

高速道路上の完全自動運転化を前提とする 確率的な時間価値の異質性を考慮した交通量配分モデル

Traffic Assignment Model with Heterogeneity of Stochastic Value of Time
Assuming Completely Autonomous Driving on Expressway

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学院

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

○学生員 栗原脩斗 (Shuto Kurihara)

学生員 新田 翔 (Sho Nitta)

正 員 峪 龍一 (Ryuichi Tani)

正 員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

道路ネットワークの利用者は、各々の時間価値に基づいて移動の是非の判断や経路選択をする。時間価値は社会的属性や移動の目的、経済的環境など様々な要因によって決まり、利用者ごとに異なる^{1),2)}。しかし、多くの交通量配分の手法では時間価値は確定的な値として用いられている。

近年では自動運転車両の研究開発が進展しており、自動運転化により道路ネットワーク利用者は移動中に運転する必要がなくなる。そのため利用者は移動中、運転に代わって仕事や趣味など自由に時間を使うことができるようになり、利用者が運転する場合と比べて時間価値は低下する³⁾。

自動運転はレベル0からレベル5の6段階のレベルに分類される。特に、レベル3からレベル5の自動車は、自動運転システムの作動時にすべての運転タスクが自動で実行される。2021年現在、日本ではレベル3の自動運転システムを搭載した自動運転車両が実用化されている。この車両では、自動運転を継続することが困難な場合には運転者が運転操作をするという条件の下で、渋滞時の高速道路において自動運転が可能になった。さらに、官民ITS構想・ロードマップ2020⁴⁾では、2025年を目途に、限定領域内で運転者による運転操作が必要ないレベル4の自動運転が、高速道路上を走行する自家用車で利用可能になると見込まれている。レベル4の状況下では、利用する道路によって経路内で運転のモードが異なるため、時間価値も利用する道路によって異なる。レベル5は、自動運転が走行領域を限定されずに利用可能になる段階であり、その技術的レベルは非常に高く、達成には時間を要することが予想される。以上より、自動運転技術の開発段階ではレベル4の状況が長い間継続すると考えられる。

既存研究では、利用者ごとの時間価値の異質性を考慮したモデルがいくつか提案されている。Leurent⁵⁾は、確率的な時間価値を持つネットワーク利用者の均衡配分モデルを提案した。Wu and Huang⁶⁾は、利用者間に時間価値が連続的に分布していると仮定し、利用者均衡とシステム最適それぞれに基づく交通量配分モデルを提案した。いずれの研究も人間が車両を運転する場合のみを想定しており、自動運転時と人間による手動運転時の時間価値

の違いや移動コストの不確実性は考慮されていない。

また、自動運転化レベル5の状況を想定した研究は多数ある一方で、自動運転化レベル4にあたる、高速道路などの一部の道路上でのみ自動運転が可能な状況を想定した研究は少数である。Wu et al.⁷⁾は自動運転時の時間価値と人間による手動運転時の時間価値の値をそれぞれ設定し、自動運転による走行が可能な高速道路と手動運転で走行する一般道路が混在する特定のネットワークを想定した交通量配分モデルを提案した。

本研究では、図-1のような高速道路と一般道路が混在する任意のネットワークにおいて、自動運転化レベル4の状況を想定し、すべての車両が高速道路上で自動運転可能であると仮定する。また、確率的な時間価値を用いて利用者の異質性を考慮した需要変動型の交通量配分モデルを提案する。

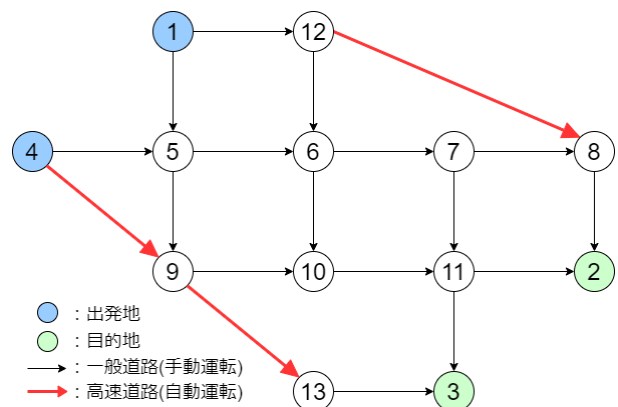


図-1 高速道路と一般道路が混在するネットワーク例
Nguyen and Dupuis⁸⁾のテストネットワークをもとに作成

2. 定式化

2.1 記号

本稿で用いる主な記号を示す。

W	道路ネットワーク中の OD ペア集合
K_w	OD ペア $w(\in W)$ 間の経路集合
A	道路ネットワーク中のリンク集合
A_e	高速道路リンクの集合
A_l	一般道路リンクの集合
Ω	経路交通量パターン集合
α	自動運転時の時間価値

β	手動運転時の時間価値
ρ	手動運転から自動運転に切り替わったときの時間価値減少率
$\mu_\beta, \sigma_\beta^2$	β のパラメータ
x_a	リンク a の交通量
t_a	リンク a の移動時間
t_a^0	リンク a の自由走行時間
p_a	リンク a ($\in A_e$)の通行料
c_a	リンク a の交通容量
γ, n	BPR 関数のパラメータ
GC_w^k	OD ペア w 間の経路 k の一般化コスト
$\delta_w^{k,a}$	リンク a が OD ペア w 間の経路 k を構成するとき 1、それ以外の時に 0 をとる変数
f_w^k	OD ペア w 間の経路 k の交通量
Te_w^k	OD ペア w 間の経路 k における高速道路上の移動時間
Tl_w^k	OD ペア w 間の経路 k における一般道路上の移動時間
P_w^k	OD ペア w 間の経路 k における高速道路の通行料
$D_w(c_w)$	OD ペア w 間の最小経路コスト c_w に関する需要関数
φ, ω	需要関数のパラメータ
c_w^k	OD ペア w 間の経路 k の経路コスト
c_w	OD ペア w 間の最小経路コスト
f_w^{k*}	利用者均衡状態における OD ペア w 間の経路 k の交通量
f	経路交通量パターン
f^*	利用者均衡状態の経路交通量パターン

2.2 交通流の定式化

OD ペア w での交通需要 q_w は OD ペア w 間を発着するすべての経路交通量の和であり、式(1)で表される。

$$q_w = \sum_{k \in K_w} f_w^k \quad (1)$$

where

$$f_w^k \geq 0, \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (2)$$

リンク交通量 x_a はリンク a を通過するすべての経路交通量の和であり式(3)で表される。

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_w^{k,a} \cdot f_w^k \quad (3)$$

2.3 一般化コストの定義

本研究では、リンク移動時間は式(4)に示す BPR 関数により算出する。

$$t_a(x_a) = t_a^0 \cdot \left(1 + \gamma \cdot \left(\frac{x_a}{c_a}\right)^n\right) \quad (4)$$

また、自動運転時の時間価値 α を手動運転時の時間価値 β を用いて式(5)で表す。 ρ は手動運転から自動運転に切り替わったときの時間価値減少率を表し、 $0 < \rho \leq 1$ の値をとる定数である。

$$\alpha = \rho \cdot \beta \quad (5)$$

ここで、 β は確率変数とする。異なる時間価値を 1 つの

確率変数で表すことにより、時間価値の確率分布の加法性を考慮する必要はなく、 β の分布は任意に与えることができる。本研究では、定式化の簡略化と、 β が非負であることを考慮して、Leurent⁵⁾と同様に対数正規分布に従うものとする。

$$\beta \sim LN(\mu_\beta, \sigma_\beta^2) \quad (6)$$

このとき、 β の平均と分散はそれぞれ式(7), (8)で表される。

$$E[\beta] = \exp\left(\mu_\beta + \frac{\sigma_\beta^2}{2}\right) \quad (7)$$

$$\text{var}[\beta] = \exp(2\mu_\beta + \sigma_\beta^2) \cdot (\exp(\sigma_\beta^2) - 1) \quad (8)$$

また、 α の平均と分散は β と ρ を用いてそれぞれ式(9), (10)で表せる。

$$E[\alpha] = E[\rho \cdot \beta] = \rho \cdot E[\beta] \quad (9)$$

$$\text{var}[\alpha] = \text{var}[\rho \cdot \beta] = \rho^2 \cdot \text{var}[\beta] \quad (10)$$

本研究では、すべての車両が自動運転での走行が可能であり、高速道路上では自動運転、一般道路上では人間により手動で運転されると仮定する。また高速道路の利用には通行料が課せられるとする。ここで OD ペア w 間の経路 k の一般化コスト GC_w^k を以下のように定義する。

$$GC_w^k = \alpha \cdot Te_w^k + \beta \cdot Tl_w^k + P_w^k \quad (11)$$

where

$$Te_w^k = \sum_{a \in A_e} \delta_w^{k,a} \cdot t_a(x_a) \quad (12)$$

$$Tl_w^k = \sum_{a \in A_l} \delta_w^{k,a} \cdot t_a(x_a) \quad (13)$$

$$P_w^k = \sum_{a \in A_e} \delta_w^{k,a} \cdot p_a \quad (14)$$

この定義では、道路ネットワーク中のリンクは高速道路リンクと一般道路リンクに分けられ、リンク集合は $A = A_e \cup A_l$ ($A_e \cap A_l = \emptyset$)と表される。OD ペア w 間の経路 k を構成する高速道路リンク上の移動時間の合計と一般道路リンク上の移動時間の合計は式(12), (13)で表される。それぞれ、高速道路上の移動時間に自動運転時の時間価値を乗じ、一般道路上の移動時間に手動運転時の時間価値を乗じる。さらに経路 k を構成する高速道路リンクの通行料の合計を経路の通行料として式(14)で表し、時間価値を乗じた移動時間と経路の通行料の和が一般化コストとして式(11)のように定義される。ここで、式(5)により一般化コストは式(15)のように確率変数 β のみを用いて表せる。

$$GC_w^k = (\rho \cdot \beta) \cdot Te_w^k + \beta \cdot Tl_w^k + P_w^k = \beta \cdot (\rho \cdot Te_w^k + Tl_w^k) + P_w^k \quad (15)$$

式(15)より、一般化コスト GC_w^k の平均と分散は、 β の平均と分散をそれぞれ用いて式(16), (17)で表せる。

$$E[GC_w^k] = E[\beta] \cdot (\rho \cdot Te_w^k + Tl_w^k) + P_w^k \quad (16)$$

$$\text{var}[GC_w^k] = \text{var}[\beta] \cdot (\rho \cdot Te_w^k + Tl_w^k)^2 \quad (17)$$

2.4 経路コストの定義

本研究では、Uchida⁹⁾と新田ら¹⁰⁾に従い一般化コスト

のばらつきを考慮した利用者のリスク回避的な経路選択を考慮する。ODペア w 間の経路 k の一般化コストの平均と一般化コストの標準偏差に λ を乗じた値の和を、経路コスト c_w^k とし式(18)に定める。

$$c_w^k = E[GC_w^k] + \lambda \cdot \sqrt{\text{var}[GC_w^k]} \quad (18)$$

ここで、標準偏差項の係数 λ はリスク回避度を表す定数であり、正の値をとる。この経路コストを経路選択基準として用いる。

2.5 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間のサービス水準によって変動することを考慮する。ODペア w 間の交通需要 q_w は w 間の最小経路コストの関数として表される。

$$q_w = D_w(c_w) \quad (19)$$

where

$$D_w(c_w) = \varphi \cdot \exp(-\omega \cdot c_w) \quad (20)$$

$$c_w = \min_{k \in K_w} c_w^k \quad (21)$$

$$c_w \geq 0 \quad (22)$$

ここで、 $D_w(c_w)$ は需要関数であり、式(20)の指数関数で表す。 φ , ω は需要関数のパラメータであり、正の値をとる。

2.6 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以下の式(23)-(25)と式(2), (22)で表される。

$$f_w^k \cdot (c_w^k - c_w) = 0, \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (23)$$

$$c_w^k - c_w \geq 0, \forall k \in K_w, \forall w \in W \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K_w} f_w^k = D_w(c_w), \forall w \in W \quad (25)$$

式(25)は、式(1)のフロー保存条件を考慮したOD間の需要に関する条件である。経路を構成するリンクのコストに加法性があるとき、経路ごとに表された変数をリンクごとの変数に置き換えることができ、利用者均衡の条件は等価な最適化問題として表現できる。しかし、本研究では式(18)の経路コストの定義に標準偏差項が含まれており、経路を構成するリンクのコストに対して加法性は成り立たない。そのため、リンクに関する変数を用いた表現はできず、利用者均衡配分を最適化問題として表すことができない。そこで本研究では、均衡条件を経路に関する変数を用いた変分不等式問題として以下のように表す。

Find $f^* \in \Omega$

$$\text{s.t. } \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} c_w^k(f^*) \cdot (f_w^k - f_w^{k*}) \geq 0, \quad (26)$$

$$\forall f \in \Omega$$

ここで、 Ω は式(2), (25)を満たす経路交通量パターン集合である。

3. まとめと今後の課題

本研究では、高速道路上のみの完全自動運転化を前提として、利用する道路により時間価値が異なること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。このモデルでは、利用者の異質性を表すため、運転者の時間価値を対数正規分布に従う確率変数とする定式化を提案した。今後はテストネットワークにおいて数値実験を行いモデルの検証をする。

4. 参考文献

- 1) 城間洋也, 福田大輔, 岡英紀, 和泉範之: 複数データを用いた時間価値分布推計: 首都圏高速道路利用者を対象とした実証分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.75, No.6(土木計画学研究・論文集第37巻), pp.I_405-I_414, 2020.
- 2) 河野達仁, 森杉壽芳: 時間価値に関する理論的考察—私的交通のケース—, 土木学会論文集, Vol.2000, No.639, pp.53-64, 2000.
- 3) Steck, F., Kolarova, V., Bahamonde-Birke, F., Trommer, S. and Lenz, B.: How Autonomous Driving May Affect the Value of Travel Time Savings for Commuting, Transportation Research Record, Vol.2672, No.46, pp.11-20, 2018.
- 4) 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://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20200715/2020_roadmap.pdf (閲覧日 2021.12.1)
- 5) Leurent, F.: Cost versus time equilibrium a network, European Journal of Operational Research, Vol.71, No.2, pp.205-221, 1993.
- 6) Wu, W. X. and Huang, H. J.: Finding anonymous tolls to realize target flow pattern in networks with continuously distributed value of time, Transportation Research Part B, Vol.65, pp.31-46, 2014.
- 7) 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, Vol.134, 2020.
- 8) 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.
- 9) Uchida, K.: Estimating the value of travel time and of travel time reliability in road networks, Transportation Research Part B, Vol.66, pp.129-147, 2014.
- 10) 新田翔, 峪龍一, 内田賢悦: 自動運転車両普及過程における移動時間信頼性を考慮したマルチクラス交通量配分モデルの開発, 第62回土木計画学研究発表会・講演集, 2020.