

手動運転車と SAVs 混在下における SAV 走行区間設計問題の構築

嶋本 寛¹

¹正会員 宮崎大学准教授 工学部工学科土木環境工学プログラム (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)
shimamoto@cc.miyazaki-u.ac.jp

自動運転技術およびマッチング技術の進展により、近い将来に共有自動運転車 (Shared Autonomous Vehicles; SAVs) が新たな交通手段として実用化されることが期待されている。しかし、自動運転技術が成熟していない時点では、SAVs は自動運転車両が安全に通行できる設備が完備された専用区間の通行に限定されることが想定される。本研究では、道路上で手動運転車と SAVs が混在し利用者はいずれかの交通手段で移動する状況を想定し、SAVs が走行可能な区間および SAVs 導入台数を決定する問題を構築する。SAVs が走行区間のみを通過して、サービス開始から終了までの一連の運行を行うためには、走行区間が連続している必要がある。本研究では、ある前提条件のもと走行区間の連続条件を簡易な制約条件により記述できることを示す。最後に、構築するモデルを仮想ネットワークに適用した結果を示す。

Key Words: Shared Autonomous Vehicles (SAVs), Running lane desing problem, Mixed integer programming

1. はじめに

IoT, AI などをコア技術とする第 4 次産業革命ともよばれる大きなイノベーションが生まれており、交通分野でも MaaS (Mobility as a Service) などの新たなサービスによるモビリティの確保が期待されている。諸外国では Uber や Lift などの配車サービス (ride-hailing) が広く展開されており、わが国でも AI オンデマンド乗合タクシーとしていくつかの自治体で実証実験が行われている。今後は自動運転車両を導入し、より安価なモビリティサービスの提供に繋がることも想定されよう。しかし、現時点では完全自動運転技術は確立されていない。完全自動運転技術が確立されるまでの間は、安全性の観点から自動運転車両は磁気マーカやセンサー等の機器が埋め込まれた区間の走行に限定される可能性も考えられる。

以上を踏まえ、本研究では道路上において手動運転車 (以下, HDVs; Human Driven Vehicles) と指定された区間しか走行できない共有型自動運転車 (以下, SAVs; Shared Autonomous Vehicles) が混在し、移動者はいずれかの手段で目的地まで移動する状況を想定し、SAVs が走行可能な区間と SAVs 導入台数を決定するモデルを、システム最適化問題として構築する。なお、デポからの回送を考慮しないモデルと考慮するモデルの 2 種類のモデルを構築するが、回送を考慮するモデルにおいては

SAVs が走行区間のみを通過してサービス開始から終了までの一連の運行を行うためには、デポから走行区間が連続している必要がある。本研究では、ある前提条件のもとでは走行区間の連続性条件を簡易な制約条件により記述できることを示す。最後に、構築したモデルを仮想ネットワークに適用する。

ライドシェアや自動運転などの新しい交通サービスの導入可能性を検討した研究として、香月ら²⁾は東京都市圏パーソントリップ調査で得られたトリップの時空間情報やトリップ属性のデータを用いて、自動運転型ライドシェアサービスのマッチング成立可能性や自動車トリップの削減可能性を検討している。田村ら³⁾は、群馬県パーソントリップ調査データに対してマッチング手法を適用し、ミクロな視点でのライドシェアの成立可能性を分析している。Seo et al.³⁾は、共有型自動運転車両 (SAV) システムの最適化モデルを、時空間ネットワーク上における多目的最適化問題として定式化している。松尾・嶋本⁴⁾は、Solo Driver (SD), Ridesharing Driver (RD), Rider (R) の 3 主体を設定し、時空間ネットワーク上における各主体のシステム最適条件を満たすフローを算出するモデルを構築している。さらに、トリップ単位で需要を与える「トリップベースモデル」と、主体の 1 日全体における移動および希望する活動場所および時刻が与えられたときの行動を記述する「アクティビティベース

モデル」の2種類のモデルの解の比較を行っている。

これらの研究では、各車両の走行レーンの議論はされていない。自動運転車両の専用走行レーン敷設に関しては、シミュレーションモデルによる評価^{5) 6)}、ネットワーク均衡モデルを内包した2段階最適化問題による敷設箇所の決定⁷⁾、等の研究がある。しかし、これらの研究では共有型車両を考慮していない。

2. モデルの定式化

(1) モデルの概要と前提条件

a) モデルの概要

本研究では、自動運転技術が未熟であるため自動運転車両は指定された区間のみ走行可能である社会を想定する。すべての移動者は手動運転車か共有型自動運転車（以下、SAVs）のいずれかの交通手段で移動するとき、システム最適状態を満たすSAVs走行区間とSAVs投入台数を決定する問題を構築する。なお、以下ではHDVsを運転して移動する者を「HDVs運転者」、SAVsで移動する者を「SAVs乗客」とよび、「HDVs運転者」と「SAVs乗客」をあわせて「移動者」とよぶことにする。

SAVsは車両の存在するデポからサービス開始場所まで、およびサービス終了場所からデポまで回送する必要がある。回送距離はデポおよびサービス開始・終了場所に依存するため、SAVsの回送距離を考慮しないモデルを「回送なしモデル」とする。さらに、SAVsのデポの位置を外生的に与え、SAVsの回送距離を考慮するモデルを「回送ありモデル」とする。

b) モデルの前提条件

まず、「回送なしモデル」と「回送ありモデル」に共通の前提条件を以下に述べる。移動者およびSAVsのフローの記述に関して、以下の前提条件を設ける。

- ・ 移動者はHDVs、SAVsのいずれかの手段を利用する。HDVsでは、相乗りは行わない。
- ・ HDVs運転者とSAVs乗客は、移動途中に入れ替わることはできない。
- ・ すべての移動者の需要（出発地・到着地および出発・到着時刻制約）は既知であるとする。
- ・ すべての移動者は、到着時刻制約に関わらず目的地になるべく早く到着できることが望ましいと考えている。
- ・ 各リンクには容量が存在し、HDVsとSAVsの合計は容量を超過することができない。
- ・ 各ノードにも容量が存在し、HDVsとSAVsの待機台数も容量以下である。

次に、HDVs運転者、SAVs乗客およびSAVs車両にかかるコストに関して、以下の前提条件を仮定する。

- ・ HDVs運転者は、貨幣換算された移動時間コストと

走行距離に比例する車両走行コスト（ガソリン代など）のコストがかかる。

- ・ SAVs乗客は、移動時間コストのみがかかる。
- ・ SAVs車両は、車両走行コストのみがかかる。

最後に、SAVs走行区間の指定に関して以下の前提条件を仮定する。

- ・ SAVs車両は指定された区間のみを走行可能である。
- ・ HDVsは、SAVsの指定走行区間も含めてすべての区間を走行可能である。
- ・ 意思決定者は、SAVsの走行区間および投入するSAVs台数を決定する。
- ・ SAVsの走行区間の指定には、リンク長に比例したコストがかかる。また、SAVsの走行区間コストに関する予算制約が存在する。

さらに、「回送ありモデル」では以上で述べた前提条件に加えて、以下の前提条件も仮定する。

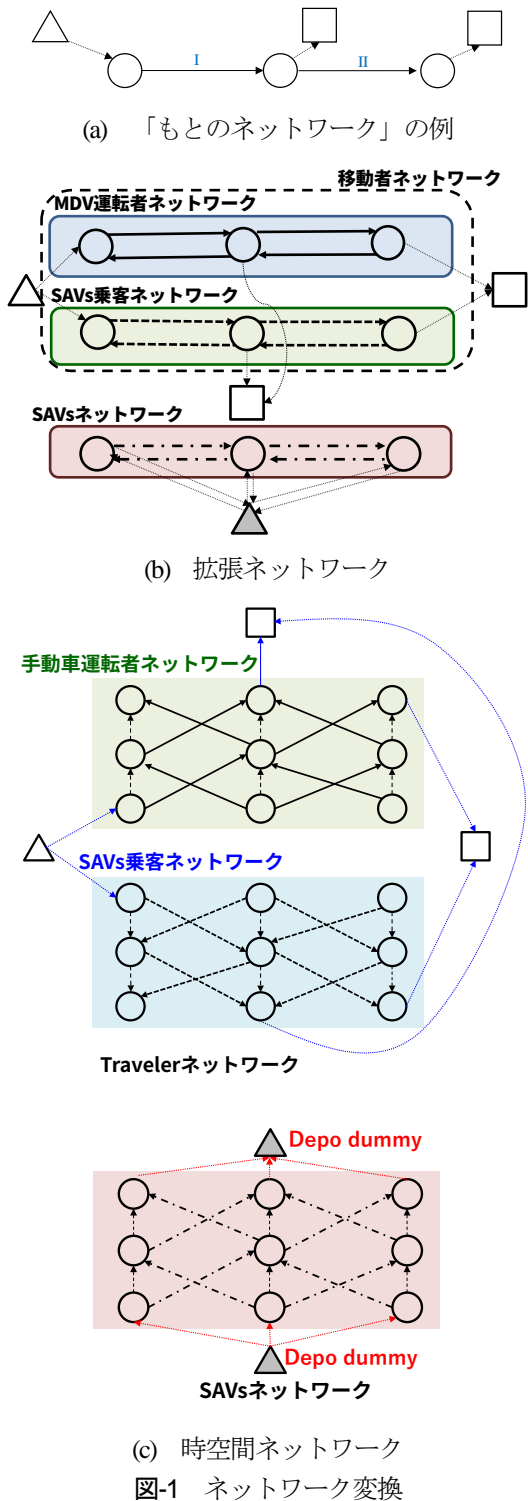
- ・ SAVs車両のデポを1箇所のみとし、その位置を外生的に与える。
- ・ （一方通行でない限り）隣接するノード間の両方向を同時にSAVs走行区間として指定する。

なお、上記の2つ目の前提条件は、SAVs車両がデポから走行区間のみを自走してデポにたどり着けるような制約条件を簡便な式で表すために設定している。制約条件の設定方法は、(5)節で述べる。

(2) 時空間ネットワークの構築

移動者のフロー、SAVsのフローをそれぞれ記述するため、図1(a)に示す「もとのネットワーク」を図1(b)に示すように「移動者ネットワーク」と「SAVsネットワーク」の2種類のネットワークとして記述する。ただし、前節で述べたように、「HDVs運転者」と「SAVs乗客」は移動途中で入れ替わることができないため、「移動者ネットワーク」をさらに「HDVs運転車ネットワーク」と「SAVs乗客ネットワーク」の2種類のネットワークとして記述する。「SAVsネットワーク」におけるセントロイドは、デポを表すダミーノード（SAVsデポノード）として表し、「回送なしモデル」ではSAVsデポノードから「もとのネットワーク」におけるすべてのノードをつなぐアクセス・イグレスリンクを作成するが、「回送ありモデル」ではSAVsデポノードから「もとのネットワーク」におけるデポが位置するノードのみをつなぐアクセス・イグレスリンクを作成する。そして、図1(b)のネットワークを図1(c)に示す時空間ネットワーク（STEN; Space-Time Extended Network）⁴⁾に拡張する。

時空間ネットワークにおけるノードは、2次元ネットワークに存在するノードを時間帯ごとに定義したものであり、 (i, t) （ただし i は2次元ネットワークにおけるノード番号、 t はノードの時間帯）のように表記できる。



本研究では、需要が発生、集中する「起点ノード」、 「終点ノード」とそれ以外のノードである「途中ノード」の3種類のノードを設定する。リンクに関しては、「移動リンク」と「アクセスリンク」、「待機リンク」の3種類のリンクを定義する。「移動リンク」は車両による移動を表すリンクであり、移動リンクの流出ノード、流入ノードをそれぞれ (i, t_1) 、 (j, t_2) とすると $t_2 = t_1 + c_{ij}$ が成り立つ。なお、 c_{ij} は2次元ネットワークにおける ij 間の移動時間であり、本研究では2次元ネットワーク上

におけるノード間移動時間は時間帯幅 Δt の整数倍であるとする。「待機リンク」は各ドライバーあるいはライダーの活動を希望しない場所 i において隣接するノード (i, t) および $(i, t + \Delta t)$ を結ぶリンクであり、時刻 t から $t + \Delta t$ までの間に待機することを表している。「アクセスリンク」は、移動者および SAVs の起点ノードあるいはデポノードからのアクセスを表すリンクである。「移動者ネットワーク」では、各ノードの希望出発時刻にのみアクセスリンクを作成し、「SAVs ネットワーク」では図 1(b)で作成したアクセスリンクに対応するリンクを時刻 $t = 1$ においてのみ作成する。「イグレスリンク」は、移動者および SAVs の終点ノードあるいはデポノードへのイグレスを表すリンクである。「移動者ネットワーク」では、各ノードの到着出発時刻にのみイグレスリンクを作成し、「SAVs ネットワーク」では図 1(b)で作成したイグレスリンクに対応するリンクを時刻 $t = NT$ (分析対象の最終時間帯) においてのみ作成する。

(3) 記号表記

本研究で用いる記号表記は、以下の通りである。

a) STENに関する変数

- X : 主体の種類 ($D \cup P \cup SAV$)
- D : HDVs 運転者
- P : SAVs 乗客
- T : 移動者 ($D \cup P$)
- SAV : SAV
- Δt : 時間帯幅
- NT : 計算対象時間帯数
- A_1^X : 種類 X の STEN における移動リンク集合
- A_2^X : 種類 X の STEN における待機リンク集合
- A_3^X : 種類 X の STEN におけるアクセスリンク集合
- A_4^X : 種類 X の STEN におけるイグレスリンク集合
- A : STEN における全リンク集合
- I^X : 種類 X の STEN におけるノード集合
- R : STEN における起点集合
- S : STEN における終点ノード集合
- i_a : リンク a の流入ノード
- j_a : リンク a の流出ノード
- q_{rs} : STEN における rs 間の需要
- d_1, d_2 : SAVs の起点、終点デポを表すノード

b) STEN と「もとのネットワーク」の対応を表す変数

- L : 「もとのネットワーク」におけるリンク集合
- $n(i)$: $i \in I$ の「もとのネットワーク」におけるノード番号
- $a_{1,lt}^X$: 「もとのネットワーク」におけるリンク l 、時間帯 t に流出する、種類 X の STEN に対応する移動リンク
- $a_{2,lt}^X$: 「もとのネットワーク」におけるリンク l 、時間帯 t に流出する、種類 X の

STENに対応する待機リンク

c) フロー, SAVs 走行区間に関する決定変数

- x_a^s : 目的地を s とするリンク $a \in A$ の旅客 (HDVs 運転者・SAVs 乗客) フロー
 y_a : リンク $a \in A$ の SAVs フロー
 z : 投入する SAVs 台数
 ϕ_l : リンク $l \in L$ が SAVs 走行区間として指定されれば 1, そうでなければ 0 をとるバイナリー変数

d) パラメータ

- α_1 : 移動時間の時間価値
 α_2 : 待ち時間の時間価値
 t_a, t_l : リンク $a \in A$ およびリンク $l \in L$ の旅行時間
 β^{TC} : 単位距離あたりの移動コスト (ガソリン代)
 θ_{MND} : HDVs の保有コスト (円/台・日)
 θ_{SAV} : SAVs の保有コスト (円/台・日)
 BGT : SAVs 走行区間を指定するための上限予算
 κ : SAVs の乗車定員
 CR_l : もとのネットワーク」における移動リンク l の容量
 CP_l : もとのネットワーク」における待機リンク l の容量

(4) STEN リンクコスト

以上で述べた仮定および STEN の設定により, STEN における移動リンク, 待機リンク, アクセスリンク, イグレスリンクのコストは, それぞれ以下のように設定できる.

a) 移動リンク

式(1)に示すように, HDVs 運転者の移動には移動時間コスト ($\alpha_1 t_a$) と車両走行コスト ($\beta^{TC} t_a$) が負荷され, SAVs 乗客および SAVs の移動リンクには, それぞれ移動時間コスト, 車両走行コストのみが負荷される.

$$c_a^s = \begin{cases} \alpha_1 t_a + \beta^{TC} t_a & (\forall a \in A_1^D) \\ \alpha_1 t_a & (\forall a \in A_1^P) \\ \beta^{TC} t_a & (\forall a \in A_1^{SAV}) \end{cases} \quad (1)$$

b) 待機リンク

移動者は, 到着時刻制約に関わらず目的地になるべく早く到着することが望ましいと仮定しているため, 待機リンクコストは式(2)および式(3)のように表される.

$$c_a^s = \begin{cases} w_a^s & (\forall a \in A_2^D \cup A_2^P) \\ 0 & (\forall a \in A_2^{SAV}) \end{cases} \quad (2)$$

ただし,

$$w_a^s = \begin{cases} \alpha_2 \Delta t & (n(s) \neq n(j_a)) \\ 0 & (n(s) = n(j_a)) \end{cases} \quad (3)$$

c) アクセスリンク・イグレスリンク

本研究では, HDVs の保有コスト (日単位の購入費および維持費) を式(4)に示すようにアクセスリンクに負

荷する. また, イグレスリンクのコストは式(5)に示すようにすべて 0 である.

$$c_a^s = \begin{cases} \theta_{MND} & (\forall a \in A_3^D) \\ 0 & (\forall a \in A_3^P \cup A_3^{SAV}) \end{cases} \quad (4)$$

$$c_a^s = 0 \quad (\forall a \in A_4^D \cup A_4^P \cup A_4^{SAV}) \quad (5)$$

なお, 次節で示すように SAVs の導入コストを目的関数に明示的に含めるため, SAVs の保有コストはアクセスリンクには含めない.

(5) 定式化

a) 回送なしモデル

SAVs のデポをダミーノードとして扱い回送距離を考慮しないとき, SAVs 車両導入台数および走行区間を決定するシステム最適問題は, 以下に示す総コスト最小化問題として定式化できる.

$$\min_{x,y,z,\phi} Z = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A^T} c_a^s x_a^s + \sum_{a \in A^{SAV}} c_a y_a + \theta_{SAV} z \quad (6)$$

s.t.

$$\sum_{a \in OUT(r)} x_a^s - \sum_{a \in IN(r)} x_a^s = q_{rs}, \forall r \in R, s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{a \in OUT(s)} x_a^s - \sum_{a \in IN(s)} x_a^s = -\sum_{r \in R} q_{rs}, \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{a \in OUT(i)} x_a^s - \sum_{a \in IN(i)} x_a^s = 0, \forall i \in \{I^T - R - S\} \quad (9)$$

$$\sum_{a \in OUT(d_1)} y_a - \sum_{a \in IN(d_1)} y_a = z \quad (10)$$

$$\sum_{a \in OUT(d_2)} y_a - \sum_{a \in IN(d_2)} y_a = -z \quad (11)$$

$$\sum_{a \in OUT(i)} y_a - \sum_{a \in IN(i)} y_a = 0, \forall i \in \{I^{SAV} - d_1 - d_2\} \quad (12)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_{1,lt}}^s + y_{a_{1,lt}}^{SAV} \leq CR_l, \forall l \in L, t \in NT \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_{2,lt}}^s + y_{a_{2,lt}}^{SAV} \leq CP_l, \forall l \in L, t \in NT \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_{1,lt}}^s \leq \kappa y_{a_{1,lt}}^{SAV}, \forall l \in L, t \in NT \quad (15)$$

$$y_{a_{1,lt}}^{SAV} \leq CR_l \cdot \phi_l, \forall l \in L, t \in NT \quad (16)$$

$$\sum_{l \in L} t_l \phi_l \leq BGT \quad (17)$$

$$x_a^s \geq 0, \forall a \in A^T, s \in S \quad (18)$$

$$y_a \geq 0, \forall a \in A^{SAV} \quad (19)$$

$$z \geq 0 \quad (20)$$

$$\phi_l = \{0, 1\}, \forall l \in L \quad (21)$$

式(6)の第 1 項, 第 2 項, 第 3 項はそれぞれ移動者の総走行時間と総走行コストの和, SAVs の総走行コスト, SAVs 導入コストを表している. なお, 前節で述べたり

リンクコストにおいて SAVs の走行時間を 0 としているため、式(6)の目的関数に SAVs の走行時間を含めていない。

式(7)から式(9)および式(10)から式(12)はそれぞれ、時空間ネットワーク上における移動者、SAVs のフロー保存則を表している。式(13)から式(15)は容量制約条件を表している。式(13)は HDVs と SAVs の交通量がリンク容量以下であるという条件である。式(14)は HDVs と SAVs の待機台数が駐車場容量以下であるという条件である。式(15)は SAVs の移動者数は車両容量以下であるという条件である。式(16)は、SAVs 走行区間として指定されても SAVs フローはリンク容量以下であることを意味しており、SAVs は走行区間しか通行できないという制約条件である。なお、HDVs の通行区間に関する制約条件を課していないため、HDVs はすべての区間を通行可能である。式(17)は走行区間の指定コストが予算制約以下であるという予算制約条件である。式(18)から式(20)はそれぞれ移動者フロー、SAVs フローおよび SAVs 台数の非負条件を表している。最後に、式(21)は走行区間のデザイン変数がバイナリー変数であるという条件である。

b) 回送ありモデル

SAVs 車両がデポからデポまでの移動を完結するためには、STEN 上のデポを表す起点ノードから終点ノードまでの間が走行区間で接続されている必要があるが、「回送なしモデル」ではそのような制約条件を課していない。そのため、「回送なしモデル」においてデポを表すノードをダミーノードから道路ネットワーク上のいずれかのノードに変更するのみでは、多数の実行不能解が生成されるため計算効率が低下するものと考えられる。そこで、本節では SAVs が自走によりすべての移動を行えるような走行区間の連結条件を、制約条件として表すことを考える。

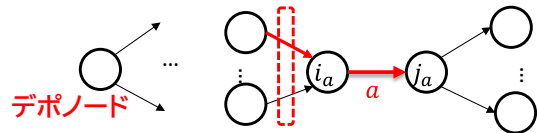
道路ネットワークにおいて、一方通行でない限り隣接するノード間には方向別の 2 本のリンクが存在するが、2.(1)で仮定したように隣接するノード間の両方向を同時に SAVs 走行区間として指定するため、ノード間のリンクの方向を区別する必要はない。そこで、下記に示す手順によりデポノードから遠ざかる方向のリンクである「順方向リンク」のみの集合を作成する。

Step 1 : 最短経路探索

デポノードを起点とし、道路ネットワーク上のすべてのノードまでの最短経路探索を行い、ノード*i*における最小コストを ω_i とする。

Step 2 : 「順方向リンク集合」の生成

$\omega_{i(l)} > \omega_{j(l)}, \forall l \in L$ であればリンク*l*を「逆方向リンク」、 $\omega_{i(l)} < \omega_{j(l)}, \forall l \in L$ であればリンク*l*を「順方向リンク」とよぶことにする。道路ネットワーク上から逆方向リンクを除去したリンク集合*L'*を生成する。



あるリンクが走行区間として指定されるためには、上流に位置するいずれかのリンクが走行区間である必要がある

図-2 走行区間の連続性に関する制約条件

そして、「順方向リンク集合*L'*」に含まれるリンクを対象に、下記の制約条件により SAVs 走行区間の連結条件を表す。

$$\varphi_m \leq \sum_{n \in IN(i_m)} \varphi_n, \forall m \in L', i_m \neq n_{depo} \quad (22)$$

$$\varphi_m = \{0,1\}, \forall m \in L' \quad (23)$$

$$\phi_l = \Delta_m^l \varphi_m, \forall l \in L \quad (24)$$

式(22)は、ある順方向リンクが走行区間として指定されるには、そのリンクの直上流に位置する順方向リンクのうち少なくとも 1 本が走行区間として指定されている必要がある、という制約条件である。この制約条件により、デポノードを起点とし連続した SAVs 走行区間を記述することが可能である。(図-2 参照) 式(23)はデザイン変数がバイナリー変数であるという条件を表している。式(24)における Δ_m^l は道路ネットワーク上のリンク*l*と「順方向リンク」*m*の関係を表すダミー変数であり、式(24)により「順方向リンク」における走行区間の有無を、道路ネットワーク上のリンクにおける走行区間の有無に変換している。

なお、本節では隣接するノード間の両方向のリンクを同時に走行区間として指定するため、一方通行が存在しない道路ネットワーク上では上記の制約条件を満たす走行区間のみを走行して、デポからデポにたどり着くことが可能である。一方通行が存在する場合は、上記の制約条件のみを満たす(一部の)走行区間からデポにたどり着かないことがありうる。しかし、一般的な道路ネットワークにおいて一方通行の区間はごくわずかであるため、一方通行の影響は限定的であると考えられる。

以上を踏まえて、「回送ありモデル」は「回送なしモデル」に走行区間の連結条件を制約条件として追加した問題として、以下のように定式化できる。

$$\min_{x,y,z,\phi} Z = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A^T} c_a^s x_a^s + \sum_{a \in A^{SAV}} c_a y_a + \theta_{SAV} z \quad (6)$$

s.t.

式(7)~式(21), 式(22)~式(24)

3. ケーススタディ

本章では、仮想ネットワークに対して構築した 2 種類

のモデルを適用し、モデルの挙動を確認する。第 2 章で構築した混合整数計画問題は MATLAB 2022a から汎用ソルバーである Gurobi Optimizer 9.5.0 を呼び出して求解する。以下、(1)節で計算条件を説明し、(2)節では HDVs の保有コストを考慮しないケースにおいて、「回送なしモデル」と「回送ありモデル」の解の比較を行う。最後に(3)節で、HDVs 保有コストに関する感度分析を行う。

(1) 計算条件

a) 計算対象ネットワーク

計算対象ネットワークとして、図-3 に示す仮想ネットワーク (Sioux Falls ネットワーク) を採用した。リンク長等の情報⁸⁾も公開されており、リンク旅行時間は $[d_a/2] \times \Delta t$ (分) (ただし、 d_a はリンク a のリンク長 (km) , $[x]$ は x を切り上げて整数にした値) として与えた。また、 $\Delta t = 15$ とし、リンク容量は公開されている値の 0.5 倍と設定した。

回送ありモデルではデポの位置を指定する必要があるが、郊外部を想定したノード 1 と中心部を想定したノード 10 の 2 ケースを想定する。

b) パラメータ設定

構築したモデルにおけるパラメータは時間価値 (α_1 および α_2) , SAVs 車両定員 (κ) , 車両走行コスト (β^{TC}) および SAVs, HDVs の保有コスト (θ_{SAV} , θ_{MNV}) である。このうち、時間価値は $\alpha_1 = 2000$ 円/時、 $\alpha_2 = 4000$ 円/時と設定し、車両容量は $\kappa = 3$ と設定した。また、 β^{TC} は表 1 に示す属性値を用いて車両走行コストを時間単位に変換して $\beta^{TC} = 2.92$ 円/分と設定した。なお、車両走行コストとしてガソリン代のみを考慮した。

SAVs の保有コストは、表 2(a) に示す属性値を用いて算出された 1 日あたりの保有コスト (4406.4 円/日) を参考に、 $\theta_{SAV} = 5,000$ 円/日と設定した。HDVs の保有コストは、表 2(b) に示す属性値を用いて算出された維持費 (1666.7 円/日) および購入費と維持費の合計 (2488.5 円/日) を参考に、 $\theta_{MND} = 1,500$ 円/日と 2,500 円/日の 2 種類の値を設定した。なお、 $\theta_{MND} = 1,500$ 円/日は HDVs の保有に際して維持費のみを考慮しているケースに相当し、 $\theta_{MND} = 2,500$ 円/日は購入費と維持費を考慮しているケースに相当する。

c) 需要設定

Sioux Falls ネットワークでは静的な OD 需要しか公開されていないが、松尾・嶋本⁴⁾と同様の方法でこれを時間帯ごとに割り振る。図-4 に示すように、基準時刻から出発時刻の間には、ある「ばらつき」が存在するものとする。そして、許容到着時刻は、「出発時刻+OD 間の最小旅行時間+Time Window」により設定する。以下では、出発時刻の「ばらつき」をポアソン分布で表現し、その平均値を $\lambda = 1$ とし、Time Window は全 OD ペアで一律で

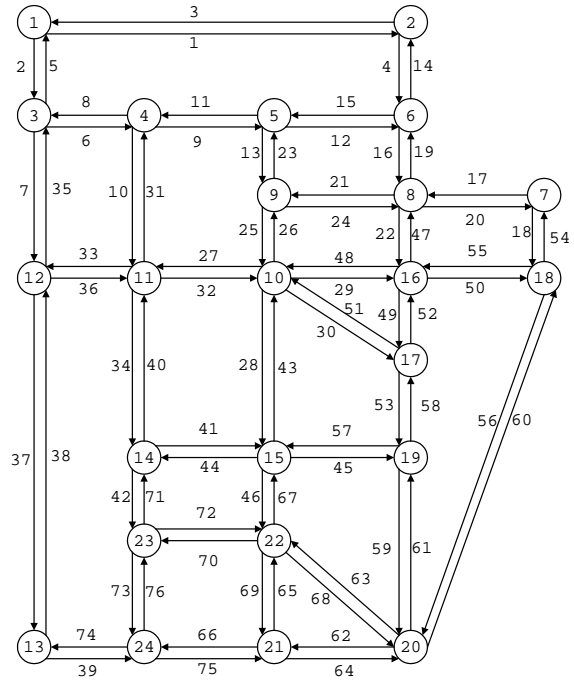


図-3 計算対象ネットワーク

表-1 パラメータ設定に用いた属性値

時間帯幅	燃料費	車両燃費	平均速度
15 min	140 円/l	12km/l	30km/h

表-2 SAVs および HDVs の属性値

(a) SAVs の属性値

車両本体価格	耐用年数	維持費 (月あたり)
500 万円	5 年	50,000 円

(b) HDVs の属性値

車両本体価格	耐用年数	維持費 (月あたり)
300 万円	10 年	50,000 円

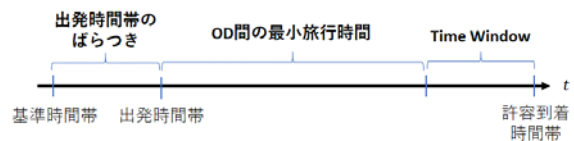


図-4 出発・到着時刻制約の設定

4Δt (1時間) とした。

d) 評価指標

本研究における評価指標として、SAVs 台数、SAVs 分担率、目的関数値改善度の 3 つを採用する。SAVs 台数および SAVs 乗客比率は、SAVs の普及の程度を見る指標であり、SAVs 乗客比率は以下のように移動リンクを通過する HDVs 運転手の総走行距離と SAVs 乗客の総走行距離に対する SAVs 乗客の総走行距離として定義する。

$$r_{SAV} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_1^p} t_a x_a^s}{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_1^p \cup A_1^u} t_a x_a^s} \quad (25)$$

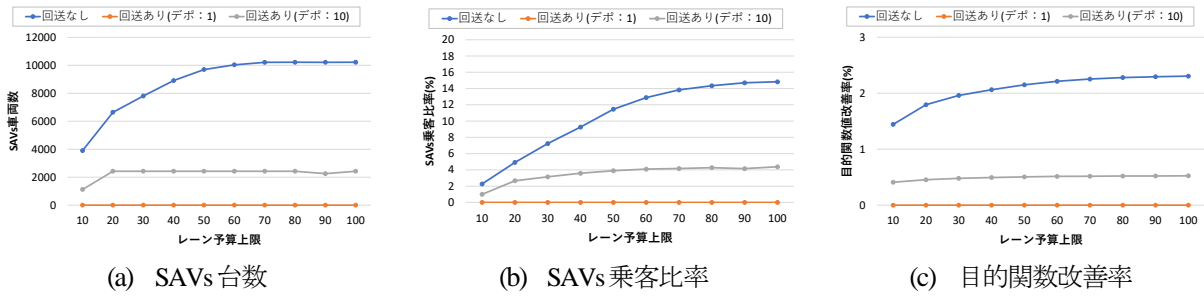


図-5 HDVsを保有コストを考慮しないときの評価指標

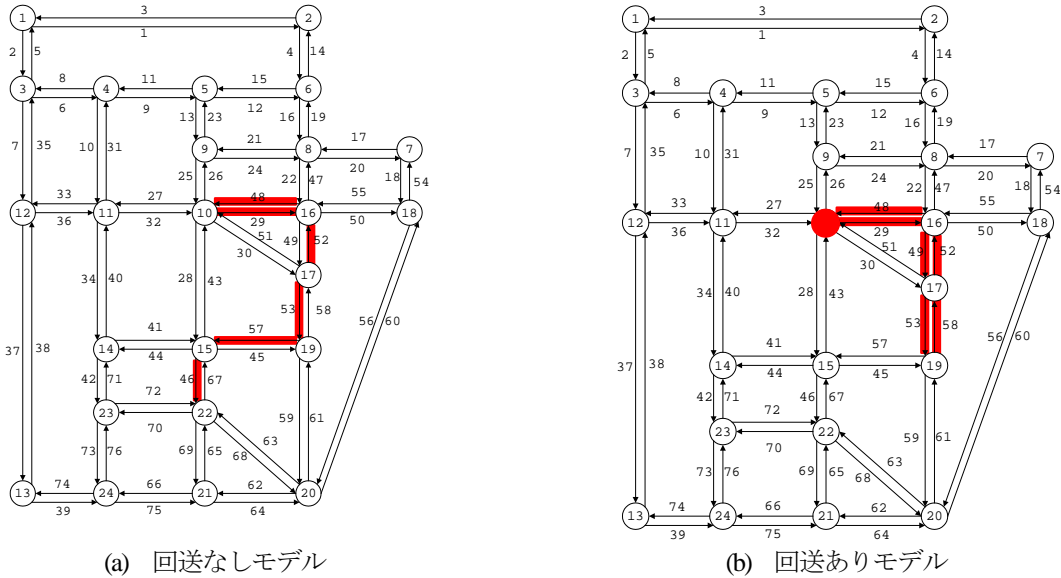


図-6 SAVs 走行区間 (予算上限:10)

一方、目的関数値改善度は以下に示すように SAVs が普及していないときと比較したときの目的関数値の改善度を表す指標である。

$$IR = 1 - Z_{OPT} / Z_{MND} \quad (26)$$

(2) HDVsの保有コストを考慮しないケース

本節では、HDVsの保有コスト θ_{MND} を0としてモデル間の解の比較を行う。図-5(a), (b), (c)にそれぞれ走行予算制約と SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数値改善率を表す。

回送なしモデルでは、予算上限が増加するにつれて SAVs 台数が増加する傾向にあるが、予算上限が 70 以降では SAVs 台数が頭打ち傾向にあるといえる。SAVs 乗客比率は、予算上限が 90 に達するまでは増加傾向にあるといえる。SAVs 乗客比率が頭打ちとなる区間上限予算が SAVs 台数が頭打ちとなる予算上限よりも大きいのは、同じ車両台数でも SAVs の走行可能区間が拡大することが理由であると考えられる。また、目的関数改善率も、予算上限が 90 に達するまでは増加する傾向にあることが読み取れる。

回送ありモデルに着目すると、デポの位置がノード 1 のとき、SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数改善比率

がすべて 0 であり、SAVs および SAVs 走行区間を導入しない解が最適となった。それに対し、デポの位置がノード 10 のときは、SAVs が導入される解が最適となったが、予算上限が 20 以降は SAVs 台数が頭打ち傾向にあることがわかる。また、回送なしモデルの解と比較すると、回送ありモデルの解はすべての評価指標が大きく下回っているといえる。これは、回送なしモデルの方が回送コストを考慮していないことに加えて、走行区間の実行可能解領域が広いことも理由であると考えられる。

図-6(a), (b)および図-7(a), (b)に、それぞれ予算上限が 10, 50 のときの、回送なしモデルと回送ありモデル (デポ位置: 10) の SAVs 走行区間を示す。予算上限が 10 のときの両モデルの解を比較すると、概ね類似した傾向にあることがわかる。しかし、回送なしモデルでは、デポの位置をどこに設置しても SAVs が走行区間のみを自走してデポに戻ることができないのに対し、回送ありモデルでは SAVs が走行区間のみを自走してデポであるノード 10 に戻ることができることがわかる。予算上限が 50 のときは、回送なしモデルの方が広範囲に走行区間を伸ばしているものの、予算上限が 10 のときと同様にデポをどこに設置しても SAVs が走行区間のみを自走してデポに戻ることができないことがわかる。

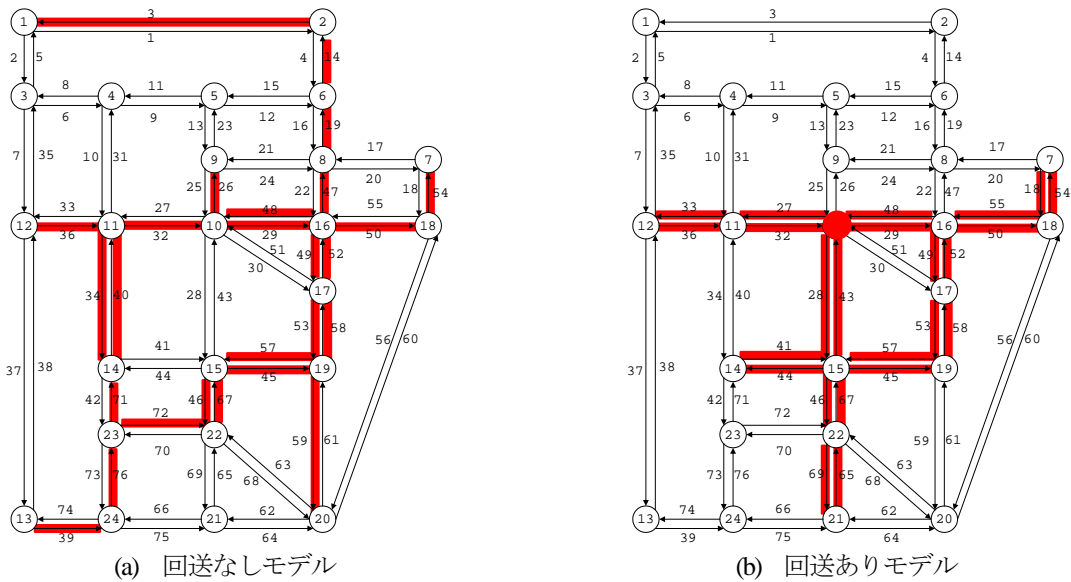


図-7 SAVs 走行区間 (予算上限:50)

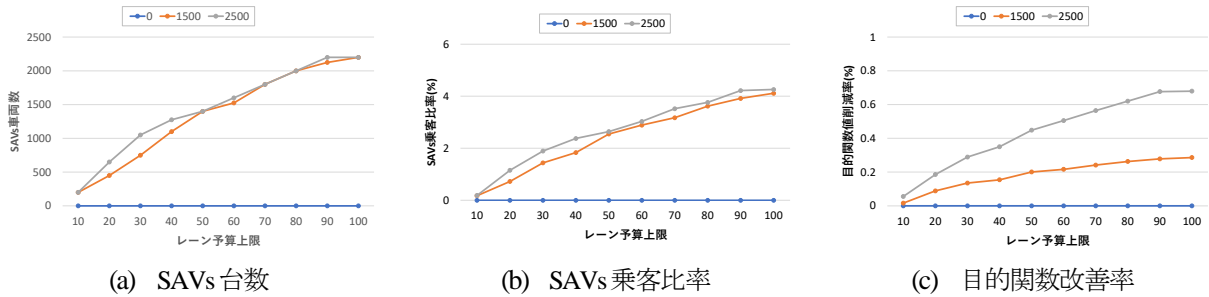


図-8 デポの位置が 1 のときの評価指標

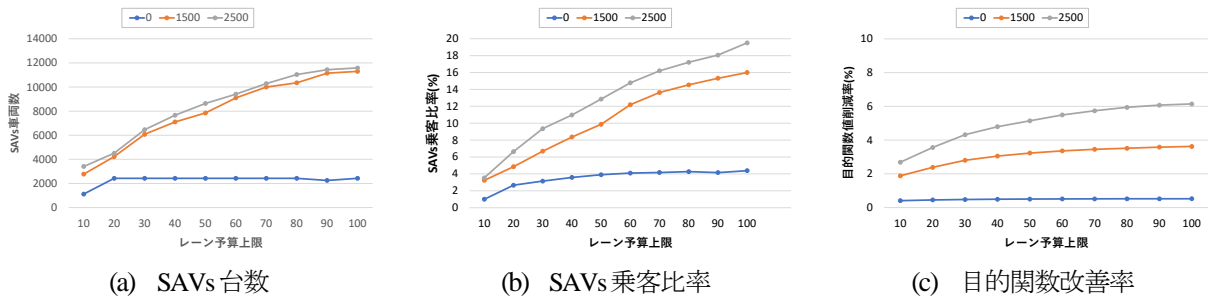


図-9 デポの位置が 10 のときの評価指標

(3) HDVs の保有コストの影響分析

本節では、HDVs の保有コストを負荷して計算し、HDVs の保有コストの影響を分析する。前述したように HDVs の保有コストとして、HDVs の保有に際して維持費のみを考慮しているケース ($\theta_{MND} = 1,500$) と購入費と維持費を考慮しているケース ($\theta_{MND} = 2,500$) の 2 ケースを想定する。なお、回送ありモデルの 1 回あたりの計算時間は 2 分程度であったが、回送なしモデルで $\theta_{MND} = 1,500$ 、予算上限 50 としたときの計算時間が 72 時間以上であったので、以下では回送ありモデルについて考察する。HDVs の保有コストを考慮したとき、回送ありモデルに比べ回送なしモデルの方が計算コストが大

幅に高い理由として、簡易な制約条件により走行区間の実行可能領域を限定できたためであると考えられる。

図-8(a), (b), (c)にデポの位置がノード 1 であるときのそれぞれ SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数改善率を示す。前述したように、保有コストが 0 のときは SAVs を導入しない解が最適となった。保有コストが 1,500 および 2,000 のときで、予算上限に対する SAVs 台数および SAVs 乗客比率は大きな差異はないものの、両指標ともに保有コストが 2,000 のときの方が 1,500 のときよりも両指標は常に大きいといえる。一方、目的関数改善率に関しては、保有コストが 1,500 のときと 2,000 のときの差が大きい。これは、1 台あたりの保有コストが大きくなる

と、SAVs 導入にともなう HDVs 台数削減効果が大きく計上されるためであると考えられる。

図-9(a), (b), (c)にデポの位置がノード 10 であるときのそれぞれ SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数改善率を示す。SAVs 台数に関しては, デポの位置がノード 1 のときと同様に保有コストが 1,500 のときと 2,000 のときで大きな差異はない。SAVs 台数も保有コストが 1,500 のときよりも 2,000 のときの方が常に大きな値となっているが, 両者の差はデポの位置がノード 1 のときよりも大きくなっている。目的関数改善率についても, 保有コストが大きくなるにつれ大きくなる傾向にあることが読み取れる。

最後に, デポの位置がノード 1 とノード 10 のときの結果を比較すると, すべての指標においてデポがノード 10 のときの方が大きく, SAVs 走行区間を導入する効果が大きいことがわかる。

4. おわりに

本研究では, 道路上において手動運転車 (HDVs) と指定された区間しか走行できない共有型自動運転車 (SAVs) が混在する状況を想定し, SAVs が走行可能な区間と導入すべき SAVs 台数を決定する手法論を提案した。SAVs のデポの位置を仮想的に与え, デポからサービス開始場所およびサービス終了場所からデポまでの回送を考慮しない回送なしモデルと, デポの位置を所与として与え回送を考慮する回送ありモデルの 2 種類のモデルを混合整数計画問題として定式化した。特に, 「回送ありモデル」では, SAVs 走行区間についてある前提条件のもと, SAVs が走行区間のみを走行してデポからデポに移動できるような走行区間の連続性条件を, 簡易な制約条件により表現した。

提案した手法を仮想ネットワークに適用し, 以下のことを確認した。

- ・ 回送なしモデルの方が回送ありモデルよりも, SAVs 導入台数や SAVs 乗客率が高く, 手動運転車のみのケースに対する目的関数改善率も高い傾向にある。
- ・ 回送ありモデルにおいて, HDVs の保有コストを加味した方が SAVs 導入台数や SAVs 乗客率が高く, また目的関数改善率も向上する。
- ・ 回送ありモデルにおいて, 目的関数改善率は SAVs のデポの位置に大きく依存する。
- ・ HDVs の保有コストを考慮するケースにおいて, 回送ありモデルは 1 回あたりの計算時間が数分程度であるのに対し, 回送なしモデルの 1 回あたりの計算時間は 72 時間以上であった。

特に上記の 2 点目に関して, 自家用車はいったん保有

するとその購入コストおよび維持費は意識しないと考えられる。したがって, 例えばすべての内燃機関自動車が電気自動車に置き換わるなど, ドラスティックな変化が生じるまでに, 本研究で SAVs 専用レーンの導入を検討する必要があると解釈することもできるであろう。また, 4 点目に関しては, 回送ありモデルでは簡易な制約条件を負荷するにより, 実行可能解領域を大幅に限定できたためであると考えられる。

本研究で構築したモデルは商用ソルバーにより求解可能である。しかし, 回送なしモデルにおいて, 手動運転車の保有コストを考慮したときの計算時間が 72 時間以上であり, 現実的な時間内に解を得ることが困難であった。今後の課題として, バイナリー変数と実数変数を分解する Benders 分解など, 効率的な解法アルゴリズムの適用があげられる。さらに, 回送ありモデルではデポの位置を所与とし, さらに SAVs 走行区間の設定に関してやや強い前提条件を課しているが, より一般的な枠組みでデポの位置も含めた最適化モデルへの拡張する余地があるといえる。最後に, 本研究では SAVs および手動運転車の 1 日あたりの保有コストをパラメータとして与えたが, 本来は車両の保有は長期的な視点で意思決定されることが考えられる。したがって, 車両の保有に関する意思決定も内包した, 長期的な視点のモデルを構築する余地があるといえる。

謝辞: 本研究は, JSPS 科研費 21H01459 および国土交通省道路局「道路政策の質の向上に資する技術研究開発 (課題名: 自動運転とシェアリングが融合した新しいモビリティサービスと社会・都市・生活の未来についての研究開発; 研究代表者: 溝上章志 熊本学園大学教授)」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 香月秀仁, 東達志, 谷口守: 郊外間交通へシェア型自動運転者の導入可能性-トリップの時空間特性・個人属性の観点から-, 都市計画学論文集, Vol. 52(3), 769-775, 2017
- 2) 田村祐貴, TRONCOSO PARADY Giancarlo, 高見淳史, 原田昇: 地方都市におけるライドシェアマッチングの成立可能性と効果に関する研究-群馬県パーソントリップ調査データを用いた分析-, 交通工学論文集, Vol. 5(2), A_108-A_117, 2019
- 3) Seo, T. and Asakura, Y.: Multi-objective liner optimization problem for strategic planning of shared autonomous vehicle operation and infrastructure design, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1-13, 2021
- 4) 松尾優輝, 嶋本寛: ライドシェアを考慮した時空間ネットワーク配分モデルの構築, 第 42 回交通工学研究発表会・論文集, CD-ROM, 2022
- 5) David Prentiss, Elise Miller-Hooks, A two-class priority preservation scheme for CAV-only zones, Proceedings of the 2020

- Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, 2020
- 6) Khaled Hamad, Abdul Razak Alozi: Shared vs. dedicated lanes for autonomous vehicle deployment: A simulation-based assessment, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 205-215, 2022
- 7) Sara Movaghar, Mohmoud Mesbah, Meeghat Habibian: Optimum location of autonomous vehicle lanes: a model considering vehicle variation, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 5782072 (13 pages), 2020
- 8) Transportation Networks for Research Core Team. *Transportation Networks for Research*. <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>. (2022.9.30 受付)

SAV RUNNING SECTION DESIGN PROBLEM UNDER MIXED MANUAL DRIVING VEHICLE AND SAVs

Hiroshi SHIMAMOTO