

プローブデータを含む多様なセンシングデータを融合した面的な車両軌跡の推定

小林 桂子¹・桑原 雅夫²

¹ 学生非会員 東北大学大学院 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:k-kobayashi@plan.civil.tohoku.ac.jp

² 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 6-3-09)

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

本研究では筆者らが単路区間で提案した車両軌跡推定手法を面的に展開する。道路ネットワークは面的に広がっており、例えば信号制御でも面的な制御が実施されているため、面的な車両軌跡を推定する必要がある。本研究では、まず軌跡推定の効率的な計算手法である Variational Theory を用いて、面的な車両軌跡を推定する際に、境界条件として必要となる各区間への車両の流入・流出時刻を信号現示と関連付けて推定する手法を提案し、実測データを用いた検証を行った。また、推定時刻に誤差がある際の推定軌跡への影響を理論的に考察した。

Key Words : Vehicle trajectory, Kinematic Wave Theory, Variational Theory, Data fusion, Probe data

1. 研究背景と目的

車両軌跡を推定することにより、推定軌跡を用いて信号制御やエネルギー消費量推計、旅行時間推定、遅れ時間の評価など多様な方面に利用することができる。交通流の解析手法である Kinematic Wave 理論に基づき、Daganzo¹⁾は車両軌跡を推定するための効率的な計算手法である Variational Theory による手法を考案した。更に Variational Theory で考慮されていなかった対象区間途中からの車両の流入・流出を考慮し、センサーデータ、プローブデータ、信号現示データを融合した単路区間における車両軌跡推定手法の研究が Mehran ら²⁾によって行われた。しかし、これらの研究は全て単路区間で考えられている。

そこで本研究では単路区間で確立している軌跡推定手法を面的に展開することを目的とする。具体的には、単路区間の軌跡推定手法を面的に展開するために必要となる全ての区間への車両の流入及び流出時刻を、一般的にリンク上流に設置されている車両感知器から求められるかどうか検証する。更に、全ての区間への車両の流入・流出時刻を求める際に発生した誤差が推定軌跡にどのような影響を及ぼすか、感度分析を行う。

2. Daganzo¹⁾による Variational Theory

Variational Theory では図-1 のように time-space diagram 上に線形近似した Fundamental Diagram の三角形を張り巡らせたネットワークを用いて計算する。

計算において必要となる情報は、区間内の信号現示データとプローブデータと軌跡を求めたい区間の入口と出口における車両の通過時刻である。三角形の頂点をノードとし、区間入口及び出口のノードに車両の通過時刻を累積台数にして値を与える。そして、境界のノードから Forward Wave や Backward Wave に沿って全てのノードの累積台数を求め、同じ累積台数のノードを結んだ線が車両軌跡となる。

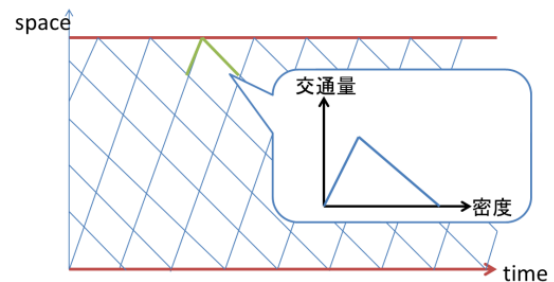


図-1 Variational Theory 概念図

3. 車両の流入・流出時刻推定手法と検証

Variational Theory を用いて、面的に車両軌跡を推定するためには、境界条件として、全ての区間への車両の流入・流出時刻が必要となる。そこで、図-2のように一般的にリンク上流に設置されている車両感知器を使って求める手法を提案する。ここでは、一区間を交差点から次の交差点までの間としている。

(1) 流入・流出時刻推定手法及び検討課題

図-2のように各リンクの上流に車両感知器が設置されている区間で考えると、流入時刻は1の車両感知器より計測できる。流出時刻は、直進車は2の車両感知器、左折車は3の車両感知器、右折車は4の車両感知器を通過することから得られる。右折専用現示があれば、今述べたように車両感知器から流出時刻を得ることができる。しかし、右折専用現示がない場合、図-2の4の車両感知器のように右左折先の車両感知器では2つの方向からの車両を計測するため、右左折車の判断方法が検討課題となる。

(2) 右左折車の挙動検証と検討課題の解決策

右折専用現示がない東京国際フォーラム西交差点のビデオ観測により、実際の右左折車の挙動を把握し、解決策の提案と検証を行った。ビデオ観測により得たデータは2009年6月19日8時22分から8時50分の13サイクルで、そのうち代表的な1サイクルについて右左折車の挙動を示したのが図-3である。流出時刻とは図-2で示した区間出口を出た時刻で、右左折先の車両感知器は図-2における4の車両感知器にあたる。対向直進車の存在は図-2における5の車両感知器から分かる。図-3において、1台目の右折車を見ると、右折車は十分な車頭間隔がある時に右折をすることが分かった。左折車は、歩行者がいなければ左折できるため、対向直進車の影響はない。よって対向直進が飽和交通流状態であれば、右左折先の車両感知器を通過した車両は左折車だと言える。対向直進の飽和交通流状態が終了した後は右折も左折も可能になるので、その時の判断は以下の式を用いる。

$$(\text{区間入口の車両感知器計測時刻}) + (\text{区間の旅行時間}) + (\text{対向直進の飽和交通流状態終了後の右左折別交差点通過所要時間}) \div (\text{右左折先の車両感知器計測時刻})$$

この式が右折先か左折先かどちらかで成立すれば、その方向に進んだ車両だと判断できる。右左折先どちらでも成立する場合は、同時刻の対向直進車の有無を考えて、対向直進車がない場合は、上式の左辺と右辺の早い順に対応させる。

以上の考察をまとめると、右左折車は図-4の手順で判断できると考えられる。

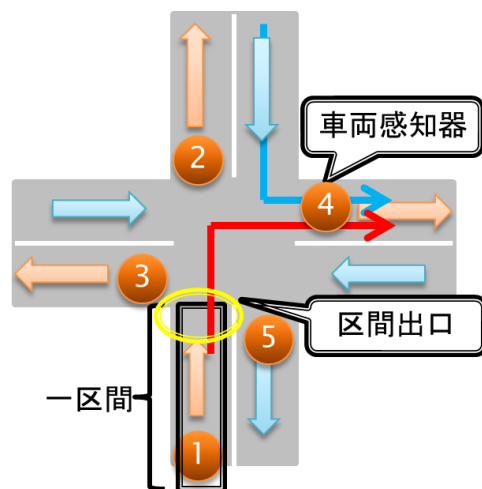


図-2 交差点及び車両感知器設置場所

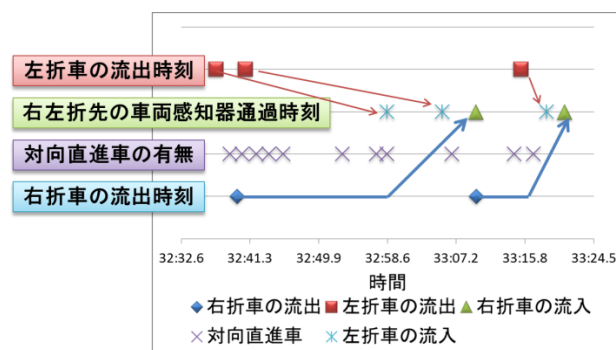


図-3 右折専用現示がない場合の右左折車の挙動

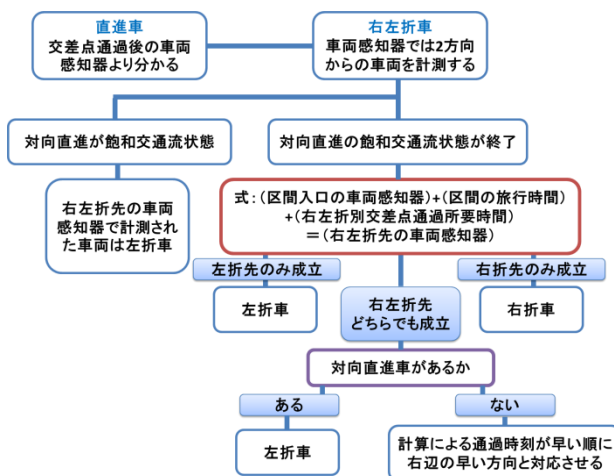


図-4 右折専用現示がない場合の右左折車判断手順

(3) 実測データを用いた検証

(2)で挙げた判断基準の検証を(2)で用いたデータを利用して行った。その結果が表-1である。ここでは(2)で挙げた式の左辺を計算通過時刻と呼ぶ。また表-1にある計算通過時刻と車両感知器通過時刻の差を番号1の車両から順に表示したのが図-5である。

計算通過時刻と実際の車両感知器通過時刻との差は平均で6.3秒、最大で23.5秒であった。また、例えば表-1の22番と23番の車両は、計算通過時刻で考えると流出順は22番、23番の順であるが実際は車両感知器を23番、22番の順で通過していた。よって提案した手順を用いても、計算通過時刻が数秒しか異ならない右折車と左折車がある場合は、そこで右左折車の誤判断が発生し得る。今回は対向直進車の飽和交通流状態終了後に右左折した52台のうち46台は正確に判断でき、6台は右左折を誤って判断した。すなわち正答率は88.5%であった。右左折車の誤判断は、実際の流出時刻とは異なる時刻をその車両の流出時刻とすることに繋がり、流出時刻に誤差が生じる要因となる。

4. 流出時刻誤差による推定軌跡への影響分析

第3章で生じた右左折車の誤判断、すなわち実際の流出時刻とは異なる時刻をその車両の流出時刻とした場合の推定軌跡への影響を理論的に考察し、データを用いて検証を行う。

(1) 誤差による推定軌跡への影響

流出時刻が実際と異なるということは、Variational Theoryの境界条件である区間出口における累積台数の値に違いが出るということである。Variational Theoryに基づく、図-6のようにある点Pの累積台数は境界上の点Aもしくは点Bどちらかからの最短経路で決まり、例えば図-6の赤線部のように点Aからの最短経路で累積台数が決まる点の集合が存在する。しかし点Qは誤差のない境界条件から累積台数が決まるため誤差の影響を受けない。よって点Aの累積台数が実際と異なる時、その影響を受ける点は、点Aからの最短経路によって累積台数が決まる集合だけであり、その集合の前後で軌跡が多少変化する。

(2) 誤差がある場合の軌跡推定の検証

a) 検証使用データ

検証使用データは東京都世田谷区の駒沢通りのAVIデータ、信号現示データ、対象区間で観測されたプローブデータを用いた。ここは片側1車線道路で、上流のAVI1と下流のAVI2の間の距離は約

1.12km、区間途中には6つの信号交差点がある。データは2006年9月1日のものである。今回の検証では朝のピーク時である8時40分から9時10分のデータで軌跡を推定した。プローブデータは1秒間隔で集められたデータで、この時間帯においては13台分のプローブデータが得られている。6つの信号交差点のうちAVI1から数えて3つ目の信号交差点のみ、信号現示データがない。Variational Theoryの境界条件として用いるプローブデータは、8時46分44秒にAVI1を通過し、8時56分01秒にAVI2を通過した。

表-1 実測データを用いた右左折車判断の検証

番号	観測車両	計算通過時刻	実際の車両感知器通過時刻	誤った推定通過時刻	計算通過時刻と車両感知器通過時刻の差
1	左折車	24分00.7秒	24分22.5秒		21.8秒
2	左折車	24分06.1秒	24分25.9秒	24分24.6秒	18.4秒
3	右折車	24分23.9秒	24分24.6秒	24分25.9秒	2.0秒
...					
20	右折車	32分46.2秒	33分09.6秒	対向直進車がいたため誤判断は生じない	23.5秒
21	左折車	32分45.6秒	33分05.4秒		19.9秒
22	右折車	33分16.2秒	33分20.8秒	33分18.6秒	2.4秒
23	左折車	33分20.2秒	33分18.6秒	33分20.8秒	0.6秒
...					
50	左折車	45分57.9秒	46分11.1秒		13.2秒
51	左折車	46分09.3秒	46分14.5秒		5.3秒
52	左折車	48分16.8秒	48分16.0秒		0.8秒

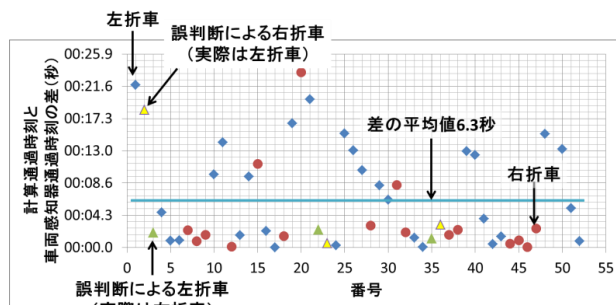


図-5 実測データを用いた右左折車判断の誤差

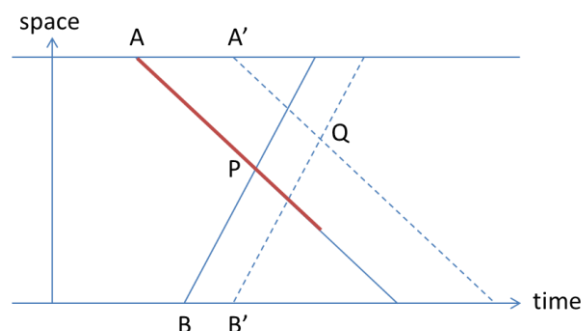


図-6 点Pの高さの決まり方

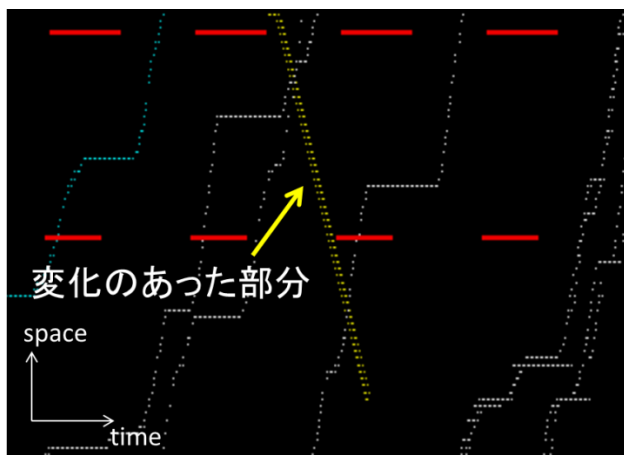


図-7 誤差により累積台数に変化のあった場所（拡大図）

b) 推定時刻の誤差による影響の検証方法

AVI1 と AVI2 のデータとプローブデータ及び信号現示データを入力して、Variational Theory を用いて全ての点の累積台数を求める。誤差による軌跡への影響を調べるため、実際のデータすなわち誤差がないデータと誤差があるデータの2つのデータを用いる。誤差があるデータとしては、実際は 8 時 57 分 26 秒に AVI2 を通過していた車両の通過時刻を 8 時 57 分 36 秒に 10 秒間変更したデータを用いた。実際のデータで求めた全ての点の累積台数と、誤差を持たせた場合の全ての点の累積台数を比較し、累積台数の値に変化のあった部分を描写する。

c) 検証結果

誤差がある場合とない場合の累積台数を比較した結果が、図-7 である。黄色い線で示されている部分が、誤差のあるデータと実際のデータを比較して、累積台数の変化があった場所である。図-7 より、累積台数を変化させた点からの最短経路で累積台数が決まる点まで全て累積台数が変化している。これらのことから、(1)で考察した通り、誤差により累積台数の変化が生じる集合が Backward Wave に沿って求まることが分かった。

5. まとめ

本研究では、単路区間で確立している軌跡推定手法を面的に展開するための手法と、その時に発生する誤差の感度分析を行った。

軌跡推定のための効率的な計算方法である Variational Theory を用いて、面的に軌跡を推定するためには、全ての車両の区間への流入・流出時刻が必要であった。そこで、右折専用現時がある場合とない場合の2つの場合に分けて、リンク上流に設置

されている車両感知器を用いて、全ての車両の区間への流入・流出時刻を求める手法を提案し、実測データに基づいて検証した。ビデオ観測の結果から、右折専用現時がある場合は、提案した手法で、流入・流出時刻を求めることができた。右折専用現時がない場合は、直進車の流入・流出時刻は求まり、右左折車については、区間入口の車両感知器データや区間の旅行時間なども用いて考えることで、ほぼ求められるが、右左折車の誤判断が生じる場合もある。また、右折専用現時がある場合もない場合も、交差点を通過するのに要する時刻を適切に設定し、その時刻を車両感知器通過時刻から引き算することで、流出時刻を求める。

提案手法においても車両のリンク流出時刻に推定誤差はあるので、流出時刻に誤差がある場合の感度分析を行った。感度分析では、流出時刻に誤差があることにより、正しい流出時刻を用いて軌跡を推定した場合と比べて、一部軌跡が異なることが、理論的にも実証的にも証明された。影響の及ぶ範囲については、誤差の生じる地点が分かれば理論的に求まることも分かった。

以上の研究から、単路区間で確立している軌跡推定手法を面的に展開するために、車両感知器データ、プローブデータ、信号現示データを用いて境界条件を求める手法を提案した。そして、Variational Theory を用いて軌跡を推定する際に、境界条件が異なるために生じる変化を明らかにした。

参考文献

- 1) C. F. Daganzo : On the Variational Theory of Traffic Flow: Well-Posedness, Duality and Applications, *American Institute of Mathematical Sciences*, Vol.1, No.4, pp.601-619, 2006.
- 2) 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.

(2012. 5. 7 受付)