

プローブデータと車両感知器データを融合活用した都市間高速道路における交通状態の推定

桑原 雅夫¹・大畑 長²・瀧川 翼³・阿部公一⁴・今井 武⁵

¹正会員 東北大学教授 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3-09)
E-mail:kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学研究員 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3-09)
E-mail: ohhata-ta@plan.civil.tohoku.ac.jp

³学生会員 東北大学 情報科学研究科 修士課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3-09)
E-mail: takigawa@plan.civil.tohoku.ac.jp

³非会員 NEXCO東日本 東北支社 (〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央3-2-1)
E-mail: k.abe.ac@e-nexco.co.jp

³非会員 本田技研工業 (〒351-0188 埼玉県和光市本町8-1)
E-mail: takeshi_a_imai@hm.honda.co.jp

本研究は、プローブデータと車両感知器データを融合して、都市間高速道路を走行する全車両の走行軌跡を推定し、手法の適用性を検証したものである。少数ではあるがプローブ情報を活用することで、車両感知器が設置されていない区間における交通状態をどの程度推定できるのかは、これからのインフラヘビーでない交通管理に有用な課題である。本手法は、Kinematic Wave理論に基づく方法で、解法としてVariational Theoryを用いた方法と交通シミュレーションによる方法の2種類を検討した。東北自動車道上りの約60km区間のお盆渋滞に適用したところ、Variational Theoryによる結果と交通シミュレーションによる結果はよい整合を見せていた。また、筆者らが提案した対象区間の途中からの出入り交通を考慮した計算も行ったが、あまり精度の改善は見られなかった。

Key Words : vehicle trajectory, kinematic wave, variational theory, probe vehicle, traffic detector

1. はじめに

近年、プローブ車両データや携帯・スマホデータなど、個人発の移動情報が収集できるようになってきた。これらは、すべての移動体の情報を計測することができないサンプル情報であるが、1移動体の連続する移動記録を計測することができるという点で、路側に設置されている車両感知器や画像センサーから得られるデータとは質が異なっている。

従来から最もよく活用されてきた車両感知器データは、設置位置を通過する全車両のデータを計測できるが、設置されていない場所の情報は得られない。したがって、プローブデータによって車両感知器の設置されていない区間の情報を補完することができれば、時間的・空間的に連続する交通状態のモニタリングができる可能性がある。さらに、費用がかかるインフラセンサー類を減らしても、必要な交通のモニタリングができる可能性もあり、異なるデータを融合解析することは、これからの交通管理に有用な検討課題である。

本稿では、東北自動車道上りの白石ICから本宮ICまでの約60km区間を対象に、プローブ車両データと数地点設置されている車両感知器データの融合解析を行い、その有用性を検証するものである。

2. 推計手法の概要

本手法は、対象区間の上流端から流入する車両台数をそこに設置されている車両感知器データから収集し、それらをKinematic Wave理論に基づいて下流側に流していく方法である。一般の交通シミュレーションなどの解析と大きく異なる点は、以下の2点である：

- ①下流側への車の移動は、計測されている何台かのプローブ車両の軌跡と整合するように移動させること
 - ②対象区間の下流端に設置されている車両感知器から得られる通過台数と、整合するように移動させること
- すなわち、プローブ車両の軌跡が制約条件になるので、Kinematic Wave理論に沿って車両を移動させたとしても、プローブ車両を追い越すことはできない。また、下流端

に早く到着しても、下流端の車両感知器から自分の流出順番が来るまで、区間から出ることはできないという制約を付けて移動させる。

(1) Variational Theoryによる方法

このような制約条件付きの車両移動の計算方法としては、Daganzo(2005a,b)が、Variational Theoryという手法の提案を行っており、高速道路だけでなく信号交差点がある一般街路にも適用できる効率的な計算手法であるので、これを利用する。また、この手法の改良版として、筆者らは対象区間の途中から車両が入り出す場合の軌跡推定法を提案しているため、それも適用して区間内のICからの出入り交通の考慮も行うこととする。

本手法の入力データは、次の3種類である：

- ① 対象区間の入り口(上流端)と出口(下流端)における全車両の通過時刻。上下流端に設置されている車両感知器データを用いて通過時刻を設定する。
- ② 区間を走行するプローブ車両の走行軌跡データ
- ③ 対象区間のFundamental Diagram (交通流率-交通密度の関係) 本研究では、Forward Wave速度(自由流速度)とBackward Wave速度を一定とした三角形の関係を仮定する。

また出力は、時間軸と空間軸からなるタイム・スペースダイアグラムに累積台数の軸を加えた3次元空間上の車両の累積高さがアウトプットされる(図1参照)。特定の車両の累積高さは変わらないので、累積高さのコンターラインを引けば車両の軌跡が求められる。

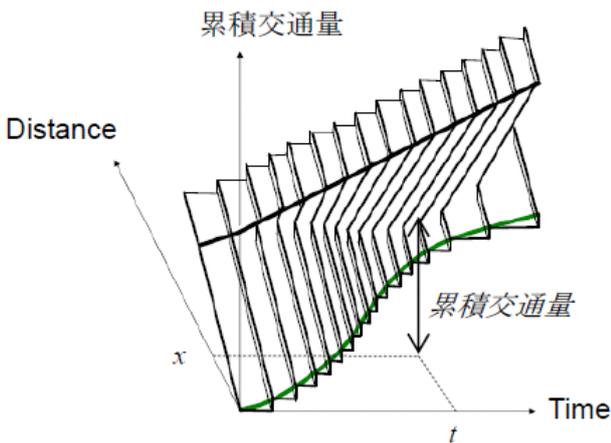


図1 3次元の交通流の表現(Newell 1993)

(2) 交通シミュレーションによる方法

基本的にVariational Theoryは効率的な計算を行う手法であって、車両移動の基本はFundamental Diagramに従ったKinematic Wave理論に沿ったものである。したがって、Variational Theoryによらなくても、Kinematic Wave理論に

基づいた交通シミュレーションでも車両の移動を表現できる。

本研究では、先述のように区間上流端から車両感知器の観測に従って車両を発生させ、それらをFundamental Diagramから求められる車間距離(S)と速度(V)の関係を使って移動させる。すなわち、ある時点の車間距離(S)から速度(V)を算定し、その速度でスキャンインターバル間に進むことができる距離だけ車両を移動させるというロジックである。ただし、プローブ車両の軌跡が制約条件になるので、観測されているプローブ車両の軌跡は固定してそれにS-V関係で追従するものとする。さらに、下流端では車両感知器のデータから下流端を通過する時刻が決まっており、個々の車は先頭車から順番に決められた流出時刻に流出するという制約を受ける。そのため、車両が下流端に早く到達しても、その流出時刻にならないと流出できないというロジックを追加している。

3. 適用区間とデータ

図2のように対象区間は東北自動車道上りの白石ICから本宮IC間の64kmであり、2012年8月14日の10:00から19:00のお盆渋滞を対象とした。

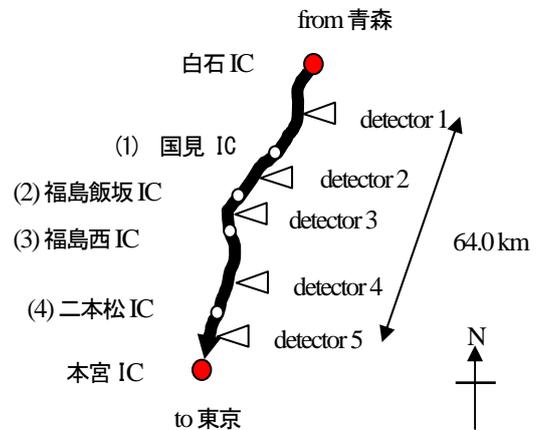


図2 東北自動車道上りの対象区間

入力データは、図3に示すように、次の2種類である：

- ① IC間に設置されている5分間集計の感知器データ
- ② 太線で示している5本のプローブ軌跡(プローブデータとしては27の軌跡が観測されているが、入力として用いるのは、そのうちの5本とし、その他の軌跡は推定軌跡の検証に用いる。)

プローブ軌跡は、6秒間隔で位置を計測したものをを用いた。また、車両感知器データは5分間集計のため、各5分間で車両が一樣に到着したと仮定して対象区間の入り口と出口の通過時間を算定した。対象区間途中にある4つのICでの出入り交通量についても、同様に5分間ごとの

一様分布を仮定して算出した。各ICの感知器データでは、感知器を通過した車両が本線の上り方面に行くのか、件方面に行くのか判別できないので、流入量と流出量の差分しかわからない。

なお、本研究では、プローブ軌跡と次のプローブ軌跡に挟まれる領域の車両の交通量保存則を満足させるために、区間に流入した車両の台数に区間途中の出入り台数を差し引きした台数が、区間から流出する台数と整合するように、流出台数を増減させている。たとえば、途中出入りを考慮しないケースでは、Probe 1が流入してから次のProbe 2が流入するまでの時間に区間入口を通過した車両の台数と同じ台数をProbe 1とProbe 2が流出する間の時間に流出させるように、流出台数を修正している。また、途中出入りを考慮するケースでは、途中の出入り台数を差し引きしたうえで、流出台数を修正している。交通量保存則の満足のさせ方は、このほかにも途中出入り台数を調整するなどあるが、今回は対象区間からの流出台数で調整を行った。

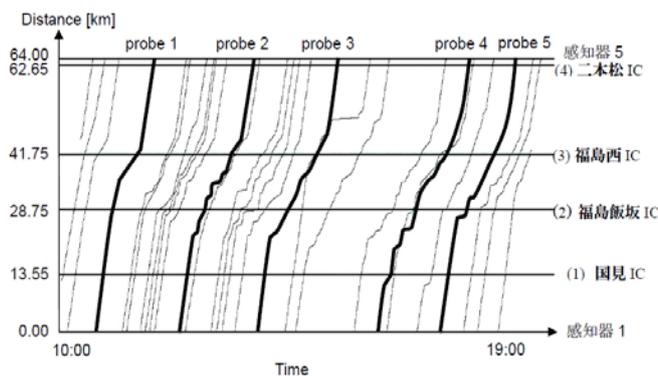


図3 対象区間のプローブ軌跡と感知器, IC位置

また、Fundamental Diagramについては、Forward Wave Speed, Backward Wave Speedが一定値を取る三角形の分布系を仮定し、表1のように設定した。

表1 Fundamental Diagramの形状パラメータ

パラメータ	値
Forward wave speed (km/h)	32.4
Saturation flow rate (veh/h)	1750
Jam density (Veh/km)	165

4. 適用結果

(1) Variational Theoryによる方法

図4は1つのプローブ軌跡のみを使った推定結果であり、図5は5つのプローブ軌跡すべてを使って推定した結果を表している。これらは、いずれも区間途中での車両出入りを考慮していない結果である。5つのプローブ軌跡を使

った場合の方が、渋滞の最後の時間における渋滞長の推定結果がよく、約2時間に1台のプローブ車両軌跡を使った今回の例であっても、かなり精度よく渋滞状況を再現できることが分かった。

さらに本推定手法は、近未来の交通状況も予測することができる。たとえば図4の破線が現在時刻であった場合、そこから引いたForward Wave Speed (u) と Backward Wave Speed (w) で囲まれる部分 (ABC) は、現在時刻以降に区間に流入あるいは流出した車両の影響を受けない領域であるので、ABC部分は将来の交通状況ではあるが、現在までの情報で予測ができる領域となる。したがって、現在時刻に区間に流入する車両に対して、その車がいつ、どこで渋滞列に入るのかを情報提供することができるという予測能力を持つ。

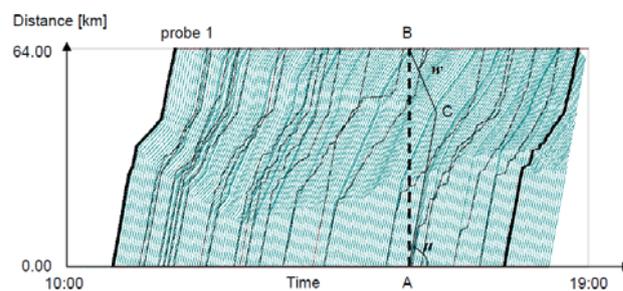


図4 1つの軌跡参照+途中流入考慮無し推定結果

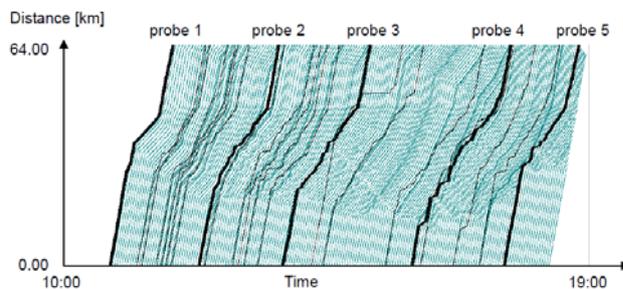


図5 5つの軌跡参照+途中流入考慮無し推定結果

図6は、5つのプローブ軌跡を用い、さらに区間途中の4つのICにおける車両出入りを考慮した推定結果である。区間途中の出入りを考慮した方が推定結果が改善されると期待したが、それほど改善は見られなかった。

また、図中のProbe 4の軌跡前後にみられるように、車両軌跡の不連続ができてしまうという課題が見受けられた。基本的には、複数のプローブ軌跡を参照しながら推定する場合には、プローブ軌跡の前後での推定軌跡の不連続が起こってしまうが、渋滞、非渋滞領域といったマクロ的な交通状態の推定については、大きな問題ではないと考えている。

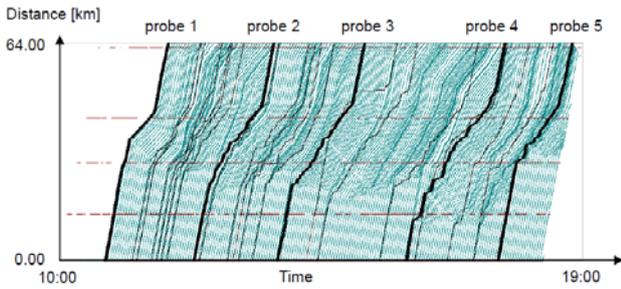


図6 5つの軌跡参照+途中流入考慮有りの推定結果

図7は、以上3種類の推定結果をまとめたものである。図7では、参照していないプローブ軌跡と同じ時刻に区間に流入した推定軌跡が当該プローブ軌跡と各位置における通過時刻にどの程度の差があったのかを表したものである。よって、図7の縦軸は、このように求めた非参照プローブ軌跡と推定軌跡の通過時刻の RMS 誤差を表している。これによれば、「5つの軌跡参照+途中流入考慮無し」の結果が最も精度良く、次に「5つの軌跡参照+途中流入考慮有り」、最後に「1つの軌跡参照+途中流入考慮無し」の順番になった。途中流入を考慮しても推定結果が改善されなかった理由として考えられることは、プローブ軌跡自体にすでに途中流入車両の影響が含まれているので、加えて途中流入を考慮しても改善効果があまりなかったものと考えられる。

また、図7には破線が示されているが、これらは交通量保存則を満たすための流出台数の修正を行わなかったケースを示している。明らかに、交通量保存則を満たすような流出台数の修正を行った方が推定精度がよいことがわかる。

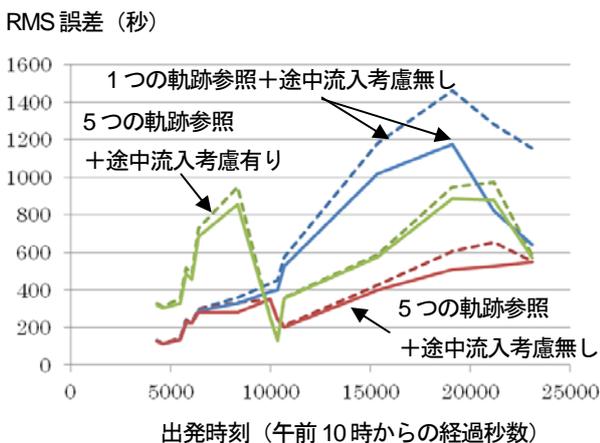


図7 3種類の推定結果のRMS誤差 (Variational Theoryによる推定)

(2) 交通シミュレーションによる方法

図8, 9, 10, 11は、交通シミュレーションを用いて推定した結果であり、Variational Theoryによる推定結果を示した図4, 5, 6, 7に対応した図である。先述のように、Variational Theoryも交通シミュレーションもKinematic Wave理論に基づき、同じFundamental Diagramを使っているため、基本的に同じ推定結果が得られるべきものである。ただし、数値計算におけるVariational Theoryのスキャンインターバルは10秒、交通シミュレーションでは1秒を使っているため、その分の差が出てしまうことになる。これらの図を見ると、スキャンインターバルによる多少の差はみられるものの、同じ傾向が得られた。

交通シミュレーションによる方法の一つの特徴は、図9, 10に見られるように、参照プローブ軌跡の前に車両がない空白領域ができることである。この理由は、

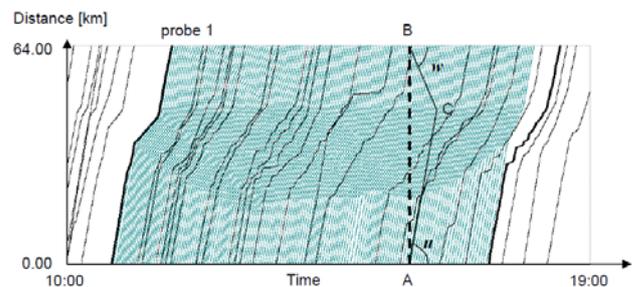


図8 1つの軌跡参照+途中流入考慮無しの推定結果 (交通シミュレーションによる推定)

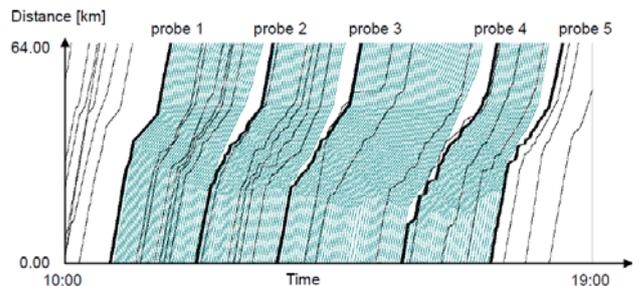


図9 5つの軌跡参照+途中流入考慮無しの推定結果 (交通シミュレーションによる推定)

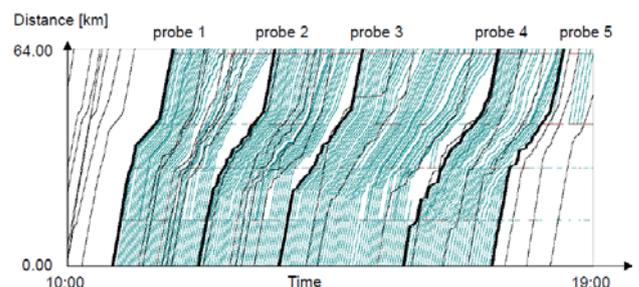


図10 5つの軌跡参照+途中流入考慮有りの推定結果 (交通シミュレーションによる推定)

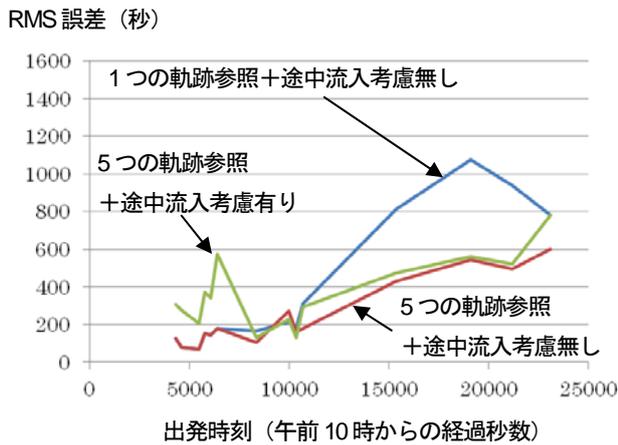


図11 3種類の推定結果のRMS誤差
(交通シミュレーションによる推定)

一般車両(参照プローブ以外の車両)は、その前者に追従して走行するが、参照プローブはあらかじめ観測された軌跡に沿って走行するためである。空白の領域ができるケースとしては2つ考えられ、1つは参照プローブの前車との車間距離が大きく空いてしまう場合である。もう1つは、参照プローブが前者を追い越してしまう場合である。前者を追い越してしまう場合は、後続車は参照プローブの軌跡に追従するので、その前者の軌跡は後続車の軌跡推定には無関係となるために、参照プローブの前者を消しているためである。Fundamental Diagramのパラメータの調整、すなわち道路区間の特性だけでなく運転者個人の特性、車種特性なども考慮したパラメータ調整が、うまくいけばこのような空白領域はなくなるはずであるが、完璧なパラメータ調整は難しいと思われる。しかしながら、渋滞長や旅行時間の変化といったマクロ的な交通状態の推定には、厳密なパラメータ調整は必要ないと思われる。

5. まとめと今後の課題

本研究は、プローブデータと車両感知器データを融合して、都市間高速道路を走行する全車両の走行軌跡を推

定し、手法の適用性を検証したものである。本手法は、Kinematic Wave理論に基づく方法で、解法としてVariational Theoryを用いた方法と交通シミュレーションによる方法の2種類を検討した。東北自動車道上りの約60km区間のお盆渋滞に適用したところ、両手法とも観測されているプローブ軌跡と良い整合を見せていた。

今後の課題としては、以下があげられる：

1. 大型車、小型車などの車種を考慮すること
2. 対象区間の一部分しか走行しないプローブ軌跡を活用する方法を検討すること
3. Fundamental Diagramなどのパラメータ調整の方法

参考文献

- 1) Babak Mehran and Masao Kuwahara (2011) Fusion of Probe, Passing Time and Signal Timing Data to Estimate Vehicle Trajectories on Urban Arterials, 交通工学, Vol.46 (No.1), 77-89
- 2) Daganzo, C. F. (2005a). A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions. *Transportation Research Part B*, 39, 187-196.
- 3) Daganzo, C. F. (2005b). A variational formulation of kinematic waves: Solution methods. *Transportation Research Part B*, 39, 934-950.
- 4) Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves. I: Flood movement in long rivers II: A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of Royal Society*, A229, 281-345.
- 5) Mehran, B., Kuwahara, M., & Naznin, F. (2012). Implementing kinematic wave theory to reconstruct vehicle trajectories from fixed and probe sensor data. *Transportation Research Part C*, 20(1), 144-163.
- 6) Newell, G. F. (1993). A simplified theory on kinematic wave in highway traffic, part I: General theory. *Transportation Research Part B*, 27(4), 281-287.

Estimating Running Vehicle Trajectories on an Intercity Motorway based on Data Fusion of Probe and Detector Data

Masao KUWAHARA, Takeshi OHATA, Tsubasa TAKIGAWA,
Koichi ABE and Takeshi IMAI

This study proposes a data fusion technique to estimate trajectories of all running vehicles on an intercity motorway based on probe vehicle data and conventional traffic detector data. Although probe vehicle data are getting popular, their rich information on vehicle trajectories have not been fully utilized but mostly reduced travel time information have been used. The objective of this research is therefore to examine a data fusion framework to reconstruct vehicle trajectories by combining conventional traffic detectors with probe vehicle data based on the kinematic wave theory and implements the solution by the variational theory proposed by Daganzo and also by a constrained traffic simulation model.