

NINJA 待ち行列モデルのナッシュ均衡

申請中 早稲田大学院 *角野はる香 KADONO Haruka
01307080 早稲田大学 豊泉洋 TOYOIZUMI Hiroshi

1. はじめに

人気のあるテーマパークでは過剰な待ち時間が問題視されている。その改善策の例として、東京ディズニーリゾートで導入されているディズニー・ファストパス (R) (以下、ファストパス) が挙げられる [1]。しかし、来園時間の遅い客ほどファストパスを取得しにくく公平さに欠けるなどの問題点がある。

これらのデメリットの解消が期待される待ち行列システム「NINJA 待ち行列」のモデルが提案されている [2][3][5]。この論文では、分身配置をゲーム理論的に考え、そのナッシュ均衡の分析を行う。

2. NINJA 待ち行列

NINJA 待ち行列とは、テーマパークでアトラクションに並ぶ際にバーチャル上に自分の分身を多数並べさせることができる待ち行列システムである [2]。このシステムでは、同時に複数のアトラクションに並ぶことや、同じアトラクションに同時に並べさせた複数個の分身の待ち時間を合算することが可能である。現在乗車中の客がサービスを終了した後、合算待ち時間が最も長い人が次に乗車できる。

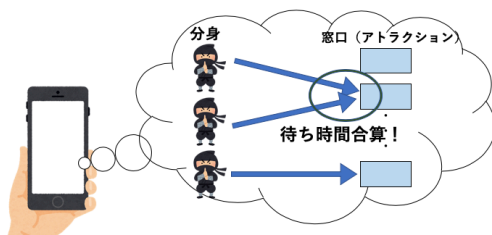


図 1: NINJA 待ち行列のイメージ

3. NINJA 待ち行列モデル

当論文では、2つのアトラクション A, B が設置されたテーマパークにおいて、各顧客が分身を2個ずつ持つ NINJA 待ち行列モデルを取り上げる。このとき取りうる戦略は、合算戦略 A : A に2個ずつ並ばせる戦略、合算戦略 B : B に2個ずつ並ばせる戦略、分身戦略: A と B に1個ずつ並ばせる戦略の3つである。

3.1. 定義

システム内では、客の到着が平均 λ のポアソン分布、各アトラクションのサービス時間が平均 $\frac{1}{\mu}$ の指数分布に従い、 $\frac{\lambda}{\mu} = \rho < 1$ と仮定する。

アトラクション $x \in \{A, B\}$ に分身を $n \in \{1, 2\}$ 個並ばせる客の到着は平均 λ_n^x のポアソン分布、サービス時間は平均 $\frac{1}{\mu}$ の指数分布に従い、 $\frac{\lambda_n^x}{\mu} = \rho_n^x$ とする。また、 $\rho_x = \frac{\lambda_1^x + \lambda_2^x}{\mu}$ と仮定する。合算戦略 A をとる確率を p 、合算戦略 B をとる確率を q 、分身戦略をとる確率を $1 - p - q$ とすると、 $\lambda_1^A = \lambda_1^B = (1 - p - q)\lambda$, $\lambda_2^A = p\lambda$, $\lambda_2^B = q\lambda$ が成立する。

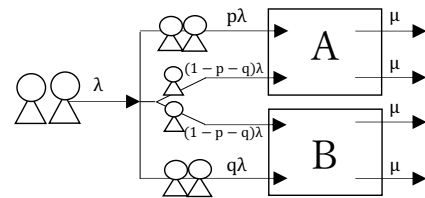


図 2: NINJA 待ち行列モデル

3.2. 期待利得

各顧客が A, B から得られるサービス価値をそれぞれ R_A, R_B とする。本来ならばこの値は人によって異なるが、今回は簡単のため全員同じ値を取るものとし、 $R_A > R_B$ と仮定する。また、待ち時間コストを C とする。

アトラクション x に分身を n 個並ばせる客の期待待ち時間 W_n^x は以下のように表される [4]。

$$W_n^x = \frac{\frac{\rho_x}{\mu(1-\rho_x)} + \sum_{i=1}^{n-1} \rho_i^x W_i^x (\frac{i}{n} - 1)}{1 - \sum_{i=n+1}^2 \rho_i^x (1 - \frac{n}{i})}$$

したがって、各戦略の期待利得は以下の通り。ただし、分身戦略における期待待ち時間は近似値で表記している。

$$\text{合算 } A: R_A - C \frac{\frac{\rho_A}{\mu(1-\rho_A)} (1 - \frac{1}{2}\rho_A)}{1 - \frac{1}{2}\rho_2^A}$$

$$\text{合算 } B: R_B - C \frac{\frac{\rho_B}{\mu(1-\rho_B)}(1 - \frac{1}{2}\rho_B)}{1 - \frac{1}{2}\rho_B^2}$$

$$\text{分身: } R_A + R_B - \frac{C(1 - \rho_2^A)(1 - \rho_2^B)}{\frac{\rho_A(1 - \frac{\rho_2^B}{2})}{\mu(1-\rho_A)} + \frac{\rho_B(1 - \frac{\rho_2^A}{2})}{\mu(1-\rho_B)}} M$$

ただし、

$$M = 1 + \frac{\rho_A(1 - \rho_B)(1 - \frac{\rho_2^B}{2})}{\rho_B(1 - \rho_A)(1 - \frac{\rho_2^A}{2})} + \frac{\rho_B(1 - \rho_A)(1 - \frac{\rho_2^A}{2})}{\rho_A(1 - \rho_B)(1 - \frac{\rho_2^B}{2})}$$

3.3. ナッシュ均衡

各顧客は期待利得が最も高い戦略をとる。各個人の利得は時間コストと他者の戦略によって異なる。このとき、各戦略がどのような条件でナッシュ均衡になるか計算する。ただし、今回は純粋戦略のみ検討している。

- $p = 1, q = 0$ (全員が合算戦略 A をとる場合)

$$R_B \frac{2\mu(1-\rho)(1 - \frac{1}{2}\rho)}{\rho^2} \leq C \leq (R_A - R_B) \frac{\mu(1-\rho)}{\rho}$$

が成立するときナッシュ均衡である。

- $p = 0, q = 1$ (全員が合算戦略 B をとる場合)
 C の値に関わらずナッシュ均衡にならない。
- $p = 0, q = 0$ (全員が分身戦略をとる場合)

$$C \leq R_B \frac{2\mu(1-\rho)}{\rho^2}$$

が成立するときナッシュ均衡である。

4. 時間コストによるナッシュ均衡の違い

以上の結果より、 C の値によってナッシュ均衡が変化することが分かる。本章では、前章での結果をもとに C の値の区間を4つに分け(図3)それぞれ考察を行う。

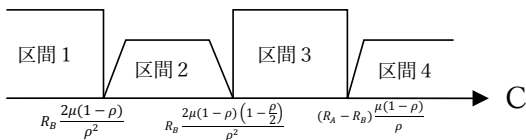


図 3: 時間コスト C の値とナッシュ均衡の関係

まず区間1のとき、ナッシュ均衡は全員が分身戦略をとっている状態 ($p = 0, q = 0$) である。こ

の場合、時間コスト C が小さいため、待ち時間は期待利得の大小にあまり影響を与えない。そのため、どちらかだけに並ぶよりも A と B 両方に並んだ方が期待利得が高くなる。

次に、区間2の場合を考える。時間コストが区間1を超えて大きくなるにつれて、待ち時間が期待利得に与える影響が少しずつ大きくなる。つまり、 A に分身を1個並べたときと2個並べたときの待ち時間コストの差が大きくなる。そのため、 A に2個並べて待ち時間を短くしようとする客が徐々に増えていく。このように、区間2では分身戦略と合算戦略 A の混合戦略がナッシュ均衡であると考えられる。

区間3でのナッシュ均衡は、全員が合算戦略 A をとっている状態 ($p = 1, q = 0$) である。区間2では、 C の値が大きくなるにつれて A に分身を2個並べせる客が増えていたが、さらに値が大きくなり区間3に達すると、全員が A に分身を2個並べせるようになる。

最後に、 C が区間4に達すると、 A では待ち時間コストが極めて高くなる一方、 B では待ち時間なくアトラクションに乗車可能である。そのため、長い待ち時間を耐えて人気のある A に並ぶ人と、妥協して空いている不人気アトラクション B に並ぶ人に分かれる。つまり、区間4では合算戦略 A と合算戦略 B の混合戦略がナッシュ均衡であると考えられる。

参考文献

- [1] 東京ディズニーリゾート, [公式] ディズニーファストパス, <https://www.tokyodisneyresort.jp/tdl/guide/fastpass.html>, 2021/2/19 閲覧.
- [2] 鶴田裕太郎・豊泉洋, 忍者 (NINJA) 待ち行列を用いたテーマパークの運営法.
- [3] 豊泉洋, 忍者待ち行列, 待ち行列部会, 2020.
- [4] Kleinrock, A delay dependent queue discipline, Naval Research Logistics Quarterly, 11(4) pp329-341, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nav.3800110306>, 1964.
- [5] H.Toyoizumi, Ninja Queue and its application to theme park, IFORS 2021.