

自動運転車両普及後の道路ネットワーク における移動時間不確実性を考慮した 走行時間短縮便益の推計手法の開発

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 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: ryuichitani@eis.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 (〒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

近年、自動運転技術の発展に伴い、自動運転車両(以下 AV)の実社会への導入が目指されている。AV は人間と経路選択行動が異なるため、所要時間や混雑などの交通状況が改善され、様々な便益が生じると考えられる。しかし、AV の道路ネットワークへの導入による便益の推計手法は未確立である。

そこで本研究では、AV が普及した道路ネットワークにおけるすべてのドライバーの総移動時間について、人間が運転する車両のみの場合と比較する。それらの差から、道路ネットワーク全体でどれほど走行時間を短縮できたかを走行時間短縮便益として推計する。また、便益推計の過程での交通量配分に関して、道路ネットワークにおける移動時間の不確実性という点に着目し、移動時間信頼性を考慮した交通量配分計算を導入する。

Key Words: *Travel Time Reliability, Travel Time Reduction Benefit, Autonomous Vehicles, Stochastic Travel Demand, Road Network*

1. 背景と目的

近年、自動運転技術は世界的に発展している。それに伴い、日本でも自動運転車両の実用化に向けた動きが加速している。こうした背景を受けて、自動運転車両の道路ネットワークへの導入によってさまざまな便益が生じることが見込まれている。

そこで、本研究では自動運転車両の導入による交通状況の改善という点に着目した。とりわけ、自動運転車両が完全に普及した道路ネットワークにおいて、人間が運転する車両のみの場合と比較してどれほど走行時間を短縮できたかを金銭的価値、すなわち走行時間短縮便益として推計する。また、便益の推計の過程では道路ネットワークにおける移動時間の不確実性、すなわち移動時間信頼性を考慮した交通量配分計算を行う。

既存研究では移動時間信頼性を考慮した交通量配分モ

デルがいくつか提案されている。その多くはネットワーク内における交通需要を確率変数として仮定している。

例えば、Nakayama and Takayama¹⁾は 2 項分布に従う交通需要を提案した。Clark and Watling²⁾はポアソン分布に従う交通需要を提案した。また、Lam et al.³⁾は正規分布に従う交通需要を提案した。しかし、Uno et al.⁴⁾は交通需要が非対称な分布形状をもつ確率変数であることを観測によって明らかにした。このことから、Zhou and Chen⁵⁾、Sumalee and Xu⁶⁾は各 OD ペアの交通需要が対数正規分布に従う交通量配分モデルを提案した。

また、移動時間信頼性を考慮した便益評価手法もいくつか提案されている。Fosgreau and Kralström⁷⁾は移動時間の分散を考慮した効用モデルを提案した。Kato and Uchida⁸⁾は観測リンク交通量から移動時間信頼性の価値を推定するモデルを提案した。本研究では、移動時間の分散を考慮したドライバーの効用関数から、一般化費用

のアナロジーとして一般化時間という数量を定義し、走行時間短縮便益を推計する。

加えて、自動運転車両の普及をみこして、自動運転車両と人間が運転する既存の車両が同じ道路ネットワークに併存する状況を考慮した交通量配分モデルが提案されている。Zhang and Nie⁹⁾は既存の車両は確率的利用者均衡配分原則 (SUE) に従い、自動運転車両は利用者均衡配分原則 (UE) に従うと仮定する交通量配分モデルを提案した。また、Bagloee et al.¹⁰⁾は既存の車両は利用者均衡配分原則に従い、connected vehicle は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。Tani and Uchida¹¹⁾は自動運転車両と道路インフラが相互通信することによりシステム最適配分が実現するとして、既存の車両は時間信頼性を考慮した利用者均衡配分原則 (TTR-UE) に従い、自動運転車両は時間信頼性を考慮したシステム最適配分原則 (TTR-SO) に従うと仮定した交通量配分モデルを提案した。本研究では Tani and Uchida¹¹⁾をもとに、人間が運転する自動車は TTR-UE 配分原則に従うものとし、自動運転車両は TTR-SO 配分原則に従うものと仮定する。

自動運転車両が TTR-SO 配分原則に従うかどうかという点については、様々な議論があると想定される。しかし、本研究において自動運転は、①社会的に望ましい交通状況の実現に資するべきものであること、②混雑課金等を必要とせずにそうした状況を実現できることの2つの理由から、自動運転車両は TTR-SO 配分原則に従うという立場をとる。

2. モデルの定式化

(1) 記号

W :	OD ペア集合
K :	経路集合
A :	リンク集合
Q :	ネットワーク全体の総交通需要 (自動車の生成交通量)
p_w :	総交通需要に占める OD ペア w の交通需要の割合
cv :	総交通需要の変動係数
$F_{w,k}$:	OD ペア w における経路 k の交通量
V_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
c_a :	リンク a の交通容量
β_a, n :	BPR 関数のパラメータ
$T_{w,k}$:	OD ペア w における経路 k の経路移動時間
TT :	総移動時間

$\delta_{w,k,a}$: リンク a が OD ペア w における経路 k を構成するときに 1 を、それ以外るときに 0 をとる変数

(2) 交通流の定式化

本研究では総交通需要 Q を対数正規分布に従う確率変数とする。このとき、OD ペア w での交通需要 Q_w は $Q_w = p_w \cdot Q$ と表すことができ、同様に対数正規分布に従う。また、総交通需要の平均と分散がそれぞれ $E[Q] = q, \text{var}[Q] = (cv \cdot q)^2$ と表せるとする。ただし、任意の異なる OD ペアは互いに独立であると仮定する。そのため、異なる OD ペア間の確率的な相関は考慮しない。このことから、OD ペア w 間の交通需要 Q_w の平均と分散はそれぞれ $E[Q_w] = p_w \cdot q, \text{var}[Q_w] = p_w^2 \cdot (cv \cdot q)^2$ と表せる。

また、OD ペア w での交通需要 Q_w は、OD 間に生じるすべての経路交通量の和であり、(1) 式で表せる。

$$Q_w = \sum_{k \in K} F_k \quad (1)$$

この関係は交通需要、経路交通量の平均についても同様であり、(2) 式で表せる。

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

ただし

$$\forall f_{w,k} \geq 0 \quad (3)$$

リンク交通量 V_a はリンク a を通るすべての経路交通量の和であり、(4), (5) 式に示す関係が成立する。

$$V_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \delta_{w,k,a} \cdot F_{w,k} \quad (4)$$

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \delta_{w,k,a} \cdot f_{w,k} \quad (5)$$

(3) 移動時間の定式化

本研究では、既存研究にならぬリンク移動時間は (6) 式の BPR 関数により算出する。

$$t_a(v_a) = t_a^0 \cdot \left(1 + \beta_a \cdot \left(\frac{v_a}{c_a} \right)^n \right) \quad (6)$$

なお、本研究においてリンク交通量は確率変数である。(6) 式に確率変数 V_a を代入した確率的リンク移動時間を (7) 式に表す。

$$T_a(V_a) = t_a^0 \cdot \left(1 + \beta_a \cdot \left(\frac{V_a}{c_a} \right)^n \right) \quad (7)$$

このとき、リンク移動時間の平均と分散はそれぞれ式 (8), (9) で表せる。

$$\begin{aligned} E[T_a] &= t_a^0 + \frac{t_a^0 \cdot \beta_a}{c_a^n} \cdot E[V_a^n] \\ &= t_a^0 + \frac{t_a^0 \cdot \beta_a}{c_a^n} \cdot v_a^n \cdot (1 + cv^2)^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[T_a] &= E[T_a^2] - (E[T_a])^2 \\ &= \left(\frac{t_a^0 \cdot \beta_a}{c_a^n} \right) \cdot v_a^{2n} \cdot \left((1 + cv^2)^{2n^2 - n} - (1 + cv^2)^{n^2 - n} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

また、経路移動時間はリンク移動時間の和であり、式

(10) で表せる.

$$T_{w,k} = \sum_{a \in A} \delta_{w,k,a} \cdot T_a \quad (10)$$

本研究において、任意の異なるリンクの移動時間は互いに独立であると仮定する. このことに留意すると、経路移動時間の平均と分散はそれぞれ式 (11), (12) で表せる.

$$E[T_{w,k}] = \sum_{a \in A} \delta_{w,k,a} \cdot E[T_a] \quad (11)$$

$$\text{var}[T_{w,k}] = \sum_{a \in A} \delta_{w,k,a} \cdot \text{var}[T_a] \quad (12)$$

(4) TTR-UE 配分の定式化

利用者均衡配分原則に従う場合、ネットワーク内のすべての移動者は自身の移動時間が最小となるよう経路を選択する (Wardrop の第 1 原則). 本研究では、移動時間の不確実性を考慮した交通量配分のため、リンクコストを (13) 式に定める.

$$E[T_a] + \gamma \cdot \text{var}[T_a] \quad (13)$$

また、移動者はリスク回避的な経路選択行動をとると仮定する. このとき、リンクコストにおける分散項の係数 γ は正の値をとる. したがって、本研究における TTR-UE 原則に基づく交通配分は (14) 式に示される最適化問題として定式化される.

$$\min_v \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} (E[T_a] + \gamma \cdot \text{var}[T_a]) dV_a \quad (14)$$

なお、制約条件は (2), (3), (5) 式である.

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

$$\forall f_{w,k} \geq 0 \quad (3)$$

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \delta_{w,k,a} \cdot f_{w,k} \quad (5)$$

(5) TTR-SO 配分の定式化

ドライバーがシステム最適配分に従う場合、ネットワーク内に存在するすべての移動者の移動時間の総和 (総移動時間) が最小になるよう、ドライバーは経路を選択する (Wardrop の第 2 原則). ここで、Sumalee and Xu⁹⁾によると、TTR-SO 原則に基づく交通配分は式(15)に示される最適化問題として定式化される.

$$\min_v (E[TT] + \gamma \cdot \text{var}[TT]) \quad (15)$$

ただし

$$TT = \sum_{a \in A} TT_a = \sum_{a \in A} V_a \cdot T_a \quad (16)$$

なお、制約条件は (2), (3), (5) 式である.

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

$$\forall f_{w,k} \geq 0 \quad (3)$$

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \delta_{w,k,a} \cdot f_{w,k} \quad (5)$$

(6) 一般化総移動時間の定式化

本研究では走行時間短縮便益を求めるにあたって、道路ネットワークにおける一般化総移動時間 gt を定義する. はじめに、ネットワーク全体での効用関数を (17) 式に定義する.

$$u = -\alpha \cdot E[TT] - \beta \cdot \text{var}[TT] - \gamma \cdot f \quad (17)$$

ここで、 α, β, γ はそれぞれの項を無次元とするための正の校正係数であり、 f は交通に係る金銭的費用である. 本研究では交通にかかる費用は考慮しないため、以下 $f=0$ として計算する. ここで、(17) 式の両辺を α で除したものを (18) 式に示す.

$$\frac{u}{\alpha} = -E[TT] - \frac{\beta}{\alpha} \cdot \text{var}[TT] \quad (18)$$

このとき、(18) 式の両辺は $E[TT]$ 、すなわち総移動時間の平均と同じ次元を持つ数量である. そこで、(18) 式の右辺に負号を乗じ、 β/α を γ としたものを一般化総移動時間と定義し、(19) 式に示す.

$$gt = E[TT] + \gamma \cdot \text{var}[TT] \quad (19)$$

このとき、校正係数 γ の次元は [(min pcu)] または [(hour pcu)] である.

この定義では、一般化総移動時間の平均によりネットワーク内におけるすべての移動者の所要時間を考慮し、一般化総移動時間の分散に校正係数を乗じた値によって移動時間の信頼性を考慮している. なお、本研究では、校正係数 γ はリンクコストにおける分散項の係数と等しいものとする.

以上から、TTR-UE 配分における一般化総移動時間と TTR-SO 配分における一般化総移動時間との差 Δgt を用いて、走行時間短縮便益は (20) 式によって推計されるものとする.

$$(\text{走行時間短縮便益}) = \Delta gt \cdot VOT \quad (20)$$

このとき、(20) 式中の VOT とは時間価値原単位を表す. 平成 30 年度費用便益分析マニュアル¹²⁾によると、普通乗用車の時間価値原単位は 39.6 [JPY/(pcu · min)] である. 当マニュアルより、本研究の数値計算に関しても同じ値を用いる.

3. 数値計算

(1) 10D ネットワークにおける数値計算

モデルの検証のため、図-1 に示すテストネットワークを用いて数値計算を行った. このテストネットワークは 1 つの OD ペア、3 つの経路、5 つのリンクから構成される. 経路番号およびリンク番号は図-1 に表す. また、こ

のテストネットワークにおけるリンクの自由走行時間と交通容量は表-1 に表す。ここで、単位時間当たりの総交通需要の平均 q と変動係数 cv をそれぞれ 10 [pcu], 0.1 とする。また、(14), (15) 式中の目的関数における分散項の係数 γ は 0.2 とする。なお、BPR 関数のパラメータは Sumalee and Xu⁹⁾ にならい $\beta_a = 0.15, n = 4$ とする。以上の条件のもと、TTR-UE 配分原則に従う場合、TTR-SO 配分原則に従う場合について配分計算を行った。

便益を推計するため、TTR-UE 配分原則に従う場合と TTR-SO 配分原則に従う場合の両方について総移動時間を計算し、表-2 にそれぞれの結果を表す。この結果から、このテストネットワークにおいて TTR-SO 配分の場合における総移動時間の平均と分散は TTR-UE 配分の場合より減少していることがわかる。ここで、乗用車の時間価値原単位を 39.6 [JPY/(min・pcu)] とする¹²⁾。このとき、テストネットワークにおける自動運転車両が完全に普及した場合の 1 分間あたりの走行時間短縮便益は 2.97×10^8 [JPY] と求められた。したがって、1 日あたりでは 4.22×10^6 [JPY] であると推計された。

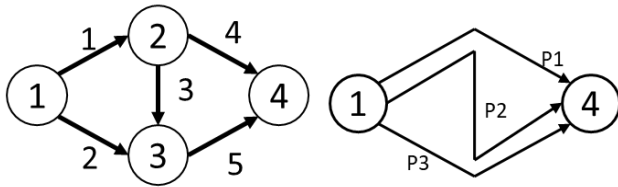


図-1 1OD テストネットワーク

表-1 1OD テストネットワークにおける自由走行時間と交通容量

リンク	自由走行時間 [min]	交通容量 [pcu]
1	5	10
2	10	10
3	3	10
4	15	10
5	10	10

表-2 1OD テストネットワークにおける一般化総移動時間

総移動時間	TTR-UE	TTR-SO
平均 [min・pcu]	208.2	196.6
分散 [(min・pcu) ²]	423.7	110.9
一般化時間 [min・pcu]	292.9	218.8

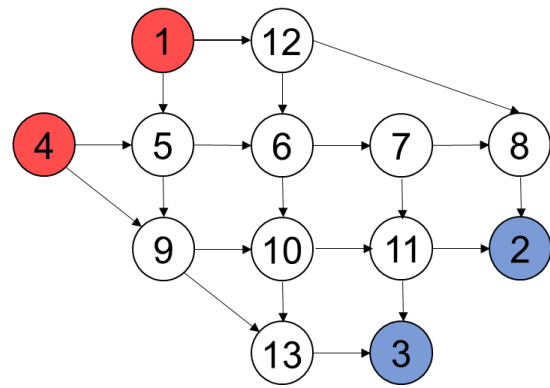


図-2 4OD テストネットワーク

表-3 4OD テストネットワークにおける一般化総移動時間

総移動時間	TTR-UE	TTR-SO
平均 [hour・pcu]	975	917
分散 [(hour・pcu) ²]	34,210	13,262
一般化時間 [hour・pcu]	7,817	3,569

(2) 4OD ネットワークにおける数値計算

Nguyen and Dupuis¹³⁾ に示される 4 つの OD ペア、13 のノードと 19 のリンクから構成されるテストネットワークにて走行時間短縮便益を推計する。この 4OD テストネットワークを図-2 に表す。なお、OD ペアはノード 1 から 2、1 から 3、4 から 2、4 から 3 の 4 つである。この 4OD テストネットワークにおけるすべてのリンクの自由走行時間と交通容量はそれぞれ 0.05 [hour], 1,000 [pcu] とする。また、1 つの OD ペアでの単位時間当たりの交通需要は 1,000 [pcu]、その変動係数は 0.1 であるとする。また、(14), (15) 式中の目的関数における分散項の係数 γ 、BPR 関数のパラメータは、前節で用いたものと同様である。以上の条件のもと、TTR-UE 配分原則に従う場合、TTR-SO 配分原則に従う場合について配分計算を行った。

それぞれの配分原則に従う場合の総移動時間の平均、分散及び一般化時間を表-3 に表す。この結果から 4OD テストネットワークにおける 1 時間あたりの走行時間短縮便益は 1.00×10^7 [JPY] と算出された。したがって、1 日あたりでは 2.40×10^8 [JPY] であると推計された。

4. 感度分析

(1) 変動係数 cv に関する感度分析

すべての移動者が TTR-SO 配分原則に従うという条件のもと、総交通需要の変動係数以外の初期条件は 3 章第 1 節にならって配分計算を行う。変動係数を 0 から 1 の

範囲にて 0.001 刻みで変化させたときの、総移動時間の平均、分散とリンク交通量の配分結果の挙動を順に図-3,4,5に表す。

図-3.4 の結果から、変動係数が大きくなるにつれて総移動時間の平均と分散は指数的に増大することが示された。また、図-5 の結果から変動係数がおよそ 0.5 以上の範囲では、リンク交通量は変動係数に関してほぼ変化しないことが示された。

(2) 分散項係数 γ に関する感度分析

すべての移動者が TTR-SO 配分原則に従うという条件と、TTR-UE 配分原則に従うという条件のそれぞれの場

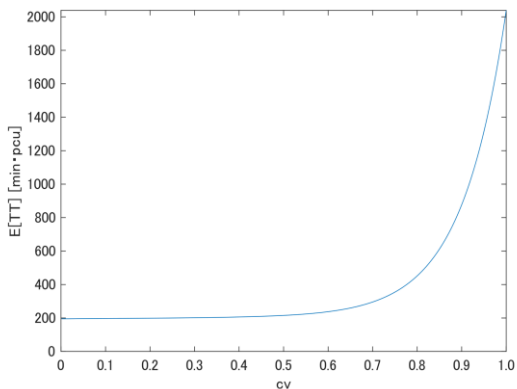


図-3 変動係数—総移動時間の平均の関係

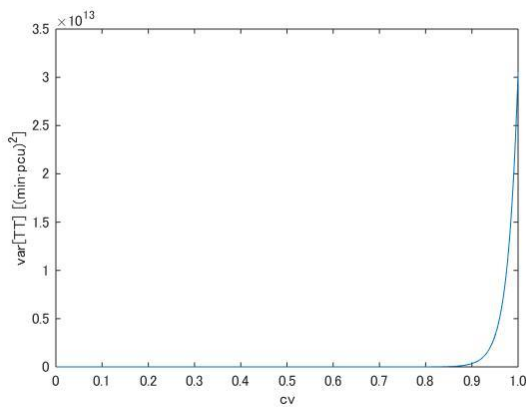


図-4 変動係数—総移動時間の分散の関係

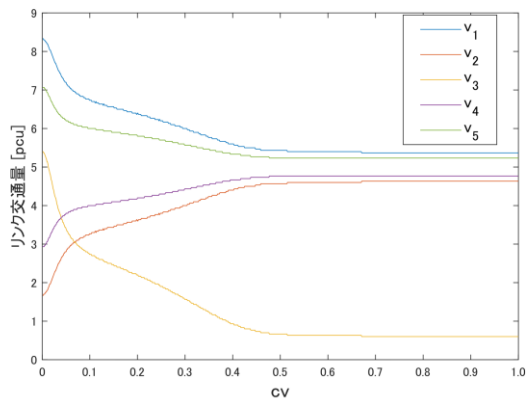


図-5 変動係数 - リンク交通量の関係

合について、リンクコストにおける分散項の係数 γ 以外の初期条件は 3 章第 1 節にならない配分計算を行う。このとき、目的関数における分散項の係数も同様に変化することに注意されたい。分散項係数を 0 から 1 の範囲にて 0.001 刻みで変化させたときの、総移動時間の平均と分散の挙動を分析する。加えて、TTR-UE 配分と TTR-SO 配分との一般化時間の差の挙動についても分析する。TTR-SO 配分原則に従う場合の総移動時間の平均、分散の挙動をそれぞれ図-6, 7 に表す。同様に TTR-UE 配分原則に従う場合は図-8, 9 に表す。また、TTR-UE 配分と TTR-SO 配分との一般化時間の差を図-10 に表す。

図-6,7の結果から、TTR-SO配分において分散項の係数が大きくなると総移動時間の平均は増加し、分散は減少することが分かった。これは分散項の係数が増加するほど目的関数に対する分散の影響が大きくなり、分散を最小化するような経路選択になるためと考えられる。また、このことから、分散項係数が 0.4 以上の範囲では、移動者は移動時間の分散が最小となるような経路選択行動をとっているとみなすことができる。この経路選択行動は、現実の移動者のそれと乖離しているものと考え、3 章における数値計算では分散項係数 γ の値として 0.2 として採用し、計算を実行した。図-8, 9 の結果から、TTR-UE 配分においては総移動時間の平均と分散はともに減少することが示された。この分析の範囲における総移動時間の平均と分散の減少幅はそれぞれ 3 [min·pcu]、70 [(min·pcu)²] 程度である。この結果から、TTR-UE 配分についても分散項の係数が増加するほど分散を最小化するような経路選択になる傾向があると考えられる。また、図-10 の結果から、2 つの配分原則での一般化時間の差については、任意の分散項係数について TTR-UE 配分での一般化時間の方が TTR-SO 配分の場合より大きいことが示された。また、分散項の係数が増加するほど、一般化時間の差が大きくなることが明らかとなった。

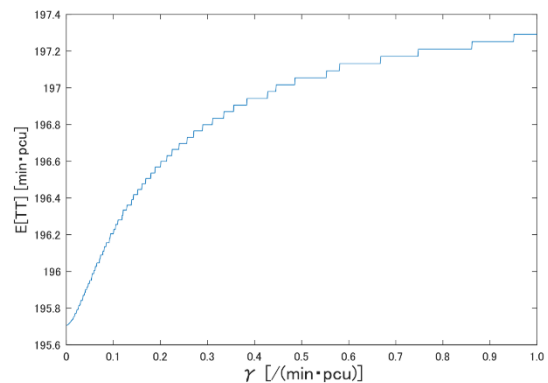


図-6 分散項係数—総移動時間の平均の関係 (TTR-SO)

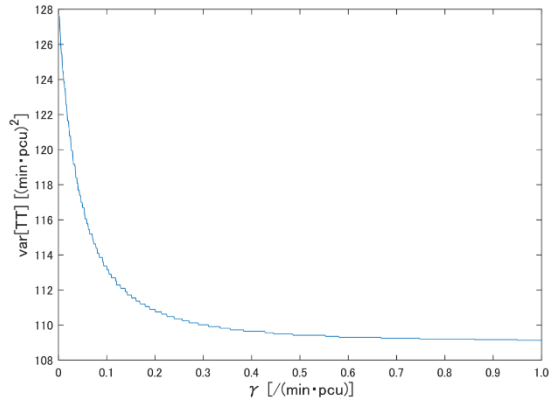


図-7 分散項係数—総移動時間の分散の関係 (TTR-SO)

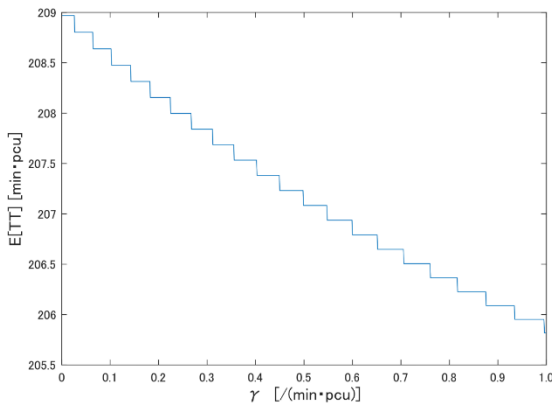


図-8 分散項係数—総移動時間の平均の関係 (TTR-UE)

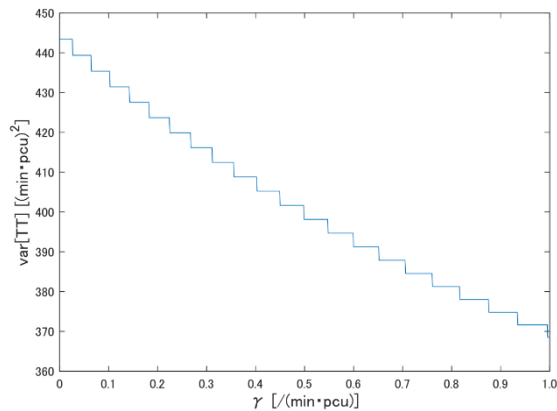


図-9 分散項係数—総移動時間の分散の関係 (TTR-UE)

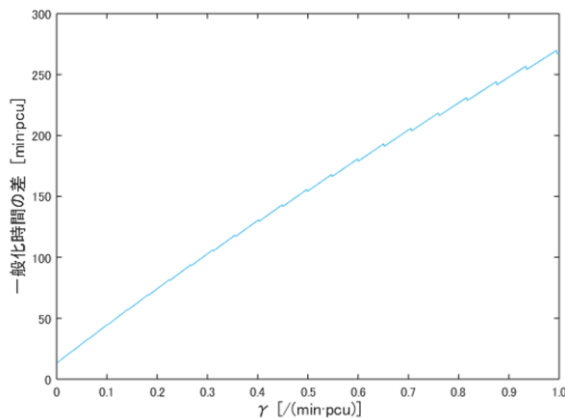


図-10 分散項係数—総移動時間の差

5. 結論

本研究では、移動時間信頼性を考慮した交通量配分モデルによって TTR-SO に従う自動運転車両が完全に普及した場合の走行時間短縮便益を推計する手法を開発した。また、外生的に与えられた総交通需要の変動係数、リンクコストにおける分散項の係数が配分結果に与える影響を感度分析により考察した。

今後の課題として、OD 間、リンク間における移動時間の確率的な相関を考慮した交通量配分モデルを組み込むことがあげられる。本研究での数値計算では、OD 間、リンク間における移動時間の確率的な相関を計算の都合上考慮していない。そのため、実際の道路ネットワークと多少乖離した経路選択行動になっていると考えられる。この乖離を解消するため、OD 間、リンク間における移動時間の確率的な相関を考慮した交通量配分モデルの導入が望ましい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP18H01550 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Nakayama, S., Takayama, J., Traffic network equilibrium model for uncertain demands. *Proceedings of the 82nd Transportation Research Board Annual Meeting*, (2017)
- 2) Clark, S., Watling, D., Modeling network travel time reliability under stochastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol.39, No.2, pp.119-140 (2005)
- 3) Lam, W. H. K., Shao, H. and Sumalee, A., Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply, *Transportation research Part B*, Vol.42, No.10, pp.890-910 (2008)
- 4) Uno, N., Kurauchi, F., Tamura, H. and Iida, Y., (2009) Using bus probe data for analysis of travel time variability, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol.13, No.1, pp.2-15 (2009)
- 5) Zhou, Z. and Chen, A., Comparative analysis of three user equilibrium models under stochastic demand, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.42, No.3, pp.239-263 (2008)
- 6) Sumalee, A. and Xu, W., First-best marginal cost toll for a traffic network with stochastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol.45, No.1, pp.41-59 (2011)
- 7) Fosgerau, M., Karlström, A., The value of reliability, *Transportation Research Part B*, Vol.44, No.1, pp.38-49 (2010)
- 8) Kato, T., Uchida, K., A Simplified Network Model for Travel Time Reliability Analysis in a Road Network. *Journal of Advanced Transportation*, Volume 2017 (2017)
- 9) 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)

- 10) Bagloee, S. A., Sarvi, M., Priksson, 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)
- 11) Tani, R., Uchida, K., 自動運転車両の普及過程における移動時間信頼性を考慮した交通量配分モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.58, CD-ROM (2018)
- 12) 国土交通省, 平成 30 年度費用便益分析マニュアル, pp.7 (2018)
- 13) 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)

DEVELOPMENT OF ESTIMATION METHOD FOR TRAVEL TIME REDUCTION BENEFIT WITH CONSIDERING THE TRAVEL TIME UNCERTAINTY IN AN AUTONOMOUS VEHICLES PREVAILED ROAD NETWORK

Sho NITTA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

Development of automatic driving technology is proceeding. In this paper, a traffic flow assignment method for estimating the travel time reduction benefit brought by the spread of autonomous vehicles is proposed. For the two networks, i.e., the network where human driven vehicles are prevailed and the network where autonomous vehicles are prevailed, two generalized total travel times are estimated by the proposed method. From two generalized total travel times, the benefit thanks to autonomous vehicles is then calculated. We examined the effects of driver's different attitude toward travel time variability on traffic flows. In addition, sensitivity analysis is also carried out to see how the traffic flows are influenced by exogenously given calibration parameters..