時空間カルマンフィルタを用いたプローブ情報による滞留長の推定

山本　理久[1]・瀬谷　創[2]

[1]学生非会員　神戸大学 大学院工学研究科（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail:226t140t@stu.kobe-u.ac.jp

[2]正会員　神戸大学准教授　大学院工学研究科（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: hseya@people.kobe-u.ac.jp

交差点付近における渋滞状況の把握においては滞留長が重要な指標となるが，目視・カメラによる現地調査はコスト面や広域性の観点で課題がある．これに対し，広域に対して常時観測が可能な方法として ETC2.0 等のプローブ情報の活用が考えられるが，現状方法論は限られており，また信号現示等の現地調査を要するものが少なくない．そこで本研究では，プローブデータを活用し，時空間カルマンフィルタによって交差点付近における速度分布をフィルタリングすることによって外れ値を排除しながら滞留長を推定するための方法を提示する．また，提案手法を神戸市の渋滞交差点における滞留長の把握に適用し，信号現示の変更による交通流への影響を効果的に捉えられることを示す．

Key Words: *storage length, floating-car data, ETC2.0, space-time Kalman filter*

1. はじめに

近年，国土交通省による生産性革命プロジェクトの具体例として取り上げられたように，渋滞のピンポイント対策が注目され，全国各地の関係機関によって様々な局所的渋滞対策が行われている．こうした取り組みの前後において交通状況の把握による効果検証は不可欠であり，中でも渋滞状況の変化を最も簡明に表現可能な滞留長は重要な指標である．しかし，現状として滞留長の把握はコストのかかる現地調査による実測や，トラフィックカウンターによる断片的な計測が主流である．そのため，経済的かつ継続的に調査が可能な観測体制が求められており，特に効率的な交通状況の把握方法として ETC2.0 等のプローブデータの活用が期待されている．

ETC2.0 プローブ情報を用いた交通状況の把握については高速道などを中心に行われているものの，一般道を対象として滞留長測定を目指した研究は少ない[1),2),3)]．また，それらについても，高い正確度を目指すと，信号現示等の現地調査が必要となる．本研究では，ETC2.0 プローブデータを活用し，時空間カルマンフィルタ（space-time Kalman filter (STKF)）によって交差点付近における速度分布をフィルタリングすることによって外れ値を排除しつつ滞留長を推定するための実用的な方法を提示する．また，提案手法を神戸市の渋滞交差点における滞留長の把握に適用し，信号現示の変更による交通流への影響を効果的に捉えられることを示す．

以下，第 2 章では，検証の方針について説明する．第 3 章では，提案する STKF による滞留長把握法について説明を行う．第 4 章では，適用例を示す．最後に第 5 章で本研究に関するまとめを述べる．

2. 検証の方針

(1) 対象地点

本研究では神戸市西区の伊川谷町漆山交差点付近の道路における車両の滞留を検証の対象とした．漆山交差点は 3 つの信号交差点が近接する特殊な形状の交差点であり，神戸市内一般道路 55 箇所（2022 年 1 月現在）に指定された「主要渋滞箇所」の 1 つとなっている（**図-1**）．以下，**図-1** に示した通り，交差点への各流入部をそれぞれ流入部 A～E と呼称する．本研究では大蔵谷 IC の出口に面している流入部 E を除いた流入部 A から D において滞留長の算定を行った．

(2) データ概要

本研究では，村野ら[1)]の「算定手法①」を参考に，デジタル道路地図（DRM）における A から D の各流入部



図-1　対象地点付近の概要

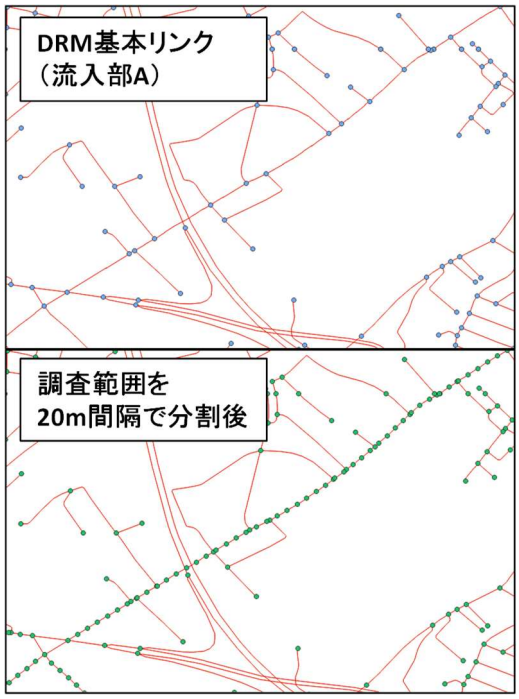


図-2　分割したネットワーク（流入部 A）

のリンクを交差点から20m間隔に分割したネットワークデータ（**図-2**）を用意し，橋ら [4]で開発したマップマッチング手法により，ETC2.0 プローブデータを分割リンクにマッチングし，車両ごとの空間平均速度を．時刻差を距離で除することによって算出した．空間平均速度を求め，一定の閾値を仮定することで，滞留長を求めることができる．

(3)　データの加工

交通状況の把握方法として滞留長の常時観測は最終的な理想形ではあるが，ETC2.0 搭載車の混入率は一般道（特に細街路）では現状かなり低く [5]，今回扱うような日交通量が 1 万台程度の交差点では精度よく空間平均速度を求めるに十分なプローブデータを即時に得ることはできない．そこで今回は 1 か月分蓄積されたデータを，1 日を 20 分間隔に分けた時間帯ごとに集計する形で精度（サンプルサイズ）を確保することとした．集計にあたっては，平均値や中央値を用いることが考えられ，今回は中央値を求めることとした．このような設定は，長期間での滞留長の変動及び時間帯ごとの滞留長の変化の把握に重きを置いたものである．具体的なケースとしては，交差点の線形や信号現示の変更による交通流への影響把握や，時間帯別の渋滞状況の遷移を把握したい場合などが想定される．

今，信号現示変更を例にとって具体的に考えてみる．あるリンク l における，ある日 d のある時刻帯 t の車両の通過速度の分布は（標本は車両），渋滞流と自由量を含むため，多峰性を示すと考えられる．その分布の平均値ないし中央値は，車両数（標本サイズ）が十分に多ければ，中心極限定理によりヒストグラムがおおむね正規分布的な形状になると考えられる（結果によっては，20m や 20 分間隔といった分割を見直す必要がある）．ここで，信号現示変更が有効に機能したとき，同時刻における渋滞流の割合は減ると考えられるので，変更後の分布の中央値は，速度上昇方向に改善する．その改善分を抽出すればよい．

3.　時空間カルマンフィルタ（STKF）

(1)　STKF の概要

2 (2) の方法で計算した空間平均速度は，マップマッチング前の緯度経度と時刻より計算したものであるため，多分にノイズを含む．したがって，2 (3) で述べたような集計を行ったとしても，標本サイズが十分でなければ，20m 区間ごとの速度はばらつきをもつ可能性があり（ある 1 台の車両は，興味のあるリンク集合の一部のみを通過することにもよる），何かしらのフィルタリング処理を行わないと，滞留長を安定的に求めることは難しい．そこで本研究では，KF を用いてフィルタリング処理を行うこととした．ただし，隣接する区間の速度が独立であるとは想定できないため，リンク間の相関を考慮する必要がある．相関の大きさは，上下方向で異なると考えられるため，本研究では，相関構造を上下方向で相関レンジの異なる指数関数でモデル化することとした．

KF は状態空間モデルにおいて内部の見えない状態を効率的に推定する計算手法であり，一期前（本稿では 20 分前）のあるリンク l の状態推定値 $\boldsymbol{x}_{l,t-1}$ から当期の状態を予測し，またそれを当期の観測データ $\boldsymbol{y}_{l,t}$ を用いて補正する．今回は，1 日を 20 分ごとの 72 区分に分けた各時点におけるリンクごとの速度の中央値を取ったベクトルを，時点 $t(1 \leq t \leq 72)$ における観測ベクトル $\boldsymbol{y}_t$ と捉え，$t-1$ 時点の状態変数のベクトルを，$\boldsymbol{x}_{t-1}$ とおく．

このとき，状態方程式は，

$$\boldsymbol{x}_t = \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{t-1} + \boldsymbol{\eta}_t \quad (1)$$
$$\boldsymbol{\eta}_t \sim \mathrm{N}(\boldsymbol{0}, \sigma^2\boldsymbol{I})$$

とモデル化できるとし，観測方程式は，

$$\boldsymbol{y}_t = \boldsymbol{x}_t + \boldsymbol{\zeta}_t \quad (2)$$
$$\boldsymbol{\zeta}_t \sim \mathrm{N}(\boldsymbol{0}, \tau^2\boldsymbol{I})$$

とモデル化できると仮定する．τ^2 と σ^2 は分散パラメータ，$\boldsymbol{0}$ は 0 からなるベクトル，$\boldsymbol{I}$ は単位行列である．ここで，$\boldsymbol{F}$ はリンク間の相関関係を示す行列であり，$\boldsymbol{F}$ の i 行 j 列の要素 f_{ij} は，地点間の距離を表す行列 $\boldsymbol{D}$ の要素 d_{ij} を用いて，

$$f_{ij} = \begin{cases} \exp\left(-\dfrac{d_{ij}}{r_1}\right) & (i < j) \\ 1 & (i = j) \\ \exp\left(-\dfrac{d_{ij}}{r_2}\right) & (i > j) \end{cases} \quad (3)$$

と表される．ここで，r_1，r_2 はそれぞれ交差点に向かう方向，その逆方向での影響の大きさを定めるパラメータである．以上のような定式化の下で，求めるべきパラメータは，$(r_1, r_2, \tau^2, \sigma^2)'$ の 4 つであり，原理的には，周辺対数尤度を最大化することで，求めることができる [6]．ただし，今回パラメータが安定的に推定できなかったため，本研究では試行錯誤の結果，$(r_1, r_2, \tau^2, \sigma^2)' = (4, 4, 10, 1)'$ と外生的に与えている．この点については今後の課題としたい．

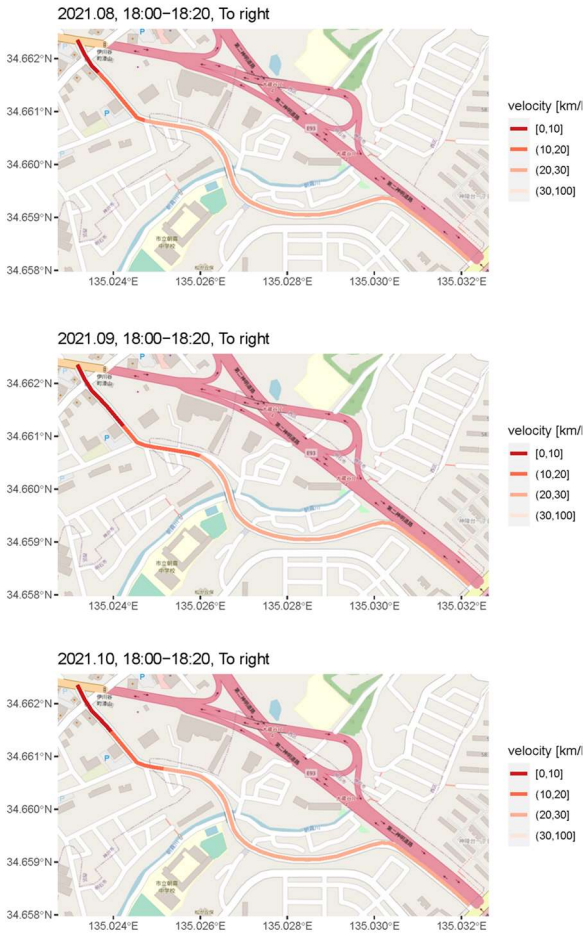


図-3　推定結果
（流入部 D：交差点へ流入する方向）

4.　結果と考察

対象交差点では，2021 年の 9 月と 10 月に信号現示の変更が行われた．8 月の時点では，ステップ数：20，サイクル長：約 180 秒前後であったが，9 月の変更でステップ数：23，サイクル長：約 200 秒～250 秒と変更され



図-4　推定結果（流入部 C：交差点へ流入する方向）

た．この変更は，逆時差解消による安全性向上と渋滞緩和をねらいとしたものである．しかし，特定の枝で渋滞が悪化する状況が見られたことから，再度 10 月にサイクル長の調整が行われ，サイクル長は 190 秒前後に設定された．なお，筆者らがミクロ交通シミュレータ SUMO を用いて検証した結果では，平均損失時間で見て，夕ピークの最適なサイクル長は，180 秒程度と同水準であった [7].

本研究では，このような背景を踏まえつつ，3 章で説明した手法による空間平均速度の状態推定を行った．流入部 D，C のフィルタリング後の空間平均速度の状態推定値をそれぞれ，図-3，図-4 に示す（ただし，両者とも交差点に流入する方向である）．流入部 D は，9 月に悪化し，10 月に改善，流入部 C は，9 月以降改善という結果となった.

ここで例えば，速度 20km/h 以下，あるいは 10km/h 以下を渋滞と定義すれば，平均的な滞留長を求めることが可能となる．ただし，（本研究では発生しなかったが），速度が交差点から低減せずに振動するような可能性も考えられるため，その対処も今後考えたい.

5. おわりに

交差点付近における渋滞状況の把握においては滞留長が重要な指標となるが，目視・カメラによる現地調査はコスト面や広域性の観点で課題がある．これに対し，広域かつ常時観測が可能な方法として ETC2.0 等のプローブ情報の活用が考えられるが，現状方法論は限られており，また信号現示等の現地調査を要するものが多い.

そこで本研究では，ETC2.0 プローブデータを活用し，リンク間の相関関係を指数関数でモデル化した時空間カルマンフィルタ（STKF）によって交差点付近における速度分布をフィルタリングすることによって外れ値を排除しつつ滞留長を把握するための実用的な方法を提示することを試みた．神戸市の渋滞交差点における滞留長の把握に適用し，信号現示の変更による交通流への影響を効果的に捉えられることを示した.

今後の課題として，現在はパラメータを外生的に与えているため，これを内生的に推定することが挙げられる．また，今回リンク 20m，1 か月毎，20 分単位でモデル化を行ったが，モデル化に適切な時間・リンク解像度についても，検討を行う必要がある.

REFERENCES

1) 村野祐太郎，松田奈緒子，里内俊介，松岡禎典，横地和彦，田名部淳，前川友宏，橋本申：ETC2.0 プローブ情報を活用した滞留長の算定手法に関する研究，第 18 回 ITS シンポジウム 2020，2020.
2) 中田寛臣，松田奈緒子，横地和彦，里内俊介，前 川友宏，田名部淳：ETC2.0 プローブ情報を活用したボトルネック指数に関する検証，第 17 回 ITS シンポジウム 2019，2019.
3) 加藤 哲，田中良寛，橋本浩良，瀬戸下伸介，立川 太一：ETC2.0 プローブ情報を活用した渋滞状況の把握手法の効率化・高度化に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.55，CD-ROM，2017.
4) 橋口剛，瀬谷創，瀬木俊輔，井料隆雅，安田昌平：隠れマルコフモデルに基づく最短経路探索の考え方を用いたマップマッチング手法の検証，土木計画学研究・講演集，Vol.66，CD-ROM，2022.
5) 井料隆雅：航空写真を用いた細街路における ETC2.0 データのサンプル率の推定，土木計画学研究・講演集，Vol.67，CD-ROM，2023.
6) Gurka, M. J Selecting the best linear mixed model under REML, *The American Statistician*, Vol.60, No.1. pp. 19-26, 2006.
7) 山本理久，瀬谷創：複雑交差点における信号現示変更の効果検証， 2022