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

Simulation of Saturated Thema Park for Reduction of Waiting Time

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 清水 仁

NTT Communication Science Laboratories shimizu.hitoshi@lab.ntt.co.jp

NTT サービスエボリューション研究所 松林 達史

NTT Service Evolution Laboratories matsubayashi.tatsushi@lab.ntt.co.jp

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 納谷 太

NTT Communication Science Laboratories naya.futoshi@lab.ntt.co.jp

keywords: multiagent simulation, theme park problem

Summary

In this research, we show a paradox of the "theme park" problem. In the crowded amusement park, it is generally believed that the equalization of queue lines of people can decrease the waiting time for riding on attraction. However, the equalization of queue lines occasionally increases the waiting time in the case where congestion degree is over the limit of capacity. This paradox makes it difficult to reduce congestion. In this paper, we propose a method to reduce the waiting time even in the "theme park paradox" situation, and evaluate effectiveness of our method by multiagent simulation.

1. は じめに

行楽シーズンの遊園地やテーマパークでは一日に数万 人もの人々が訪れ,人気アトラクションには長い行列が できて混雑が発生する. 混雑のおかげでテーマパークが 話題になったり、どのアトラクションが楽しいかの見当 がつくようになったりなどのメリットもある一方、待ち 時間が長すぎると、他のアトラクションを体験したり食 事や買い物をしたりする時間がなくなるなどのデメリッ トも生じる.このような混雑に対して運営サイドでも, 待ち時間をスマホや掲示板に表示したり,優先パスを発 行するなど, 待ち時間を削減するための対策をしている. このようなテーマパークの混雑緩和に関する問題を一般 的に"テーマパーク問題"と呼び [川村 03, 柳田 09], 計 算機上でマルチエージェントシミュレーションを用いて 様々な検討がなされてきた. テーマパーク問題とはすな わち、複数アトラクションからなるテーマパークに大勢 の来園者が訪れるときに、全体の混雑度を減少させる問 題といえる. これまでに、たとえば混雑情報を一定割合 の来園者に提供することにより, アトラクションの行列 を分散させて混雑度を小さくできる場合があることが示 されている [辺見 02, 兼田 10, 川村 03]. しかしながら従 来研究では、提案する混雑緩和策がどの程度の混雑状態 において有効かを定量的に示していなかった.

本研究では、混雑状態の指標として飽和度と飽和状態 を定義し, 遊園地全体が飽和状態のときは混雑を平準化 しても待ち時間が減少しない現象(「テーマパークのパ ラドックス」)が発生することを示す. そして,「アトラ クション巡回順の指定」と「行列上限の設定」が混雑飽 和状態でも待ち時間削減に有効であることと,これら2 つの方式を組み合わせた提案手法はより大きな効果が得 られることを示す.

2. 関 連研

2.1 テーマパーク問題

テーマパーク問題に関するこれまでの様々な研究は,以 下の3種類に分類できる. それぞれ一例を挙げる.

来園者のアトラクション選択 [呉 10, 辺見 02, 兼田 10, 川村 03, 柳田 09]

来園者のアトラクション選択によって、混雑状況が どのように変化するかを評価することを目的とする. 辺見ら [辺見 02] は、混雑情報を一定割合の来園者 に提供した上で,来園者が待ち時間の短いアトラク

ションを選択する戦略をとれば、アトラクションの 行列が分散されて混雑度が小さくなる場合があるこ とを示した.

シミュレーションの精緻化 [藤野 14, 藤野 15, 飯田 11, 佃 14]

シミュレーションに要素を追加してその効果を検証し、より正確に現実世界を再現することを目的とする。藤野ら[藤野 14]は、複数人数からなる集団でテーマパークを巡回するモデルを用いて、集団行動が多様性を減少させて混雑が発生しやすくなる場合があることを示した。

来園者の誘導手法の提案 [朝日 15, 今川 07, 小林 12, 前 田 16, 聶 15, Tsai 12]

来園者を誘導して混雑緩和する手法を提案して、シミュレーション上での効果を評価する研究である. 朝日ら [朝日 15] は、予定していなかったアトラクションへ誘導したり、誘導に失敗したときにスケジュールを逐次修正したりするシステムによって、待ち時間が短縮できることを示した.

本研究は3つのうち「来園者の誘導手法の提案」のカテゴリに属する.このカテゴリで提案された手法の多くは、混雑を回避するために動的スケジューリングによって来園者を誘導するアプローチがとられてきた.しかし既存研究の手法は、どの程度の混雑状態において有効かが定量的に示されていなかった.

本研究では、アトラクションの稼働条件や来園者数の変化に対し、混雑が飽和する条件について明らかにする. さらに、混雑飽和状態においても待ち時間を削減可能な誘導手法を提案する. 我々の提案手法は、動的スケジューリングのように来園者同士のスケジュールを調整したり個別に情報発信したりしないため、複雑なシステムが不要であるという利点がある.

一方、「シミュレーションの精緻化」の視点においては、 実測されたデータと整合させて妥当性を示すことが重要 である. 近年、GPS やインターネットの普及により実測 データが容易に取得できるようになったため、テーマパー クは様々な観点で分析されている [Ahmadi 97, Birenboim 13, Hoon Hyun 16]. たとえば [Birenboim 13] は、来園 者が所持する GPS の軌跡を分析することで、時間帯ごと の来園者の活動の傾向を繁忙期と閑散期で比較している. シミュレーションを構築する上では、これらの研究の知 見を考慮していく必要がある.

2.2 オペレーションズリサーチ分野

前節で説明したテーマパーク問題は、来園者がいつアトラクションを体験するかをスケジューリングする問題ともいえる.これまで主にオペレーションズリサーチの分野で研究されてきたスケジューリング問題の中でも、生産管理の分野で扱われるジョブショップスケジューリング問題は、仕事を機械に効率的に割り振ることで完了時刻

や納期遅れ等を最小化することを目的としたタスクである [鍋島 74]. ジョブショップスケジューリング問題の応用として, 伊藤ら [伊藤 15] は, 人間ドックのスケジューリングをジョブショップスケジューリング問題の変種として扱うことで待ち時間を短縮できることを示した.

また一方でテーマパーク問題は、アトラクションに来園者が到着したときの待ち行列の問題でもある。これまでに待ち行列理論もオペレーションズリサーチの一分野として様々なモデルが提案されており [Cruz 14, Wu 14], 医療分野への応用例 [Lakshmi 13] や避難シミュレーション分野への応用例 [Vermuyten 16] が報告されている。

テーマパーク問題についても、来園者を仕事に対応させアトラクションを機械に対応させると、ジョブショップスケジューリング問題や待ち行列理論と類似した問題設定となる。しかしながら、生産管理や人間ドックでは全工程が完了しないと目的を達成できないのに対して、テーマパークでは巡回したいアトラクションを体験できずに帰宅する来園者がいても許容される。また、テーマパークでは一般的に先着順の行列に並ぶが、生産管理や人間ドックでは先着順でなくても許容される。このような点から問題設定に差分が生じるため、テーマパーク問題に対して既存のアプローチをそのまま利用することは難しい。

3. モ デ ル

3.1 遊園地の設定

アトラクション数を M,来園者数を N とする.開園時刻と閉園時刻を,それぞれ $t_{\rm start}$ と $t_{\rm end}$ とする.営業時間を $\Delta t = t_{\rm end} - t_{\rm start}$ とする.アトラクション m の定員 (capacity) を c_m とする.アトラクション m の体験時間 (service time) を s_m とする.アトラクション m の処理能力 (flow rate) を $f_m = c_m/s_m$ とする.アトラクション m の待ち行列の上限 (limit) を l_m とする.アトラクション m に対する選好値 (preference) を p_m とする.本研究では来園者について選好値は共通とする.

また,具体的な数値については,既に発表されている研究の実験条件のうち,実際のテーマパークのデータを取得している聶ら [聶 15] の東山動植物園遊園地の設定を用いた.遊園地は午前 10 時に開園して午後 5 時に閉園する.シミュレーションの単位時間は 1 分とした ($\Delta t = 420$).アトラクションは 16 個あり,それぞれのスペックは表 1 の通りである.ただし,本研究では時間単位を 1 分としため,文献 [聶 15] で秒単位だった「体験所要時間」は四捨五入して分単位で整数にした.アトラクションの選好値 p_m は,文献 [聶 15] の月間の体験者平均人数に比例させた.

夷 1	タア	トラ	カショ	ンの設定

m	1	2	3	4	5	6	7	8
s_m	2	7	2	2	1	2	3	2
c_m	28	80	24	30	20	38	40	32
p_m	20	19	15	15	13	11	11	10
m	9	10	11	12	13	14	15	16
s_m	2	2	2	3	2	2	2	3
c_m	48	48	14	54	24	32	30	16
p_m	10	9	9	9	8	6	6	5

表2 各記号の定義(その1)

記号	意味
	総アトラクション数
\overline{N}	総来園者数 [人]
c_m	アトラクション m の定員 [人]
s_m	アトラクション m の体験時間 [分]
f_m	アトラクション m の処理能力 [人/分]
$\overline{l_m}$	アトラクション m の待ち行列の人数の上限 [人]
p_m	アトラクション m に対する選好値
$\overline{w_n}$	来園者 n の体験予定リストの個数
\overline{W}	来園者の体験予定リストの個数の平均

3.2 来園者の設定

来園者 n は,体験予定数 w_n 個のアトラクションを含む体験予定リストを保持する.来園者 n は入園前に,選好値 p_m に比例した確率でアトラクション m を選択することを w_n 回繰り返して,体験予定リストを生成する.選択された順に,優先順が高いアトラクションとして扱う.ただし,同じ来園者が同じアトラクションを複数回選択することはない.また, $1 \le w_n \le M$ であり, w_n は平均W のポアソン分布に比例する.ここで表 2 に各記号の意味を示す.

来園者の状態遷移図を図1に示す.以下ではこの図の 番号に沿って来園者の行動ルールを説明する. (1) 来園者 は、開園時刻 t_{start} に N 人全員が入園する. 入園した来 園者が次に向かうアトラクションを選択する際は、体験 予定リストに含まれるアトラクションのうち、退園時間 までに体験可能なアトラクションであり、かつ、待ち行 列の許容値を超えていないアトラクションを選択の候補 とする. (2) 候補の中で、体験予定リスト上で優先順位 が最も高いものを選択してそのアトラクションへ移動す る. (3) どのアトラクションにも並べないときは、「待機」 状態となり,次のステップに再度アトラクション選択を 行う. アトラクション間の移動の所要時間は常に10分と した. 本研究では位置関係が主な議論対象ではないため 移動時間を一定としている. 来園者がアトラクションに 到着したとき、(4) 待ち行列が l_m 以上であれば、行列に 並ばずにアトラクションの選択をやり直す. $(5)l_m$ 以内 であれば、待ち行列に並ぶ. 複数の来園者が同時にアト ラクションに到着した場合には、ランダムな順番で行列 に並ぶ. (6) 待ち行列は先着順で、順番が来たらアトラク ションを体験する. ただし各アトラクションは, 待ち行

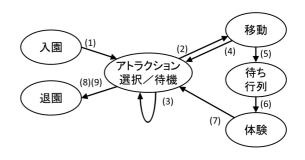


図1 来園者の状態遷移図

列に 1 人以上来園者が並んでいて,かつ,前回の稼働が未完了ではないときに,稼働が始まる。(7) アトラクションの体験が完了すると,体験予定リストから当該アトラクションが削除され,(8) 体験予定リストが空になった場合は,来園者は退園する。体験予定リストがまだ残っている場合は再度アトラクション選択をするが,(9) 閉園時刻 t_{end} になると体験予定リストが残っていても強制的に退園する *1 .

3.3 評 価 指 標

本研究では、来園者の平均滞在時間 S(Sojourn Time) と遊園地全体の稼働率 π で評価する $*^2$. ここで平均滞在時間 S は、来園者 n が入園してから退園するまでの時間 T_n の平均 $\frac{1}{N}\sum_n^N T_n$ であり、短いほど円滑に遊園地を巡回できたことになり来園者にとって好ましいと考えられる。ただし、 $0 \le S \le \Delta t$ である。また、遊園地全体の稼働率 π を、アトラクション m を体験した来園者数 D_m を用いて、 $\pi = \sum_m^M D_m/\Delta t \sum_m^M f_m$ と定義する。稼働率 π が大きいほど効率的な遊園地運営であると言える。ただし、 $0 \le \pi \le 1$ である。平均滞在時間 S をなるべく小さく、稼働率 π をなるべく大きくするために、目的関数 $J = \frac{S}{\Delta t} + \lambda \times (1 - \pi)$ を定義し、これを最小化することを目指す。ただし、 $0 \le J \le (1 + \lambda)$ である。 λ は S と π のどちらを重視するかのバランスをとるパラメータであり、大きいほど π を重視することになる。

また、遊園地の混雑度合を評価するために、アトラクション m の飽和度 ρ_m を、体験予定の来園者数 A_m と一日の処理能力 $\Delta t \cdot f_m$ の比で、 $\rho_m = A_m/(\Delta t \cdot f_m)$ と定義する。 ρ_m が大きいほどアトラクション m が混雑し、 $\rho_m > 1$ で体験予定者全員が体験することは不可能となる。このとき、アトラクション m が飽和状態であると定

^{*1} 本研究では(1)の入園時刻と(9)の強制的な退園時刻を全来 園者で共通としたが、来園者ごとに異なる時刻を設定しても、 同様の傾向の実験結果が得られる.

^{*2} 滞在時間=移動時間+行列待ち時間+アトラクション体験時間+ 待機状態の時間

表3 各記号の定義(その2)

記号	意味
t_{start}	開園時刻 [分]
t_{end}	閉園時刻 [分]
Δt	営業時間[分]
$\overline{T_n}$	来園者 n の滞在時間 [分]
\overline{S}	来園者の平均滞在時間 [分]
A_m	アトラクション m を体験予定の来園者数 [人]
D_m	アトラクション m を体験した来園者数 [人]
π	遊園地全体の稼働率
$ ho_m$	アトラクション m の飽和度
R	飽和状態のアトラクション数

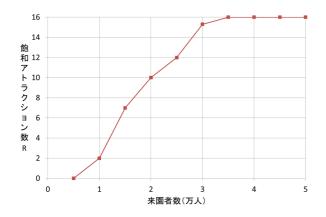


図2 来園者数の混雑度への影響

義する. また、飽和状態のアトラクションの個数 R がアトラクション数 M と等しい状態、すなわち全アトラクションが飽和状態のときを遊園地の混雑飽和状態と定義する. 表 3 に各記号の意味を示す.

3.4 混雑飽和状態の設定

本節では、体験予定数 w_m の平均 W を 6 と固定し、来園者数 N を変化させて、混雑飽和状態が発生する設定値を求めた。飽和アトラクションの個数 R を図 2 に示す。3.5 万人においては 16 個全てのアトラクションの飽和度が 1 を超えており混雑飽和状態である。そこで、後述の実験 1 では混雑飽和状態の例として N=3.5 万人、M=16, W=6 の条件を用いる。

4. テーマパークのパラドックス

そもそも混雑とは、時間的にも空間的にも人が密集している状態、と表現することができる。したがって、混雑を緩和させたいときには、時間的にも空間的にも人を分散させることが一般的に有効と考えられる。これまでのテーマパーク問題の研究では、この考え方で混雑緩和の手法が検討されてきた。たとえば、「待ち行列の長さに応じて、客の到着を奨励したり、情報を流して到着しな

いように呼びかける」 [高橋 01] ような混雑対策が有効と考えられてきた.この考え方に基づけば、偏っている行列の待ち時間を平準化することで、平均的な待ち時間は短くなるように思われる.しかし、実際には直感に反して、行列を平準化することで待ち時間が長くなる場合があることを、以下の予備実験によって説明する.

4.1 予 備 実 験

予備実験ではアトラクション数 M,来園者数 N の遊園地において,単純化のために全アトラクションの処理能力を 1[L/H],アトラクション間の移動にかかる時間を 0[H] とし,計算を簡単にするために $N \mod M = 0$ とする.また,営業時間 $\Delta t = N$ とし,来園者は全アトラクションを体験した後退園する *3.この設定は混雑飽和状態であり稼働率 $\pi = 1$ にすることができる.そこで, $\pi = 1$ の条件下で,以下の 2 パターンを比較する.

パターン1(空間的に平準化されている)

- \bullet 初期配置:全アトラクションに N/M 人ずつ
- 全アトラクションの待ち時間が常に等しい

パターン 2 (空間的に平準化されていない)

- 初期配置: あるアトラクションに N-M+1 人, 残りの M-1 個のアトラクションに 1 人ずつ
- M − 1 個のアトラクションの待ち時間が常に 0

パターン1で2つ目の条件を満たすためには、毎時刻でアトラクションの体験を完了した来園者 M 人が、全員異なるアトラクションを選択する必要がある。パターン2で2つ目の条件と $\pi=1$ を同時に満たすためには、全来園者が同一の巡回置換に従った順序でアトラクションを体験する必要がある。任意の M,N について、上記を満たすようなアトラクションの体験順序を決めることができる。たとえば、全員の体験順序をアトラクション IDの昇順に揃えると、パターン1、パターン2ともに条件を満たす。このとき、パターン1、パターン2はそれぞれ、 $\pi=1$ の条件下で待ち時間の分散が最小と最大のパターンとなる。

N=6, M=3 で全員の体験順序をアトラクション ID の昇順に揃えたときの来園者の状態の推移を,表 4 と表 5 に示す。アルファベットがアトラクションを体験していることを表し,矢印はアトラクションの待ち行列で待っていることを表している。 平均滞在時間は,パターン 1 では 5.5 分である一方,パターン 2 では 5.0 分となる。この結果を参考に一般の N, M(ただし,N>M)につい

^{*3} すなわち体験予定数 w_m を M に固定 $(\forall m, w_m = M)$ し, 予備実験ではポアソン分布を仮定しない.

表 4	パターン	1(N -	- 6 M	- 3)	の推移

来園者			退園時刻				
n	1	2	3	4	5	6	T_n
1	Α	\rightarrow	В	\rightarrow	С	-	5
2	\rightarrow	A	\rightarrow	В	\rightarrow	С	6
3	В	\rightarrow	С	\rightarrow	Α	-	5
4	\rightarrow	В	\rightarrow	С	\rightarrow	A	6
5	С	\rightarrow	Α	\rightarrow	В	-	5
6	\rightarrow	С	\rightarrow	Α	\rightarrow	В	6

表 5 パターン 2(N=6, M=3) の推移

来園者			退園時刻				
n	1	2	3	4	5	6	T_n
1	Α	В	С	-	-	-	3
2	\rightarrow	Α	В	С	-	-	4
3	\rightarrow	\rightarrow	Α	В	С	-	5
4	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	A	В	С	6
5	С	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	A	В	6
6	В	С	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	A	6

て計算すると、パターン1の平均滞在時間*4は、

$$\left(\frac{N}{M} - 1\right) \times \frac{1}{2} + \left(\frac{N}{M} - 1\right)(M - 1) + M$$

$$= \left(1 - \frac{1}{2M}\right)N + \frac{1}{2} \tag{1}$$

であり、パターン2の平均滞在時間 *5 は、

$$\{(N - (M - 1) - 1) \times \frac{1}{2} \times (N - (M - 1)) + (N - (M - 1) - 1) \times (M - 1) + M \times N\} \frac{1}{N}$$

$$= \frac{N}{2} + \frac{M - M^2}{2N} + M - \frac{1}{2}$$
(2)

である $*^6$. したがって、パターン 1 とパターン 2 との差分は、

$$(1) - (2) = \frac{(M-1)(N-M)^2}{2MN} > 0$$
 (3)

となり、常にパターン 1 のほうが平均滞在時間が長い。また式 (3) から、M が一定であれば、N が増加するにつれてパターン 1 とパターン 2 の差分は大きくなる。

一般的には空間的に平準化することで混雑を緩和して, 平均滞在時間も短縮できるように思われる.ところが以 上の予備実験で示した通り、稼働率 $\pi=1$ の条件下では、行列の待ち時間が平準化されたパターン 1 のほうが、平準化されていないパターン 2 よりも平均滞在時間が長い、この直感に反する現象を我々は「テーマパークのパラドックス」と名付けた.

4.2 予備実験の考察

なぜ前節のような「テーマパークのパラドックス」現象は生じるのだろうか.一つ目の理由として、パターン1,2ともに稼働率が1であることが挙げられる.稼働率が1未満のアトラクションがあれば、別の待ち行列に並ぼうとする来園者を誘導することで空席を埋めて稼働率を上昇させることができる.そして、稼働率を上げて来園者が体験数を増やせれば早期に退園できるので、平均滞在時間は短縮できる.しかし稼働率が1の状態では、空席が存在しないので稼働率を上昇させることができず、平均滞在時間は短縮できない.

二つ目の理由として、パターン2では行列が短いアトラクションがあるため、来園者が連続してアトラクションを体験できることが挙げられる。たとえば表5の来園者1は、アトラクションA,B,Cを待ち時間なしで続けて体験できるので、早期(時刻3)に退園する。そして早期に退園する来園者が発生すると、行列に並ぶ人数の総和が早期に減少する。そのため、残された来園者の待ち時間も短くなるので、平均滞在時間が短縮される。

現実世界の来園者は一般的に、待ち時間がなるべく短いアトラクションを選択する傾向があると思われる. しかし全員がその行動をとると、この「テーマーパークのパラドックス」のために平均滞在時間が最適解よりも長くなる. すなわちこのパラドックスは、個人最適が全体最適につながらない「合成の誤謬」の一例ともいえる.

予備実験の条件ではパターン 2 のように誘導すれば最適化できるが、3 章で示した一般的なモデルではどのように誘導すれば平均滞在時間を短縮できるのだろうか.一般的なモデルでは稼働率 $\pi=1$ という条件は必ずしも満たされないため、予備実験のように単純な分析はできない.また一般的な条件ではアトラクションも来園者もそれぞれ特徴が異なるため、各特徴を考慮して解析的に最適化することは実質的に不可能である.そこで、以降の章では、予備実験をふまえて提案手法を提示した上で、マルチエージェントシミュレーションを用いて提案手法の効果を検証する.

5. 提 案 手 法

予備実験から、稼働率が1に近くなる混雑飽和状態においては、空間的に混雑を平準化しても平均滞在時間が短縮できないことがわかった。しかし我々は、パターン2のような状態に近づけることで、混雑飽和状態でも平均滞在時間を短縮できると考え、2種類の手法を考案した。

^{*4} パターン 1 においては、時刻 0 で各アトラクションに N/M の来園者が並ぶ. 1 個目のアトラクションでは、来園者ごとに待ち時間が異なり、平均的に (N/M-1)/2 の待ち時間を要する(第 1 項). 以降に並ぶ (M-1) 個のアトラクションは N/M-1 の待ち時間を要する(第 2 項). これに体験時間の M を加える(第 3 項).

^{*5} パターン 2 においては、時刻 0 でアトラクション A に並んだ N-(M-1) 人は来園者ごとに待ち時間が異なり、アトラクション A で平均的に (N-(M-1)-1)/2 の待ち時間を要する(第 1 項).以降に並ぶ (M-1) 個のアトラクションは待ち時間 0 となる.時刻 0 時でアトラクション A 以外に並ぶ M-1 人の来園者は、全員アトラクション A で N-(M-1)-1 の 待ち時間を要し、その他のアトラクションでは待ち時間 0 となる(第 2 項).これに体験時間の M を人数分加えて(第 3 項),来園者数 N で割る.

^{*6} パターン 2 は、任意の N, M について、最小の平均滞在時間となるパターンの 1 つである.

1つ目の手法(アトラクション巡回順の指定)では,事前にアトラクションに順番を割り当て,来園者は体験予定リストのアトラクションをその順番に体験する.アトラクション巡回順はM!通り考えられるが,以下の候補に絞る.ただし,手法名のうちFLW,PRF,SAT はそれぞれ処理能力 (flow rate, f_m),選好値 (preference, p_m),飽和度 (saturation, ρ_m) を表している.また,dsc は降順 (descending),asc は昇順 (ascending) を表している.

FLW-dsc: 処理能力が大きい順 FLW-asc: 処理能力が小さい順 PRF-dsc: 選好値が大きい順 PRF-asc: 選好値が小さい順 SAT-dsc: 飽和度が大きい順 SAT-asc: 飽和度が小さい順

2つ目の手法(行列上限の設定)は、これまで暗黙的に ∞ に設定されていた待ち行列の上限 l_m を、有限の値に設定することに相当する.これにより、行列を短い状態に維持することが期待できる.単純化のため、全アトラクションの行列の上限 l_m を同一の値 $L[\Lambda]$ とする.L の候補としては、[10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000, 4000, 6000] に絞った.ただし,L がアトラクションの定員 c_m より小さくなると,稼働率 π_m が悪化することが自明であるため, $l_m = \max(L, c_m)$ とした.以降では,この手法を $\mathbf{Olim}(L)$ と呼ぶ.

2つの手法は単独でも実行可能であるが、同時に実行することも可能である。そこで、実験1で最適な「アトラクション巡回順」と「行列上限」の組み合わせを求めて提案手法とする。

6. 実験 結果

本研究のシミュレーションには、NTT データ数理システムの S^4 Simulation System を使用した。各実験では各 10 回の試行を行い、評価には S と π の平均値を用いた $*^7$. また、目的関数のパラメータは $\lambda = 5$ に固定した $*^8$.

6.1 実験1:最適な巡回順と行列上限の探索

実験 1 では N=3.5 万人, M=16, W=6 とした. 巡回順と行列上限の組み合わせの目的関数は,PRF-asc-Qlim(400) が最小となったため,これを提案手法とする. このときの評価指標を図 3 に示す.グラフの右下ほど望ましい結果である.どの巡回順についても,行列上限を大きくするにつれて稼働率は上昇するが,大きくしすぎると平均滞在時間が増加する,という傾向が見られた.稼働率がほぼ最大のうち,平均滞在時間が低い組み合わせが提案手法として選択されていた.

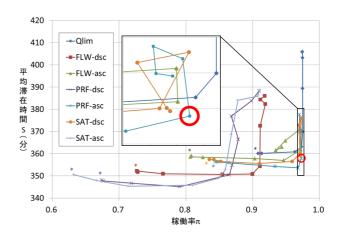


図3 実験 1:最適な巡回順と行列上限の探索 $(N=3.5\ 万人)$. 中央の四角内は右下の四角内の拡大図. 赤丸は選択された提案手法. $L=[10,20,40,100,200,400,1000,2000,4000,\infty]$ のみをプロットし、この順に線で接続した. *は系列の先頭. 比較対象として $Q\lim(L)$ もプロットした.

6.2 実験2:提案手法の評価

実験 2 では,M=16,W=6 の下で N が変化したときの提案手法の性能を評価する.比較対象として,来園者が当初の体験予定リストの順番で巡回した場合(以降,Greedy)と,最短待ち時間で体験できるアトラクションを選択した場合(以降,minWait)と,PRF-ascと,Qlim(400)を選んだ.その結果,混雑飽和状態付近($N \geq 2$ 万人)では,提案手法の目的関数の値が最も小さくなった(図 4).以降ではこの差が生じる原因を,平均滞在時間と稼働率に分解して分析する.

実験 2 の平均滞在時間を図 5 に示す。来園者数が少ない領域では \min Wait が最も短い。しかし,1 万人 $\le N < 2$ 万人では \max PRF-asc が最短の手法となる。そして,N > 2 万人では提案手法 (PRF-asc-Qlim(400)) の平均滞在時間が最も短い。また,遊園地が混雑飽和状態となっている 3 万人 $\le N$ では,提案手法は $\le N$ では,是案手法は $\le N$ では, $\ge N$ の領域では, $\ge N$ の領域では, $\ge N$ PRF-asc $\ge N$ \ge

実験 2 の混雑飽和状態付近の稼働率を図 6 に示す.来園者数が少ない(N < 3 万人)ときは \min Wait がわずかな差で最大となっているが,混雑飽和状態($N \geq 3.5$ 万人)では各手法間の差はほとんどない.これは,アトラクションが飽和状態になると行列がほとんど途切れなくなり,処理能力と等しい数の来園者がアトラクションを体験できるからである.

以上の結果から、PRF-asc と Qlim(400) がともに混雑 飽和状態で平均滞在時間の短縮に有効であり、また2つ

^{*7} 実験 1, 2 を通じて S と π の標準偏差は平均値の 2% 以内だったため、記載は省略した。

^{*8} $\lambda = 0$ として稼働率を無視すれば平均滞在時間をさらに短縮することも可能であるが、今回は稼働率をある程度重視した。

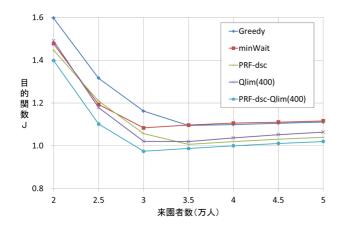


図4 実験2:目的関数の評価

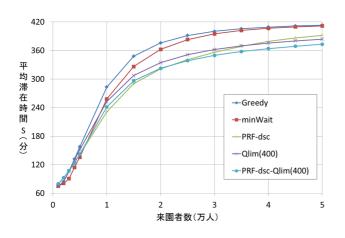


図5 実験2:平均滯在時間の評価

を同時に実行する提案手法 PRF-asc-Qlim(400) は,より大きな効果が得られることが示された.

7. 考 察

7.1 平均滞在時間が短縮されるメカニズム

実験 $2 \circ N > 1$ 万人の領域では,待ち時間が平準化された \min Wait よりも平準化されていない PRF-dsc のほうが平均滞在時間が短いことから,テーマパークのパラドックスが発生していると言える.しかし,平均滞在時間が短い $Q\lim(400)$ と PRF-dsc- $Q\lim(400)$ も行列上限によって待ち時間がほぼ平準化されていることから,待ち時間に偏りがあることが平均滞在時間短縮の必要条件ではないことがわかる.むしろ「待ち時間が短い行列」が存在することが重要である. $Q\lim(400)$ と PRF-dsc- $Q\lim(400)$ は直接的に行列の待ち時間を短くするし,PRF-dsc も行列の長さを偏らせることで一部のアトラクションの行列が短くなる.そして他のアトラクションを体験して残り

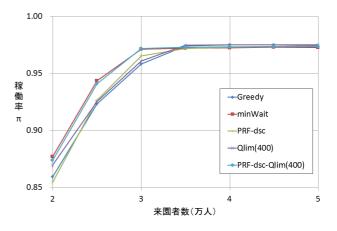


図6 実験2:稼働率の評価

の体験予定リストが少なくなった来園者が短い待ち時間の行列に並べば、早期に次のアトラクションを体験できて体験予定リストの完了に近づくので、滞在時間が短くなる。来園者ごとに体験予定リストの数はまちまちだが、他のアトラクションを体験した直後の人のほうが、行列に長時間並んでいた人と比較して残りの数が少ない確率が高いだろう。そのため、行列を待ち時間が短い状態に維持することが平均滞在時間の短縮に有効であると言える。

7.2 提案手法の適用条件

今回の設定では PRF-dsc-Qlim(400) が提案手法となったが、アトラクションや来園者の設定値が異なる場合には、各設定ごとに巡回順と行列上限の最適な組み合わせを探索する必要がある。特に、今回は各アトラクションに移動する時間が全て 10 分という設定を用いたが、移動時間がアトラクション間ごとに異なる条件では、移動時間を小さくする巡回順を候補に含める必要がある。

また本研究では、来園者は事前に行きたいアトラクションが決まっていて、体験予定リストのアトラクションを全て体験し終えると退園するモデルを用いた。しかし、たとえば全来園者が閉園時間までアトラクションを繰り返し体験し続けるような行動をとる場合には、どのように来園者を誘導しても平均滞在時間は変わらない($S=\Delta t$)、そのため、提案手法が有効であるためには、体験予定のアトラクションを全て体験し終えると退園する、という条件が必要である。

8. ま と め

本研究では、以下の二点について検討した. 1 つ目は、 混雑飽和状態で稼働率が大きい場合には、混雑を空間的 に平準化しても待ち時間が短縮できない、という「テー マパークのパラドックス」を示した. 2 つ目は、混雑飽 和状態でも待ち時間を短縮できる手法を示した. 本研究の提案手法は特定の条件下で限定された候補から探索した最適解であり、混雑状況に合わせて常に最適な巡回スケジュールを求めることは今後の課題である. しかし本研究の知見は、これまでのテーマパーク問題のシミュレーション研究では言及されておらず、混雑飽和状態の遊園地等を検討対象とする際に有益だと考える.

今後は、7·2節で述べたモデルの前提条件が成立するかどうかを、アンケートや実証実験によって検証することも重要な課題である。スマートフォンが普及した現在においては、個人の体験履歴等も取得可能である。ビッグデータの時代に対応して、個人の属性と嗜好の関係も把握できるモデルに発展させていきたい。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Ahmadi 97] Ahmadi, R. H.: Managing capacity and flow at theme parks, *Operations Research*, Vol. 45, No. 1, pp. 1–13 (1997)
- [朝日 15] 朝日大地, 井上知洋, 筒井章博:誘導スケジューリング による集団状態最適化手法のシミュレーション評価, 研究報告知 能システム (ICS), Vol. 2015, No. 6, pp. 1–8 (2015)
- [Birenboim 13] Birenboim, A., Anton-Clavé, S., Russo, A. P., and Shoval, N.: Temporal activity patterns of theme park visitors, *Tourism Geographies*, Vol. 15, No. 4, pp. 601–619 (2013)
- [Cruz 14] Cruz, F. R. and Van Woensel, T.: Finite queueing modeling and optimization: A selected review, *Journal of Applied Mathemat*ics, Vol. 2014, (2014)
- [藤野 14] 藤野直輝, 小島一晃, 村松慶一, 松居辰則: O-011 集団 意思決定を考慮した歩行者の挙動に関するシミュレーションモデルの構築: テーマパークにおいて混雑情報を提供した際のマルチエージェントシミュレーション (O 分野: 情報システム, 一般論文), 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 13, No. 4, pp. 317–324 (2014)
- [藤野 15] 藤野直輝, 小島一晃, 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: テーマパーク来場者に対する満足度向上に向けた混雑情報提供 法の検討, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 29, pp. 1-4 (2015)
- [呉 10] 呉志賢, 本多克宏, 市橋秀友: 代替案選択モデルを伴う仮想テーマパークシミュレータとユーザ嗜好のばらつきの影響, 日本知能情報ファジィ学会ファジィシステムシンポジウム講演論文集, Vol. 26, pp. 30–30 (2010)
- [辺見 02] 辺見和晃: コンピュータの中の人工社会: **来場者に優しいテーマパーク-混雑緩和問題と情報の共有",共立出版(2002)
- [Hoon Hyun 16] Hoon Hyun, K., Min, A., Kim, S.-J., and Lee, J.-H.: Investigating cultural uniqueness in theme parks through finding relationships between visual integration of visitor traffics and capacity of service facilities, *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 14, No. 3, pp. 247–254 (2016)
- [飯田 11] 飯田真理子, 高橋真吾: テーマパークにおける混雑緩和 政策の意思決定支援のためのミクロダイナミクス分析, 経営情報 学会 全国研究発表大会要旨集, Vol. 2011, pp. 50-50 (2011)
- [今川 07] 今川孝博, 川村秀憲, 車谷浩一, 大内東: テーマパーク問題における予定情報共有システムの提案と有効性の検証 (セッション 1: 社会システムと強調, 社会システムと知能), 電子情報通信学会技術研究報告. AI, 人工知能と知識処理, Vol. 106, No. 585, pp. 1-6 (2007)
- [伊藤 15] 伊藤真理,鈴木敦夫,河原芳昭:人間ドックにおける最適スケジュール作成について,日本経営工学会論文誌, Vol. 66, No. 1, pp. 49-58 (2015)
- [兼田 10] 兼田敏之, 構造計画研究所創造工学部, 名古屋工業大学 兼田研究室: 13 章遊園地のアトラクションの混雑と効果的なア ナウンス, artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション, pp. 135–147, 構造計画研究所 (2010)
- [川村 03] 川村秀憲, 車谷浩一, 大内東: テーマパーク問題のマルチエージェントによる定式化と調整アルゴリズムに関する検討,電子情報通信学会技術研究報告. AI, 人工知能と知識処理, Vol. 102, No. 613, pp. 25–30 (2003)

- [小林 12] 小林雄也, 長江剛志: 優先パスオークションによるテーマパーク待ち行列損失軽減, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. 95, No. 7, pp. 631–634 (2012)
- [Lakshmi 13] Lakshmi, C. and Iyer, S. A.: Application of queueing theory in health care: A literature review, *Operations Research for Health Care*, Vol. 2, No. 1, pp. 25–39 (2013)
- [前田 16] 前田勝也, 高見一正: テーマパークにおける混雑回避のためのスマートデバイスを利用した巡回経路レコメンド方式, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 15–16 (2016)
- [鍋島 74] 鍋島一朗: スケジューリング理論, 数学ライブラリー 37, 森北出版 (1974)
- [聶 15] 聶耳, 鈴木麗璽, 有田隆也: 東山動植物園遊園地への巡回ガイド端末の導入による混雑緩和のシミュレーション評価, 情報処理学会第 77 回全国大会, Vol. 4, p. 09 (2015)
- [高橋 01] 高橋幸雄, 森村英典: 混雑と待ち, 朝倉書店 (2001)
- [Tsai 12] Tsai, C.-Y. and Chung, S.-H.: A personalized route recommendation service for theme parks using RFID information and tourist behavior, *Decision Support Systems*, Vol. 52, No. 2, pp. 514–527 (2012)
- [佃 14] 佃勇平, 須貝康雄:優先搭乗券の発券枚数調整によるテーマパークの混雑緩和, 情報処理学会第 76 回全国大会, Vol. 2, p. 8 (2014)
- [Vermuyten 16] Vermuyten, H., Beliën, J., De Boeck, L., Reniers, G., and Wauters, T.: A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems, *Safety Science*, Vol. 87, pp. 167– 178 (2016)
- [Wu 14] Wu, K.: Classification of queueing models for a workstation with interruptions: A review, *International Journal of Production Re*search, Vol. 52, No. 3, pp. 902–917 (2014)
- [柳田 09] 柳田靖, 鈴木恵二:複雑ネットワークモデルにおける テーマパーク問題に関する考察—ネットワークモデルの比較法, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 437–446 (2009)

〔担当委員:鳥海 不二夫〕

2016年12月1日 受理

-著者紹介



清水 仁

2001 年東京大学工学部化学生命学科卒業. 2004 年奈良先端大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了. 同年, 西日本電信電話株式会社入社. 2006 年より 3 年間 NTT ネットワークサービスシステム研究所, 2014 年より NTT コミュニケーション科学基礎研究所にて, 機械学習および人流分析の研究開発に従事. 電子情報通信学会会員.



松林 達史

2000 年京都大学理工学部物理学科卒業. 2002 年 10 月より 2 年半,理化学研究所非常勤研究員. 2005 年東京工業大学大学院理工学研究科地球感星科学専攻博士課程修了.同年,日本電信電話株式会社入社.以来,NTT コミュニケーション科学基礎研究所,NTT サービスエボリューション研究所にて,グラフ可視化および機械学習の研究開発に従事.博士(理学).情報処理学会会員.



納谷 太

1992 年慶応義塾大学理工学部電気工学科卒業. 1994 年同大学大学院修士課程修了. 博士 (工学). 1994 年日本電信電話株式会社入社. 2003 年より 6 年間 ATR メディア情報科学研究所, 同知識科学研究所出向. コミュニケーションロボット, バターン認識, センサネットワーク, データマイニング等の研究に従事. 現在, NTT コミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員. 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, IEEE 各会員.