

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15107

研究課題名（和文）センシングデータと交通流理論の融合による実社会ネットワークの交通状態推定技術開発

研究課題名（英文）Development of traffic state estimation technology of real world network by fusion of sensing data and traffic flow theory

研究代表者

川崎 洋輔（KAWASAKI, Yosuke）

日本大学・工学部・講師

研究者番号：90751793

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、センシングデータと交通流理論の融合により、実社会のネットワークの交通状態を推定する手法の開発を目的とする。

交通管制では、ネットワーク情報を収集し、交通状態をモニタリングした上で、交通制御や情報提供を行うことが重要である。これまでの研究では、単路部（一次元）における交通状態推定は行われていたが、面的に広がるネットワークの交通状態推定は行われていなかった。よって、ドライバーの経路選択行動を考慮した交通流モデルとセンシングデータを組み合わせてネットワーク交通流を表現するモデルを開発した。実社会のネットワークを対象にモデル検証した結果、精度良く状態推定していることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来の単路区間（一次元）の交通状態推定手法を二次元ネットワークに拡張し、経路選択率と整合的な交通状態とモデルパラメータを同時に推定するものであり、学術的新規性が高く、今後のネットワークワイドな交通状態推定の学術的な発展に貢献している。

また、日常的な渋滞の把握に加えて、事故・災害やオリンピック等の事前にパラメータ学習が困難な非日常時の交通状態推定にも応用可能であり、多様な場面での交通マネジメントに貢献できるので、社会的な有用性も高いと考える。

研究成果の概要（英文）：This research proposes to develop a method for estimating traffic state in real-world networks by fusing sensing data and traffic flow theory.

In traffic control, it is important to collect information on the network and provide traffic control and information based on the results of monitoring traffic conditions. Previous studies have estimated the traffic condition in a single road section (one-dimensional), but have not estimated the traffic condition in an areal network. Therefore, we developed a model that represents network traffic flow by combining a traffic flow model that takes into account drivers' route selection behavior and sensing data. The model was validated on a real-world network, and the results showed that the model accurately estimated the state of the network.

研究分野：交通工学

キーワード：交通状態推定 交通流理論 経路選択 データ同化 プローブデータ 車両感知器

1. 研究開始当初の背景

交通管制では、ネットワークの交通状態を把握した上で、交通制御・情報提供する必要がある。交通状態把握のセンシングデータは、古くから車両感知器データが活用されている。最近では、大量のプロープデータ(e.g. カーナビのGPS)が収集・蓄積されている。センシングデータは、スペースかつ観測誤差(e.g. GPSエラー)がある。よって、観測誤差を考慮し、未観測箇所の交通状態をモデルで推定する必要がある。そのため、応募者は、プロープデータと交通流モデルを活用した状態空間モデルを定式化し、リアルタイムにネットワークの交通状態を推定する理論を構築してきた。ここで、交通流モデルとは、Fundamental diagram (FD)と呼ばれる交通量と車両密度との関係に従って車両を動かすモデルの総称である。状態空間モデルとは、センシングデータにより、シミュレーションモデルの推定結果の改善を図るモデルである。今後は、この理論を社会実装する必要があるが、以下の問題がある：

- ネットワークの交通状態推定精度が、経路選択モデルに完全に依存
- 大規模ネットワークへのモデル適用時に計算負荷の増加

よって、本研究では、上記問題を解決するための手法構築を試みる。なお、状態空間モデルを活用し、交通状態推定を試みた研究は、多数存在する。これらの研究は主に高速道路(単路部)を対象としており、ネットワークを対象としている研究は非常に少ない。その理由は、主に“ドライバーの経路選択行動”および“センシングデータと経路選択モデルの関係”をモデル化する必要があり、モデル構築が困難なためと推察される。

2. 研究の目的

本研究では、センシングデータと交通流理論を融合し、リアルタイムに実社会のネットワーク(大規模ネットワーク)の交通状態を推定する手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実社会の経路選択行動のモデル化

ドライバーの経路選択行動をモデル化し、交通流モデルに組み込む。この場合、経路選択行動の精度は、モデル内容に依存し、交通ダイナミクスを表現しきれない。そこで、経路選択モデルの確率誤差を考慮し、交通ダイナミクスを表現する。そのために、経路選択行動を組み込んだ交通流モデルを状態空間モデルに拡張することで、経路選択モデルや観測の誤差を考慮する。

(2) 計算負荷の軽減方法の開発

実社会の大規模ネットワークへのモデル適用時には、計算負荷が増加する。そこで、状態空間モデルのアウトプットである事後分布の算定(フィルタリング)を効率的に行うアルゴリズムを構築する。また、多様なセンシングデータを使用することで、部分的なOD(Origin-Destination)情報を観測し、時事刻々と変化するODおよび交通状態を推定する。

(3) 実社会ネットワークを対象としたモデル検証

(1)(2)で構築したモデルをアクセスコントロールされた自専道と信号交差点のある一般道の混在したネットワークで検証する。検証箇所は、地方都市を想定している。

4. 研究成果

(1) 状態空間モデルの構築

まず、ネットワークの仮定を述べる。ネットワークは有方向リンクとリンクの結節点であるノードで構成される。それぞれのリンクは、長さ Δx のセルに分割される。セルのインデックスを $i = 1, 2, \dots, C$ とする。それぞれのセルの交通状態は、区分線形FDで表現される。セル i の区分線形FDを ϕ_i と表記する。 ϕ_i は以下の3つのパラメータを持つ。

$$\begin{aligned} v_i &= \text{forward wave speed of } \phi_i, \\ w_i &= \text{backward wave speed of } \phi_i, \\ q_i^{\max} &= \text{maximum flow of } \phi_i. \end{aligned}$$

次に、状態ベクトルを定義する。タイムステップを $t = 1, 2, \dots, T$ と表記する。車両の目的地のインデックスを $d = 1, 2, \dots, D$ と定義する。状態変数は、「 $k_i^d(t)$ =セルの目的地別の車両密度」と定義する。状態ベクトルは、全てのセルの目的地別の車両密度 $k_i^d(t)$ の集合ベクトルとして、 $K^D(t)$ と定義する。次にモデルに用いる観測値を定義する。観測値は、「 $\hat{k}_i(t)$ =セル i の車両密度」および「 $\hat{\pi}_{ij}(t)$ =セル i から j への分岐率」の2種類を定義する。上記、状態ベクトルと観測値を用いて、状態空間モデルを下式で定義する。

$$\begin{aligned}
k_i^d(t+1) &= f(K^D(t) + e(t)) \text{ for } \forall i, d, t, \\
\hat{k}_i(t) &= \sum_d k_i^d(t) + \omega(t)z, \\
\hat{\pi}_{ij}(t) &= g(K^D(t) + \gamma(t).
\end{aligned}$$

1つ目の式はシステムモデル, 2つ目, 3つ目の式は観測モデルである. 式中の $f(\cdot)$ はシステムモデルの関数であり, 経路選択モデルを組み込んだ交通流モデルである. $g(\cdot)$ は観測モデルの関数である. $e(t)$, $\omega(t)$, $\gamma(t)$ はシステムノイズと観測ノイズである. なお, 状態空間モデルの詳細は, 引用文献 を参照されたい.

(2)実規模ネットワーク適用のためのフィルタリング(事後分布の計算)手法の開発

前述の状態空間モデルは, システムモデルが非線形となっている. 非線形のモデルのフィルタリングは, 既に粒子フィルタという手法が提案されている. 粒子フィルタは, モンテカルロ近似により複雑な形状の確率分布を近似可能という特徴を持つ. 一方, 粒子フィルタは, 以下に述べる縮退の問題が指摘されている. 粒子フィルタは, 時間進展に伴い, 少数の粒子の重みだけ大きくなり, その他の多数の粒子の重みはほとんどゼロになってしまう. こうなると, 少数の粒子だけで確率分布を近似することとなり, 近似精度が極端に悪化する. この問題を縮退という. 粒子フィルタで縮退を抑制するためには, 大量の粒子を生成することが考えられるが, 計算量が急増してしまう. よって, 本研究では, 多様な粒子パターンを逐次, 生成することで, 縮退を抑制する融合粒子フィルタを用いた計算方法を構築した. 融合粒子フィルタを用いた状態空間モデルの詳細は, 引用文献 を参照されたい.

(3)モデル検証(平常時): 一般道も含めた地方都市ネットワーク

ネットワークは, 仙台市中心部の主要地方道以上の規格の道路(リンク数 2,002)を抽出したデータを用いた. ネットワークの真の交通状態は不明なため, 本研究では, シミュレーションで真値を生成した上で, その一部をモデルに用いて精度検証する双子実験を行った.

交通状態推定精度の検証結果を述べる. 図1に特定経路のタイム・スペース図を示す. 当該経路は, 信号機が7基設置された一般道である. 真値(シミュレーション)と状態空間モデルのタイムスペース図を比較すると, ボトルネック交差点の位置は一致しており, また, 概ね渋滞長も再現できていると思われる.

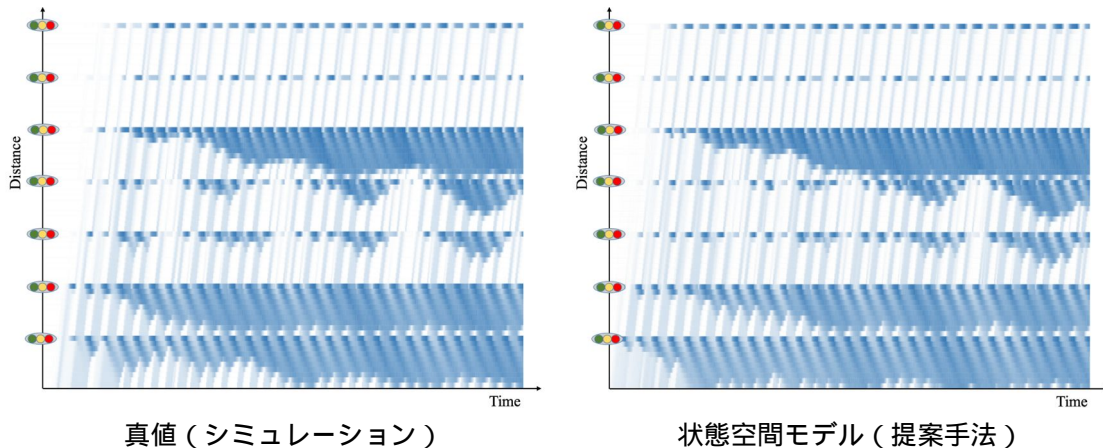


図1 交通状態の推定結果の検証: 図中の色味は速度を示し, 濃い色は速度が低い状況を表す

(4)モデル検証(事故時): 高速道路

事故発生時は, 事故車両の車線閉塞により, 交通流率が突発的に低下する. 前述したモデルは, 平常時のみを対象としているため, 事故時のネットワークにそのまま適用することができない. そのため, 当初予定していなかったが, 事故時の状態推定のモデル構築も本研究にておこなった. 具体には, モデルパラメータである交通流率を確率変数とし, 逐次, 観測されるセンシングデータを用いて交通流率を推定する状態空間モデルを構築した.

図2に首都高速道路を対象にした交通流率の推定結果を示す. 上段は, 交通流率の時間推移を示している. 黒線は, 状態空間モデルによる推定値であり, アンサンブル平均を意味する赤色はセンサーデータであり真値である. 下段は, 交通流率の時系列誤差である. これを見ると, 事故前後の交通流率の変化を精度

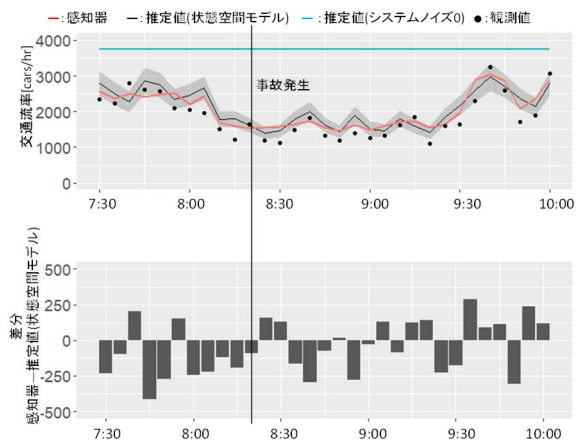


図2 交通流率の推定結果

良く追隨している状況が確認される。

また、同様に平常時の高速道路においても渋滞・非渋滞等の多様なパターンの交通流を対象にモデルの精度検証を行った。検証の結果、精度良く交通状態を推定できていることを確認した。

なお、上記の平常時および事故時のモデル内容および検証の詳細は、引用文献、を参照されたい。

< 引用文献 >

Kawasaki, Y., Hara, Y. and Kuwahara, M. : Real-Time Traffic State Estimation on a Two-dimensional Network by State Space Model, Transportation Research Part C: Emerging Technologies , Vol.113, pp.176-192, 2020

川崎洋輔, 梅田 祥吾, 桑原 雅夫, 田中淳, 大畑長, 熊倉大起, 南 航太, 鈴木 裕介 : 状態空間モデルによる事故発生時の交通流率の推定手法の構築, 土木学会論文集 D3, Vol.76, No.5, p. I_1297-I_1309, 2021.

川崎洋輔, 梅田 祥吾, 桑原 雅夫, 田中淳, 大畑長, 熊倉大起, 吉川真央, 鈴木 裕介 : 都市高速道路におけるプローブ軌跡データと車両感知器の融合による交通状態の推定および精度検証, 土木学会論文集 D3, Vol.77 , No.5, p. I_521-I_534 , 2022 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KAWASAKI Yosuke, UMEDA Shogo, KUWAHARA Masao, KUMAKURA Daiki, OHATA Takeshi, TANAKA Atsushi, YOSHIKAWA Mao, SUZUKI Yusuke	4. 巻 77
2. 論文標題 ESTIMATION AND ACCURACY VERIFICATION OF TRAFFIC STATE BY FUSION OF PROBE TRAJECTORY DATA AND VEHICLE DETECTOR ON METROPOLITAN EXPRESSWAY	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	6. 最初と最後の頁 I_521 ~ I_534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.77.5_I_521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawasaki Yosuke, Hara Yusuke, Kuwahara Masao	4. 巻 113
2. 論文標題 Traffic state estimation on a two-dimensional network by a state-space model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 176 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trc.2019.03.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KAWASAKI Yosuke, UMEDA Shogo, KUWAHARA Masao	4. 巻 9
2. 論文標題 DETECTION AND ANALYSIS OF DETOURS OF COMMERCIAL VEHICLES DURING HEAVY RAINS IN WESTERN JAPAN USING MACHINE LEARNING TECHNOLOGY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 8 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.9.1_8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawasaki Yosuke, Hara Yusuke, Kuwahara Masao	4. 巻 38
2. 論文標題 Traffic State Estimation on a Two-Dimensional Network by a State-Space Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transportation Research Procedia	6. 最初と最後の頁 299 ~ 319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trpro.2019.05.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 川崎洋輔, 梅田 祥吾, 桑原 雅夫, 田中淳, 大畑長, 熊倉大起, 南 航太, 鈴木 裕介
2. 発表標題 状態空間モデルによる事故発生時の交通流率の推定手法の構築
3. 学会等名 第61回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎洋輔, 梅田 祥吾, 桑原 雅夫, 田中淳, 大畑長, 熊倉大起, 吉川真央, 鈴木 裕介
2. 発表標題 首都高速道路におけるプローブ軌跡データと車両感知器の融合による交通状態の推定および精度検証
3. 学会等名 第62回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎洋輔, 佐津川功季, 梅田祥吾, 桑原雅夫
2. 発表標題 観光地における長期交通状態予測手法の提案
3. 学会等名 第18回ITSシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kawasaki Yosuke, Hara Yusuke, Kuwahara Masao
2. 発表標題 Traffic State Estimation on a Two-Dimensional Network by a State-Space Model
3. 学会等名 The 23rd International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT 23) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎洋輔、梅田祥吾、桑原雅夫
2. 発表標題 ブローブ軌跡データを用いた抜け道の検出
3. 学会等名 第17回ITSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawasaki Yosuke, Umeda Shogo, Kuwahara Masao
2. 発表標題 Detection and Analysis of Detours of Commercial Vehicles during Heavy Rain in Western Japan Using Machine Learning Technology
3. 学会等名 French-Japanese Seminar : Simulation of On-Ground Mobility in Critical Situations : Cognitive Models and Computerized Modeling (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関