

移動時間信頼性を考慮した 自動運転車両専用リンクの最適配置計画

新田 翔¹・峪 龍一²・内田 賢悦³

¹ 学生会員 北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）

E-mail: n96sho1203@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学大学院工学研究院土木工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）

E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学大学院工学研究院土木工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目）

E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

自動運転車両(以下 AV)は機械制御によって運転を行うため、人間が運転する車両(以下 HV)より優れた運転性能を有すると考えられる。AV の普及は道路ネットワーク上の移動時間とそのばらつきを低減させ、移動コストを減少させることが期待される。しかし、AV と HV が混在する状況下では、HV の運転挙動が AV による移動コストの減少効果を阻害する可能性が考えられる。そこで、AV と HV が混在するリンクのうち、いくつかを AV のみが走行可能である専用リンクに転換することで、AV の移動コストを減少させるスキームが想定されて研究が行われている。

本研究では、AV と HV が混在する道路ネットワークにおいて、移動コストが最小となるような AV 専用リンクの最適配置計画手法を開発した。また、テストネットワークでの数値計算を行い、AV 専用リンクの設置によって、移動コストが低減することを示した。

Key Words: *Autonomous Vehicle, Travel Time Reliability, Traffic Assignment Model, AV Dedicated Link*

1. はじめに

自動運転技術の発展に伴い、自動運転車両（以下 AV とする）の実用化に向けた動きが加速している。AV がする普及過程においては、従来と異なる交通状況が生起すると考えられる。

AV の普及過程における交通状況の変化として、リンク交通容量の変動が挙げられる。AV は機械制御によって車間距離を取るため、人間が運転する車両（以下 HV とする）より効率的な運転挙動を示すと考えられる。また、AV は車両間の通信によって、正確な交通情報を取得できるとされている。そのため AV は、HV に比べ、より効率的な経路を選択できるとされている。AV の普及は、道路ネットワーク上における移動コストの減少に寄与することが期待される。こうした背景から、AV と HV の経路選択行動の違いに着目し、両車両が混在している道路ネットワーク上における交通量配分モデルが提案されている。Bagloee et al.¹⁾、Zhang and Nie²⁾は、HV は利用者均衡配分原則(UE)に従い、connected vehicle は道路インフラとの通信に基づいてシステム最適配分原則(SO)

に従って経路選択をすると仮定した交通量配分モデルを提案した。Wang et al.³⁾は、AV は UE に従い、HV は Cross Nested Logit モデルによって交通量配分を行うモデルを提案した。Nitta et al.⁴⁾は、AV は UE に従い、HV は logit 型の確率的利用者均衡配分(SUE)に従うとし、移動時間の信頼性を考慮した交通量配分モデルを提案した。

道路ネットワーク上に AV と HV が混在している状況下では、HV の経路選択行動が AV による移動コストの減少を阻害する可能性が考えられる。このことから先行研究では、AV が HV に対して排他的に利用可能な道路空間の配置問題が数多く提案されている。Chen et al.⁵⁾は道路ネットワーク上の一部の領域を AV のみが利用できる、AV 専用ゾーンの最適配置問題を提案した。しかし、AV 専用ゾーンを設置した場合、HV がゾーン内にアクセスできないことが生じうる。Chen et al.⁶⁾、Tani et al.⁷⁾は道路ネットワークを構成するリンクの一部車線を AV のみが利用できる、AV 専用車線の最適配置問題を提案した。この枠組みでの AV 専用車線の導入は、同一リンク内で車種別に交通量を分割することであり、実務上困難であると考えられる。また、Wu et al.⁸⁾は AV と HV が混

在するリンクを AV のみが利用することができるリンク (以下 AV 専用リンク) に転換することによって移動コストを減少させるスキームを提案した。しかし, Wu et al.⁸⁾ で提案されたモデルは, ネットワーク規模への拡張が行われていない。

こうした背景から本研究では, Wu et al.⁸⁾ のモデルをネットワーク規模へ拡張し, AV と HV が混在する道路ネットワークにおいて, 移動コストが最小となるような AV 専用リンクの最適配置計画手法を開発する。AV 専用リンク最適配置計画のネットワーク規模への拡張を考えたとき, HV の交通に関して OD 間で途絶することが考えられる。そこで本研究では, 道路ネットワークの経路情報から, AV 専用リンクとなるリンクの候補集合 (以下コントロールリンク集合) をあらかじめ定めてから, 最適な配置計画を求める手法を提案する。コントロールリンク集合を定めることで HV に関する OD 間の途絶を容易に判定することを可能とした。

本稿の構成を以下に示す。第 2 章では, 本稿で用いる交通量配分モデルを定式化する。第 3 章では, 交通量配分モデルに基づいた AV 専用リンクの最適配置問題を定式化する。第 4 章では, テストネットワークにおける数値計算を示す。第 5 章で本研究のまとめを示す。

2. 交通量配分モデルの定式化

(1) 記号

本研究では, 各種の交通量, 移動時間は確率変数として表現されるが, それらは単に交通量あるいは移動時間として表記することにする。本稿で用いる記号を以下に示す。

- Δ : リンク-パスインシデンス行列
- $\delta_{w,k,s}$: リンク s が OD ペア w における経路 k を構成するとき 1 を, それ以外るとき 0 をとる変数
- x_j : AV 専用リンク配置問題における政策変数ベクトル
- W : OD ペア集合
- K_w : OD ペア w における経路集合
- K : ネットワーク上の経路集合
- S : リンク集合
- Q : ネットワーク内の総交通需要 (生成交通量)
- Q^z : 車両 $z \in \{h, a\}$ の総交通需要 (添字 h, a はそれぞれ車両 HV, AV を表す)
- p_z : 総交通需要に対する車両 z の比率
- Q_w^z : OD ペア w における車両 z の交通需要
- p_w^z : Q^z に対する Q_w^z の比率
- $F_{w,k}^z$: OD ペア w における経路 k 上の車両 z 交通量
- $p_{w,k}^z$: 車両 z が OD ペア w において経路 k を選択する確率

- V_s^z : リンク s 上の車両 z 交通量
- V_s : リンク交通量
- h_0 : 基準臨界車頭時間
- R_z : h_0 に対する車両 z の臨界車頭時間の比率
- $\omega_{a,s}$: リンク交通量に対する AV 車両の比率
- R_s : h_0 に対するリンク交通量 V_s の臨界車頭時間の比率
- H_s : リンク s の臨界車頭時間
- C_s : リンク s の交通容量
- T_s^z : 車両 z に関するリンク s の移動時間
- t_s^0 : リンク s の自由流走行時間
- α_s, β_s : BPR 関数のパラメータ
- $T_s^{z'}$: 車両 z に関するリンク s における混雑による遅れ時間
- $PT_{w,k}^z$: 車両 z に関する OD ペア w における経路 k の移動時間
- $c_{w,k}^z$: 車両 z に関する OD ペア w における経路 k の移動コスト
- $g_{w,k}^{hv}$: OD ペア w における経路 k の一般化移動コスト

(2) コントロールリンク集合の定式化

本研究では, AV 専用リンクの最適配置計画手法の開発を行う。Chen et al.⁶⁾, Tani et al.⁷⁾ に示される AV 専用車線の最適配置問題では, ネットワーク上のすべてのリンクにおいて, AV と HV の共用車線が常に存在しているため, HV の交通流に関して OD 間の途絶が生じない。しかし, AV 専用リンク配置問題では, その配置によっては HV の交通流に関して OD 間の途絶が生じうる。例えば, 図-1 に示したテストネットワークにおいて, リンク 1 と 2 が同時に AV 専用リンクとなった場合, HV はノード 1 から 4 に到達することはできない。こうした配置計画は実行不可能である。図-1 のような小規模なネットワークであれば OD 間を途絶させるリンクの組合せを判別することは容易であるが, 大規模なネットワークの場合は難しくなる。そこで本研究では, AV 専用リンクとなるリンクの候補 (以下コントロールリンク) をあらかじめ定めることで OD 間の途絶の判定を容易にする問題設定を定式化する。

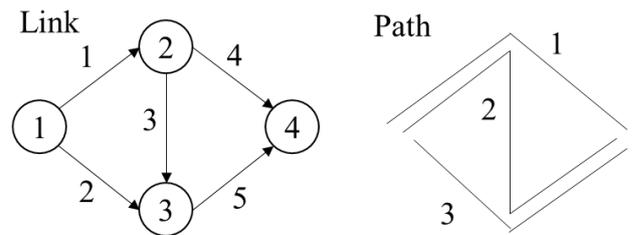


図-1. テストネットワーク

AV専用リンクの配置にあたっては、リンクと経路の関係性を考慮する必要がある。ネットワーク上のあるリンクがAV専用となったとき、HVはそのリンクを含む経路を選択できなくなる。そのため、AV専用リンクを含む経路はAVのみが利用できるAV専用経路となる。したがって、AV専用リンク配置問題はAV専用経路配置問題としてみなすことができる。ここで、AV専用経路を構成するすべてのリンクにおいて、AVが排他的に走行するわけではない。AV専用経路を構成するリンクのうち、AV専用リンク以外のリンクがHVが走行しうる他の経路の一部を構成する場合、そのリンクにおいてHVが走行することができる。AV専用経路とは、その経路が属するODペアの交通需要のうち、AVのみが結果的に走行することとなる経路として説明される。

図-1に示したテストネットワークにおいて、すべてのリンクがコントロールリンクである場合を考える。このとき、「リンク1のみをAV専用リンクとする」配置計画と「リンク3と4のみをAV専用リンクとする」配置計画はともに、経路1,2をAV専用経路としているため等価である。そのため、すべてのリンクがコントロールリンクである場合、例に示したような冗長性が生じる。こうした事態を避けるためにもコントロールリンクの候補をあらかじめ絞って集合を定める必要がある。

ネットワークにおけるリンク-パスインシデンス行列は以下に与えられる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \delta_{1,1,1} & \cdots & \delta_{1,1,|S|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{|W|,|K_W|,1} & \cdots & \delta_{|W|,|K_W|,|S|} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)式は列ベクトル $\mathbf{A}_s = [\delta_{1,1,s}, \dots, \delta_{w,k,s}, \dots, \delta_{|W|,|K_W|,s}]^T$ を用いて以下に表せる。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \cdots \mathbf{A}_s \cdots \mathbf{A}_{|S|}] \quad (2)$$

ここで、リンク集合 S の部分集合を $S_j (\neq \emptyset, \forall j \in J)$ とする。ただし J は S の部分集合に関する添字集合である。このとき、縮約したリンク-パスインシデンス行列を考える。

$$\mathbf{A}_j = [\mathbf{A}_1 \cdots \mathbf{A}_s \cdots \mathbf{A}_{|S_j|}] \quad \forall j \in J \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{A}_j は(4)を満たす。

$$\mathbf{0}_{|K|} \leq \mathbf{A}_j \mathbf{1}_{|S_j|} \leq \mathbf{1}_{|K|} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

ここで、ベクトル $\mathbf{0}, \mathbf{1}$ はそれぞれ、すべての成分が0,1の列ベクトルを表し、下付きの添え字はその次元を表す。このとき、(4)式のベクトル $\mathbf{A}_j \mathbf{1}_{|S_j|}$ の k 番目の成分は、経路 k に含まれる S_j 中のリンクの本数を表している。すなわち、(4)式は経路 k に含まれる S_j 中のリンクは高々1本であることを表す。この制約によって、ある経路をAV専用経路とするために必要なリンクが1本に定まるため、

例に示した冗長性を回避することができる。

上の定式化を例示する。図-1に示したテストネットワークのリンク-パスインシデンス行列は以下に与えられる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

この行列から、(4)式を満たす部分リンク-パスインシデンス行列 \mathbf{A}_j として以下の3つの部分行列が挙げられる。

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)式に挙げられた部分行列のそれぞれに対して、AV専用リンク最適配置問題が定義される。 \mathbf{A}_2 の場合は、構成する列ベクトルがリンク2,3,4に対応しているため、コントロールリンク集合は S_2 、すなわち $\{2,3,4\}$ と定義される。なお、この場合においてはリンク1,5は常にAVとHVがともに利用可能である共用リンクである。

AV専用リンク配置問題における政策変数のベクトル \mathbf{x}_j を定める。 \mathbf{x}_j はネットワーク上のリンク数と等しい次元の列ベクトルであるとし、各成分を $x_{j,s}$ とする。各成分は0または1の値をとり、成分が1であるとき、対応するリンクがAV専用となるものとする。対して、成分が0であるときは、対応するリンクはAVとHVがともに利用可能である共用リンクであるとする。また、以上

の議論から、 \mathbf{A}_j で定義されるコントロールリンクの集合に含まれないリンク s に対する政策変数 $x_{j,s}$ は常に0となる。

(3) 交通流の定式化

本研究ではNitta et al.⁴⁾をもとに、移動時間の不確実性を考慮したマルチクラス交通量配分モデルを用いる。ネットワーク全体での総交通需要 Q を対数正規分布に従う確率変数として表現する。

$$Q \sim LN(\mu_Q, \sigma_Q^2) \quad (7)$$

以下、対数正規分布 $LN(\mu_X, \sigma_X^2)$ に従う確率変数 X の平均 $E[X]$ 、分散 $Var[X]$ はそれぞれ $\exp(\mu_X + \sigma_X^2/2)$ 、 $\exp(2\mu_X + \sigma_X^2) \cdot (\exp(\sigma_X^2) - 1)$ と計算されることに注意されたい。

車両 $z \in \{h, a\}$ の交通需要 Q^z は、その比率 p_z と総交通需要 Q として計算される。

$$Q^z = p_z \cdot Q \quad \forall z \in \{h, a\} \quad (8)$$

同様にして、ODペア w における車両 z の交通需要 Q_w^z は、 p_w^z と Q^z との積となり、(9)式で表せる。

$$Q_w^z = p_w^z \cdot Q^z \quad \forall w \in W \quad (9)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\sum_{w \in W} p_w^z = 1 \quad (10)$$

各車両の経路交通量 $F_{w,k}^z$ は、車両 z の経路選択確率 $p_{w,k}^z$ と各車両の交通需要 Q_w^z との積となり、(11)式で表せる。

$$F_{w,k}^z = p_{w,k}^z \cdot Q_w^z = p_{w,k}^z \cdot p_w^z \cdot Q \quad \forall k \in K_w \quad (11)$$

各車両のリンク交通量 V_s^z は、リンク s を通るすべての経路交通量の和であり、(12)式で表せる。

$$\begin{aligned} V_s^z &= \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,s} \cdot F_{w,k}^z \\ &= \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,s} \cdot p_{w,k}^z \cdot Q_w^z \\ &= \hat{p}_s^z \cdot Q \quad \forall s \in S \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\hat{p}_s^z = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,s} \cdot p_{w,k}^z \cdot p_w^z \cdot p_z \quad (13)$$

リンク交通量 V_s は各車両のリンク交通量 V_s^z の和となり、(14)式で表せる。

$$\begin{aligned} V_s &= V_s^h + V_s^a \\ &= \hat{p}_s^h \cdot Q + \hat{p}_s^a \cdot Q \\ &= \hat{p}_s \cdot Q \quad \forall s \in S \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\hat{p}_s = \hat{p}_s^h + \hat{p}_s^a \quad (15)$$

このとき、リンク s を通る交通量 V_s は、総交通需要 Q の \hat{p}_s 倍として表わされるため、(16)式に示す対数正規分布に従う。

$$V_s \sim LN(\mu_{V_s}, \sigma_{V_s}^2) \quad (16)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{V_s} = \mu_Q + \ln(\hat{p}_s) \quad (16a)$$

$$\sigma_{V_s}^2 = \sigma_Q^2 \quad (16b)$$

(4) リンク交通容量の定式化

本研究では、AVとHVが混在するリンク s における臨界車頭時間 H_s は、基準車頭時間 h_0 と h_0 に対する混合交通流 V_s の臨界車頭時間の比率 R_s との積として定める。この詳細な導出過程は Nitta et al.⁴⁾を参考にされたい。 h_0 に対する各車両の臨界車頭時間の比率 R_z は以下に示す対数正規分布に従うとする。

$$R_z \sim LN(\mu_{R_z}, \sigma_{R_z}^2) \quad z \in \{h, a\} \quad (17)$$

このとき、混合交通流 V_s の臨界車頭時間の比率 R_a は(18)式に表される。

$$R_s = R_a^{\omega_{a,s}} \cdot R_h^{1-\omega_{a,s}} \quad \forall s \in S \quad (18)$$

ここで、 $\omega_{a,s}$ はリンク s におけるAVの比率であり、(19)式に表される。

$$\omega_{a,s} = \frac{V_s^a}{V_s} = \frac{\hat{p}_s^a}{\hat{p}_s} \quad \forall s \in S \quad (19)$$

基準車頭時間 h_0 に対する車両 z の臨界車頭時間の比率

が(17)式に示す互いに独立な対数正規分布： $R_z \sim LN(\mu_{R_z}, \sigma_{R_z}^2)$ に従う場合、 R_s は(20)式に示す対数正規分布に従う。

$$R_s \sim LN(\mu_{R_s}, \sigma_{R_s}^2) \quad (20)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{R_s} = \omega_{a,s} \cdot \mu_{R_a} + (1 - \omega_{a,s}) \cdot \mu_{R_h} \quad (20a)$$

$$\sigma_{R_s}^2 = \omega_{a,s}^2 \cdot \sigma_{R_a}^2 + (1 - \omega_{a,s})^2 \cdot \sigma_{R_h}^2 \quad (20b)$$

したがって、リンク s における臨界車頭時間は基準車頭時間と、 R_s との積として、(21)式に表される。

$$H_s = h_0 \cdot R_s \quad \forall s \in S \quad (21)$$

リンク交通容量は、その定義から(22)式に表される。

$$C_s = \frac{3600}{H_s} = \frac{3600}{h_0 \cdot R_s} \quad \forall s \in S \quad (22)$$

以上の定式化からリンク交通容量は(23)式に示す対数正規分布に従う。

$$C_s \sim LN(\mu_{C_s}, \sigma_{C_s}^2) \quad (23)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{C_s} = \ln(3600) - \ln(h_0) - \mu_{R_s} \quad (23a)$$

$$\sigma_{C_s}^2 = \sigma_{R_s}^2 \quad (23b)$$

(5) 移動コストの定式化

本研究におけるリンク移動時間は、(24)式に示すBPR関数によって算出する。

$$T_s^z(V_s^h, V_s^a) = t_s^0 \cdot \left(1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{V_s}{C_s} \right)^{\beta_s} \right) \quad (24)$$

はじめに、AVに関するリンクの移動時間、移動コストを定式化する。(24)式に(12)、(22)式を代入すると、(25)式を得る。

$$T_s^a(V_s^h, V_s^a) = t_s^0 \cdot \left(1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{\hat{p}_s \cdot Q \cdot H_s}{3600} \right)^{\beta_s} \right) \quad (25)$$

(25)式は、自由流移動時間を表す第1項と、リンクの混雑による遅れ時間を表す第2項とに分離できることを示している。以下、第2項をリンク遅れ時間と表現し、 $T_s^{a'}$ で表す。(25)式よりリンク遅れ時間は(26)式に表せる。

$$T_s^{a'} = t_s^0 \cdot \alpha_s \cdot \left(\frac{\hat{p}_s \cdot Q \cdot H_s}{3600} \right)^{\beta_s} \quad (26)$$

(26)式において、 $\ln(T_s^{a'})$ が正規分布に従うため、 $T_s^{a'}$ は(27)式に示す対数正規分布に従う。

$$T_s^{a'} \sim LN(\mu_{T_s^{a'}}, \sigma_{T_s^{a'}}^2) \quad (27)$$

ここで、以下の関係が成立する。

$$\mu_{T_s^{a'}} = \ln(t_s^0) + \ln(\alpha_s)$$

$$+ \beta_s \cdot \{\mu_Q + \mu_{R_s} + \ln(\hat{p}_s) + \ln(h_0) - \ln(3600)\} \quad (27a)$$

$$\sigma_{T_s^{a'}}^2 = (\beta_s)^2 \cdot (\sigma_Q^2 + \sigma_{R_s}^2) \quad (27b)$$

結果として、リンク移動時間は自由流移動時間の分だけシフトした対数正規分布に従う。よって、移動時間の平

均、分散と2つの異なるリンクにおける移動時間に関する共分散はそれぞれ(28), (29), (30)式に表せる.

$$\begin{aligned} E[T_s^a] &= t_s^0 + E[T_s^{a'}] \\ &= t_s^0 + \exp\left(\mu_{T_s^{a'}} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{T_s^{a'}}^2\right) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} Var[T_s^a] &= Var[T_s^{a'}] \\ &= \exp\left(2\mu_{T_s^{a'}} + \sigma_{T_s^{a'}}^2\right) \left(\exp\left(\sigma_{T_s^{a'}}^2\right) - 1\right) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} Cov[T_{s_1}^a, T_{s_2}^a] &= Cov[T_{s_1}^{a'}, T_{s_2}^{a'}] \\ &= \exp\left(\mu_{T_{s_1}^{a'}, T_{s_2}^{a'}} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{T_{s_1}^{a'}, T_{s_2}^{a'}}^2\right) \\ &\quad - \exp\left(\mu_{T_{s_1}^{a'}} + \mu_{T_{s_2}^{a'}} + \frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_{T_{s_1}^{a'}}^2 + \sigma_{T_{s_2}^{a'}}^2\right)\right) \quad \forall s_1, s_2 \in S \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、以下の関係が成立する.

$$\begin{aligned} \mu_{T_{s_1}^{a'}, T_{s_2}^{a'}} &= \ln(\alpha_{s_1}) + \ln(\alpha_{s_2}) + \ln(t_{s_1}^0) + \ln(t_{s_2}^0) \\ &\quad + \beta_{s_1} \cdot \ln(\hat{p}_{s_1}) + \beta_{s_2} \cdot \ln(\hat{p}_{s_2}) + (\beta_{s_1} + \beta_{s_2}) \cdot \mu_Q \\ &\quad - \beta_{s_1} \cdot \mu_{C_{s_1}} - \beta_{s_2} \cdot \mu_{C_{s_2}} \end{aligned} \quad (30a)$$

$$\sigma_{T_{s_1}^{a'}, T_{s_2}^{a'}}^2 = (\beta_{s_1} + \beta_{s_2})^2 \cdot \sigma_Q^2 + \beta_{s_1}^2 \cdot \sigma_{C_{s_1}}^2 + \beta_{s_2}^2 \cdot \sigma_{C_{s_2}}^2 \quad (30b)$$

経路移動時間は、その経路を構成するリンクの移動時間の合計であり、(31)式で表せる.

$$PT_{w,k} = \sum_{s \in S} T_s \cdot \delta_{w,k,s} \quad \forall w \in W, \forall k \in K_w \quad (31)$$

(31)式より、経路移動時間の平均と分散はそれぞれ(32), (33)式に表せる.

$$E[PT_{w,k}] = \sum_{s \in S} E[T_s] \cdot \delta_{w,k,s} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} Var[PT_{w,k}] &= \sum_{s \in S} Var[T_s] \cdot \delta_{w,k,s} \\ &\quad + 2 \cdot \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 (\neq s_1) \in S} \delta_{w,k,s_1} \cdot \delta_{w,k,s_2} \cdot Cov[T_{s_1}, T_{s_2}] \end{aligned} \quad (34)$$

本研究では、移動時間の不確実性を考慮したリスク回避的な経路選択を想定するため、経路コストを(34)式に定める.

$$\begin{aligned} c_{w,k}^a &= E[PT_{w,k}] + \gamma_r \cdot \sqrt{Var[PT_{w,k}]} \\ &\quad \forall w \in W, \forall k \in K_w \end{aligned} \quad (34)$$

ここで、経路コストにおける分散項の係数 γ_r は正の値をとる.

続いて、HV のリンク移動時間を定式化する. HV は AV 専用リンクを利用できない. そこで本研究では、HV のリンク移動時間を以下に定める.

$$T_s^h(V_s^h, V_s^a) = t_s^0 \cdot \left(1 + \alpha_s \cdot \left(\frac{V_s}{(1 - x_{j,s})C_s}\right)^{\beta_s}\right) \quad (35)$$

このとき、HV が AV 専用リンクを利用した際の移動時間は ∞ となる. 本研究では HV は、logit 型の SUE にした

がって経路選択を行う. HV の経路コストも(32)-(34)式に示した定式化によって求められるものとする. したがって AV 専用リンクを含む経路移動時間が ∞ となるため、logit モデルの特性から HV がその経路を利用する確率は 0 となる. そのため AV 専用リンクを含む経路は実質的に AV 専用経路となる.

(5) 交通量配分問題の定式化

本研究では、同一の道路ネットワーク上に HV と AV が混在する状態を考える. HV と AV は互いに異なる経路選択行動をとるものとし、それらの経路選択問題はマルチユーザクラス型の交通量配分問題として定式化される. HV のドライバーの経路選択は、logit 型の確率的利用者均衡 (SUE) 条件によって表現する. Wang et al.³⁾と同様に、HV に関する一般化経路費用を(36)式に定める.

$$g_{w,k}^h = c_{w,k}^h + \frac{1}{\theta} \cdot \ln\left(\frac{f_{w,k}^h}{q_w^h}\right) \quad (36)$$

ここで、 $f_{w,k}^h$, q_w^h はそれぞれ $E[F_{w,k}^h]$, $E[Q_w^h]$ を表す. また、 θ は正の値をとるロジットモデルの分散パラメータであり、その値が大きいくほど、HV は確度の高い経路情報をもとに経路選択を行うことができる. ある OD ペアにおける SUE 配分の均衡条件は、利用される経路の一般化コストはすべて等しく、利用されていない経路のコストより小さいかせいぜい等しくなることである. この均衡条件を踏まえると、HV に関する均衡条件は変分不等式問題として(37)式に表せる.

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} g_{w,k}^h \cdot (f_{w,k}^h - f_{w,k}^{h*}) \geq 0 \quad (37)$$

s. t.

$$\sum_{k \in K_w} f_{w,k}^h = q_w^h \quad (38)$$

$$f_{w,k}^h \geq 0 \quad (39)$$

ここで、 $f_{w,k}^{h*}$ は均衡状態における $f_{w,k}^h$ を表す.

一方、AV の経路選択は、利用者均衡 (UE) 条件によって表現する. それは変分不等式問題として(40)式に表せる.

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} c_{w,k}^a \cdot (f_{w,k}^a - f_{w,k}^{a*}) \geq 0 \quad (40)$$

s. t.

$$\sum_{k \in K_w} f_{w,k}^a = q_w^a \quad (41)$$

$$f_{w,k}^a \geq 0 \quad (42)$$

(36)式から(42)式より、HV と AV が混在するネットワークにおける交通量配分問題は、変分不等式問題として(43)式に表せる.

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} g_{w,k}^h \cdot (f_{w,k}^h - f_{w,k}^{h*})$$

$$+ \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} c_{w,k}^a \cdot (f_{w,k}^a - f_{w,k}^{a*}) \geq 0 \quad (43)$$

ただし、制約条件は(38), (38), (41), (42)式である。

3. AV 専用リンク最適配置問題の定式化

本研究では、道路ネットワーク全体の総不効用が最小となるような AV 専用リンクの配置問題を定式化する。第 2 章の議論より、AV は UE に従って経路を選択することから、AV の総不効用は移動コストの総和とする。また、HV は logit 型の SUE に従って経路を選択することから、HV の総不効用は OD 間の期待最大効用に OD 需要の平均を乗じ、符号を反転したものとする。以上より、AV 専用リンク最適配置問題は以下のように定式化される。

$$\min_{J, x_j} \sum_{w \in W} c_w^{a*} \cdot q_w^a - \sum_{w \in W} \left(\ln \left(\sum_{k \in K_w} \exp(-c_{w,k}) \right) + \gamma \right) \cdot q_w^h \quad (44)$$

ここで、 c_w^{a*} は交通量配分問題から得られた、OD ペア w の最小移動コストであり、 γ はオイラーの定数である。また、この最適化問題では、総移動コストを求めるために第 2 章 5 節に示した交通量配分を下位問題とする。

4. 数値計算

(1) 設定

本章では小規模なテストネットワークにおける AV 専用リンク最適配置問題を解く。この数値計算では、図-2 に示す Nguyen-Dupuis ネットワーク⁹⁾を用いる。このネットワークは 13 個のノード、19 本のリンクを持ち、それぞれ図-2 に示した番号が与えられている。また、このネットワークは 4 つの OD ペア(ノード 1→2, 1→3, 4→2, 4→3)を有し、各 OD 内ペア内の経路とそれを構成するリンクは表-1 に示される。

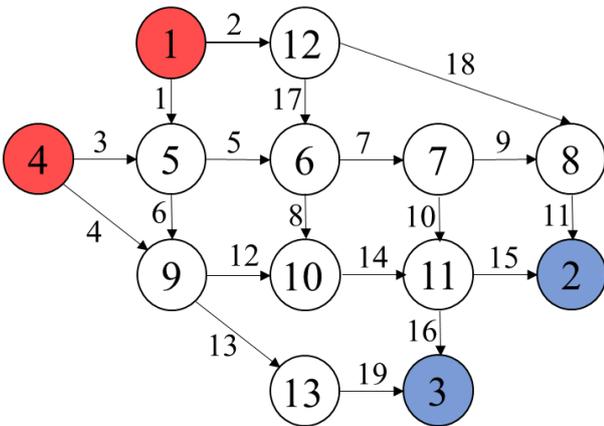


図-2. Nguyen-Dupuis ネットワーク

表-1. ネットワーク上の経路情報

OD	経路	構成リンク	OD	経路	構成リンク
	1	2-18-11	15	3-5-7-9-11	
	2	2-17-7-9-11	16	3-5-7-10-15	
	3	2-17-7-10-15	4→2	17	3-5-8-14-15
1→2	4	2-17-8-14-15	18	3-6-12-14-15	
	5	1-5-7-9-11	19	4-12-14-15	
	6	1-5-7-10-15	20	3-5-7-10-16	
	7	1-5-8-14-15	21	3-5-8-14-16	
	8	1-6-12-14-15	22	3-6-12-14-16	
	9	2-17-7-10-16	4→3	23	3-6-13-19
	10	2-17-8-14-16	24	4-12-14-16	
1→3	11	1-5-7-10-16	25	4-13-19	
	12	1-5-8-14-16			
	13	1-6-12-14-16			
	14	1-6-13-19			

ここで、各リンクの自由流移動時間はリンク 4 と 13 が 10[min], リンク 18 が 15[min], それ以外は 5[min]とした。BPR 関数のパラメータはすべてのリンクに関して等しく、 α_s と β_s をそれぞれ 0.15, 4 と定めた。このネットワークにおける 1 時間当たりの総交通需要の平均と変動係数はそれぞれ 18,000[pcu], 0.10 と与えた。また、OD 交通量は OD ペア 1→2 に 9,000[pcu], その他の OD に 3,000[pcu]として与えた。また、経路コストにおける分散項の係数 γ_r は 1.0 と定める。(36)式中の分散パラメータ θ は 0.1 とする。基準車頭時間 h_0 は 2.0[sec], h_0 に対する HV の臨界車頭時間の比率 R_h の分布パラメータ $\mu_{R_h}, \sigma_{R_h}^2$ はそれぞれ 0.14, 0.040 と設定した。このとき、HV の臨界車頭時間の平均 $E[H_h]$ は約 2.34[sec]となる。また、 h_0 に対する AV の臨界車頭時間の比率 R_a の分布パラメータ $\mu_{R_a}, \sigma_{R_a}^2$ はそれぞれ 0.0, 0.010 とした。このとき、AV の臨界車頭時間の平均 $E[H_a]$ は約 2.01[sec]となる。

(2) コントロールリンク集合

本節では第 2 章 2 節での議論から、Nguyen-Dupuis ネットワークのコントロールリンク集合を定める。表-1 に示した経路情報から経路-リンクインシデンス行列を作成し、コントロールリンク集合を求めた。ここでネットワークの形状から、例えば、リンク 13 とリンク 19 は必ず同一の経路に含まれる。AV 専用リンクの最適配置問題が経路ベースで考えられることから、リンク 13 を AV 専用リンクとすることはリンク 19 を AV 専用リンクにすることと等しい。したがって、リンク 13 または 19 の片方のみをコントロールリンク集合に含まれる要素として考えればよい。この計算では、リンク 13 のみコントロ

ールリンク集合に含まれる要素として、リンク 19 はコントロールリンクとして考えないものとする。

以上のことを踏まえ計算を行い、17 のコントロールリンク集合が得られた。得られた集合に含まれる要素の数ごとに区分したコントロールリンク集合を以下の表-2 にまとめる。

表-2. コントロールリンク集合

要素数	コントロールリンク
4	{1,2,3,4}
	{2,4,5,6}
	{2,5,12,13}
	{7,13,14,18}
	{10,11,13,14}
	{11,13,15,16}
5	{1,3,4,17,18}
	{4,5,6,17,18}
	{4,6,7,8,18}
	{4,6,8,10,11}
	{5,12,13,17,18}
	{7,8,12,13,18}
6	{8,10,11,12,13}
	{9,10,13,14,18}
	{9,13,15,16,18}
	{4,6,8,9,10,18}
	{8,9,10,12,13,18}

(3) 結果

本節では、前節で求めたコントロールリンク集合をもとに、AV 専用リンク配置問題を解く。ここでは、総交通需要に対する AV の比率 p_a が 70%, 80%, 90%の各場合

について計算を行った。求められた最適な AV 専用リンクの配置と、そのときの AV 専用経路の本数を表-3 に示す。与えた各 p_a に対して、AV 専用リンク配置前後での各車両の総不効用の変動を表-4 に示す。また、 p_a が 70%である場合の交通量配分の結果を表-5 に示す。

表-3, 4 より、AV 専用リンクの配置によって総不効用が減少することが示された。特に、AV に関する不効用が HV より大きく減少することが明らかになった。また、表-5 より、ほとんどの AV 専用経路の移動コストが配置前と比較して減少することが示された。また、OD4→2 のように AV 専用リンクに転換される経路を利用していた HV が、専用リンク配置後に他の経路に流入したことによって、その経路の移動コストが増加しうることも読み取れた。

表-3. AV 専用リンクの最適配置

p_a	AV 専用リンク	AV 専用経路数
70%	10, 12	12
80%	10, 12	12
90%	16	9

表-4. AV 専用リンク配置による不効用の変動

p_a	AV 専用リンク	不効用($\times 10^6$)		
		AV	HV	合計
70%	配置前	5.8406	2.4916	8.3322
	配置後	5.8119	2.4853	8.2972
80%	配置前	6.4838	1.6132	8.0970
	配置後	6.4732	1.6121	8.0852
90%	配置前	7.2314	0.7994	8.0308
	配置後	7.2259	0.7994	8.0253

表-5. AV 専用リンク配置前後の経路交通量と経路移動コスト

	配置前					配置後				
	経路	経路交通量		経路移動コスト		経路	経路交通量		経路移動コスト	
		HV	AV	HV	AV		HV	AV	HV	AV
1→2	1	342.1	3582.5	587.5	587.5	1	682.0	3195.1	584.7	584.7
	2	339.7	826.6	587.5	587.5	2	617.2	2.6	585.7	585.7
	3	334.8	106.5	587.6	587.6	3	0.0	1074.1	-	584.7
	4	335.3	87.6	587.6	587.6	4	391.2	0.1	590.2	590.2
	5	337.8	445.4	587.5	587.5	5	620.4	0.1	585.5	585.5
	6	337.5	814.0	587.5	587.5	6	0.0	483.9	-	584.5
	7	336.7	264.7	587.5	587.5	7	389.1	0.1	590.1	590.1
	8	336.2	172.7	587.6	587.6	8	0.0	1544.1	-	584.5
1→3	9	111.9	13.3	395.0	395.0	9	0.0	32.4	-	390.5
	10	108.6	4.2	395.3	395.3	10	183.2	0.9	396.4	396.4
	11	167.7	2.6	390.8	390.8	11	0.0	1217.9	-	386.8
	12	161.2	0.0	391.2	391.2	12	252.3	0.0	392.9	392.9
	13	165.6	0.5	391.0	391.0	13	0.0	56.7	-	387.1
	14	185.0	2079.5	389.8	389.8	14	464.5	792.1	386.9	386.9
4→2	15	155.3	43.7	419.7	419.7	15	586.0	257.3	418.3	418.3
	16	185.5	29.2	417.8	417.8	16	0.0	32.2	-	418.6
	17	179.7	0.3	418.2	418.2	17	313.9	0.0	424.5	424.5
	18	183.5	1.1	418.0	418.0	18	0.0	0.3	-	418.7
	19	195.9	2025.7	417.3	417.3	19	0.0	1810.3	-	418.0
4→3	20	155.2	539.1	211.4	211.4	20	0.0	4.0	-	209.3
	21	135.0	0.0	212.9	212.9	21	160.7	0.0	216.9	216.9
	22	149.8	1.3	211.8	211.8	22	0.0	0.0	-	210.3
	23	155.2	572.2	211.4	211.4	23	369.5	773.6	208.6	208.6
	24	149.6	4.4	211.8	211.8	24	0.0	1.9	-	210.2
	25	155.2	982.9	211.4	211.4	25	369.7	1320.4	208.6	208.6

5. まとめ

本研究では、AV と HV が混在する道路ネットワークにおいて、道路ネットワーク全体の移動コストが最小となる AV 専用リンクの最適配置計画手法を開発した。手法の開発に際し、道路ネットワークにおける移動時間の不確実性を考慮するため、Nitta et al. (2021)⁹で提案されたマルチクラス交通量配分モデルを用いた。AV 専用リンクの配置に関しては、リンクと経路の関係を踏まえ、実

行可能領域を経路ベースで考える定式化を行った。開発した手法は道路ネットワーク上の総不効用の最小化問題として定式化されている。

今後の課題として、コントロールリンク集合を求める効率的なアルゴリズムの開発が挙げられる。本稿で開発した手法を大規模ネットワークに適用した場合、コントロールリンク集合の個数が大幅に増加することが予想される。AV 専用リンクの最適配置問題を解くうえで、ネットワークの経路情報からコントロールリンク集合を効

率的に求められるアルゴリズムの開発が望まれる。

謝辞：本研究は北海道大学アンビシャス博士人材フェローシップ、JSPS 科研費 20J10083, 21H01446 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Bagloee, S. A., Sarvi, M., Pトリクソン, M. and Rajabifard, A., A mixed user-equilibrium and system-optimal traffic flow for connected vehicles stated as a complementarity problem, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.32, pp.562-580, 2017.
- 2) Zhang, K. and Nie, Y., Mitigating the impact of selfish routing: An optimal-ratio control scheme (ORCS) inspired by autonomous driving, *Transportation Research Part C*, Vol.87, pp.75-90, 2018.
- 3) Wang, J., Peeta, S., & He, X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 139–168, 2019.
- 4) Nitta, S., Tani, R., Kato, T. & Uchida, K., Development of a Multi-Class Traffic Assignment Model Considering Travel Time Reliability and Variable Link Capacity in the Spreading Process of Automated Vehicles, 8th International Symposium on Transport Network Reliability, 2021.
- 5) Chen, Z., He, F., Yin, Y., and Du, Y., Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99: pp.44–61, 2017.
- 6) Chen, Z., He, F., Zhang, L., and Yin, Y., Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72: 1pp.43–156, 2016.
- 7) Tani, R., Sumalee, A. and Uchida, K., Travel time reliability-based optimization problem for CAVs dedicated lanes. *Transportmetrica A: Network Science*, 2021.
- 8) Wu, W., Zhang, F., Liu, W., and Lodewijks, G., Modelling the traffic in a mixed network with autonomous-driving expressways and non-autonomous local streets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 134, 2020.
- 9) Nguyen S., Dupuis C., An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs, *Transportation Science*, Vol.18, No.2, pp.185-202, 1984

(?????.??? 受付)

Optimal Deployment Plan of Dedicated Links for Autonomous Vehicles with Considering the Travel Time Reliability.

Sho NITTA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

This study proposes an optimal deployment plan of dedicated Links for Autonomous Vehicles (AVs). In AVs and Human-driven Vehicles (HVs) mixed flow road network, the route choice behavior of HVs may inhibit the reduction of travel costs by AVs. We formulate an optimal deployment plan of AV dedicated links that minimizes the total disutility of the entire road network as the optimization problem. We introduce the concept of control links to avoid the disruption of OD due to the deployment of AV dedicated links. Multi-class traffic assignment model by which the effects of the mixed flow of AVs and HVs on a road network is applied to this method. Numerical calculations in a test network are presented to demonstrate the proposed method.