

効率的なバイクシェアリングのための 利用権取引制度とその解法の提案

加藤 桃子¹・原 祐輔²・長江 剛志³

¹ 学生員 東北大学大学院工学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-816)
E-mail: momoko.kato@most.tohoku.ac.jp

² 正会員 東北大学未来科学技術共同研究センター (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)
E-mail: hara@plan.civil.tohoku.ac.jp

³ 正会員 東北大学大学院工学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-814)
E-mail: nagae@m.tohoku.ac.jp

近年、バイクシェアリングというサービスが世界中で導入されている。バイクシェアリングとは、自転車(シェアサイクル)の貸出・返却場所であるポートを複数箇所に配置し、どのポートでも相互に自転車の貸出・返却が行えるものである。しかし、特定の起終点ポートの需要が高まると乗りたいときに乗れないなどのシェアサイクルを有効利用できない場合がある。本研究ではシェアサイクルを有効利用するため、時間帯ごとにシェアサイクルを利用できる権利(利用権)を財として取引する方法を提案する。利用者に対する利用権の配分問題を整数計画問題として定式化するが、整数計画問題は大幅な計算時間とならない。しかし整数計画問題がLP(linear programming)緩和できることで計算に必要な時間が大幅に削減できる。本研究では時間分解可能性に着目し、最適配分問題をLP緩和する方法を提案する。

Key Words : *Bike-sharing, Dynamic Programming, allocation problem*

1. はじめに

近年はパリのヴェリブに代表されるようなバイクシェアリングが世界中で導入されている[1]。バイクシェアリングは自転車の貸出・返却場所(ポート)を複数箇所に配置し、どのポートでも相互に自転車の貸出・返却が行えるようなサービスを提供するものである。ここではシェアされる自転車をシェアサイクルと呼ぶ。バイクシェアリングの最も重要な使命は、都市内で使われる自動車の代替となることである。交通事故、渋滞、化石資源の浪費などの問題を、自動車の便利な機能の一部をバイクシェアリングに置き換えることによって軽減し、より便利で快適な都市生活を目指すことが目的である。しかし、特定のポートの需要が高まるとシェアサイクルを有効利用できない場合がある。有効利用できていないとは、乗りたいと思ったポートに行ってもシェアサイクルが1台も残っていないなどの場合を指す。本研究ではシェアサイクルを有効利用するため、時間帯ごとにシェアサイクルを利用できる権利(利用権)を財として取引する方法を提案する。

こうした利用権取引に関する研究として、原・羽籾[2]は利用者に対する利用権の配分問題を整数計画問題として定式化している。また、各利用者はただ1つの時間帯の利用権にのみ入札すると仮定した場合(single-minded bit)にはLP緩和問題の解は元の整数計画問題

の解と一致することを示した。整数計画問題がLP緩和できることで計算に必要な時間が大幅に削減できる。しかし、single-minded bit という条件は利用者の利用権の選択の自由度を下げる可能性がある。本研究では時間分解性に着目し、厳密なsingle-minded bitよりも利用者の選択の自由度が高いLP緩和法を提案する。

本稿ではまず、2.で定式化を行う。次に、3.に数値計算の例を示しながら、LP緩和問題が最適配分問題に一致する新しい方法を提案する。

2. 定式化

(1) 状況設定

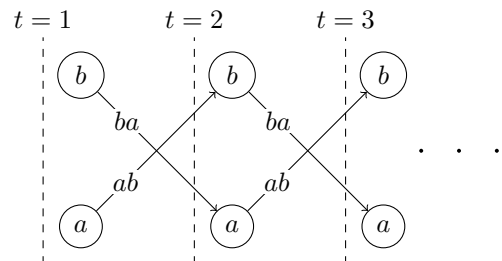


図-1 状況設定(ポートが2つの場合の例)

図1に本研究の状況設定を示す。離散時点 $t \in T := \{1, 2, \dots, T\}$ を考え、ポートを $n \in N := \{a, b, \dots, N\}$,

起点ポート n から終点ポート m へ向かう利用権を $nm \in L \subseteq N \times N \setminus \{(n, n) : n \in N\}$ とする．利用者は $j \in J := \{1, 2, \dots, J\}$ と表す．ある時点に開始したトリップは次の時点の貸出が始まる前に終わらなければならない．すなわち，時点 t に貸し出されたシェアサイクルは時点 $t+1$ の初期までにトリップ終点のポートに返却されなければならない．また，利用者は1日に1回のトリップを行う主体と仮定している．各利用者は任意の利用権 nm に対して評価値 $v_{nm}^j(t)$ を持っている．各利用者は初期時点で利用権の購入権 $Y^j(0) = 1$ を持つ．利用権を得られるのは1度きりのため，利用権を配分された以後の時点の購入権は0となる．各ポートのシェアサイクルの初期配置台数 $z_n(0)$ は所与の定数とする．

(2) 最適配分問題

本研究では，シェアサイクルが有効に活用されている状態を利用権が配分された(落札した)利用者の評価値の和が最大となる状態と定義する．そのため，シェアサイクルを最大限有効活用するための配分問題は，以下の最大化問題 [P] として定式化できる．

[P]

$$\max_{y, Y, z} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{nm \in L} v_{nm}^j(t) y_{nm}^j(t) \quad (1)$$

subject to

$$Y^j(t) + \sum_{nm \in L} y_{nm}^j(t) = Y^j(t-1) \quad \forall (j, t) \in J \times T \quad (2)$$

$$z_n(t) + \sum_{j \in J} \sum_{nk \in L} y_{nk}^j(t) = z_n(t-1) + \sum_{j \in J} \sum_{ln \in L} y_{ln}^j(t-1) \quad \forall (n, nm, t) \in N \times L \times T \quad (3)$$

$$y_{nm}^j(t) \in \{0, 1\} \quad \forall (j, nm, t) \in J \times L \times T \quad (4)$$

$$Y^j(t) \in \{0, 1\} \quad \forall (j, t) \in J \times T \quad (5)$$

$$z_n(t) \geq 0 \quad \forall (n, t) \in N \times T \quad (6)$$

このとき， $y_{nm}^j(t)$ は時点 t の利用者 j の利用権 nm に対する評価値と配分である．

$$y_{nm}^j(t) = \begin{cases} 1 & \text{if 時点 } t \text{ で利用者 } j \text{ に} \\ & \text{利用権 } nm \text{ を配分する} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Y^j(t)$ は時点 t の利用者 j の利用権の購入権である．

$$Y^j(t) = \begin{cases} 1 & \text{if 前の期までに利用者 } j \text{ は} \\ & \text{何も配分されていない} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$z_n(t)$ は時点 t ，ポート n の在庫である．全ての利用者 j および利用権 nm について $y_{nm}^j(0) = 0$ とする．

問題 [P] の目的関数は各時点の各利用者の利用権の評価値の総和となっている．制約条件の意味は以下の通り：制約条件式 (2) は入札者は1日に1回のトリップを行う主体と仮定しているため，1人に2つ以上の利用権を配分しないという条件を時点 t ごとに分割したもの；式 (3) の制約条件は時点 $t-1$ でポート n に入ってくるシェアサイクルの数と時点 t でポート n から出て行くシェアサイクルの数が等しいことを表す．

続いて，図2にモデルの時間進展を示す．各時点では，以下の順にシェアサイクルの返却・貸出が行われるとする．

1. 前の期からの在庫 $z_n(t-1)$ の繰越
2. 前の期のトリップの終了(ポートへの返却)
3. 当該期の貸出
4. 次の期への在庫 $z_n(t)$ の繰越

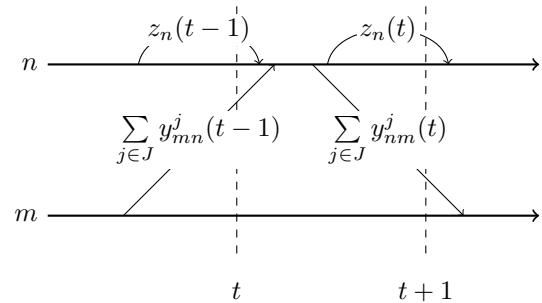


図-2 モデルの時間進展

3. 最適配分問題の新しいLP緩和法

(1) single-minded bit によるLP緩和

[P] を整数計画問題として定式化した．しかし，整数計画問題は計算に膨大な時間がかかってしまうため，LPに緩和する必要がある．原・羽籾 [2] は single-minded bit の場合にはLP緩和問題の解は元の整数計画問題の解と一致することを示した．ここで，single-minded bit とは，各利用者はただ1つの時間帯の利用権にのみ入札するという仮定である．制約条件行列が完全ユニモジュラ行列であれば，LP緩和問題の解は整数解となることが知られているが，原・羽籾 [2] は single-minded bit を仮定した最適配分問題のLP緩和問題の制約行列が完全ユニモジュラ行列であることを証明した．

(2) 新しいLP緩和の方法

しかし，single-minded bit という条件は制約が強すぎる．もっとモデルの制約を緩め，複数の利用権に入札できるようにしなければ実用的とは言えないだろう．最適配分問題がLP緩和できない原因は以下の2つにある．

1. 1人の利用者が時点をまたいで2種類以上の利用権を配分されている。
2. 1人の利用者が時点内で2種類以上の利用権を配分されている。

問題1は1単位未満での購入権の持ち越しを許さないという条件を加えることで防ぐことができる。つまり、時点 t 利用者 j の購入権 $Y^j(t)$ は整数でなければならないという条件を残すだけでよい。問題2は各時点内で1つの起点もしくは終点についてsingle-mindedを仮定することで防ぐことができる。この節では新しい最適配分問題のLP緩和法を数値計算例を交えて紹介する。

まず、複数入札でLPに緩和できない原因を明らかにするため、複数入札を仮定した場合の数値計算例を以下に示す。与えるパラメータは時点 $t \in \{1, 2\}$ 、利用者 $j \in \{1, 2, \dots, 7\}$ 、ポート $n \in \{a, b\}$ 、ポート n の初期配置台数 $z_n(0) = 2$ 、評価値(表1に示す)である。

表-1 複数入札時に入札される全利用者の評価値

入札者	OD	$v(t=1)$	$v(t=2)$
1	$a \rightarrow b$	0.09	0.69
1	$b \rightarrow a$	0.04	0.31
2	$a \rightarrow b$	0.21	0.70
2	$b \rightarrow a$	0.39	0.83
3	$a \rightarrow b$	0.71	0.99
3	$b \rightarrow a$	0.41	0.09
4	$a \rightarrow b$	0.77	0.78
4	$b \rightarrow a$	0.22	0.96
5	$a \rightarrow b$	0.56	0.10
5	$b \rightarrow a$	0.95	0.32
6	$a \rightarrow b$	0.90	0.35
6	$b \rightarrow a$	0.49	0.40
7	$a \rightarrow b$	0.90	0.35
7	$b \rightarrow a$	0.33	0.15

表2に複数入札時の最適配分を示す。利用権は不可分でなければならないにもかかわらず、利用者4に時点1の利用権 ab 及び時点2の利用権 ba が0.5個ずつ配分されていることが分かる。つまり、単に複数入札しようとする、1人の利用者が時点をまたいで異なる利用権を配分される場合を排除できない。

(3) 時点をまたいだ購入の制約

それでは1人の利用者が時点をまたいで2種類以上の利用権を配分される場合を排除するにはどうすればよいか。それは購入権に整数制約をつければよい。購入権にのみ整数制約をつけることで制約条件式(2)から自動的に配分も整数になると推測する。表3に購入権

表-2 複数入札時の最適配分

入札者	OD	$y(t=1)$	$y(t=2)$
1	$a \rightarrow b$		1
2	$b \rightarrow a$		1
3	$a \rightarrow b$		1
4	$a \rightarrow b$	0.5	
4	$b \rightarrow a$		0.5
5	$b \rightarrow a$	1	
6	$b \rightarrow a$	1	
7	$a \rightarrow b$	1	

表-3 購入権に整数制約をつけた場合の複数入札時の最適配分

入札者	OD	$y(t=1)$	$y(t=2)$
1	$1 \rightarrow 2$		1
2	$2 \rightarrow 1$		1
3	$1 \rightarrow 2$		1
4	$2 \rightarrow 1$		1
5	$2 \rightarrow 1$	1	
6	$1 \rightarrow 2$	0.5	
6	$2 \rightarrow 1$	0.5	
7	$1 \rightarrow 2$	1	

にのみ整数制約をつけた場合の最適配分を示す。1人の利用者が時点をまたいで2種類以上の利用権を配分される場合は排除できたように見えるが、今度は同一時点内で1人の利用者が異なる利用権を配分されている。

(4) 同一時点内でのsingle-minded

それでは1人の利用者が同一時点内で異なる利用権を配分される場合を排除するにはどうすればよいか。それには各利用者は同一時点内で1つの起点もしくは終点についてsingle-mindedであればよい。表4に各利用者が各時点で1つの起点もしくは終点についてsingle-mindedである場合の評価値を示す。表5に各利用者が各時点で1つの起点もしくは終点についてsingle-mindedである場合の最適配分を示す。表5から分かるように、各利用者は1種類の利用権のみ配分されている。以上、同一時点内で1人の利用者が2種類以上の利用権を配分される場合を排除できた。

表-4 1つの起点もしくは終点について single-minded と仮定した場合の全利用者の評価値

入札者	OD	$v(t=1)$	$v(t=2)$
1	1 → 2	0.09	0.69
2	1 → 2	0.21	-
2	2 → 1	-	0.83
3	1 → 2	0.71	0.99
4	1 → 2	0.77	-
4	2 → 1	-	0.96
5	1 → 2	-	0.10
5	2 → 1	0.95	-
6	2 → 1	0.49	0.40
7	1 → 2	-	0.35
7	2 → 1	0.33	-

表-5 1つの起点もしくは終点について single-minded と仮定した場合の最適配分

入札者	OD	$y(t=1)$	$y(t=2)$
1	1 → 2		1
2	2 → 1		1
3	1 → 2		1
4	1 → 2	1	
5	2 → 1	1	
6	2 → 1	1	
7	1 → 2		1

(5) 計算時間について

最後に、本研究の LP 緩和法は全ての $y_{nm}^j(t) \in \{0, 1\}$ についての整数計画問題を解くより少ない計算時間で最適配分が求められると予想する根拠として、整数計画問題を解くより未知変数の許容領域が極めて小さいことを示す。以下に本研究の未知変数の許容領域と全ての $y_{nm}^j(t) \in \{0, 1\}$ についての整数計画問題の未知変

数の許容領域を比較する。

$$|T^J| \ll 2^{|J| \times |L| \times |T|}$$

左辺が本研究の未知変数の許容領域、右辺が全ての $y_{nm}^j(t) \in \{0, 1\}$ についての整数計画問題の未知変数の許容領域である。右辺は全ての利用者、利用権、時点について 0 か 1 かを調べるのに対し、左辺は変数 Y があることで、 Y が 1 から 0 に変わるタイミングを全ての利用者について調べるだけでよくなる。この式を見ると、明らかに左辺の方が未知変数の許容領域が極めて小さいことが分かる。これより、整数計画問題をそのまま解くよりも少ない計算時間で最適な配分が求められると予想される。

4. おわりに

本研究では、シェアサイクルの効率的運用のための利用権取引において、最適配分問題の計算時間短縮のため時間分解性に着目し、厳密な single-minded bit よりも利用者の選択の自由度が高い LP 緩和法を提案した。

まず、本研究で扱う最適配分問題を整数計画問題として定式化した。次に、最適配分問題を LP 緩和するための方法として時点をまたいだ購入を許さないという制約、同一時点内で single-minded であるという制約を加えた。最後に元の整数計画問題よりも提案した方法の方が計算時間が短縮できると予想する根拠を示した。

参考文献

- 1) Elliot Fishman, Simon Washington, and Narelle Haworth, “Bike Share: a synthesis of the literature,” *Transport reviews*, vol.33, No.2, pp.148-165, 2013.
- 2) 原 祐輔, 羽籐 英二, “乗捨て型共同利用交通システムに対する利用権取引制度の設計とその解法の提案,” 土木学会論文集 D, 登載決定, 2014.

A Tradable Permit System for an Efficient Bike-sharing and Its Solution

Momoko KATO, Yusuke HARA, Takeshi NAGAE

In this study, we aim to propose an optimized management solution of a bike-sharing using a tradable permit system. The bike-sharing system enables us to access a shared bike at one of many rental ports which are scattered around a city and to return it at any port in the city after a short journey. In the conventional bike-sharing system, some ports may be empty or overcrowded because of unequal demand distribution for shared bikes. In order to avoid the inefficient operation, this study proposes a tradable permit mechanism for bike-sharing. At first, we formulate an optimal allocation problem as an integer programming problem. However, the integer programming problem needs a lot of calculation time. We show that a linear programming relaxation of the integer programming problem reduces calculation time significantly.