D－32　　平成28年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第73号

交通プローブデータを活用した道路ネットワークの移動時間推定

Travel time estimation for road network with traffic prove data

北海道大学工学部　○学生員　大和田聖 (Takashi Owada)
北海道大学大学院工学研究院　正会員　内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1.　はじめに

近年の目覚ましい情報関連技術の発達と普及により，ビッグデータの収集および，その利用に適した環境が整えられつつある．その結果として，大量かつ多様なデータを得ることが容易になった．また，データそのものの処理方法，あるいはデータの分析手法などをテーマとして取り上げた研究も増加している．さらに,研究から実務への成果の応用も期待されているだろう．土木・交通分野での，交通ビッグデータの活用への期待も否が応でも高まっているのではないだろうか.

交通状況の正確な推定によって，社会にもたらされるメリットは大きい.とくに,移動時間をより正確に把握できることで,道路利用者に対し，経路選択に有益な情報を提供できると考えられる．また，道路管理者あるいは運営者にとっても同様に,効率的な道路ネットワークの維持管理等のために必要な情報を与えることができるだろう．

本研究では，トラフィックカウンタデータ，プローブカーデータの 2 種類のデータの特性をそれぞれ活用し，道路ネットワークの移動時間を推定する方法を提案する．トラフィックカウンタデータは，道路ネットワーク上のリンクに設置された，トラフィックカウンタによって収集されるデータで，常時リンク内の交通量を観測できる．常時観測可能であるため，データ数が豊富ではあるものの，ネットワークの一部のリンクにしか設置されていない．プローブカーデータは，ネットワーク上を走行するプローブカーからリアルタイムで得られるデータで，ドライバーの選択に応じた，特定の経路についての移動時間の実測値が分かる.わが国では, ETC2.0 として実用化されているが,普及率が低いためデータ数は限られているものの，今後の発展が期待できる.

本研究では，トラフィックカウンタデータから得られる交通量データを活用して経路移動時間分布を算出し，プローブカーデータから得られる移動時間の実測データを用いて補正する.これにより，より確度の高い移動時間分布が推定可能になる.ネットワークの一部の実データを活用し，特定の経路の移動時間を導くことができる．さらに，経路間の相関性を用いることによって，データのない経路も含めたネットワーク全体の変化の様相を捉えることができる.

2.　定式化

具体的な経路移動時間分布の推定方法は，内田 [1]に準ずるものとする．まず，観測されるリンク交通量を確率変数として，各交通量，移動時間のモデル化をおこなう．次に，トラフィックカウンタデータから得られる交通量データに関する尤度関数を定義する．これを最大化することで，経路移動時間の確率分布を算出する．最尤法によって求められた確率分布を事前分布とし，プローブカーデータによる経路移動時間の実測値を尤度とし，ベイズ推定をおこない，経路移動時間分布の事後分布を推計する.ベイズ推定による事後分布の推計を繰り返すことで,より確度の高い分布を得ることができる.

2.1　記号

本稿で用いる主な記号は以下に示す通りである．ここで，確率的変数は大文字で表すものとし，その平均については小文字で表すことにする.

A	ネットワーク上のリンク集合
A_0	ネットワーク上で交通量が観測されているリンクの集合
I	OD ペアの集合
J_i	OD ペアi間の経路集合
δ_{aj}	リンクaが経路jの一部であれば 1，それ以外は 0 をとる変数
Q_i	O-D ペアi間の確率的交通需要
F_{ij}	O-D ペアi間の経路jの確率的交通量
V_a	リンクaの確率的交通量
V_{ab}	リンクa，b両方を通過する確率的交通量
p_{ij}	経路選択確率
cv_i	O-D 交通量の変動係数
c_a	交通容量
$\theta(a)$	リンクaに隣接するリンクの集合
$c_{ij}(\mathbf{f})$	O-D ペアi間の経路jの一般化費用

2.2　仮定

本研究では以下に示す仮定を設けた.

- ネットワーク上の$|\mathrm{A}|$本のリンクの内，$|\mathrm{A}_0|$本のリンクにおいて時間交通量が複数回観測されている.
- ネットワーク上の O-D 交通量は，正規分布に従い，その変動係数はO-D ペアによらず一定である.
- ネットワーク上の経路交通量は，O-D 交通量に経路選択確率を乗じたものであり，経路選択確率は（確率的）利用者均衡配分モデルによって表現される.

- ネットワーク上のリンク交通量は，そのリンクを通過する経路交通量の和として表現される．

以上の仮定から，交通量が観測されるリンク交通量は，次元が$|A_0|$の多変量正規分布に従うことになる．

2.3　確率的交通フロー

O-D 交通量Q_iは, 平均が $\mathrm{E}[Q_i] = q_i$, 分散が$\mathrm{var}[Q_i] = (cv \cdot q_i)^2$の確率分布に従うものとする．ここで$cv$は変動係数である．経路$j \in J_i$上の確率的交通量$F_{ij}$は，式(1)で与えられる．

$$F_{ij} = p_{ij} \cdot Q_i \ \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i \tag{1}$$

F_{ij}は平均，分散・共分散が，それぞれ$f_{ij} = p_{ij} \cdot q_i$，$\mathrm{cov}[F_{ij}, F_{ik}] = p_{ij} \cdot p_{ik} \cdot var[Q_i]$の確率分布に従う．ここで$p_{ij}(j \in \mathbf{J}_i)$は，（確率的）利用者均衡配分モデルから推計される経路選択確率である．平均経路交通量は，以下の保存則を満たす．

$$\sum_{j \in J_i} f_{ij} = q_i \ \ \forall i \in \mathbf{I} \tag{2}$$

確率的経路交通量の分散は，次式で与えられる．

$$\begin{aligned}\mathrm{var}[F_{ij}] &= var[p_{ij} \cdot Q_i] = (p_{ij})^2 \cdot var[Q_i] \\ &= (cv_i \cdot f_{ij})^2 \quad \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i\end{aligned} \tag{3}$$

以下に示すように，経路交通量と O-D 交通量の間には，分散に関する保存則が成立する．

$$\begin{aligned}\mathrm{var}[Q_i] &= \sum_j var[F_{ij}] + \sum_{j_1} \sum_{j_2} cov[F_{ij_1}, F_{ij_2}] \\ &= (p_{ij})^2 \cdot var[Q_i] + \sum_{j_1} \sum_{j_2 \neq j_1} p_{ij_1} \cdot p_{ij_2} \cdot var[Q_i] \\ &= (cv \cdot q_i)^2 \cdot \left(\sum_j p_{ij} \right)^2 = (cv \cdot q_i)^2 \ \forall i \in \mathbf{I}\end{aligned} \tag{4}$$

リンクa上の交通量V_aは，次式で与えられる．

$$V_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{aj} \cdot F_{ij} \ \ \forall a \in \mathbf{A} \tag{5}$$

リンク交通量の平均と分散･共分散の関係は次式で与えられる．

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{aj} \cdot f_{ij} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{aj} \cdot p_{ij} \cdot q_i \ \forall a \in \mathbf{A} \tag{6}$$

$$\mathrm{cov}[V_a, V_b] = \mathrm{var} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{aj} \cdot \delta_{bj} \cdot F_{ij} \right] \forall a, b \in \mathbf{A} \tag{7}$$

ここで

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{aj} \cdot \delta_{bj} \cdot F_{ij}$$

は2本のリンクa， b両方を通る交通量を表す．

2.4　確率的移動時間

本研究では，以下に示す BPR 関数によってリンク移動時間を表す．

$$t_a(v_a) = t_a^0 \left(1 + \gamma \left(\frac{v_a}{c_a} \right)^\lambda \right) \forall a \in \mathbf{A} \tag{8}$$

ここで t_a^0は自由走行時間，γとλはパラメータである．BPR 関数から，リンク移動時間の平均，分散，共分散（$\mathrm{E}[t_a(V_a)]$, $\mathrm{var}[t_a(V_a)]$， $\mathrm{cov}[t_a(V_a), t_b(V_b)]$）を計算することができる．以下では, 式をわかりやすくするため，$E[t_a(V_a)]$, $\mathrm{var}[t_a(V_a)]$, $\mathrm{cov}[t_a(V_a), t_b(V_b)]$ をそれぞれ $\hat{t}_a(v_a)$，$\sigma_a^2(v_a)$，$\sigma_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b)$と表記することにする．

経路jの移動時間Ξ_{ij}は以下で与えられる．

$$\Xi_{ij} = \sum_{a \in A} t_a(V_a) \cdot \delta_{aj} \ \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i \tag{9}$$

その平均と分散は，以下で与えられる．

$$\hat{\xi}_{ij} = \sum_{a \in A} \hat{t}_a(v_a) \cdot \delta_{aj} \ \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i \tag{10}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{var}[\Xi_{ij}] &= \sum_{a \in A} \sigma_a^2(v_a) \cdot \delta_{aj} \\ &\quad + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b(\neq a) \in A} \delta_{aj} \cdot \delta_{bj} \cdot \sigma_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b) \\ &\quad \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i\end{aligned} \tag{11}$$

また，経路移動時間の共分散は式(12)で与えられる．

$$\begin{aligned}\mathrm{cov}[\Xi_{ij}, \Xi_{ik}] &= \mathrm{cov}\left[\sum_{a \in A} \delta_{aj} \cdot t_a(V_a), \sum_{b \in A} \delta_{bj} \cdot t_b(V_b) \right] \\ &= \sum_{a \in A} \sum_{b \in A} \delta_{aj} \cdot \delta_{bk} \cdot \sigma_{ab}(v_{ab}, v_a, v_b) \\ &\quad \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i, \forall k \in \mathbf{J}_i\end{aligned} \tag{12}$$

ここで，平均経路交通量は，経路移動時間の平均と分散から構成される一般化費用$c_{ij}(\mathbf{f})$を評価指標として，（確率的）利用者均衡配分原則から推計される経路選択確率を用いて, 以下で示される均衡条件を満たすものとする．

$$f_{ij} = p_{ij}(\mathbf{c}(\mathbf{f})) \cdot q_i \ \ \forall i \in \mathbf{I}, \forall j \in \mathbf{J}_i \tag{13}$$

where

$$\mathbf{c} = \left(c_{11}(\mathbf{f}), \cdots, c_{i|I||J_{|I|}|}(\mathbf{f}) \right)$$

$$\mathbf{f} = \left(f_{11}, \cdots, f_{|I||J_{|I|}|} \right)$$

3.　移動時間の推定

3.1　トラフィックカウンタデータの活用

今, トラフィックカウンタが設置されているリンクにおいて, k個（k日分）の時間交通量観測データがあるとし，それらは以下に示すベクトルで表すことにする．

$$\hat{\mathrm{v}}^l = \left(v_1^l, \cdots, v_{|A_0|}^l \right) \ \ l = 1, \cdots, k \tag{14}$$

平均O-Dベクトル$\mathbf{q}$を以下で定義する.

$$\mathbf{q} = (q_1, \cdots, q_{|I|}) \tag{15}$$

また, トラフィックカウンタが設置されているリンクの交通量ベクトルを以下で定義する.

$$\mathbf{V}(\mathbf{q}, cv) = (V_1, \cdots, V_{|A_0|}) \tag{16}$$

$\mathbf{V}(\mathbf{q}, cv)$は多変量正規分布に従うため, 以下のように表現できる.

$$\mathbf{V}(\mathbf{q}, cv) \sim MVN(\mathbf{v}(\mathbf{q}, cv), \mathbf{\Sigma}(\mathbf{q}, cv)) \tag{17}$$

where

$$\mathbf{v}(\mathbf{q}, cv) = (v_1, \cdots, v_{|A_0|})$$

$$\mathbf{\Sigma}(\mathbf{q}, cv) = \begin{pmatrix} \mathrm{var}[V_1] & \cdots & \mathrm{cov}[V_1, V_{|A_0|}] \\ & \ddots & \vdots \\ & & \mathrm{var}[V_{|A_0|}] \end{pmatrix}$$

$\mathbf{v}(\mathbf{q}, cv)$, $\mathbf{\Sigma}(\mathbf{q}, cv)$は, それらのエレメントがそれぞれ式(6), 式(7)で表されるリンク交通量に関する平均ベクトル, 分散・共分散行列である. 以上の定式化を用いると, $\mathbf{\Sigma}(\mathbf{q}, cv)$が正則でない場合も計算可能な以下に示す尤度関数を$(\mathbf{q}, cv)$に関して最大化することによって, リンク交通量を推計することにする.

$$\ln \tilde{L} = -\frac{k \cdot \rho}{2} \cdot \log(2\pi) - \frac{k}{2} \cdot \log\left(\prod_{i=1}^{\rho} \lambda_i\right)$$

$$-\frac{1}{2} \cdot \sum_{l=1}^{k} (\hat{\mathbf{v}}^l - \mathbf{v}) \Sigma^- (\hat{\mathbf{v}}^l - \mathbf{v})^T \tag{18}$$

ここで$\lambda_i (i = 1, \cdots, \rho)$ は非負な$\mathbf{\Sigma}(\mathbf{q}, cv)$の固有値であり, $\mathbf{\Sigma}^{-1}$ は$\mathbf{\Sigma\Sigma^-\Sigma} = \mathbf{\Sigma}$を満たす適当な$\mathbf{\Sigma}$の一般化逆行列である.

3.2　事後分布の推定

ネットワーク上のn本の経路のうち, ある1つの経路について, 経路移動時間の実時間データが1回だけ得られた場合を考える.

経路移動時間の確率変数$\mathbf{X}$は, 多変量正規分布に従い, 以下で表される.

$$\mathbf{X} \sim \mathrm{MVN}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{\Sigma}) \tag{19}$$

where

$$\mathbf{X} = (\mathrm{X}_1, \mathrm{X}_2, \cdots, \mathrm{X}_n) = (\mathrm{X}_1, \mathbf{X_2})$$

$$\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \cdots \mu_n) = (\mu_1, \boldsymbol{\mu_2})$$

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \cdots & \sigma_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \mathbf{\Sigma_{12}} \\ \mathbf{\Sigma_{21}} & \mathbf{\Sigma_{22}} \end{pmatrix}$$

n 次元の確率ベクトルをスカラー量X_1と$(n-1)$次元のベクトル$\boldsymbol{X_2}$に分割する.

X_1は正規分布に従い, 以下のようになる.

$$X_1 \sim N(\mu_1, \Sigma_{11}) \tag{20}$$

ここで, 移動時間の実測データ, $X_1 = x_1$が与えられたとする. 移動時間を尤度とし, 最尤推定によって得られた分布を事前分布とし, ベイズ推定を用いることで, 事後分布の平均および分散$\hat{\mu}_1, \hat{\sigma}_{11}$を求められる.

このとき, $\boldsymbol{X_2}$の条件付き分布は多変量正規分布に従い, 以下のように表現できる.

$$\widehat{\boldsymbol{X}}_2 \sim \mathrm{MVN}(\widehat{\boldsymbol{\mu}}_2, \widehat{\mathbf{\Sigma}}_{22}) \tag{21}$$

where

$$\widehat{\boldsymbol{\mu}}_2 = \boldsymbol{\mu}_2 + \mathbf{\Sigma_{21}} \sigma_{11}^{-1} x_1$$

$$\widehat{\mathbf{\Sigma}}_{22} = \mathbf{\Sigma_{22}} - \mathbf{\Sigma_{21}} \sigma_{11}^{-1} \mathbf{\Sigma_{12}}$$

さらに, 経路間の相関ρは事前分布のそれと変わらないと仮定すると, 以下のようになる.

$$\hat{\sigma}_{1i} = \rho_{1i} \hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_i \quad (i = 1, \ldots, n) \tag{22}$$

したがって, 事後分布のすべての平均および分散を求められる.

ある経路についての移動時間データが複数観測された場合には, この過程を複数回繰り返すことにより, 新たな事後分布の推計が可能である.

4.　数値計算例

図-1のようなリンク4本, 経路3本からなるテストネットワークを考える. 各経路を経路1から3とする. このうち, リンク1, 2からなる経路を, 経路1とする. 経路2はリンク1, 3からなり, 経路3はリンク4から構成される.

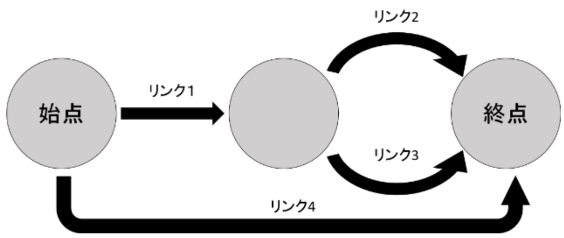

図-1　テストネットワーク

ここで, O-D交通量の変動係数は所与とし, $cv = 0.1$と設定した. また, リンク移動時間に関しては, 式(8)示したBPR関数において, $t_a^0 = \alpha$, $(\gamma \cdot t_a^0)/c_a = \beta$, $\lambda = 1$とし, 表-1に示す設定値を与えた. 観測リンク交通量は, リンク1, リンク2についてデータが存在すると仮定し, 表-2に示す値を与えた.

表-1　移動時間パラメータ

リンク	α	β
1	5	0.1
2	4	0.2
3	6	0.4
4	10	0.3

表-2　リンク交通量の観測値

	リンク1	リンク2
1	100	50
2	80	20
3	200	80
4	70	30
5	150	90
6	120	80
7	140	120
8	100	40
9	90	50
10	130	65

2章および3章で示した手法に従い, 数値計算をおこなうと, 平均O-D交通量は，$q = 238$と推計された.

リンク交通量についての平均および分散・共分散行列は以下のよう推計された.

$$\boldsymbol{v} = (135.43 \quad 91.99 \quad 43.43 \quad 102.49)$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 183.40 & 84.63 & 18.86 & 0 \\ 84.63 & 84.63 & 0 & 0 \\ 18.86 & 0 & 18.86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 105.05 \end{pmatrix}$$

推計されたリンク交通量に対応する経路移動時間の平均および分散・共分散行列は以下のようになる.

$$\boldsymbol{\mu} = (40.94 \quad 41.92 \quad 40.75)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} 8.60 & 4.28 & 0 \\ 4.28 & 6.36 & 0 \\ 0 & 0 & 9.45 \end{pmatrix}$$

よって，各経路に関する移動時間の事前分布を求められることが示された.

次に，経路1の移動時間データの実測値が1回だけ観測された場合を考える．ベイズ推定を用いて，経路1の移動時間の事後分布を求める．経路1の事前分布について以下のように示すことができる.

$$X_1 \sim N(40.94, 8.60)$$

観測値を，$x_1 = 35$とし，これを尤度とする．ベイズ推定による事後分布の平均および分散は，以下のように推計される.

$$\hat{X}_1 \sim N(37.97, 4.30)$$

このときの，事前・事後分布は図-2のようになる.

このとき, 条件付き分布および相関係数ρを用いて, 移動時間の観測値が存在しない経路については，条件付確率を計算すると，式(21)に示した関係から，以下のように推計される.

$$\hat{\mu}_2 = (76.75 \quad 40.75)$$

$$\hat{\Sigma}_{22} = \begin{pmatrix} 2.10 & 0 \\ 0 & 9.45 \end{pmatrix}$$

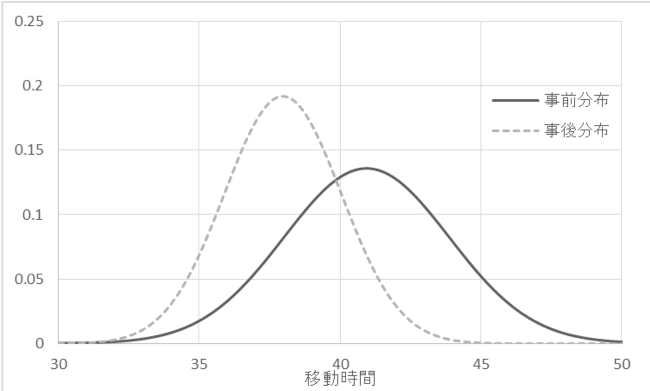

図-2　経路1の移動時間分布

さらに相関係数ρを用いて，$\hat{\Sigma}_{12}$，$\hat{\Sigma}_{21}$を求めると，最終的に事後分布の平均および分散・共分散行列は以下のようになる.

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = (37.97 \quad 76.75 \quad 40.75)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \begin{pmatrix} 4.30 & 0.71 & 0 \\ 0.71 & 2.10 & 0 \\ 0 & 0 & 9.45 \end{pmatrix}$$

経路1および経路3の間の相関は0となるため，事後分布を算出しても，平均と分散は変化していないことがわかる.

5.　まとめ

本研究では，トラフィックカウンタデータと ETC2.0 による経路移動時間データの活用を念頭に置き，ネットワーク上の経路移動時間を推計するフレームワークを提案した．さらにテストデータを用いたモデルの数値実験を行った．今後は実データを用いた検証を行う必要がある.

参考文献

1)　内田賢悦，峪龍一，山田雄太，加藤哲平：常時観測データを用いた道路ネットワークの移動時間分布の推定に関する研究，第53回土木計画学研究・講演集，2016