

都市部道路網を対象とした 混雑回避巡回スケジューリング手法

栗山 恭嘉 村田 佳洋 柴田 直樹† 安本 慶一 伊藤 実

奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科† 滋賀大学情報管理学科

近年、都市部、観光地など慢性的な混雑が生じる環境において、希望する目的地を限られた時間内で効率よく巡回するスケジューリング手法の確立が望まれている。我々は先行研究にて、複数ユーザの巡回スケジュールを同時に調整することで、各ユーザが混雑を避けて優先度の高い地点を制約時間内なるべく多く巡回できるようなスケジューリング手法を提案した。この手法では、はじめに各ユーザの希望巡回地点リストを入手し、各ユーザが希望した目的地を巡回する場合のシミュレーションを行うことで、時刻毎の各地点、各経路の混雑状況を予測する。次に、予測混雑下においてユーザの要望をできるだけ満足するよう、ユーザの目的地数および巡回順序を調整することでスケジュールを算出する。しかし、この手法は、利用する交通流モデルに従い忠実にシミュレーションを行うため、得られるスケジュール結果は十分に正確であるものの、多大な計算時間を要するため、大規模な道路網への適応が困難であった。本稿では、シミュレーション時に利用する交通流モデルのパラメータを動的に調整することで、計算時間の削減を行う手法を提案する。計算機上で、10,000人のユーザを含む大規模交通網にて実験を行った結果、提案手法は、先行研究と同程度に良いスケジュールを3分の1程度の計算時間で算出できることを確認した。

Congestion Alleviation Scheduling Technique in Urban Road Network Based on Prediction of Future Congestion on Roads and Spots

Hisaka Kuriyama Yoshihiro Murata Naoki Shibata† Keiichi Yasumoto Minoru Ito
Nara Institute of Science and Technology † Shiga University

For efficient sightseeing tour and business in urban areas, it is important to establish the scheduling method to visit multiple spots efficiently within a specified time. As previous work, we proposed a method for finding schedules for thousands of users by predicting congestion of routes and spots in the future through simulation. Using the predicted results, the method adjusts each user's provisional schedule by changing visiting order of spots and reducing the number of visiting spots, keeping user's satisfaction as high as possible. This method strictly performs simulation based on a typical traffic flow model, so calculated schedules are satisfactory enough. However, the large computation time required for the faithful simulation makes it difficult to apply this method for a large scale road network. In this paper, we propose a scheduling method for reducing the computation time by dynamically adjusting parameters used in a traffic flow model. We have implemented the proposed method and evaluated the method by performing simulations for a large scale road network with more than 10,000 users. The results showed that the computation time is reduced to about one third of our previous method.

1 はじめに

近年、都市部、観光地では慢性的な混雑が生じている。これらのエリアにおいて、移動経路や目的地の混雑を考慮し、希望する目的地を効率よく巡回するスケジューリング手法の確立が望まれている。

移動経路の混雑を回避する代表的な手段としては、交通網の渋滞状況を考慮した経路作成、案内を行う VICS カーナビ [1] の利用が挙げられる。カーナビは従来、起終点間の最短距離経路の算出が目的であったが、路上に設置されたビーコンを介して道路の混雑情報を入手し、その情報を基に混雑を回避した経路選択が可能となった。しかし、このような混雑の回避手法は、現在の混雑状況に基づいて迂回経路を案内するので、多数のユーザが同一の情報を利用し、迂回経路を選択した場合に、その迂回経路が新たに混雑する可能性がある。

この問題を解消する手法として、ユーザ間で経路情報を共有し、互いに重複しない経路を選択することで混雑を回避する方式が提案されており、個人の移動効率向上に加えて、道路網全体としての混雑減少を実現している [2]。

一方、目的地における混雑緩和を試みた例として、イベント会場やテーマパークなどの大規模施設において、直近の混雑情報から各来園者が次に訪れるアトラクションを調整する方式が提案されている。本方式では、特定のアトラクションへの来園者の集中を防ぎ、園内に分散させることで、全ユーザの平均待ち時間の低減を実現している [3]。

これらの既存研究では、経路、目的地のどちらか一方の混雑のみを考慮したスケジューリングを行う。しかし、観光地などにおいては、移動経路が混雑すると共に、特定の目的地に過度のユーザが集中することで、目的地内におけるユーザの円滑な

活動の妨げとなる。さらに、このような目的地の混雑は近隣交通網の混雑を誘発する要因ともなるため、快適な観光活動を保証するためには、移動経路に加えて、各訪問地における混雑状況も考慮したスケジュールの算出が望ましい。また、現実環境においては、ある特定の時刻までに自宅に帰らなければならない、といった時間制約も同時に考慮する必要がある。

上記の問題に対し、我々は先行研究 [4] にて、目的地や予定経路の情報を共有することによって各ユーザにとっては混雑を回避し、全体としても混雑を緩和するスケジュールを算出・提示するシステムを提案した。しかし、本手法は、全ユーザの予定経路から各道路、各地点での混雑状況をシミュレーションし、その結果から予定巡回経路を変更するという手順を繰り返すため、シミュレーション時間が大きくなるという問題があった。

本稿では、先行研究におけるアルゴリズムを改良し、混雑回避効果を大きく削減することなく、より大規模なシミュレーションを可能にする手法を提案する。先行研究においては、各道路を短い固定長のブロック単位で分割し、各ブロックを順次スキャンし、密度、移動速度を更新していたが、本方式は道路中に存在するブロック数に応じて、計算時間が増加するという問題があった。本稿では、ブロック長を可変とし、道路をその時々状況に応じて可変長のブロックに分割し、スキャン回数を減らすことで、計算コストを大幅に削減する方法を提案する。

提案手法を実装し、10,000人のユーザを含む大規模交通網において評価実験を行った。その結果、先行研究と比較して、スケジューリングに要する時間を3分の1程度に短縮可能であることを確認した。

2 関連研究

都市交通網、観光地などにおける、混雑状況を考慮した巡回スケジューリング手法について、様々な研究がなされている。

移動経路上の混雑緩和を目的としたものの代表的な例としては、先述の VICS や、イベント会場などの屋内施設において、通信ユニットを介して現在の混雑情報を考慮し経路案内を行うシステムが提案されている [5]。しかし、これらの手法は、多数のユーザが同一の情報を利用し迂回路に流入した際には新たな混雑を招く恐れがある。この問題を解消する手法として、短期的な混雑予測を行い、ユーザ間で経路の重複を避けることで交通流の円滑化を試みた例がある [2]。

目的地における混雑を考慮した例として、大規模イベント会場など、複数のユーザが圏内を移動し、各アトラクションにてサービスを受ける環境下における混雑回避手法が提案されている。文献 [3] では、各ユーザが各アトラクションの混雑情報を通信ユニットを介して入手し、待ち時間の小さいアトラクションを次に訪問することで、各アトラクションの待ち時間が軽減されることが確認されている。

これらの既存研究では、目的地間の移動時間、各地点での待ち時間の両方を考慮したスケジューリングは行われておらず、また、直近の混雑情報のみを参照し、巡回目的地の変更を行うケースがほとんどである。これに対し、我々は先行研究にて、移動時間および各地点での待ち時間の両方を同時に扱い、かつ、ユーザが活動を開始し、最終的な目的地に到着するまでの、より長い期間についての混雑予測を行うことで、ユーザが直観的に行動する場合に比べて、より効率の良いスケジュールが得られることを確認した [4]。しかし、この手法は、全ユーザの予定経路から混雑状況をシミュレーションし、その結果から予定経路を変更するという手順を繰り返すため、シミュレーション時間が大きくなるという問題があった。

我々の先行研究においては、各道路を短い固定長のブロック単位で分割し、各ブロックを順次スキャンしたうえで、ブロック内に所属するユーザ数に応じて密度、移動速度を更新していた。本方式は、計算時間が増加するという欠点があり、シミュレーション時間が増加する原因となっていた。本稿では、ブロック長を可変とし、より長い区間のブロックを道路中に混在させ、スキャン回数を減らすことで、計算コストの低減を行い、より大規模な道路網、かつ、より多数のユーザを対象に提案手

法を適用できるようにする。

3 問題設定

本章では、まず、提案方式が対象とする環境と仮定について述べ、次に問題の形式的な定義を与える。

3.1 想定する環境と仮定

本研究では、多数のユーザがそれぞれ、訪問を希望する複数の施設を目的地として選び、各施設を巡回する環境を想定する。各ユーザは出発地点から道路網を目的地に向かって移動し、到着した際にサービスを受ける。各ユーザは出発地点から道路網を目的地に向かって移動し、到着した際にサービスを受ける。各地点には、サービスを受け終えるまでに要する時間が設定されており、ユーザは必要な時間を消費することでサービスが終了し、次の目的地への移動を再開する。ユーザは希望する全ての目的地を訪れると、巡回活動を終了する。各道路、各地点に複数のユーザが集中することで混雑が発生した場合は、各道路ではその混雑度に応じて移動速度が低下する。各地点ではサービスが開始されるまでの待ち時間が発生する。

目的地を巡回するユーザは、入力として訪問を希望する巡回目的地群、及びその重要度（その目的地への訪問を希望する強さの程度）、最終目的地への希望帰着時間を設定する。各ユーザは目的地を訪問しサービスを受けることができれば、自身が設定した重要度に相当する得点が得られるものとする。ただし、ユーザの希望帰着時間以降に、目的地を訪問しサービスを受けることができて、その目的地の得点は加算しないものとする。入力としてデータベース入力とユーザ入力を与えられたときに、全ユーザの得点の合計を最大化するスケジュールを算出することが本研究の目的である。

3.2 入力

入力は、予め与えられたデータベース入力とユーザ入力を持つとする。

<データベース入力>

- 交通流モデル：道路網におけるユーザの振る舞いを表現するためのモデル。
- 施設のサービスモデル：サービス施設におけるユーザの振る舞いを表現するためのモデル。
- 地図データ：道路網を示すグラフ $G = (V, E)$ として与えられる。道路網を構成する交差点をノード、交差点間の道路をリンクとする。各リンクは、以下の項目を持つ。
 - リンク長：2つのノード間の距離
 - V_f ：自由流速度（密度が0のときの速度）
 - D_{max} ：最高密度（速度が0となるときの密度）
- 施設データ：ユーザがサービスを受ける施設を表す。それぞれの施設 d_n （例えばレストランなどの施設、 $1 \leq n \leq |D|$ ）は、以下の3つの項目を持つ。
 - 施設の場所：施設が位置する場所であり、グラフ上のノードに対応付けられる。
 - c_m ：ノードのキャパシティであり、同時にサービスを受けることが可能な最大の人数。
 - St_m ：ユーザがサービスを受け終えるまでに要する時間（ただし、待ち時間を除く）。

<ユーザ入力>

あるユーザ u が入力を行うデータは以下の6つの項目である。

- $start_u$ ：出発地点
- $D_u \subseteq D$ ：訪問を希望する目的地群
- $imp_u(d)$ ： $d \in D_u$ である各目的地に対する重要度（訪問を希望する強さの度合い）
- $goal_u$ ：最終目的地
- $imp_u(goal_u)$ ：最終目的地に対する重要度
- $time(goal_u)$ ：希望する帰着時間

ユーザは、自身が入力した各目的地の選好度に応じて、それぞれ異なった重要度を設定すると考えられる。ここでは、各目

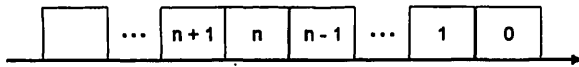


図 1: ブロック番号の割り当て例

的地、及び出発地点の重要度の総和がユーザ間で等しくなるよう (1) 式のように設定を行う。

$$\sum_{d \in D_u} imp_u(d) + imp_u(goal_u) = 100 \quad (1)$$

3.3 出力

ユーザは、帰着希望時間内に目的地においてサービスを受けることができれば、重要度と同値の得点を得る。よって、巡回候補となる目的地が多数存在し、時間内で全目的地を巡回することが困難な場合には、移動のコストや優先度を考慮し、目的地の数を削減する必要がある。解となるスケジュールは、提案手法を利用するユーザ数分のスケジュールで構成され、 $S = (s_1, \dots, s_{|U|})$ で表す。 s_i は、ユーザ $u_i (u_i \in U)$ のスケジュールであり、 $s_i = (d_{i1}^1, d_{i1}^2, \dots, d_{ij}^1, \dots, d_{ij}^n)$ と表記する。ここで、 $d_{ij}^j (d_{ij}^j \in D_u)$ はユーザ u_i が j 番目に訪問する目的地である。

4 ユーザの行動モデル

本章では、提案手法で利用する交通流モデルと、2地点間の経路移動の際に用いる移動戦略について述べる。

4.1 交通流モデル

道路を表すリンクについて、先行研究では、一般的な計算機上において、ユーザの移動計算を実用的な速度で行うために、広域交通流の処理を高速に計算可能なブロック密度法 [8] を採用した。ブロック密度法では、リンクをいくつかの固定長のブロックに分割し、下流側から上流側に順番に番号を割り当てる (図 1)。ここで、ブロック長 L_n は自由流速度 V_f で 1 シミュレーションステップ (1 シミュレーションステップは 1 秒の時間経過) 移動した際の移動距離と同値とする。 n 番目のブロックについて、ブロックに属するユーザ数を N_n とすると、ブロックの通過密度 D_n は $\frac{N_n}{L_n}$ で定義される。ブロックの通過速度 V_n は、(2) 式のように定義する。

$$V_n = V_f \left(1 - \frac{D_n}{D_{max}}\right) \quad (2)$$

図 1 に示すように、各ユーザの移動の計算は下流端ブロックから順に行う。各ユーザは自身が現在属するブロック n の通過速度で移動する。また、ユーザがブロック n からブロック $n-1$ に移動した際は、通過速度は V_n から V_{n-1} に即座に変更される。ブロック n に属するユーザが、隣接するブロック $n-1$ に移る際に、移動先のブロックの通過密度 D_{n-1} が D_{max} を超える場合は、現在のブロック n の先頭で停止し、ブロック $n-1$ の混雑が解消するまで待機する。各ブロックは (2) 式に基づいてステップ毎に通過速度を更新する。各ブロックに所属するユーザは各ユーザは自身が属するブロックの通過速度が更新されると、直ちに更新後の速度へと変更を行う。

4.2 施設のサービスモデル

ユーザは自身が訪問を希望する地点 (ノード) へ移動し、サービスを受ける。到着時に、その地点においてサービスを受けている人数が、キャパシティよりも小さい場合は、ユーザは即座にサービスを開始することが可能である。サービスを受けている人数が、キャパシティに達している場合は、ユーザは待ち行列に並び、空きができるまで待機する。

4.3 2地点間の経路選択戦略

ユーザの 2 地点間の移動経路の選択方法について、最短距離経路戦略、最短時間経路戦略、経路情報共有戦略の 3 種類の戦略を考える。

最短距離経路戦略

最短距離経路戦略 (Shortest Distance Route, 以下 SD とする) は、目的地間の経路長を最短にする経路を選択する戦略である。

最短時間経路戦略

最短時間経路戦略 (Shortest Time Route, 以下 ST とする) を用いるユーザは、目的地間を最短時間で移動可能な経路を選択する。ここで、リンク l を構成する各ブロックの現在の混雑状況に基づく通過所要時間の総和を、リンク l の期待通過時間 (Expected Passing Time) EPT_l として定義する。VICS センターは、一定時間間隔で ST ユーザに対して全リンクの期待通過時間を配信する。ST ユーザは交差点毎に、各リンクの期待通過時間情報を基に、最短時間経路を検索する。

経路情報共有戦略

経路情報共有戦略 (Route Information Sharing, 以下 RIS とする) は、文献 [2] で提案された手法である。RIS は目的地間の所要時間を最短にし、かつ他の RIS ユーザと重複しない経路を選択することで効率的な移動を行う戦略である。ここで、ユーザ j のリンク l についての通過確信度 (Passage Assurance) $PA_{j,l}$ を p 個のリンクを含む経路についてスタート地点から順に

$$\frac{p}{p}, \frac{p-1}{p}, \frac{p-2}{p}, \dots, \frac{2}{p}, \frac{1}{p} \quad (3)$$

と定義し、割り当てを行う。これは、近い将来通過するであろうリンクの通過確率が高く、未来に通過するであろうリンクの通過確率が低いことを意味する。次に、全 RIS ユーザの PA の総和として総通過確信度 (Total Passage Assurance) TPA_l を定義する。ここで、RIS ユーザに配信する情報として期待混雑度 (Expected Traffic Congestion) ETC_l を以下のように定義する。

$$ETC_l = EPT_l \cdot (TPA_l + 1.0) \quad (4)$$

各ユーザは交差点を通過し経路探索を終えた時点で PA を経路情報サーバに送信する。サーバは期待混雑度を算出し、交差点に近づいたユーザに対して配信を行う。ユーザは交差点毎に全リンクの期待混雑度を受け取り、現地点から目的地までの期待混雑度が最小となる経路を検索することで、他の RIS ユーザと重複しない経路を選択する。

5 提案方式

提案方式では、まず、各ユーザが訪問を希望する巡回目的地群、希望する帰着時間情報を収集し、得られた情報を基に、全ユーザが希望する経路を巡回したと仮定したシミュレーションを行い、各地点、各経路の混雑状況をあらかじめ予測する。次に、予想混雑下において、目的地間の移動経路だけでなく、巡回する目的地の順序変更や巡回地点数の削減を行い、全ユーザが希望する時間までに最終目的地に帰着でき、かつ優先度の高い目的地を多く訪問できるよう調整を行う。

5.1 提案手法の概要

各ユーザは、WiMAX やセルラー通信などの広域通信機能を備えたデバイスを所持すると仮定する。各ユーザから得られた要望を基にスケジューリングを行う情報センター (以下、サーバとする) が存在し、ユーザは無線アクセスポイントを経由してサーバとの情報のやり取りが可能とする。各ユーザは活動を開始する前に、端末上で訪問を希望する巡回目的地群、及びその重要度 (その目的地への訪問を希望する強さの程度) を入力し、サーバに送信する。サーバは、各ユーザから入手した情報を基に、全ユーザが希望する経路を巡回したと仮定したシミュレーションを行い、サービス時間帯 (例えば 7 時~21 時) における各地点、各経路の混雑状況を予測し、予測混雑下において各ユーザのスケジュールを調整する。サーバは全ユーザのスケジュールが確定後、ユーザにスケジュールを送信する。

5.2 可変長ブロックの導入

ブロック密度法は、リンクに属するブロックを順にスキャンし、ブロック内の密度、通過速度を更新するため、ブロック長

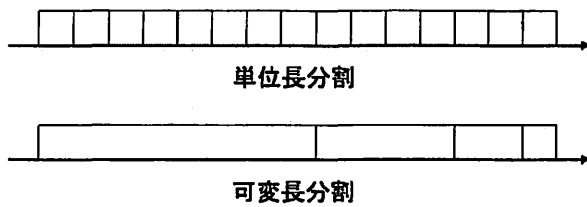


図 2: ブロックの分割方法

が一定であれば、リンクの総延長に比例して処理に要する時間が長くなる。さらに、ユーザが存在していないブロックも計算対象となるため、道路網を短いブロックで細かく分割すると計算効率が悪化する。シミュレーションステップを大きくとれば、ブロック長も長くなるため、ブロック数が減少して計算量が軽減されるが、交差点などのモデルを考える際は、流出量が正確に再現されず、精度面で問題が生じる。

そこで本稿では、文献 [6] にて提案された、可変長ブロックを利用する。本文献では、従来は固定値であるブロック長を可変とし、より長い区間のブロックを混在させ、スキャンを行う回数を減らすことで、あまり精度を落とさない範囲において計算コストを削減している。道路網上の交差点部は、複数リンクからのユーザの流出が生じるため、適切に交通量を再現するためには、できるだけ正確にユーザの挙動をシミュレートする必要がある。本稿では、流量の再現性の精度が要求されるリンク下流端に短いブロックを、それ以外のあまり精度を要求されない区間では長いブロックを配置する。具体的には、リンク下流端には自由流速度で 1 シミュレーションステップ分移動した距離に等しい長さのブロックを配置し、上流に向かうにつれ、その長さを整数倍したブロックを配置する (図 2)。

5.3 スケジューリングアルゴリズム

提案アルゴリズムでは、各ユーザができるだけ重要度の高い地点を多く巡回し、希望する帰着時間内に最終目的地に帰着できるように調節を行う。スケジューリングアルゴリズムの詳細を以下に示す。

- (1) 各ユーザが希望する目的地群に対して、文献 [7] などの発見的手法を用いて、総移動距離が最小となるような巡回経路を求める (取り扱う道路網の構造が単純である時は、全探索を行っても良い)。
- (2) 各ユーザが (1) で求めた経路を巡回したと仮定し、提案システム上でシミュレーションを行う。目的地間の移動戦略には RIS を用い、目的地での滞在は 4 章で述べたモデルに準じる。
- (3) 各ユーザの得点 (重要度の総和)、帰着するまでに要した時間を求める。
- (4) 巡回目的地を状況に応じて変更する (目的地の増減、巡回順序の変更などを行う。詳細は 5.4 節にて解説する)。
- (5) (2)-(4) の処理を全ユーザの巡回目的地変更がなくなる、または規定のループ数繰り返す、決定したスケジュールを実際に配布する

5.4 巡回目的地の変更手順

予備実験の結果、5.3 節のアルゴリズムについて、同じ目的地の挿入、削除を無為に繰り返すユーザが現れ、解が収束しない場合が発生することが分かった。そこで、タブーカウントを用いてこの繰り返しの防止する。ユーザが、削減したある目的地を再度追加し、その結果、希望帰着時間を超過した場合は、超過が生じた目的地毎にタブーカウントを記録する。タブーカウントの値が一定値を上回った目的地、以後その目的地の追加は行わないことで、短時間で戦略変更の繰り返しの停止させることができる。各ユーザについて、巡回目的地を以下のアルゴリズムに従い変更する。

- (1) シミュレーションの結果、希望帰着時間内で巡回できたかを確認する。希望帰着時間内で巡回できた場合につい

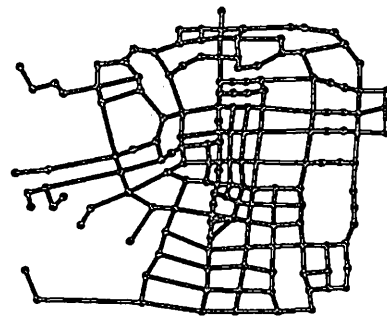


図 3: 道路網構造

て、ユーザが希望する全ての目的地を巡回できていれば処理を終了するが、過去に目的地の削減を行っている場合 (2) の処理) は、(4) へ移る。帰着できていない場合は (2) へ移る。

- (2) ユーザの巡回希望リストの中から 1 つ目的地を外し、残った目的地群に対して全ての巡回パターンを算出する。この処理を、巡回希望リストに含まれる全ての目的地について順番に行い、最短距離経路戦略により希望帰着時間内で巡回でき、かつ最も重要度の総和が高い経路を選ぶ。
- (3) 現在の巡回目的地集合を更新し、処理を終了する。
- (4) ユーザが希望する目的地集合内で、現在の巡回目的地集合に含まれず、かつタブーカウントが規定回数に満たない目的地群を生成する。これを追加候補目的地群とする。
- (5) 現在の巡回目的地集合に追加候補目的地群の中から一つだけ目的地を追加し、それらをすべて回った場合の経路のすべての組み合わせをチェックし、最短距離経路戦略により希望帰着時間内にて巡回でき、最も重要度の総和が高い経路を選ぶ。該当する経路が存在しない場合は処理を終了する。
- (6) ステップ (5) にて設定した経路において追加された目的地のタブーカウントを 1 増やす

6 評価実験

提案手法の有効性を確認するために実験を行った。本章では、従来の固定長ブロック方式を用いた交通流モデルと比較して、本稿で採用した可変長ブロック方式により、精度の低下を抑えつつ、スケジューリングに要する時間が短縮されているかどうかを確認するため、交通流モデルに固定長ブロック方式を用いた場合と、可変長ブロック方式を用いた場合の、計算時間、全ユーザの得点の平均値を計測した。また、10,000 程度のユーザを含む大規模道路網にて、既存の混雑回避手法との比較を行うことで、以前の手法 [4] からのスケラビリティの改善度合いを確認した。

6.1 実験設定

本実験では、図 3 に示す大阪市下の主要道路を模した道路網構造を用いた。道路網上のノード数は 158、リンク数は 231、トポロジの全長は 258.5km に設定した。本実験では、各ノードには 1 つのサービス施設が割り当てられているとする (必ずしも施設が割り当てられる必要は無く、単に交差点部として扱っても良い)。1 シミュレーションステップは 1 秒とした。各ノードのサービス所要時間は 600-3600 秒の範囲でランダムに設定した。各ノードのキャパシティは 40-80 ユーザの範囲でランダムに設定した。この値は、10,000 ユーザが全ての目的地に均等に割り振られた場合に適度な待ち時間が生じる値に設定を行った。各リンクの自由流速度は 60km/h (16.67m/s) とし、最高密度は、実際には、道幅などから実測で求めるが、ここでは文献 [2] で用いられている一般的な値を用い、0.14 とした。自由流速度、最高密度は各リンクの特性に応じて個別に設定されるが、本研究では簡略化のため、全リンクにおいて共通とした。また、ここでは 1 ユーザは 1 台の自動車であると仮定する。

ユーザは出発地点から行動を開始し、0-4 つの異なる目的地を巡回、サービスを受け、最終的な目的地へと移動し行動を終了する。2 地点間の移動には、RIS アルゴリズムを用いる。なお、提案アルゴリズムでは、シミュレーションの結果、ユーザが希望する時間内での帰着が困難と分かった場合は目的地数を削減するが、最低でも出発地点から最終的な目的地への移動は行うものとした。ユーザは最終目的地に到着した際に道路網上から取り除かれる。出発地点、各目的地、及びその重要度はランダムに設定される。希望帰着時間は、ユーザが入力を行った目的地群の巡回に要する総距離の最短を理想速度で移動した際に要する時間に、各目的地における混雑が生じない際のサービス所要時間の総和を加えたものとする。

タブーリストの許容回数については、10,000 ユーザについて、値を 1-5 の範囲で変更し、全ユーザが各々ランダムに選択された 5 つの地点への訪問を希望したとして、図 3 の道路網にて実験を行った。その結果、平均得点、訪問目的地数に大きな差が生ず、許容回数の増加に伴いスケジューリングに要する時間も増すため、本実験では許容回数を 1 回とした。

スケジューリング時のループ回数は、予備実験の結果、ほとんどのユーザが 10 ループ目後において、目的地の変更を行わなくなったため、本実験ではその値を 10 とした。また、実験には一般的な PC (Core2 Duo 2.66GHz, 2.0GByte Memory, WindowsXP pro.) を用いた。

6.2 比較対象の設定

既存研究 [2, 3] では、経路・目的地のいずれか一方のみを扱っており、また、文献 [2] は 2 地点間の移動のみを扱っている。よって、本稿で提案する手法との比較を行うため、経路、目的地の両者についての混雑を考慮し、かつ、複数の目的地を巡回するよう拡張を行った。ここでは、ユーザは通信ユニットを所持し、各道路、各目的地の混雑情報を随時入手可能であると仮定した。比較対象におけるユーザの行動パターンとして、ユーザは複数ある目的地のそれぞれの現在の混雑状況、および、そこまでの経路の混雑状況の両方を考慮して、その程度に応じて次の目的地を決定することとした。ここで、移動や滞在に要する時間は、あくまで現在の混雑状況を取得した時点での値であり、将来的な予測は全く含まれない。よって、ユーザが実際に消費する時間は、移動開始前に見込んだものとは異なる可能性がある。しかし、正確な値を予測することは現実的に困難であるため、現在の混雑状況を基に予測を行うことは一般的なユーザの行動パターンとして現実的であると考えられる。

ユーザは、出発地点からの巡回開始時、または現在所属する目的地でサービスを受け終えた後に、巡回希望リスト内の未訪問地点の待ち行列リストに含まれるユーザ数、サービス所要時間、キャパシティを入手し、(5) 式により移動、滞在に要する時間を見込む。

$$predicttime = stay_m + time(d_{now}, d_m) \quad (5)$$

ここで、 $time(d_{now}, d_m)$ は、現在所属する地点 d_{now} から、巡回希望リスト内の選択候補となる地点 d_m への移動に要する時間である。 $stay_m$ は地点 d_m の現在の混雑状況に基づき算出された予想サービス所要時間であり、サービス時間に待ち時間の予測値を加えた値で表される。ここで、待ち時間の予測値は、(地点 d_m の待ち行列の長さ) × (地点 d_m のサービス時間) / (地点 d_m のキャパシティ) で表される。ユーザは巡回候補となる全てのノードの見込み時間を算出し、最も予想所要時間が小さい地点を次の目的地に設定し直す。さらに、ユーザは希望帰着時間からの遅延ができるだけ生じないように、その地点を訪れることで希望帰着時間を超過しないかどうかを (6) 式に基づき見積もる。

$$returntime = predicttime + \alpha \cdot time(d_m, d_{end}) \quad (6)$$

ここで、 $time(d_m, d_{end})$ は、地点 d_m から、最終目的地 d_{end} への移動に要する時間、 α は 1 以上の定数である。ユーザは現在時刻に (6) 式により得られた値を加えた時刻が、希望帰着時間を超過する場合は、その地点への訪問をキャンセルし、最

表 1: 設定 1: 可変長ブロックの有効性確認 (10,000 ユーザ)

分割方式	ブロック長	得点	有効 訪問数	計算 時間
固定長	16.67	64.6	1.989	41 分
固定長	266.72	60.4	1.899	13 分
固定長	533.44	61.7	1.931	12 分
可変長	16.67-33.34	64.6	1.988	26 分
可変長	16.67-66.68	63.9	1.976	19 分
可変長	16.67-133.36	63.2	1.969	16 分
可変長	16.67-266.72	62.9	1.960	14 分
可変長	16.67-533.44	64.2	1.983	14 分

表 2: 設定 1: 可変長ブロックの有効性確認 (15,000 ユーザ)

分割方式	ブロック長	得点	有効 訪問数	計算 時間
固定長	16.67	63.8	1.980	61 分
固定長	266.72	44.1	1.515	21 分
固定長	533.44	46.2	1.563	22 分
可変長	16.67-33.34	63.1	1.967	40 分
可変長	16.67-66.68	61.1	1.930	30 分
可変長	16.67-133.36	55.0	1.781	26 分
可変長	16.67-266.72	46.9	1.581	26 分
可変長	16.67-533.44	48.0	1.614	27 分

終目的地に向けて移動を開始する。超過しない場合は、ユーザは地点 d_m への移動を開始する。 α 値が小さい際は、帰還に要する時間を短めに見積もり、 α 値が大きい際は、時間に余裕をもって最終目的地への移動を開始する。本実験では、 $\alpha = 1$ とした。また、2 地点間の移動、移動所要時間の見積もりには、RIS アルゴリズムを用いた。

6.3 評価指標

以下の項目に基づいた比較により評価を行った。

平均得点: 全ユーザの得点の平均値

平均有効訪問数: 各ユーザが実際に訪問した目的地 (以下、実訪問数とする) において、希望帰着時間内でサービスを受け終えることができた目的地の平均数

超過人数: 希望帰着時間を超過したユーザ数

6.4 実験結果・評価

設定 1: 可変長ブロックの有効性確認

本実験では、可変長ブロック方式の導入により、スケジューリングに要する時間が短縮されているかどうかを確認した。また、可変長ブロックの導入により、交通流の再現が荒くなり、得られるスケジュールの精度低下 (平均得点、平均有効訪問数の低下) が見込まれるため、従来型の交通流モデルに用いる固定長ブロック方式でスケジューリングを行った際の結果と比較を行うことで、その程度を確認した。スケジューリング時の仮想シミュレーションについて、固定長ブロック方式では、全てのブロックを等しく分割した。本実験では、ブロック長を 16.67, 266.72, 533.44 (自由流速度で、順に 1, 16, 32 秒移動した距離に等しい) m と変更し、実験を行った。一方、可変長ブロック方式については、下流端ブロックの長さは、16.67 m とし、上流に向かうにつれて 2 倍ずつの長さに変更を行った。ブロック長の最大値は、33.34, 66.68, 133.36, 266.72, 533.44 (自由流速度で、順に 2, 4, 8, 16, 32 秒移動した距離に等しい) m と変更し、実験を行った。道路網上のユーザ数は 10,000, 15,000

表 3: 設定 2:従来手法との比較結果 (10,000 ユーザ)

	実訪問数	有効 訪問数	得点	超過 人数
従来手法	1.729	1.332	44.4	3800
提案手法	2.190	1.989	64.6	2008

の 2 パターンとした。全てのユーザは、実験開始時と同時に道路網上に配置され、スケジューリングを行う。スケジューリングが終了すると、各ユーザはスケジューリング結果を受け取り、巡回を開始するが、この実際の巡回時の交通流モデルは従来型の固定長ブロック方式を利用する。これにより、可変長ブロック方式によりスケジューリングを行った結果を、従来の交通流モデルに適応した際に、どの程度ずれが発生しているかどうかを確認可能となる。

表 1, 2 に、実験により得られた結果を示す。表 1 より、両方式ともに、ユーザ数が 10,000 の場合については、ブロック長の最大値が 266.72, 533.44 の場合において、計算時間が 3 分の 1 程度にまで短縮されていることが分かる。しかし、ブロックの最大値が 266.72 を超えるあたりからは、長さが大きく違うにも関わらず、計算時間には差がほとんど見られないため、計算時間はブロック長のサイズに対して、必ずしも線形に変化しないことが推察される。一方、全ユーザの平均得点、平均有効訪問数については、可変長ブロック方式では、ブロック長に関わらずいずれも類似した結果となっているが、固定長ブロック方式ではやや低下が見られる。表 2 より、ユーザ数が 15,000 の場合については、計算時間については 10,000 ユーザの場合と同様の傾向がみられるが、全ユーザの平均得点、平均有効訪問数については、ブロック長の最大値が 133.36 を超えるあたりから、大幅な減少が見られる。本設定では、各経路、目的地が過剰に混雑している状態であり、このような状況下においては、荒いスケジューリングの影響が大きくなり、精度が大幅に低下することが予想される。

以上の結果より、本稿で扱う規模の道路網について、過剰な混雑が生じない範囲においては、可変長ブロックを導入することで、精度を維持しつつ、計算時間を大幅に短縮可能であることが示された。

設定 2: 従来手法との比較

我々は先行研究においては、単純な形状の小規模道路網のみで評価を行ったため、より現実的な環境において提案手法の有効性を確認する必要がある。そこで本節では、大人数のユーザについて、現実的な規模の道路網を用いて実験を行った結果について述べる。ここでは、道路網上で巡回活動を行った全ユーザが提案手法を用いて巡回を行った際と、従来手法を用いた際の結果を比較した。従来手法を用いるユーザは 6.2 節で述べたモデルを従い巡回を行うよう設定した。道路網上には両方式について、各々ユーザ数を 10,000, 15,000 と変化させ、実験を行った。本実験では、実験開始時に上記設定人数のユーザが同時に道路網上に配置され、巡回を開始する。

提案方式、従来方式について、シミュレーションを行った結果の平均値を表 3, 4 に示す。表 3 より、ユーザ数が 10,000 の場合、平均得点については提案方式が従来方式と比べて 45% 程度高いことが分かる。よって、提案方式が事前にシミュレーションすることで、重要度の高い地点を優先的に選択して巡回していることが分かる。また、提案方式では、シミュレーションを通して、希望帰着時間内にて巡回できるよう目的地数を調整しているため超過人数も少ない。表 4 より、ユーザ数が 15,000 の場合についても同様の傾向が見られ、従来方式と比べて提案方式では、平均得点については 75% 程度高く、希望帰着時間の超過人数も少ない。

以上より、大規模道路網においても、我々の先行研究にて提案した手法が十分有効であることが確認された。

表 4: 設定 2:従来手法との比較結果 (15,000 ユーザ)

	実訪問数	有効 訪問数	得点	超過 人数
従来手法	1.532	1.150	35.6	4980
提案手法	2.179	1.975	63.6	3040

7 おわりに

本稿では、大規模道路網において、各ユーザが帰着時間制約を満たしつつ、可能な限り重要度の高い目的地を巡回できるようなスケジューリング手法を提案した。実験結果より、交通流モデルに可変長ブロックを用いることで、先行研究に対して、あまり精度を落とさない範囲において、スケジューリングに要する時間が 3 分の 1 程度まで軽減可能であることを確認した。

今後の課題としては、本稿で取り扱った道路網は主要道路のみを対象としており、ユーザ数についても、実際の環境では数十万程度の存在が考えられるため、更なるスケーラビリティの拡張が挙げられる。本問題へと対応としては、文献 [9] で提案されている手法を参考に、地図を複数の領域に分割し、各領域に属するユーザの移動計算を分散並列して行うことでスケジューリングに要する時間を削減し、より詳細な交通網、多様なユーザがへの適応を試みる予定である。

参考文献

- [1] Vehicle Information and Communication System Center: VICS HOME PAGE, <http://www.vics.or.jp/>
- [2] Yamashita, T., Izumi, K., Kurumatani, K. and Nakashima, H.: "Smooth Traffic Flow with a Cooperative Car Navigation System," *Proc. of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS 2005)*, pp. 478-485 (2005).
- [3] Kawamura, H., Kataoka, T., Kurumatani K. and Ohuchi A.: "Investigation of Global Performance Affected by Congestion Avoiding Behavior in Theme Park Problem," *IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 124, No. 10, pp. 1922-1929 (2004).
- [4] 栗山 恭嘉, 村田 佳洋, 柴田 直樹, 安本 慶一, 伊藤 実: "将来の混雑状況予測に基づく混雑回避巡回スケジューリング手法の提案", 情報処理学会研究報告. ITS, Vol. 2007, No. 28, pp. 63-70 (2007).
- [5] Narasimhan, S. and Bungartz, H.-J.: "Congestion-Aware Optimization of Pedestrian Paths," *Proc. of the 18th Symposium Simulationstechnique (ASIM 2005)*, pp. 242-247 (2005).
- [6] Horiguchi, R., Kuwahara, M., Katakura, M., Akahane, H. and Ozaki, H.: "A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE Ver. 2'," *Proc. of the 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems*, 8pp., (1996).
- [7] Maruyama, A., Shibata, N., Murata, Y., Yasumoto, K. and Ito, M.: "P-Tour: A Personal Navigation System for Tourist," *Proc. of 11th World Congress on ITS*, vol. 2, pp. 18-21 (2004).
- [8] 馬場美也子, 棚橋 巖, 北岡広直, 森 博子, 寺本英二: "交通流シミュレータ NETSTREAM", 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 1, pp. 226-235 (2005).
- [9] 清水光輝, 玉城龍洋, 高村健太郎, 安江里佳, 北栄輔: "セル・オートマトン交通シミュレータのクラスターコンピュータ上での実装について", 情報処理学会研究報告, 2006-MPS-59, pp. 1-8 (2006).