

粒子フィルタを利用した都市高速道路における 潜在的ランプ間 OD 交通量の推定

小篠 耕平[†] 井料 隆雅[†] 朝倉康夫[‡]
神戸大学大学院[†] 東京工業大学大学院[‡]

1. 研究の背景・目的

近年, ETC(Electric Toll Collection)の利用状況を集計した ETC 統計データにより, 詳細な交通量変動の分析が可能となっている. 特に個々のランプ利用状況(ランプ間 OD 交通量)を用いれば, 従来から用いられていた車両検知器による断面交通量よりかなり詳細な利用状況の変化を観測できる. このようなデータを蓄積し活用することは, 精密な交通計画や交通制御をデータオリエンテッドアプローチによって実現することに寄与するといえよう. 一方, ランプ間 OD 交通量は断面交通量と比較してその絶対量が非常に小さく(数台/1 時間程度のことも多い), 実務的に意味のある変動が偶然誤差に隠れて非常に見えづらくなる傾向がある. 偶然誤差はポアソン分布に従う傾向があり¹⁾, 正規分布に依拠する一般的な統計方法の適用も難しい. 本研究では, このような特徴を持つ時間帯別ランプ間 OD 交通量のデータから, 偶然誤差を含まない潜在的に存在していたランプ間 OD 交通量(以後, 潜在的ランプ間 OD 交通量と呼ぶ)を推定する手法を, 粒子フィルタを用いて構築した. 特定の分析対象区間にこの手法を適用し, これにおける曜日ごとの交通量の特性の差異を抽出することを試みる.

2. 分析手法

(1)分析に用いるデータ

阪神高速道路神戸線の摩耶(オンランプ)~西宮(オフランプ)間における, ETC を利用した車両のランプ間 OD 交通量を対象とする. 集計時間単位は 8 時 2 分~8 時 24 分の 22 分間とした. これは平均ランプ間 OD 交通量が約 10 台となる集計時間単位である. 期間は 2009 年 7 月 1 日~2011 年 6 月 30 日の平日 479 日のデータセットを用いた.

(2)粒子フィルタ

粒子フィルタとは, 一般的な状態空間モデルに対してフィルタリングを適用して, ノイズを含む観測値から対象の状態を推定する手法であり, 非線形・非正規分布のモデルの状態推定にも適用できる. 粒子フィルタの基本的な考え方は, 状態空間中に多数

の粒子を散布する事で事後分布, 事前分布を逐次的にモンテカルロ近似するというものである²⁾. 粒子フィルタの状態空間モデルは, 状態量 x_t の時間遷移を表すシステムモデル(式(1))と, 観測量 y_t との関係を表す観測モデル(式(2))から構成される.

$$x_t = F_t(x_{t-1}, v_t) \quad (1)$$

$$y_t = H_t(x_t, w_t) \quad (2)$$

システムモデル, 観測モデルはそれぞれシステムノイズ v_t と観測ノイズ w_t を含む. 具体的な粒子フィルタのアルゴリズムを次に示す.

- (a)初期分布 $p_0(x)$ に従い初期状態 $x_{0|0}^{(i)} (i = 1, \dots, N)$ の粒子を生成.
- (b)システムモデルより各粒子の状態 $x_{t|t-1}^{(i)}$ を予測.
- (c)観測モデルに対応する尤度関数 $p_t(y_t|x_{t|t-1})$ より各粒子の重み $\pi_t^{(i)}$ を算出.
- (d)算出した重み $\pi_t^{(i)}$ に応じてランダムに復元抽出して状態 $x_{t|t}^{(i)}$ の粒子をリサンプリング.
- (e) $t = t + 1$ として(b)~(d)を繰り返す.

粒子フィルタにおける対数尤度は各粒子の状態 $x_t^{(i)}$ と観測値 y_t より式(3)で表わされる.

$$l(\theta) = \sum_{t=1}^T \ln(\sum_{i=1}^N p(y_t|x_t^{(i)})) - T \ln N \quad (3)$$

(3)仮定する状態空間モデル

粒子フィルタによる潜在的ランプ間 OD 交通量 μ_t の推定において構築した状態空間モデルを次に示す.

・システムモデル

潜在的ランプ間 OD 交通量 μ_t の日変動はランダムウォークを仮定して式(4)のようにした. システムノイズの標準偏差 σ_v は未知パラメータである.

$$\ln \mu_t = \ln \mu_{t-1} + v_t \quad (v_t \sim N(0, \sigma_v^2)) \quad (4)$$

・観測モデル

実際に観測されている交通量 λ_t は潜在的ランプ間 OD 交通量 μ_t のポアソン分布に従うと仮定して, 式(5)のように設定した.

$$\lambda_t \sim Po(\mu_t) \quad (5)$$

従って尤度関数は式(6)で表わされる.

$$p_t(\lambda_t|\mu_{t|t-1}) \propto \frac{\mu_{t|t-1}^{\lambda_t} \exp(-\mu_{t|t-1})}{\lambda_t!} \quad (6)$$

(4)ロバスト推定

一般的な最尤推定では, 誤差の大きな観測値に引

An estimation based on particle filter of potential OD traffic volume in expressway

[†]Ozasa Kohei, Iryo Takamasa · Kobe University

[‡]Asakura Yasuo · Tokyo Institute of Technology

表-1 パラメータ推定結果

	一週間毎					一日毎(479日)
	月曜(90日)	火曜(96日)	水曜(97日)	木曜(97日)	金曜(99日)	
最大対数尤度	-198.88	-209.95	-204.08	-203.02	-211.76	-1021.66
システムノイズの標準偏差 σ_v	0.006	0.033	0.012	0.022	0.020	0.007
分散比	0.79	1.00	0.91	1.14	0.81	0.92

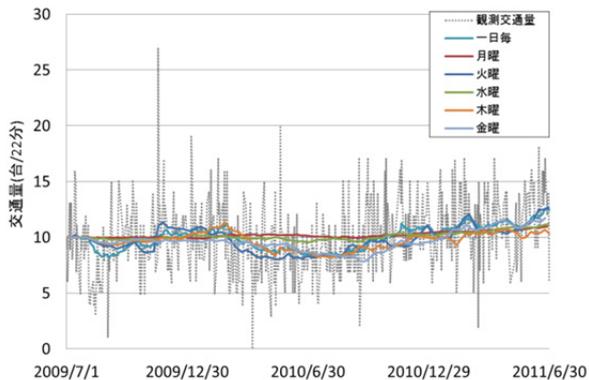


図-1 潜在的ランプ間 OD 交通量 μ_t の推定結果

つ張られて誤ったパラメータを推定してしまい、推定がロバストでないことがある。交通量においても、事故時のデータなどに推定値が引っ張られることがあるため、ロバストな推定を行う必要がある。本研究ではロバストな推定法として M 推定法を用いた。

M 推定法とは、最尤推定法を拡張したものであり、最尤推定より得られた推定値と観測値の残差に応じて、各観測値の尤度に重みをつけるというものである³⁾。M 推定法のアルゴリズムを次に示す。

- (a) 最尤推定法などで初期パラメータ $\hat{\theta}_0$ を推定する。
- (b) 残差に応じて各観測値に重みを付ける。
- (c) 重みを乗じて算出した尤度を用いて再度最尤推定することでパラメータ $\hat{\theta}_t$ を算出する。
- (d) $t = t + 1$ としてパラメータ推定結果 $\hat{\theta}_t$ が収束するまで(b)~(c)を繰り返す。

観測値の重みづけ方法として、本研究ではカット付最小二乗法を用いた。具体的には事前確率が 5% 以下もしくは 95%以上の観測値の重みをゼロとした。

(5) モデルの整合性

推定した潜在的ランプ間 OD 交通量 μ_t と観測交通量 λ_t の関係がポアソン分布に従っているかは式(7)に示す分散比から確認する。ポアソン分布の分散比は 1 となり、それより大きければ過分散、小さければ過少分散が発生している。

$$\text{分散比} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{(\lambda_t - \mu_t)^2}{\mu_t} \right) \quad (7)$$

3. 分析結果

粒子フィルタではモンテカルロ近似誤差に起因する誤差が生じるため、粒子数 $N = 1000$ 個とし、各パラメータにおける対数尤度は 30 回試行した平均値を用いた。初期分布は $p_0 \sim N(\ln(10), 0.001)$ とした。また、一日毎と各曜日の一週間毎の各データセット別に推定を行った。各データセットにおけるパラメータ

ータ推定値と分散比を表.1 に、その時の潜在的ランプ間 OD 交通量の推定結果を図.1 に示す。

図-1 より大きなばらつきを持った観測交通量から、種々の要因によるノイズを除去した潜在ランプ間 OD 交通量を推定できていることが分かる。さらに、各曜日で長期変動傾向は似ているものの変動特性は異なる。例えば、月曜と水曜は変動幅が小さく交通量がほぼ一定であるのに対して、火曜、木曜、金曜は変動幅が大きい。これは、表-1 の σ_v の推定結果からも分かる。表-1 の分散比を見ると、火曜日の分散比は 1.00 と理想的だが、木曜は過分散となっている。逆に火曜と木曜以外では過小分散となっている。木曜を除いて、分散比は 1 を超えていないため仮定したモデルで交通量変動を記述できていると考えられる。しかし、木曜を除いて過小分散になっている事には問題があるかもしれない。ポアソン分布では各利用者が毎日ランダムに利用するかどうかを決定していると考えていることに相当するが、同一の利用者が規則性を持って、毎回ほぼ同じ時間に通過しているなら誤差が過小になる事はあり得る。

4. 今後の課題

(1) 観測モデルの検討

観測モデルにポアソン分布を仮定したが、利用者が規則的な行動していれば分散は過小になる。そのため、観測モデルに二項分布や負の二項分布を用いた方が交通量変動をより説明できる可能性がある。

(2) 旅行時間の影響

上田ら⁴⁾によって交通量は旅行時間が長くなれば交通量が増加する事が示されており、潜在的ランプ間 OD 交通量を旅行時間に依存させる必要がある。

5. 謝辞

本研究で用いた ETC 統計データは阪神高速道路株式会社より提供をいただいたものである。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小池真実, 井料隆雅, 朝倉康夫: 都市高速道路におけるランプ間 OD 交通量の短時間変動分析, 土木計画学研究発表会・講演集, 42, CD-ROM, 2010.
- 2) 北川源四郎: モンテカルロフィルタおよび平滑化について, 統計数理, 44, 第1号, pp.31-48, 1996.
- 3) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析プログラム SALS, 財団法人東京大学出版会, pp.160-196, 1982.
- 4) 上田大樹, 井料隆雅, 朝倉康夫: 高速道路の旅行時間がランプ間 OD 交通量に与える影響の実証分析, 土木計画学研究発表会・講演集, 47, CD-ROM, 2013.