

第IV部門

需要の不確実性を考慮した自転車シェアリングの動的料金設定に関する研究

京都大学工学部 学生会員 ○今井 研太郎
 京都大学大学院 正会員 瀬木 俊輔
 京都大学大学院 フェロー 小林 潔司

1 概要

自転車シェアリングシステムの抱える問題点の一つとして「利用需要の時間的, 空間的偏在によって一部の駐輪場で自転車の集中および在庫切れが生じてしまうこと」が挙げられる. 通常のオペレーションにおいて, 事業者はシステムを安定的に供給するために貨物輸送による自転車の再配置を実施するが, そのためには多額の費用を要するため, 貨物輸送のみに依拠したシステムの安定化は非効率的な場合がある. 本研究ではシステムの安定供給を可能にするための補完的な仕組みとして「駐輪場別/時間帯別の料金設定制度」(以下, プライシングと呼ぶ)の導入に着目し, その有効性に関して分析することを目的とする. 具体的には, 「駐輪場で自転車の在庫切れが生じて新たな貸し出し需要を満たせなくなる状況」および「返却時に満車状態で自転車の返却需要を満たせなくなる状況」の発生が需要の不確実性下において, ある確率水準以下になるような制約条件下におけるプライシングモデルを設定し, 最適料金探索アルゴリズムの開発を行った. また, モデルケースにおいて数値シミュレーションを行うことで, プライシングの導入によって初期自転車台数, 駐輪容量, 再配置台数が削減され, 消費者余剰, 社会的余剰が改善されるケースを例示した.

2 需要の不確実性を考慮したプライシングモデル

2.1 モデルの前提

駐輪場総数を N , システム運用の営業時間長を T として, 一営業の終了時点(時刻 $t = T$)に自転車の再配置業務が行われ, 営業の開始時点($t = 0$)において初期状態にリセットされるモデルを想定する. 上付添字 $h(1, \dots, H)$ は営業時間長 T を均等に H 分割した際の時間帯の通し番号を表す.

2.2 需要のモデル

利用料金を無料とした場合の駐輪場 i から駐輪場 j への移動需要は発生率が λ_{ij}^h のポアソン分布に従うと仮定する. また, 代替交通手段と比較した際に自転車シェアリングの無料利用によって得られる効用 v_{ij}^h が一様分布 $U(0, v_{ij}^h)$ に従うとする. 駐輪場 i から駐輪場 j への自転車シェアリング利用料金を p_{ij}^h とすると実際の利用需要の発生率 λ_{ij}^h は次式のように線形の関数で表される.

$$\lambda_{ij}^h = \begin{cases} \bar{\lambda}_{ij}^h (1 - \frac{p_{ij}^h}{v_{ij}^h}) & \text{if } (p_{ij}^h \leq v_{ij}^h) \\ 0 & \text{if } (v_{ij}^h < p_{ij}^h) \end{cases}$$

2.3 駐輪場の在庫管理モデル

h 期の時刻 t における自転車台数の初期台数からの変化量 $x_i^h(t)$ は期待値 $\mu_i^h(t)$, 分散 $\sigma_i^h(t)^2$ の正規分布に従うと近似される.

$$\begin{aligned} \mu_i^h(t) &= \mu_i^{h-1}(\frac{h-1}{H}T) + \sum_{j \neq i} (\lambda_{ji}^h - \lambda_{ij}^h)(t - \frac{h-1}{H}T) \\ \sigma_i^h(t)^2 &= \sigma_i^{h-1}(\frac{h-1}{H}T)^2 + \sum_{j \neq i} (\lambda_{ji}^h + \lambda_{ij}^h)(t - \frac{h-1}{H}T) \\ &\quad \text{if } (h > 1, \frac{h-1}{H}T \leq t \leq \frac{h}{H}T) \end{aligned}$$

この正規分布の h 期における上側 5 パーセント曲線 $u_i^h(t)$ と下側 5 パーセント曲線 $d_i^h(t)$ はそれぞれ 95 パーセント信頼の確率水準 $\alpha (\simeq 1.645)$ を用いると

$$\begin{aligned} u_i^h(t) &= \mu_i^h(t) + \alpha \sqrt{\sigma_i^h(t)^2} \\ d_i^h(t) &= \mu_i^h(t) - \alpha \sqrt{\sigma_i^h(t)^2} \end{aligned}$$

95 パーセントの信頼確率で「自転車の在庫切れが生じないための条件」および「駐輪容量不足が生じないための条件」はそれぞれ

$$\begin{aligned} 0 &\leq Q_i(0) + \min_t [d_i(t)] \\ S_i &\geq Q_i(0) + \max_t [u_i(t)] \end{aligned}$$

最適な初期自転車配置台数 $Q_i(0)$ および駐輪容量 S_i は等号成立時において求められる.

Kentaro IMAI, Syunsuke SEGI and Kiyoshi KOBAYASHI

imai.kentaro.73a@st.kyoto-u.ac.jp

2.4 最適化問題

事業者を公共的な主体とみなし, 社会的余剰 NB の期待値を最大化する問題を設定した.

$$\begin{aligned} \max[NB = CS + \Pi] \\ CS = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} \left(\frac{\bar{v}_{ij}^h - p_{ij}^h}{2} \right) \lambda_{ij}^h \frac{T}{H} \\ \Pi = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{h=1}^H \sum_{j \neq i} p_{ij}^h \lambda_{ij}^h \frac{T}{H} - C_{M_i} M_i - C_Q Q_i(0) - C_{S_i} S_i \right] - F \\ \text{subject to } \Pi \geq 0 \cdots (*) \end{aligned}$$

CS は消費者余剰, Π は利潤, C_{M_i} は自転車一台あたりの再配置費用, C_Q は自転車一台当たりの資本費用, C_{S_i} は自転車一台あたりの駐輪スペース費用, F は固定費, M_i は再配置台数を表す (それぞれ一営業期間あたりの期待値とした). また (*) は事業者が独立採算で運営するための条件を表す.

3 最適料金探索アルゴリズム

変数を料金 p_{ij}^h として目的関数 NB を最大化するような最適料金の組み合わせを数値的に導くためのアルゴリズムを実装した. 近似解探索のアルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを援用した.

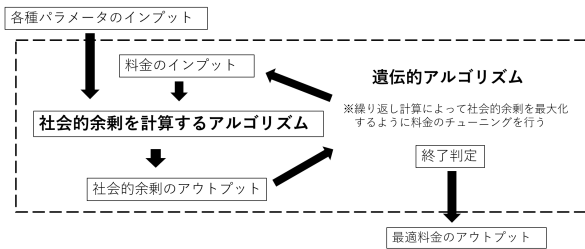


図 1: アルゴリズムの概要

4 数値シミュレーションの結果

case1「すべての駐輪場/時間帯で共通の料金設定」, case2「駐輪場/時間帯ごとに異なる料金設定」でそれぞれ数値シミュレーションを行い, 両者の結果を比較した.

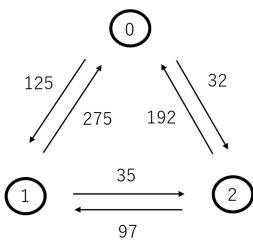


図 2: 料金無料の場合の需要 ($0 \leq t < 9$)

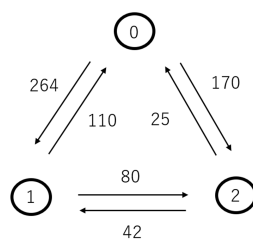


図 3: 料金無料の場合の需要 ($0 \leq t \leq 18$)

表 1: パラメータの設定

N	H	T	C_Q	C_{M_0}	C_{M_1}	C_{M_2}	C_{S_0}	C_{S_1}	C_{S_2}	F	$\bar{v}$
3	2	18	15	100	100	100	200	170	140	500000	500

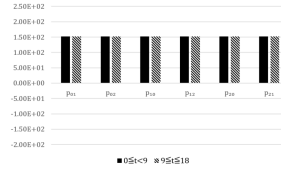


図 4: case1:最適料金

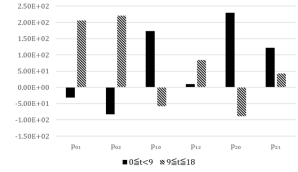


図 5: case2:最適料金

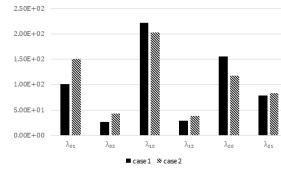


図 6: 需要の比較 ($0 \leq t < 9$)

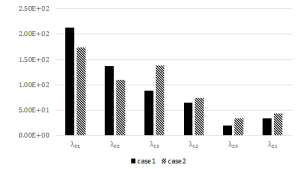


図 7: 需要の比較 ($9 \leq t \leq 18$)

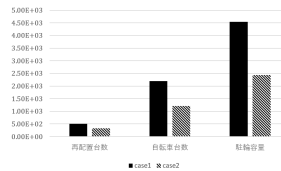
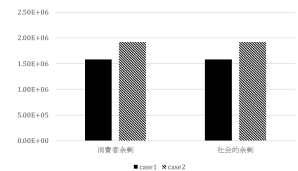


図 8: 再配置台数, 自転車台数, 図 9: 消費者余剰, 社会的余剰駐輪容量の比較



5 結論

モデルケースにおいて数値シミュレーションを行うことで, 本研究で開発したアルゴリズムの有効性を示すとともに, プライシングの導入によって駐輪容量, 自転車の初期在庫水準, 再配置台数が削減され, 消費者余剰および社会的余剰が改善されるケースを例示した. 本研究の主要な課題として (1) 自転車不足/駐輪容量不足の事態が利用需要に与える影響の適切な評価, (2) 需要関数の適切なモデリング, (3) 輸送距離, 輸送ルートを検討することが挙げられる.