

交通シミュレーションにおける OD 推定に伴う不確実性の評価

Uncertainty qualification of OD estimation in the traffic flow simulation

柳井 都古杜^{*1} 阿部 和規^{*1} 山田 知典^{*2} 藤井 秀樹^{*1} 吉村 忍^{*1}
 Mikoto Yanai Kazuki Abe Tomonori Yamada Hideki Fujii Shinobu Yoshimura

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科
 School of Engineering, The University of Tokyo

^{*2} 東京大学人工物工学研究センター
 Research into Artifacts, Center for Engineering, The university of Tokyo

OD(Origin-Destination) estimation, which is input data in the traffic flow simulation, is an extremely important indicator that affects the simulation results. Traditionally, OD estimation has been performed on the basis of the equilibrium principle. However, due to recent improvements in computing capabilities, study of OD estimation based on the micro traffic flow simulation is increasing. In this study, we compare and examine the uncertainty between OD estimation based on the SUE principle and that based on the micro traffic flow simulation.

1. はじめに

近年、交通問題を解決する手法として交通シミュレーションが注目を集めている[藤井 1999]。シミュレータの中でもマルチエージェントモデルに基づくものは個々の車両の加減速、右左折、車線変更などといった挙動を詳細に取り扱うことが可能であり、交通施策の評価にも用いられるようになってきた。

交通シミュレーションでは入力データとして、交通需要データを必要とする。しかし、広範囲の交通需要を測定することは難しく、局所的な交通量を基に推定されてきた。従来その推定は、利用者均衡配分モデルを用いて行われることが多かった[Michael 1997]が、近年計算機能力の向上により、マイクロ交通シミュレーションを用いた推定に関する研究が増えている[北岡 2002]。利用者均衡配分モデルとは、交通主体が常に最適な経路選択を行うものと仮定して、交通量を予測するモデルである。それを発展させたモデルとして、確率論的利用者均衡配分モデル(SUE)がある。これは、個々の交通主体が、最適と認知した経路を選択すると仮定しており、情報の不完全性や行動の不確実性を考慮することができる。一方マイクロ交通シミュレーションを用いた推定では、交通量について、シミュレーションによって得られた計算値と実測値を比較し、両者が一致するような交通需要データを探索する。

推定においては、確率論的な考えが用いられているため、推定結果は一意には定まらない。また、推定結果が実際の状況と常に一致することは無く、幅を持った推定を行うことが重要である。しかし、このような推定に伴う不確実性に関する研究はまだ十分行われていない。そのため本研究では、SUE による推定と、マイクロ交通シミュレータによる推定の不確実性を比較、検討を行う。

本稿では、まずマイクロ交通シミュレーションによる推定手法と、SUE による推定手法の概要を示す。次に、不確実性評価を行う準備段階として、SUE モデルとマイクロ交通シミュレータの特性の違いを明らかにするため、各モデルによる配分交通量を比較する。

2. ミクロ交通シミュレーションによる推定手法

シミュレーションによる推定は一般的に次のように行う。

- 各 OD 交通量の初期値を設定
 - シミュレーションにより各地点の交通量を計算
 - 計算された交通量と、観測交通量を比較し、各 OD 交通量を修正
 - (b)(c)を繰り返す
- 今回は、マイクロ交通シミュレータとして、知的マルチエージェントシミュレータ MATES(Multi-agent based Traffic and Environment Simulator) [藤井 2006, 吉村 2004]を用いる。

3. SUE による推定手法

3.1 推定理論

今回、SUE に基づく OD 推定の手法として、ベイズ推定と確率論的利用者均衡配分を利用した推定手法である Wei らの手法[Wei 2013]を用いた。その理論について説明を行う。

主な変数の定義を次のようにする。まず N を OD ペアの集合、 R を経路の集合、 R_n を OD ペア n における経路の集合、 L をネットワーク上におけるリンクの集合、 L^* を観測リンクの集合とする。また、 q_n を OD ペア n の交通需要、 y_r を経路 r の交通需要、 x^* を観測リンクの交通量とし、その他の変数については、導入する際に適宜定義する。

まずベイズ推定を用いることにより、次のような式が得られる。

$$P(\bar{y}|sue, \bar{x}^*) \propto P(sue, \bar{x}^*|\bar{y})P(\bar{y}) \\ = P(\bar{x}^*|\bar{y})P(sue|\bar{y})P(\bar{y}) \quad (1)$$

ここで、 sue は確率論的利用者均衡配分モデルに従うことを表す。

- $P(\bar{x}|\bar{y})$ は、各経路の交通量 \bar{y} のときに、交通量 \bar{x} が観測される確率を表す。 $x_l(\bar{y})$ を各経路の交通量が \bar{y} のときにおけるリンク l の交通量、 σ_l をリンク l における観測誤差の標準偏差として、式(2)で与えた。

$$P(\bar{x}|\bar{y}) = \prod_{l \in L^*} \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{|x_l(\bar{y}) - x_l^*|^2}{2\sigma_l^2}} \quad (2)$$

ここで MATES において観測誤差の分散は、観測交通量の平均とほとんど等しい[山田 2017]なので、比較のため σ_l を式(3)で与えた。

$$\sigma_l = \sqrt{x_l^*} \quad (3)$$

- (2) 次に $P(\text{sue}|\vec{y})$ は、各経路の交通量が \vec{y} のとき、確率論的利用者均衡配分モデルに適合している確率で、式(4)で表せる。

$$P(\text{sue}|\vec{y}) = \prod_{r \in R} p(r|\vec{y})^{y_r} \quad (4)$$

$P(r|\vec{y})$ は経路 r を選択する確率であり、確率論的利用者均衡配分モデルに基づき、次の式(5)で与える。

$$P(r|\vec{y}) = \frac{e^{-2z_r(\vec{y})}}{\sum_{v \in R_n} e^{-2z_v(\vec{y})}} \quad (5)$$

$z_r(\vec{y})$ は経路 r を経たした際の旅行時間であり、各リンクの旅行時間の和で与えることができる。各リンクの旅行時間 d_t を式(6)で与えた。

$$d_t = d_t^0 \left\{ 1 + 0.15 \left(\frac{x_t(\vec{y})}{k_t} \right)^4 \right\} \quad (6)$$

ここで、 d_t^0 は自由流における旅行時間、 k_t はリンク 1 の交通容量である。

- (3) $P(\vec{y})$ は、各経路の交通量が \vec{y} となる確率で、定数 η を用いて次のように表せる。

$$P(\vec{y}) = \prod_{v \in N} \frac{q_v!}{\prod_{r \in R_n} y_r!} \eta \quad (7)$$

- (4) (1)~(3)から、観測交通量が x^* かつ確率論的利用者均衡配分モデルを前提としたときにおける、各経路の交通量の確率密度分布 $P(\vec{y}|\text{sue}, x^*)$ は次の式で与えられる。

$$P(\vec{y}|\text{sue}, x^*) \propto \prod_{v \in N} \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{|x_v(\vec{y}) - x_v^*|^2}{2\sigma_v^2}} \prod_{r \in R} p(r|\vec{y})^{y_r} \prod_{v \in N} \frac{q_v!}{\prod_{r \in R_n} y_r!} \quad (8)$$

3.2 数値計算

式(8)を利用して \vec{y} で積分することにより、各経路の交通量の平均や分散を求めることができるが、計算コストが非常に高く現実的ではない。そのため、実用的には式(8)で表される確率密度分布に従う \vec{y} をサンプリングすることにより、平均や分散を推定する。

サンプリングの方法をまとめると次のようになる。

- (a) 各経路交通量 $y_1^0, y_2^0, \dots, y_{|N|}^0$ の初期値を設定($t=1, n=1$ とする)
 (b) OD ペア n について、サンプル y_n^t を MH アルゴリズムに基づき取得
 (c) (b)を全 OD ペアについて行う($n=1 \sim |N|$)
 (d) (b)(c)を一定回数(設定サンプル数)繰り返す($t=1 \sim$)

ここで、初期値依存性を無くするため、今回は、サンプルの内最初の 2 割を切り捨てた残りの 8 割で確率を推定した。

ステップ(b)における MH アルゴリズムの詳細について述べる。まず条件付確立 $\theta(\alpha|\beta)$ を以下の式(9)で与える。

$$\theta(\alpha|\beta) = \frac{m!}{\alpha! (m-\alpha)!} \left(\frac{\beta}{m} \right)^\alpha \left(\frac{m-\beta}{m} \right)^{m-\alpha} \quad (9)$$

ここで m は α の最大値として設定する。これを用いて、MH アルゴリズムは次のように表せる。

- (a) あるルート r について、 $\theta(y_r^t|y_r^{t-1})$ の確立密度分布に従う乱数 y_r^t を取得する。 y_n^{t-1} の要素の内、 y_r^{t-1} を y_r^t に置き換えたものを y_n^t とする。
 (b) 式(10)で表される τ を計算する。

$$\tau = \frac{P(\dots, y_n^t, \dots | \text{sue}, x^*) \theta(y_r^t|y_r^{t-1})}{P(\dots, y_n^{t-1}, \dots | \text{sue}, x^*) \theta(y_r^{t-1}|y_r^{t-1})} \quad (10)$$

- (c) $\min(1, \tau)$ の確率で y_n^t を採択し、 $y_n^t = y_n^{t-1}$ とする。棄却されれば $y_n^t = y_n^{t-1}$ とする。

4. 交通量配分モデルの比較

不確実性を評価する前段階として、SUE モデルとマイクロ交通シミュレータの特性の違いを明確にするため、各モデルによる交通量配分において、どのような違いが出るかの検討を行った。具体的には、まずマイクロ交通シミュレーションを実行することにより、各リンク交通量を取得する。次に複数の観測地点を設定し、マイクロ交通シミュレーションによって計算された各観測交通量から、非観測地点の交通量を SUE に基づき推定する。SUE による推定値とマイクロ交通シミュレーションによる計算値を比較することで、各モデルによる交通量配分に違いを検討する。

結果として、各リンクコスト(旅行時間)の計算方法の違いにより、有意な差が生じた。違いの一つとしては、右左折における待ち時間の計算方法が挙げられる。具体的には、MATES においては右折の待ち時間を考慮する一方、SUE においては、待ち時間を考慮しない。そのため、MATES においては、右折を用いる経路よりも、左折を用いる経路の方が選択されやすく、交通量が多く配分されやすい。

SUE モデルによる推定において、待ち時間を考慮したリンクコストの計算を導入し、各パラメータ設定を調整することで、交通量配分の差を少なくすることが出来ると考えられる。

5. おわりに

マイクロ交通シミュレーションで得られた交通量から SUE に基づき推定を行い、マイクロ交通シミュレーションによる計算値と SUE に基づく推定値の比較を行った。その結果、各モデルの特性について、右左折にかかる待ち時間の考慮の有無が重要な違いであることが分かった。

今後は各モデルによる推定の不確実性について、比較、検討を行っていく。

参考文献

- [Michael 1997] B. G. H. Michael, S. M. Caroline, B. Fritz, K. Gunter, "A stochastic user equilibrium path flow estimator," *Transportation Research Part C Emerging Technologies* 5(3), 197-210, 1997.
 [Wei 2013] C. Wei, Y. Asakura, "A Bayesian Approach to traffic estimation in stochastic user equilibrium networks," *Social and Behavioral Science* vol.80, 591-607, 2013.
 [北岡 2002] 北岡広宣, 寺本英二, 小根山裕之, 桑原雅夫, "OD 交通量推定手法による現況再現," 土木計画学研究 所・講演集 No.25, 2002.
 [藤井 1999] 藤井聡: "交通計画におけるシミュレーション適用可能性," 土木計画学研究・論文集 No.16, 19-34, 1999.
 [藤井 2006] 藤井秀樹, 仲間豊, 吉村忍, "知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発 第二報: 歩行者エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較," *シミュレーション* vol.25, 274-280, 2006.
 [山田 2017] 山田知典, 石川佳愛, 阿部和規, 藤井秀樹, 吉村忍, "マルチエージェント交通流シミュレーションにおける交通量の不確実性評価," *日本シミュレーション学会論文誌* Vol.9, No.1, 1-9, 2017.
 [吉村 2004] 吉村忍, 西川紘史, 守安智, "知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発," *シミュレーション* vol.23, 228-237, 2004.