2T-03

電動パーソナルモビリティのシェアリング事業に向けた無線充電システムの導入とインセンティブスキームに関する検討

林 寛将 [1]　笹谷 拓也 [1,2]　畑 勝裕 [1]　山村 亮介 [3]　川原 圭博 [1]
東京大学 [1]　日本学術振興会特別研究員 DC[2]　mercari R4D[3]

1　はじめに

電動パーソナルモビリティのシェアリング事業はマルチモーダルな交通ネットワークのラストワンマイルを担う手段として多くの都市で採用されるようになった．既存のシェアリング事業では，地域や時間によって生じる車両分布の不均衡性がステーションの車両数が空・満杯になるといった利便性の低下を招くことがあった．これを防ぐために，報酬と引き換えに不均衡性を緩和する別のステーションを利用してもらうようにユーザの行動変容を促すインセンティブスキームが提案されている [1]．

一方，電池や充電に着目すると，ユーザは近距離の移動であっても電池切れのリスクを避けるためにできるだけ電池残量が大きい車両を選ぶ傾向があり，電池残量が小さい車両が放置され，事業者は電池の交換や充電に大きなコストを費やす必要がある．そこで本論文では，無線充電ステーションの導入とユーザにシステム全体を改善するような行動変容を促すインセンティブスキームを提案する．充電ステーションに向かうユーザには敢えて電池残量を小さい車両を選ぶように促すことで，次に利用するユーザが電池切れになる可能性や電池管理にかかるコストを低減することが期待できる．

以下の章では，モデル構築と Citi Bike が提供するデータに基づくシミュレーションにより利便性や事業コストに関して本手法を評価した結果について説明する．

2　システムモデル

2.1　電池残量推移と無線充電ステーション

車両に搭載される電池の容量を B_C，入力を W_{in}，平均出力を W_{out} とする．サービスには m 個のステーション $\boldsymbol{S} = \{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$ があるとし，そのうち無線給電ステーションを $\boldsymbol{S_W}$ と表記する．また，無線充電ステーションは図 1 に示すように段階的に導入されることを想定し，その導入率を r とする．車両は無線充電ステーション $\boldsymbol{S_W}$ に置かれている時間に入力電力 W_{in} で充電され，その他のステーション $\overline{\boldsymbol{S_W}}$ では電池残量が閾値 B^r_{th} より小さい車両を対象に需要が小さい夜間に電池交換が行われるとする．

また，ユーザが電池残量や使用するステーション間の距離に応じて合理的に車両を選択できるように多項ロジットモデルを採用した [2]．

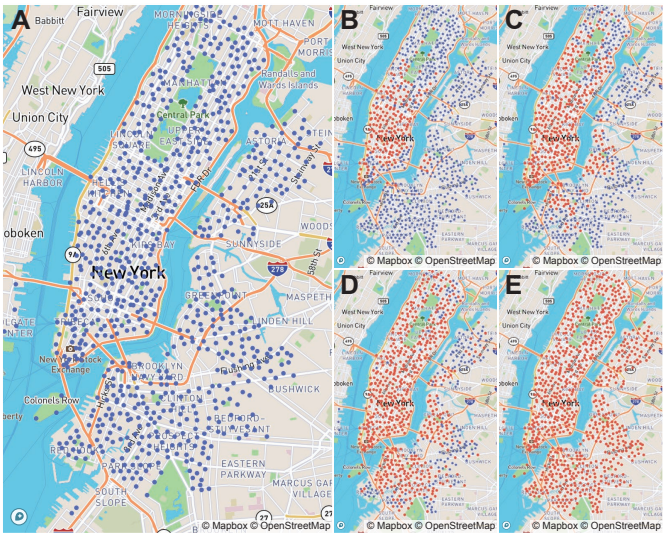


図 1　Citi Bike のステーションマップ．赤いマーカーは無線充電ステーションを表す．導入率は A：0 %，B：25 %，C：50 %，D：75 %，E：100 % である．

2.2　インセンティブスキーム

ステーション $s_o \in \overline{\boldsymbol{S_W}}$ から電池残量が閾値 B^i_{th} 以下である車両 b を選択し，ステーション $s_d \in \boldsymbol{S_W}$ まで移動するトリップにインセンティブを設定する．インセンティブの報酬 p は次のように決定される．

$$p_{od} = \begin{cases} p & (s_o \in \overline{\boldsymbol{S_W}} \text{ and } s_d \in \boldsymbol{S_W} \text{ and } b \le B^i_{\text{th}}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

つまり，対象となるトリップを完了したユーザは報酬 p を受け取るが，対象ではない移動をしたユーザの報酬は 0 となる．

次に，ユーザがインセンティブを受け入れる条件を定義する．前提として，ユーザは設定されたインセンティブやステーションにある車両の電池残量，移動に必要な電池残量などの情報をサービスから提供されているとする．

ユーザ u はインセンティブによって歩くことができる距離の上限 γ_u と受け入れる報酬の下限 c_u を持っているとする [3]．ユーザ u の出発地点 $l_{u,o}$ または目的地点 $l_{u,d}$ とインセンティブの対象となるステーション s_i までの距離を $L(l_u, s_i)$ とする．次に，ステーション s_o，s_d 間を移動するために必要な電池残量を B_{od} とし，時刻 t にステーション s_o にある車両全ての電池残量を集合 $\boldsymbol{b}(t, s_o)$ と表記する．したがって，ユーザ u がインセンティブを受け入れ

A study on Wireless Charging System and Incentive Scheme for a Sharing Service of Electric Personal Mobility Devices
Hiromasa Hayashi[1], Takuya Sasatani[1,2], Katsuhiro Hata[1], Ryosuke Yamamura[3], and Yoshihiro Kawahara[1]
1. The University of Tokyo
2. JSPS Research Fellow
3. Mercari R4D

Copyright ©2021 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

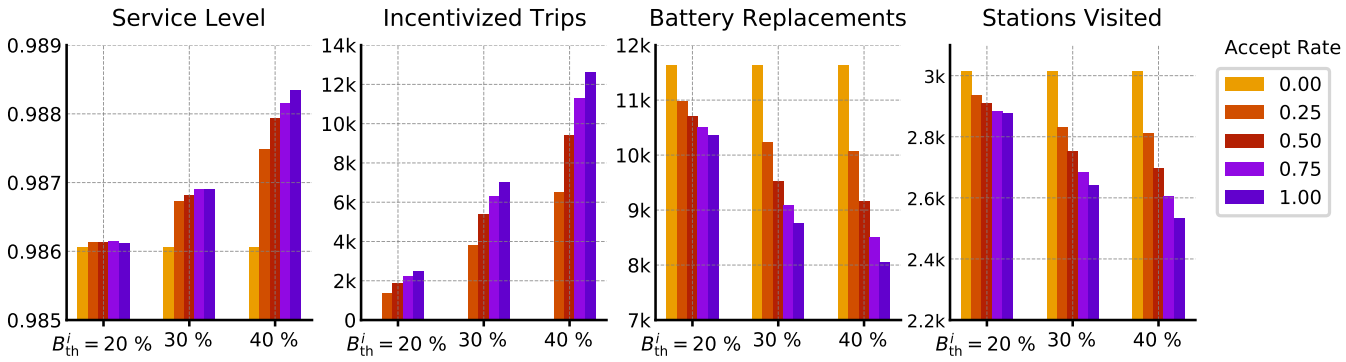


図 2　シミュレーション結果．各パラメータに対し，左の列からサービス品質とインセンティブトリップの回数，電池の交換回数，電池交換のためにステーションを訪れた回数を表す．

る条件は次のようになる．

$$L(l_{u,o}, s_o) \leq \gamma_u \quad \cap \quad L(l_{u,d}, s_d) \leq \gamma_u \tag{2}$$

$$c_u \leq p \tag{3}$$

$$\boldsymbol{b}(t, s_o) \cap [B_{od}, B^i_{\text{th}}] \neq \varnothing \tag{4}$$

3　実験

3.1　データセットと環境設定

データセットとして Citi Bike が提供するオープンデータを用い，2019 年 9 月 6 日から 10 日間のデータを抽出した [4]．初期条件が結果に与える影響を緩和するために最初の 72 時間はバーンイン期間として取り除いた．

本稿の解析で用いた値を表 1 にまとめる．詳しい環境設定は [2] を参考にされたい．c_u の累積分布関数は [3] の調査結果を利用し，受け入れる確率 P_{accept} がおよそ 0.25，0.50，0.75 となる報酬 p を採用した．さらに，比較としてインセンティブを行わない場合（$P_{\text{accept}} = 0$）と全てのユーザがインセンティブを受け入れる場合（$P_{\text{accept}} = 1$）についても調査した．なお，インセンティブがユーザの車両選択に与える影響のみ変化させ，式 (2) による需要の変化は本稿では扱わない．

3.2　結果

結果を図 2 に示す．サービス品質（Service Level）は総需要に対する貸出・返却時の電池残量に問題がないトリップの割合として定義した．

サービス品質は B^i_{th} と P_{accept} を上げるとわずかに増加する傾向にあった．ここで，総トリップ数が 574,404 回という非常に大きい数であることを考慮する必要があり，例えば $B^i_{\text{th}} = 30\ \%$，$P_{\text{accept}} = 0.25$ のとき 388 回のトリップを改善している．

インセンティブトリップの回数を見ると，B^i_{th} と P_{accept} の増加とともに大きく増加することが分かる．これはインセンティブの対象となる車両が増加することに加え，往来できるステーション数も増加することが原因である．一方で，電池の交換回数とステーションへの訪問回数はインセンティブトリップの回数ほど大きな変化は見られない．特に P_{accept} を上げると付与する報酬 p の総和が膨大になるため，事業コストの減少にはつながらないことが分かる．しかし，$B^i_{\text{th}} = 30\ \%$，$P_{\text{accept}} = 0.25$ のとき，インセンティブの回数が 3811 回であることに対し，電池の交換回数が 12.0 %，ステーションへの訪問回数が 6.0 % 減少した．このとき $p = 0.2$ であるため，非常に小さいコストで電池管理の負担を減らすことができることが分かる．

表 1　シミュレーションで用いた値

B_C	360 Wh	W_{in}	50 W
W_{out}	180 W	r	25 %
p	\$ 0.2, 0.5, 1	総トリップ数	574,404
B^i_{th}	20, 30, 40 %	B^r_{th}	25 %

4　おわりに

本稿では無線充電ステーションの導入と電池や充電に関するインセンティブスキームの検討を行った．ユーザに電池残量の小さい車両を選択して無線充電ステーションに向かうように行動変容を促すことで，利便性の向上や事業コストの低減を見込むことができる一方で，対象とする車両の電池残量の閾値や報酬によってインセンティブと電池交換にかかるコストにトレードオフが生じることが明らかになった．

謝辞

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト（JPMJER1501），（株）メルカリの助成を受けたものである．

参考文献

[1] Chung, H., Freund, D. and Shmoys, D. B.: Bike Angels: An Analysis of Citi Bike' s Incentive Program, *Proceedings of the 1st ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies*, Association for Computing Machinery (2018).

[2] 林　寛将，笹谷拓也，畑　勝裕，山村亮介，川原圭博：電動パーソナルモビリティのシェアリング事業に向けた無線充電システムのシミュレーションによる解析，マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2020)，pp. 520–525 (2020).

[3] Singla, A., Santoni, M., Bartók, G., Mukerji, P., Meenen, M. and Krause, A.: Incentivizing users for balancing bike sharing systems., *AAAI*, Vol. 1, pp. 723–729 (2015).

[4] Citi Bike: Citi Bike System Data, Citi Bike (online), available from ⟨https://www.citibikenyc.com/system-data⟩ (accessed 2021-01-07).

Copyright ©2021 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.