

整数計画問題を用いた共有型自動運転 システムの設備サイズの決定手法

藤谷 慶一郎¹・朝倉 康夫²・瀬尾 亨³

¹ 非会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

E-mail: fujiya.k.ab@m.titech.ac.jp

² フェロー会員 東京工業大学名誉教授 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

³ 正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

E-mail: seo.t.aa@m.titech.ac.jp (Corresponding Author)

共有型自動運転車(SAV)を用いたカーシェアリングシステムは将来的に実現することが期待される。本研究では、整数計画問題を用いて、SAV システムの車両の導入数や駐車場の配置数といった設備サイズと車両の運用を同時に決定する最適化手法を提案する。整数計画問題では移動需要を所与とし、利用者と運行者両方のコストの和を最小化する。移動需要が時間とともに順次明らかになる場合には、最適化問題のみで適切な車両運用を実現することが難しいと考えられるが、そのような場合にも初期に想定した需要に対する整数計画問題によって決定した設備サイズを用いることが利用者と運行者のコストの和を減少させる傾向にあることを仮定のネットワーク上での数値実験により確認した。

Key Words: shared mobility, one-way type, automated vehicle, integer programming, facility size

1. はじめに

シェアードモビリティは乗り物を個人で保有せず、利用者間で共有するシステムである。シェアードモビリティは乗り物の返却方法によって 2 種類に分かれる。一つは利用者が乗り物を貸出場所に返却しなければならないラウンド型、もう一つは貸出場所と異なる場所への返却が可能であるワンウェイ型である。ワンウェイ型のシェアードモビリティは、ラストマイル交通を埋める存在としての活躍が期待される。

現在のところ、車両の再配置にかかるコストなどが問題となりワンウェイ型カーシェアリングは普及が進んでいない。しかし、将来的に自動運転技術の活用が進んだ場合、再配置を含め運行にかかるコストが低下しこのようなシステムが一般的なものになる可能性がある。その場合、車両の台数や駐車場の枠数のような設備サイズがシステムのコストのうち大きな割合を占めるようになって考えられる。

ワンウェイ型カーシェアリングに関する既往研究を概観すると、車両の利用者への割り当てや経路の決定に関する問題については多くの研究がなされて

いる。しかし、それらの研究では設備サイズの問題は切り離して考えられる場合が多い^{1), 2)}。

また、設備サイズの決定をふくむ問題についての既往研究では移動需要は静的に与えられている^{3), 4)}。全時間帯の移動需要が一度に与えられるような問題は静的な問題、時刻とともに移動需要が一部ずつ与えられるような問題は動的な問題と呼ばれている⁵⁾。静的な問題はいわば当日の運行は前日以前に行われた予約にのみ基づいて行われると仮定しているようなものである。実際のシステムの運行では事前予約によってのみ運行が行われるとは限らない。したがって、静的な問題によって決定した設備サイズが実際の運行においても有用に働くかという点には疑問が残る。

このような既往研究の状況を踏まえ、本研究の目的を次の 2 点とする。一点はワンウェイ型カーシェアリングサービスの設備サイズを決定する静的な問題を定式化すること、もう一点はその問題によって決定した設備サイズを用いることが、動的に需要を与えて運行を決定する際にも有用性を失わないかを検討することである。

2. 定式化

(1) 問題設定

共有型完全自動運転車(Shared Autonomous Vehicle: SAV)を用いたワンウェイ型カーシェアリングサービスを想定する。ネットワークは Parking lot と呼ばれる箇所と、それらを結ぶリンクによって構成される。SAV はネットワーク上で利用者の有無に関わらずリンクを移動できる。Parking lot では利用者が SAV の貸し出し及び返却を行える。また Parking lot は使用されない SAV の駐車を行うためのスペース (Parking slot)を持つことができる。Parking slot の設置されている数を超えて SAV を駐車させることはできない。利用者は SAV によってのみ移動を行い、移動を行わないときは Parking lot で待機する。一台の SAV には一人のみが乗車することができるものとし、ライドシェアは考慮しない。また、渋滞は考慮せず、リンクコストは常に一定とする。利用者は出発地、目的地、最早出発時刻、最遅到着時刻を持つ。本問題ではすべての利用者についてこれらの情報を所与とする。

(2) 最適化問題

以上の設定のもと、SAV の総走行時間、利用者の総移動時間、利用者の総待ち時間、SAV の導入台数、Parking slot の総設置数の線形和を最小とする整数計画問題を定式化する。

定式化に用いる記号の定義を表-1 に示した。この内、 i 番目の Parking slot の数(容量) P_i 、 k 番目の SAV の時間帯 t でのノードペア ij 間の運行を表す x_{ijt}^k 、 r 番目の利用者の移動を表す y_{ijt}^r が決定変数である。その他は所与とする。

本問題の目的関数は式(1)に示した。第 1 項は SAV の総移動時間、かっこで括られた第 2 項は乗客の総移動時間及び待機時間、第 3 項は SAV の導入台数、第 4 項は Parking slot の設置数を表している。後述の実験において各項の重み係数は、単位を貨幣価値に揃えるための値とした。

Minimize

$$\begin{aligned}
 & \gamma_1 \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{i \in G} \sum_{j \in G | j \neq i} x_{ijt}^k c_{ij} \\
 & + \gamma_2 \left(\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{i \in G} \sum_{j \in G | j \neq i} y_{ijt}^r c_{ij} \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{r \in R} \sum_{t \in T | t \leq \tau^r} y_{l^r t}^r r_t \right) \\
 & + \gamma_3 \sum_{k \in K} \sum_{i \in G} \sum_{j \in G} x_{ij}^k \\
 & + \gamma_4 \sum_{i \in G} P_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{i \in G} x_{iht}^k = \sum_{j \in G} x_{hjt}^k \tag{2}$$

$$(\forall h \in G, \forall t' \in [1, t_e - 1], \forall k \in K) \\
 \sum_{i \in G} \sum_{j \in G} x_{ijt}^k \leq 1 \tag{3}$$

$$\sum_{i \in G} x_{iit}^k = 1 \tag{4}$$

$$(t = t_e - c_{ii}, \forall k \in K)$$

$$\sum_{i \in G} y_{iht}^r = \sum_{j \in G} y_{hjt}^r \tag{5}$$

$$(\forall h \in G, \forall t' \in [1, t_e - 1], \forall r \in R)$$

$$\sum_{j \in G} y_{ijt}^r = 1 \tag{6}$$

$$(i = l^r, t = \tau^r, \forall r \in R)$$

$$\sum_{i \in G} y_{ijt}^r = 1 \tag{7}$$

$$(j = l^r, t = \tau^r - c_{ij}, \forall r \in R)$$

$$\sum_{i \in G | i \neq l^r} \sum_{j \in G} y_{ijt}^r = 0 \tag{8}$$

$$(t = \tau^r, \forall r \in R)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{j \in G | j \neq l^r} y_{ijt}^r = 0 \tag{9}$$

$$(t = \tau^r - c_{ij}, \forall r \in R)$$

$$\sum_{r \in R} y_{ijt}^r \leq \sum_{k \in K} x_{ijt}^k \tag{10}$$

$$(\forall i, j \in G (i \neq j), \forall t \in T)$$

$$\sum_{k \in K} x_{iit}^k \leq P_i \tag{11}$$

$$(\forall i \in G, \forall t \in T)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in G} x_{ijt}^k \leq P_i \tag{12}$$

$$(\forall i \in G, t = 0)$$

$$x_{ijt}^k \in \{0, 1\} \tag{13}$$

$$(\forall k \in K, \forall i, j \in G, \forall t \in T)$$

$$y_{ijt}^r \in \{0, 1\} \tag{14}$$

$$(\forall r \in R, \forall i, j \in G, \forall t \in T)$$

$$P_i \in \{0\} \cup N \tag{15}$$

$$(\forall i \in G)$$

式(2)から式(4)は SAV の移動に関する制約条件式である。式(2)は SAV のフロー保存則を表している。式(3)は $t = 0$ において全 SAV の集合 K に含まれる SAV について、導入されいづれかの Parking slot に配置されるか、導入されないかのどちらかになることを表している。式(4)は最終タイムステップのノードに伸びるリンクはすべて待機/駐車リンクとするためのものである。これは Parking slot の制約を用いる上で必要となるものである。

式(5)から式(10)は利用者の移動に関する制約条件

式である。式(5)は利用者のフロー保存則を表している。式(6)は利用者 r が最早出発時刻 τ_r において、出発 Parking slot l_r にいることを表しており、式(7)は最遅到着時刻 τ_r' までには到着 Parking slot l_r' への移動を完了していることを表している。

式(8)と式(9)は、利用者 r が最早出発時刻 τ_r において出発 Parking slot l_r 以外には存在しないことと、最遅到着時刻 τ_r' において到着 Parking slot l_r' 以外には存在しないことをそれぞれ表している。式(10)は利用者は SAV に乗車しなければ Parking lot 間を移動できないことを表している。

式(11)と式(12)は Parking slot の設置数に関する制約条件式である。式(11)は運行中の各時刻の各 Parking lot において、SAV の駐車数は Parking slot の設置数以下とならなければならないことを表している。式(12)は各 Parking lot における SAV の初期配置数について同様の条件を表している。

式(13)から式(15)は決定変数の値域の制約を表している。

表-1 数式中の記号

G	全 Parking lot の集合
K	全 SAV の集合
R	全利用者の集合
T	タイムステップの集合
t_e	最終タイムステップ
c_{ij}	Parking lot $i, j \in G$ 間のリンクコスト
τ^r	利用者 $r \in R$ の最早出発時刻
τ'^r	利用者 $r \in R$ の最遅到着時刻
l^k	利用者 $r \in R$ の出発地 Parking lot
l'^k	利用者 $r \in R$ の目的地 Parking lot
P_i	Parking lot $i \in G$ の Parking slot の数
x_{ijt}^k	SAV k が Parking lot i, j 間のリンクを、タイムステップ t に使用した場合は 1, そうでない場合は 0 となるバイナリ変数
y_{ijt}^r	利用者 r が Parking lot i, j 間のリンクを、タイムステップ t に使用した場合は 1, そうでない場合は 0 となるバイナリ変数
γ_n	重みパラメータ ($n = 1, 2, 3, 4$)

3. 数値シミュレーションによる実験

2章では SAV を用いたワンウェイ型カーシェアリングサービスについて、移動需要を静的に与えた際に、コストを最小化する設備サイズと車両の運行を求める最適化問題を定式化した。この最適化問題に一日の移動需要を入力し、整数最適化問題のソルバーによって求解すると最適な設備サイズを得ること

ができることは確認できているが、その詳細は紙幅の都合上省略する。しかし、1章で述べたように静的な問題により得られた設備サイズが、時々刻々の需要が与えられ、動的に運行を決定する際にも有用かどうかは検討する必要がある事項である。

本章ではその検証のための二つの実験について述べる。実験 1 は最適化問題の解の設備サイズを用いることが、コストを減少させる傾向にあることを検証するための実験である。実験 2 は、需要パターンが日々変動する場合において、最適化問題の解およびその設備サイズを用いた際のコストの変動の安定性について検証するための実験である。

(1) 実験 1

a) 実験手法

実験の流れは図-1 に示した通りである。初めに最適化問題の与件となる、ネットワークと移動需要を設定する。用いたネットワークは図-2 に示したものである。移動需要は仮想的なパターンをポアソン分布に基いて作成した。需要方向の偏りを表現するために Parking lot 10 を出発するトリップの発生確率を他の 5 倍とした。移動需要は、全体的なトリップの発生確率を変え 9 パターン作成した。

次に、一つの移動需要パターンを静的に与えて、最適化問題を解いた。これにより設備サイズの最適解を得た。なお、求解には Gurobi Optimizer を用いた。

こうして決定した設備サイズを用いて運行シミュレーションを行った。シミュレーションにおいては移動需要は動的に与え、次のようなルールで運行を決定した。各タイムステップごとに与えられた移動需要を即座にいずれかの SAV に割り当てる。各 SAV は割り当てられた移動需要をキューに保持し、順番に処理する。キューに移動需要がない SAV は現在の Parking lot に駐車する。Parking slot が埋まっている場合は別の Parking lot へ回送する。

移動需要を割り当てる SAV および回送先 Parking lot の決定ルールには、手法 A と手法 B の二種類を用いた。手法 A は、いずれも無作為に決定する手法である。対して、手法 B は、移動需要は利用者の待ち時間および迎車にかかるコストの重み付き和が最小となる SAV に割り当て、回送先は到着するタイムステップに空き Parking slot がある Parking lot の中で最も近いものを選ぶという手法である。

その後、最適解を用いた場合との比較を行うため、最適解の設備サイズから、Parking slot 10 のみの SAV 配置数と Parking slot 設置数を 0 から 20 までの範囲で変化させ、それぞれの場合で運行シミュレーションを行った。

最後に、各設備サイズを用いた場合のコストを、シミュレーションの結果からそれぞれ計算した。コストの内訳は SAV が利用者をおせて運行するコスト、SAV が客を迎車するコスト、Parking slot が埋まっていたために SAV が回送するコスト、利用者の移動時間、利用者の待ち時間、SAV の導入コストおよび Parking slot の設置コストである。

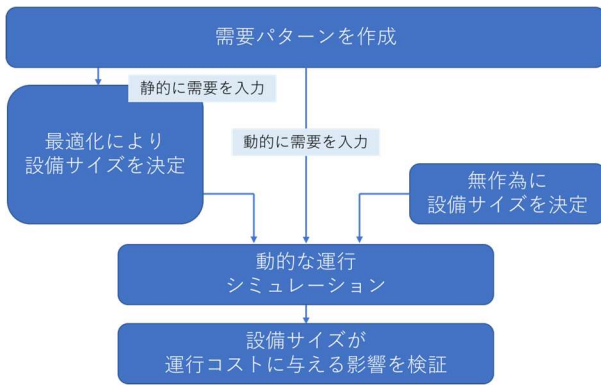


図-1 実験1の流れ

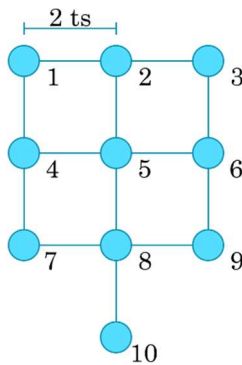


図-2 実験において用いたネットワーク

b) 実験結果・考察

まず、最適化によって得られた設備サイズについて述べる。表-2に需要パターン8を入力に用いた場合のParking slot 10の最適解の設備サイズを示した。SAVの導入台数とParking slotの設置数はすべてのParking lotにおいて等しくなった。Parking lot 10とその付近のParking lotの設備サイズは他のParking lotよりも大きい傾向にあった。これらの特徴は他の8つの需要パターンでも同様であった。

表-2 需要パターン8を用いたときの最適解

Parking lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SAV	1	1	1	3	2	3	2	3	4	5
Parking slot	1	1	1	3	2	3	2	3	4	5

表-3 設備サイズの最適解とシミュレーション時コスト最小の設備サイズ

需要パターン	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最適解	3	5	3	3	1	2	8	5	7
方法 A	11	16	15	6	4	5	20	18	20
方法 B	2	3	3	4	2	3	4	5	8

続いて、運行シミュレーションの結果について述べる。図-3、図-4に手法A,Bそれぞれを用いた場合の、需要パターン8のシミュレーション結果を示した。

Parking slot 10の設備サイズを増加させていったときの、各コストの変化についてみると、SAV旅行時間と利用者旅行時間については渋滞を考慮しないため、変化しなかった。SAV導入コストとParking slot設置コストはそれらを増やすのに比例して自明に増加した。SAVの迎車コストや回送コストは設備サイズの増加に伴って増加する傾向にあった。ただし、総コストに対する割合は他のコストに比べて小さかった。一方で利用者待ち時間は設備サイズの増加に伴って減少する傾向にあった。その減少幅は次第に小さくなり、下に凸な曲線を描く傾向にあった。これにより総コストに極小値が発生するケースが多かった。

表-3に、Parking slot 10の最適解の設備サイズと、運行シミュレーションで最も総コストが低くなったときの設備サイズ(SAVの配置台数=Parking slot設置数)をまとめた。運行の決定ルールに手法Bを用いた場合は、移動需要パターン9組のうち、Parking slot 10の最適解の設備サイズと、総コストを最小化したその差が1以下のものが7組を占めた。最適解の設備サイズは、運行決定に手法Bを用いて動的な運行を行う際に総コストが最小になる設備サイズの近くに得られたと考えられる。

一方で、手法Aを用いた場合は、すべての需要パターンで、総コストが最小になる設備サイズは最適解のものより大きくなった。手法Aは移動需要や回送先のParking lotを無作為に割り当てるものであり、これは運行の決定方法として非常に効率の悪いものであるといえる。これに対して、静的最適解の設備サイズは、需要が静的に与えられ最高の効率の運行ができることを前提としたものである。効率の悪い手法Aを用いるには静的最適解の設備サイズは小さいものであったと考えられる。

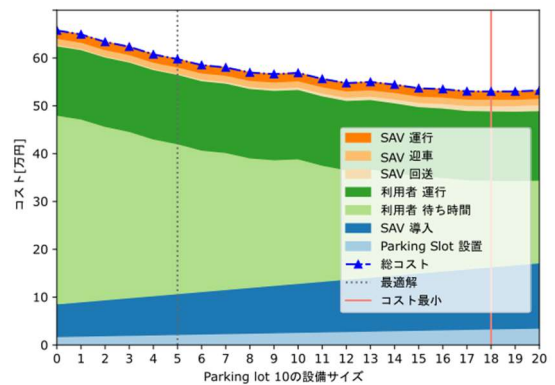


図-3 手法Aを用いた場合の需要パターン8のシミュレーション結果

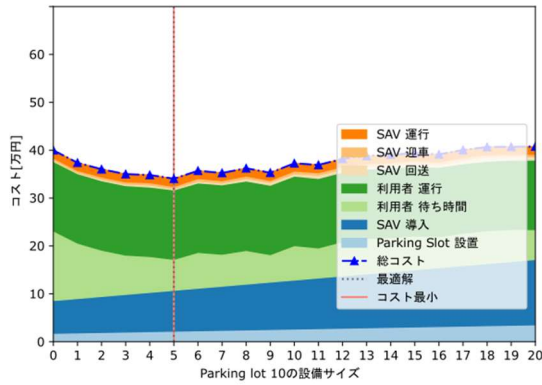


図-4 手法 B を用いた場合の需要パターン 8 のシミュレーション結果

(2) 実験 2

a) 実験手法

はじめに、与件となるネットワークと移動需要を設定する。ネットワークは実験 1 と同じものを用いた。移動需要については、同じポアソン分布から乱数を発生させ 14 パターン生成した。これは 14 日間の需要を表現したものである。

次に、14 パターンの移動需要をそれぞれ最適化問題に与えた。これにより、14 日のうちある一日の移動需要に最適化された 14 パターンの設備サイズが得られた。

こうして得られた 14 パターンの設備サイズそれ

ぞれで、14 日分の運行シミュレーションを行い、各種コストを計算した。

b) 実験結果・考察

まず、最適化によって得られた設備サイズの変動について述べる。表-4 に各日の需要パターンを最適化問題に入力した際に得られた SAV および Parking slot のすべての Parking lot での総数、需要パターンの発生トリップ数を示した。また、各項目の変動係数を示した。変動係数は標準偏差を算術平均で除したものであり、数値のばらつきを比較することができる。

需要の多寡を表す発生トリップ数の変動係数が 7.06% であったのに対し、最適化問題の解である SAV や Parking slot の総数の変動係数は 8.20% となった。これは最適化問題の解のばらつきが、入力力のばらつきよりも大きくなったことを示している。

次に、運行に用いる設備サイズの違い、ないしその設備サイズを得るために入力した需要パターンによる運行コストの変化について述べる。表-5 には 14 パターンの得られた設備サイズに対してそれぞれシミュレーションを行ったときの、各コストの 14 日間の総和の平均値および変動係数を示した。総コストの変動係数は 1.82% と、得られた設備サイズの変動係数 8.20% と比較して小さくなった。コストの各項目に着目すると SAV の回送コストおよび利用者の待ち時間の変動係数は設備サイズの変動係数よりも大きくなった。

表-4 14 通りの需要パターンによって得られた設備サイズの最適解

需要パターン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	変動係数 [%]
SAV	31	40	37	40	40	40	32	39	36	33	37	38	34	37	8.20
Parking slot	31	40	37	40	40	40	32	39	36	33	37	38	34	37	8.20
発生トリップ数	121	154	126	147	133	154	133	143	128	133	141	146	137	133	7.06

表-5 14 通りの設備サイズを用いて 14 日運行を行った際のコストとそのばらつき

	平均値 [万円]	標準偏差 [万円]	変動係数 [%]
総コスト	737	13.41	1.82
SAV運行	32	0	0
SAV回送	6	1.21	20.2
SAV迎車	11	0.50	4.51
利用者運行時間	287	0	0
利用者待ち時間	181	28.42	15.7
SAV導入	175	14.35	8.20
Parking slot設置	45	3.69	8.20

図-5 に、最適化問題により設備サイズを決定するために入力した需要パターンの発生トリップ数と総コストの散布図を示した。相関係数は 0.19 となり、ほとんど相関は見られなかった。最適化問題に与える需要の大小は確率的な変動の範囲では、週単位の総コストに大きな影響は与えないと考えられる。

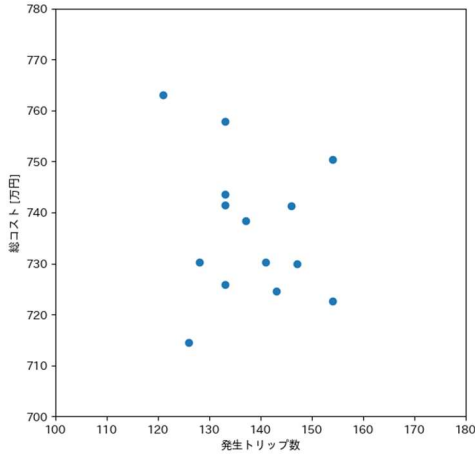


図-5 設備サイズを得るために入力した需要パターンの発生トリップ数と 14 日間のシミュレーションの総コストの分布

表-5 において分散の大きさを考慮すると、総コストに影響を与えているのは、主に利用者待ち時間と設備サイズ (SAV 導入数, Parking slot 設置数) と考えられる。図-6 に設備の導入にかかったコストと利用者の待ち時間の散布図を示した。相関係数は -0.93 となり、強い負の相関を示した。最適化問題に入力する需要の大小は総コストには大きな影響を与えないものの、コストの内訳には影響を与えていると考えられる。需要の大きい日のパターンをを入力した場合の設備サイズを用いると、設備にかかるコストは大きくなる代わりに利用者の待ち時間が減少し、需要の小さい日のパターンを用いればその逆の結果が得られると考えられる。

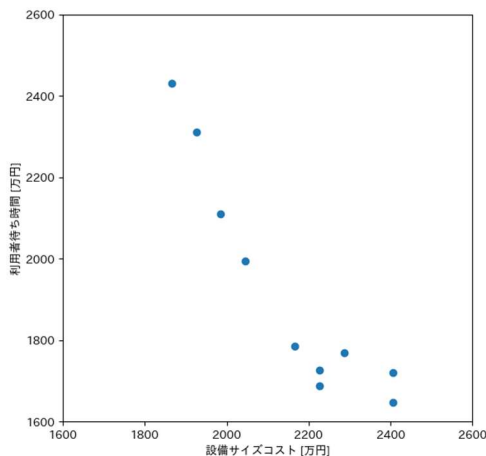


図-6 設備サイズに関するコストと利用者待ち時間の分布

4. 結論

共有型自動運転車 (SAV) を用いたワンウェイ型カーシェアリングサービスにおいて、SAV の導入台数や駐車スペース (Parking slot) の設置数のような設備サイズを、整数計画問題によって決定する手法を考案した。

また、この手法によって決定した設備サイズを、動的に運行を決定する場合に用いることの、有用性をシミュレーションを用いた数値実験によって検討した。実験により、静的最適解の設備サイズと動的な運行シミュレーション上で総コストが最小になる設備サイズが近いものとなる場合があることを確認した。ただし効率の悪い運行決定手法を用いる場合はその限りではないことも分かった。また、設備サイズのうち、Parking slot の設置数は総コストにほとんど影響を与えず、総コストに大きな影響を与えているものは SAV の導入台数であることが分かった。さらに、日毎に需要が変動する場合、どの日の需要を最適化問題に入力しても、期間の総和を取れば総コストに差はあまり生じないことが分かった。ただし、コストの内訳には影響を与え、設備サイズにかかるコストと利用者の待ち時間がトレードオフ関係にあることが分かった。

REFERENCES

- 1) 山田匡規, 木村 雅志, 高橋 直希, 吉瀬 章子: ラストマイル・モビリティシェアリング最適化モデルによる運用分析, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 63, No. 7, pp. 386-393, 2018.
- 2) 伊藤祥汰, 内田敬: 車庫配置変数を含むライドシェアリング運行最適化問題の定式化と解集合限定法, 交通工学研究発表会論文集, Vol. 40, pp. 567-572, 2020.
- 3) 中村謙太, 溝上章志, 橋本淳也: ワンウェイ型カーシェアリングシステムの導入可能性と最適ステーション配置, 土木学会論文集 D3, Vol. 73, No. 3, pp. 135-147, 2017.
- 4) Seo, T. and Asakura, Y: Multi-objective linear optimization problem for strategic planning of shared autonomous vehicle operation and infrastructure design. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 23, pp. 3816-3828, 2022.
- 5) Jean-François Cordeau and Gilbert Laporte: The dial-a-ride problem: models and algorithms, Annals of Operations Research, Vol. 153, No. 1, pp. 29-46, 2007