

# 複数時間帯を考慮したネットワークレベル交通状態推定手法の開発

峪 龍一<sup>1</sup>・川村 雄斗<sup>2</sup>・内田 賢悦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)  
E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)  
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)  
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

本研究は交通観測データを用いて、ネットワークレベルで確率的なリンク交通量およびリンク移動時間を推定する手法を提案する。複数の時間帯において、ネットワークレベルの交通観測データが得られることを前提として、複数の時間帯における交通状態を同時に推定する手法を構築した。複数の時間帯においてリンク交通量およびリンク移動時間が、ネットワーク全体のうち、部分的なリンクにおいて観測されているとき、観測機会ごとにデータが観測されたリンクでのみ尤度を定義することによって、尤度最大化を行うことが可能となる。尤度の計算にあたっては、交通感知器の設置台数の制限およびプローブカー混入率の低さを念頭に置いている。全時間帯全道路ネットワークで観測され得るデータ規模と比較して、データの観測密度が低いことを考慮できる手法を構築している。テストネットワークにおいて、12の時間帯における道路ネットワーク全体のリンク交通量とリンク移動時間を尤度最大化により推定した。

**Key Words :** *probe car data, traffic counter data, network uncertainty, traffic state estimation*

## 1. はじめに

道路ネットワーク全体の交通状態推定を行うために、交通感知器とプローブカーによって、それぞれリンク交通量およびリンク移動時間が観測されており、データが利用可能である。交通感知器は設置および運用にかかる費用が高価であり、道路ネットワーク全体に対して、設置できるリンクの数は限られる。プローブカーデータの取得は、交通流に占めるプローブカーの混入率に依存している。道路ネットワークの整備がある程度進んだ地域においては、道路施設の供給が大きくなるため、道路空間における混雑が縮小し、ある時間幅において、道路ネットワーク全体において観測されるプローブカーの割合は小さくなる。交通流を観測する時間幅を小さくすれば、同時時間帯における、異なるリンク間における交通量および移動時間の確率的相関を推定しやすくなるものの、同時にデータを欠測するリンクを増やすおそれもある。このように、交通観測データを用いた交通状態の推定においては、データの欠測の取り扱いが不可欠である。特に道路ネットワークの交通状態を多変量分布として表し、

リンク間の相関を表現したい場合には、データの欠測を前提としながらも、観測結果を無駄なく利用可能な交通状態推定手法が求められる。

観測データから交通状態を推定する研究が多方面から行われている。原らりおよびHara et al.<sup>2)</sup>は蓄積して観測されたプローブカーデータから、多次元正規分布に従うリンク速度を推定し、未観測道路リンクにおけるリンク速度を補完する手法を構築している。

Shao et al.<sup>3)</sup>はマルチユーザークラスを想定したOD交通需要の同時分布を推定する手法を提案している。OD交通需要の平均と分散共分散をラッソ回帰によって推定している。ここでは交通感知器によるデータの利用を想定しているため、プローブカーデータのように、観測機会ごとに欠測されるデータの取り扱いについては考慮されていない。

本研究では、プローブカーデータと交通感知器データを組み合わせて、複数時間帯を対象としてネットワーク全体のリンク交通量とリンク移動時間の同時分布を尤度最大化によって推定する手法を構築する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では本研究

で提案するモデルにおいて採用する仮定について説明する。第3章ではネットワークモデルと複数時間帯の問題を考慮できる尤度最大化問題を定義する。第4章ではテストネットワークを用いて、複数時間帯における尤度最大化の計算例を示す。最後に第5章では本研究のまとめと今後の展望を示す。

## 2. 仮定

本研究における主要な仮定は以下の3点である。

- 本研究において推定の対象とする交通状態は、道路ネットワーク全体におけるリンク交通量と後述するリンク遅れ時間である。リンク遅れ時間はリンク移動時間に対応しており、それぞれの同時分布はお互いを平行移動したものとなっている。
- リンク交通量は交通感知器が設置されているリンクにおいてのみ観測されるものとする。リンク遅れ時間はすべてのリンクにおいて観測されるものの、各観測機会において観測される確率は、道路ネットワーク全体におけるプローブカー混入率によって決まるものとする。
- 日生成交通需要、時間帯別生成交通需要、および各時間帯におけるOD交通需要はそれぞれ多変量対数正規分布に従うと仮定する。同様に、各リンクの交通容量も対数正規分布に従うと仮定する。

## 3. モデル

### (1) 交通流

前節より、対数正規分布に従う日生成交通需要 $Q$ に対して、時間帯 $i$ における生成交通需要は割合 $p_i$ を用いて $Q_i = p_i \cdot Q$  ( $\forall i \in I$ )と表される。時間帯 $i$ におけるODペア $j$ の交通需要は割合 $p_{ij}$ を用いて $Q_{ij} = p_{ij} \cdot Q_i$  ( $\forall i \in I, \forall j \in J_i$ )と表される。交通需要 $Q_{ij}$ に属する経路 $k$ の交通量は同様に経路選択確率 $p_{ijk}$ を用いて $F_{ijk} = p_{ijk} \cdot Q_{ij}$  ( $\forall k \in K_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J_i$ )と表される。ここで、OD交通需要はその経路交通量の総和であるから経路選択確率について $\sum_{k \in K_{ij}} p_{ijk} = 1$ が成り立つ。リンク交通量はそのリンクを通過する経路交通量を用いて、以下のよう

$$V_{ai} = \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{aijk} \cdot F_{ijk} \quad \forall a \in A, \forall i \in I \quad (1)$$

ここで、リンク交通量は時間帯ごとに定義されるものとする。ここで時間帯 $i$ におけるリンク交通量は以下のようにも表すことができる。

$$V_{ai} = \hat{p}_{ai} \cdot Q \quad \forall a \in A, \forall i \in I \quad (2)$$

ここで

$$\hat{p}_a = \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{aijk} \cdot p_{ijk} \cdot p_{ij} \quad \forall a \in A, \forall i \in I \quad (3)$$

つまり、時間帯 $i$ におけるリンク交通量は日生成交通需要を割合 $\hat{p}_{ai}$ だけ実数倍したものと定義される。したがって、リンク交通量は対数正規分布に従うことが確認される。

### (2) 移動時間

本研究では確率的なリンク移動時間をBPR<sup>4</sup>関数によって定義する。先に定義したリンク交通量およびリンク交通容量 $C_a \sim LN(\mu_{C_a}, \sigma_{C_a}^2)$ を用いて、リンク移動時間は確率変数として以下のように表される。

$$t_{ai}(V_{ai}, C_a) = t_a^0 \left( 1 + \gamma_a \cdot \left( \frac{V_{ai}}{C_a} \right)^{\lambda_a} \right) \quad (4)$$

$$\forall a \in A, \forall i \in I$$

リンク移動時間は確定項（自由走行時間、 $t_{0a}$ ）と確率項から構成される。リンク移動時間を $T_{ai}$ 、確率項をリンク遅れ時間、 $\hat{T}_{ai}$ とすると、 $\hat{T}_{ai} = T_{ai} - t_{0a}$ である。リンク交通量とリンク交通容量はそれぞれ対数正規分布に従うことから、リンク遅れ時間もまた対数正規分布に従うことがわかる。ここで、リンク遅れ時間はリンク移動時間を確定項の分だけ平行移動したものであるため、それぞれの分散共分散は等しい。各リンクにおける自由走行時間が外生的に所与であるとすると、リンク移動時間を推定することとリンク遅れ時間を推定することはそれぞれ等しくなる。しかし、同時に推定する交通状態としてリンク交通量を含める場合、尤度を計算するために、分布形状を等しくする都合、推定する交通状態としてリンク遅れ時間を採用することが適当である。

経路移動時間是对応するリンク移動時間の和として表現される ( $\Xi_{ijk} = \sum_{a \in A} T_{ai} \cdot \delta_{aijk} \quad \forall k \in K_{ij}, \forall j \in J_i$ )。経路移動時間の平均と分散を用いて、ドライバーのリスク回避的な経路選択行動を表現する経路選択費用を以下のように定義する。

$$c_{ijk}(\mathbf{F}_i) = E[\Xi_{ijk}] + \gamma \cdot \text{var}[\Xi_{ijk}] \quad (5)$$

$$\forall k \in K_{ij}, \forall j \in J_i$$

ここで、 $\mathbf{F}_i$ は時間帯 $i$ における確率的経路交通量を表すベクトルである。 $\gamma$ はドライバーのリスク回避度を表すパラメータである。

本研究では以下に示すロジット型の確率的利用者均衡配分モデルに従って、各時間帯において、ネットワーク均衡が実現しているものと仮定する。なお、交通量配分問題は不動点問題として定式化される。

$$E[F_{ijk}] = p_{ijk}(\mathbf{c}(\mathbf{F}_i)) \cdot E[Q_{ij}] \quad (6)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall k \in K_{ij}$$

ここで、

$$p_{ijk} = \frac{\exp(-\theta \cdot c_{ijk}(\mathbf{F}_i))}{\sum_{j=1}^{|J_i|} \exp(-\theta \cdot c_{ij}(\mathbf{F}_i))} \quad (7)$$

$$\mathbf{c}_i = \left( c_{i11}(\mathbf{F}_i), \dots, c_{i|J_i||K_{ij}|}(\mathbf{F}_i) \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_i = \left( F_{i11}, \dots, F_{i|J_i||K_{ij}|} \right) \quad (9)$$

$p_{ijk}$ は経路選択確率を表す。 $\theta$ は効用のばらつきを表すパラメータである。 $\mathbf{c}_i$ は時間帯  $i$  における経路選択費用を表すベクトルである。

### (3) 複数時間帯における最尤推定

本節では、複数時間帯を対象として、尤度最大化によって、交通状態を推定する手法について述べる。まず、時間帯  $i$  において交通状態を推定する手法について説明する。各リンクにおいて推定される交通状態を  $\mathbf{X}_{ai} = (V_{ai} \ T'_{ai})$  とすると、リンク交通量およびリンク遅れ時間はそれぞれ対数正規分布に従うことから、 $\mathbf{X}_{ai} \sim MVLN(\boldsymbol{\mu}_{ai}, \boldsymbol{\Sigma}_{aa,i})$  となり、2変数の対数正規分布に従う。ここで、 $\boldsymbol{\mu}_{ai}$  と  $\boldsymbol{\Sigma}_{aa,i}$  はそれぞれ  $V_{ai}$  と  $T'_{ai}$  の平均パラメータと分散共分散パラメータである。道路ネットワーク全体を対象とする交通状態ベクトル、 $\mathbf{X}_i = (\mathbf{X}_{1i}, \dots, \mathbf{X}_{|A|i})$  も同様に、 $\mathbf{X}_i \sim MVLN(\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i)$  となり、多変数対数正規分布に従う。

次に、時間帯  $i$  において、 $G$  日間の交通観測データが得られたとき、 $g$  日目の観測に対する観測状態ベクトル  $\mathbf{m}_{gi}$  と観測値ベクトル  $\hat{\mathbf{d}}_{gi}$  を定義する。時間帯  $i$  のリンク  $a$  においてデータが観測される時、その観測の組み合わせは、(i) リンク交通量のみが観測される場合 {v}, (ii) リンク遅れ時間のみが観測される場合 {t}, (iii) リンク交通量とリンク遅れ時間の双方が観測される場合 {v, t}, (iv) なにも観測されない場合 {} の4つである。このとき、リンク  $a$  における観測状態ベクトル  $\mathbf{m}_{agi}$  を (i) から (iv) に対応させてそれぞれ、(1, 0), (0, 1), (1, 1), (0, 0) とする、観測状態ベクトルは以下のように表される。

$$\mathbf{m}_{gi} = (\mathbf{m}_{1gi}, \dots, \mathbf{m}_{|A|gi}) \quad \forall a \in A \quad (10)$$

この観測状態ベクトルを対角成分とする行列のうち、すべての要素が0である行を削除した行列  $\mathbf{M}_{gi}$  を定義する。例えば、 $\mathbf{m}_{gi} = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$  であるとき、 $\mathbf{M}_{gi}$  は以下のようになる。

$$\mathbf{M}_{gi} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

この  $\mathbf{M}_{gi}$  を用いて、各観測機会において、データが観測された地点のみの情報を使って尤度を計算する (Dominici et al.<sup>9</sup>)。  $g$  日目において観測されたデータ数を  $n(g)$  とすると、 $\mathbf{M}_{gi}$  は  $n(g) \times (2 \cdot |A|)$  の行列となる。

$g$  日目の観測に対する観測値ベクトル  $\hat{\mathbf{d}}_{gi}$  は以下のように定義される。

$$\hat{\mathbf{d}}_{gi} = (\hat{v}_{1i} \ \hat{t}_{1i} \ \dots \ \hat{v}_{|A|i} \ \hat{t}_{|A|i}) \quad (11)$$

ここで、 $\hat{v}_{ai}$  および  $\hat{t}_{ai}$  はそれぞれ、観測されたリンク交通量およびリンク遅れ時間の自然対数をとったものである。なお、観測状態ベクトル  $\mathbf{m}_{agi}$  と対応して、観測値が存在しない、あるいは観測値が0以下となる場合には、有効な観測が存在しないものとみなし、便宜的にその要素は  $-\infty$  などの小さい値をとるものとする。上の、観測値が0以下となる場合に関して、リンク遅れ時間は、自由走行時間に対する移動時間の増分として定義される。したがって、リンク移動時間が自由走行時間より小さくなる場合、すなわち、制限速度を超えて走行する車についてはリンク遅れ時間を定義できなくなる。

以上の定義を基に、時間帯  $i$  における、ネットワーク全体の交通状態を推定する尤度関数を以下のように定義する。

$$L_i(\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i) \quad (12)$$

$$= \prod_{g=1}^G \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{d}}_{gi} - \boldsymbol{\mu}_{gi})^T \boldsymbol{\Sigma}_{gi}^{-1} (\hat{\mathbf{d}}_{gi} - \boldsymbol{\mu}_{gi})\right)}{2\pi^{n(g)/2} |\boldsymbol{\Sigma}_{gi}|^{1/2}}$$

ここで、

$$\boldsymbol{\Sigma}_{gi} = \mathbf{M}_{gi} \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{M}_{gi}^T \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\mu}_{gi} = \mathbf{M}_{gi} \boldsymbol{\mu}_i \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{d}}_{gi} = \mathbf{M}_{gi} \hat{\mathbf{d}}_{gi} \quad (15)$$

上に示す尤度関数を、3(1)-(2)で定義する交通量配分問題で制約された、尤度最大化問題を解くことによって、ネットワーク全体の交通状態を推定する。本問題では、複数時間帯を対象として最尤推定を行うことから、推定の対象となる交通状態の次元が大きくなる。そこで、3(1)-(2)で定義するネットワーク交通流と移動時間の定式化に基づき、各時間帯各OD交通需要の平均  $\mathbf{q}_i$  と日生成交通需要の変動係数  $cv$  を用いて、尤度関数を  $L_i(\mathbf{q}_i, cv)$  と再定義する。したがって、交通状態に関する尤度関数が、交通量配分問題を介して、OD交通需要の平均ベクトルと日生成交通需要の変動係数に関する尤度関数となった。

全時間帯全ODペアの交通需要を効率的に推定するため、 $\mathbf{q}_i$  あるいは  $cv$  の片方を所与とした尤度関数  $L_i(\mathbf{q}_i|cv)$  と  $L_i(cv|\mathbf{q}_i)$  をそれぞれ定義する。この2つの尤度関数に関する尤度最大化問題を交互に解くことによって、全時間帯全道路ネットワークの交通状態を推定するアルゴリズムを以下に示す。

- Step 1 繰り返し回数  $n = 1$  とし、日生成交通需要の変動係数の初期解を与える ( $cv_1$ )
- Step 2 日生成交通需要の変動係数  $cv_n$  を所与として、各時間帯各OD交通需要の平均に関して尤度最大化問題を解き、各時間帯各OD交通需要の平均  $\mathbf{q}_n$  を得る。
- Step 3 各時間帯各OD交通需要の平均  $\mathbf{q}_n$  を所与とし、日生成交通需要の変動係数に関して尤度最大化問題を解き、日生成交通需要の変

動係数 $cv_{n+1}$ を得る.

Step 4 収束していれば計算を終了し、終了していなければ、 $n = n + 1$ として、Step 2に戻る

Step 2において、時間帯 $i$ についての尤度最大化問題を各時間帯についてそれぞれ独立に解いている。日生成交通需要の変動係数が所与であることから、各時間帯における尤度最大化問題はそれぞれ独立となるためである。

#### 4. 数値計算

##### (1) 設定

本研究では、Yang et al.<sup>9)</sup>のテストネットワークを用いて、12時間分の交通状態の推定を行う。この道路ネットワークを図-1に示す。ODペア数は8、総経路数は32、リンク数は12である。正午から午前0時にかけて、12の時間帯における各ODペアにおける交通需要の平均と分散・共分散を真値として設定した。各時間帯におけるOD交通需要の平均を図-2に示す。なお、全時間帯全ネットワークにおける交通需要の変動係数は0.2と設定する。このOD交通需要を所与として、交通量配分問題を解き、ネットワーク全体のリンク交通量とリンク移動時間の多変量分布を得る。これを真値として、ランダムサンプリングを行い、得られたサンプルを疑似的なプローブカーデータ、交通感知器データとして扱う。本研究では、各時間帯におけるサンプル数は300とした。

道路ネットワーク全体のリンク交通容量の平均と変動係数はそれぞれ1,000 [pcu/hour]、0.2とした。リンクコスト関数のパラメータ、 $t_a^0$ と $\gamma_a$ はそれぞれ2と6とした。

なお、プローブカー混入率は数値計算の便宜上、ネットワーク全体において一様であると仮定した。なお、今回の数値計算ではプローブカー混入率は0.3としている。すべてのリンクで、ある観測機会において、0.3の確率でリンク遅れ時間が観測されることを意味する。一方で、現実には、リンクごとにプローブカー混入率が異なることが知られている。本研究で提案する手法では、リンクごとに異なるプローブカー混入率を考慮することも可能である。

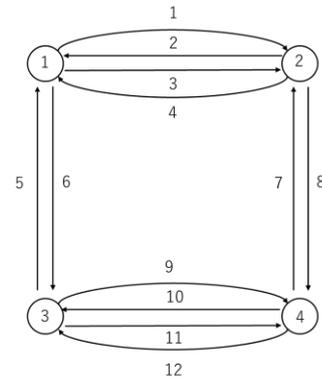


図-1 テストネットワーク

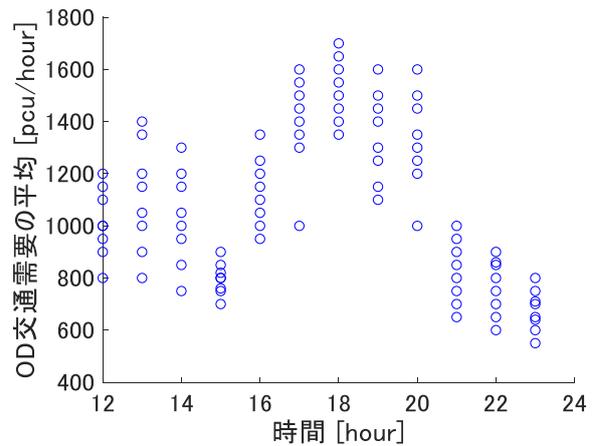


図-2 OD交通需要の平均

##### (2) 結果

図-3はプローブカー混入率を0.3としたときの対数尤度の収束過程である。ここでは、3.で示したアルゴリズムにおける $n$ を繰り返し回数としている。10回以内の繰り返し計算によって、対数尤度が収束している様子が確認できる。

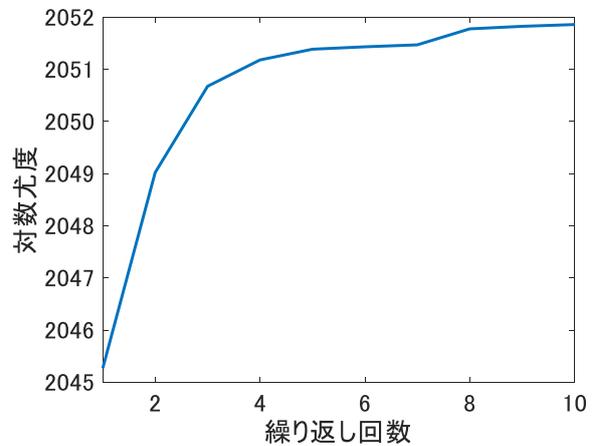


図-3 対数尤度の収束過程

## 5. まとめ

本研究では、複数の時間帯にわたって観測された、プローブカーデータと交通感知器データを用いて、全時間帯全道路ネットワークにおける交通状態を確率的に推定する手法を構築した。交通感知器の設置箇所の制限、およびプローブカー混入率の低さによって、時間的・空間的に網羅的な観測は不可能であるため、部分的に観測された交通データの使用を前提として、交通状態を尤度最大化によって求める手法を開発した。複数時間帯の交通状態を同時に推定するため、扱う次元が大きくなる。そのため、条件付きの尤度最大化問題を繰り返し解くことによって、効率的に計算可能なアルゴリズムを示した。

数値計算として、テストネットワークを用いて、提案するアルゴリズムに基づいて、12の時間帯のサンプルデータを用いて、尤度最大化問題を解いた。提案するアルゴリズムに従い、対数尤度が収束する様子を確認した。

今後の課題として、リアルタイムに観測される交通データを用いて、過去に蓄積して観測されたデータから推定される交通状態を更新する手法の妥当性を、実証的に示すことがあげられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)（課題番号：18H01550）と科学研究費補助金特別研究員奨励費

（課題番号：20J10083）の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) 原祐輔, 花岡洋平, 桑原雅夫. 道路ネットワーク内の関係性に着目した長期観測プローブデータによるプローブ未観測リンクの交通状態補間, 交通工学論文集, Vol. 2, No. 1, pp. 1-10.
- 2) Hara, Y., Suzuki, J. and Kuwahara, M.: Network-wide traffic state estimation using a mixture Gaussian graphical model and graphical lasso. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 86, pp. 622-638, 2018.
- 3) Shao, H., Lam, W.H.K., Sumalee, A. and Hazelton, M.L. Estimation of mean and covariance of stochastic multi-class OD demands from classified traffic counts. *Transportation Research Part C*, Vol. 59, pp. 92-110, 2015.
- 4) Bureau of public road: Traffic assignment Manual, U.S. Department of Commerce, Urban Planning Division, Washington D.C., 1964.
- 5) Dominici, F., Parmigiani, G. and Clyde, M.: Con-jugate analysis of multivariate normal data with incomplete observations. *The Canadian Journal of Statistics*, Vol. 28, No. 3, pp. 533-550, 2000.
- 6) Yang, H., Zhang, X. and Meng, Q. Stackelberg games and multiple equilibrium behaviors. *Transportation Research Part B*, Vol. 41, pp. 841-861, 2007.

(?)

## Network-level traffic state estimation method considering the multi-hourly time slots

Ryuichi TANI, Yuto KAWAMURA and Kenetsu UCHIDA

This article proposes a method for estimating stochastic link flow and link travel time at the network level using traffic observation data. Assuming that network-level traffic observation data is available at multiple hourly time slots, we develop a method to estimate traffic conditions at multiple hourly time slots simultaneously. When the link traffic flow and link travel time are observed at limited links in the whole road network, the likelihood can be maximized by calculating the likelihood only on the data observed at each observation. When calculating the likelihood, the method can consider the low density of data observations compared to the fully observed data. The limited number of traffic counters and the low probe-car penetration rate are the motivation for developing the proposed model. In the test network, we estimated the link traffic flow and link travel time of the whole road network in 12 hourly time slots.