

シェアリングシステムの短期オペレーションにおける確率的在庫管理手法の導入

斉藤いつみ¹・羽藤英二²

¹正会員 工修 NTT サービスイノベーション総合研究所
E-mail: saitoitsumi@gmail.com

²正会員 東京大学 工学系研究科 社会基盤学科

本研究では、確率的在庫管理問題の概念に基づいたシェアリングシステムの短期的 (within-day) のオペレーションモデルを提案する。シェアリングネットワークにおける車両を各ポートの在庫ととらえ、確率的な需要関数を設定した上で有限期間の期待収益最大化問題として定式化する。この際、需要関数は料金によって内生的に変化するとし、車両の配車制御と料金を政策変数とした最適化問題としてシェアリングオペレーションをとらえる。数値計算により、将来需要を考慮し政策変数を適切に定めることで異なる需要パターンに対し安定的に収益を増加させられる可能性を示した。

Key Words : *dynamic programming, stochastic demand, malkov decision process, mobility sharing*

1. はじめに

シェアリングシステムとは、自家用車のように個人が車両を保有するのではなく、利用したい時間に利用したい場所で利用料金を支払って車両を利用するサービスである。レンタカーと異なり、1回の利用時間は短時間利用を想定しており、一台の車両を複数人で利用することで利用者は自身の自動車保有コストを削減することができサービス提供者は効率的に車両を運用することで収益を得る仕組みである。

サービス提供者の収益管理において最も重要となるのは、時間的・空間的に異なる需要パターンに対し効率的に車両を割り当てるかという点である。特に、乗り捨てを許すシェアリングサービスでは、空間的な車両の偏りと需要のアンマッチがシステムの非効率性を生み出す可能性が存在し、時間的・空間的にばらつきがある需要を適切に車両に割り当てシステム効率を最適化することが安定的な運用のために極めて重要である。ここで、シェアリングシステムとは従来の交通システムと異なり1台の容量が小さい車両の組み合わせで成り立っている系である。このような問題に対し、本研究では1台1台の車両をどのタイミングでどの需要に割り当てるか、またその際の料金設定は各時間帯・ODごとにどのように設定すべきかといった細かい制御を想定している。このような問題は非常に変数の多い組み合わせ最適化問題となり、実用的なネットワーク規模の問題においては厳密な最適解を求めるのが難しい問題となるため、実用規模の問題で良い解を

求める手法についての検証も重要となる。従来の交通システムでは個々の車両の配分といったミクロな離散量制御の概念はあまり多くはなかったが、個人の移動履歴や嗜好などが把握できるようなシステムの基盤が整ってきていること、シェアリングのように個々の車両を適切に運用する必要のあるサービスでは多様な需要の適切なマッチングを考慮する必要があることなどから、組み合わせ最適化問題としてミクロな制御問題を捉えることの必要性も高くなってくると考えられる。

本研究では、まず小さなネットワークにおいて確率的在庫問題の概念に基づき時間的に異なる需要パターンを想定したネットワーク上の最適制御方策を求める枠組みについて提案を行う。2章で確率的在庫管理問題の基本的概念を示し、3章でシェアリングネットワークにおける定式化へ拡張する。4章で数値実験の結果を示し5章でまとめと今後の課題を示す。

2. 確率的在庫管理問題

(1) 問題の設定

確率的在庫管理問題とは、ある時点 t において在庫情報に基づき利潤を最大化するように商品の発注有無や発注量を決定する問題である。このとき、商品の管理者は在庫の維持費用と在庫不足で顧客を失う機会損失あるいは罰則とのトレードオフを考慮しながら適切な発注方策を求める。今、時間帯 t における状態集合を S_t 、政策集合を A_{t-1} 、状態政策系列集合を $H_t = \{H_{t-1}, A_{t-1}, S_t\}$ とする。ここで、政策 π を履歴依存的な政策系列 $\pi =$

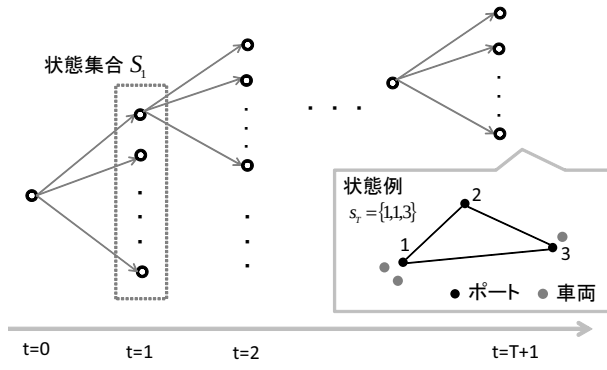


図-2 離散時間での状態遷移と各状態の概念

(2) 状態変数の定義

シェアリングネットワークにおいて、時刻 t における状態 s_t は車両 $k (\in K)$ の各ポート位置 $x_k (1 \leq x_k \leq V)$ についての組み合わせ $s_t = \{x_1, \dots, x_K\}$ として定義する。例えば、 $K = 3, V = 5$ のときの状態の一つは $\{1, 3, 4\}$ と表すことができる。状態 $\{1, 3, 4\}$ が状態 $\{1, 3, 5\}$ に遷移するとは、車両 3 がポート 4 からポート 5 に遷移し残りの車両は同じ位置に遷移する（利用されない）ことを表す。図 2 に状態変数と離散時間上での状態遷移の概念を示した。

(3) 需要関数の定義

次に、需要関数について定義する。本研究では、図 3 に示すように各車両の状態遷移確率を各ポートにおける時間帯 t ごとの需要分布 $p(d_{it})$ と各ポートから他のポートへの遷移確率 p_{ijt} を用いて定義する。各ポートの時間帯 t ごとの需要分布 $p(d_{it})$ はポアソン分布を用いて以下のように定義する。ただし、 λ_{it} は各ポート i の時間帯 t におけるポアソン分布の期待値パラメータ、 d_{it} は需要数である。

$$p(d_{it}) = \frac{\lambda_{it}^{d_{it}} \exp(-\lambda_{it})}{d_{it}!} \quad (6)$$

料金に対する需要の変動を表現するため、期待値パラメータ λ は時間帯 t 、ポート i, j 間の料金 f_{ijt} を用いて以下のように構造化する。ただし、期待値パラメータは正の値をとるため本研究では指数関数を用いて構造化した。

$$\lambda = \exp(\alpha + \beta \cdot f_{ijt}) \quad (7)$$

ポート間 $i, j (j \neq i)$ の時間帯 t における遷移確率 p_{ijt} は多項ロジットモデルを用いると、リンク i, j 間の時間帯 t における効用の確定項 V_{ijt} を用いて以下のように表せる。

$$p_{ijt} = \frac{\exp V_{ijt}}{\sum_j \exp V_{ijt}} \quad (8)$$

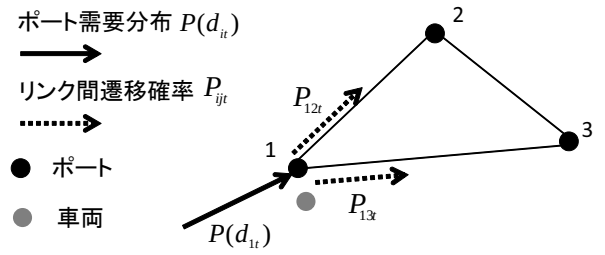


図-3 シェアリングネットワークにおける需要関数の定義

(4) 政策変数の定義と問題の仮定

本研究では、政策変数として各時間帯 t ごとの車両 k の操作変数 y_{kt} の組み合わせ、各時間帯 t ごと、各リンク ij ごとの料金 f_{ijt} の 2 つを考える。料金については時間帯、リンクごとの変数を設定すればよい。以下、車両ごとの操作変数について説明する。時間帯 t において、各車両 k に対して行うことのできる操作は、何もしない、ポート $i (\in V)$ に移動させるという $V+1$ 個の選択肢が存在する。それぞれの選択肢 z_v について行う・行わないの 1/0 変数を定義すると、各操作は同時に 1 つしか行うことができないので $\sum z_v = 1$ を満たす。ここで、 $y_{kt} = z_v : \text{if}(z_v = 1)$ とすると、政策変数 a_t は各車両 k に対する操作変数の組み合わせとして $a_t = \{y_{1t}, y_{2t}, \dots, y_{Kt}\}$ と表すことができる。ただし、車両をポート i からポート $j \in V (j \neq i)$ に移動させる場合はオペレーションコスト c_{ij} が発生するものとする。また、問題の仮定として以下の条件を仮定する。

- 第 t 期にポート i からポート j に遷移した車両は、第 $t+1$ 期の直前にポート j に到着する。(第 t 期のポート j の流入量には加算されず、第 $t+1$ 期の流入量に加算される)
- 第 t 期にポート i からポート j に配車操作した車両は、第 $t+1$ 期の直前にポート j に到着する。(第 t 期のポート j の流入量には加算されず、第 $t+1$ 期の流入量に加算される)

以上の仮定より、第 t 期のポート i における流出量は第 t 期のポート i における車両数を上回ることはできない。このことは次節の状態遷移確率の導出でより詳しく述べる。

(5) 状態遷移確率の導出

前項までに状態変数と需要関数、操作変数を定義した。本項ではこれらを考慮して各状態間の遷移確率を導出する。ここで、各状態の遷移確率を各ポート i の時間帯 t における車両数 $s(t)_i$ 、時間帯 t においてポート i からポート j に移動させた車両総台数 $\sum_j a(t)_{ij}$ 、時間帯 t においてポート j からポート i に移動させた車両総台数 $\sum_j a(t)_{ji}$ 、時間帯 t においてポート i からポ

ト j に遷移した需要総数 $\sum_j d(t)_{ij}$, 時間帯 t において
ポート j からポート i に遷移した需要総数 $\sum_j d(t)_{ji}$ と
すると第 $t+1$ 期におけるポート i の車両数 $s(t+1)_i$ は

$$s(t+1)_i = s(t)_i - \sum_j a(t)_{ij} - \sum_j d(t)_{ij} \quad (9)$$

$$+ \sum_j a(t)_{ji} + \sum_j d(t)_{ji}$$

となる. 各ポート i での状態 $s(t)_i$ から状態 $s(t+1)_i$ へ
の状態遷移確率を $p(s(t+1)_i|s(t)_i, a(t)_i)$ とすると, 系
全体での状態遷移確率 $p(s(t+1)|s(t), a(t))$ は各ポート
における状態遷移の積として次のように表すことができ.

$$p(s(t+1)|s(t), a(t)) \quad (10)$$

$$= \prod_{i=1}^V p(s(t+1)_i|s(t)_i, a(t)_i)$$

ここで, 前節で述べたように各ポートにおける車両流
入は第 $t+1$ 期の直前に起こるとし, 流出は第 t 期の直
後に起こるとする. よって, 流出量の合計 $\sum_j a(t)_{ij} +$
 $\sum_j d(t)_{ij}$ は第 t 期における台数 $n(t)_i$ を超えることは
できない. この条件を用いて, 各ポート i における状態
の遷移確率 $p(s(t+1)_i|s(t)_i, a(t)_i)$ を次の 3 つの場合に
場合分けして導出する.

(a) $s(t)_i - \sum_j a(t)_{ij} - \sum_j d(t)_{ij} < 0$,
 $s(t)_i - \sum_j a(t)_{ij} - \sum_j d(t)_{ij} > s(t)_i$ のとき
車両保存則, $0 \leq \sum_j a(t)_{ij}, 0 \leq \sum_j d(t)_{ij}$ より

$$p(s(t+1)_i|s(t)_i, a(t)_i) = 0 \quad (11)$$

(b) $0 < s(t)_i - \sum_j a(t)_{ij} - \sum_j d(t)_{ij} \leq s(t)_i$ のとき
需要総数がポートの車両数を超えないので, ポア
ソン分布において $\sum_j d(t)_{ij}$ の需要が発生する確率
に各需要のポート間遷移確率 p_{ijt} をかけた値が状
態遷移確率となる.

$$p(s(t+1)_i|s(t)_i, a(t)_i) \quad (12)$$

$$= p(\sum_j d(t)_{ij}) \cdot \prod_j p_{ijt}^{d(t)_{ij}} \cdot \frac{1}{s(t)_i C_{\sum_j d(t)_{ij}}}$$

ただし, 今回車両を区別して状態を扱っているため,
移動しない車両の選択組み合わせ数 $s(t)_i C_{\sum_j d(t)_{ij}}$
で除していることに注意する.

(c) $s(t)_i - \sum_j a(t)_{ij} - \sum_j d(t)_{ij} = 0$ のとき
需要総数がポートの車両数と等しいので, ポアソ
ン分布において $\sum_j d(t)_{ij}$ 以上の需要が発生する確
率に各需要のポート間遷移確率 p_{ijt} をかけた値が
状態遷移確率となる.

$$p(s(t+1)_i|s(t)_i, a(t)_i) \quad (13)$$

$$= \sum_{d_{it}=\sum_j d(t)_{ij}}^{\infty} p(d_{it}) \cdot \prod_j p_{ijt}^{d(t)_{ij}}$$

$$\sum_j d(t)_{ij}-1$$

$$= (1 - \sum_{d_{it}=0} p(d_{it})) \cdot \prod_j p_{ijt}^{d(t)_{ij}}$$

以上の各ポート i における状態遷移確率を式 (10) に代
入することで系全体の状態遷移確率を求めることがで
きる.

(6) 収益関数

状態遷移確率の導出結果に基づき, 収益関数を導出
する. 各ポート間における需要遷移ごとに収益 r が得
られ, 各ポート間における車両操作ごとにコストがか
かる. これより, 状態 $s(t)$ から $s(t+1)$ への遷移にお
ける期待収益 $r_t(s(t), a(t))$ は次のように表せる.

$$r_t(s(t), a(t)) \quad (14)$$

$$= \sum_{s(t+1) \in S(t+1)} \{ (\sum_i \sum_j d(t)_{ij} \cdot f_{ijt}$$

$$- \sum_i \sum_j a(t)_{ij} \cdot c_{ij}) \cdot p(s(t+1)|s(t), a(t)) \}$$

(7) 最適性方程式

前項で述べた収益関数より, 離散有限時間 $t(0 \leq t \leq T)$ 上での, 収益関数の最適性方程式は以下のように書
き下すことができる.

$$u_t(s(t)) = \max_{a \in A_{s(t), t}} \{ r_t(s(t), a) \quad (15)$$

$$+ \sum_{j \in S_{t+1}} p(j|s(t), a) u_{t+1}(s(t), a, j) \}$$

(8) 解法アルゴリズム

以上の定式化に基づき, 2.3 で示したように後退アル
ゴリズムを用いて最適方策を求める. 各再帰計算中で
車両の操作変数, 料金の組み合わせについて最適化問
題を解くことで各状態ごとの車両操作, 料金について
の最適方策を求めることができる. この際, 車両操作
については離散的な組み合わせパターン, 料金につい
ては連続量として最適化問題を解く.

4. 数値計算例

(1) ネットワークの設定

ポート数 $V=3$, 車両数 $K=3$, 時間帯 $t=5$ のネットワ
ークで数値計算を行う. ポアソン分布のパラメータは時
間帯, ポートごと, ポート間遷移効用の確定項はリンク
ごとに設定した. また, 車両の配送コストは 1 回あたり
 $c=0.2$, 料金パラメータは $\beta=-0.5$ とした. また, 制
御を行わない場合として料金を一律 $f_{ijt}=3$ とした場
合をベースケースとして比較した. 各ポートの需要の
固有パラメータは表 1 のように定めた. ,0.2,0.1,0.3,2,2

表-2 配車制御を行った場合の最適政策例 ($t = 4$)

状態 $s(t)$	最適政策 (配車)	期待収益 (制御なし)	期待収益 (制御あり)	期待収益増加率
(2,1,1)	(ϕ, ϕ, ϕ)	17.3	20.2	1.17
(2,1,2)	$(1 \rightarrow 1, \phi, \phi)$	15.7	20.2	1.28
(2,1,3)	(ϕ, ϕ, ϕ)	19.2	22.3	1.16
(2,2,1)	$(\phi, 2 \rightarrow 1, \phi)$	15.7	20.2	1.28
(2,2,2)	$(\phi, 2 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 3)$	13.1	19.6	1.50
(2,2,3)	$(\phi, 2 \rightarrow 1, \phi)$	17.1	21.7	1.27
(2,3,1)	(ϕ, ϕ, ϕ)	19.2	22.3	1.16
(2,3,2)	$(\phi, \phi, 3 \rightarrow 1)$	17.1	21.7	1.27
(2,3,3)	(ϕ, ϕ, ϕ)	19.7	22.8	1.16

表-1 需要パラメータの設定

ポート	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
1	0.4	0.2	4	5.	0.2
2	1	3	0.3	0.5	0.5
3	0.2	0.1	0.3	2	2

(2) 配車制御のみを行う場合

配車制御のみを行った場合の計算例 ($t = 4$ における状態の一部) を表 2 に示した。ただし、 ϕ は「何もしない」操作を表す。状態 (2,1,2) や (2,2,2) では、車両を次の時間帯まで同じポートに確保することが期待収益を高める結果となっており、必ずしも移動させるだけではなく利用を制限することでも期待収益をあげられる可能性があることがわかった。平均の期待収益増加率は 1.20 となりどの状態においても平均的に期待収益を増加させられる結果となった。車両を移動させる操作や利用を制限する操作は移動させる時間帯 t においてのみ考えれば収益の損失につながるが、ネットワーク上の需要分布に偏りがある場合は将来の需要パターンを考慮しコストがかかっても操作を行う方が収益をあげられる場合があることを示している。

(3) 料金制御のみを行う場合

次に料金制御を行った場合の数値計算例を表 3 に示す。ただし、料金の取りえる範囲は $1 \leq f_{ijt} \leq 10$ とした。また、最適政策はリンクごとの料金を示している。表より、すべての場合において期待収益が増加していることがわかる。平均の期待収益増加率は 1.73 となり、料金固定の配車制御よりも収益を増加させられる可能性が高いことがわかった。また、最適料金の結果をみると、需要が多い時間帯、リンクでは料金が高く設定され、需要が少ない時間帯、リンクでは料金が低く設

定されていることがわかる。現実運用されているシステムでは、大きな単位での時間帯ごとの料金設定はなされていることも多いが、さらに細かく時間帯やリンクごとに料金を設定することで期待収益を大きく増加させられる可能性があることが示された。

5. まとめと今後の課題

本研究では、確率的在庫管理問題をシェアリングネットワークに拡張し、車両と料金の最適化オペレーションの概念を提示した。数値計算例より、異なる状態においても将来収益を考慮して制御を行う場合収益を安定的に増加させることができた。需要に偏りがある場合には、細かなオペレーションによって収益を安定的に確保することが可能になると考えられる。

今後の課題として、規模が大きくなった場合の最適化問題の解法アルゴリズムの検討、実データを用いた検証、需要関数の時間選択等を考慮した場合の検証を行う予定である。特に、今回は時間帯ごとに非常に細かなオペレーションを行うことを想定しているため、利用者の意思決定の仮定 (モデリング) や予測精度に関してはより詳しく検討を行う必要がある。例えば、時間帯選択の枠組みを導入することで、利用者の時間帯変更の行動を表現することができれば、より現実的な評価を行うことができるであろう。また、時間選択の際には利用可能性や待ち時間など動的に変化するシェアリングのサービス変数を考慮にいれながら行動していることが考えられる。これらの意思決定メカニズムを組み込んだ収益管理の評価を行う必要がある。

また、今回は車両オペレーションに関してすべての組み合わせを考慮して最適解を導いたが、現実のオペレーションにおいては計算時間の観点からもそのような解法は現実的ではないだろう。ネットワーク、車両規模が大きくなった場合の現実時間での解法アルゴリズム

表-3 料金制御を行った場合の最適政策例 ($t = 4$)

状態 $s(t)$	最適政策 (料金)	期待収益 (制御なし)	期待収益 (制御あり)	期待収益増加率
(2,1,1)	(1,1,5.6,5.6,1,1.6,1)	17.3	32.1	1.85
(2,1,2)	(1,1,7.1,7.1,1,1,1)	15.7	28.1	1.79
(2,1,3)	(4.3,1,6.6,6.6,1,1.6,6.4)	19.2	33.1	1.72
(2,2,1)	(1,1,7.1,7.1,1,1,1)	15.7	28.1	1.79
(2,2,2)	(1,1,1,1,1,1)	13.1	21.8	1.66
(2,2,3)	(4.5,1,1,1,1,1,5.9)	17.1	28.2	1.66
(2,3,1)	(4.3,1,6.6,6.6,1,1.6,6.4)	19.2	33.1	1.72
(2,3,2)	(4.5,1,1,1,1,1,5.9)	17.1	28.2	1.66
(2,3,3)	(2.9, 1, 1, 1, 1.5, 4.4)	19.7	31.8	1.2

ムの検討も重要な課題となる。

参考文献

- 1) 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫: 確率モデルハンドブック, 朝倉書店, 1995.
- 2) Niels Agatz, Alan Erera, Martin Savelsbergh, Xing Wang: Optimization for dynamic ride-sharing, A review European Journal of Operational Research, Volume 223, Issue 2, pp.295-303, 2012.
- 3) Niels Agatz, Alan Erera, Martin Savelsbergh, Xing Wang: Dynamic Ride-sharing: a Simulation Study in Metro Atlanta, Social and Behavioral Sciences, vol.17
- 4) Talluri, K., Ryzin, G: Revenue Management Under a General Discrete Choice Model of Consumer Behavior, Management Science, Vol. 50, No. 1, pp. 15-33, 2004

(2013. 8. 2 受付)