

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656302

研究課題名(和文)交通事故発生要因の解明に向けた個別車両データに基づく走行軌跡推定に関する研究

研究課題名(英文) A Study of Vehicle Trajectory Estimation Using Microscopic Traffic Data for Understanding Cause of Accidents

研究代表者

宇野 伸宏 (UNO, NOBUHIRO)

京都大学・経営学研究科・准教授

研究者番号：80232883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では車両感知器などによる交通データを用いて、高速道路上の交通状態の時空間変動を可能な限り記述・再現する方法論を開発し、それを用いて交通事故発生前後の交通状況を把握することを目的とする。具体的には、次の2課題について取り組んできた。1) 広く普及しているループコイル式の車両感知器より得られる車両通過時のパルスデータを用いて、異なる2地点間を通過する車両をマッチングする手法を構築した。2) フィードバック法である拡張カルマン・フィルタと、マクロ交通シミュレーションであるブロック密度法を組み合わせることでフィードバック型交通状態推定手法を構築し、事故発生状況分析への適用性についても確認した。

研究成果の概要(英文)：This study is aimed at developing a methodology to estimate the spatial and temporal change in traffic state using the existing traffic data obtained by conventional detectors, so as to grasp traffic condition before and after occurrence in accident. The following subjects have been conducted. 1) We develop a methodology to match vehicular pulse data of the same vehicle obtained by traffic detectors located at different sections along intercity expressway. 2) This study also develops a feed-back type estimation method of traffic condition, which is composed of extended Kalman filter and macroscopic traffic simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木計画学・交通工学

キーワード：交通工学 交通事故 ITS 車両マッチング 交通状態推定 シミュレーション 車両感知器 カルマンフィルタ

1. 研究開始当初の背景

高速道路が我が国においても社会経済活動を支える動脈の役割を果たしていることは自明である。この重要な社会インフラの円滑性、効率性、安全性を一層高める上で、道路ネットワーク上に出現する交通状態を把握することは必要不可欠といえる。特に交通事故予防のためには、事故発生前後の交通状況を詳細に把握し、それに基づき適切な対策を立案実施することが求められる。

一方、高速道路上に広く設置されている車両感知器は時間的には連続的に交通状況を把握可能であるが、空間の面では感知器の設置個所および近傍の状況の把握ができるのみであり、道路上のあらゆる場所で起きうる事故に対応した形で、交通状況を把握するためには、非観測部分を観測データおよびシミュレーション技法等を統合的に利用して推測することが必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、定常的に収集される車両感知器などによる交通データを用いて、高速道路上の交通状態の時空間変動を可能な限り記述・再現する方法論を開発し、それを用いて交通事故発生前後の交通状況を把握することを目的とする。具体的には、次の2課題について取り組む。1) 広く普及しているループコイル式の車両感知器より得られる車両通過時のパルスデータを用いて、異なる2地点間を通過する車両をマッチングする手法を構築する。2) フィードバック法である拡張カルマン・フィルタと、マクロ交通シミュレーションであるブロック密度法を組み合わせることでフィードバック型交通状態推定手法を構築し、事故発生状況分析への適用性についても確認する。前者については、車両マッチングの結果、2地点間の旅行時間の計測が可能となるとともに、マッチング精度が相当程度確保されれば、車両マッチングの失敗により、突発事象の発生を検知できる可能性がある。

3. 研究の方法

3.1 パルス情報による車両マッチング手法

(1) アルゴリズムの構築

本研究では、2つのパターンを対応づけるDPマッチングを応用したマッチングアルゴリズムを構築する。DPマッチングとは、動的計画法を採用したアルゴリズムであり、2つの1次元パターン  $X = x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_l$ 、 $Y = y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_j$  における、 $X$ の第*i*要素  $x_i$  と、 $Y$ の第*j*要素  $y_j$  との対応付け  $j = u_i (i = 1, \dots, l)$  を最適化する問題である。この要素間の対応付けコストを

$$d_i(u_i) = \|x_i - y_{u_i}\| \quad (1)$$

とすると、最適化問題は次のように定式化される。

$$\min F = \sum_{i=1}^l d_i(u_i) \quad (2)$$

本研究では、コスト  $d_i(u_i)$  として、上流と下流の車両の車長差を適用し、このコストが最小となる経路を求めることにより、両地点を通過した車両が対応づけられる。図1はDPマッチングで求められる経路の例を示したものである。

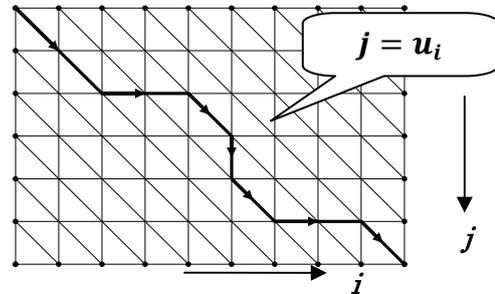


図1 DP マッチング

本研究では車線変更を考慮したマッチングアルゴリズムを構築する。図2は図1の一部を抜き出してきたものである。まず、①の経路は上流の車両Bと下流の車両Cがマッチングすることを示す。この場合車両BとD、CとEがマッチングされる。次に②の経路は、車両Bが車線変更し、下流で観測されないケースを示す。この場合、車両Cと車両Dがマッチングし、車両Bに対応する車両がないために、②の経路を選択する。逆に③の経路は車両Dが車線変更で車両Bの前方へ流入してきたケースを示す。この場合は車両BとEがマッチングするために③の経路を選択する。なお、本研究のデータでは、下流の車両が車線変更したか否かを特定することは困難であるため、本研究では車両Dが車線変更することを、車両Bの前方へ車間流入すると言い換え、上流の車両に関する車線変更・車間流入を特定する。

本研究では、車長差のコストに加えて、車線変更車両に対して②の経路を選択しやすくする車線変更コスト *OUT*、車間流入車両に対して③の経路を選択しやすくする車間流入コスト *IN*、全車両に対して②、③の経路を選択しやすくする車線維持コスト *KEEP* を導入することで車線変更を考慮する。

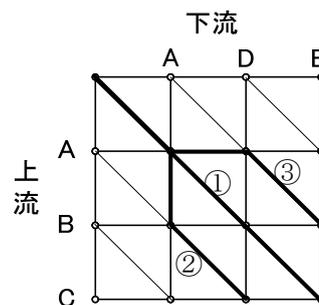


図2 DP マッチングにおける車線変更

(2) 利用データの概要

本研究では、名神高速道路下り線高槻バス停付近の 2 つの車両感知器から取得された、交通流パルスデータを用いる。なお、マッチング教師データ、車線変更データを作成するため、2011年5月24日にビデオ撮影を行い、車両軌跡を抽出した。以下では、ビデオ撮影を行った時間帯のうち、車線変更が自由に起こる 1 時間分のデータを対象として分析を行う。

(3) 車線変更モデルの構築

各車両の車線変更および車間流入を推定するモデルとして、本研究ではロジットモデルを適用する。第 1 走行車線、追越車線については、車線変更、車線維持の 2 項選択モデル、第 2 走行車線については、第 1 走行車線への車線変更、追越車線への車線変更、車線維持の 3 項選択モデルとする。

その結果、車線変更確率および車間流入確率が 60%以上と推定された車両の 7 割以上が車線変更・車間流入していることが確認された。そこで本研究では、車線変更確率・車間流入確率が 60%以上となる車両を車線変更車両および車間流入車両、それ以外を車線維持車両として車両マッチングを行う。

3.2 フィードバック型交通状態推定手法

本研究では、2 つめの課題に対応するため、フィードバック法である拡張カルマン・フィルタとブロック密度法を組み合わせることでフィードバック型交通状態推定手法を構築する。その概要を図 3 に示す。ブロックごとに勾配を設定し、KV 関係の形を変化させること、ブロック長を以下の式で表すように設定することによって勾配の影響を考慮する。つまり、各ブロックで決定される自由流走行速度の中で最速の値を用いてブロック長を決定する。

$$dL = \max_{1 \leq i \leq N} (V_{f,i} * dt) \quad (3)$$

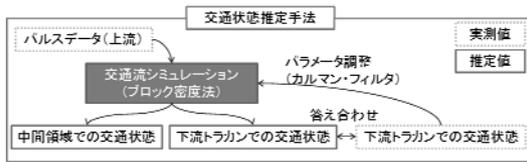


図 3 交通状態推定手法の概要

カルマン・フィルタは次の様に定式化される。

$$x_{t+1} = A_t x_t + B_t u_t + w_t \quad (4)$$

$$y_t = H x_t + v_t \quad (5)$$

$$\hat{x}_t = \bar{x}_t + K_G (y_t - H \bar{x}_t) \quad (6)$$

式(4)は状態変数の漸化式であり、式(5)は観測方程式と呼ばれ、観測値と状態変数の関係を表したものである。式(6)は式(4)によって推定された  $\bar{x}_t$  に観測値  $z_t$  と推定された観測値  $H \bar{x}_t$  との差にカルマン・ゲイン  $K_G$  を乗じたものを足すことによってカルマン・フィルタによる最終的な推定値は算出される

ことを示している。カルマン・ゲイン  $K_G$  は推定値と真値との誤差を最小化するように決める。カルマン・フィルタを交通流モデルと組み合わせると以下のように概要が示される。

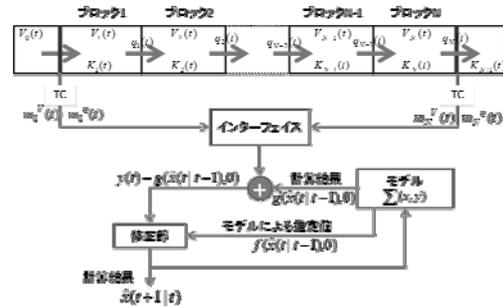


図 4 交通状態推定手法の計算スキーム

交通流モデルにおいて、状態変数はパラメータを含む観測されない状態変数と観測された境界条件をインプット  $(u(t))$  とすることができる。この時、以下のように状態空間方程式が設定される。

$$x(t+1) = f[x(t), u(t), \xi(t)] \quad (7)$$

インプット変数  $u$  と観測変数  $y$  の分け方で以下の計算スキームに分けられ、本研究では、最上流への流入量も推定値とする。

セル内の変数は交通密度  $K_i$ 、空間平均速度  $V_i$  であり、境界条件は最上流への流入量  $q_0$ 、最上流の速度  $V_1$  と最下流からの流出量  $q_{N+1}$ 、最下流の速度  $V_N$  である。観測変数は  $m_N^q, m_N^v, m_0^v, m_0^q$  とし、それぞれ最下流の流出量、最下流の走行速度、最上流の走行速度、最上流への流入量を示している。

計算スキーム インプット変数なし、勾配影響を表すパラメータも調整

$$x = [K_1, V_1, \dots, K_N, V_N, q_0, V_f, K_c, \alpha, \beta]$$

$$y = [m_N^q, m_N^v, m_0^v]$$

最上流への流入量は以下の式で漸化式を与える。

$$q_0(t+1) = q_0(t) + \xi_0^q(t) \quad (8)$$

4. 研究成果

4.1 パルス情報による車両マッチング手法  
(1) 車両マッチングアルゴリズムの検証

3.1(1)で説明した車両マッチングアルゴリズムを実データに適用し、アルゴリズムの精度検証を行う。検証にあたっては、車長差のみをコストとした場合(車長のみ)、車線変更車両が正確に特定された場合(真値車線変更)、3.1(3)で車線変更車両と推定されたものを用いた場合(推定車線変更)の3つのケースについて比較を行う。また、マッチング精度の評価値としては正解率(マッチング真値数のうち正しくマッチングされた車両数の割合)、旅行時間計測精度の評価値としては RMS 誤差(秒単位)を用いる。なお、1時間分のデータを45分の教師データと15分の検証データに区切り、前者を用いて車線変

更車両・車間流入車両およびマッチング正解率が最大となる車線変更に関するコストのパラメータを推定した。以下、15分の検証データに対して検証を行う。

各ケースの正解率およびRMS誤差を表1に示す。

表1 マッチング正解率・RMS誤差

		第1走行	第2走行	追越
真値数		543	908	852
車長のみ	正解率	60.2%	41.0%	32.6%
	RMS誤差[s]	11.1	7.9	20.2
車線変更真値	正解率	63.2%	54.7%	47.5%
	RMS誤差[s]	8.4	5.9	9.2
車線変更推定	正解率	60.8%	46.5%	39.0%
	RMS誤差[s]	8.7	6.0	13.6

表より、車長のみと比較して、車線変更を考慮したほうが、真値・推定値を問わずマッチング精度・旅行時間計測精度が向上していることがわかる。特に、第2走行車線と追越車線で大きく向上している。また、RMS誤差について車線変更真値と車線変更推定値を比較すると、第2走行車線では正解率の差ほど大きな差がないものの、第1走行車線、追越車線では、明確な差があることがわかる。以上より、車線変更を考慮した場合のほうが、車両マッチング精度、旅行時間計測精度ともに向上することが示唆された。

さらに、パラメータの移転性を確認するために、ビデオ撮影を行った日のうち、パラメータ推定に用いたものとは交通状況の異なる夕方時間帯を対象に、同様の車両マッチングアルゴリズムを適用する。表2に正解率およびRMS誤差を示す。

表より、真値車線変更では、全車線で車長のみと比較して精度が向上していることがわかる。特に、追越車線での精度向上が顕著である。また、推定車線変更では、追越車線を除いて、精度が低下していることがわかる。これは車線変更車両を必ずしも正確に特定できていないことに起因すると考えられる。

表2 異なる交通状況での正解率・RMS誤差

		第1走行	第2走行	追越
真値数		200	355	505
車長のみ	正解率	60.5%	44.8%	37.0%
	RMS誤差[s]	10.0	6.4	9.4
真値車線変更	正解率	65.0%	53.2%	69.1%
	RMS誤差[s]	8.0	6.2	2.7
推定車線変更	正解率	56.5%	43.1%	56.0%
	RMS誤差[s]	9.7	7.7	2.5

## (2) まとめ

本研究では、車線変更を考慮した車両マッチングアルゴリズムを構築し、車線変更車両が正確に特定できれば、マッチング精度、旅行時間計測精度ともに向上することを示した。モデルで推定された車線変更車両を用いた場合でも、交通状況によっては精度が向上することが示唆された。

## 4.2 フィードバック型交通状態推定手法

### (1) 道路線形による影響分析

この章では、自由流走行速度やKV直線の傾きが道路線形に影響を受けるかどうか分析する。用いるデータは名神高速道路西宮～八日市、京滋バイパス全線の3年間の車両感知器データである。全72地点の車両感知器について、自由流走行速度とKVの傾きを自由流のKV関係より直線回帰を行うことより決定したが、交通量の少ない地点では、KVの傾きが正值をとるため、これらの地点のデータは次の影響分析には用いないこととする。このように決定された各地点の自由流走行速度、KV直線の傾きをそれらの地点の勾配、有効曲率、分合流までの距離を説明変数に重回帰分析を行った結果を表3、表4に示す。この結果より、道路勾配の影響を加味することとする。

表3 自由流走行速度の重回帰分析結果

モデル概要・分散分析				
R2乗値	0.154			
修正済みR2乗	0.129			
F値	6.118			
有意確率	0.004 ***			
係数				
	係数	標準誤差	t値	有意確率
(定数項)	92.91	1.078	86.220	< 2e-16 ***
勾配	-88.19	39.23	-2.248	0.028 **
分合流までの距離	0.001816	0.0006309	2.878	0.005 ***
Signif. codes: 0 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1				

表4 回帰直線の傾きの重回帰分析結果

モデル概要・分散分析				
R2乗値	0.155			
修正済みR2乗	0.130			
F値	6.141			
有意確率	0.004 ***			
係数				
	係数	標準誤差	t値	有意確率
(定数項)	-819.5	77.48	-10.576	0.000 ***
有効曲率	308500	98950	3.118	0.003 ***
分合流までの距離	-0.05732	0.03921	-1.462	0.148
Signif. codes: 0 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1				

### (2) 事故発生状況分析への適用の検証

事故発生時の速度・密度のコンター図を作成することで、5分集計車両感知器より空間的・時間的に細かい交通状態を把握することが可能であることを示した。



図5 交通状態推定手法による速度コンター

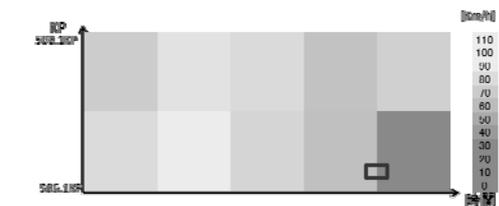


図6 5分集計データによる速度コンター

図 5 より事故が発生（図中の矩形で表記）後に交通渋滞が発生している様子が見られるが、図 6 より事故と渋滞の時間的な前後関係が把握できない。このことより、より細かい事故発生状況の把握が可能であり、事故発生状況分析に有用であることが分かる。

さらに事故発生前後における交通状態パラメータの変動を把握した。その結果、自由流走行速度、KV の傾き、勾配影響パラメータにおいては事故発生前後においてパラメータの変化が大きく表れる事が分かった。

### (3) まとめ

本研究では道路勾配を考慮したフィードバック型の交通状態推定手法の構築を行い、事故発生状況分析への適用性について検討を行った。その結果、追突事故分析、インシデント検知への本手法適用の有用性は示された。しかしながら、扱った事故件数が少なかったため、今後適用事例を増やしつつ、検証の精度を高めることが必要と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 7 件）

1) 塩見康博, 谷口知己, 宇野伸宏, 嶋本寛 : 個別車両データを用いた単路部ボトルネックにおける速度変動予測と車線変更誘導による渋滞抑止効果の検証. 高速道路と自動車, Vol. 56, No. 3, pp. 30 - 40, 2013 年 3 月.

2) Shiomi, Y., Ogawa, T., Uno, N. and Shimamoto, H., Vehicle Re-Identification for Travel Time Measurement Based on Loop Detectors Considering Lane Changes. The proceedings of TRB 91th annual meeting, Jan., 2013.

3) 小川喬之, 塩見康博, 宇野伸宏, 嶋本寛 : 車線変更を考慮した車両マッチング手法に基づく旅行時間計測. 第 11 回 ITS シンポジウム Peer-Review Proceedings, pp. 7 - 12, 2012 年 12 月.

4) V. L. Knoop, S. P. Hoogendoorn, Y. Shiomi and C. Buisson: Quantifying the Number of Lane Changes in Traffic An empirical analysis. Journal of Transportation Research Board, No. 2278, pp. 31 - 41, Nov., 2012.

5) 飛ヶ谷明人, 宇野伸宏, 嶋本寛, 中村俊之 : “阪神高速道路における交通障害発生時の交通量変動に関する研究”, 第 33 回交通工学研究発表会論文報告集, 287-294, 2013. 09

6) 多田昌裕, 飯田克弘, 倉内文孝, 平岡敏洋, 金澤文彦, 有馬伸広, “運転者挙動解析に基づく ITS 合流支援追突防止情報提供サービスの効果検証”, 土木学会論文誌 D3, Vol. 63, No. 1, pp. 1-11, 2013. 02

7) Shiomi, Y., Uno, N., Shimamoto, H., Kurauchi, F., Yamamoto, K., Tago, K. and Tsuchihashi, Y., “Study on Drivers’ Comprehension of Advanced Graphical Route Information Panel Considering Individual Attributes”, International Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, Issue 2, pp65-75, DOI 10. 1007/s 13177 -013-0057-9, 2013. 5

〔学会発表〕（計 2 件）

1) 谷口知己, 塩見康博, 宇野伸宏, 嶋本寛, 中村俊之 : 車線交通量の均衡メカニズムを生体化した単路部多車線交通流モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol. 48, CD-ROM, 2013 年 11 月.

2) 藤井大地, 塩見康博, 宇野伸宏, 嶋本寛, 中村俊之 : “フィードバック型交通状態推定手法の事故発生状況分析への適用可能性”, 土木計画学研究・講演集, Vol. 47, CD-ROM, 2013 年 6 月.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp/its/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宇野 伸宏 (UNO NOBUHIRO)

京都大学・大学院経営管理研究部・准教授  
研究者番号：8 0 2 3 2 8 8 3

### (2) 研究分担者

倉内 文孝 (KURAUCHI FUMITAKA)

岐阜大学・工学部・教授  
研究者番号：1 0 2 6 3 1 0 4

嶋本 寛 (SHIMAMOTO HIROSHI)

宮崎大学・工学部・准教授  
研究者番号：9 0 4 6 4 3 0 4

塩見 康博 (SHIOMI YASUHIRO)

研究者番号：4 0 4 2 2 9 9 3