

利用者均衡を満たす混雑予測を用いた最適人流制御

Optimum pedestrian flow control using congestion forecasting satisfying user equilibrium

山田 広明¹ 神山 直之^{2,3} 岩下 洋哲¹ 大輪 拓也¹ 大堀 耕太郎¹

Hiroaki Yamada¹, Naoyuki Kamiyama^{2,3}, Hiroaki Iwashita¹, Takuya Ohwa¹, and Kotaro Ohori¹

¹ 株式会社富士通研究所

¹ Fujitsu Laboratories Ltd.

² 九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所

² Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University

³ 国立研究開発法人科学技術振興機構, さきがけ

³ JST, PRESTO

Abstract: In the theme park, restricting the order of wandering or the use of the attractions is greatly reduce visitor satisfaction. The problem of how to achieve overall system optimization such as congestion reduction where managers can not force people to do something is a unique problem on pedestrian flow control. In recent years, many researchers have been optimized congestion using simulation optimization methods. However, the method they use is forces people to do something, indirect control method like information distribution has not been to be used in. In this paper, we attempt to optimize congestion by using “congestion forecasting” as one of indirect pedestrian control method. We propose a method to derive optimal information distribution policy by using congestion forecasting satisfying user equilibrium.

1 はじめに

テーマパークでは、しばしば人気アトラクションや人気ショー（以降では、アトラクションやショーを区別せずに、単にアトラクションと呼ぶ）に利用者が集中する大混雑が起こる。このような混雑を緩和することは、待ち時間が短縮できるという意味で利用者の満足度の向上に寄与するし、また、群衆形成により発生する様々な危険を抑止できるという意味で施設の円滑な運営にとっても重要である。ところが、テーマパークにおいて、混雑緩和のために訪問アトラクションを制限したりアトラクションの回遊順序を強制したりすると、エンターテインメント性を低下させるため、利用者の満足度が著しく低下してしまう。このような人々に行動を強制できない状況で、いかにして混雑緩和のようなシステム全体の最適化をいかにすれば達成できるかという問題は、人流制御特有の問題と言える。

人々に行動を強制することで人流制御を行う方法としては、たとえば誘導員に誘導や施設レイアウト変更による動線変更がある。本論文では、これらの制御手段を人流の**直接制御**と呼ぶ。一方で、行動を

強制することなく意思決定に働きかけることで人流制御を行う方法もある。たとえばルート推薦や混雑情報の配信あるいはクーポンの配信に制御である。これらの制御手段を人流の**間接制御**と呼ぶ。人流の間接制御は、人々の趣向に応じたあるいは個別の制御が必要なため技術的に困難であるが、スマートフォンのような個々人の状態を取得しそれに応じて個別に情報配信を可能にするデバイスの普及によって、需要が高まりつつある。

本研究では、人流の間接制御手法の一つである混雑予測の配信について、混雑緩和を実現する最適な施策の導出を試みる。ここでは、混雑予測の内容と配信対象のさまざまな組み合わせを情報配信施策と呼ぶ。最適な施策の導出を、以降では**施策最適化**と呼ぶ。本研究では、対象システムをシミュレータ上で再現し最適施策を探索するシミュレーション最適化アプローチ[3]により施策最適化を試みる。混雑予測による人流制御では、1)予測が安定して再現されるかと、2)予測による人々の行動変化をも考慮して最適化できるか、の二点を解決する必要がある。

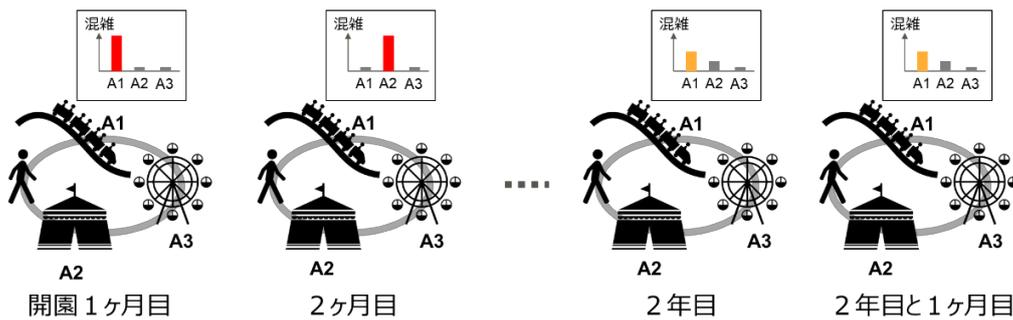


図 1: テーマパークにおける利用者均衡のイメージ図

単純に混雑予測を配信すると、人々は混雑箇所を箇所や時間帯を回避するように行動するため、混雑すると予測箇所が空き、空くと予測された箇所が混雑してしまう。このような外れる予測は、最適化ができたとしても、利用者から信頼を失い制御の効果を失ってしまう。あるいは、予測に基づく他者の行動を考慮して、あえて混雑箇所に向かうといった出し抜き行動を誘発してしまい、想定した制御効果が得られない。したがって、混雑予測はその結果が再現される物である必要がある。これが一つ目の予測の安定性の問題である。混雑予測がリアルタイムに配信されると、人々は得られた情報に基づいて行動を変化させる。そのような行動変化は、混んでいないと予測された箇所に人が集まり混雑が発生し、混んでいると予測された箇所から人がいなくなり混雑が消滅する、ということが時間的に交互に起こる**ハンチング現象**を引き起こすことが知られている[1][2]。このように、予測による行動変化が新たな混雑状況を作り出し、その状況に基づく予測がさらに行動を変化させるというマイクロ行動とマクロ現象の循環により、混雑の振動現象のような新たな問題を引き起こされる場合がある。そのため人々の行動変化をも考慮して最適化することが重要である。これが二つ目の予測による行動変化の問題である。

本論文では、**利用者均衡(user equilibrium)**に着目して、混雑予測を用いた人流の最適制御を試みる。利用者均衡とは、当該テーマパークの利用が無制限繰り返されたのちに至る均衡状態である(図1)。利用者均衡はナッシュ均衡の一種であり、「各利用者が自身の効用を最大化しようと行動している状態で、全ての利用者にとって行動を変更させる誘因が存在しない状態」と定義できる。利用者均衡では、以前の状態から人々の行動はもはや変化しない。したがって、利用者均衡状態を混雑予測として配信すれば、予測と同じ状態が作り出される。このような混雑予測では、予測の安定性の問題を引き起こさない。また利用者均衡を計算する際に、混雑予測に基づく行動変化を再現したシミュレータを用いれば、予測に

よる行動変化の問題にも対処できる。以降では、以上の予言の自己成就的な混雑予測を、**利用者均衡を満たす混雑予測**と呼ぶ。

続く第二章では関連研究について述べ、第三章で問題設定を述べ、第四章で具体的な提案手法を記述する。第五章で提案手法の実験結果を示し、第六章でまとめを述べる。

2 関連研究

人流における施策最適化は、主にシミュレーション最適化で行われてきた。古典的には施策最適化は、小数の候補施策を設計し、それらをシミュレーション上で評価し最も望ましい結果をもたらす施策を見つける形で行われる[9]。また、小数のパラメータに着目して、パラメータ空間内で最も望ましい結果をもたらす値を見つける試みも行われている[2][4]。しかし、これらの方法は、候補施策の事前設計や探索空間の絞り込みを行うため、網羅的な施策分析ができないという問題がある。この点を解決するために、近年、ブラックボックス最適化手法を用いて、網羅的に施策を分析する研究が行われている[5][6]。しかし、これらの研究では移動経路の指定という直接制御を想定しており、間接制御を想定する施策最適化手法になっていない。具体的には、予測と結果が一致する安定した混雑予測を導出することはできないという問題がある。

人流の間接制御を試みる関連研究として、ゲーム理論に基づいたアプローチがある[7][8]。増田[8]は、テーマパークで人々が戦略的に振る舞う状況で、ファストパスの導入が、混雑の均衡状態をどのように変えるかを分析している。ゲーム理論に基づく分析は、ファストパス導入やアトラクションの料金設定のような間接制御の効果を分析できる点で優れている。しかし、ゲーム理論に基づく分析では、混雑状況をリアルタイムで観測してそれをもとに行動を変化させるといった人間行動の動的な側面が捨象されているという問題がある[8]。そのため、混雑予測を配信し人々の行動が変化することで起こる、ハンチ

ング現象などを考慮できないという問題がある。

予測の安定性の問題と予測による行動変化の問題を考慮して、最適な情報配信施策の導出を試みる研究は未だ見られない。

3 問題設定

本章では、本論文で用いるシミュレーションモデルを概説し、解くべき最適化問題の定式化を行う。

3.1 テーマパークのシミュレーション

テーマパークの利用者は、行きたいアトラクションを現在地から近い順に効率的に巡っていく。混雑状況を認知している場合は、待ち時間を短くし乗れるアトラクションを増やすために、混んでいるアトラクションは後回しにする。Ohori[9]は、以上の利用者行動を多項ロジットモデルによりモデル化することで、実際のテーマパークの混雑状況を再現した。Ohori[9]は、各利用者にとってのアトラクションの効用 U がアトラクションへの好み α と移動コスト d と混雑コスト c で決まると考え、アトラクション $A = (a, b, \dots, n)$ が存在する状況の回遊行動を、効用

$$U^A = \alpha^A + \beta_1 d^A + \beta_2 c^A, \quad (1)$$

を最大化するアトラクションを逐次選択する行動としてモデル化した。ここで β_1, β_2 は各利用者の移動コストと混雑コストに対する重視度である。また、混雑コスト c は各アトラクションの混雑情報を得る度に更新される。本論文では、Ohori[9]のテーマパークの人々の情報取得と意思決定を再現したモデルを用いて実装したシミュレータを用いる。

本論文では、特定の時刻と特定のアトラクションに利用が集中する混雑状況を作りだし、混雑予測を配信することでその混雑状況を解決する(図2)。シミュレーションは、上記の混雑状況をミニマルに再現する設定にする。具体的には、利用者を表すエージェントは300体、アトラクションは3つ($A1, A2, A3$)とする。全エージェントは3つアトラクション全ての利用を目的とするが、その中には人気アトラクション $A1 > A2 > A3$ が存在する。これを好み ($\alpha^{A1}, \alpha^{A2}, \alpha^{A3}$) が $(1.00, 0.66, 0.33), (1.00, 0.33, 0.66), (0.66, 0.33, 1.00)$ であるエージェントをそれぞれ200体、50体、50体ずつ生成することで表現する。利用者が入場する時間にはピークが存在し、これをエージェントの到着時間が平均午前9時、標準偏差10分

の正規分布に従い決まることで表現する。簡単のためにアトラクション間の移動距離は無いと見え、移動コスト d^A は0とする。混雑コスト c^A には、混雑状況が代入される。混雑コストは0から1の実数を取り、混雑状況について何も知らない状態(初期値)は $c^A = 1$ である。簡単のために混雑コスト重視度に個人差はないと見え、 β_2 は-1とする。利用者は、最も効用が大きいアトラクションを決定論的に選択し、アトラクションに待ち行列が出来ていた場合は最後尾に並び、先頭に来たらアトラクションに搭乗する。全てのアトラクションは、一回の利用人数の上限が50人であり、一回の興行にかかる時間が10分である。

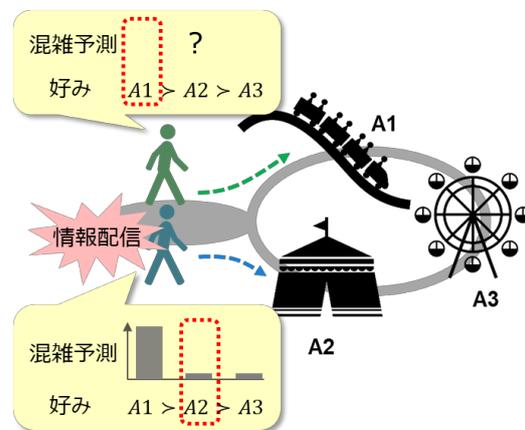


図2: テーマパークにおける利用者行動と混雑予測の配信による人流制御のイメージ図

3.2 最適化問題の定式化

人流制御の最適化のための施策変数は、配信する内容である混雑予測(Forecast) F と混雑予測を配信する対象を決める配信施策(Policy) p である³。しかし混雑予測 F には、利用者均衡を満たす混雑予測を計算して用いるため、自由に設定することはできない。本論文では、複数のアトラクションを回遊する利用者に対して、混雑予測 F が配信施策 p に基づき配信されたとき、アトラクションの最大待ち人数 $f(F, p)$ を最小化するような、混雑予測 F と配信施策 p を求める問題を考える。すなわち、

$$\min_{F, p} f(F, p), \quad (2)$$

$$\text{s.t. } F = 0, \quad (3)$$

考える。そのような配信施策は、スマートフォンを用いて、プレミアムチケット購入者のみあるいは先着順に混雑情報を配信することで可能である。

¹ 現在地からアトラクションまでの距離を用いる。移動により生じる、疲労等の負の誘因を意味する。

² 各アトラクションの混雑状況を用いる。混雑により生じる、待ち時間等の負の誘因を意味する。

³ 配信施策は、単純に全来場者中の何割に配信するかを

という最適化問題を考える. 混雑予測 F は, 結果として起こる混雑(Outcome) O と一致する利用者均衡を満たす混雑予測である. テーマパーク全体の待ち人数 Q を, 各時刻 $t = (t_0, t_1, \dots, T)$ 各アトラクション $A = (a, b, \dots, n)$ における待ち人数 q_t^A を用いて,

$$Q = \begin{pmatrix} q_{t_0}^a & \dots & q_{t_0}^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_T^a & \dots & q_T^n \end{pmatrix}, \quad (4)$$

と表したとき, O は Q を各時刻における最大値が 1 になるように正規化した値である. 具体的には,

$$O = \begin{pmatrix} q_{t_0}^a / \max_A q_{t_0}^A & \dots & q_{t_0}^n / \max_A q_{t_0}^A \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_T^a / \max_A q_T^A & \dots & q_T^n / \max_A q_T^A \end{pmatrix}, \quad (5)$$

である. なお目的関数であるアトラクションの最大待ち人数は,

$$f(F, p) = \max_{A,t} q_t^A, \quad (6)$$

である.

4 提案手法

本章では, 利用者均衡を満たす混雑予測を導出する方法を述べ, 次に最適な情報配信施策を導出する方法を述べる.

4.1 利用者均衡を満たす混雑予測の導出

利用者均衡を求める方法として, Frank-Wolfe 法あるいは条件付き勾配法と呼ばれる方法が提案されている[10]. Frank-Wolfe 法は, 利用者均衡のアイデアに則って, 人々が効用最大化行動を取りその結果として混雑状況が生じ, 混雑状況に応じて人々が更に効用最大化行動を取るということが繰り返された場合にどのような状態に至るかを, 勾配法を用いて計算する. Frank-Wolfe 法は, 通常, 利用者均衡となる利用経路配分を求めるために用いられるが, 本論文では, これを利用者均衡となる混雑予測値の配分を求めるために用いる.

利用経路配分における利用者均衡とは, 出発地から目的地までの間にある全ての経路の旅行時間(移動コスト)が等しくなるような利用者の配分である. Frank-Wolfe 法では, 利用経路配分を x としたとき, 各経路を構成するリンク $i \in (1, 2, \dots, I)$ のリンク旅行時間 t_i の積分の和を最小化する x を求めることで, 利用者均衡を求める. すなわち,

$$\min_x \sum_i \int_0^x t_i(w) dw, \quad (7)$$

を解く. 一方で, 混雑予測における利用者均衡とは, 全ての混雑予測が結果と一致するような混雑予測値の配分である. つまり, 混雑予測 F とその結果として

起こる混雑 O の差である予測誤差 $E^A(F)$ の和を最小化する, F を求めることで, 利用者均衡を求めることができる. したがって, 式(7)に代わり,

$$\min_F \sum_A E_A(F), \quad (8)$$

を解くことで, 利用者均衡を満たす混雑予測を求める.

Algorithm 1 が混雑予測のために拡張された Frank-Wolfe 法である. 利用者均衡を満たす混雑予測は, 最初の時刻から順に求めていく. 各時刻で, まず更新方向ベクトル d^k を求め(4,5,6), 次に予測誤差 $E_{t,A}$ の最小化する更新ステップサイズ γ^k を求める(7,8). これを 1 iteration として, 時刻 t での全アトラクション A の混雑予測値の変化量 $\Delta_{t,A} = |f_{t,A}^{k+1} - f_{t,A}^k| / f_{t,A}^k$ の平均 $\bar{\Delta}_t$ が δ 以下になるまで繰り返す(9,10,11). 一時刻の混雑予測を求め終わったら, 次の時刻の混雑予測を求

める. ここで, $\mathcal{F} \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$ は初期混雑予測であ

り, 行の要素数は予測する時間刻みの数, 列の要素数はアトラクション数である. $\delta \leftarrow 0.01$ は収束判定の基準値であり, p は情報配信施策である. Simulate(F, p) は, 混雑予測 F が配信施策 p で配信されたときのシミュレーション結果である. $o_{t,A}$ は時刻 t の混雑であり, $E_{t,A}$ は時刻 t の予測誤差である.

Iteration k における混雑予測 F^k は, 各時刻各アトラクションの混雑予測から成る, $F^k = \begin{pmatrix} f_{t_0,a}^k & \dots & f_{t_0,n}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{T,a}^k & \dots & f_{T,n}^k \end{pmatrix}$.

Algorithm 1: FW method for congestion forecasting.

Input: \mathcal{F}, δ, p

```

1: for  $t = t_0, t_1, \dots, T$  do
2:    $F^0 \leftarrow \mathcal{F}$ 
3:   for  $k = 0, 1, \dots, K$  do
4:      $o_t \leftarrow \text{Simulate}(F^k, p)$ 
5:      $O^* = (f_{t_0,A}^k, \dots, o_{t,A}, \dots, f_{T,A}^k)$ 
6:      $d^k = O^* - F^k$ 
7:      $\gamma^k =$ 
 $\arg \min_{\gamma \in [0,1]} \left( \sum_A E_{t,A} \leftarrow \text{Simulate}(F^k + \gamma d^k, p) \right)$ 
8:      $F^{k+1} = F^k + \gamma^k d^k$ 
9:     if  $\bar{\Delta} \leq \delta$  then
10:       $\mathcal{F} \leftarrow F^k$ 
11:      break
12:     end if
13:   end for
14: end for
15: return  $\mathcal{F}$ 

```

4.2 情報配信施策の最適化

最適な混雑予測 \mathcal{F}^{p_opt} と情報配信施策 p_opt を、Algorithm 2により求める。Pは施策集合であり、 q_t^A は施策pでのテーマパーク全体の待ち人数であり、 Q^p は最大待ち人数である。

Algorithm 2: Optimization of information dissemination.

Input: P

1: for $p \in P$ do

2: $\mathcal{F}^p \leftarrow \text{Algorithm1}(p)$

3: $q_t^A \leftarrow \text{Simulate}(\mathcal{F}^p, p)$

4: $Q^p \leftarrow \max_{A,t} q_t^A$

5: end for

6: $p_opt \leftarrow \arg \min_p Q^p$

7: return $(\mathcal{F}^{p_opt}, p_opt)$

5. 計算機実験

提案手法を用いて、3.1節で説明したテーマパークのシミュレーションの施策最適化を行う。シミュレーションは8:00から12:00まで行い、一時間毎に混雑予測を行う。情報配信施策は混雑予測を配信するエージェントの割合とし、配信割合を0から1までを0.1刻みずつ変えた11施策を施策集合とする。

表1が、提案手法により導出された最適施策とその混雑緩和効果である。導出された施策により最大待ち人数を159人から138人に減らすことができていることが分かる。また、配信した混雑予測とその結果として起こる混雑の差を意味する予測誤差は0.0004と十分に小さく、利用者均衡を満たす混雑予測を導出できていることが分かる。なお、11時台で、全てのアトラクションの混雑予測が1となっているが、これは全てのアトラクションが一切混雑していないことを意味する。全て0と同じ意味合いである。以上から、人流を制御し混雑緩和を実現する、混雑予測を導出できていると言える。

表 1: 導出された最適施策とその混雑緩和効果

配信割合(p_opt)	0.1
混雑予測(\mathcal{F}^{p_opt})	A1 A2 A3
	8:00 (1.00 0.29 0.04)
	9:00 (1.00 0.35 0.26)
	10:00 (0.01 0.15 1.00)
11:00 (1.00 1.00 1.00)	
最大待ち人数	138/159
予測誤差	0.0004

次に、各アトラクションの混雑状況の変化を確認

し、適切な施策を導出できているかを確認する。図3に、混雑予測による各アトラクションの混雑状況の変化を示す。図3(a)は、三つのアトラクションの待ち人数である。左図は混雑予測配信なし、右図は最適な混雑予測配信ありである。横軸は時間であり縦軸は待ち人数である、青がA1、赤がA2、緑がA3のそれぞれのアトラクションを表す。図3(b)では、三つのアトラクションに並んだ利用者の待ち時間の分布を示している。(a)と同様に、左図が配信なしで、右図が配信ありである。横軸が待ち時間(分)で、縦軸が頻度である。図3(a)から、アトラクションA1のピークを全体的に抑制する形で、待ち人数を減らしていることが分かる。また、図3(b)のA1の図から、30分以上並んだ利用者の数を大幅に減らしていることが分かる。以上から、最大待ち人数の減少というシステム全体の最適化を実現しつつ、個々のエージェントの待ち時間も悪化させない、優れた施策を導出できていることが分かる。

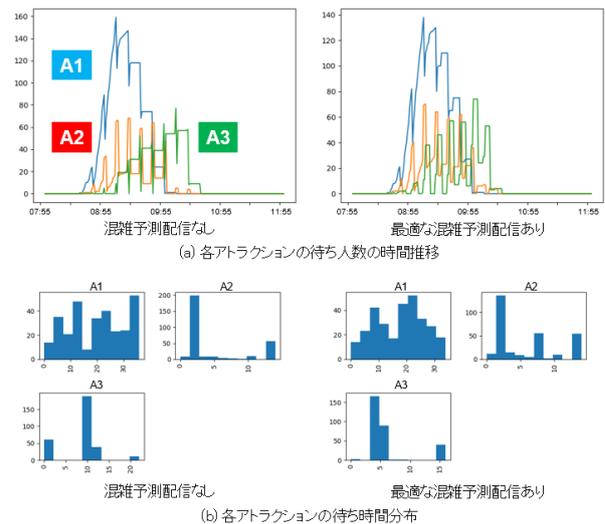


図 3: 混雑予測による各アトラクションの混雑状況の変化

最後に、複数の試行について提案手法を適用し、利用者状況がわずかに異なっても、一貫性がある結果を導出できるかを確認する。図4に、乱数シードが異なる10試行のシミュレーションに対して、提案手法を適用した結果を示す。数値は、最大待ち人数を削減できた割合である。数値が書かれていないセルは、利用者均衡を満たす混雑予測を存在しなかったことを意味する。最適な配信施策は、行方向に見たときに値が最も小さくなっている列である。利用者状況がわずかに異なっても、10施行中8試行で同じ配信施策0.1が最適施策として選ばれており、一貫性がある結果を導出できることが分かる。

試行番号	配信施策										
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	1.00	0.89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.00	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1.00	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1.00	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	0.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1.00	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1.00	0.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図 4: 10 試行のシミュレーションに対する
施策最適化の結果

5 まとめ

本研究では、混雑予測による人流制御の施策最適化を目的に、利用者均衡に着目して混雑予測を計算することで、最適な情報配信施策を導出する手法を提案した。そして、テーマパークのシミュレーションを対象とした計算機実験において、最適な混雑予測配信施策を導出できることを示した。

今後は、GA などのヒューリスティックな最適化手法との比較を行い、本手法の計算量の面での優位性を確認することが課題である。また、実際のテーマパークでの実証に向けて、現実を模擬したより複雑なシミュレーションに対しても提案手法が適用可能かの検証を進める予定である。

謝辞

本研究は、JST、さきがけ、JPMJPR1753 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 大口 敬, 佐藤 貴行, 鹿田 成則: 渋滞時の代替経路選択行動に与える交通情報提供効果, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, pp. 799-804, (2005)
- [2] Imai T., Nishinari K.: Optimal information provision for maximizing flow in a forked lattice, Physical Review E, Vol. 91, No. 6, p. 062818, (2015)
- [3] Jian N., Henderson S. G.: An introduction to simulation optimization, In proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, pp. 1780-1794, (2015).
- [4] 清水 仁, 松林 達史, 納谷 太混: 雑飽和状態の遊園地における待ち時間削減手法のシミュレーション評価, 人工知能学会論文誌, Vol. 32, No. 5, p. AG16-F_1-8, (2017)
- [5] 清武 寛, 幸島 匡宏, 松林 達史, 戸田 浩之: 最適制

御策の効率的探索技術に関する研究, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. JSAI2017 巻, p. 3N12in2, (2017)

- [6] 清水 仁, 大塚 琢馬, 岩田 具治, 澤田 宏, 納谷 太, 上田 修功: ベイズの最適化による最適集団誘導探索, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 118, No. 284, pp. 99-110, (2018)
- [7] Hassin R.: Rational Queueing, CRC Press, (2016)
- [8] 増田 靖混: 混雑制御—ディズニールランドのジレンマ—, オペレーションズ・リサーチ, Vol.63 No.8, (2018)
- [9] Ohori K., Iida M., Takahashi S.: Virtual Grounding for Facsimile Model Construction Where Real Data Is not Available, SICE journal of control, measurement, and system integration, Vol. 6, No. 2, pp. 108-116, (2013)
- [10] LeBlanc L.J., Morlok E.K., Pierskalla W.P.: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, Transportation Research Vol. 9, No. 5, pp. 309-318, (1975).