

特定条件下での完全自動運転車と手動運転車の混在流における 需要変動型交通量配分モデル

Traffic Assignment Model with Variable Demand for Mixed Flow of
Fully Autonomous and Manual Driving Vehicles under Specific Conditions

北海道大学工学部 ○学生員 田子喬一 (Kyoichi Tago)
北海道大学大学院工学院 学生員 栗原脩斗 (Shuto Kurihara)
北海道大学大学院工学研究院 正員 嶋 龍一 (Ryuichi Tani)
北海道大学大学院工学研究院 正員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

近年、自動運転に関する技術は急速に発展しており、交通状況もそれに伴い大きく変化することが予想される。特に、自動運転の効率的な運転挙動により、自動運転車同士、または自動運転車と手動運転車間の車間距離が短くなるため、交通容量の大幅な改善され、渋滞や交通事故の減少などが期待される。官民 ITS 構想・ロードマップ 2020¹⁾によると、自動運転車(AV)は、その自動運転レベルにより 0 から 5 までの 6 段階に分類される。

特にレベル 3 から 5 の間では、すべての運転挙動が自動で実行される。その内のレベル 4 では、高速道路上など限られた環境でのみの完全自動運転、レベル 5 では高速道路、一般道関係なく完全自動運転が行われると規定されている。

2022 年現在、国土交通省²⁾は 2025 年を目途に高速道路上での完全自動運転(レベル 4)の実現を掲げている。

また、時期は未定であるものの高速道路に限定しない完全自動運転(レベル 5)も見通されており、自動運転車の普及は進んでいくと考えられる。しかしレベル 5 は技術的、法律的な問題が数多く存在しており、その実現までに時間を要することが予想されるため、自動運転レベル 4 の自動運転車と従来の手動運転車(HV)が混在する状況が長く続くと考えられる。

Wu et al.³⁾はレベル 4 にあたる自動運転による走行が可能な高速道路と、手動運転でのみ走行が可能な一般道が混在するネットワークを想定した交通量配分モデルを提案した。この中で、自動運転時・手動運転時それぞれに設定された時間価値と高速道路の出口位置の変化が均衡フローにどのような影響を及ぼすかを明らかにした。

Wang et al.⁴⁾はレベル 5 の自動運転車に無料アクセスを許可する一方で、手動運転車には通行料を支払うことでアクセスを許可する AVT(autonomous vehicle/toll) レーンにおいて交通量が均衡フローに与える影響を推定するために、混在流における自動運転車と手動運転車の反応時間の違いを考慮した交通容量を設定し、弾性需要によるマルチクラス交通量配分問題(MTA-ED 問題)を提案した。

先行研究では自動運転レベル 5 の状況を想定した研究は多く存在する。一方で、自動運転レベル 4 に相当する自動運転車が実現した社会において、自動運転で走行可

能なリンク(AV 高速道路)と手動運転のみで走行可能なリンク(非自動運転道路)の両方がネットワーク上に存在し、さらに、自動運転車と手動運転車が同じ道路空間に共有する交通システムを明示的にモデル化して分析する研究は少ない。

本研究では、一般道では手動走行し、高速道路上でのみ AV として自動走行するレベル 4 の機能を有するコネクテッドカー(CV)と、従来の手動運転車(HV)が混在する状況を想定する。さらに、以下の 3 種類のリンクが混在する状況を想定する。

- AV として走行する CV と HV が利用可能な高速道路リンク
- AV として走行する CV のみが利用可能な高速道路リンク
- HV として走行する CV と HV が利用可能な一般道リンク

リンクの交通容量は各車両の先行車の挙動に対する追従車の反応時間の影響を受けるため、前述の CV と HV が混在する状況では、HV のみの状況とは異なるリンクの交通容量になることが予想される。本研究では、リンクの種類によって異なる交通容量と、車両が AV、HV どちらのモードで走行するかによって異なる値をとる時間価値を考慮し、CV と従来の HV が混在するネットワークにおける需要変動型交通量配分モデルを提案する。

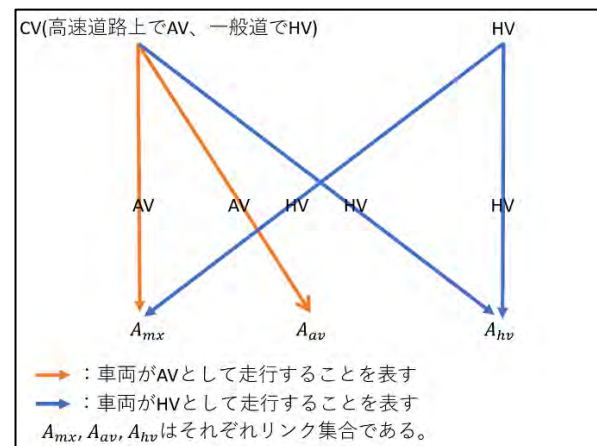


図-1 2種類の車両と3種類のリンク集合

2. モデルの定式化

2.1 記号

W	OD ペア集合
K_w	OD ペア w ($\in W$)における経路集合
A	リンク集合 ($A = A_{mx} \cup A_{av} \cup A_{hv}$)
A_{mx}	AVとして走行するCVとHVが利用可能な高速道路リンクの集合
A_{av}	AVとして走行するCVのみが利用可能な高速道路リンクの集合
A_{hv}	HVとして走行するCVとHVが利用可能な一般道リンクの集合
Ω_f	実行可能な経路交通量ベクトルの集合
Λ_z	ODパスインシデンス行列
q_w	ODペア w での交通需要
q_w^z	ODペア w における車両 $z \in \{hv, cv\}$ の交通需要(添字 hv, cv はそれぞれ車両HV, CVを表す)
q_w^{z*}	均衡状態におけるODペア w 間の交通需要
$f_{w,k}^z$	ODペア w における経路 k 上の車両 z の交通量
$f_{w,k}^{z*}$	車両 z の利用者均衡状態におけるODペア w の経路 k の交通量
\mathbf{f}	経路交通量ベクトル
\mathbf{f}^*	均衡状態における経路交通量ベクトル
\mathbf{f}_z	車両 z の経路交通量ベクトル
\mathbf{f}_z^*	車両 z の均衡状態における経路交通量ベクトル
V_a	リンク a の交通量
$p_{av,a}$	リンク a の交通量に対するAVとして走行するCV車両の比率
C_a	リンク a の交通容量
ω_{hv}	HVの反応時間
ω_{av}	リンク a ($\in A_{mx}$)におけるAVとして走行するCVの反応時間
ω'_{av}	リンク a ($\in A_{av}$)におけるAVとして走行するCVの反応時間
μ	全車両の長さの平均値
T_a	リンク a の移動時間
t_a^0	リンク a の自由旅行時間
α_a, β_a	リンク a のBPR関数のパラメータ
$T_{w,k}^{mx}$	ODペア w 間の経路 k におけるAVとして走行するCVとHVが利用可能な高速道路上の移動時間
$T_{w,k}^{av}$	ODペア w 間の経路 k におけるAVとして走行するCVのみが利用可能な高速道路上の移動時間
$T_{w,k}^{hv}$	ODペア w 間の経路 k におけるHVとして走行するCVとHVが利用可能な一般道上の移動時間
$C_{w,k}^z$	ODペア w 間の経路 k における車両 z の経路コスト
C_w^z	ODペア w 間における車両 z の最小経路コスト
$C_z(\mathbf{f}^*)$	車両 z の経路コストのベクトル

$GC_{w,k}^z$	ODペア w 間の経路 k における車両 z の一般化コスト
VOT_{hv}	車両 z のHVモードにおける自動車の時間価値
VOT_{av}	車両 z のAVモードにおける自動車の時間価値
$P_{mx,a}$	リンク a ($\in A_{mx}$)の通行料金
$P_{av,a}$	リンク a ($\in A_{av}$)の通行料金
$P_{w,k}$	ODペア w 間の経路 k における高速道路の通行料

2.2 交通流の定式化

ODペア w における交通需要 q_w と各車両の交通需要の関係は以下の式(1)で表せる。

$$q_w = \sum_{z \in \{hv, cv\}} q_w^z \quad (1)$$

ODペア w における車両 z の交通需要 q_w^z は車両 z の経路交通量の和となるため、式(2)で表せる。

$$q_w^z = \sum_{k \in K_w} f_{w,k}^z \quad (2)$$

where

$$f_{w,k}^z \geq 0, \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (3)$$

ODペア w における経路 k 上の交通量 $f_{w,k}$ は以下のように表される。

$$f_{w,k} = \sum_{z \in \{hv, cv\}} f_{w,k}^z \quad (4)$$

車両 z のリンク a の交通量は、リンク a を通るすべての経路交通量の和であり、式(5)で表される。

$$V_a^z = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_w^{k,a} \cdot f_{w,k}^z \quad (5)$$

リンク a の交通量は式(6)で表される。

$$V_a = \sum_{z \in \{hv, cv\}} V_a^z \quad (6)$$

2.3 リンク交通容量の定式化

Wang et al.⁵⁾を基に、リンク a における交通容量は以下の式(7)-(9)として表される。

$$C_a = t_a^0 \frac{1}{t_a^0 \cdot \left((1 - p_{av,a}) \cdot \omega_{hv} + p_{av,a} \cdot \omega_{av} \right) + \mu} \quad \forall a \in A_{mx} \quad (7)$$

$$C_a = t_a^0 \frac{1}{t_a^0 \cdot \omega'_{av} + \mu}, \forall a \in A_{av} \quad (8)$$

$$C_a = t_a^0 \frac{1}{t_a^0 \cdot \omega_{hv} + \mu}, \forall a \in A_{hv} \quad (9)$$

where

$$\omega_{hv} > \omega_{av} > \omega'_{av} \quad (10)$$

$$p_{av,a} = \frac{V_a^{cv}}{V_a}, \forall a \in A_{mx} \quad (11)$$

式(7)はAVとして走行するCVとHVが利用可能な高速道路リンク($a \in A_{mx}$)の交通容量を示しており、リンク内のAVとして走行するCV車両の比率と、先行車の

挙動に対する反応時間 ω_{hv} 、 ω_{av} を考慮して表される。ただしHVの先行車の挙動に対する反応時間 ω_{hv} はAVとして走行するCVの先行車の挙動に対する反応時間 ω_{av} より大きくなるとする。

式(8)はAVとして走行するCVのみが走る高速道路のリンク($a \in A_{av}$)の交通容量を示している。このリンクではAV挙動をする車両のみが存在するため、リンク内の車両は先行車だけでなく、全車両の挙動が把握できることが想定される。よって先行車の挙動に対する反応時間 ω'_{av} は ω_{hv} 、 ω_{av} よりも小さく考えられる。

式(9)はHVとして走行するCVとHVが走る一般道のリンク($a \in A_{hv}$)の交通容量を示している。このリンクでは、全車両はHVとして走行する。よって先行車の挙動に対する反応時間は式(7)で使用した、 ω_{hv} を用いてリンク内の交通容量を表せる。

式(10)は各リンク集合における車両の先行車の挙動に対する追従車の反応時間の大小関係を示している。

式(11)はリンク集合 A_{mx} のリンク内において、AVとして走行するCV車両の比率を示しており、リンク内交通量とAVとして走行するCVの交通量を用いて表せる。

2.4 移動時間の定式化

本研究におけるリンク移動時間は式(12)に示すBPR関数によって算出する。

$$T_a(V_a^{hv}, V_a^{cv}) = t_a^0 \cdot \left(1 + \alpha_a \cdot \left(\frac{V_a^{hv} + V_a^{cv}}{C_a(V_a^{hv}, V_a^{cv})} \right)^{\beta_a} \right) \quad \forall a \in A \quad (12)$$

2.5 一般化コストの定義

ODペア w 間の経路 k の移動時間 T_w^k は、経路上の各リンクの移動時間の和であり、式(13)の関係が成立する。

$$T_w^k = T_{w,k}^{mx} + T_{w,k}^{av} + T_{w,k}^{hv} \quad (13)$$

where

$$T_{w,k}^{mx} = \sum_{a \in A_{mx}} \delta_w^{k,a} \cdot T_a(V_a^{hv} + V_a^{cv}) \quad (14)$$

$$T_{w,k}^{av} = \sum_{a \in A_{av}} \delta_w^{k,a} \cdot T_a(V_a^{hv} + V_a^{cv}) \quad (15)$$

$$T_{w,k}^{hv} = \sum_{a \in A_{hv}} \delta_w^{k,a} \cdot T_a(V_a^{hv} + V_a^{cv}) \quad (16)$$

$$\forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (17)$$

本研究における道路ネットワーク上のリンクはAVとして走行するCVとHVが利用可能な高速道路リンク($a \in A_{mx}$)、AVとして走行するCVのみが利用可能な高速道路リンク($a \in A_{av}$)、HVとして走行するCVとHVが利用可能な一般道リンク($a \in A_{hv}$)の3種類である。

高速道路リンクの通行料はリンクの種類ごとに異なると仮定する。ODペア w における経路 k の高速道路の通行料 $P_{w,k}$ は、栗原ら⁶⁾に基づき、経路を構成する高速道路リンクの通行料の和と定義し、以下の式(18)で表される。

$$P_{w,k} = \sum_{a \in A_{mx}} \delta_w^{k,a} \cdot P_{mx,a} + \sum_{a \in A_{av}} \delta_w^{k,a} \cdot P_{av,a} \quad (18)$$

ODペア w 間の経路 k における各リンク上の移動時間に乗ずる時間価値は車種($z \in \{hv, cv\}$)のみによって決まるのではなく、各車両がAV、HVどちらの挙動をするかによって決まる。よって同じ車種であっても移動するリンクによって時間価値が異なる。

以上より車両 $z \in \{hv, cv\}$ の一般化コストはそれぞれ式(19)(20)で表される。

$$GC_{w,k}^{hv} = VOT_{hv} \cdot (T_{w,k}^{mx} + T_{w,k}^{hv}) + P_{w,k} \quad (19)$$

$$GC_{w,k}^{cv} = VOT_{av} \cdot (T_{w,k}^{mx} + T_{w,k}^{av}) + VOT_{hv} \cdot T_{w,k}^{hv} + P_{w,k} \quad (20)$$

where

$$GC_{w,k}^z, \forall z \in \{hv, cv\} \quad (21)$$

2.6 需要変動の定式化

本研究では、OD間の交通需要は固定的な値ではなく、OD間の交通サービス水準の大小によって変化するとし、需要変動型の利用者均衡を考慮する。

ODペア w 間における車両 z の交通需要 q_w^z は最小経路コスト C_w^z の関数として式(22)で表される。

$$q_w^z = D_w^z(C_w^z), \forall w \in W \quad (22)$$

where

$$C_w^z = \min_{k \in K_w} C_{w,k}^z, \forall w \in W, \forall z \in \{hv, cv\} \quad (23)$$

$$C_w^z \geq 0 \quad (24)$$

Wang et al.⁴⁾と同様に車両 z の経路コストは逆需要関数を使い、式(25)で表される。

$$C_{w,k}^z = GC_{w,k}^z - D_w^{-1,z}(q_w^{z*}), \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (25)$$

2.7 利用者均衡配分の定式化

需要変動を考慮した利用者均衡配分の条件は式(26)-(28)で表される。

$$f_{w,k}^z \cdot (C_{w,k}^z - C_w^z) = 0 \quad \forall k \in K_w, \forall w \in W, \forall z \in \{hv, cv\} \quad (26)$$

$$f_{w,k}^z \geq 0, (C_{w,k}^z - C_w^z) \geq 0 \quad \forall k \in K_w, \forall w \in W, \forall z \in \{hv, cv\} \quad (27)$$

$$\sum_{k \in K_w} f_{w,k}^z = D_w^z(C_w^z) \quad \forall w \in W, \forall z \in \{hv, cv\} \quad (28)$$

式(28)は経路交通量の和がOD間の交通需要に等しく、OD間の交通需要が需要関数により定められることを表している。

本研究では、CVとHVの混在流を考慮した交通容量によってリンク移動時間が非対称になるため、交通量配分問題を最適化問題として定式化できない。そこで、交通量配分問題を以下に示す変分不等式問題として定式化する。

$$\sum_{z \in \{hv, cv\}} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} C_{w,k}^z(\mathbf{f}^*) \cdot (f_{w,k}^z - f_{w,k}^{z*}) \geq 0 \quad (29)$$

ベクトル表記で定式化すると、式(30)となる。

$$\sum_{z \in \{hv, cv\}} \mathbf{C}_z(\mathbf{f}^*)^T \cdot (\mathbf{f}_z - \mathbf{f}_z^*) \geq 0 \quad (30)$$

where

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_z^T \in \Omega_f &= \{\mathbf{f}_z^T \mid \wedge_z \mathbf{f}_z = \mathbf{q}_z; \mathbf{f}_z \geq \mathbf{0}\}, \forall z \in \{hv, cv\} \\ \mathbf{f}^* &= [\mathbf{f}_{hv}^{T*}, \mathbf{f}_{cv}^{T*}] \end{aligned} \quad (31)$$

$\mathbf{C}_z(\mathbf{f}^*)$ は車両 z の経路コストをベクトルで表したものである。

3.まとめと今後の課題

本研究では、レベル4のコネクテッドカー(CV)と従来の手動運転車(HV)が混在する状況を想定した上でリンクの種類によって変化する、先行車の挙動に対する追従車の反応時間を考慮した交通容量と、各リンク上での運転モードによって異なる値をとる時間価値を考慮した需要変動型の利用者均衡配分モデルを提案した。

今後は仮想ネットワーク上での数値実験を行い、モデルの挙動を検証する。

4.参考文献

- 1) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議:官民 ITS 構想・ロードマップ 2020, https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_2020.pdf(閲覧日 2022.11.2

9)

- 2) 国土交通省:自動運転の実現に向けた国土交通省の取り組み・参考資料, <https://www.mlit.go.jp/common/001227121.pdf>(閲覧日 2022.11.29)
- 3) Wu, W., Zhang, F., Liu, W., & Lodewijks, G. (2020). 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, 101855.
- 4) Wang, J., Lu, L., Peeta, S., & He, Z. (2021). Optimal toll design problems under mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125, 102952.
- 5) Wang, J., Peeta, S., & He, X. (2019). 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.
- 6) 栗原脩斗, 峪龍一, 内田賢悦:高速道路上の完全自動運転化を前提とする確率的時間価値の異質性を考慮した最適通行料金モデル,第66回土木計画学研究発表会.