遊園地シミュレーションにおける許容限界モデル

Tolerance Limit Model in Theme Park Simulation

清水	仁*1
Hitoshi	Shimizu

*1 松林 達史 *2 .izu Tatsushi Matsubayashi 藤野 昭典 ^{*1} 澤田 宏 ^{*1} Akinori Fujino Hiroshi Sawada

*¹NTT コミュニケーション科学基礎研究所 NTT Communication Science Laboratories *²NTT サービスエボリューション研究所 NTT Service Evolution Laboratories

The theme park problem has been studied for reducing the congestion of theme parks. We previously proposed a multinomial linear model as attraction selection model of the guests in the theme park simulation to reproduce the tendency of the waiting time in the real world. In this paper, we propose a tolerance limit model to express the difference between tolerance limits of guests. We expect introducing the tolerance limit model into our previous selection model improves the reality of its simulation results. We confirmed experimentally that the tolerance limit model was effective in reducing the excessive fluctuation of attraction waiting time observed in the simulation with our previous model. Our experimental results indicated that the effect of attraction throughput on attraction waiting time was small when the difference between the preference of guests was small.

1. はじめに

天気の良い休日の遊園地は多くの家族連れやカップルで賑 わい,アトラクションによっては2,3時間待ちすることが常 態化している.行列で待つ時間は苦痛を伴うことも多く,近年 の「ゼロにしたい待ち時間ランキング」**iにおいても,テーマ パークのアトラクションの待ち時間が上位にランクインしてい る.テーマパーク問題とは,このような要望に応えるために, 遊園地のシミュレーションを用いて混雑緩和方法を探求する問 題である [辺見 02, 川村 03].

テーマパーク問題の中で,現実世界の待ち時間の推移の傾 向を再現するという課題に対して,我々はこれまでに多項線形 モデルを用いた来園者のアトラクション選択モデルを提案した [清水 17],このモデルでは,来園者が取りうる行動に「どのア トラクションも選択せずに待機する」を加えることで,待ち時 間が来園者に比例して増大することなく,なだらかなピークを 持って推移する.また,一般的によく使われる多項ロジットモ デル(例えば[Ohori 13])と比較して,待ち時間の許容限界を パラメータに持つためモデルの解釈が容易であるという利点 がある.しかし[清水 17]のアトラクション選択モデルでは来 園者間の選好の個人差を考慮しておらず,全来園者共通の選好 にもとづいてアトラクションを選択するモデルになっていた. 現実の遊園地では全来園者の選好が同一とは限らないため,シ ミュレーションモデルとしては不十分であった.

そこで本稿では, [清水 17] のアトラクション選択モデルに 選好の個人差を導入するため, 来園者の待ち時間の許容限界の バラつきを表現できる許容限界モデルを提案する.そして提案 モデルを用いることで, 遊園地シミュレーションの待ち時間に おいて, 不自然に大きな変動が抑制されることを示す.また, 来園者の選好のバラつきの大きさがシミュレーション結果に与 える影響を確認する.

2. 多項線形モデル

[清水 17] のアトラクション選択モデルでは, 来園者 n が時 刻 t でのアトラクション m の魅力 $A_{m,n,t}$ と, そのアトラク ション m を選択する確率 $\theta_{m,n,t}$ を,

$$\mathcal{A}_{m,n,t} = \max(0, \alpha_{m,n} - W_{m,t}) \tag{1}$$

$$\theta_{m,n,t} = \frac{\mathcal{A}_{m,n,t}}{\sum_{m=1}^{M} \mathcal{A}_{m,n,t}}$$
(2)

であると仮定する. ただし, $W_{m,t}$ はアトラクション m の時刻 tにおける待ち時間を表し, $\alpha_{m,n}$ はアトラクション m に対す る来園者 n の待ち時間許容限界を表す. 簡略化のため, 以降で は $\alpha_{m,n}$ を許容限界と呼ぶ. また, $\sum_{m=1}^{M} A_{m,n,t} = 0$ のとき, 来園者はどのアトラクションも選択せず待機する. [清水 17] では,待ち時間の許容限界 $\alpha_{m,n}$ を来園者 n ごとに設定せず 共通の α_m としていた. このため, このモデルを使ったシミュ レーションでは来園者の個人差が考慮されていなかった.

3. 提案モデル

来園者の許容限界の個人差を表現するモデルとして,本研 究では以下の許容限界モデルを提案する.

$$\alpha_{m,n} = \phi_n \times \hat{\psi}_{m,n} \tag{3}$$

$$\hat{\psi}_{m,n} = \frac{\psi_{m,n}}{\max_m \psi_{m,n}} \tag{4}$$

ここで、 ϕ_n は来園者 n の待ち時間許容限界の最大値を表し、 本稿では忍耐力と呼ぶ.また、 $\psi_{m,n}$ は来園者 n のアトラク ション m に対する相対的な選好を表し、アトラクション選好 と呼ぶ.そして、忍耐力 ϕ_n とアトラクション選好を最大値が 1 になるように正規化した $\hat{\psi}_{m,n}$ の積で、許容限界 $\alpha_{m,n}$ を見 積もることができると仮定する.

3.1 忍耐力 ϕ_n の分布

連絡先:清水 仁,NTT コミュニケーション科学基礎研究所, 〒 619-0237 京都府相楽郡精華町光台 2-4,0774-93-5112, hitoshi.shimizu.kg@hco.ntt.co.jp

 ^{*}i シチズン時計調べ:ビジネスパーソンの「待ち時間」意識. https: //www.citizen.co.jp/research/time/. 2019 年 2 月 4 日アク セス

記号 $\alpha_{m,n}$

表 1: 待ち時間の許容限界に関するアンケート(%)

調査	待ち時間をどの程度覚悟しますか?(分)*i				推定			
年	15	30	60	90	120	> 120	μ	σ
2009	15.5	34.0	37.8	7.3	4.3	1.3	3.38	0.65
2013	18.3	24.5	33.5	9.0	8.5	6.3	3.51	0.87
2018	21.0	29.3	27.0	10.3	7.3	5.3	3.41	0.88



図 1: 待ち時間許容限界の分布. 点線は各年のアンケート結果, 実線はアンケート結果を近似した対数正規分布を示す. 横軸は 時間 [分] の対数軸, 縦軸は確率密度を示す.

来園者の忍耐力 ϕ_n のモデルを検討するにあたって、シチズ ン時計が行ったアンケート調査 *^{*i*}を参考にした、「行列して順 番を待つとき、待ち時間をどの程度覚悟しますか?」という問 いに対する回答結果を表1に示す.このアンケート結果の分 布を、対数軸のヒストグラムで図1(点線)に示す.これを対 数正規分布で近似すると、最尤法で得られた分布の確率密度 関数は図1(実線)となる.両者を比較するとよく適合してい る.各アンケートから求めたパラメータ $\mu \ge \sigma$ を表1の右端 に示す.

アンケートで回答者が複数のアトラクションに対して異な る許容限界を持っている場合には,最大の値を回答することが 期待される.そこで,来園者 n の待ち時間許容限界の最大値 である忍耐力 ϕ_n は,以下のように対数正規分布に従うと仮定 する.

$$\log(\phi_n) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2).$$
 (5)

3.2 アトラクション選好 ψ_n の分布

来園者 n のアトラクション m に対する相対的な選好 $\psi_{m,n}$ の モデルには、一般的なディリクレ分布 [Goodhardt 84] を用い る.すなわち、アトラクション選好 $\psi_n = (\psi_{1,n}, \dots, \psi_{M,n})$ が、 パラメータ $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_M)$ を持つディリクレ分布 Dir(β) に従うと仮定する.

$$\psi_n \sim \operatorname{Dir}(\boldsymbol{\beta}).$$
 (6)

このとき $\psi_{m,n} \ge 0$ かつ $\sum_{m} \psi_{m,n} = 1$ であり,期待値は $E[\psi_{m,n}] = \frac{\beta_m}{\sum_{m} \beta_m}$ である.つまり β_m が大きいアトラクショ ン m ほど人気が高い.

まとめると提案モデルは、対数正規分布に従う忍耐力 ϕ_n と、 ディリクレ分布から得られるアトラクション選好 $\psi_{m,n}$ を最大 値が1になるように正規化した $\hat{\psi}_{m,n}$ との積で、来園者 n の

式 2. 百 ll 马 9 元 我
意味
フレニカン シュー (の しの) に対ナフ
アトラクンヨン $m \in \{0, \cdots, M\}$ に刈りる
来園者 $n \in \{1, \dots, N\}$ の待ち時間許容限界.
来園者 n に対するアトラクション m の

表 9. 久記号の定義

$\mathcal{A}_{m,n,t}$	
	時刻 $t \in \{1, \cdots, T\}$ での魅力.
$W_{m,t}$	時刻 t でのアトラクション m の待ち時間 [分].
$\theta_{m,n,t}$	来園者 n が時刻 t でアトラクション m を
	選択する確率.
ϕ_n	来園者 n の忍耐力.
μ, σ	ϕ_n を生成する対数正規分布のパラメータ.
$oldsymbol{\psi}_n$	来園者 n のアトラクション選好.
	M 次元ベクトル.
β	ψ_n を生成するディリクレ分布のパラメータ.
	M 次元ベクトル

待ち時間許容限界 $\alpha_{m,n}$ が決まる.表 2 に各記号の定義をまとめた.

3.3 パラメータ推定

数値回答型のアンケートなどで $\{\{\alpha_{m,n}\}_{m=1}^{M}\}_{n=1}^{N}$ の具体的な 数値が得られた場合には、以下の操作で $\{\phi_n\}_{n=1}^{N}$ と $\{\psi_n\}_{n=1}^{N}$ に分解できる.

$$\phi_n = \max_m \alpha_{m,n} \tag{7}$$

$$\psi_{m,n} = \frac{\alpha_{m,n}}{\sum_{m} \alpha_{m,n}} \tag{8}$$

式 (7) は式 (3) の両辺の最大値をとることで得られる.式 (8) は式 (3) の両辺に \sum_{m} をつけた $\sum_{m} \alpha_{m,n} = \phi_n \times \sum_{m} \psi_{m,n} / \max_{m} \psi_{m,n}$ で式 (3) の各辺を割って $\sum_{m} \psi_{m,n} = 1$ を使うと得られる. $\{\phi_n\}_{n=1}^{N}$ と $\{\psi_n\}_{n=1}^{N}$ はそれぞれ一般的な対数正規分布とディリクレ分布に従うため,最尤法でパラメータ (μ , σ) と β を推定することができる.

4. シミュレーション実験

[清水 17] と同様のシミュレータを用いて提案モデルの妥当 性を検証する. M 個のアトラクションがある遊園地で,一日 T 分の営業時間に N 人が来園してアトラクションを巡回する 様子をシミュレーションする.

4.1 実験設定

遊園地の設定

アトラクションの設定は, [佃 14] を参考にして表3の値を 用いた.営業時間はT = 780分として,開園からT/2分後に 滞在中の来園者数がピークとなるように,来園者ごとに入園時 刻と退園時刻を設定した.ただし,来園者ごとに平均3のポ アソン分布に従って体験を予定するアトラクションの個数を設 定し,その数のアトラクションを体験した来園者は退園する. 待ち時間 $W_{m,t}$ は,アトラクションの待ち行列の人数を処理能 力 f_m で割った時間を用いた.来園者はこの待ち時間を任意の 時点で取得可能とする.また,選択できるアトラクションがな い場合の待機時間は,30分未満のランダムな値とした. 来園者の設定

提案モデルについて、対数正規分布のパラメータは、表1の うち 2018 年の $\mu = 3.41$, $\sigma = 0.88$ を用いた. ディリクレ分 布のパラメータは、 $\beta = c \times (5, 10, 15, 20, 30)$ として、cの値 を変化させた.

表 3:	アトラク	ションの設定	

	体験時間	定員	処理能力		
m	$s_m[分]$	$c_m[\mathcal{A}]$	$f_m[人/分]$		
1	5	12	2.4		
2	10	16	1.6		
3	3	18	6.0		
4	2	3	1.5		
5	10	32	3.2		

一方,提案モデルの個人のバラつきをなくして平均化した ものを既存モデル([清水 17] のモデルに相当)と呼び, $\alpha_m = \exp(\mu) \frac{\beta_m}{\max_m \beta_m}$ とした.これは提案モデルにおいて $\log(\phi_n) = \mu$, $\psi_{m,n} = \frac{\beta_m}{\sum_m \beta_m}$ に固定したことに相当する.

4.2 実験結果

最初に,既存モデルで来園者数を変化させて,待ち時間の推移を比較した結果を図2に示す.N = 2500ではピークが平坦な待ち時間の推移が得られる.しかしN = 5000では,待ち時間が不自然に振動する様子が観察された.これは,アトラクションが来園者共通の待ち時間許容限界を下回った時点で,待機状態だった大勢の来園者が殺到するために引き起こされる挙動である.N = 7500では,さらに振動の振幅が大きくなる.

次に,提案モデルでc = 1.0に固定して,来園者数を変化さ せて待ち時間の推移を比較した結果を図3に示す. N = 2500では既存モデルと同様の結果が得られる. 一方N = 5000で は,待ち時間の振動が抑制された. これは来園者間で許容限界 の値が異なるためである.また各アトラクションの待ち時間の ピークは,来園者数がN = 2500からN = 7500まで増加す るにつれて,次第に大きな値になった.

図4に、来園者数をN = 5000に固定して、提案モデルで cの値を変化させたときの結果を示す、c = 0.01(上図)では、 処理能力の小さいアトラクション 2 や4 が長い待ち時間とな り、処理能力の大きなアトラクション 1 や 3 は待ち時間が短 かった、一方、c = 10000(下図)では、待ち時間の長さがア トラクションの人気順に一致する時間帯が多くなった、

4.3 考察

N = 2500のとき,既存モデルと提案モデルのどちらも,各 アトラクションの待ち時間は短い周期で振動した.この周期は アトラクション m の体験時間 s_m に対応する.待ち行列の人 数を処理能力で割った値を待ち時間 $W_{m,t}$ としているため,ア トラクションが稼働したステップでは定員の人数だけ待ち行列 が短くなる.一方,来園者は待ち行列が短くなると,許容限界 を超えていないアトラクションの待ち行列に並ぶため,短時間 で待ち行列の人数が元に戻る.

しかし $N = 5000 \ge N = 7500$ の既存モデルでは、特にア トラクション 2 と 4 の待ち時間が、60 分を超える周期と 60 分 を超える振幅で大きく振動した.アトラクションの特徴として は、どちらのアトラクションも処理能力 f_m が小さい.処理能 力 f_m が小さいアトラクションでは、選択する来園者が同数で も待ち時間はより大きく増加する.そのため、待ち時間が来園 者共通の許容限界を下回ったときに来園者が殺到した後、体験 時間の周期では許容限界の待ち時間に戻ることができない状 態になっていると考えられる.このような長周期で振幅の大き い振動が現実世界で発生すれば、30 ~ 60 分程度の周期での 観察によって検出されると考えられる.しかし現実の観測デー タ*ⁱⁱ では観察されないため、モデルが不十分であると考える. 一方、 $N = 5000 \ge N = 7500$ の提案モデルでは、許容限 界が来園者ごとに異なるため、同一時刻に同一アトラクション を選択する来園者の数は、既存モデルよりも少ない.そのた め、体験時間の周期の間に均衡する待ち時間に戻るため、滑ら かな変動で推移する. N = 5000 と N = 7500 を比較すると、 N = 7500 のほうが母数が大きいため、同じ待ち時間でも許容 限界を超えていない人数が多くなり、均衡する待ち時間はより 長くなる.以上の提案モデルの待ち時間推移の傾向は、現実の 観測データ*ⁱⁱと比較しても類似していることが確認できる.

図4の結果から、来園者の選好のバラつきの大きさで、シ ミュレーション結果が変化することが確認できた. c = 0.01 (上図)のように $c \rightarrow 0$ の極限に近い場合は、 ψ_n はパラメータ β_{m} のカテゴリカル分布に近くなる. このとき来園者1人 $a_m \beta_m$ につき1種類のアトラクションばかりを選択するため、各アト ラクションの待ち時間は相互に影響が小さく、それぞれの人気 と処理能力の関係によって決まる. それに対して, c = 10000 (下図)のように $c \to \infty$ の極限に近い場合は、全来園者の選 好が共通して, $\psi_{m,n}$ は $\frac{\beta_m}{\sum_m^{\beta_m}}$ に近い値となる.図4の上下 の図を比較すると、来園者の選好のバラつきが大きい場合は、 処理能力の小さいアトラクションに長い待ち時間が生じやす く, 来園者の選好のバラつき小さい場合は, 人気が高いアトラ クションに長い待ち時間が生じやすい、という傾向が観察され た. このように提案モデルは、来園者の集団の特性に対応して パラメータを調整することで、より現実に近いシミュレーショ ンができると考える.

5. まとめと今後の課題

本研究では、遊園地シミュレーションにおいて、来園者の個 人差を考慮した許容限界モデルを提案した.また、アンケート 等からシミュレーションのパラメータを推定する手法を提示し た.実験により、来園者の許容限界に個人差を取り入れること で、遊園地シミュレーションの待ち時間の大きな振動が抑制さ れてより自然になることを示した.そして、来園者の選好の個 人差の大きさがシミュレーション結果に与える影響を示した.

現時点では実データが手元にないためモデルの提案だけに とどまるが、今後は実データによりモデルの妥当性を検証した 上で、実際の遊園地に提案手法を適用して混雑緩和策の検討に 利用したい.また、待ち時間に限らず許容限界は存在する.例 えば物やサービスに対する支払額の許容限界も顧客によってバ ラつきがあると考えられるため、一般的な市場においても許容 限界モデルが適用できるかを検証したい.

謝辞

弊社インターンにて予備実験をしていただいた東京大学の 岡本亘氏に感謝します.

参考文献

[Goodhardt 84] Goodhardt, G. J., Ehrenberg, A. S., and Chatfield, C.: The Dirichlet: A comprehensive model of buying behaviour, *Journal of the Royal Statistical Soci*ety. Series A (General), pp. 621–655 (1984)

 ^{*}ii たとえばhttp://tokyodisneyresort.info/(ディズニーリゾー ト混雑情報)や, https://dwait.net/(東京ディズニーランド& シーの混雑予想と待ち時間)で入手可能(2019年2月8日アクセ ス).



図 2: 既存モデル(来園者の許容限界が共通)の場合,来園者が2500人のとき(左)は待ち時間の推移がほぼ単峰になるが,来園 者が5000人のとき(中)は待ち時間の推移が不自然に振動を繰り返す.来園者が7500人のとき(右)は振動の振幅がさらに大き くなる. 横軸は開園からの時間[分],縦軸は待ち時間[分].



図 3: 提案モデルの場合, 来園者が 2500 人のとき(左)は待ち時間の推移は既存モデルに近いが, 来園者が 5000 人のとき(中) は待ち時間の推移の振動が抑制される. 来園者が 7500 人のとき(右)は各アトラクションのピークが 5000 人のときよりも増加す る. 横軸は開園からの時間 [分],縦軸は待ち時間 [分].



図 4: 提案モデルで, c = 0.01 のとき(上)は処理能力の低い アトラクションに行列が集中する. c = 10000 のとき(下)は 待ち時間の長さが人気順に一致する. 横軸は開園からの時間 [分],縦軸は待ち時間 [分].

- [Ohori 13] Ohori, K., Iida, M., and 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)
- [清水 17] 清水 仁, 松林 達史, 納谷 太, 澤田 宏: 遊園地におけ る待ち時間を考慮したアトラクション選択行動モデルとそ のパラメータ推定手法, データ指向構成マイニングとシミュ レーション研究会 (2017), SIG-DOCMAS-013-04
- [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)
- [価 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)
- [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)