだけいたかの累積時間をグラフにしたものである。横

軸はエージェントが生成された時刻順で並んでいる。下のグラフは上のグラフを生成された時刻で 200 人ずつ区間に分けて高密度累積時間を箱ひげ図にまとめたものである。

確率選択エージェントは、他のエージェントに比べてどの区間でも幅が広くなっている。これは、長い時間高密度な群衆の中を移動する人が生まれやすいことを意味する。

待つエージェントははじめの 0-200 区間、どのエージェントよりも高密度累積時間が短くなっている。しかしながら、後ろの 400-1000 区間の待つエージェントの累積時間は高い値になっている。

混雑を考慮するエージェントはどの区間でも低い水準を保っているように読み取れる。特に後半の区間は他のエージェントの累積時間が増えているが、このエージェントは比較的増えていない。

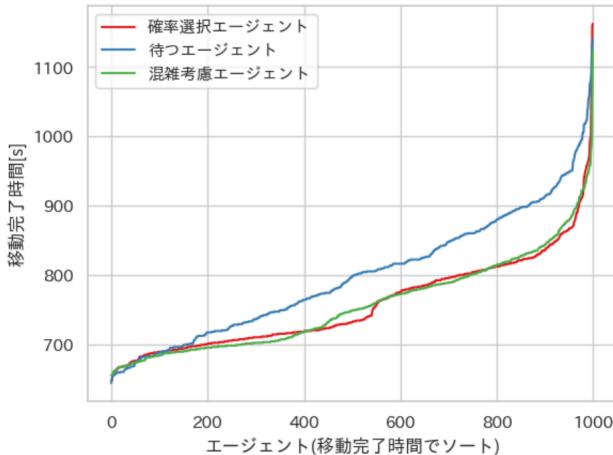


図 7 移動完了時間の比較



図 8 経路を迂回する様子

図 8 は確率選択エージェントと混雑を考慮するエージェントの移動の様子を並べたもので、ある時刻の各リンクの人口密度を可視化したものである。左が確率選択エージェント、右が混雑を考慮するエージェントの移動の様子である。

図 8 で紫で強調した部分がエージェントの迂回が見られた経路である。これらは前方の経路が混雑している時に迂回路を選ぶという原理のため、集団後方にいくにつれて分岐する傾向が見られた。しかしながら、図 7 にあるように、確率選択エージェントと混雑考慮エージェントの移動完了時間にはあまり相違がないため、迂回したから移動時間が長くかかるということはないといふことができる。ただし移動距離は長くなる可能性がある。

3.4 スタートを改良した待つエージェント

待つという方策を評価するに当たり、スタート時の大混雑が平均人口密度の上昇に大きな影響を与えていて、その後の移動の様子を十分に評価できないと考えたため、スタート時の人口密度が $0.25[\text{人}/\text{m}^2]$ 以上のとき、出現させないという制限を変えた実験を行った。このエージェントは待つエージェントのスタートの大混雑を取り除いた安定状態の様子を評価するためのものである。図 5 として平均人口密度をグラフにした。

このグラフによると、約 6 割の人は平均人口密度を $0.3[\text{人}/\text{m}^2]$ 以下に抑えることができることがわかる。しかしながら、このエージェントはスタートの混雑を意図的に解消しているため、他のエージェントと比較するものではない。あくまで待つエージェントはスタートがボトルネックになっているということを表すためのものである。

4 考 察

図 4、図 5 から、待つという方策は混雑解消につながると考えられたが、連続的にスタート地点から人が出現する場合、スタート地点付近での大混雑を引き起こすことになるため、単純に待つという方法は混雑を解消するための経路推薦アルゴリズムに単純に実装することはできない。しかしながら、スタート地点付近を抜けると確率選択エージェントよりも、低い人口密度を保って安定している様子が見られたため、場合を選べば待つという方策が混雑解消に役に立つ場面があると考えられる。実際に 3.4 での実験結果のように、ボトルネックであるスタート地点の混雑を解消すると平均人口密度がかなり低くなつた。

図 6 より、確率選択エージェントは高密度リンクに長く滞在する可能性があることが明らかとなった。これは確率選択エージェントは一度混雑した群衆に入ると、そこを抜け出す見込みが薄いために起きると考えられる。

図 6 より、待つエージェントは最初の区間、他のエージェントよりも高密度累積時間が短くなることが分かった。これは後ろの区間のエージェントが待つことにより前の人々の人口密度が上がらないため起きると考えられる。

図 7 を見ると、待つエージェントは進まない時間を設ける分、遅くなるだろうと予想していたが、混雑考慮エージェントの群衆の移動完了時間のグラフが確率選択エージェントの群衆の移動完了時間のグラフと形が同じであることは予想外であった。混雑考慮エージェントの経路探索方法は混雑を考慮した上で移動時間をもとにしているためである。しかし、平均人口密度や高密度累積時間を少なくする効果があることが図 5、図 6 によって示された。これは群衆の移動の中で混雑抑制ができたということになる。

衆の移動完了時間のグラフが確率選択エージェントの群衆の移動完了時間のグラフと形が同じであることは予想外であった。混雑考慮エージェントの経路探索方法は混雑を考慮した上で移動時間をもとにしているためである。しかし、平均人口密度や高密度累積時間を少なくする効果があることが図 5、図 6 によって示された。これは群衆の移動の中で混雑抑制ができたということになる。

5 関連研究

交通渋滞の緩和を目的とした研究テーマとして、DRGS(Dynamic Route Guidance System)がある。これはリアルタイムに道路の交通情報を取得し、車両に対して最適な経路を提供する動的経路誘導システムである。

Souza et al. [11] は、CHIMERA (Congestion avoidance through a traffic classification Mechanism and a Re-routing Algorithm) という DRGS を提案している。CHIMERA は、対象エリア全体の交通量を最適化するために提案されたシステムであり、k-shortest path algorithm を用いて迂回路を算出し、複数の経路に車両を確率分布に従って分散させることによって、迂回先で新たな渋滞が発生する確率を低減している。

Pan et al. [12] は、DSP (Dynamic Shortest Path), RkSP (Random k Shortest Path), EBkSP (Entropy Balanced k-Shortest Paths), FBkSP (Flow Balanced k Shortest Path) と呼ばれる経路誘導手法を提案している。DSP は各車両の予定路を除く迂回路の中から最も推定走行時間が低くなる経路を提供するという方法である。この方法は迂回路で新たな渋滞を引き起こす可能性がある。RkSP は k 本の迂回路の中からランダムで一つ経路を選択する手法である。EB k SP は複数の迂回路を用意し、どの車両をどの経路に割り当てるのか、割当数を決めて、その値が小さい迂回路から車両を割り当てるという手法である。

これらの手法は車両の混雑を引き起こさないための経路推薦方法である。人流での経路推薦では、車両のように推薦通りに移動するとは限らないため全体が管理できた上で推薦は難しいが瞬間の経路選択の方法として参考になる。本研究では、混雑を考慮した最適な経路がユーザーに与えられたとしても、その点を考慮して確率的に経路を選択するというシミュレーションとなっている。

6 まとめと今後の展望

本研究では、群衆移動時の混雑を抑制するための経路推薦手法を考察するために、待つことや混雑度を考慮した最短経路アルゴリズムを実装したエージェントを作成して、群衆移動をシミュレーションし、混雑度の変化を調べた。その結果、待つという方策は全体としてはスタートで大混雑を起こす可能性があり、ただ待たせるというのは群衆移動において危険であるということがわかった。したがって、前方が混雑している場合は、別の道を迂回させる経路推薦が必要となる。次に、混雑を考慮した上で経路推薦の介入を行うと、混雑の高密度累積時間を短くすることができて、移動の様子からは後方の群衆が迂回路

を移動する様子が確認できた。これはこのシミュレーション内では、混雑の発生を抑える経路推薦ということができる。迂回路を通るため、移動距離は長くなるが、移動時間は介入前のエージェントと比較して変化がなかった。

今回使用した混雑を考慮する経路推薦アルゴリズムは、混雑しているマップの中で、最も移動完了時間が短くなるような経路を求めるものであった。そのため、たとえ混んでいたとしても、そのルートを通るほうがゴールに早く到着する場合は混雑した道を選んでしまう恐れがあった。このアルゴリズムのコストを速度ではなく、人口密度にすることで、人口密度が高い場所に行かないというアルゴリズムにすることができるれば、より混雑を避けるような動きになって全体の混雑も発生しにくくなる事が考えられる。

また、アルゴリズムが考慮するマップの混雑状況は探索の瞬間のものであるため、実際に混雑している場所が、そこに到着する時点では解消されている、あるいはその逆となる可能性も考えられる。したがって、一定時間後の混雑状況を推定して経路探索アルゴリズムを組み込むという方法は混雑考慮アルゴリズムの精度を上げることに繋がる可能性がある。

そして、迂回路を推薦されたエージェントがそうでないエージェントとどれくらい移動距離に差があるのかを調べる必要がある。ごく一部の人だけが遠回りさせられるということは推薦経路の不満足さに関わる可能性がある。

文 献

- [1] 森俊勝 ”日本におけるマルチエージェントシミュレーション活用の動向” 情報処理 Vol.55,No.6,pp.585-590 (2014)
- [2] M.D.Hall,D.V.Vliet and L.G.Willumsen ”SATURN-a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes” Traffic Engineering Control (1980)
- [3] 飯田恭敬, 藤井聰, 内田敬 ”道路網における経路選択を考慮した動的交通流シミュレーション” 土木学会論文集. No.536/IV-31.37/47(1996)
- [4] M.Van Aerde and S.Yagar ”Dynamic Integrated Freeway/Traffic Signal Networks:A Routing-Based Modeling Approach” Transportation Research A.22.445/453 (1998)
- [5] Q.Yang and H.N.Koutsopoulos ”A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems” Transportation Research C.4-3 113/129(1996)
- [6] G.Cameron ”PARAMICS-Moving Vehicles on the Connection Machine” IEEE Conference Computer Society Press pp.291-300(1994)
- [7] ジョン・J・フルーレイン ”歩行者の空間” 鹿児島出版 (1974)
- [8] 若泉亮汰, 横山大作 ”全体最適化を目指した経路推薦システムのための混雑情報伝達に関する考察” DEIM Forum 2020 J5-3 day2 p77 (2020)
- [9] 赤松隆, 赤松隆 ”渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分 1 起点・多終点および多起点・1 終点 OD ペアの場合” 土木学会論文集 No.488/IV-23,pp.21-30 (1994)
- [10] 松井寛, 藤田素弘 ”高速道路を含む都市圏道路網における利用者均衡配分モデルの実用に関する研究” 土木学会論文集 No.653/IV-48,85-94 (2000)
- [11] Allan M.De Souza, Roberto S. Yokoyama, Guilherme Maia, Antonio Loureiro and Leandro Villas ”Real-Time Path Planning to Prevent Traffic Jam Through an Intelligent Transportation System” IEEE Symposium on Computers and Communication(Volume:1, pp.726-731) (2016)
- [12] J.Pan, I.Sandu Popa, K.Zeitouni, and C.Borcea ”Proactive Vehicu-