

都市や観光地における混雑状況を考慮した 多数ユーザ同時巡回スケジューリング手法

栗山 恭嘉^{†1} 村田 佳洋^{†2,†3} 柴田 直樹^{†3,†4}
安本 慶一^{†1,†3} 伊藤 実^{†1}

都市部や観光地における移動経路、訪問施設の混雑状況を緩和するため、これまで、ユーザ間の情報共有による重複しない移動経路の選択法や、直近の混雑情報から混雑していない施設を訪問するための手法が提案されている。本論文では、各移動経路、各目的地における混雑を同時に考慮した、複数ユーザ同時巡回スケジューリング手法を提案する。提案手法では、各ユーザの希望巡回目的地リストを入力とし、(i) すべてのユーザが希望した目的地を同時に巡回したと仮定したシミュレーションを行うことで、時刻ごとの各道路、各施設の混雑状況を予測したうえで、(ii) 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、ユーザが巡回する目的地の調整を繰り返すことでスケジュールを算出する。提案手法を計算機上に実装し、都市部道路網を模した地図を用いて評価実験を行った結果、20,000 のユーザについて、8 分程度と実用化可能な時間でスケジューリングでき、ユーザが直近の混雑情報を用いて行動した場合と比べて、提案方式ではより高い満足度（ユーザが希望どおりに巡回できたかを示す指標）を達成できることを確認した。また、提示されたスケジュールを無視して独自の判断で行動するユーザが出現する場合を想定した条件設定の下においても実験を行い、提案手法が有効に機能することを確認した。

Route Scheduling Technique for Massive Users in City Section and Sightseeing Area Based on Congestion of Roads and Spots

HISAKA KURIYAMA,^{†1} YOSHIHIRO MURATA,^{†2,†3}
NAOKI SHIBATA,^{†3,†4} KEIICHI YASUMOTO^{†1,†3}
and MINORU ITO^{†1}

So far, a number of scheduling methods have been proposed to find (i) a non-congested route by sharing route information among users, or (ii) a schedule

to alleviate congestion at specific facilities based on the latest congestion information. In this paper, we propose a method for finding schedules for massive users by predicting congestion of routes and destinations at each point of time. In our method, we collect all users' information of visiting destinations and perform traffic simulation assuming that the users visit their intended destinations. Using the simulation result, our method adjusts each user's provisional schedule by changing visiting order of destinations and reducing the number of visiting destinations, while keeping the user's satisfaction as high as possible. We have implemented the proposed method and evaluated the method by performing simulations for a large-scale road network with more than 20,000 users. As a result, we confirmed that the computation time is about eight minutes, which is reasonable for practical use. Our experimental results also show that, (1) the proposed method achieves higher user satisfaction degree (the sum of importance degrees specified for the visited destinations) than the case when users visit each destination by using the latest congestion information of roads and facilities, (2) users have reasonable incentive to follow the output.

1. はじめに

都市部、観光地では慢性的な混雑が生じており、従来から人々の経済活動に多大な損失をもたらしてきた。国土交通省の試算によると、交通渋滞による損失は、日本国内だけでも約38億時間、金額にして約12兆円にものぼっている¹⁾。また、観光地においては、近年の動向として、レクリエーション活動の単位が団体から家族、小グループへと変化しており、観光地周辺の道路網では今後よりいっそうの自家用車による混雑が予想される²⁾⁻⁴⁾。このような状況下において、移動経路上の混雑状況を考慮しながら効率良く目的地を巡回するスケジューリング手法の確立は、長時間の移動により被る不快感の軽減にとどまらず、オンデマンドバス、運送業の配送計画などのビジネス効率を高めるためにも重要である。また、混雑緩和の対象は道路交通だけにはとどまらず、観光地やテーマパークなどの施設内にも拡張される。たとえば、複数の訪問スポットが存在する観光地においては、特定のサービス拠点へ

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

^{†2} 広島市立大学情報科学部システム工学科
Graduate School of Information Science, Hiroshima City University

^{†3} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST

^{†4} 滋賀大学経済学部情報管理学科
Faculty of Economics, Shiga University

来訪者が集中した際に、サービスの所要時間に加えてサービス開始までの待ち時間が発生し、来訪者の円滑な行動を妨げる原因となる。

これらの問題に対して、近年の情報通信技術の発達を、道路や訪問施設における混雑の解消に役立てようという試みがなされてきた。現在、携帯型通信端末、ならびに無線 LAN に代表される近接通信を用いたネットワーク環境の整備にともない、いつでもどこでもコンピュータが利用可能なユビキタス環境が実現されつつある。ユビキタス環境では、多種多様な通信デバイスを介して、簡単に情報を手に入れることが可能である。このような環境下においては、たとえば、移動者とインフラ間で情報の送受信を行うことで、移動者は道路網、サービス拠点における最新の混雑情報を取得し、得られた情報を基に、混雑を回避したスケジュールの立案が可能となる。実在するサービスとしては、交通網の渋滞状況を考慮した経路作成、案内を行う VICS カーナビゲーションシステム⁵⁾ が代表的であり、近年急速に普及している。従来、カーナビは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ため、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は、その迂回経路に車両が集中することで、新たに混雑する可能性がある^{6),7)}。

この点を補う手法として、2 地点間の移動に際して、ユーザ間で各人が選択した経路の情報を共有し、互いに重複しない経路を選択し直す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、道路網全体における交通流の円滑化がある程度実現されている⁸⁾。さらに、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。そこでは、各来園者が次に訪れるアトラクションを決定する際に、携帯端末などを用いて、各アトラクションの混雑情報を取得する。そして、得られた情報を基に訪問するアトラクションを調整し、特定のアトラクションへの来園者の集中を防ぐことで、待ち時間を低減させている⁹⁾⁻¹³⁾。

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を対象としたスケジューリングを行っている。しかし、人気のある観光地近辺などでは、経路上の混雑と各目的地における混雑の両方が問題となる場合がある。そこで、両者の混雑状況を同時に考慮し、巡回順序や経路を変えるなどの方法を用い、道路網、サービス施設上のユーザを分散させることで、特定のユーザだけでなく、ユーザ全体におけるスケジュールの効率化が期待できる。現実環境においては、ある特定の時刻までに最終的な目的地に到着しなければならない、といっ

た時間の制約も考慮する必要がある。文献 8)-13) において提案されている方式は、基本的には 2 地点間の移動、または施設におけるサービスが終了した際に、次の経路、目的地の選択をそのつど行うものであり、時間の制約については論じられていない。また、両者の混雑も同時に扱っていないため、これらを考慮するためにはアルゴリズムの拡張が求められる。

以上の点をふまえ、本論文では、各ユーザが希望する巡回地点リストを基に、ユーザが出発地点から巡回を開始し、最終的な目的地に到着するまでのより長期的な期間における、混雑状況を考慮したスケジューリング手法を提案する。提案手法では、全ユーザのスケジュールから各道路、各サービス施設での混雑状況をシミュレーションし、その結果からユーザの希望度合いに応じて経路、巡回目的地を変更するという手順を繰り返すことで、各ユーザが混雑を避けて優先度の高い地点をできる限り多く巡回し、希望する時間までに出発地点に帰還できるよう調整を行う。本手法は、シミュレーションを繰り返すことでスケジューリングが得られるまで時間を要するため、シミュレーション時に用いる交通流モデルのパラメータを調整し、精度が過度に低下しない範囲でシミュレーションを簡易化することで、スケジューリングに要する時間の短縮を図る。

上記提案手法を計算機上に実装し、大阪市下の主要道を模した道路地図を用いて評価を行った。その結果、20,000 人のユーザについて、精度を過度に落とさない範囲で、8 分程度で同時にスケジュールの算出が可能であり、ユーザが経路、目的地の直近の混雑情報を利用して行動した場合と比べて、20~30%程度高い満足度（ユーザが希望どおりに巡回できたかを示す指標）を達成することが分かった。また、提示されたスケジュールを無視して独自の判断で行動するユーザが出現する環境を想定した設定の下においても実験を行った。その結果、提示されたスケジュールを無視したユーザについて、うち 9 割程度のユーザは、提示されたスケジュールより良い結果を得ることができなかった。これより、提案手法に従うインセンティブが十分に与えられていることが示された。

2. 多数ユーザの同時スケジューリング問題

本章では、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。

2.1 想定する環境と仮定

多数のユーザがそれぞれ、訪問を希望する複数の施設や観光地（サービス拠点と呼ぶ）を目的地として選び巡回を行い、最終的な目的地に到達した際に巡回を終了する環境を想定する。各ユーザは出発地点から道路網上を目的とするサービス拠点に向かって移動し、到着し

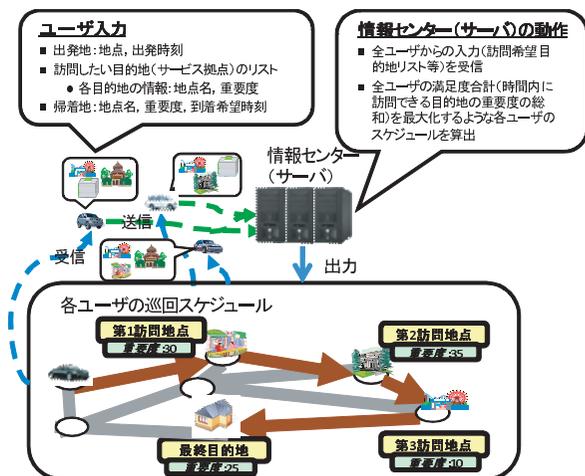


図 1 提案システムの概要
Fig. 1 Proposed system overview.

実際にサービス拠点の属性に応じたサービスを受ける。各サービス拠点には、サービスを受け終わ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を終了し、次の目的地への移動を再開する。各道路、各サービス拠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し、各サービス拠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。

ユーザは、入力として訪問を希望する巡回目的地群、およびその重要度（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。ユーザは、自身が定めた時間制約に従い、限られた時間内に、できるだけ多くの希望する目的地を訪れ、最終的な目的地へ到達しようと試みる。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満足度が得られる。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た場合については、ペナルティとして、その目的地の満足度を加算しない。本研究が対象とする問題は、ユーザ入力を与えられたときに、全ユーザの満足度の合計を最大化するスケジュールを算出することである。

本対象問題を解く提案システムの概要を図 1 に示す。提案システムは、情報センター（サーバ）とユーザ車両群から構成される。サーバは全ユーザの入力を無線ネットワークなどを介して収集し、各ユーザのスケジュールを算出しネットワークを介して配送する。各ユーザ

は、配送されたスケジュールを受け取ると、それに従って目的地を巡回する。以上の方法により、全ユーザの満足度の総和を最大化することを目指す。

2.2 入力

入力は、あらかじめ与えられたデータベース入力とユーザ入力からなる。

<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舞いを表現するためのモデル。
- サービス拠点のモデル：目的地におけるユーザの振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）
 - K_{max} ：最高密度（速度が0となるとき密度）
- サービス拠点データ：ユーザがサービスを受けるサービス拠点を表す。地図上には n 個のサービス拠点（たとえば、レストランなど） $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ が存在し、それぞれのサービス拠点 $d \in D$ は、以下に記す5つの項目を持つ。
 - $d.pos$ ：サービス拠点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。1つのノードに対して複数のサービス拠点があってもよい。その場合、ユーザがノードに到着した際、ユーザは目的とするサービス拠点においてサービスを受ける。逆に、ノードについて、必ずしもサービス拠点を割り当てる必要はない。
 - $d.Ls$ ： d においてサービスを受けているユーザのリスト
 - $d.Lq$ ： d においてサービス開始を待っているユーザのリスト
 - $d.C$ ： d 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。したがって、 $|d.Ls| \leq d.C$ である。
 - $d.St$ ： d においてユーザがサービスを受け終わるまでに要する時間（ただし、待ち時間を除く）

<ユーザ入力>

全ユーザの集合を U と表記する。各ユーザ $u \in U$ は以下の6つのデータを入力とする。

- $start_u$ ：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
- $goal_u$ ：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、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、各目的地、および最終目的地に付与された重要度の総和がユーザ間で等しくなるよう、式 (1) のように正規化された値を設定する。

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

2.3 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、重要度と同値の満足度を得る。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、移動のコストや重要度を考慮し、訪問する目的地の選別を行う必要がある。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、 $S = \langle s_1, \dots, s_{|U|} \rangle$ 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、 $s_i = \langle d_1^u, d_2^u, \dots, d_j^u, \dots, d_{l_u}^u \rangle$ と表記する。ここで、 $d_j^u (d_j^u \in D_u)$ はユーザ u_i が j 番目に訪問する目的地であるが、ユーザが入力したスケジュールから、いくつかの目的値が削減された結果が出力される可能性がある。これにともない得られる満足度についても変化が現れる。仮に時間内で入力した全目的地を巡回できればユーザの満足度は 100 となる。一方、訪問する目的地が削減された場合や、希望帰着時間を超過した場合にはその値は低下する。

3. 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、およびサービス拠点におけるサービスモデルについて述べる。

3.1 交通流モデル

動的交通流シミュレーションモデルは、流体モデルと離散モデルに大別される¹⁴⁾。流体モデルは道路上の車両全体の流れを交通流としてとらえ計算する。流体モデルは、道路上の個々の車両移動を考えず、道路または道路を分割した短い区間において、密度を更新していく方式が主流である。交通量の移動計算を簡略化しているため計算コストが少なく、大規模ネットワークへ適用可能であるという利点を持つ。流体モデルは、交通流理論に従うモデルであるが、車両を流体集合として扱い 1 台 1 台を区別できないため、経路選択挙動をモデル化できないという短所がある。一方、離散モデルは車の挙動を個々に取り扱うため、経路選択挙動が容易にモデル化できるという長所を持つ。文献 8), 15), 16) では密度管理を流

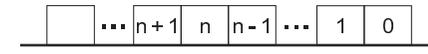


図 2 ブロック番号の割当て例
Fig. 2 Example of block assignment.

体モデルにて行うことで計算コストを低減させるとともに、車両を離散的に扱うよう拡張している。本研究では、大規模ネットワーク道路上において多数の車両が独自の経路選択挙動を行う環境を想定しているため、同様の観点でモデルを構築する。以下、本モデルの詳細を説明する。

リンクをある固定長 L のブロック群に分割し、図 2 のように先頭ブロックから順番に番号を割り当てる。ここで、ブロック長 L 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 秒の時間経過とする) 移動した際の移動距離と等しい値とする。リンクの 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 K_n は $\frac{N_n}{L}$ で定義される。ブロックの通過速度 V_n は、交通流のシミュレーションにおいてよく利用されている Greenshields の式¹⁷⁾ を用い、式 (2) のように定義する。本式は、ブロックの密度が増加するにつれて、速度が線形的に低下することを示している。

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

各ユーザの移動計算は、先頭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。仮に、ブロック n に属するユーザが、隣接するブロック $n-1$ に移った際に、移動先のブロックの通過密度 K_{n-1} が K_{max} を超える場合は、ブロック間の移動を行わず、現在のブロック n とブロック $n-1$ の境界で停止し (ブロック n にとどまるとする)、ブロック $n-1$ の混雑が解消するまで待機する。また、各ブロックについて式 (2) に基づいて、シミュレーションステップごとに通過速度を更新する。

本研究では大規模交通網における複数ユーザの挙動を取り扱うため、できる限り単純な交通流モデルを構築する。そのため、現段階では信号 (赤信号時の停止)、交差点における右折待ち、交差点以外での U ターン、複数車線、追い越し、行き止まり、といった要素を考慮していない。

3.2 サービス拠点のサービスモデル

ユーザは自身が訪問を希望するサービス拠点が存在するノードへと移動しサービスを受ける。新規ユーザがサービス拠点 d に到着した際に、サービス状況に空きがある場合は、即座にサービスを開始する。空きがない場合は待ち行列に並び、空きが生じるまで待機する。サービスを受けているユーザは、 $d.St$ の時間を消費することでサービスを終了し、次の目的地に向けて移動を開始する。このとき、 d にサービスの空きを待っているユーザが存在する場合は、待ち行列 $d.Lq$ の先頭に位置するユーザに対しサービスが開始される。

3.3 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。SD 戦略を用いるユーザは、各経路の混雑情報を利用しない。すなわち、地図のみを参照し 2 地点間の移動を行うユーザに該当する。

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) は、目的地間を最短時間で移動可能な経路を選択する戦略であり、車載 VICS カーナビゲーションシステムの利用に該当する。ST 戦略を用いるユーザは、地図情報に加えて、道路交通情報センタから受け取った道路網全体の混雑情報に基づいて経路を決定する。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 とする。VICS センタは、一定時間間隔で ST 戦略を用いるユーザに対して、全リンクの期待通過時間を配信する。ST 戦略を用いるユーザは交差点を通過するたびに、各リンクの期待通過時間情報を基に、現在地点から目的地までの期待通過時間を最小化する経路を再計算し、自身の経路を変更する。

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 8) で提案された手法である。RIS 戦略を用いるユーザは、地図情報と現在の混雑情報に加えて、RIS 戦略を用いる他のユーザが選択した経路の期待混雑度に基づいて経路を選択する。RIS 戦略では、各ユーザの通過予定経路情報を経路情報サーバに収集し、本情報を基に予測される渋滞情報を計算する。各ユーザは計算された情報を基に自身の経路を再調整し、他の RIS 戦略を用いる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。以下、本手法

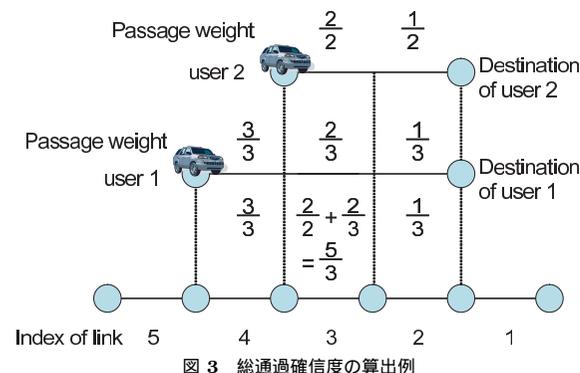


図 3 総通過確信度の算出例

Fig. 3 Example of total passage assurance calculation.

の詳細を説明する。

ここでは、ユーザ j が選択した移動経路上に p 個のリンクが存在する場合を考える。まず、移動経路上のリンク l について、ユーザが将来そのリンクを通過する確率を、通過確信度 (Passage Assurance) $PA_{j,l}$ と定義する。次に、 p 個のリンクを含む経路について、スタート地点からリンク p まで、通過確信度を以下のように割り当てる。

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

たとえば、現在地点を含むリンクには $1(p/p)$ が、目的地点を含むリンクには $1/p$ が割り当てられる。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。割当て終了後、各ユーザは自身の通過確信度を経路情報サーバに送信する。

次に、経路情報サーバはすべての RIS 戦略を用いるユーザから得られた PA の総和を、図 3 のように計算し、総通過確信度 (Total Passage Assurance) TPA_l と定義する。経路情報サーバはこの値を計算し、さらに以下の式を用いて、RIS 戦略を用いるユーザに配信する情報として、各リンクが将来的にどの程度混雑するかを予想した、期待混雑度 (Expected Traffic Congestion) ETC_l を次のように算出する⁸⁾。

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

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。経路情報サーバは交差点に近づいたユーザに対して全リンクの期待混雑度を配信する。この情

報を基に、ユーザは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 戦略を用いるユーザと重複しない経路を選択する。

4. 多数ユーザ同時スケジューリング手法

本章では、提案方式の概要、スケジューリング手順、およびスケジューリング時間高速化のための工夫点について述べる。

4.1 提案手法の概要

本研究の目的は、複数ユーザが行動を開始し、帰還するまでの長期間における混雑状況を考慮した巡回スケジュールを算出することであるが、このような条件の下、将来の混雑を予測し各ユーザの旅程を調整することは一般的に困難である。そこで提案手法では、各ユーザが希望する目的地を巡回したと仮定したシミュレーションを計算機上で行うことで、各道路、各施設が将来どの程度混雑するかを予測することを考える。

提案方式では、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目的地を同時に巡回したと仮定したシミュレーションを行う。シミュレーションを行うことで、複数のユーザが同一の経路や目的地に集中した場合は、各地点においてどの程度の混雑が生じるかが分かる。その結果、ユーザが設定した目的地を希望どおりに巡回した場合に、混雑によりスケジュールに遅れが生じるかどうか、および、帰着時間を超過するかどうかが予測可能となる。次に、超過が生じたユーザについては、訪問目的地の順序や数を変更するなどの方法でスケジュールを更新する（目的地を削減する際は、重要度の高い目的地を優先的に残す）。上記処理を複数回繰り返すことで、各ユーザが希望する時間までに最終目的地に到着でき、かつ重要度の高い目的地をできるだけ多く訪問できるようスケジュールの調整を行う。

図 1 ですでに示したように、提案手法を実現するための前提条件として、各ユーザは、WiMAX¹⁸⁾ やセルラ通信などの広域通信機能を備えたデバイスを持すると仮定する。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（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とりが可能とする。各ユーザは巡回を開始する前に、端末上で訪問を希望する巡回目的地群、およびその重要度を入力し、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、その結果を基に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。

4.2 スケジューリングアルゴリズム

提案アルゴリズムでは、4.1 節で述べたように、各ユーザができるだけ重要度の高い目的地を多く巡回し、希望する時間内に最終目的地に到着できるように調節を行う。以下にスケジューリングアルゴリズムの詳細を示す。

- (1) 各ユーザ $u \in U$ について、 u が訪問を希望する目的地群 D_u を、訪問予定の目的地群を格納する変数 D'_u にコピーする。出発地点 $start_u$ を出発し、 D'_u のすべての目的地を訪問し、最終目的地 $goal_u$ に至る最短の経路を求める。この最短巡回経路を求める問題は、巡回セールスマン問題に帰着できるので、Lin-Kernighan 法¹⁹⁾ など、よく知られた発見的アルゴリズムにより求めることができる。求めた巡回経路を s_u とする。
- (2) 全ユーザが (1) または (4) で求めた経路のとおり巡回する場合のシミュレーションを行い、各シミュレーション時刻 $t (\geq 0)$ での各ユーザ u の位置を求める。シミュレーションでは、3.1 節で述べた交通流モデルに従って、時刻 t における各ブロックの車両（ユーザ）密度および車両速度から次の時刻 $t+1$ における各ユーザ u の位置および車両速度を求める。また、目的地間の移動には 3.3 節で述べた RIS 戦略を用い、各目的地での滞在時間は 3.2 節で述べたモデルに従って算出する。本シミュレーションは、全ユーザが最終目的地に到達するまで行う。
- (3) シミュレーション終了後、各ユーザ u の満足度合計（希望帰着時刻 $time(goal_u)$ までにサービスを受けることができたサービス拠点群の重要度の和）と帰着するまでに要した時間を求める。
- (4) 各ユーザ u の現在の訪問予定目的地群 D'_u に対し、目的地の削減または追加、巡回順序の変更などを行う（詳細は 4.3 節で解説する）。変更後の訪問予定目的地群を D'_u に更新する。 $start_u$ を出発し、 D'_u のすべての目的地群を巡回した後、 $goal_u$ に到達する最短経路を求める。
- (5) (2)–(4) の処理を全ユーザの巡回目的地変更がなくなる、またはあらかじめ指定された回数繰り返し、決定したスケジュールをユーザに配布する。

4.3 巡回目的地の変更手順

予備実験の結果、4.2 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、解が収束しなかった（この状態を振動状態と定義する）。そこで、タブーカウントという概念を用いてこの繰返しを防止する。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ごとにタブーカウ

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については、以後その目的地の追加は行わないことで、短時間で目的地変更の繰返しを停止させることができる。

以上の点をふまえ、4.2 節アルゴリズムのステップ (4) で述べた巡回目的地変更手順を、以下のように定義する。

- (4a) シミュレーションの結果、ユーザ u が希望帰着時刻 $time(goal_u)$ 以前に訪問予定目的地群 D'_u の全目的地を巡回し最終目的地 $goal_u$ に到達したかどうかを確認する。そうである場合、過去に目的地を削減していた (4b) の処理) かどうかを調べ、削減していなければ (4e) に移る。過去に目的地の削減を行っていた場合は、(4c) へ移る。 $time(goal_u)$ 以前に帰着できていない場合は (4b) へ移る。
- (4b) D'_u から最も重要度の低い目的地を 1 つ削除し、(4e) に移る。
- (4c) $D_u - D'_u$ に含まれる目的地のうち、タブーカウントが規定回数に満たない目的地群 (追加候補目的地集合と呼ぶ) を生成する。
- (4d) 現在の訪問予定目的地集合 D'_u に、追加候補目的地集合から重要度が最も高い目的地を追加する。また、その目的地のタブーカウントを 1 増やす。
- (4e) ユーザ u に対する訪問予定目的地群 D'_u の変更手続きを終了する。

4.4 スケジューリング時間高速化のための工夫

提案手法では、全ユーザの予定スケジュールを基にシミュレーションを行い、その結果から予定巡回目的地を変更するという手順を何度も繰り返すために、スケジューリングに要する時間が大きくなるという問題がある。

提案手法では、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、ブロック長が短かければ、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。また、全ユーザの道路網上の移動、サービス拠点におけるサービス処理を、1 シミュレーションステップごとに更新するが、1 シミュレーションステップ=1 秒の時間経過と設定されているため、1 回のシミュレーションが終了するためには多大な時間を消費する。仮に、ブロック長を長くとした場合は、リンクに含まれるブロック数が減少して計算量が削減されるが、ブロック長が 1 シミュレーションステップあたりの自由流速度で進む距離より大きい場合は、4.2 節のアルゴリズムの各ループで、自由速度の流れがブロックの途中までしか到達せず、ブロック間の交通状態が不均一になることが知られている²⁰⁾。また、シミュレーションステップを大きい時間にした場合は、密度の変化が複数ブロックにわたってなだらかになり、精度面で同様に問題が生

じることが知られているため^{21),22)}、交通流の再現性に正確さが求められる事例への適応は不向きである。

信号制御方式の評価など、各道路におけるユーザの細かな挙動を再現する必要がある場合は、上述したような正確性が求められるが、本提案手法によってシミュレーションを行う目的は、ユーザが初期地点から出発し、最終目的地へ到着するまでの期間における、各道路、各施設の混雑具合をある程度の精度で把握することである。たとえば、ある特定のユーザがある時間において交通網内のどのリンクに所属し、リンク内のどの位置に存在するか、などの細かな挙動を正確に再現する必要はない。よって、粗いシミュレーションを行った結果と、厳密にシミュレーションを行った結果を比較した際に、それらの結果が大幅に異ならないければ、少々の精度が落ちることを許容したうえで、シミュレーションの簡略化を行うことは妥当である。

以上の点をふまえ、本研究では交通流のパラメータを変更することで、シミュレーションに要する時間の短縮を図る。変更するパラメータは、シミュレーション時のブロック長、シミュレーションステップの時間間隔である。これらを変更することで、以下のような効果が見込める。

(1) ブロック長の変更

一般的には、1 ブロック長は、自由流速度で 1 シミュレーションステップ移動した変位に等しい値とするが、本設定では、ブロック長を大きくとることで、速度の更新に要する計算時間の短縮が期待される。

(2) シミュレーションステップの変更

シミュレーションステップを変更することで、ユーザの 1 シミュレーションステップあたりの移動変位が大きくなり、シミュレーションに要する時間が短縮される。現在は、1 シミュレーションステップ=1 秒の時間経過と設定しているが、シミュレーションステップを大きくとることで、シミュレーション処理に要する時間の大幅な短縮が期待される。

文献 20), 22) より、シミュレーションステップを dt 、自由流速度を V_f 、ブロック長を dL とすると、ブロック長 dL は、シミュレーションステップ dt でブロックを飛び越えて車両が流出しないようにするため、 dL は $V_f \cdot dt$ より長く設定する必要がある。一方、 dL が $V_f \cdot dt$ より長いと、1 シミュレーションステップのなかで、自由流のウェーブがブロックの途中にとどまるため、ブロックの状態を 1 つの値で表すことが困難となり、交通流の再現性に問題が生じる。よって、 dL は $V_f \cdot dt$ に等しく設定することが一般的である。本実験では、これらの点をふまえて、 $dL = V_f \cdot dt$ を満たす範囲で、パラメータを変更し計算機上で

実験を行う。

5. 評価実験

提案手法の有効性を確認するために、JAVA 言語で開発したシミュレータを用いて、(1) スケジューリング時間高速化のために行ったシミュレーション簡易化の有効性、(2) 既存手法と比較した際の優位性の 2 点について評価を行った。(1) については、4.4 節で述べた方法について、実験パラメータを変更し測定を行った。(2) については、提案手法を実際の環境で利用することを考えた際に、問題が生じると予想されるいくつかの状況に対しても実験を行った。以下、詳細を述べる。

まず、道路網上で目的地の巡回を行うすべてのユーザが提案手法を用い、同時にスケジュールを受け取り巡回を行った際と、異なる設定(5.1 節で述べる)を用いて巡回を行った際の結果を比較した。次に、提示されたスケジュールを無視したほうがユーザ個人にとって有利であるならば、この提案手法を用いるインセンティブが失われる。そこで、ユーザが提示されたスケジュールを無視し、独自の判断で行動した場合についての実験を行った。なお、一連の実験に使用したマシンは次のとおりである：Intel Core2 Duo E6700 (2.66 GHz), メモリ：2GB Memory, OS：WindowsXP Pro。

以下、各実験に共通する環境設定、提案手法との比較を行う比較対象の設定、評価指標について述べ、次に、各実験の設定、およびそれらの結果について述べ、考察を行う。

5.1 共通の実験設定

本実験では、図 4 に示す大阪市下の主要道路を模した地図を用いた。道路網上のノード(交差点)数は 158、リンク(交差点間の道路)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 つのサービス拠点割り当てられているとする(実際は、ノードに対して必ずしもサービス拠点が割り当てられる必要はなく、単に交差点部として扱ってもよい)。また、各リンクは双方向に移動可能である。各ノードのサービス所要時間は、実際の環境においては、提供されるサービスに応じて異なる値をとることを考慮し、600–3,600 秒(10 分–1 時間)と現実的な滞在時間の範囲でランダムに設定した。また、各サービス拠点のキャパシティについては 40–80 ユーザの範囲でランダムに設定した。これらの値は、仮に 10,000 程度のユーザが、道路網上に存在するすべてのサービス拠点に均等に割り振られた場合に、各拠点における待ち時間が、ほとんど生じない程度の値を参考に設定した。各リンクの自由流速度は 60 km/h (16.67 m/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 8) で用いられている一般的な値を用い、0.14 とし

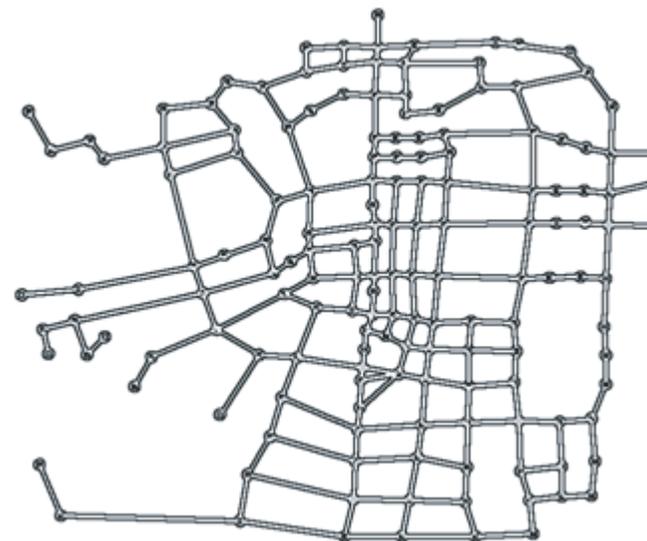


図 4 道路網構造

Fig. 4 Road network structure.

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 台の普通自動車であり、自動車がスケジューリングサーバとの通信を行うナビゲーションシステムを搭載していると仮定する。

実験において、ユーザ数は 10,000–25,000 で可変させた。実際には、大阪市の 1 日の交通量は数十万～数百万台であることが予想される。本実験では、各道路、各サービス拠点の流動性にのみ着目し、初期地点から出発し、最終目的地へ到着するまでの期間における、各道路、各サービス拠点の混雑具合をある程度の精度で把握することを目的とし、実験に用いた計算機の計算能力、メモリ容量の範囲内で抽象化したユーザ数(類似の行動を行う複数ユーザを 1 ユーザで代表させるなど)を使用することとした。

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する。移動時には、各ユーザは各目的地に到着した際にサービスを受け、その地点でのサービスが終了した後、次の目的地へ向けて新たに移動を開始する。ユーザは希望する目的地を巡回し終わり、最終的な目的地へと到達した際に行動を終了し、道路網上から取り除かれる。なお、提案アルゴリ

表 1 タブーカウントの許容回数検証結果 (ユーザ数: 10,000)
Table 1 Results for different tabu count limits (10,000 users).

タブーカウントの 許容回数	平均訪問 目的地数	平均 満足度	計算時間 (分)	ループ 回数
1	2.195	64.4	59.7	11
2	2.196	64.5	71.8	13
3	2.197	64.3	108.4	20
4	2.196	64.3	123.7	23
5	2.197	64.4	141.6	26

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。出発地点、各目的地、最終的な目的地、および各目的地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必要な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。

解の振動を防止するために利用するタブーカウントの許容回数について、効果的な値を求めるために予備実験を行い決定した。実験では、10,000 ユーザが、各々ランダムに選択された 0-4 つの拠点への訪問を希望したとして、図 4 の道路網を用いて行った。また、タブーカウントの許容回数は 1-5 の範囲で変更し、それぞれについて計測を行った。本予備実験の結果を表 1 に示す。本結果より、タブーカウントに比例してループ回数、計算時間が増加したが、ループ回数にかかわらず、平均満足度、訪問目的地数はほぼ一定であることが分かる。よって、許容回数の増加にともないスケジューリングに要する時間が増すことを考慮し、本実験では許容回数を 1 とする。さらに、スケジューリング時のループ回数は、上記設定の下で予備実験を行った結果、5 ループを超えるあたりにおいてほとんどのユーザが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 5 とした。

5.2 比較戦略の設定

提案手法の有効性を確認するため、本研究との関連性が強い既存研究 (8), (10) との比較実験を行う。しかし、これらの既存研究は、道路、サービス拠点のいずれかの混雑を扱っており、基本的には 2 地点間の移動のみを対象としている。そこで、本研究で提案する手法との比較を行うために、道路、サービス拠点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アルゴリズムの拡張を行った。以下、その詳細について述べる。

まず、ユーザは通信ユニットを所持し、各道路、各サービス拠点の混雑情報を随時入手可

能であると仮定する。ユーザは自身が訪問を希望する各目的地における現在の混雑状況、その目的地へ達するまでの経路における混雑状況の両方を考慮し、その程度に応じて次の目的地を決定する。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、将来的な予測はまったく含まれていない。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、正確な時間を予測することは現実的に困難であり、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、巡回希望リスト内の未訪問目的地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、式 (4) により経路の移動、目的地において滞在に要する時間を見込む。

$$predicttime = stay + time(d_{now}, d) \quad (4)$$

ここで、 $time(d_{now}, d)$ は、現在所属する目的地 d_{now} から、巡回希望リスト内の選択候補となる目的地 d への移動に要する時間である。 $stay$ は目的地 d 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下式で表される。

$$stay = \frac{|d.Lq| \times d.St}{d.C}$$

ここで、 $|d.Lq|$, $d.St$, $d.C$ は、それぞれ目的地 d の待ち行列の長さ、サービス時間、キャパシティを表している (2 章の定義参照)。ユーザは巡回候補となるすべての目的地の見込み時間を算出し、最も予想所要時間 $predicttime$ が小さいサービス拠点を次の訪問先に設定し直す。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、その目的地を訪れることで希望帰着時間を超過しないかどうかを、式 (5) に基づき見積りを行う。

$$returntime = predicttime + \alpha \cdot time(d_m, d_{end}) \quad (5)$$

ここで、 $time(d_m, d_{end})$ は、目的地 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式 (5) 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、その目的地への訪問をキャンセルし、最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。よって、 α の値が小さい場合は、帰還に要する時間を短めに見積もり、 α の値が大きい場合は、時間に余裕をもって最終目的地へ帰還することを意味している。本実験では、 $\alpha=1$ とした。また、2 地点間の移動、および移動所要時間の見積り時には、3.3 節で述べた経路情報共有戦略 (RIS)

を用いた。

ここで、上記手順により巡回を行う戦略を、以後、直近情報利用戦略と呼ぶ。これに対して、提案手法を用いて巡回を行う戦略を、グローバル情報利用戦略と呼ぶこととする。直近情報利用戦略は、各ユーザがそのつど目的地を決めて移動する方式のため、計算コストがほとんどかからないのに対し、グローバル情報利用戦略では、全ユーザの巡回予定情報を用いた巡回シミュレーションのためユーザ数に依存した計算コストがかかる。

5.3 評価指標

ユーザが希望する目的地を帰着時間内で巡回できたか、という観点から、以下の項目に基づき評価を行った。

平均満足度：全ユーザの満足度の平均値

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

5.4 実験結果・評価

5.4.1 実験 1：交通流モデルのパラメータ調整によるスケジューリング時間の高速化

本実験では、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調整することで、解の精度、および算出のための計算時間がどの程度変動するかを調べた。本実験では、実験開始時と同時にすべてのユーザが道路網上に配置され、サーバに対して自身が巡回を希望する目的地情報を送信、サーバ側は受け取った情報を基にスケジューリングを開始する。スケジューリング時には、交通流モデルのパラメータを調整することで高速化を図った。スケジューリングが終了した際に、各ユーザはスケジューリング結果を受け取り、得られた結果に従い巡回行動を開始した。

まず最初に、通常のパラメータを用いた交通流モデル（シミュレーションステップ、ブロック長を変更していない）でスケジューリングを行った際の、計算に要する時間を図 5 に、それぞれの場合の平均満足度の分布を図 6 に示す。図 5 より、スケジューリングに要する時間は、ユーザ数が増加するにつれて線形的に増加することが分かる。代表的な数値を見ると、10,000 ユーザにおいては 30 分程度、15,000 ユーザにおいては 43 分程度、20,000 ユーザにおいては 50 分程度、25,000 ユーザにおいては 65 分程度となっている。また、これらの計測を行うに際して、ユーザ数が 20,000 に達するあたりから、デッドロック（あるリンクの先頭に位置するユーザが最高密度に達しているリンクに進入できず停止しており、そのリンクの先頭ユーザも同様にして次のリンクに進入できずに停止している。このような

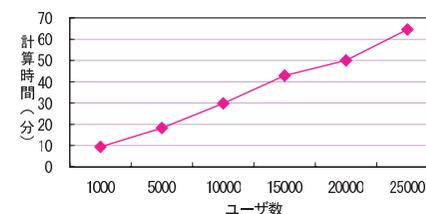


図 5 通常のパラメータ値を用いた交通流モデルでスケジューリングを行った際に要するスケジューリング時間の分布
Fig. 5 Calculation time for traffic model with usual parameter values.

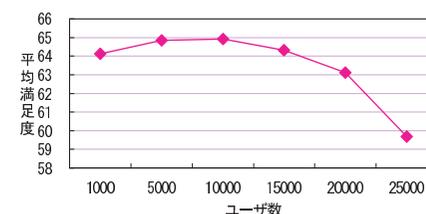


図 6 通常のパラメータ値を用いた交通流モデルでスケジューリングを行った際の平均満足度の分布
Fig. 6 Satisfaction degree for traffic model with usual parameter values.

状態が環状に発生すると、いつまでもこの状態が解消されない) が頻繁に発生するようになったため、25,000 ユーザで計測を打ち切っている。

次に、交通流モデルのパラメータを調整した場合の結果を見る。調整したパラメータはブロック長とシミュレーションステップであり、これらの値を変更することで、シミュレーション結果にどのような影響を与えるかを確認した。本実験では、道路網全体のユーザ数は 10,000, 15,000, 20,000, 25,000 に設定した。ブロック長、シミュレーションステップの倍率については、文献 20), 22) の記述に従い、同倍率で変化させた。倍率の値は、各ユーザ数について、それぞれ 5 から 50 の範囲で 5 刻みで変更した。

上記設定の下に実験を行った結果を図 7, 図 8 に示す。なお、図中には比較値として、パラメータを変更していない（倍率が 1 である）場合の結果も同時に掲載している。図 7 より、計算時間については、いずれのユーザ数においても大幅な短縮が見られるが、倍率が大きくなるにつれて、時間の短縮具合は緩やかになっている。具体的な値を見ると、パラメータを調節しない場合（倍率が 1）と倍率を 50 とした場合を比較すると、約 6 分の 1 程度まで低減されている。平均満足度については、倍率を変更することで、変更しない場合と比べて不規則に低下しているが、特に、20,000, 25,000 のユーザを設置した際に大きく低下し

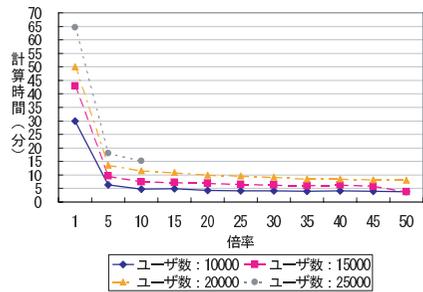


図 7 交通流モデルのパラメータ値 (ブロック長とシミュレーションステップ) を変更した際のスケジューリング時間の分布

Fig. 7 Calculation time for traffic model with different parameter values (in block length and simulation step length).

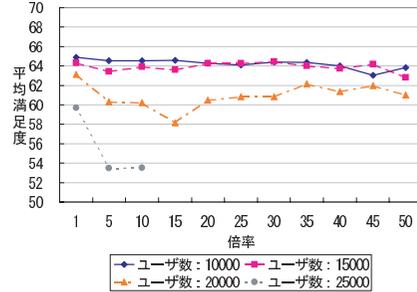


図 8 交通流モデルのパラメータ値 (ブロック長とシミュレーションステップ) を変更した際の平均満足度の分布

Fig. 8 Satisfaction degree for traffic model with different parameter values (in block length and simulation step length).

ている。まず、20,000 ユーザの場合には、倍率を 15 倍に設定した際には、10%ほど満足度の低下が生じる。しかし、平均すると低下率は 5%程度に抑えられているため、十分実用的な範囲である。次に、25,000 ユーザの場合を見ると、倍率が 5, 10 の時点で 15%ほど満足度が低下している。また、15 以上の倍率については、デッドロックが発生し、値を取得することができなかった。これより、道路網が過剰に混雑している状況下では、パラメータを変更することで生じる影響が相当大きくなる事が分かる。さらに、倍率を大きくとりすぎた場合には、デッドロックによりスケジューリング自体を行うことが困難となる。

以上の結果から、交通流モデルのパラメータを適切に調整し、シミュレーションを簡略化することにより、道路網が多少混雑している状況においては、過度に精度が低下しない範囲にて、計算時間を大幅に短縮できることが分かった。

図 7, 図 8 の結果より、ユーザ数が 20,000 の場合でも、一般的な PC で 8 分程度でスケジュールが算出できることが分かった。一般に、サービス拠点や各道路エリアの混雑度合いは、数分間隔という短い期間には変化しないと考えられる。そのため、提案手法によるスケジュールの更新を 10-15 分間隔で実行し、各ユーザはスケジュール要求時に、システムが過去に計算した最新のスケジュールを取得して利用するという運用形態をとることにより、提案手法の算出時間は実用可能な値であるといえる。

5.4.2 実験 2: 直近情報利用戦略との比較

本実験では、道路網上で目的地の巡回を行ったすべてのユーザが、グローバル情報利用戦

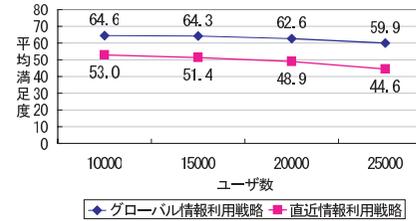


図 9 ユーザを同時に道路網上に配置した場合における平均満足度の分布

Fig. 9 Satisfaction degree for different number of users.

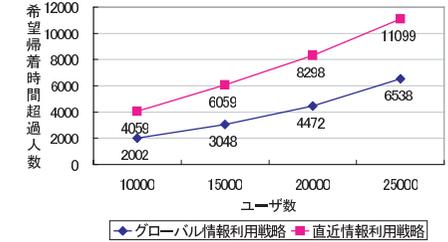


図 10 ユーザを同時に道路網上に配置した場合における希望帰着時間超過人数の分布

Fig. 10 Number of over-return-time users for different number of users.

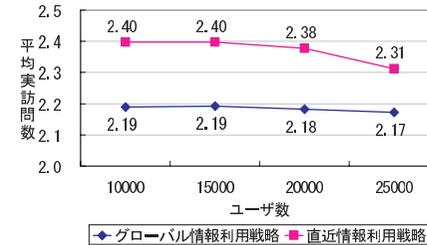


図 11 ユーザを同時に道路網上に配置した場合における平均実訪問数の分布

Fig. 11 Number of visits for different number of users.

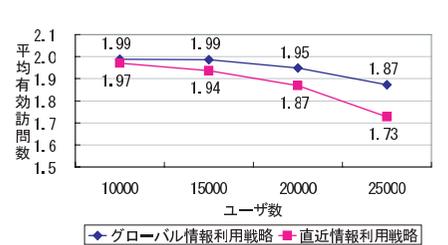


図 12 ユーザを同時に道路網上に配置した場合における平均有効訪問数の分布

Fig. 12 Number of valid visits for different number of users.

略 (提案手法) を用い巡回を行った場合と、直近情報利用戦略を用いた場合を比較した。道路網上には、両方式について、各々ユーザ数を 10,000, 15,000, 20,000, 25,000 と変化させ配置した。また、実験 1 と同様、全ユーザには実験開始時と同時に巡回を開始させた。

実験を行った結果について、平均満足度の分布を図 9, 希望帰着時間超過人数の分布を図 10, 平均実訪問数の分布を図 11, 平均有効訪問数の分布を図 12 に示す。ここで、平均実訪問数は、ユーザが指定した帰着時刻を超えて訪問したサービス拠点も含む数であり、平均有効訪問数は帰着時刻までに訪問したサービス拠点の数である。帰着時刻を超えて訪問したサービス拠点に対しては満足度は加算されない。したがって、平均有効訪問数、満足度が高いほど良い方式であるといえる。図 11 から、平均実訪問数は直近情報利用戦略の方が

0.10-0.20 程度高いが、図 9 から、平均満足度については、グローバル情報利用戦略が直近情報利用戦略と比べて 20-30%程度高く、図 10 から、帰着時間を超過したユーザ数も少ない。また、図 12 から、平均有効訪問数も、グローバル情報利用戦略の方が高くなっていることが分かる。

次に、図 11, 図 12 から、直近情報利用戦略では、実訪問数と有効訪問数の差がユーザ数 10,000 のときは $2.40 - 1.97 = 0.43$ であるのが、ユーザ数 25,000 のときは $2.31 - 1.73 = 0.58$ となり、道路網上のユーザ数の増加にともない、徐々に大きくなっていることが分かる。これは、道路網のユーザ密度が高い場合、現在の混雑情報を基に最も混雑の小さい目的地を選択したとしても、移動経路、および目的地に、予想されていた以上のユーザが集中してしまい、移動開始前に行った見積り以上の時間を消費していることが推察される。その結果、予想外の混雑に巻き込まれ、帰着時間を超過するユーザが頻発したものとされる。グローバル情報利用戦略では、シミュレーションの結果、仮に次の目的地を訪問した際に混雑に巻き込まれ、希望帰着時間を超過した場合は、訪問目的地の順序変更、削減を行い、混雑している地点へはできる限り向かわないように調整を行う。よって、この処理を繰り返すことで、道路網上のユーザが時空間的に分散されるため、直近情報利用戦略を用いることで生じた問題を回避している。さらに、訪問目的地の削減時においても、できるだけ重要度の高い地点を優先的に残すため、比較手法と比べて平均満足度も高くなっており、グローバル情報利用戦略の有効性が確認できる。

以上の結果より、グローバル情報利用戦略では、繰り返しシミュレーションを行うことで、帰着時間を考慮しつつ、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。

5.4.3 実験 3: インセンティブの評価

本実験では、グローバル情報利用戦略(提案手法)を利用しスケジュールを受け取ったユーザの何割かが、与えられた結果に従わず、独自の判断で行動する(ここでは、ユーザがサーバから与えられたスケジュールを無視し、直近情報利用戦略を用いて自身が元々希望していた目的地群を訪問することを意味する)場合を考え、グローバル情報利用戦略に従うインセンティブを確認する。道路網全体のユーザ数は 10,000, 15,000 に設定した。なお、20,000 以上のユーザ数についても計測を試みたが、デッドロックが頻発したため断念した。ユーザの配置方法については実験設定 2 と同様とし、配置されたユーザについて、独自の判断で行動するユーザの割合を 10 から 90 の範囲で 10%刻みで変化させ、それぞれの場合において計測を行った。

独自の判断で行動するユーザの満足度がどのように変化したのかを、図 13, 図 14 に示

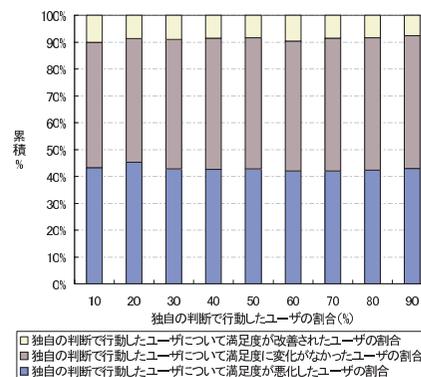


図 13 独自の判断で行動したユーザの満足度の変化 (10,000 ユーザ)

Fig. 13 Satisfaction degree of selfish users (Among 10,000 users).

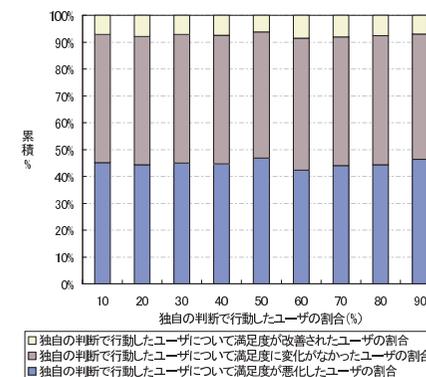


図 14 独自の判断で行動したユーザの満足度の変化 (15,000 ユーザ)

Fig. 14 Satisfaction degree of selfish users (Among 15,000 users).

す。独自の判断で行動したユーザについて、サーバの指示に従わないことで満足度が改善されるユーザも最大で 10%程度存在するが、満足度が変わらない(45-50%程度),または満足度が悪化する(40-45%程度)ユーザの割合が圧倒的に多いことが分かる。また、独自の判断で行動するユーザの全体に対する割合が異なる場合、全体のユーザ数が 10,000 人の場合や 15,000 人の場合でも、同じ傾向が見られる。以上の結果より、ユーザが独自の判断で行動することで得をする確率は 10%程度であり、グローバル情報利用戦略により得られた結果に従う方が得策である。

6. ま と め

本論文では、大規模道路網における混雑状況を考慮し、多数のユーザがそれぞれ、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。

大阪市下の主要道を模した地図を用い実験を行った結果、20,000 のユーザについて、8 程度でスケジュールの算出が可能であった。また、ユーザが経路、目的地の直近の混雑情報を利用して行動した場合と比べて、20-30%程度高い満足度を達成可能であり、提示されたスケジュールを無視して独自の判断で行動するユーザが出現する場合においても、提案手法が有効に機能することが分かった。ユーザが直近の混雑情報を利用して行動する場合に

は計算時間がほとんどかからないのに対し、提案手法では、現状で、20,000 ユーザ巡回シミュレーションのため 8 分程度の計算時間がかかっている。しかし、この計算時間により得られる 20-30%の満足度向上は十分に価値があるものと考えている。

一方、提案手法は上記規模の道路網においては、現実的な時間内でスケジュールの算出が可能であったが、現実の都市で本手法を運用できるようにするためには、より詳細な道路網、多くのユーザ（大都市を対象とした場合は少なくとも 10 万程度のユーザを同時にスケジューリングする必要がある）を取り扱う必要があると考えられる。また、現実の環境では、サービス拠点によって収容数が著しく異なるケース（水族館とレストランなど）も存在する。これらに対応できるよう、今後シミュレーションの分散実行方式や抽象化方式を検討したい。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：全国の渋滞状況。
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/data/jutai/indexd.html>
- 2) 国土交通省近畿地方整備局大阪国道事務所：大阪国道事務所の取り組み—大阪国道事務所事業概要。 <http://www.osaka.kkr.mlit.go.jp/ir/gaiyo/match04.html>
- 3) JamJamNews：地域・京都に路面電車が復活か—交通渋滞緩和の救世主。
<http://www.news.janjan.jp/area/0611/0611094370/1.php>
- 4) Mizokami, S., Asakura, Y., Furuichi, E. and Kameyama, M.: Forecasting System of Sightseeing Travel Demand Considering Area Attraction and Excursion Behavior, *J. Infrastructure Planning and Management*, Vol.639, No.IV-46, pp.65-75 (2000).
- 5) Vehicle Information and Communication System Center: VICS HOME PAGE.
<http://www.vics.or.jp/>
- 6) Mahmassani, H.S. and Jayakrishnan, R.: System Performance and User Response under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor, *Transportation Research*, Vol.25A, pp.293-307 (1991).
- 7) Klügl, F., Bazzan, A.L.C. and Wahle, J.: Selection of Information Types Based on Personal Utility a Testbed for Traffic Information Markets, *Proc. 2nd Int'l Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, pp.374-384 (2003).
- 8) Yamashita, T., Izumi, K., Kurumatani, K. and Nakashima, H.: Smooth Traffic Flow with a Cooperative Car Navigation System, *Proc. 4th Int'l Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-05)*, pp.478-485 (2005).
- 9) Suzuki, R. and Arita, T.: Effects of Information Sharing on Collective Behaviors in Competitive Populations, *Proc. 8th Int'l Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB-03)*, pp.36-39 (2003).
- 10) Kawamura, H., Kataoka, T., Kurumatani, K. and Ohuchi, A.: Investigation of Global Performance Affected by Congestion Avoiding Behavior in Theme Park Problem, *IEEE Trans. on Electronics, Information and Systems*, Vol.10, No.124, pp.1922-1929 (2004).
- 11) Kataoka, T., Kawamura, H., Kurumatani, K. and Ohuchi, A.: Distributed Visitors Coordination System in Theme Park Problem, *Proc. 2004 Int'l Workshop on Massively Multi-Agent Systems (MMAS-04)*, pp.335-348 (2004).
- 12) 柳田 靖, 鈴木恵二：テーマパークにおける巡回戦略の比較, 情報処理学会研究報告, 2007-ICS-147, pp.15-22 (2007).
- 13) 刀根哲也, 小原和博：テーマパークでの混雑情報と優先搭乗パスの効果に関するマルチエージェントによる検討, 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.3, pp.407-415 (2007).
- 14) 堀口良太：交通運用策評価のための街路網交通シミュレーションモデルの開発, 東京大学学位論文 (1996).
- 15) Horiguchi, R., Kuwahara, M. and Nishikawa, I.: The Model Validation of Traffic Simulation System for Urban Road Networks: 'AVENUE', *Proc. 2nd World Congress on Intelligent Transport*, Vol.4, pp.1977-1982 (1995).
- 16) 馬場美也子, 棚橋 巖, 北岡広宣, 森 博子, 寺本英二：交通流シミュレータ NET-STREAM, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.1, pp.226-235 (2005).
- 17) Greenshields, B.: A study of traffic capacity, *Proc. Highway Research Board*, Vol.14, pp.448-494 (1934).
- 18) The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards.
<http://www.ieee802.org/16/>
- 19) Helsgaun, K.: An Effective Implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic, *European Journal of Operational Research*, Vol.126, No.1, pp.106-130 (2000).
- 20) 赤羽弘和, 大口 敬, 小根山裕之：交通シミュレーションモデルの開発の系譜, 交通工学, Vol.37, No.5, pp.47-55 (2002).
- 21) 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. 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems*, CD-ROM (1996).
- 22) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 堀口良太：ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について, 交通工学, Vol.32, No.4, pp.39-43 (1997).

(平成 21 年 5 月 22 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



栗山 恭嘉

2006年大阪市立大学工学部卒業。2008年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在、(株)日立製作所勤務。



村田 佳洋 (正会員)

2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在、広島市立大学情報科学研究科准教授。遺伝的アルゴリズム、エージェント技術等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



柴田 直樹 (正会員)

1996年大阪大学基礎工学部中退，1998年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了，2001年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。2001年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2004年4月より現在，滋賀大学経済学部情報管理学科助教授。分散システム，ITS，遺伝的アルゴリズム等の研究に従事。ACM，IEEE 各会員。



安本 慶一 (正会員)

1991年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1995年同大学大学院博士後期課程退学後，滋賀大学経済学部助手。2002年より現在，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング，ユビキタスシステムに関する研究に従事。ACM，IEEE/CS，電子情報通信学会各会員。



伊藤 実 (正会員)

1977年大阪大学基礎工学部卒業，1979年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1979年より大阪大学基礎工学部助手。1986年より大阪大学基礎工学部講師。1989年より大阪大学基礎工学部助教授。1993年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。現在に至る。工学博士。データベース理論，効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事。ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員。