

プローブ車両軌跡データを用いた 交通の量的把握

小林 桂子¹・和田 健太郎²・桑原 雅夫³

¹ 非会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ東北支店 (〒980-0811 仙台市青葉区一番町4丁目6-1)

E-mail: kobayashi-kk@oriconsul.com

² 正会員 東京大学助教 生産技術研究所 (〒153-8505 目黒区駒場4-6-1)

E-mail: wadaken@iis.u-tokyo.ac.jp

³ 正会員 東北大学大学院教授 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究ではプローブ車両軌跡データのみを用いて交通量を推定する手法を提案した。提案手法は Kinematic Wave 理論に基づき、2台のプローブ車両の間の交通状態を推定する。実データを用いて提案手法の検証を行った結果から、提案手法は特に渋滞状況下で精度良く推定可能であることが示された。

Key Words : Traffic volume estimation, Probe vehicle trajectory, Kinematic wave theory

1. 研究背景と目的

交通量や密度などの交通の量的な情報は、道路における遅れ時間の評価や信号制御、OD推定、環境評価などに活用される最も基本的な情報の1つである。従来、量的な情報の観測は車両感知器などの定点観測により行われていた。しかし、感知器の整備や維持にコストがかかることや観測できる地点が限定されるなどの課題が指摘されている。

一方、近年ではGPS機器を搭載したプローブ車両による移動体観測が普及しつつある。移動体観測はセンサーインフラを必要とせず、観測地点の制約も受けずに詳細な軌跡情報を観測することができる。ただしあくまでプローブ車両データはサンプルデータであるので、交通の量的な情報は直接得られない。また観測データを旅行時間に大幅に縮約した活用が主になっているのが現状である。しかし、軌跡データは車両の加減速や停止などの運転モードや道路状況を反映した豊富な情報を持っており、これらの情報と交通流の特性を組み合わせることで、交通の量的な把握も可能とするポテンシャルを有している。

本研究ではプローブ車両軌跡データのみを用いて交通の量的推定を可能とする手法を提案する。この手法は、2本のプローブ車両の間の交通状態を Kinematic Wave(KW)理論により補完するものであり、車両の詳細な軌跡データを集約することなく活用す

ることができる。提案手法を日本で得られたプローブ車両データを用いて検証することにより、プローブ車両の持つ軌跡データという豊富な情報を用いれば、交通量の推定が可能であること示す。

なお、プローブ車両データを活用して交通の量的把握を試みた研究は、いくつか存在する¹⁾²⁾³⁾。しかし、いずれの研究もプローブ車両データに加えて追加的な条件(車両感知器、車間距離データなど)を必要とするという点で本研究と異なる。

2. 交通量推定手法

2本のプローブ車両の間の交通状態をKW理論により補完する手法を構築する。まず三角形の Fundamental Diagram(FD)を仮定する。NewellによるKW理論⁴⁾⁵⁾⁶⁾によれば、ある地点の累積台数は、上流境界からのFWに沿って評価される累積台数(式(1)右辺の第1項)と下流境界からのBWに沿って評価される累積台数(式(1)右辺の第2項)の最小値として与えられる(最小包絡線原理)。すなわち2本のプローブ車両データのうち先行プローブ車両の累積台数を0台、後続プローブ車両の累積台数をN台とすれば、対象地点(図-1の黄色線)の累積台数 N_{mid} は式(1)で与えられる。

$$N_{mid} = \min\{N, k_{jam}x\} \quad (1)$$

ここで k_{jam} は飽和交通密度、 x は図-1にあるように

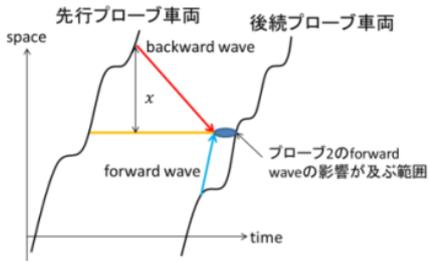


図- 1 2本のプローブ車両軌跡データを用いた交通量推定の概念図

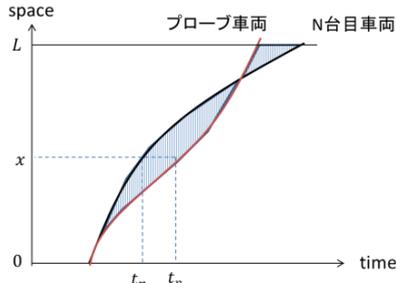


図- 2 数式(1)の概念図

ある地点に到達する BW が出発する先行プローブ車両の位置と、任意の地点の位置の距離の差である。

この方法では予め 2 本のプローブ車両の間が渋滞領域であると分かっているならば、BW の影響のみで各地点の累積台数を求めることができる。一方、渋滞領域と自由流領域が混在する場合は、2 つの問題が生じる。1 つ目は、2 本のプローブ車両の累積台数の差である N の値が不明なことである。2 つ目は図-1 に示すように、後続プローブ車両の軌跡だけでは FW の条件が不足することである。

そこで本研究では、後続プローブ車両軌跡を境界条件として用いるのではなく、後続車両の軌跡を再現するように N の値を決定する手法を提案する。これは後続プローブ車両の軌跡には 2 本のプローブ車両の間の交通状態が反映されていることを利用するものである。具体的には、まず N の値を適当に与え KW 理論に基づく交通状態を効率的に求める手法である Variational Theory (VT)⁷⁾ で N 台目の軌跡を推定する。ここで、上流側の境界が不足することを補うために、2 本のプローブ車両の間に一様分布で車両が到着することを仮定する。そして推定軌跡と後続プローブ車両の軌跡の二乗和が最小となる時の N の値を採用する。この問題は、位置 x における、 N 台目の車両及びプローブ 2 の時刻 t_n 及び時刻 t_p の時の累積台数をそれぞれ $n = N(x, t_n)$, $p = P(x, t_p)$ とすれば、式(2)のように定式化できる (図-2)。

$$\begin{aligned} & \min_n \int_0^L (t_p - t_n)^2 dx \\ & = \min_n \int_0^L (P^{-1}(x, p) - N^{-1}(x, n))^2 dx \end{aligned} \quad (2)$$

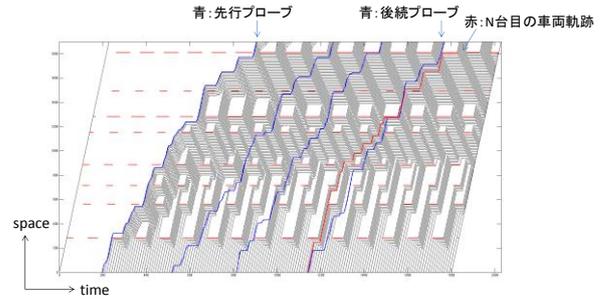


図- 3 検証結果の軌跡図

ここで L は対象区間の長さである。以上より推定した N は 2 本のプローブ車両の間の流入交通量を表している。更にこの N 及び上流境界における一様分布の仮定により、VT で全ての地点の累積台数を計算すれば、2 本のプローブ車両の間の全ての交差点の交通状態を推定することが可能となる。

3. 東京都駒沢通りにおける検証

(1) 検証使用データ及び検証方法

検証使用データは東京都世田谷区から目黒区へ通じる駒沢通りの信号現示データ、対象区間で観測したプローブ車両データ、区間内全ての交差点に設置したビデオ観測より得た車両の通過台数データである。ここは片側 1 車線道路で、対象区間の長さは約 2km、区間途中には 8 つの信号交差点がある。データは 2010 年 12 月 1 日のもので、使用するプローブ車両データは、朝のピーク時を含む午前 7 時 00 分から午前 9 時 00 分に観測された 13 台のデータであり、1 秒間隔で集められたデータを用いる。

FD は、FW 速度は実測より 30(km/時)とし、BW 速度は 15(km/時)と仮定、 k_{jam} は 160(台/km)と仮定した。

ビデオ観測より得た各交差点における車両の通過台数を真値として、提案手法により推定された交通量との比較を行った。検証を行った 2 本のプローブ車両の組み合わせ数は 10 通りである。プローブ車両の離れている間隔は最短で 6 分、最長で 32 分で検証した。まず式(2)によって求めた最適な N の精度について検証を行う。次に最適な N を用いて推定した各交差点における累積曲線を、ビデオ観測によって得られた真値と比較する。交通状態の異なるエリアでの検証を行うため、信号交差点を 8 個含む約 2km の混雑した区間と、上流の信号 4 個までの約 1.2km の比較的空いている区間の 2 つで検証した。

(2) 最適な N の値の推定の検証結果と考察

図-3 は図に示す 2 本のプローブ車両データを用いた推定の図であり、青線が後続プローブ車両の軌跡

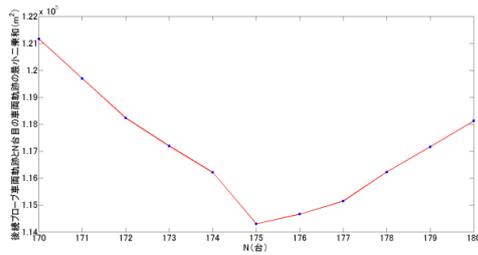


図-4 最適なNの値の推定

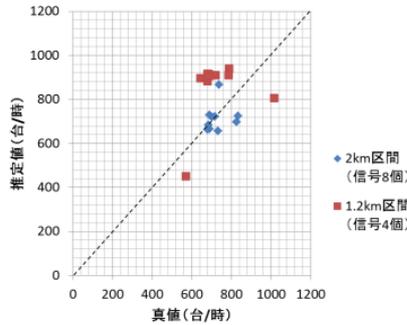


図-5 2本のプローブ車両軌跡データを用いた交通量推定の検証結果

で、赤線が推定した N 台目の車両軌跡である。この2本の軌跡の二乗和を縦軸に取り、横軸に N の値を取ったグラフが図-4である。二乗和の値は N の値に対しておおよそ凸のグラフになった。これは N の値が小さすぎても大きすぎても後続プローブ車両の軌跡が再現されないからである。図-5は検証区間の長さ別に見た検証結果である。1.2km 区間（相対誤差の平均 27%）の方が真値と推定値の差が大きく、2km 区間（相対誤差の平均 7%）の推定の方が当たっていることが分かる。区間が長い方が、推定精度が良い理由は、推定対象エリアに混雑している領域を含むためだと考えられる。渋滞領域では BW の影響で累積台数が決まる。FW の影響だと先に述べたように FW の情報が不足するが、BW の情報は不足しないため、先行プローブ車両の情報を反映することができる。また、混雑していれば、一様分布で与えた車両の軌跡もすぐに先行車両の軌跡に追従する形で、実際に近い車両挙動になると考えられるので、混雑しているときは一様分布の仮定は結果に大きな影響を及ぼさないと考えられる。それから2本のプローブ車両が離れている時間の長さや推定誤差に相関はないことも分かった。

(3) N を用いた各交差点における交通量の比較

最適な N を用いた各交差点における、2本のプローブ車両の間に存在する推定台数を、ビデオ観測によって得られた真値及び VT の結果と比較した。VT の結果とは、上流・下流の境界条件として区間入口・出口で観測された累積台数を用いて、VT の計算で求

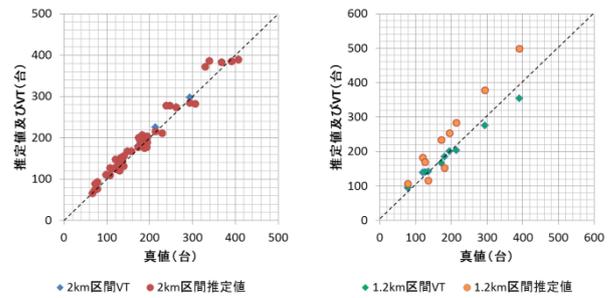


図-6 各交差点における2本のプローブ車両の間の交通台数比較

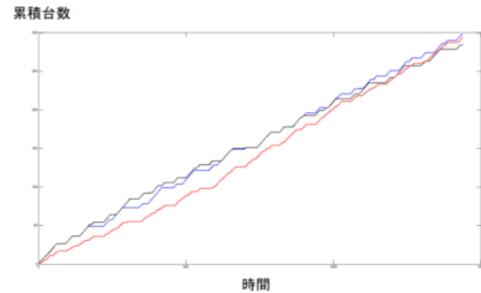


図-7 累積台数の比較（赤：真値、青：VT、黒：推定）

めた各交差点における2本のプローブ車両の間に存在する台数のことである。

各交差点において2本のプローブ車両の間に存在する車両台数を比較した結果を図-6に示す。図-6は横軸に真値、縦軸に推定値及びVTで求めた台数を取った図で、左が2km区間（相対誤差の平均8%）、右が1.2km区間（相対誤差の平均31%）である。 N の推定が良く当たった2km区間においては、各交差点における推定台数がVTの計算結果及び真値とほぼ一致しており、精度が良いことが分かった。この理由は2kmでは渋滞している交差点が多く、BWで台数が決まることが考えられる。

一方1.2km区間ではVTの計算結果は真値と近いが、推定台数は大きく外れている。この理由は、そもそも N の推定が外れていたことと、推定ではBWで台数が決まらなかったことが挙げられる。

なお、 N を用いることで図-7に示した一例のように、各交差点における累積曲線を求めることもできる。図-7を見ると、推定の追跡図はVTで求めた累積図とほぼ同じ曲線となっている。推定及びVTの累積図と、真値は途中でずれが生じているが、これは区間途中での流入・流出車両の存在が考えられる。

4. 感度分析

交通量推定にはFDの値の設定が大きく推定結果に影響すると考えられる。そこで、FDの値を変えたときに推定結果がどうなるかの感度分析を行う。検

表- 1 自由流領域における感度分析

	Fundamental Diagramの変更値			誤差(台/時)	VTの累積との比較
	q	k	v		
変更なし	1600	160	30	124	ずれは大きい
①qとv減	1500	160	25	356	ずれは大きい
②qとv増	1650	160	33	44	ずれは小さい
③v減(k増)	1600	171	25	344	ずれは大きい
④v増(k減)	1600	155	33	60	ずれは小さい

証を行うのは駒沢通りにおけるデータで、自由流領域と渋滞流領域における感度分析を分けて行う。感度分析においては、FDの形状を決定する以下の要因、飽和交通量 q 、飽和交通密度 k 、FW速度 v 、BW速度 w の関係から、1つのパラメータを変えると連動して別のパラメータの値が変化することに留意して、パラメータを設定し、分析を行った。

(1) 自由流領域における感度分析結果

自由流領域ではFWの影響で累積台数が決まるので、FW速度の値を変化させた分析を行う。表-1にはFDで変更した値、 N の推定結果の真値との誤差、累積曲線にした時にVTで求めた累積曲線とのずれについて示している。ずれについては、推定とVTのそれぞれの累積台数の変化の傾向が同じであるか、全く異なるかによって、ずれが小さいもしくは大きいとしている。

感度分析結果より、自由流領域においては、 N の推定精度と累積図の推定精度に相関がみられ、 N の誤差が大きければ累積台数のずれも大きく、 N の誤差が小さければ累積台数のずれは小さくなっている。特にFW速度を大きくした②と④のケースでは初めに仮定していたFW速度で推定を行った時よりも精度がよくなっている。自由流領域のため、仮定していたFW速度よりも実際のFW速度が大きかったことが原因で、推定精度が向上したと考えられる。よってそれとは逆のを行った①と③のケースは推定精度が悪くなっている。

(2) 渋滞流領域における感度分析結果

渋滞流領域においてはFDの特に飽和交通量とBW速度が影響すると考えられるので、これらの値を変化させて行う。表-2に示している項目は4(1)と同様である。

感度分析結果より、渋滞流領域においては N の推定精度と累積図の推定精度に相関はなさそうだとと言える。これは累積台数 N の推定誤差が小さい④のケースでも累積図は少しVTとずれる結果になっているが、累積台数 N の推定精度の悪い⑤のケースで累積図は一致する結果となっていることから言えると考えられる。まず④や⑥のケースでは、BW速度を大きくすることにより、渋滞が後ろに届きやすくなるために、BW速度が小さい時よりも渋滞する計算

表- 2 渋滞流領域における感度分析

	Fundamental Diagramの変更値			誤差(台/時)	VTの累積との比較
	q	k	w		
変更なし	1600	160	15	-39	全て一致
①q(k)減	1400	140	15	51	全て一致
②q(k)増	1800	180	15	-131	上流交差点ではずれる
③w減(k増)	1600	213	10	-111	上流交差点ではずれる
④w増(k減)	1600	133	20	8	全て少しずれる
⑤qとw減	1200	160	10	128	全て一致
⑥qとw増	1920	160	20	-133	全てずれる

結果となる。そのために累積図のずれが生じることが考えられる。また、VTの累積図と全て一致した①や⑤のケースはFDの値を全て小さい値に変更したケースである。値を小さくしたことによりBWの影響によって決まる領域が大きくなったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、2台のプローブ車両軌跡データを用いることで、その間に存在する車両数を推定する手法を提案した。検証結果から、交通量の推定が確実に可能であること、交通状態による推定精度の変化を明らかにした。加えてFDの各パラメータを変化させた時に推定精度がどのように変化するか感度分析も行い、FDの適切な設定が必要であることが分かった。これらの結果は、センサーインフラが十分でないアジア諸都市においてもプローブ車両データを用いることで交通の量的把握ができる可能性を示唆している。本研究で提案した手法のアジア諸都市への適用は、発表会において報告する予定である。

参考文献

- 1) B. Mehran, M. Kuwahara, F. Naznin : Implementing Kinematic Wave Theory to Reconstruct Vehicle Trajectories from Fixed and Probe Sensor Data, 19th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.247-268, 2011.
- 2) Z. Sun and X. Ban : Vehicle Trajectory Reconstruction for Signalized Intersections Using Variational Formulation of Kinematic Waves, Transportation Research Board 90th Annual Meeting, 2011.
- 3) 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫: 車間距離を計測するプローブカーを前提とした交通状態の推定手法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 69, No. 5, pp.I_809-I_818, 2013.
- 4) Newell, G.F. : A Simplified Theory on Kinematic Wave in Highway Traffic, Part I: General Theory, Transportation Research ,Part B, Vol. 27(4), pp.281-287,1993a.
- 5) Newell, G.F. : A Simplified Theory on Kinematic Wave in Highway Traffic, Part II: Queuing at Freeway bottlenecks, Transportation Research ,Part B, Vol. 27 (4), pp.289-303,1993b.

- 6) Newell, G.F. : A Simplified Theory on Kinematic Wave in Highway Traffic, Part III: Multi-Destination Flows, Transportation Research, Part B, Vol. 27 (4), pp.305-313,1993c. Well-Posedness, Duality and Applications, American Institute of Mathematical Sciences, Vol.1, No.4, pp.601-619, 2006.
- 7) C.F. Daganzo : On the Variational Theory of Traffic Flow: (2014. 8. 1 受付)

Traffic Volume Estimation Using Probe Vehicle Trajectory
Keiko KOBAYASHI, Kentaro WADA and Masao KUWAHARA