

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

若泉 亮汰[†] 横山 大作[†]

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

E-mail: [†]{ee67051,dyokoyama}@meiji.ac.jp

あらまし GoogleMap に代表されるナビゲーションアプリでは、現在の状況から最善の経路を推薦することができる。しかし、個人の動きを考慮して積極的にコントロールするような介入は行われていない。そのような介入ができれば人の混雑が予想される大規模なイベント時に、マクロな視点から全体最適(全体の移動完了時間を短くする)を目指すことができる。本研究の目標は、人の移動が困難になるような混雑が起きる大規模群衆の移動に主眼を置き、混雑情報を考慮した経路選択への介入によって全体の移動完了時間にどのような効果が出るのかを明らかにすることである。

シミュレーションを用いた実験の結果、経路推薦の介入ができるエージェントが増えるほど全体の平均移動完了時間は短くなった。さらに、介入したエージェントは当然移動完了時間が短くなるが、全体の7割以上に介入できること、情報のないエージェントについての恩恵も増加することが明らかとなった。

キーワード 人流、シミュレーション、混雑、経路推薦

1 はじめに

多くの人が日常的に GoogleMap に代表されるスマートフォンのナビゲーションアプリを使っており、特にはじめて訪れる地では不可欠なものになっている。これらのアプリケーションは瞬時に目的地までの最短経路を求め、場合によっては移動に制限がある場所を考慮するといった賢い経路が推薦される。

しかし、このようなアプリケーションを用いても、大規模な群衆が移動するような状況では、全員が同じ経路を推薦されてしまい、その経路が混雑することで、全体の移動完了時間が遅くなるということが起こりうる。したがって、現状大混雑が予想されるイベント会場では、最短経路(ナビゲーションアプリが推薦するであろう経路)に人が流れすぎることの無いよう、警備員を配置することで、別ルートに人を誘導するという方法を取らざるを得ない。ここで、例えば群衆の一部に異なった経路を提示するなどの方法を取れば、全体の移動完了時間を短くできる可能性がある。

本研究の目的は、混雑情報を考慮した経路選択への介入によって大規模な群衆全体の移動完了時間にどのような効果が表れるのかを明らかにすることである。ここでの結果は全体最適を目指す経路推薦システムの実装する際に大いに役に立つ。

現在はスマートフォンの GPS 機能によって他のユーザーの位置情報を集める、またはカメラや衛星からの映像を用いることで、理論的には混雑状況をリアルタイムで知ることができる。しかし、何度も条件を変えながら介入して実験するのが困難であるため、本研究ではシミュレーションを用いて実験を行う。

大混雑は頻繁に起るものではなく、スタジアムでの大きなイベントなどの特別な条件の中で起きやすい。この点でも、シミュレーション内であれば、繰り返し再現実験を行うことがで

きて都合がよい。そしてシミュレーション内で効果の検証ができるれば、実世界でもスムーズに実装に移ることができる。

この論文では、まず作成したシミュレーションの構造を示した後、各エージェントの挙動を小さな道路ネットワークで確認する。そして、日産スタジアムがある新横浜地区をシミュレーションの舞台として取り上げ、日産スタジアムから新横浜駅へ向かう大人数移動のシミュレーションを行い、混雑情報の介入の割合を変えながらどのくらいの効果の差が表れるのかを比較した。

介入して経路推薦ができるエージェントが増えるほど、全体の移動完了時間は短くなった。その中でも、情報介入されたエージェントの移動完了時間が短くなることは予想される事であったが、介入が7割を超えると、情報介入のされていないエージェントの移動完了時間の減少率が高くなるという結果が出た。これは、このシステムを実世界で実装する際の普及率の指標となると考えられる。

以下、2章では作成したシミュレーション環境の構造について、3章ではシミュレーションを用いた経路推薦システムの実験、4章では関連研究について、5章でまとめと今後の展望を述べる。

2 群衆シミュレータの設計

2.1 問題設定

本研究では図 1 のようなシステムの実装を想定したときに問題となることを人流シミュレーション内で実験を行うことで明らかにすることを目的としている。このシステムは全体の混雑状況を推定し、混雑を考慮した経路を各ユーザーに推薦するこ

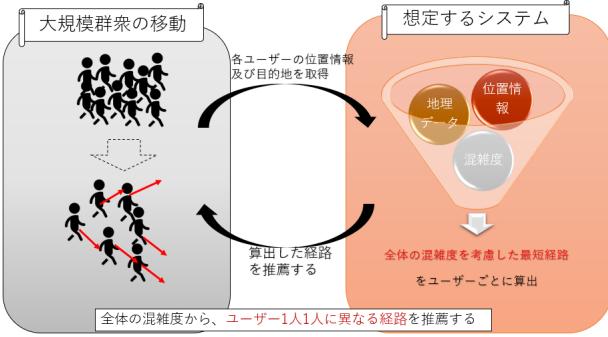


図1 想定するシステム

とによって大規模群衆の移動時間を短くすることを目的とする。そのためにはいくつかの問題がある。第一にどのようなアルゴリズムで混雑を考慮した最短経路を算出するかという問題である。地理マップのような大規模なマップで経路探索ができないければならず、さらに混雑は毎秒変化するため、あらかじめ求めておき計算コストを減らすという方法が取れない。そのため高速で動くアルゴリズムを設計しなければならない。

第二に混雑を考慮した全体最適の経路を求めることができても、実世界ではそこにいる人全員に経路を推薦できるとは限らないという問題がある。さらにはすでに最短経路を知っている人は推薦に従わないという可能性もある。そこでどの程度の人が混雑を考慮した推薦に従うことでどの程度の全体最適が実現できるのかという割合には重要な意味がある。

第三に本論文が目的とすることを実験するシミュレーション環境が必要となる。伊藤らの定義を引用すると、アカデミックな立場でのシミュレーションは現実の事象にただ似せるだけではなく、シミュレーションの目的にも言及する必要があり、シミュレーションは「現実の現象を模擬することによってその現象の解析や予測を行う実験的・補助的な手法であり、時間、費用、危険などを軽減する目的で行われる」ものでなければならない[1]。そのため本研究では人を模倣したエージェントを経路推薦ができない一般人と経路推薦の介入ができるエージェントに分けて考えることで本研究の目的となる実験ができるシミュレーション環境を設計した。

2.2 シミュレータの概要

群衆一人一人を表現することができるよう、1人の人間を1オブジェクトとして扱っている。この方法を取ることで、個別に歩行ルートを推薦することができ、それぞれに属性を割り当てるといった細かい設定をすることができる。

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3.2.1に示している。エージェントはリンク内での位置と歩行速度と今後通過する予定のゴールまでのリンクのリストを持っている。

シミュレーションの1ステップは1[s]間の動きを想定しており、図2→図3→図4の順に進む。まず、ステップ1ではリンクごとに速度の算出を行う。これはシミュレーションに混雑を

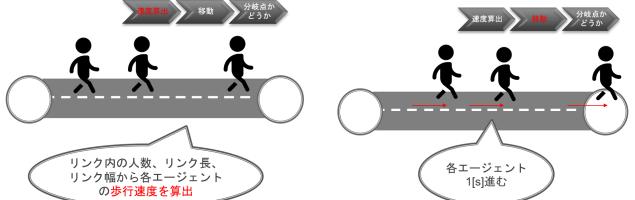


図2 ステップ1

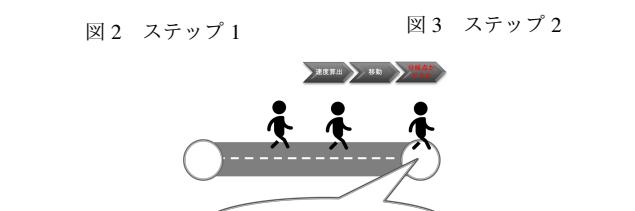


図3 ステップ2

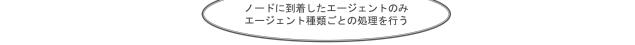


図4 ステップ3

取り入れるためのもので、リンクの長さ、幅、リンク内人口から人口密度を計算し、フルーリンの式で歩行速度を求める[2]。フルーリ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。

ステップ2で、1[s]分それぞれのエージェントを進める。速度は[m/s]を基準にしているため、速度分自分の位置を進める。

各エージェントはノード（分岐点の場合もあれば道の途中にもある）に到着すると、それぞれのエージェント種類特有の処理を行う。これをステップ3とする。すべてのエージェントの処理が終わると、ステップ1に戻る。エージェントの処理は後述する。

このようにステップごとの処理に分けることによって、すべてのエージェントの時間軸をそろえてシミュレーションを動かすことができる。ステップを分けずに処理を進めると（例えば生成されたエージェント順）シミュレーション空間に違う時間軸のエージェントが生まれるという問題が起きる。

2.3 混雑情報なしエージェント

経路推薦システムの検証において、経路推薦の介入ができない一般ユーザーが必要となる。このエージェントは、混雑情報を持たず、一般的なユーザーの挙動モデルである。このエージェントは分岐点に到達したとき、どのノードに進むのかをその都度確率を計算して、その確率に沿って経路を選択して進む。

図5のPositionに到達すると、まず次に移動する候補となるノードから目的地まで、最短ルートを歩いたときにかかる時間を計算する（図5の点線部）。最短ルートはA*アルゴリズムを用いて求める。この時、このエージェントは先の混雑度が分からぬことを想定しているので、ここで求める時間に混雑度は考慮されない。

次に、求めた時間に現在のノードから候補ノードまで（色付

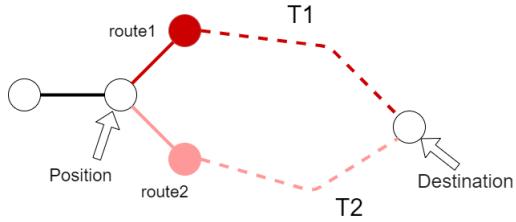


図 5 確率選択エージェントの分岐点

線部)にかかる時間を加えたものを T とする。それぞれの候補ノードごとの T が求まると、次に進むノードを確率的に選択する。

選択する確率は、最短時間との比率によって求める。 n 本の経路のうち経路 i が選ばれる確率 P_i は、経路 i でかかる時間 T_i 、最短経路となる経路でかかる時間 T_{min} を用いて、

$$y_i = -\frac{T_i}{T_{min}} + 2 \quad (2)$$

$$P_i = \frac{y_i}{\sum_{k=1}^n y_k} \quad (3)$$

として表される¹。式では、現実的に経路の差が二倍以上ある場合、その経路に進む人はいないと考え、式 2 の切片を設定している。

そして、ノードを選択した後は、選択したノードで求めた終点(図 5 では Distination)までの A*アルゴリズムが出す経路に沿って次の分岐点まで進む。

このようなアルゴリズムに従うことによって、ある程度同じ時間がかかる経路はある程度均等な別れ方をし、最短ルートが明らかな場合は、最短ルートに多くの人が流れ、一部別ルートを選択するといった挙動を表現することができる。

2.4 混雑情報ありエージェント

このエージェントは経路推薦システム内のユーザーをモデルにして作成したものである。このユーザーは自身の速度が低下すると、経路推薦システムから混雑を考慮した経路推薦システムによって経路を推薦され、その通りに経路を変更する。

全体の混雑度の推定は困難な問題だが、本シミュレーションでは全体の混雑具合はあらかじめ求めることを想定している。

このエージェントはちょうどノードに位置した時、次に進むことになっているリンクの混雑度から、自分がそのリンクを進む速度をあらかじめ計算する。そして、その速度が一定以下(本研究では 0.4m/s 以下に固定²)になったとき、今の位置をス

1: 別の確率モデルとして、かかる時間の逆数の比率を使うモデルも実験した。こちらの方が直感的な式に思えたが実験の結果、経路の長さの影響が出にくかったため、本論文では最短経路との比率のモデルを一般人を模倣したエージェントとした。

2: 予備実験として混雑を考慮する閾値についての実験を行った結果、0.4m/s が最も良いという結果が出たため、本論文でも 0.4m/s としている

タート地点とした、混雑度合いを考慮した最短経路探索のアルゴリズムを用いて、新たなルートを検索し、そのルートに進路を変更する。

このような仕様にすることによって、混雑している経路を避けるルート選択をすることができる。

2.5 混雑を考慮した最短経路探索アルゴリズム

本研究が目指す経路推薦システムの構築には混雑を考慮する最短経路探索アルゴリズムが不可欠である。このアルゴリズムは単純に最短距離の経路を導くだけでなく、混雑度を考慮しながら最も早く目的地に着くルートを探してきなくてはならない。そして、混雑度は毎秒変化するものであるため、何度も呼び出す必要がある。そのため地理空間のような巨大なマップ上でも高速で経路探索ができなくてはならない。

本研究では、このアルゴリズムを A*アルゴリズムをベースとして作成した。g コスト、f コストはそれぞれ移動にかかる時間として計算を行っている(混雑を考慮したアルゴリズムなので、必ずしも距離が短いものが最短になるとは限らないため)

A*アルゴリズムにおける g コストを計算するときのエージェントの速度をフルーリンの式 1 で求める。ヒューリスティック関数は終点までの直線距離を歩くのにかかる時間を用いている³。 f_l を A*アルゴリズムにおけるリンク l の f コスト、 v_l をリンク l を歩くときの歩行速度、 T_{goal} をゴールまでの直線距離を歩くのにかかる時間、 N_l をリンク l 内人数、 L_l をリンク l の長さ、 W_l をリンク l の幅とすると、混雑を考慮する最短経路探索アルゴリズムの f コストは次のようになる。

$$f_l = \frac{L_l}{v_l} + T_{goal} \quad (4)$$

$$v_l = 1.356 - 0.341 \times \frac{N_l}{L_l \times W_l} \quad (5)$$

式 4 は A*アルゴリズムの式である。式 5 は式 1 のフルーリンの式をこのシミュレーションに合わせて表したものである。

式 4・5 より、リンクの長さ L_l が短くても人口密度が高くなると v_l が落ちて、 f_l の値が大きくなることが分かる。このことから、コストを距離だけでなく、混雑しているリンクのコストは実際よりも大きくなり、したがって混雑度を考慮したルートを求めることができる。

3 実験結果

3.1 小さなグラフでの挙動

エージェントの挙動が本研究の想定したものとなっているかどうかを確認するためには、現実世界を模倣した大きなマップで実験するよりも、単純なグラフで実験した方がエージェント

3: 地図上の直線距離は GoogleMapAPI として使われている球面三角法を用いる。複数の方法を試した結果、球面三角法がこのマップデータに適していたためである

の挙動を捉えやすい。

この実験によってまず、情報なしエージェントが一般人らしい経路選択をしているのかを確認する。次に、情報ありエージェントが全体の混雑情報を用いた経路推薦通りに動くことによって、混雑を避ける動きが取れているかを確認する。

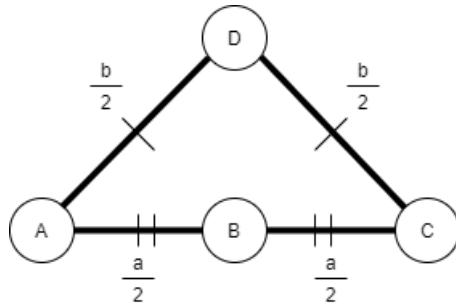


図6 小さなグラフ

グラフは4つのノードと4つのリンクから構成されている二等辺三角形、ノードAを始点として、ノードCを終点とする。リンク長は $AB+BC=a$, $AD+DC=b$ とする。

作成したグラフ(図6)は2つのルートがあり、最短経路となるルートと、長さが可変のルートがある。それぞれのエージェントが可変のルートの変化によってどのようなルート選択をするかを見ることによって、エージェントの挙動を確認することができる。

3.1.1 混雑情報なしエージェントの挙動

混雑情報なしエージェントをノードAからノードCに向かって200人生成したときの人の分かれ方を表1にまとめた。値は100回シミュレーションを行い、平均を取ったものである。

表1 小さなグラフ 情報なしエージェントの挙動

a[m]	b[m]	ABC[人]	ADC[人]	比率(ABC/200)
100	110	106.5	93.5	0.5325
100	120	111.0	89.0	0.5550
100	130	117.4	82.6	0.5850
100	140	124.5	75.5	0.6225
100	150	132.4	67.6	0.6620
100	160	141.4	58.6	0.7070
100	170	153.5	46.5	0.7675
100	180	167.3	32.7	0.8365
100	190	182.0	18.0	0.9100
100	200	200.0	0.0	1

この結果から、最短経路ともう一方の経路の差が同じ程度の時は、最短経路を50%強で選び、もう一方の経路が長くなるにつれ、最短経路を選ぶ確率が上がっていくことが分かる。そして、もう一方の経路が最短経路の2倍になったとき、そのルートは選択されなくなる様子も確認できた。

まとめると、同じような長さの経路がある状況下では、どの経路も同じ確率で選ばれ、別の道が長くなるにつれそちらを選

ぶ人の割合が少なくなっていく。そして式2で設定したように、二倍をこえるとその経路は選択されなくなる。この結果から、本研究で定義した一般の挙動を再現できていると確認できた。

3.1.2 混雑情報ありエージェントの挙動

混雑情報ありエージェントの挙動をより細かく分析する。混雑情報ありエージェントはグラフに人がいないときは、最短ルートを通るのだが、最短ルートが混み始めると、最短ルートの重みが増え始め、いずれもう一方の道を選択するようになると考えられる。

この実験では、1000人が目的地に到着するまでノードAに混雑情報ありエージェントを発生させシミュレーションを動かす。図7・8はその1000人がどちらのルートを選択したのかを表現したものである。縦軸の値は、到着したエージェントの中で、最短経路を選んだエージェント数で、横軸の値は到着した人間の数を表す。すなわち、全員が最短経路を選択すると、単調増加の直線になるが、別のルートを選択されると縦軸の値が増えず、グラフが横に伸びていくという見方ができる。

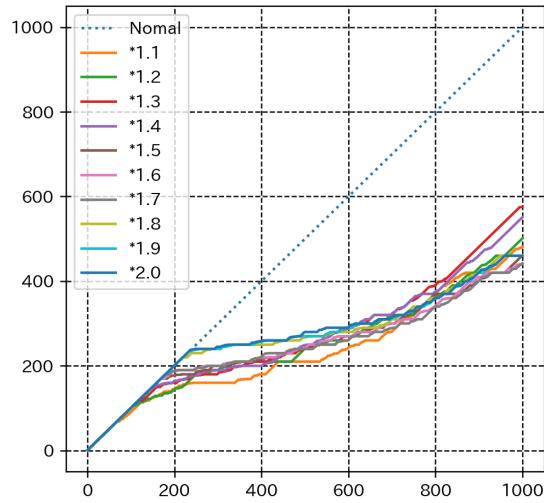


図7 混雑情報ありエージェントの選択ルート

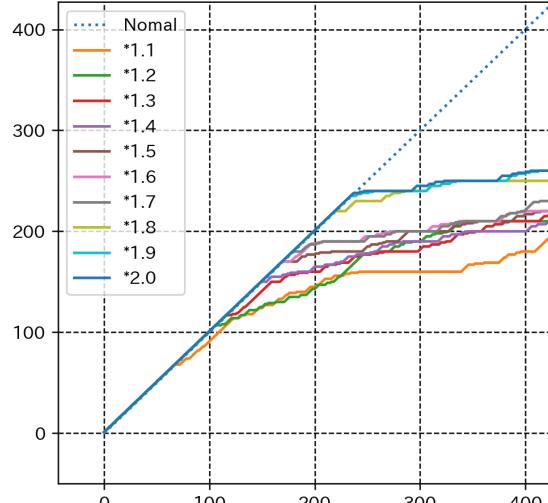


図8 図7の拡大

図 8 は図 7 を拡大したものである。図 8 を見ると、2 つのルートの差が短いものから順に分かれ始めているのが分かる。このことから、エージェントは道が混み始めると別のルートを探し始め、別のルートが短いほど別のルートを選択するという挙動を取っていることが確認できる。これはルート選択をルートの距離だけでなく、混雑度を考慮に入れ、コストの比較をしているため起きる。

次に図 7 を見ると、時間がたつと、どのグラフも同じようなジグザグした挙動になっている。これはグラフ内にある程度混みあってきて、両方のルートの h コストが均等になっているため起こる現象であり、すべての道が混んでおり、迂回のしようがない状態である。

3.2 新横浜グラフでの実験

本項では、大規模かつ現実的なマップでエージェントを動かし、エージェントの割合によって移動完了時間にどのような変化が起こるのかを確かめる。本シミュレーションでは、日産スタジアム東ゲートから新横浜駅へ群衆が移動する状況を想定している。

日産スタジアムは収容人数 72,327 人のスタジアムで、サッカーやラグビーの試合観戦やライブなどが定期的に開催される。主要なアクセスとなる新横浜駅からは徒歩 14 分かかると日産スタジアムの HP に記載がある⁴。

大規模な収容人数があり、新横浜駅までのルートが複数想定されるという点が、本論文の題材を扱う上で適切な場所だと判断し、シミュレーションを行う場所として設定した。

3.2.1 使用するデータ

本シミュレーションに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（新横浜地区）（2018年3月版適用）を利用した⁵。このデータはノード情報とリンク情報の2つの csv ファイルからなり、ノード数が 1605 個、リンク数が 1848 個から構成される。今回のシミュレーションに合わせて、始点となる日産スタジアムの東ゲートに便宜のため 1 つのノードと 3 つのリンクを追加している。

リンクデータの中には、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情報の他に、リンクの長さとリンク幅を用いた。データの詳細は参考文献[3]に記載されている。

3.2.2 マップの概要

日産スタジアムの HP に記載されている新横浜駅からのルートは道幅の広い最短経路が掲載されており、図 9 の赤く表示したルートである。そのほかにも大きく分けるとルートは全部で 3 つに分類され、2 つ目のルートは東ゲート前の階段を下りて北側に迂回するルート。3 つ目は東ゲート前の階段を下りて東

4: 「日産スタジアム HP」 <https://www.nissan-stadium.jp/>

5: 「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>

ゲート橋の下をくぐるルートが存在する。

スタジアム付近は上で述べた 3 通りのルートに分かれているが、駅前は建物が密集しており、すべての通りがほぼ垂直に交わった構造をしている。したがって、建物が密集しているエリアでは同程度の移動距離のルートが複数あり、それに伴いエージェントのルート分岐も無数に起こると考えられる。

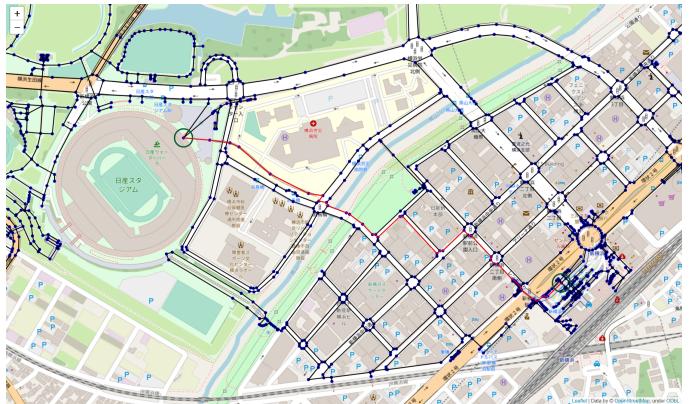


図 9 新横浜グラフと最短経路

3.2.3 空のマップを歩かせる実験

2 種類のエージェントを合計 100 人、日産スタジアム前に生成し、新横浜駅まで歩かせるというシミュレーションを行った。この実験によって、集団内の情報ありエージェントの割合がそれぞれのエージェントの移動完了時間にどのような関係をもたらすかを明らかにする。

図 10 は 100 それぞれの移動完了時間の平均をエージェントの割合別に分けてグラフ化したものである。箱ひげ図になっているのは、それぞれの割合ごとに 100 回のシミュレーションをした結果をグラフにしているためである。

例えば 10% と書かれた箱ひげ図は、10 人が情報ありで、90 人が情報なしの合計 100 人を歩かせるということを表している。そして、100 それぞれの移動完了時間を平均したものを 1 回

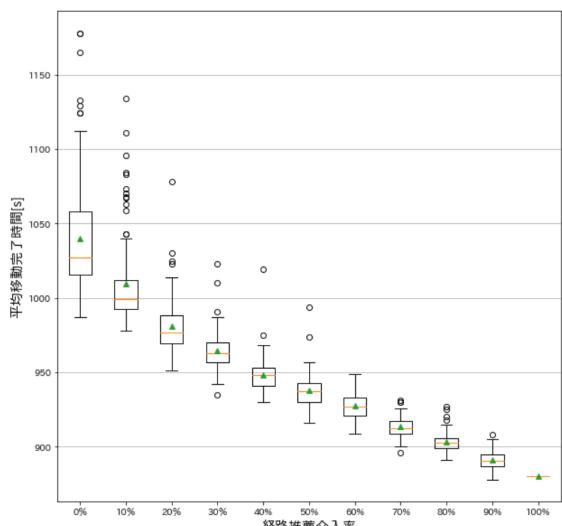


図 10 空マップ 平均移動完了時間

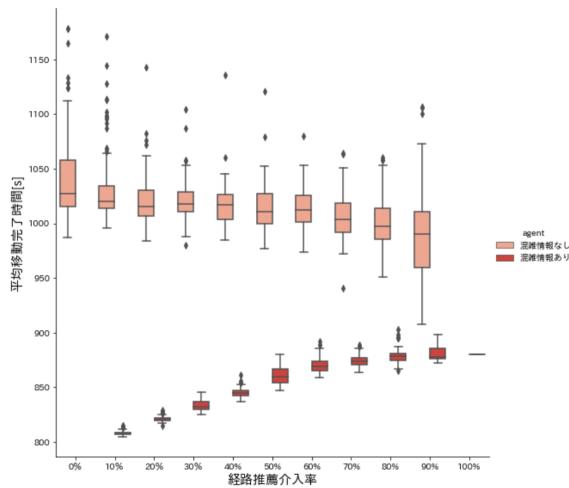


図 11 空マップ エージェント種類別移動完了時間の平均

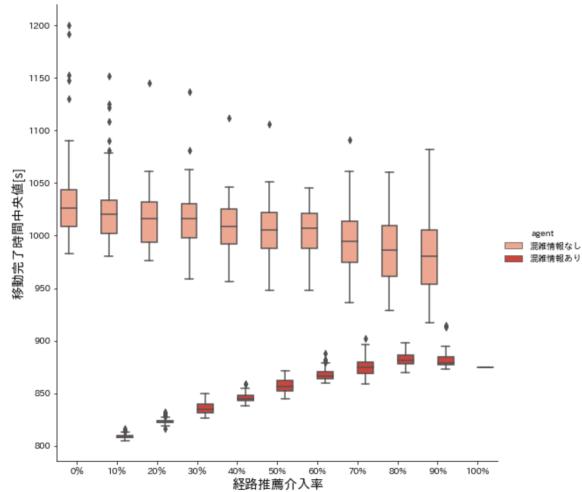


図 12 空マップ エージェント種類別移動完了時間の中央値

のシミュレーションの解として、それを 100 回行った解の分布が一つの箱ひげ図となる。(緑点は平均を表す)

横軸が 100% の時に箱ひげ図が生成されないのは、全員が情報ありエージェントの場合、確率的な要素がなくなるため、100 回のシミュレーションが同じ移動完了時間を取るためである。

図 11 は、エージェント種類別の移動完了時間の平均の箱ひげ図であり、図 12 はエージェント種類別の移動完了時間の中央値である。

図 10 から、混雑情報ありエージェントの割合が増えるにつれ、移動完了時間が全体としては短くなっていることが分かる。そして、90% の箱ひげ図の最小値を見てみると、100% の値より小さいものがあることが見て取れる。実際に確認すると、100% の値は 880[s] であるが、90% の最小値は 878[s] となっており、全員が情報ありエージェントの場合よりも、情報なしエージェントの挙動によっては全体の移動完了平均時間は短くなる場合があることが分かる。

このことは、シミュレーション内のエージェント全員に情報介入ができるることを仮定したときに、本研究で用いている混雑を考慮したアルゴリズムよりも良い全体最適があることを示している。

図 10 から全体の平均移動完了時間は、情報ありエージェントが増えるに従い短くなることが分かったが、図 11・12 を見ると、エージェントの種類によって、移動完了時間の平均に大きな差があることが分かる。

興味深いのは、情報ありエージェントを増やすにつれて、情報ありエージェントの平均移動完了時間は増えているということである。これは、混雑を考慮するアルゴリズムに従うと、当然混雑する最短経路を迂回する挙動を取るためだと考えられる。

3.2.4 混雑マップを歩かせる実験

3.2.3 の実験では、シミュレーション開始時に誰もいないマップからスタートをしていたが、それは現実的ではない。この実験では、すでに移動が開始されている混雑したマップを想定して、情報ありエージェントの割合によって移動完了時間にどのような影響が出るのかを確認する。本実験で用いる、マップの初期状態の混雑状況をヒートマップにしたもののが図 13 である。



図 13 混雑マップのヒートマップ

このマップのエージェントの分布は、スタート地点から 1000 秒間、毎秒ポアソン分布 ($\lambda=2$)⁶ に従って混雑情報なし選択エージェントを生成することで作成したものである。このマップには 1940 人のエージェントが存在する。ヒートマップを見ると、最短経路となる道に人が多くいることが分かる。

この 1940 人のエージェントの位置を固定し、この状態を時刻 0s とする。この中から特定の割合をランダムに抽出し、それらを混雑情報ありエージェントに変更して、移動完了時間を測定するという実験を行った。3.2.3 の空のマップでの実験同様 100 回のシミュレーションを行い、全体の移動完了時間を割合別にまとめる。

今回の実験では、それぞれのエージェントのスタート位置がバラバラであるため、当然ゴール付近にいるエージェントは早くゴールに到着する。そのため、単純な移動完了時間では、その結果がエージェントの種類によるものなのか、スタート位置

6: λ の値は予備実験で求めた値を用いている。本研究ではこの値の出現率が現実的かつ問題のない値と判断した。出現率が大きすぎるとリンクが詰まってしまう極端に移動完了時間が長くなってしまう。

の問題なのが判別できなくなる。したがって、この実験で扱う値は正規化されたものでなくてはならない。

そこで、各エージェントの移動完了時間をスタート地点から最短経路を進んだ時にかかるとされる時間で割ったものを移動完了時間増加率と定義する。すなわち、1に近づくほど最短時間に近づく。しかし、1は混雑の無いマップでの最短時間であるため、この実験では1になることはない。

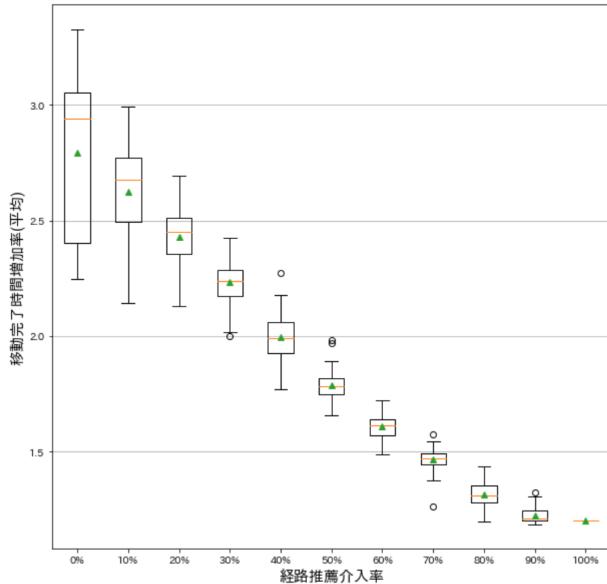


図 14 混雑マップ平均移動完了時間の増加率の分布

図 14 は混雑マップでの平均移動完了時間増加率の箱ひげ図である。図 15・16 は混雑マップでのエージェント種類別の移動完了時間増加率の平均と中央値である。図 17 は各割合ごとにエージェント種類別の移動完了時間の分布をバイオリングラフとして表したものである。

図 14 を見ると、情報ありエージェントが増えるほど、1に近づいていることが分かる。箱ひげ図の平均値だけを見ると、線形的に右肩下がりで 9 割が情報ありエージェントになると、ほとんど 10 割情報ありの時と変わらないまでに 1 に近くなることが分かる。

図 15・16 を見ると、空マップの実験同様に、エージェントの種類によって分布が異なるのが見て取れる。このグラフでは、空マップの時に見られたような情報ありエージェントの移動完了時間が伸びていくという現象は確認できなかった。

図 15・16 から、情報ありエージェントの割合が増えると、情報なしエージェントの移動完了時間も短くなっていることが分かる。図 16 の中央値のグラフは図 15 の平均値のグラフよりも安定しており、情報ありエージェントが 7 割を超えたあたりから、急に移動完了時間が 1 に近くなるという現象が起きている。これは現実でこのシステムを実装する際には 7 割以上の普及があると情報介入できないエージェントにも効果が出やすくなると言え換えることができる。

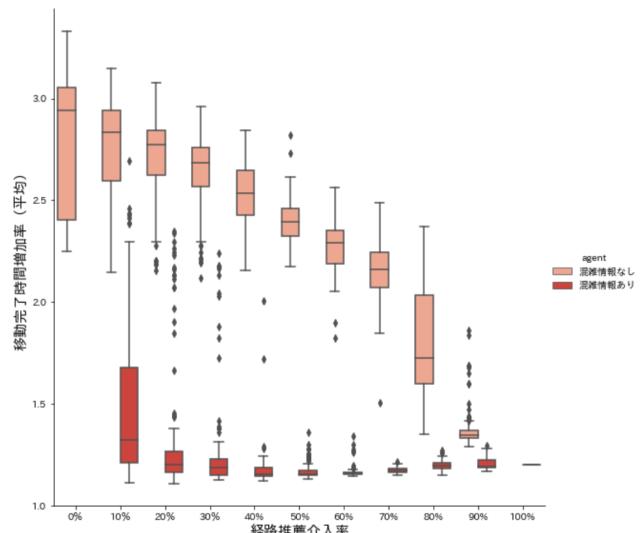


図 15 混雑マップ エージェント種類別移動完了時間増加率の分布 (平均)

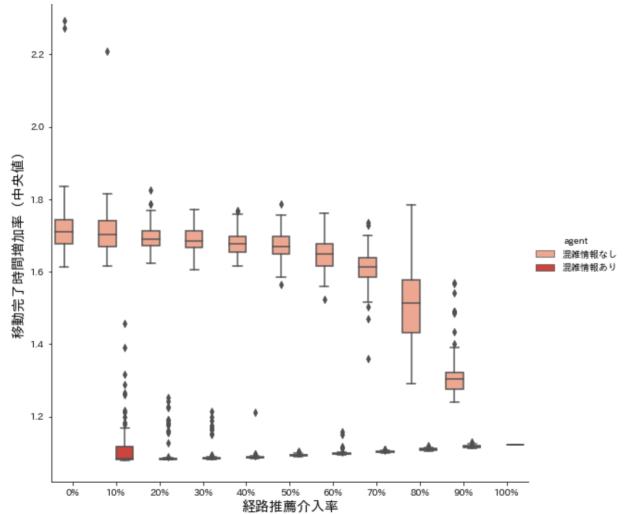


図 16 混雑マップ エージェント種類別移動完了時間増加率の分布 (中央値)

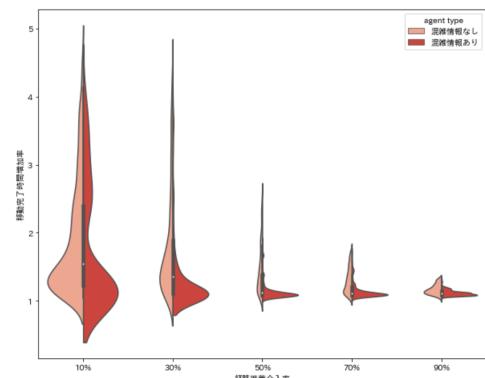


図 17 混雑マップエージェント種類別移動完了時間の増加率バイオリングラフ

3.3 考 察

空マップの実験と、混雑マップの実験から、混雑情報を持つエージェントの割合が増えると、両実験とも全体の平均移動完了時間はほぼ線形的に短くなっていくことが分かった。これは情報介入の割合を増やせば増やすほど、全体の移動完了時間は、介入した分だけ全体最適に近づいていくと言い換えることができる。

しかし、エージェント種類別に分けてみると、エージェントの種類によって異なる変化を取っていることが確認できる。空マップの実験からは、情報ありエージェントの割合が増えるほど、情報ありエージェントの平均移動完了時間は長くなるという結果が出た。

この結果は現実的には問題を含んでいる。情報を与え、経路推薦に従うエージェントは、そうでないエージェントよりも全体最適のために遠回りをさせられる可能性があり、個別に経路を推薦しているため不平等な推薦を生むことにつながってしまう恐れがある。

両実験のエージェント種類別の箱ひげ図からは、情報ありエージェントの数が増えると、情報なしエージェントの平均移動完了時間が短くなることが分かった。このことから、本研究で想定している介入を行うと、情報を持っていない人間にも良い影響が出るということができる。

4 関連研究

人流シミュレーションを用いて混雑の解消を目指す研究は多く行われている。ここでは人流シミュレーションモデルについてと混雑緩和についての関連研究を示す。

まず、人流シミュレーションモデルの関連研究として、峯元らは人流データをより効率的に活用するため、個人単位の移動行動のモデルを提案した[4]。本研究では人の行動の動線のみを考慮しているが、この研究のような詳細な行動からの情報があれば、混雑考慮や推薦のタイミングを見極める上で大いに役に立つと考えられる。飯田らは、リンクフローをボックス間のフローの受け渡しで再現するボックスモデルを用いて、交通シミュレーションを行う手法を提案した[5]。この研究ではマクロシミュレーションとしてリンクフローを抽象化して表現することで計算コストの問題を解決している。本研究で作成したシミュレーションは計算コストが大きいという問題があり、ある程度抽象化することで解決できそうだが、このような抽象化すると本研究のテーマであるユーザーごとの個別の推薦をすることが難しくなるため、両立は容易ではない。

次に混雑緩和に関する関連研究として、泉野らは群集流動に対して、空間的制約、時間的制約を用いて人流誘導の策定を支援するための評価手法を提案した[6]。本研究では空間的制約にあたる部分を混雑を考慮したアルゴリズムで自動的に割り出している点で異なる。伊藤らは、マルチエージェント交通シミュレータを用いて、将来的な渋滞が起こらないような運転ルート割り当てを提案した[7]。本研究で目的としているシミュ

レーションは全員が同じ目的地を目指すものだが、それぞれのエージェントの目的地が異なるようなシミュレーションを考える際、他の介入できるエージェントの目的地と移動ルートを共有することで全体最適を目指すという方法に応用することができると考えられる。浅井らは、人の動きの先読み行動に着目したミクロ歩行者流動モデルを提案した[8]

5 まとめと今後の展望

本研究では、大規模群衆の移動を想定した、全体最適となる経路推薦システムの構築を目指し、作成した人流シミュレーションの中で移動する大規模群衆の中の介入できるエージェントの割合を変えながら、エージェントごとの移動完了時間に与える影響を確認した。シミュレーションの結果、経路推薦の介入ができるエージェントが増えるほど、全体の平均移動完了時間は短くなり、介入していないエージェントの平均移動完了時間にも良い影響が出ることが分かった。

シミュレーションでは混雑情報ありエージェントを用意したが、そこで用いられるアルゴリズムは A*アルゴリズムをベースとして、コストに混雑度合いを考慮した速度を用いるといった単純なものを使った。本研究の主眼は混雑情報を割合ごとの影響の違いを明らかにするものであったため、このアルゴリズムが完全な全体最適であるとは限らない。3.2.3 で説明したように、全員に介入した場合よりも、短い平均移動完了時間を出したシミュレーションも存在した。したがって、対象全員に情報介入ができる状況での全体最適のアルゴリズムに研究の余地がある。

本シミュレーションでは混雑度合いをあらかじめ完全に既知の状態を想定したが、現実的にはその情報を得ることは困難である。したがって混雑状況を推定するための手法についても研究の余地がある。

文 献

- [1] 伊藤俊秀, 草薙信照 “コンピュータシミュレーション 改訂2版” オーム社 2019
- [2] ジョン・J・フルーラン “歩行者の空間” 鹿児島出版 1974
- [3] 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」
- [4] 峰元長, 秋山福生, 小野健太, 渡邊誠 “人流データに基づいた個人単位移動行動のモデル化” 日本デザイン学会 2016
- [5] 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シミュレーション” 土木学会論文集 No.536/IV-31, 37-47, 1996.4
- [6] 泉野桂一郎, 松島裕康, 野田五十樹 “歩行者シミュレーションを用いた大規模群集に対する各種移動制約導入手法の評価” 情報処理学会研究報告 Vol.2015-ICS-178 No.7
- [7] 伊藤孝之, 田中雅章, ラフィックヘドゥフィ, 鳥居義高, 徳田渉, 金田亮 “自動車間の動的経路割り当てメカニズムに基づく渋滞緩和システムの設計とシミュレーション” 情報処理学会研究報告 Vol.2014-ICS-177 No.8
- [8] 浅井美帆, 桑原雅夫 “混雑時におけるミクロ歩行者流動モデルの構築” 第 5 回 ITS シンポジウム 2006