

特別研究報告書

観光地の実時間情報に基づく 観光者の満足度向上のための 巡回スケジュール生成手法

指導教員 椋木 雅之 准教授

京都大学工学部情報学科

内田 昌希

平成26年1月31日

観光地の実時間情報に基づく観光者の満足度向上のための 巡回スケジュール生成手法

内田 昌希

内容梗概

本研究では、観光者が訪問を希望する観光施設をできるだけ多く巡回できるようなスケジュールを生成することを目的とする。適切なスケジュールを生成する手法が確立されれば、観光者が効率よく多くの観光施設を巡回できるようにスケジュールを推薦するシステムを開発することが可能となる。観光者がより多くの観光施設を巡回することは、観光者にその観光地の良さを十分に堪能してもらうために非常に重要である。

適切なスケジュールを生成するためには、観光地の未来の状況を予測する必要がある。そのために本研究ではシミュレーションを用いる。移動経路および観光施設の混雑はお互いにさまざまな要素が絡み合っており、それらを同時に考慮してスケジュールを調整することは困難であるが、シミュレーションを用いることで、各観光者にどのようなスケジュールを提示したとき満足度が向上するかを予測を行うことができる。

シミュレーションを用いて未来予測を行うためには、観光者の遷移傾向が必要となるが、観光者の遷移傾向を予め正確に予測することはできないという問題点がある。上記で述べたような情報推薦システムを想定すると、システムを利用している観光者（システム利用観光者）は推薦したスケジュール通りに巡回を行うものと仮定することで、遷移傾向を得ることができるが、システムを利用していない観光者（一般観光者）の遷移傾向は予め正確な値を得ることはできない。シミュレーションを用いた観光者の巡回スケジュール生成に関する従来研究では、すべての観光者がシステム利用観光者であることを仮定していた。そのため、一般観光者が存在する場合、シミュレーションによる未来予測が現実のものと異なってしまい、適切なスケジュール推薦ができなくなってしまう可能性がある。

本研究では、実時間情報を用いて一般観光者の遷移予測を修正し、それにともない提示するスケジュールをリアルタイムで更新することで、この問題に対処する。その日、各観光者が実際どのスポットをどのような順序で巡回したかの遷移の情報を、実時間情報と定義し、随時追加される実時間情報をシミュレー

シミュレーションに組み込むことで、シミュレーションによる未来予測がより現実のものに近づき、適切なスケジュールを推薦することができると考えられる。

提案手法では、実時間情報に基づき一般観光者の観光施設間の遷移傾向を推定し、そこから各観光施設の混雑傾向を数値化する。実時間情報に基づき一般観光者の影響をシミュレーションに反映させるためには、少ないデータで安定した推定結果を得る必要がある。観光施設間の遷移傾向をそのままシミュレーションに反映させるのではなく、各観光施設の混雑傾向に変換してから反映させることで、観光施設の組み合わせ数ではなく、観光施設数分の推定をすることにつながり、少ないデータで安定した推定を行うことができる。

上記のように実時間情報より推定した一般観光者の影響を、シミュレーションに反映させ未来予測を行うことで、リアルタイムでスケジュールの更新を行う。数値化した一般観光者の混雑傾向より、各観光施設の収容可能人数が減少している状態を想定することで、シミュレーションに一般観光者の影響を反映させる。観光者が観光行動を行っている間、随時その時点から観光行動終了までのシミュレーションを行うことで、現在推薦しているスケジュール通りに巡回できるかの判定を行う。巡回できない場合、訪問目的地の変更、削減を行うことでスケジュールを更新し、再度シミュレーションを行う。

以上のように実時間情報を用いて一般観光者の遷移予測を修正し、それにもない提示するスケジュールをリアルタイムで更新することで満足度が向上するかの実験を、シミュレータを用いて行った。まず、始めに与えられた遷移傾向が誤っていた場合でも、提案手法により実時間で遷移予測を修正しスケジュールを更新することで、満足度を向上させることができることを実験で示した。次に、観光者の観光施設間の遷移傾向をそのままシミュレーションに反映させた場合と、各観光施設の混雑傾向を数値化することでシミュレーションに反映させた場合の比較実験を行い、前者では困難であった実時間における適切なスケジュール更新を、後者は可能にしていることを確認した。最後に、評価に用いるシミュレータにおいて、さまざまなモデルで一般観光者のモデル化を行うことで、提案手法の妥当性を検証した。これらの結果より、実時間情報を用いて一般観光者の遷移予測を修正し、リアルタイムで適切にスケジュールを更新することができたとと言える。

Making Route Schedule for Enhancing Tourists Satisfaction Based on Real-Time Information in Sightseeing Area

Masaki UCHIDA

Abstract

In this paper, we intend to make route schedules for tourists to visit as many spots which they wish to visit as possible. This technology can be applied to develop a system that recommends an appropriate schedule for each tourist. Using the schedule recommendation system, tourists can go around many spots efficiently and have a good time in a sightseeing area.

In order to make appropriate schedules for tourists, we need to estimate congestion of roads and spots in the future. For that purpose, we developed a simulator which places roads and spots and simulates the tourists' transition between spots. We move the tourist agents in the simulator and observe the congestion of roads and spots in the future.

This simulation needs the transition trend of tourists, but it is impossible to get the correct transition trend of tourists in advance. Suppose that we use a schedule recommendation system, we can get the transition trend of system user tourists who use this recommendation system and follow the recommended schedule, but cannot get the transition trend of general tourists who don't use this recommendation system. In a previous research, all tourists are supposed to use this recommendation system and the simulator knows the transition trend of all tourists. However, it is not a realistic assumption and the simulation results may be different from congestion in a real sightseeing area. As a result, we cannot make appropriate schedules for tourists in a real situation.

In this paper, we estimate the transition trend of general tourists in simulation based on real-time information and update schedules so that we can cope with this problem. Real-time information that we use is the list of spots that each tourist has visited before that moment. We rerun the simulation reflecting the real-time information at that moment and make appropriate schedules for tourists.

In the proposed method, we implement the transition trend of general tourists

as the congestion trend in each spot. The reliable estimation results need to be got with a small amount of data so that simulation reflects the influence of general tourists based on real-time information. If we calculate the transition trend of general tourists directly with a small amount of data, we cannot get the reliable estimation results because the number of transitions(parameters) is the number of combinations between the spots and it is very large. In our method, we calculate the congestion trend in each spot based on real-time information. In this case, the number of parameters is the number of the spots and it is much smaller than the number of transitions. As the result, we can estimate them reliably with a small amount of data.

Simulation reflects the influence of general tourists estimated by real-time information so that we predict the future in the sightseeing area and update schedules. We reduce the capacity of each spot in simulation based on estimated results of the congestion trend, so simulation reflects the influence of general tourists. By using simulation results, our method updates the schedule of each system user tourist by reducing the number of visiting spots and changing visiting order of the spots.

To examine the effectiveness of the proposed method, we conducted simulation experiments, in which we evaluated the satisfaction of system user tourists by our method. In the first experiment, we compared our method with a previous method when the transition trend of tourists given in advance is incorrect. This experiment confirmed that our method can improve satisfaction of system user tourists by updating schedules based on real-time information. In the second experiment, we compared a method calculating the congestion trend in each spot with a method calculating the transition trend of general tourists directly. This experiment showed that our method can get reliable estimation results with a small amount of data. The last experiment investigated the validity of our method, in the cases which we modeled the transition strategy of general tourists in various way in evaluation simulation. These results show that our method can effectively reflect the real-time information and can update schedules for system user tourists adequately.

観光地の実時間情報に基づく観光者の満足度向上のための 巡回スケジュール生成手法

目次

第1章	緒論	1
第2章	多数観光者巡回スケジュール生成問題	3
2.1	多数観光者巡回スケジュール生成問題	3
2.2	シミュレーションを用いた巡回スケジュール生成の従来手法	6
2.3	従来手法の問題点	8
第3章	実時間情報に基づく巡回スケジュール生成手法	8
3.1	実時間情報の利用	9
3.2	定常確率を用いた一般観光者による影響のモデル化	11
3.3	観光地巡回スケジュール生成手法	12
第4章	未来予測シミュレータの構築	14
4.1	未来予測シミュレータの概要	15
4.2	未来予測シミュレータにおけるモデル	15
4.2.1	観光者の巡回行動モデル	15
4.2.2	道路の交通流モデル	16
4.2.3	スポットにおけるサービスモデル	16
4.2.4	経路選択戦略	17
第5章	実験	18
5.1	実験環境	18
5.2	実験の共通設定	19
5.3	実時間情報に基づくスケジュール生成実験	20
5.4	定常確率に基づく一般観光者の影響モデル化に関する実験	21
5.5	一般観光者の巡回行動モデルによる提案手法の妥当性検証	23
第6章	結論	25
	謝辞	27
	参考文献	27

第1章 緒論

観光地において、観光者が効率よくより多くの観光施設を巡回できるようにすることは、観光者にその観光地の良さを十分に堪能してもらうために非常に重要である。観光地において、特定の観光施設に観光者が集中してしまうと、サービスを満足に提供することができなくなり、観光者の円滑な行動を妨げる要因となってしまう。観光施設の混雑を緩和し、観光者が効率よくできるだけ多くの観光施設を巡回することができれば、観光者の満足度を向上させることができ、観光地の評判の向上にもつながる。さらに、観光者が効率よく多くの観光施設を巡回することは、観光施設に経済的に大きな利得をもたらす、観光地全体の活性化にもつながる。

従来、観光施設における混雑緩和の手法として、観光施設の運営者や観光地の自治体などによる混雑情報提供サービスが行われている。例えば、イベント会場やテーマパークなどにおいて、携帯端末などから各アトラクションの現在の混雑状況を取得するサービスが提供されている [1]。各観光者が混雑情報を共有することで、特定のアトラクションへ観光者が集中することを防ぎ、待ち時間を低減させているが、これは情報を提示するだけにとどまり、その情報に基づく積極的な観光者の誘導は行われていない。

このような背景を踏まえて、本研究では、観光者が訪問を希望する観光施設をできるだけ多く巡回できるようなスケジュールを生成することを目的とする。観光者は、自分の希望する観光施設のリストを持っており、その中から取捨選択を行い、限られた時間内において巡回を行うが、観光施設及び道路は、そこに存在する観光者の人数（混み具合）に応じて、滞在時間及び通過時間が余分にかかってしまう状況を想定する。観光者が訪問を希望する観光施設リストを基に、適切なスケジュールを推薦するような情報推薦システムが開発されれば、観光者が効率よく多くの観光施設を巡回することができるようになり、観光地全体がより一層活性化することにつながる。適切なスケジュールを生成するためには、観光地の未来の状況を予測する必要がある。そのために本研究ではシミュレーションを用いる。シミュレーションの精度が上がれば、予測される未来の状況もより現実に即したものとなり、より適切なスケジュールを生成できると考えられる。

シミュレーションを用いた観光者の巡回スケジュール生成に関する従来研究

として、栗山らの研究 [2] がある。[2] の研究では、すべての観光者が提示したスケジュール通りに動くことを仮定してシミュレーションを行い、その結果に基づき各観光者のスケジュールを生成していた。すなわち、すべての観光者が上記で述べたような情報推薦システムを利用していることを仮定しており、これは現実的な仮定であるとは言い難い。情報推薦システムを用いていない一般の観光者が存在する場合、シミュレーションの結果と現実が異なってしまい、システムを利用している観光者が予期せぬ混雑に巻き込まれてしまう可能性がある。以下、情報推薦システムを用いていない一般の観光者を一般観光者、情報推薦システムを利用している観光者をシステム利用観光者と呼ぶものとする。

上記の問題を解決するためには、シミュレーションにシステム利用観光者だけでなく、一般観光者も組み込む必要がある。一般観光者をシミュレーションに組み込むためには、一般観光者がどのような遷移を行うかの予測が必要となる。一般観光者が、今いる観光施設から次にどの観光施設へ遷移しやすいかといった傾向は、観光調査における今までの統計情報などからおおよそ予測は可能である。しかし、現実の観光地では、その日だけの特別なイベントや新しく開始されたサービスなどにより、想定していたものとは異なる遷移が起こる可能性があり、一般観光者の遷移を予め正確に知ることは難しい。

本研究では、実時間で得られる情報に基づき一般観光者の遷移予測を修正しつつ、シミュレーションを行うことでこの問題に対処する。実時間情報を用いることで、観光調査における統計情報のみを用いる場合では対応できない、その日だけの特別なイベントや新しいサービスによる遷移の変化にも対応できるようになると考えられる。しかし、遷移の可能性は観光施設の組み合わせ数だけあり、その数は非常に多い。この場合、その日の観光施設間の遷移の傾向を正確に推定するためには、その日実際に各観光者がどのような遷移を行ったかの情報が非常に多く必要である。そのため、実時間で各観光者が実際にどのような遷移を行ったかの記録情報から単純に遷移の傾向を推定しようとしても、その日の早期における推定は非常に困難である。一方で、実時間で適切なスケジュールを推薦するためには、一日の終盤で推定結果が得られてもあまり意味がなく、早期における安定した推定が必要である。提案手法では、一般観光者の観光施設間の遷移の傾向を直接シミュレーションに反映させるのではなく、そこから各観光施設の混雑傾向を数値化して一般観光者による影響を想定することでシミュレーションに反映させる。すなわち、観光施設間の遷移予測でなく、観光

施設の混雑予測を行う。これにより、観光施設の組み合わせ数ではなく、観光施設数分の推定をすることにつながり、少ないデータで安定した推定を行うことができる。その結果、実時間において一般観光者の傾向予測の修正が可能になる。

以下、2章では、多数観光者巡回スケジュール生成問題を定義し、その従来研究、及び問題点について述べる。3章では、本研究で提案する実時間情報に基づく巡回スケジュール生成手法について述べる。4章では、本研究で用いるシミュレータの概要について述べる。5章では、実時間情報を用いることで満足度を向上させることができること、及び観光施設間の遷移傾向ではなく各観光施設の混雑傾向の推定を行うことの妥当性を実験で示す。さらに、一般観光者に対してさまざまな巡回行動を想定した実験により、提案手法の妥当性を検証する。6章では、本研究の結論と今後の課題について述べる。

第2章 多数観光者巡回スケジュール生成問題

本章では、本研究で扱うスケジュール生成問題について定義を与え、それに関する従来研究とその問題点について述べる。

2.1 多数観光者巡回スケジュール生成問題

本研究は、観光地において多数の観光者に対して、巡回スケジュールの生成を行う。観光者は複数のスポットの中からいくつかを選択して、限られた時間の中で巡回を行う。ここで観光地とは、いくつかの観光施設を含んだ、例えば京都市のようなものであると定義し、スポットとは観光施設、例えば金閣寺や清水寺のようなものであると定義する。観光者は、自動車で観光地を巡回することを想定している。観光者は出発地点から目的地とするスポットに向かって道路網上を移動し、目的スポットに到着するとそのスポットにしばらくの間滞在しサービスを受ける。スポットには、サービスに要する時間が設定されており、観光者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。道路及びスポットにおいて、複数の観光者が集中することで混雑が発生した場合、道路ではその混雑度に応じて移動速度が低下し、スポットではサービスが開始されるまでの待ち時間が発生する。

情報推薦システムを利用する観光者（以下、システム利用観光者）は、初めに

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を設定する。ここで重要度とは、そのスポットに訪問を希望する強さの度合いを表すものとし、各システム利用観光者に対して重要度の総和が一定となるように正規化するものとする。各観光者に対し、訪問を希望するスポットの重要度を並べたリストを、重要度リストと定義する。観光者は、限られた時間内にできるだけ多くの希望するスポットを訪問しようと試みる。

観光者の満足度とは、実際にはさまざまな要因によって決定される、非常に主観的で定性的な値である。本研究では、満足度の一指標として達成度という定量的な指標を考える。達成度とは、始めにシステム利用観光者が設定した重要度リストに対し、どの程度達成できたかを示す値である。システム利用観光者は、スポット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達成度が得られるものとする。評価は、システム利用観光者の達成度の平均により行う。

情報推薦システムは、システム利用観光者から与えられた重要度リストを基に、より達成度が向上するようなスケジュールを算出する。ここでスケジュールとは、各システム利用観光者がどのスポットをどの順序で巡回するのがよいかを表す、巡回開始から終了までの巡回予定スポットのリストであると定義する。本研究が対象とする問題は、システム利用観光者により重要度リストが与えられたときに、システム利用観光者に対しできるだけ達成度が高くなるような巡回開始から終了までの巡回スケジュールを算出することである。

情報推薦システムは、情報センタ（サーバ）とシステム利用観光者による車両群から構成される。サーバは全システム利用観光者の入力を無線ネットワークなどを介して収集し、各システム利用観光者のスケジュールを算出してネットワークを介して配送する。各システム利用観光者は、配送されたスケジュールを受け取ると、それにしたがって目的地を巡回する。

情報推薦システムへの入力は、予めデータベースに与えられるデータベース入力と、システム利用観光者により与えられるユーザ入力からなる。

<データベース入力>

道路データ

道路網を示すグラフデータである。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ようなグラフ構造となっている。各道路は、以下の4つの属性を持つ。

- L : 道路の長さ. 2つの交差点間の距離.
- V_f : 自由流速度. その道路に誰も存在しないときの最高速度.
- V_{min} : 最小速度. その道路で渋滞が発生したときの最小の速度.
- K_{max} : 最高密度. その道路の速度が0となるような密度.

スポットデータ

観光者が訪問するスポットを表す. 地図上に N_s 個のスポット $S = s_1, \dots, s_{N_s}$ が存在して, それぞれのスポット $s \in S$ は, 以下に示す3つの属性を持つ.

- $s.pos$: スポットの位置.
- $s.C$: キャパシティ. スポットの収容可能な人数.
- $s.St$: スポットにおいて観光者がサービスに要する時間.

<ユーザ入力>

システム利用観光者の集合を U と表記する. システム利用観光者 $u \in U$ は以下の3つのデータを入力する.

- $start_u$: 巡回開始地点.
- $S_u \subseteq S$: 訪問を希望する目的地群.
- $imp_u(s)$: $s \in S_u$ である各目的地に対する重要度.

ここでは, 目的地に付与される重要度の総和がシステム利用観光者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.

$$\sum_{s \in S_u} imp_u(s) = 100 \quad (1)$$

また, 情報推薦システムは, システム利用観光者から入力を与えられると, 各システム利用観光者 $u (u \in U)$ に対して以下の出力を行う.

出力

スケジュール : $Schedule_u = \langle s_1^u, s_2^u, \dots, s_j^u, \dots, s_{L_u}^u \rangle$

ここで, $s_j^u (s_j^u \in S_u)$ はシステム利用観光者 u が j 番目に訪問すべき目的地である. L_u はスケジュール $Schedule_u$ に含まれる目的地の個数である. 観光者は, 一日の限られた時間の中で, 目的地においてサービスを受けることができれば, 重要度と同値の達成度を得る. 時間内にすべての目的地を巡回することが困難である場合には, 情報推薦システムは, 移動コストや重要度を考慮し, 訪問予定目的地の取舍選択を行う必要がある.

2.2 シミュレーションを用いた巡回スケジュール生成の従来手法

前節で述べたように、スケジュール生成において、すべての目的地の巡回が困難であると予測される場合には、訪問予定目的地の取捨選択を行う必要がある。だが、移動経路とスポットの混雑はお互いにさまざまな要素が複雑に絡み合っており、それらを同時に考慮して、すべてのシステム利用観光者ができるだけ達成度が向上するようにスケジュールを調整することは困難な問題である。

栗山らの手法 [2] では、シミュレーション内で実際にシステム利用観光者を動かすことで、各システム利用観光者が時間内に巡回できたかどうかを判定し、スケジュールを変更しながら繰り返しシミュレーションを行うことで、この問題に対処している。栗山らの手法 [2] では、全システム利用観光者が同時に、訪問を希望するスポットをすべて巡回すると仮定したシミュレーションを行う。訪問するスポットの順序は、巡回セールスマン問題に帰着して解くことで決定する。

巡回セールスマン問題とは、すべてのスポットを一度ずつ経由し開始地点に戻ってくるときに、移動経路が最短となるような経路を求める問題であるが、今回求める最短経路は開始地点に戻る必要はない。訪問を予定する目的地群を S'_u とすると、開始地点 $start_u$ から巡回を始め S'_u のすべての目的地を訪問するような最短経路を求める。このとき、 S'_u に対して、可能性のあるすべての経路を列挙して、その中で最短な経路を探索するという方法がある (完全列挙法)。可能性のあるすべての経路とは $s \in S'_u$ についてのすべての順列であり、計算量は訪問予定目的地の数 $|S'_u|$ に対して、階乗 $|S'_u|!$ に比例して大きくなる。これは、 $|S'_u|$ が大きくなると計算量が爆発的に増えてしまう。そのため今回は、動的計画法を用いて巡回セールスマン問題を解いている。巡回開始地点 $start_u$ を出発して、巡回予定目的地群 S'_u の部分集合 $S''_u (\subset S'_u)$ をすべて経由し、スポット $s_i (\in S''_u)$ に至る最短経路の総距離を $f(s_i, S''_u)$ と定義する。スポット s_i とスポット s_j の距離を $distance_{ij}$ とすると、 $start_u$ から $s_j (\notin S''_u)$ へ至る最短経路の総距離 $f(s_j, S''_u \cup \{s_j\})$ は

$$f(s_j, S''_u \cup \{s_j\}) = \min_{s_i \in S''_u} [f(s_i, S''_u) + distance_{ij}] \quad (2)$$

と計算できる。これは、スポット s_j に至る最短経路の総距離を求めるためには、その直前に通るスポット s_i に至るまでの最短経路の総距離のみ必要であり、スポットの巡回順序は必要ないことを意味している。 S''_u の大きさを徐々に大きくしながら、各スポット s に至るまでの最短経路を導出することで、計算量は

$|S'_u| \cdot 2^{|S_u|}$ に比例し、完全列挙法より軽減することができる。

以上のように、最短経路を巡回セールスマン問題に帰着して解き、すべてのシステム利用観光者が、各自訪問を希望するスポットをすべて巡回する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、スケジュール通りに巡回できるかどうか、及び、限られた時間内にすべての目的地を巡回できるかどうかを予測可能となる。限られた時間内にすべての目的地を巡回できなかったシステム利用観光者については、訪問するスポット、及びその数を変更するなどの方法でスケジュールを更新し、再度シミュレーションを行う。訪問予定スポットを削減する際は、重要度の低いスポットを優先的に削減する。

ここで、訪問予定スポット変更の処理において、時間内に巡回できなかった場合は目的地を削減、巡回できた場合は目的地を挿入する、といった処理を繰り返し最終的なスケジュールの決定を行おうとすると、同じ目的地の削除、挿入を無為に繰り返す観光者が現れ、解が収束しない状態が生じる。この繰り返し状態を防止するため、タブーカウントという概念を導入する。システム利用観光者が、削減したある目的地を再度追加する際、その目的地に対するタブーカウントを1増やす。タブーカウントはシステム利用観光者とスポットの各組み合わせごとに設定する。タブーカウントの回数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、目的地変更の繰り返しを防止する。

以下に、スケジュール生成のアルゴリズムの詳細を述べる。

- (1) 各システム利用観光者 $u \in U$ について、 u が訪問を希望する目的地群 S_u を、訪問予定の目的地群を格納する変数 S'_u にコピーする。出発地点 $start_u$ を出発して、 S'_u のすべての目的地を訪問する最短の経路 $Schedule'_u$ を求める。この最短巡回経路は巡回セールスマン問題に帰着して解くことによって求める。
- (2) 全システム利用観光者がそれぞれ生成したスケジュール通りに巡回する場合のシミュレーションを行う。
- (3) シミュレーション終了後、各システム利用観光者 u が実際に訪問することができた目的地群 S_u^v を求める。各システム利用観光者の現在の訪問予定目的地群 S'_u に対して、目的地の削減または追加を行う。目的地変更のアルゴリズムは以下である。

(3a) S'_u をすべて巡回できなかつた ($S_u^v \neq S'_u$) 場合

S'_u から最も重要度の低い目的地を1つ削減する.

(3b) S'_u をすべて巡回できた ($S_u^v = S'_u$) 場合

$S_u - S'_u$ 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ものの中から最も重要度が高い目的地を S'_u に追加し, その目的地のタブーカウントを1増やす.

更新された訪問予定目的地群 S'_u に対し, $start_u$ を出発し, S'_u のすべての目的地を巡回する最短経路を求め, $Schedule'_u$ を更新する.

(4) (2)-(3) の処理を全システム利用観光者の巡回目的地変更がなくなるまで繰り返す. 最終的な訪問予定目的地群 S'_u に対して, 最短経路 $Schedule'_u$ がスケジュールとして生成される.

2.3 従来手法の問題点

栗山らの手法 [2] では, シミュレーション内で実際にシステム利用観光者を動かすことで, 各システム利用観光者が時間内に巡回できたかどうかを判定していた. シミュレーション内で動かしているのは, システム利用観光者のみであり, 道路及びスポットの混雑度もシステム利用観光者のみを考慮して算出していた. すなわち, 情報推薦システムを利用していない一般の観光者 (以下, 一般観光者) を考慮せず, すべての観光者が情報推薦システムを利用している状況を仮定して, スケジュールを生成していた. しかし, 実際の観光地において, すべての観光者が情報推薦システムを利用している状況はあり得ない. 一般観光者が存在する状況下においては, シミュレーション結果が異なってしまう可能性がある. その結果, そのシミュレーション結果に基づき生成されたスケジュールに従うシステム利用観光者が, 予期せぬ混雑に巻き込まれるなどして無駄な時間を費やし, 達成度が低下してしまうことが予想される.

第3章 実時間情報に基づく巡回スケジュール生成手法

一般観光者の巡回行動モデルを予めシミュレータに組み込むことで, 予期せぬ混雑を避け, 達成度の低下を抑えることを考える. 一般観光者が今いるスポットから次にどのスポットへ遷移しやすいかの傾向は, 観光調査などにより統計情報からおおよそ推定できる. しかし, 実際は, その日に特別なイベントが開催

されたり、新しくサービスが開始されるなどして、今までの統計情報から得られた推定値が現実のものと異なる可能性がある。一般観光者の遷移を予め、正確に推定することは難しい。

そこで本研究では、観光者が実際にどのような遷移を行ったかという実時間情報を用いて、シミュレーションにおける一般観光者の遷移傾向をリアルタイムで修正することで、この問題に対処する。以下、提案手法について詳細を述べる。

3.1 実時間情報の利用

実時間情報に基づき、シミュレーションにおける一般観光者の遷移傾向をリアルタイムで修正することで、より現実に即した一般観光者の影響をシミュレーションに反映できると考えられる。

近年、全地球測位システム（GPS）が携帯電話に搭載され、子どもやお年寄りの方の位置確認などで、その応用は大きく広がっている。また、ほぼすべての観光者は携帯電話を所持した状態で巡回を行っているものと考えられる。そのため、各観光者の GPS 情報から、今までの遷移の情報を取得し、過去にどのスポットをどのような順序で訪問したかの遷移の情報を収集できるものとする。本研究で用いる実時間情報とは、各観光者がその日すでにどのスポットをどの順序で巡回したかの情報であると定義する。

第 2.1 節で述べた、情報推薦システムの入力に対して新しく、各観光者 $a \in A$ の遷移記録を導入する。 A は全観光者であり、システム利用観光者と一般観光者から構成される。すなわち、システム利用観光者 $u \in U$ に対して、 $U \subseteq A$ である。各観光者 $a \in A$ に対して、以下のような入力を導入する。

<実時間情報入力>

遷移記録

$$Log_a = \langle l_1^a, l_2^a, \dots, l_j^a, \dots, l_{L_a}^a \rangle$$

ここで、 l_j^a とは観光者 a がその日 j 番目にすでに訪問したスポットであり、 L_a は遷移記録 Log_a に含まれる目的地の個数である。遷移記録はリアルタイムで更新される。

一般観光者について、現在いるスポットから次にどのスポットに遷移するかを決定する際、実際はさまざまな要因により決定される。すなわち、各一般観光者は独自の判断で次に向かうスポットを決定する。個々の一般観光者に対し

て、次にどのスポットに遷移するかを推定するのは困難であるが、全体的にはどのスポットに遷移するかの傾向があり、それは確率の形で表記することができる。一般観光者はその確率に従い、今いるスポットから次のスポットに遷移する際、確率的に遷移するものと考えられる。これは、スポット間の遷移を示すマルコフモデルとなっている。

全体の遷移傾向の推定とは、マルコフモデルにおいてスポット間の遷移確率を推定することと同義である。遷移確率 $p(s_i|s_j)$ とは、現在のスポット s_j から別のスポット $s_i (i \neq j)$ に遷移する際に、各スポットにどの程度の割合で遷移するかの条件付き確率である。正しい遷移確率が推定されれば、シミュレーションにおいて一般観光者を現実に即した形で動かすことができ、そこから一般観光者による影響を正しく予測することができると考えられる。

しかし、実時間で得られる情報は、時間につれ随時追加されるものであり、一日の始まりの段階では少ない。それに対して、スポットの組み合わせの数だけ遷移の可能性はあり、その数は非常に多い。そのため、実時間情報に基づきスポット間の遷移確率の推定を行おうとした場合、一日の早期における推定が非常に困難である。一方で、実時間で適切なスケジュールを推薦するためには、一日の終盤で遷移確率についての正しい推定結果が得られてもあまり意味がなく、早期における安定した推定が必要である。

また、正しい遷移確率が得られたとしても、その遷移確率に従い一般観光者を確率的に動かすシミュレーションを行い未来予測する場合、一般観光者は確率的に動かしているため、シミュレーションを行うたびにその結果が変動する。一回のシミュレーションでは、そこから導出される未来予測が本当に妥当なものであるか判断ができない。シミュレーションを何度も行い、複数の未来予測を行うことで、最も妥当である結果を判断することができると考えられるが、シミュレーションを何度も行うためには膨大な計算時間が必要となり、実時間でスケジュールの推薦ができなくなってしまう。

以上から、遷移確率をそのまま用いた場合、実時間情報に基づきリアルタイムでスケジュールの修正を行うことは困難である。そのため、遷移確率を直接用いずに、一般観光者の影響を想定し、シミュレーションに反映させる方法を考える。

3.2 定常確率を用いた一般観光者による影響のモデル化

実時間情報に基づき一般観光者の影響を修正する場合、少ないデータで安定した、かつ妥当な修正を行う必要がある。そのため、提案手法において、スポット間の遷移確率ではなく、各スポットの定常確率を用いて一般観光者の影響をモデル化することを考える。定常確率とは、スポット間の遷移確率から導出される、各スポットにどれだけの観光者が存在する状態を見込めるかを示す確率である。すなわち、各スポットに常にどの程度の観光者がいる可能性があるかを示す確率であり、各スポットの一般観光者による混み具合を示す指標となる値である。一般観光者がある遷移確率のマルコフモデルに従って十分長い時間遷移を行った場合、各時刻で各スポットに観光者が訪問する確率は一定値に収束するが、この各スポットにおける収束値として定常確率を導出することができる。

具体的には以下のように導出を行う。 $i, j = 1, 2, \dots, N_s$ に対し、あるスポット s_j でサービスを終えた一般観光者が次にスポット s_i へ遷移する条件付き確率を $p(s_i|s_j)$ とし、遷移確率行列 P を $P = (p_{ij})$ ($p_{ij} = p(s_i|s_j)$) と定義する。遷移確率行列 P は N_s 次の正方行列である。また、スポット s_i の定常確率を $\omega_{s_i} = p(s_i)$ とし、定常確率ベクトル ω を $\omega = (\omega_{s_1}, \omega_{s_2}, \dots, \omega_{s_{N_s}})^T$ と定義する。この遷移確率行列 P を用いて、定常確率ベクトル ω は、

$$\begin{cases} \omega = P\omega \\ \omega_{s_1} + \omega_{s_2} + \dots + \omega_{s_{N_s}} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

を解くことで計算できる。

式(3)は、固有値問題に帰着して解くことができる。遷移確率行列 $P = (p_{ij})$ は、 $p_{ij} = p(s_i|s_j)$ であることから以下を満たす。

$$\begin{cases} p_{ij} \geq 0 & (i, j = 1, 2, \dots, N_s) \\ \sum_{i=1}^{N_s} p_{ij} = 1 & (j = 1, 2, \dots, N_s) \end{cases} \quad (4)$$

したがって、すべての成分が1の列ベクトルを $\mathbf{v}_1 = (1, 1, \dots, 1)^T$ とすると、

$$\mathbf{v}_1^T P = \mathbf{v}_1^T \quad (5)$$

が成り立つ。両辺を転置すると

$$P^T \mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_1 \quad (6)$$

となる。これは P^T の固有値の一つは1であることを示す。 P の固有値は P^T の固有値と一致することより、遷移確率行列 P の固有値の一つは1である。以上より、式(3)は、固有値が1かつ成分の総和が1となる固有ベクトルを求めることと同義である。

求められたスポット s の定常確率 ω_s は、十分長い時間遷移を行った場合、各時刻でスポット s を観光者が訪問する確率であるが、これはスポット s の混雑度の指標となっている。すなわち、定常確率 ω_s が高いスポット s ほど、観光者が訪問する確率が高いといえ、混雑が発生しやすい。スポット間の遷移確率を直接用いるのではなく、スポットの定常確率を計算してから用いることで、スポットの組み合わせ数ではなく、スポット数分の推定をすることにつながり、少ないデータで安定した推定を行うことができる。

定常確率 ω_s を用いて、スポット s にどの程度の一般観光者が存在する状態であるかを見込む。各スポットにいる予測一般観光者数は、スポット s の定常確率 ω_s に、一般観光者の総人数 $|A - U|$ を掛けることで求められるが、実際にはスポットだけでなく道路にも一般観光者は存在する。そのため、これにさらに α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を掛けることで、スポット s に存在する人数を見込む。スポット s に存在すると見込まれる一般観光者の人数を、一般観光者による混雑度 d_s と定義する。 d_s は式(7)のように計算される。

$$d_s = \omega_s \times |A - U| \times \alpha \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (7)$$

ここで、 α は全体の観光者がスポットに存在する割合であり、観光地においてスポットと道路がそれぞれ占める割合によって決定する。一般観光者による混雑度 d_s をスポット s のキャパシティ $s.C$ から引くことで、一般観光者の混雑による影響を想定し、シミュレーションに反映させる。その状態で、シミュレーション内でシステム利用観光者を実際に動かすことで、システム利用観光者及び一般観光者の影響をシミュレーションに反映させた未来予測を行うことができる。シミュレーション内で実際に動かすのはシステム利用観光者のみとなり、計算時間も大幅に短縮される。

3.3 観光地巡回スケジュール生成手法

提案手法は、一日を通してシステム利用観光者の達成度が向上するようにスケジュールの生成を行うことを目的としている。リアルタイムで観光者 a がそ

の日実際にどのスポットをどのような順序で巡回したかを示す遷移記録 Log_a が更新されていくため、それにともない、スケジュールも一般観光者の影響による混雑を反映させ、動的に変化していく。リアルタイムで得られる観光者の遷移記録より随時、一般観光者のスポット間遷移確率の推定を行う。事前に統計情報などから得られる、スポット s_j からスポット s_i への遷移確率を $p'(s_i|s_j)$ と表記する。また、実時間で得られる遷移記録 Log_a を用いて、その日の実際の遷移確率 $p''(s_i|s_j)$ は以下のように計算される。

$$\begin{cases} p''(s_i|s_j) = n_{ij}/n_j \\ n_j = \sum_{i=1}^{N_s} n_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 n_{ij} は遷移記録 Log_a において、 s_j, s_i という遷移を含む観光者 a の数である。統計情報から事前に与えられている遷移確率 $p'(s_i|s_j)$ と、実時間情報より得られた実際の遷移確率 $p''(s_i|s_j)$ を用いて、時刻 t において式 (9) のように遷移確率 $p(s_i|s_j)$ の推定を行う。

$$\begin{cases} p(s_i|s_j) = (1 - \lambda(t))p'(s_i|s_j) + \lambda(t)p''(s_i|s_j) \\ \lambda(t) = t/T_{day} \quad (0 \leq t \leq T_{day}) \end{cases} \quad (9)$$

T_{day} はその日、情報推薦を行う総時間である。 $\lambda(t)$ は、 $0 \leq \lambda(t) \leq 1$ を満たし、時刻 t に比例して徐々に大きい値となる。一日の始めの段階では、遷移記録 Log_a があまり収集できておらず、実時間情報より得られた実際の遷移確率 $p''(s_i|s_j)$ が信頼できない。そのため、重み $\lambda(t)$ を時刻 t に応じて、徐々に大きい値としていくことで、安定して遷移確率 $p(s_i|s_j)$ の推定を行う。推定した遷移確率より定常確率の導出を行い、導出された定常確率に基づきスポット s のキャパシティ $s.C$ を減らすことで、一般観光者による影響をリアルタイムで修正する。

提案手法では、時刻 t において、以下の処理をリアルタイムで随時行う。

(1) 遷移確率の修正

遷移記録 Log_a を用いて、その日の実際の遷移確率 $p''(s_i|s_j)$ を導出する。統計情報から事前に与えられている遷移確率 $p'(s_i|s_j)$ と、実時間情報より得られた実際の遷移確率 $p''(s_i|s_j)$ を用いて、式 (9) により $p(s_i|s_j)$ を修正する。

(2) 定常確率の更新

前ステップ (1) により推定された遷移確率 $p(s_i|s_j)$ より、遷移確率行列 $P = (p(s_i|s_j))$ を求める。求めた遷移確率行列 P より、式 (3) を解くことで、定

常確率ベクトル ω を更新する.

(3) 一般観光者による混雑度への変換

各スポットの定常確率 ω_s より, 各スポットの一般観光者による混雑度 d_s を式 (7) により数値化する.

(4) 想定キャパシティの導出

前ステップ (3) で求めた一般観光者による混雑度 d_s を用いて, スポット s の想定キャパシティ $s.C'$ を式 (10) のように計算する.

$$s.C' = s.C - d_s \quad (10)$$

想定キャパシティ $s.C'$ とは, 一般観光者を考慮した場合, スポット s にどれだけの空きが存在する状況であることを示す値である. また, スポット s のキャパシティ $s.C$ は, データベース入力で与えられる, スポット s の収容可能人数である.

(5) スケジュール生成

時刻 t において, 現時刻からその日の情報推薦終了時までのシミュレーションを行う. ただし, シミュレーションにおいて各スポット s のキャパシティは, 想定キャパシティ $s.C'$ を用いる. シミュレーションを行うことで, 現在提示しているスケジュール通りに巡回できるかどうかの判定を行う. シミュレーションの結果, 巡回できなかったシステム利用観光者については, 第 2.2 節で述べた従来手法のアルゴリズムと同様に, 訪問するスポット及びその数を変更するなどの方法でスケジュールを更新し, 再度現時点からのシミュレーションを行う.

この手法により, 一般観光者による混雑の影響をリアルタイムで反映させ, 混雑を避けるようなスケジュールを生成する.

第 4 章 未来予測シミュレータの構築

適切なスケジュールを生成するためには, 観光地の未来の状況を予測する必要があり, そのために本研究ではシミュレーションを用いる. 本章では, 未来予測に用いるシミュレーションについて詳細を述べる.

4.1 未来予測シミュレータの概要

本研究で用いるシミュレータは、マルチエージェントシミュレータである。シミュレーション内では、複数の観光者が一定のルールに基づき、自律的に行動する。シミュレーションでは、観光地は格子状の2次元平面となっており、その中の格子点にスポットが配置されている。また、道路はその格子に沿って、任意の数配置されており、観光者はその道路に沿ってスポット間の移動を行う。道路の交わる格子点は交差点とし、観光者は交差点に到着すると各自の判断に基づき次に進む道路を決定する。

観光者は、観光地に配置されたスポットの中からいくつかを選択し、スポットの巡回を行う。道路及びスポットにおいて、多数の観光者が集中することで混雑が発生した場合、道路ではその混雑度に応じて移動速度が低下し、スポットではサービスが開始されるまでの待ち時間が発生する。また、交差点では目的地までの経路の中から空いている経路を選択するなど、各観光者は他の観光者達の影響を受ける。シミュレーション内ではシミュレーションステップという離散的な値で時間を表し、ステップ t における各観光者の影響に基づき、ステップ $t+1$ の各観光者の位置及び状態が決定される。

4.2 未来予測シミュレータにおけるモデル

各観光者は、スポットにおいてサービスを終了すると、「巡回行動モデル」に従い次の目的地を決定し、巡回を開始する。また、道路を移動する際は、その道路内に存在する観光者数（混み具合）に応じた「交通流モデル」に従い、移動する。スポットに到着した際は、そのスポットの現在の混雑状況に応じた「サービスモデル」に従い、サービスを受ける。交差点に到着した際は、決められた「経路選択戦略」に従い、次に進む道路を選ぶ。以下、各モデルの詳細を述べる。

4.2.1 観光者の巡回行動モデル

システム利用観光者は、巡回開始時及びスポットにおいてサービスを終了する度に、訪問を希望する目的地群 S_u の中から、次に訪問する目的地を決定する。その際、情報推薦システムから提示されたスケジュールに従う。ただし、情報推薦システムから提示されるスケジュールはリアルタイムで随時更新されているが、各システム利用観光者は、巡回開始時及びスポットにおいてサービスを終了した時点で提示されているスケジュールに従い、次に訪問する目的地を決

定する.

また, 一般観光者については第 3.2 節で述べたように, 影響のみのモデル化を行う.

4.2.2 道路の交通流モデル

各道路について, 自由流速度 V_f と最小速度 V_{min} , 及び最高密度 K_{max} が与えられるものとする. その道路内に存在する観光者数を m とすると, 道路内の観光者の密度 K_m は道路長 L を用いて $K_m = m/L$ と定義される. 道路における観光者の移動速度 V_m は式 (11) で与えられ, $V_m \geq V_{min}$ の際は道路の密度 K_m が増加するにつれて線形的に低下する.

$$V_m = \max(V_f(1 - K_m/K_{max}), V_{min}) \quad (11)$$

交通流モデルをグラフで表したものを図 1 に示す.

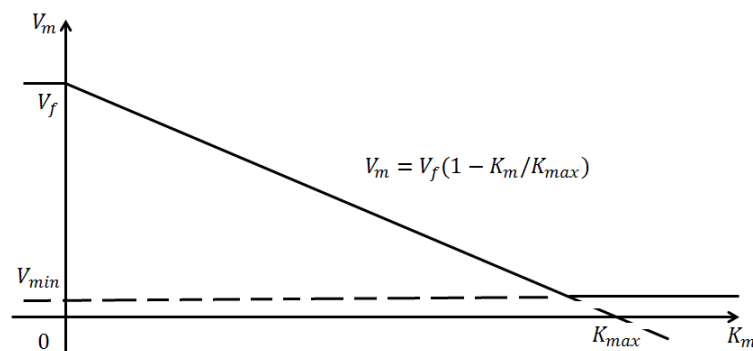


図 1: 道路の交通流モデル

4.2.3 スポットにおけるサービスモデル

観光者は自身が訪問を希望するスポットへ移動しサービスを受ける. 各スポット s は, 現在サービスを受けている観光者のリスト (サービスリスト) $s.Ls$ とサービスの開始を待っている観光者のリスト (待ちリスト) $s.Lw$ の2つのリストを持っている. 観光者 a が新たにスポット s に到着した際, サービス状況に空きがある ($|s.Ls| < s.C$) 場合は, 観光者 a をサービスリスト $s.Ls$ に加え, 即座にサービスを開始する. また, 空きがない ($|s.Ls| \geq s.C$) 場合は, その観光者 a を待ちリスト $s.Lw$ の末尾に加え, 空きが生じるまで待機させる. サービスを受けている観光者は, 必要なサービス時間 $s.St$ を消費することでサービスを終了し, $s.Ls$ から削除され, 次の目的地へ向けて移動を開始する. このとき,

待ちリスト $s.L_w$ に観光者が存在する場合は、待ちリスト $s.L_w$ の先頭の観光者がサービスリスト $s.L_s$ に加えられ、サービスが開始される。

4.2.4 経路選択戦略

観光者は目的地に向けて道路上を移動する際、経路情報共有戦略 (Route Information Sharing, 以下 RIS とする) をとるものとする。RIS 戦略は、文献 [3] で提案された手法である。これは、他の観光者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戦略である。各観光者の通過予定経路情報を経路情報サーバに収集し、渋滞情報の予測を行う。各観光者は予測された情報を基に自身の経路を再調整し、他観光者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、RIS 戦略の詳細を説明する。RIS 戦略を用いる観光者は、経路情報サーバに通過予定経路情報を送信する。経路情報サーバは、収集した各観光者の通過予定経路情報から各道路の期待混雑度 (Expected Traffic Congestion) ETC の導出を行う。交差点に到着した観光者は、現在いる交差点から目的地までの各道路の ETC の総和が最小となるような経路を選択する。また、経路を決定し交差点を通過した観光者については、その観光者の通過予定経路情報を更新する。 ETC の具体的な導出方法は以下の通りである。

まず、各道路に対して現在の混雑状況に基づく通過所要時間を求める。この通過所要時間を道路の期待通過時間 (Expected Passing Time) EPT と定義する。 EPT は式 (11) で求められた現在の混雑状況に基づく移動速度 V_m 及び道路長 L 用いて、式 (12) で与えられる。

$$EPT = L/V_m \quad (12)$$

次に、各観光者に対して通過確信度 (Passage Assurance) PA の導出を行う。 PA は、観光者 a が選択した通過予定経路上に p 個の道路が存在する場合、観光者 a が将来その道路を通過する確率である。現在地点から p 番目の道路まで、 PA は以下のように割り当てられる。

$$\frac{p}{p}, \frac{p-1}{p}, \frac{p-2}{p}, \dots, \frac{2}{p}, \frac{1}{p} \quad (13)$$

例えば、現在地点を含む道路には $p/p (= 1)$ が、 p 番目の道路には $1/p$ が割り当てられる。これは、現在地点から近い道路ほど通過確率が高く、遠い道路ほど通過確率が低いことを意味する。経路情報サーバは各観光者の PA を収集し、各

道路に対して PA の総和を計算する．この通過確信度 PA の総和を，総通過確信度 (Total Passage Assurance) TPA と定義する．

最後に， ETC を式 (14) のように算出する．

$$ETC = EPT \times (TPA + 1.0) \quad (14)$$

各観光者が経路を決定し交差点を通過するたびに，以上のような処理を行い各道路の ETC の更新を行う．交差点に到着した観光者は，現在いる交差点から目的地までの各道路の ETC の総和が最小となるような経路を選択する．そうすることで，RIS 戦略を用いる他の観光者と重複しないような経路を選択する．

第5章 実験

シミュレーションを用いて，本研究の提案手法を用いて生成されたスケジュールを，システム利用観光者の達成度により評価した．本章では，まず，正しい遷移確率を用いて生成したスケジュールに比べて，誤った遷移確率を用いて生成したスケジュールでは，システム利用観光者の達成度は低下すること，及び，提案手法では始めに誤った遷移確率の統計情報を与えられたとしても，実時間で遷移確率を修正し，そこから定常確率の更新を行うことで，達成度の低下を抑えることができることを実験で示す．次に，遷移確率を用いて一般観光者のモデル化を行った場合と，定常確率を用いて一般観光者の影響のモデル化を行った場合の実時間修正における達成度比較結果を述べる．最後に，評価に用いるシミュレーションにおいて，一般観光者の巡回行動モデルをさまざまに変化させることで，提案手法の妥当性を検証する．

5.1 実験環境

実世界における検証実験が困難であるため，シミュレータを用いた実験を行う．実験に用いる実世界を模したシミュレータを以下，実世界シミュレータと呼び，それに対して，スケジュール生成の際に未来を予測するのに用いるシミュレータを未来予測シミュレータと呼ぶものとする．実世界シミュレータは，4章で説明した未来予測シミュレータと同様のモデル化を行うが，一般観光者の巡回行動モデルについては，独立した異なるモデル化を行う．実世界シミュレータにおける一般観光者の巡回行動モデルは，未来予測シミュレータには一切関与しない．

5.2 実験の共通設定

ランダムに生成した複数のマップに対して実験をすることで評価を行う。観光者数は1000~20000(台)で可変的に実験を行う。これは、京都市を乗用車で訪れる一日の平均の観光者数がおおよそ40000人であること[4]を参考にしている。その中で、システム利用観光者の割合は、10%~100%の間で10%刻みで可変的に実験を行う。

道路は碁盤目状を仮定しており、これは白川通り、東大路通りといった京都市の主要な道路を模している。道路の間隔は1kmを仮定しており、これは上記のような主要な道路の実際の間隔を参考にしている。また、道路の自由流速度は $V_f = 60\text{km/h}$ 、最小速度は $V_{min} = 5\text{km/h}$ とした。最高密度は文献[3]で一般的とされている $K_{max} = 0.14$ とした。

シミュレーションステップは1ステップ1分としており、600ステップ(現実時間で10時間相当)のシミュレーションを行う。スポット数は $N_s = 100$ としており、各スポットの収容可能台数 $s.C$ は40~60台でランダムに設定、サービスに要する時間 $s.St$ は45~75ステップ(45~75分相当)でランダムに設定する。

各システム利用観光者が持つ訪問希望スポットの数は $|S_u| = 10$ としている。スポットの中には観光者が集中しやすい人気スポットがあることを想定し、観光者が訪問を希望するスポット及び重要度には偏りを持たせて実験を行う。具体的には、スポット $s_{91} \sim s_{100}$ が人気スポットであるものとする。各観光者は訪問を希望するスポットを、スポット $s_1 \sim s_{90}$ の中から5つ、スポット $s_{91} \sim s_{100}$ の中から5つ選択し、重要度をランダムに割り振る。さらに、スポット $s_{91} \sim s_{100}$ に関しては重要度を20%割り増すことで、人気スポットを再現している。重要度は各システム利用観光者に対して、合計100になるように正規化を行っている。

また、実世界シミュレータにおいては、一般観光者もシステム利用観光者同様に重要度リストを持っているものとし、その重要度リストに従い巡回を行う。未来予測シミュレータからは、一般観光者の持つ重要度リストを知ることはできない。全観光者が持っている重要度リストから、すべての目的地を巡回する最短経路を巡回セールスマン問題により解くことにより導出される遷移確率を、正しい遷移確率と定義する。それに対し、人気スポットの存在を想定せず、全観光者の重要度リストがランダムに設定されたものとし導出を行った遷移確率

を、誤った遷移確率であると定義する。

5.3 実時間情報に基づくスケジュール生成実験

従来手法 [2] では、一般観光者の存在を考慮していなかった。すなわち、システム利用観光者による影響のみを考慮してスケジュール生成を行っていた。従来手法を、一般観光者による影響を反映するように拡張するためには、予め統計情報などから得られる遷移確率を用いて一般観光者をマルコフモデルでモデル化し、未来予測シミュレータに組み込むことが考えられる。しかし、予め正確な一般観光者の遷移確率を得ることは難しく、遷移確率が誤っていた場合システム利用観光者の達成度が低下してしまうことが予想される。

本実験では、予め与えられた遷移確率が正しかった場合と誤っていた場合に、それぞれ上記のように一般観光者による影響を反映するよう拡張した従来手法において、システム利用観光者の達成度の比較を行う。さらに、提案手法により、実時間情報に基づき遷移確率を修正しリアルタイムでスケジュールを更新することで、予め与えられた遷移確率が誤っていた場合でも達成度の低下を抑えることができることを示す。

実世界シミュレータにおいては、一般観光者は自身の持つ重要度リストに基づき、巡回セールスマン問題を解き最短経路の巡回を行うものとする。実験はランダムで生成したマップ 10 個に対して行い、その平均値を用いて評価を行う。全観光者が 1000 人、5000 人、10000 人、20000 人の場合にそれぞれ実験を行った。比較結果を図 2~5 に示す。横軸が、システム利用観光者の割合、縦軸がシステム利用観光者の達成度の平均を表す。

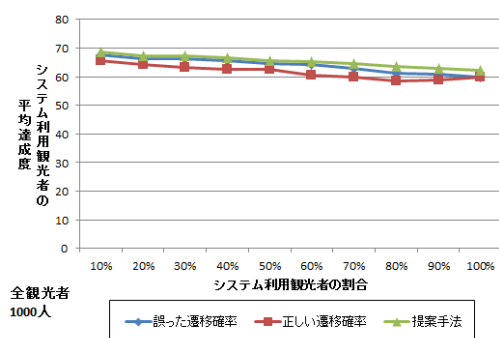


図 2: 実験 1 観光者 1000 人

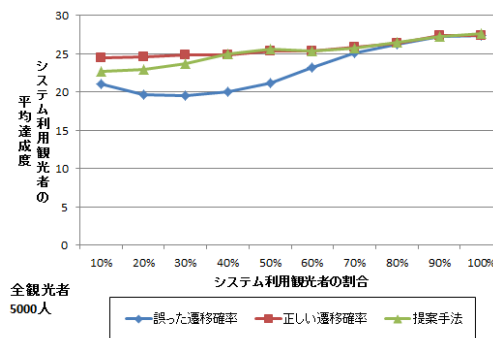


図 3: 実験 1 観光者 5000 人

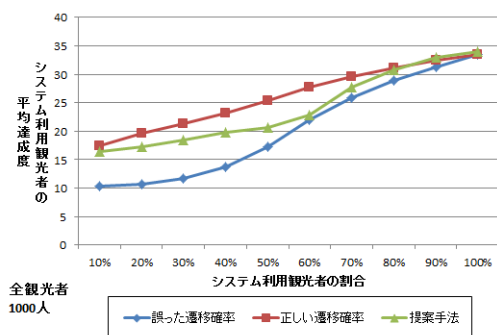


図 4: 実験 1 観光者 10000 人

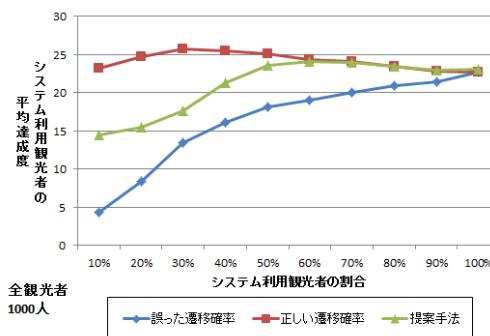


図 5: 実験 1 観光者 20000 人

図 2 より、観光者数が 1000 の場合混雑はほぼ発生しないため一般観光者による影響はほとんど受けず、与えられた一般観光者の遷移確率が正しくても誤っていても、システム利用観光者の達成度にはほとんど影響しないことがわかる。しかし、図 3~5 より、全観光者数が 5000~20000 の場合、与えられた遷移確率が誤っている場合、システム利用観光者の達成度が 5~20 程度低下していることがわかる。これは、スポット数に変換すると平均しておよそ 1~2 個のスポットを訪問できていないことに相当する。これより、予め与えられた遷移確率が誤っていた場合、従来手法により生成されたスケジュールでは、システム利用観光者は予期せぬ混雑に巻き込まれスケジュール通りに巡回できていないことがわかる。また、遷移確率の誤りによる達成度の低下は、全観光者数が多いほど大きい。これは全観光者数が多いほど混雑時に集中する観光者数が多くなり、それにともない混雑による時間の消費が大きくなるため、混雑による影響が大きくなっているのだと考えられる。

また、図 2~5 より、従来手法において実時間情報に基づきスケジュールを動的に修正することで、予め与えられた遷移確率が正しい場合と誤っている場合のおよそ中間程度の達成度を得ることができ、遷移確率が誤っていた場合に比べるとシステム利用観光者の達成度が 5~10 程度向上していることがわかる。

5.4 定常確率に基づく一般観光者の影響モデル化に関する実験

実時間情報に基づき動的にスケジュールの修正を行う際、未来予測シミュレータにおいて、推定された遷移確率より一般観光者の影響をモデル化する必要がある。提案手法では、遷移確率を用いるのではなく、そこから定常確率の更新を行うことで、一般観光者の影響をモデル化している。本実験では、遷移確率

を用いた場合と定常確率を用いた場合で、それぞれ実時間情報に基づきリアルタイムでスケジュールの修正を行い、システム利用観光者の達成度の比較を行う。実験設定は、第5.3節と同様とする。比較結果を図6～9に示す。

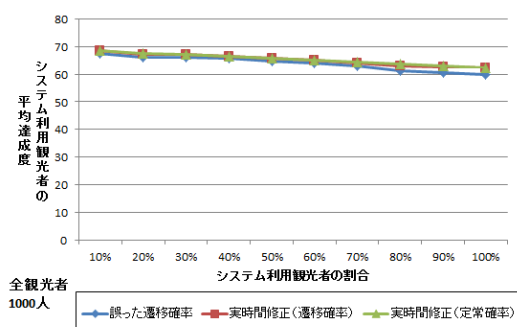


図6: 実験2 観光者 1000人

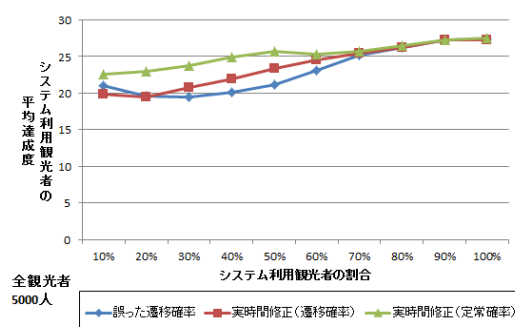


図7: 実験2 観光者 5000人

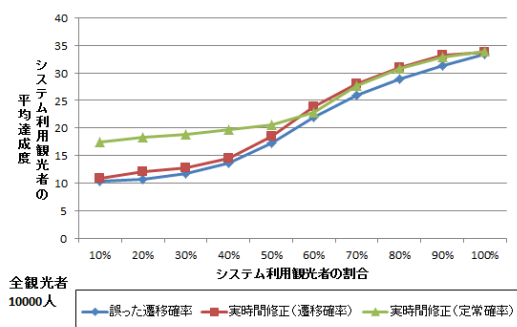


図8: 実験2 観光者 10000人

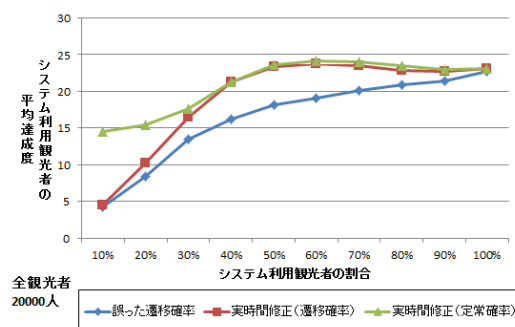


図9: 実験2 観光者 20000人

図6～9より、一般観光者の影響をモデル化する際、遷移確率を用いるよりも定常確率を用いた方が、一般観光者による影響を安定して推定することができ、システム利用観光者の達成度を向上させることができていることがわかる。

全観光者数 10000、システム利用観光者の割合 10%のときの、各ステップにおける推定された遷移確率及び定常確率の誤差の推移を図10に示す。遷移確率の誤差とは、推定された遷移確率と正しい遷移確率の誤差の絶対値に対し、スポット間の各遷移で平均をとったものと定義する。それに対し、定常確率の誤差とは、推定された遷移確率から導出された定常確率と正しい遷移確率から導出された定常確率の誤差の絶対値に対し、各スポットで平均をとったものと定義する。これらの確率誤差を単純に比較することはできないが、定常確率の誤

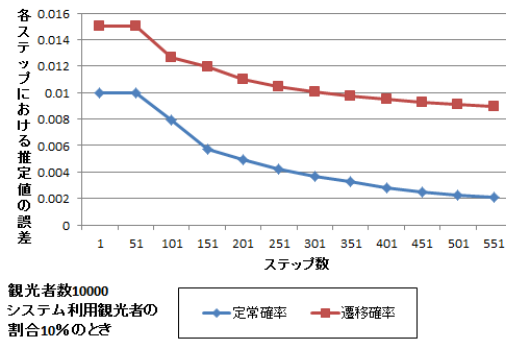


図 10: 推定された遷移確率及び定常確率の誤差の推移

差が 150 ステップ程度で初期誤差の半分まで減少しているのに対し，遷移確率の誤差は 550 ステップを超えても初期誤差の半分も減少していない．このことから，各スポットの定常確率の方がスポット間の遷移確率よりも早い段階で正しい値に近づいていることがわかる．

5.5 一般観光者の巡回行動モデルによる提案手法の妥当性検証

第 5.3 節及び第 5.4 節では，実世界シミュレータにおける一般観光者は，重要度リストより巡回セールスマン問題を解き最短経路の巡回を行うものとしていたが，本実験では，実世界シミュレータにおける一般観光者のモデルをさまざまなモデルに変更して実験を行うことで，提案手法の妥当性を検証する．想定するモデルは以下である．

- 1 直近情報戦略 [5]
- 2 重要度の高い順に巡回
- 3 正しい遷移確率に基づくマルコフモデルに従う

直近情報戦略は文献 [5] により提案された戦略である．一般観光者は，出発地点からの巡回開始時，またはスポットでサービスを終了した際，その時点での道路及びスポットの混雑度を用いて，式 (15) により移動時間及びスポットで生じる待ち時間を見込む．

$$predicttime_s = stay_s + time(s_{now}, s) \quad (15)$$

$predicttime_s$ が最小になるスポット s を次に向かう目的地として決定することで，訪問希望スポットをできるだけ効率よく巡回しようと試みる．ここで， $time(s_{now}, s)$ は，現在位置するスポット s_{now} から目的地スポット s への移動に

要する時間である。また、 $stay_s$ は式 (16) で表されるスポット s で生じる待ち時間である。

$$stay_s = \frac{|s.Lw| \times s.St}{s.C} \quad (16)$$

ここで、 $|s.Lw|$ 、 $s.St$ 、 $s.C$ は、それぞれスポット s の待ち行列の長さ、サービスに要する時間、キャパシティを表している。 $time(s_{now}, s)$ 及び $stay_s$ は、あくまで現在の混雑状況から算出される値であり、実際に消費する時間とは異なる可能性がある。

以上のモデルに対して、実世界シミュレータにおける一般観光者のモデルに適用し、第 5.3 節と同様に、予め与えられた遷移確率が正しい場合、誤っている場合、また誤っている際に提案手法により実時間でスケジュールの修正を行った場合の、システム利用観光者の達成度の比較実験を行った。全観光者数は 10000 とする。実験結果を図 11~13 に示す。

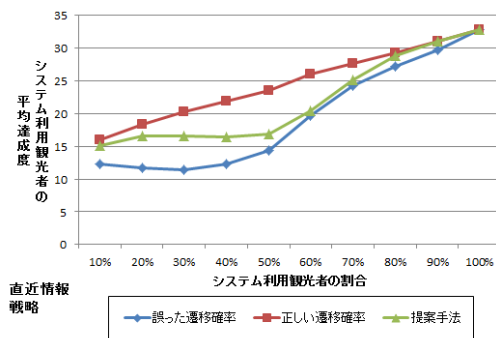


図 11: 実験 3 直近情報戦略

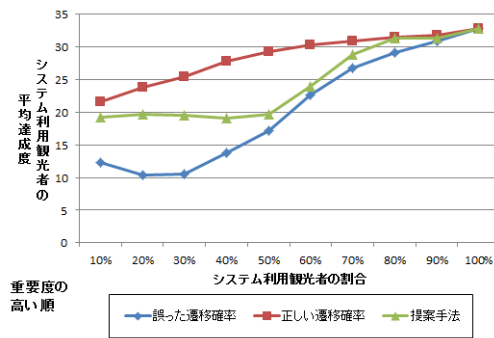


図 12: 実験 3 重要度の高い順

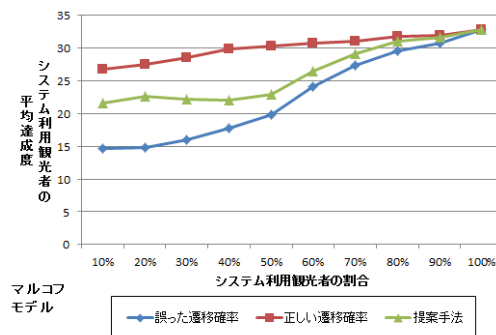


図 13: 実験 3 マルコフモデル

図 11~13 より、実世界シミュレータのさまざまなモデルに対しておよそ同様の傾向を示し、提案手法が有効であることがわかった。

また、システム利用観光者の割合が 0%~50% のとき、システム利用観光者の達成度の平均のグラフはおよそ横ばいになっていることがわかる。これは、一般観光者により人気スポットがほぼ埋め尽くされている状態であると考えられる。すなわち、人気スポットが一般観光者により常に非常に混雑している状態であり、そこを訪問しようとするとかかなりの時間を消費してしまうため、システム利用観光者は混雑が発生していない他のスポットを巡回している状態である。システム利用観光者の割合が 50% を上回るあたりで、システム利用観光者による影響が一般観光者による影響を上回り、人気スポットの混雑が解消され始める。それにより、達成度の平均が再び上昇し始めるのだと考えられる。

重要度の高い順に巡回を行う場合やマルコフモデルに従って巡回を行う場合は、次の目的地を決定する際混み具合を考慮しないため、混雑が発生しやすい。それに対し、直近情報戦略に従い巡回を行う場合は混雑が発生しにくいと考えられる。ここで、第 5.3 節で述べたように、混雑が発生しやすいほど遷移確率の誤りによる達成度の低下は大きいものと考えられるが、図 11~13 より、確かに図 11 のグラフに比べて図 12 及び図 13 のグラフの方が、遷移確率の誤りによる達成度の低下が大きくなっていることがわかる。

第 6 章 結論

本研究では、システム利用観光者から与えられた訪問を希望するスポットの重要度リストを基に、各システム利用観光者ができるだけ多くの訪問希望スポットを巡回できるようなスケジュールを生成する手法を提案した。適切なスケジュールを生成する手法が確立されれば、システム利用観光者が効率よく多くのスポットを巡回できるようなスケジュールを推薦するシステムを開発することが可能となる。スケジュール生成には観光地の未来予測を行う必要があり、そのために本研究ではシミュレーションを用いた。

シミュレーションを用いた巡回スケジュール生成の従来研究では、情報推薦システムを利用しない観光者（一般観光者）の存在を考慮していないという問題点があった。一方で、一般観光者をシミュレーションに組み込み未来予測を行うためには、一般観光者をモデル化する必要があるが、事前情報だけを用い

て一般観光者を予め正確にモデル化することは困難であった。本研究では、実時間情報を用いて一般観光者による影響のモデルを修正しつつ、リアルタイムでシミュレーションを行いスケジュールを生成することで、この問題に対処した。一般観光者があるスポットから別のスポットへ遷移する確率をリアルタイムで推定しようとした場合、遷移の可能性はスポットの組み合わせの数だけあり非常に多く、少ないデータでは推定が困難である。そのため、遷移確率を用いて一般観光者のモデル化を行いシミュレーションに反映させても、妥当な結果が得られるとは限らず、リアルタイムでの情報推薦は困難となってしまう。

この問題に対処するため、スポット間の遷移確率から各スポットの定常確率の導出を行い、一般観光者による影響をシミュレーションに反映させる手法を提案した。定常確率から一般観光者による影響をシミュレーションに反映させる方法としては、定常確率から各スポットの一般観光者による混雑度の数値化を行い、各スポットの収容可能人数を減らすという方法を用いる。スポット間の遷移確率を直接用いるのではなく、スポットの定常確率を計算してから用いることで、スポットの組み合わせ数ではなく、スポット数分の推定をすることにつながり、少ないデータで安定した推定を行うことができるという利点がある。そのため、一般観光者の影響をリアルタイムでシミュレーションに反映させることができる。実世界を模したシミュレーションによる、実時間情報に基づく定常確率を用いたスケジュール生成に関する実験では、実時間情報を用いない場合に比べて、また遷移確率を用いる場合に比べて、達成度が向上していることを確認した。

実時間情報に基づくシミュレーションを用いたスケジュール生成には様々な応用が考えられる。例えば、実時間情報をシミュレーションに随時反映させることで、観光者がどのスポットからどのスポットへ遷移しやすいかなどの傾向を明らかにし、実世界の観光者の巡回行動に対して新たな知見を得ることができ、観光政策の参考にできる。また、観光地に留まらず、運送業の配送計画などにも活用できる。このような実時間情報に基づくスケジュール生成への応用を今後の研究課題としたい。

今後、観光地について利用できるデータがさらに増えれば、各スポットの必要なサービス時間及び収容台数などをより細かく設定したり、観光者について、遷移確率だけでなく、時期や時間帯、その他性格・嗜好などをより反映させた、より細かいモデル化をすることが可能となる。観光地及び観光者をより細かく

正確にモデル化することができれば、シミュレーションの精度をさらに向上させることができ、より現実に即したスケジュール生成及び評価をすることが可能となる。また、本研究では大規模交通網における複数観光者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した。そのため、信号、交差点における右折待ち、Uターン、複数車線、追い越し、行き止まり、観光者以外の一般人による混雑渋滞による影響、といった要素は考慮していないが、交通流モデルをより複雑に細かく設計する拡張も考えられる。このような、シミュレータの拡張による実時間情報に基づくスケジュール生成手法についても今後検討していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くのご教示と熱心なご指導を賜りました美濃導彦教授、船富卓哉助教に深く感謝いたします。また、日頃より熱心なご指導と本報告書の作成において多くの助言をいただきました椋木雅之准教授に心より感謝申し上げます。最後になりましたが、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた笠原秀一氏や田村和範氏をはじめとする美濃研究室の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] ディズニーリゾート待ち時間・混雑情報: ディズニーランドアトラクションのリアルタイム待ち時間. <http://tokyodisneyresort.info/realtime.php?park=land>.
- [2] 恭嘉栗山, 佳洋村田, 直樹柴田, 慶一安本, 実伊藤: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 3, pp. 885–898 (2010).
- [3] Yamashita, T., Izumi, K., Kurumatani, K. and Nakashima, H.: Smooth Traffic Flow with a Cooperative Car Navigation System, pp. 478–485 (2005).
- [4] 京都観光 Navi: 京都観光総合調査. http://raku.city.kyoto.jp/kanko_top/kanko_chosa.html.
- [5] Kawamura, H., Kataoka, T., Kurumatani, K. and Ohuchi, A.: Investiga-

tion of Global Performance Affected by Congestion Avoiding Behavior in Theme Park Problem, *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 124, No. 10, pp. 1922–1929 (2004).