

時空間解像度の高い低混入率のコネクティッドカー軌跡データによる 信号交差点の交通流率推定手法の予備的検証

Preliminary validation of traffic flow rate estimation at signalized intersections using high resolution connected vehicle trajectories with low penetration rate

瀬尾亨¹, 日下部貴彦², 塩見康博³, 大口敬⁴

Toru SEO¹, Takahiko KUSAKABE², Yasuhiro SHIOMI³, Takashi OGUCHI⁴

交差点の信号制御では、その方向別流入率や飽和流率などの値が重要な入力値となる。それらの値を効率よく入手するために、コネクティッドカー（プローブカー）による移動体観測が着目されている。特に、集計されていない高分解能の車両軌跡データは停止位置や衝撃波を直接検知できるため有用である一方、社会的な利用可能性は必ずしも高くない。本研究では、混入率が相対的に小さい（0.1-1%程度）軌跡データに基づき、交差点への平均流入率と飽和流率を推定する手法を構築し、実データに基づき構築した。提案手法の特徴は、少ないデータでも頑健な推定ができるように単純なものとなっている点である。検証の結果、現段階では検証用データが少ないため断定的な結論は得られないものの、真値に比較的近い推定値を得られた。

Keywords: コネクティッドカー, プローブカー, 信号交差点, 到着率, 飽和流率

1. はじめに

交差点の信号制御では、その方向別流入率や飽和流率などの値に基づき効率的な現示を決定する方法が様々な提案されている¹⁾。しかし、実際の制御ではデータの制約のためこれらの値は必ずしも実態に即したものはなっていない。その一因は、交通流を観測するための車両感知器の整備と維持に多大な費用と労力が必要である点である²⁾。

コネクティッドカー（Connected vehicle: CV）（いわゆるプローブカー；用語については補注*1を参照のこと）による移動体観測は、広範な範囲から自動的にデータを取得できるため、有用な観測手段として着目・利用されている。例えば、信号制御を念頭に置いた研究として、CVデータを集計した旅行時間情報などを活用する例がある^{2), 3)}。また、高分解能なCV軌跡データ（ドットデータなどとも呼ばれる）は、個別の車両の停止時刻・位置を特定できるため、CV集計データとは質的に全く異なる価値を持つ^{4), 5)}。その長所を利用し、車両感知器と組み合わせた詳細な交通状態推定手法⁶⁾や、CVと交通流モデルによる流率推定手法^{4), 7)-9)}が提案され、実務への適用¹⁰⁾もなされている。さらに、待ち行列長やCV混入率を推定する研究¹¹⁾⁻¹³⁾や、逆にFDを推定する例^{14), 15)}や信号制御情報を推定する例^{7), 16), 17)}もあ

る。これらも信号交差点流率推定と類似した問題を扱っている表裏一体のものと位置づけられる。

個別の車両を詳細に追跡できる高分解能なCV軌跡データは、個人情報保護の観点から必ずしも利用可能性が高いとはいえない。しかし、上述した詳細な交通流モデルに基づく推定手法はある程度高いCV混入率を前提としており、低混入率を前提とした研究は非常に少ない。そのような研究の例を挙げると、Feng et al.⁹⁾は、既存の手法は30%程度の混入率を前提しているのに対し、低混入率に特化した手法として混入率2%でも有効なオンライン制御手法を提案している。Day and Bullock¹⁸⁾は、混入率1%でのオフライン制御手法を提案し、複数日のデータを合わせれば混入率0.1%にも対応できる可能性を示唆した。

本研究の目的は、極低混入率（1%以下）のCV軌跡データに基づく信号交差点部の交通流を推定する手法の構築と、その実データによる検証である。提案手法は信号制御への応用を念頭に置いて構築するが、特定の制御手法に特化するのではなく、様々な制御手法に共通して必要となる変数、すなわち流入率や飽和流率をオフラインで推定するものとする。用いるデータはITS Connectシステム車車間通信メッセージ¹⁹⁾を用いて得たCV軌跡データで、極めて高い時空間分解能を持つ

1 正会員, 博士 (工学), 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-13 e-mail: seo.t.aa@m.titech.ac.jp Phone: 03-5734-2808

2 正会員, 博士 (工学), 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻

4 正会員, 博士 (工学), 立命館大学 理工学部 環境都市工学科

3 正会員, 博士 (工学), 東京大学 生産技術研究所

が、対応する車両数が限られているものである。本論文では、この CV を便宜的に「ITS Connect 搭載車両」と呼称する。ただし現在のところ、分析可能なデータはある 1 日の朝の 3 時間分と非常に少ないため、この検証はあくまで予備的な試算と位置づけられるものである。そのため、分析に当たっては、今後精査が必要な仮定なども置いており、今後さらなる検証が必要である点に留意されたい。

2. 方法

本節で、提案する推定手法を述べる。前述の通り、本手法は極めて少ない CV の軌跡から流率を推定する。そのため、既存手法でよく用いられる詳細な交通流モデルにより高時間分解能の状態を推定するアプローチではなく、単純な仮定に基づき時間帯別の平均状態を推定する頑健な手法とする。

2.1 仮定・前提条件

提案手法が用いる主な仮定と問題の前提条件を述べる。

交通流は三角形の流率密度関係（Fundamental Diagram: FD）の Kinematic Wave (KW) 理論²⁰⁾に従うとする。この FD のパラメータは自由流速度 u 、後進波速度 w 、渋滞密度 κ であり、 u と κ が既知であるとする。一般道では、 u は走行中の車両の平均値として、 κ は一般的な知見に基づき値を設定できる。

単独の孤立した信号交差点を仮定し、その一方のみ交通流に着目する。この方向への現示は青と赤のみであるとする。信号現示情報は既知であるとする。車両は全て直進し、右左折はしないとする。車線数は任意とするが、着目する区間内では一定であり、全ての車線が同じ交通状態にあるとする。

交通流は上流から一定流率でこの交差点に流入する。この流入率を a と表記する。そして、信号待ち行列に並んでいる車両は、青信号になった瞬間に飽和流率 q^* で発進する。また、この信号交差点は非過飽和であるとする。

全車両のうち一定の割合の車両がランダムに CV であるとする。CV 混入率は未知である。CV は、自車の連続的な車両軌跡を正確に報告するとする。

本分析で対象とする問題は、FD 変数の一部、信号現示情報、CV 軌跡が与えられたときに、 a と q^* を推定することである。

2.2 定式化

上記の仮定・前提条件のもとでの典型的な車両軌跡図を図 1a に示す。図を見ればわかる通り、CV が交差点待ち行列に並んだ場合、その停止時刻・位置と赤現示開始時刻・信号位置に基づき待ち行列延伸速度 ϕ が求められ、同じくその発進情報から後進波速度 w が求

められる。さらに、図 1b に示す通り、これらの波速度と FD を組み合わせると流入率 a と飽和流率 q^* が求まる。これが推定の基本原理である。

推定手法を定式化する。CV n の停止時刻と赤現示開始時刻との時間差を t_n^0 、停止位置と停止線との間の距離を x_n^0 、発進時刻と赤現示終了時刻との時間差を t_n^1 、発進位置と停止線との間の距離を x_n^1 とおく。このとき、一台の CV n から推定される ϕ_n と w_n は

$$\phi_n = \frac{x_n^0}{t_n^0} \quad (1)$$

$$w_n = \frac{x_n^1}{t_n^1} \quad (2)$$

となる。複数の CV から ϕ と w を推定する方法は様々なものが考えられる。簡便なものとして、 $(x_n^0, t_n^0), \forall n$ の分布を近似する直線を線形回帰で求めその傾きを ϕ とする、という方法があり、今回はこれを採用する。

次に、波速度から流率を推定する。これは図 1b の通り FD を用いて以下となる：

$$a = \frac{u\phi\kappa}{u + \phi} \quad (3)$$

$$q^* = \frac{uw\kappa}{u + w} \quad (4)$$

2.3 本手法の定性的性質

上記の仮定・前提は大なり小なり実際の交通状況と異なる。また、推定結果と実際の信号制御に用いられる入力値も厳密に対応しているわけではない。例えば、交差点が孤立していて「交通流は上流から一定流率でこの交差点に到着する」ことは実際にはあり得ず、特に都市部では上流の交差点の影響を受けて到着流率は大きく時間変動する。この問題を解決するためには、和田ら⁴⁾のように交差点間の交通流を明示的にモデル化し推定する必要があるが、そのような精緻な方法論は今回のように混入率が極めて低い CV 軌跡データを用いる場合には有効性に疑問がある。

本手法が推定するのは、「直進車両が並んでいる車線の流入率と飽和流率」のある種の平均である。車線構成によっては、車線毎の流入率が大きく異なったり、右左折待ちの車両が直進車両の走行を阻害し流出率が小さくなる場合がある。これは左直車線で特に顕著である。そのため、本手法の推定結果は（右折交通量が無視できるほど小さいとしても）断面交通量の計測対象とは異なるものである。解釈や検証の際には注意が必要である。また、今回は車線間の利用形態が同じであるという仮定を置いていたが、実際の交通がこの仮定に大きく反する場合には本手法は非直感的な挙動（例：実際の流率が小さいほど流率が大きく推定される）を示す。これは、流率が小さい車線からは CV 軌跡データが観測されにくく、流率が大きい車線のデータに大きく依存した推定結果が得られるためである。ただし、似

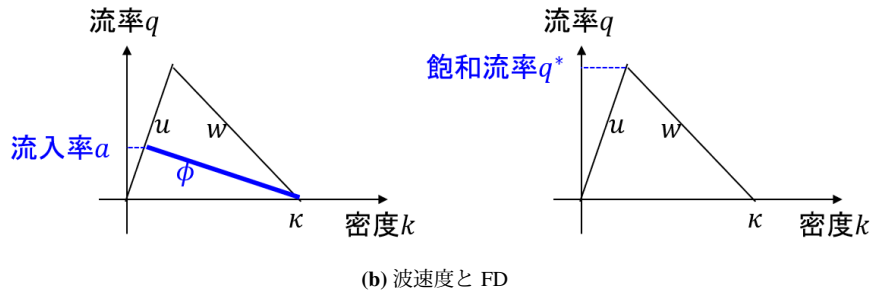
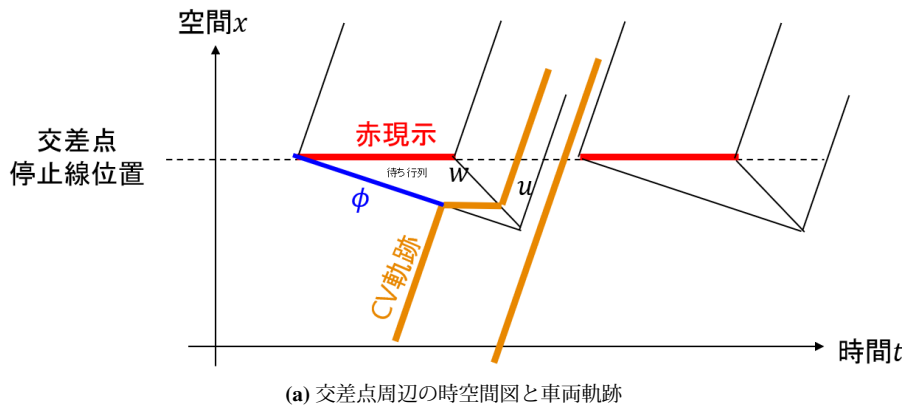


図 1: 推定手法の原理

たような問題は車両感知器により車線を区別しない断面交通量を測定して信号制御をする場合にも生じうる。

このように、この問題と実際の交通問題との対応関係は今後精査の必要がある。しかし、十分に長期間にわたり大量の CV 軌跡データを集め、この問題を解いて推定した結果は、仮定の齟齬が平均化されて実際の交通状況の平均のような結果になっていると期待される。そのような推定結果は、時間帯別定周期制御等の制御パラメータを定めるような目的には使える可能性がある。つまり、提案手法の想定されるユースケースは、「平日朝 8:00–8:30 の CV 軌跡データを 1 か月に渡り収集し、その平均到着率を推定し、次の 1 か月の当該時間帯の定周期制御のパラメータを決定する」といったものである。似たようなアプローチは、より高い混入率の CV 軌跡データに基づく信号制御手法で実際に利用されており¹⁰⁾、実務的にも有用な可能性がある。

3. 検証

3.1 分析対象

(1) 交差点

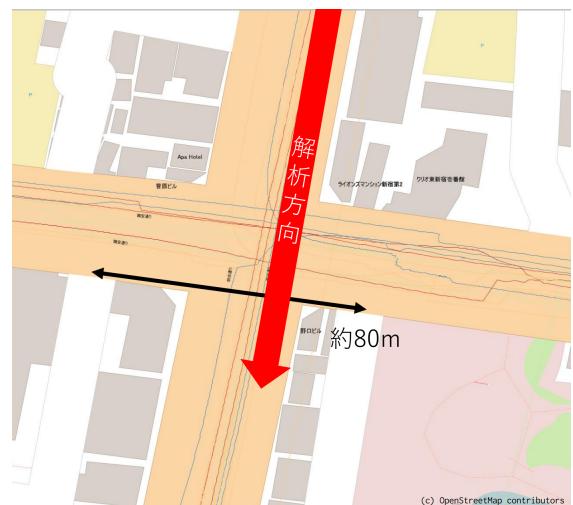
分析対象は新橋四丁目と新宿七丁目交差点とする。期間は 2021-09-27 (月曜日) の 09:00–12:00 の 3 時間とする。当該交差点周辺の地図と、そこを走行する全 CV (今回の分析対象以外も含む) の軌跡を図 2 に示す。

解析方向の車線構成は、路線左側から順番に以下の通り：

- 新橋四丁目：左直 (約 100m 上流以遠はパーキング

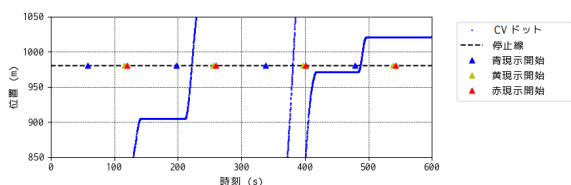


(a) 新橋四丁目

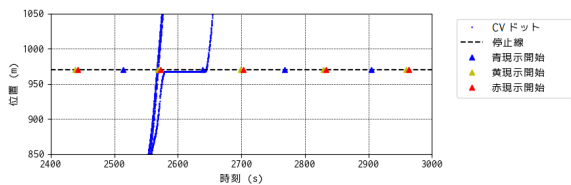


(b) 新宿七丁目

図 2: 分析対象交差点



(a) 新橋四丁目



(b) 新宿七丁目

図 3: CV 軌跡データと現示データの一部

メーターのエリア), 直進, 直進, 右折 (車線長約 60m). 約 200m 上流に別の信号交差点あり.

- 新宿七丁目: 左直, 直進, 右折 (車線長約 100m). 約 160m 上流に別の信号交差点あり.

(2) データ

検証に用いるデータは以下の通り.

ITS Connect 搭載車両軌跡データは 100 ms で時刻, 位置, 車両状態, 車両属性などを記録したものである. データは UTMS 協会によって ITS Connect 搭載車両から収集された. 位置は GNSS 測位で得たものであり, 分析時にマップマッチングにより道路上の座標とした. CV 台数は, 新橋四丁目では 3 時間の間に解析方向に 31 台, 新宿七丁目では同じく 14 台であった. その混入率は, 後述する断面交通量と合わせると, それぞれ 1.1%, 0.4% に相当する. 本データの他の CV 軌跡データと比較した長所は, 時空間分解能が極めて高いことと, ITS 無線によりほぼリアルタイムでのデータ収集が可能であることである. 一方短所は, データ収集のために別途機器が必要なことと, 現在は普及率が相対的に小さい (2023 年 2 月までの累計でおよそ 29 万台) ことである.

信号現示情報もデータ化されており, 提案手法の入力とする. いずれの交差点も, 概ね青信号が 60 秒, 赤信号と黄信号の和が 80 秒程度である. 信号制御の細目は以下:

- 新橋四丁目は南北方向青時間は制御により変化, 東西青時間は時間帯により変化 (日中の南北赤時間は固定)
- 新宿七丁目は, 南北・東西ともに歩行者信号赤後の青時間が可変, 南北右折が感应制御

マップマッチングされた CV 軌跡データと信号現示の一部を図 3 に示す. いずれのデータも合理的な挙動を示していることが確認できる.

提案手法の精度の検証のため, 当該時間帯の交通流



(a) 新橋四丁目



(b) 新宿七丁目

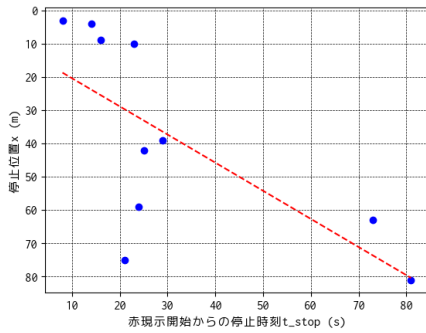
図 4: 交差点の画像

を撮影した動画データを用いる. その画像例を図 4 に示す. いずれも手前から奥の方向が調査対象としたアプローチとなる. 動画像から車両通過時刻を求め, この時間帯の平均流率と直進車線の飽和流率 (発進損失や大型車の影響を考慮したうえで, 全サイクルの平均を取った) を推定した. その結果, 路線の平均流率は新橋四丁目は 952 veh/h, 新宿七丁目は 1125 veh/h であった. これは周辺の車両感知器に測定された断面交通量ともよく一致しており, 信頼性のある真値が得られたといえる.

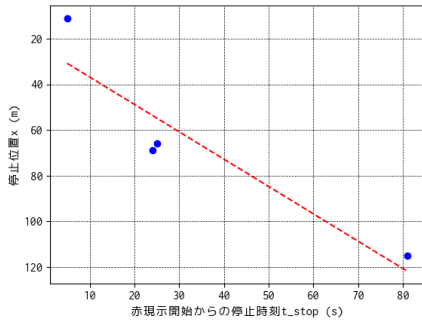
3.2 結果

当該交差点を通過し, かつ信号待ちで停止した CV (新橋四丁目で 10 台, 新宿七丁目で 7 台) の停止・発進の時刻・位置を特定し, 波速度を推定した結果を図 5, 6 に示す. その結果, 波速度は新橋四丁目で $\phi = 0.845$ (m/s), $w = 6.648$ (m/s), 新宿七丁目で $\phi = 1.197$ (m/s), $w = 4.689$ (m/s) と推定された.

自由流速度 u は, CV データの走行中速度の中央値をそのまま用いて新橋四丁目で $u = 15.0$ (m/s), 新宿七丁目で $u = 13.3$ (m/s) とする. さらに, 停止時車頭距離を 8 m と仮定し, $\kappa = 0.125$ (veh/m/lane) と仮定する. その結果, 流率推定結果は表 1 に示す通りとなった. ここで, 真値は動画像データから求めたものであり, 平

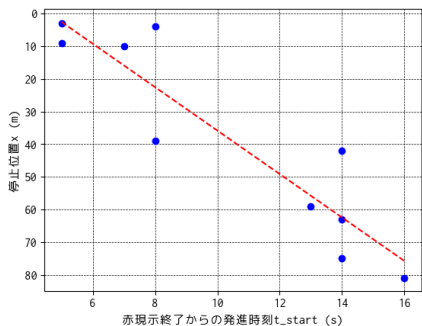


(a) 新橋四丁目. 回帰式: $x = 0.845t + 11.966$
($R^2 = 0.478$)

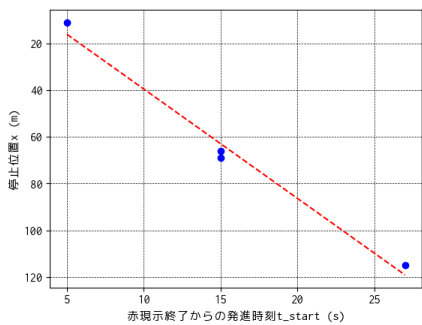


(b) 新宿七丁目. 回帰式: $x = 1.197t + 24.851$
($R^2 = 0.852$)

図 5: 停止波速度 ϕ の推定結果. 青点が CV データ, 赤破線が回帰直線を意味する.



(a) 新橋四丁目. 回帰式: $x = 6.648t - 30.636$
($R^2 = 0.843$)



(b) 新宿七丁目. 回帰式: $x = 4.689t - 7.434$
($R^2 = 0.984$)

図 6: 発進波速度 w の推定結果. 青点が CV データ, 赤破線が回帰直線を意味する.

表 1: 流率推定結果と真値. 単位は veh/h/lane

変数	新橋四丁目	新宿七丁目
流入率 a	360	494
飽和流率 q^*	2073	1995
真の平均流入率	300	465
真の飽和流率	1564	1564

均流入率は直進に用いられる直進・左直車線のもの、飽和流率は動画像解析時に対象とした直進車線のものものである。

3.3 考察

推定結果と真値を比較すると、CV 台数が非常に少なく手法も単純であるのにも関わらず、ある程度真値に近い推定結果が得られていることがわかる。未だデータ数が少ないため本手法の精度の断定はできないが、新橋四丁目と新宿七丁目の二か所で類似した結果が得られた点は注目に値すると考えられる。

本手法は渋滞密度 κ を完全に外生的に仮定している。仮定した値と実際の値が異なる場合、その比に応じて流率推定値がそのまま変化する (式 (3), (4) より)。例えば、仮に渋滞密度を 0.1 veh/m/lane (すなわち停止時車頭距離 10 m) と仮定すると、新橋四丁目の推定結果は飽和流率 1658 veh/h/lane, 流入率 288 veh/h/lane となり、いずれも真値に近くなる。渋滞密度を合理的に仮定する方法の検討が必要である。

4. 結論

本研究では、信号制御に用いることを念頭に、相対的に小さい混入率の CV 軌跡データに基づき、交差点への平均流入率と飽和流率を推定する手法を構築し、実際の ITS Connect 搭載車両軌跡データを用いて検証した。提案手法は、少ないデータでも頑健な推定を可能とするために非常に単純なものとした。検証の結果、0.4% の混入率であっても真値にある程度近い推定値を得られた。現段階では検証データがわずか 3 時間分のみであるため、一般性のある結論を得るためにはさらなる検証が必要であるが、提案手法の可能性は示せたといえる。

他の今後の課題は以下の通り。まず、第 2.3 節で述べた通り、本手法は「直進車両が並んでいる車線の流入率と飽和流率」の平均を求めるものであり、車線の利用状況によっては適用が難しい。どのような交差点に適しているのか、あるいは車線を明示的に区別するような拡張は可能か、精査が必要である。また、停止時車頭距離の合理的な仮定方法を考察する必要がある。最後に、本手法の結果を実際の信号制御に用いるための

方法の検討も重要である。

謝辞

本論文は、交通工学研究会の新制御方式研究委員会の成果の一部を報告するものであり、CV軌跡データなどはUTMS協会に提供いただいた。関係各位に謝意を表す。

補注

*1 「プローブカー (probe vehicle)」という用語には、分析者が交通現象探査の意図を持って走行させる移動体観測を主目的とした車両という意味が含まれる^{21), 22)}。今日ではその意味でのプローブカーはほぼ存在せず、通常の交通のために走行している車両に対し、外部の分析者が副次的にそのデータを取得して交通現象の分析に用いる場合がほとんどである²³⁾が、そのような車両も慣例的にプローブカーと呼ばれることが多い。本論文では、そのような副次的にデータを取得する車両を呼ぶのに「プローブカー」という用語を使うのはprobeという単語の原義に照らし合わせると誤解を招くという考えのもと、よりその機能を適切に表現した「コネクティッドカー (connected vehicle)」という用語を使うこととする。日本では「コネクティッドカー」という用語をその意味で使う例は未だ少ないようであるが、国際的には使用例は多く主流となりつつある用語法と考えられる^{5), 8), 13), 24)}。

参考文献

- 1) 交通工学研究会: 平面交差の計画と設計 基礎編, 交通工学研究会, 2018.
- 2) 関達也, 島津利行, 和智誠, 榊原肇, 大口敬: プローブ情報を活用した信号制御の見直しについて, 交通工学論文集, Vol. 8, No. 1, pp. 31–38, 2022.
- 3) 吉井稔雄, 張ウチン, 坪田隆宏: プローブ旅行時間を用いた信号交差点交通状態の判別手法, 交通工学論文集, Vol. 9, No. 2, pp. A_246–A_252, 2023.
- 4) 和田健太郎, 小林桂子, 桑原雅夫: プローブ車両軌跡データのみを用いた交通の量的把握, 生産研究, Vol. 67, No. 2, pp. 143–147, 2015.
- 5) Seo, T., Bayen, A. M., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: Traffic state estimation on highway: A comprehensive survey, *Annual Reviews in Control*, Vol. 43, pp. 128–151, 2017.
- 6) Mehran, B., Kuwahara, M., and Naznin, F.: Implementing kinematic wave theory to reconstruct vehicle trajectories from fixed and probe sensor data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 20, No. 1, pp. 144–163, 2012.

- 7) Wada, K., Ohata, T., Kobayashi, K., and Kuwahara, M.: Traffic measurements on signalized arterials from vehicle trajectories, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol. 21, No. 1, pp. 77–85, 2015.
- 8) Zheng, J. and Liu, H. X.: Estimating traffic volumes for signalized intersections using connected vehicle data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 79, pp. 347–362, 2017.
- 9) Feng, Y., Zheng, J., and Liu, H. X.: Real-time detector-free adaptive signal control with low penetration of connected vehicles, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2672, No. 18, pp. 35–44, 2018.
- 10) Zhang, B., Pang, J., Zhang, W., Qie, X., and Liu, X.: Application of big data technology in the development of intelligent transportation, *Science & Technology Review*, 2020. (in Chinese).
- 11) Comert, G.: Simple analytical models for estimating the queue lengths from probe vehicles at traffic signals, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 55, pp. 59–74, 2013.
- 12) Zhao, Y., Wong, W., Zheng, J., and Liu, H. X.: Maximum likelihood estimation of probe vehicle penetration rates and queue length distributions from probe vehicle data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 23, No. 7, pp. 7628–7636, 2022.
- 13) Wong, W., Shen, S., Zhao, Y., and Liu, H. X.: On the estimation of connected vehicle penetration rate based on single-source connected vehicle data, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 126, pp. 169–191, 2019.
- 14) 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫: 車両軌跡に基づく流率密度関係の推定法—基本的な枠組みと数値実験, 交通工学論文集, Vol. 2, No. 2, pp. A_1–A_10, 2016.
- 15) Seo, T., Kawasaki, Y., Kusakabe, T., and Asakura, Y.: Fundamental diagram estimation by using trajectories of probe vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 122, pp. 40–56, 2019.
- 16) Fayazi, S. A., Vahidi, A., Mahler, G., and Winckler, A.: Traffic signal phase and timing estimation from low-frequency transit bus data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 19–28, 2015.
- 17) 福嶋一矢, 安田昌平, 井料隆雅: プローブカーデータを用いた信号交差点のパラメータ推定, 土木計画学研究講演集, Vol. 60, 2019.
- 18) Day, C. M. and Bullock, D. M.: Detector-free signal offset optimization with limited connected

vehicle market penetration: Proof-of-concept study, *Transportation Research Record*, Vol. 2558, No. 1, pp. 54–65, 2016.

- 19) I T S C o n n e c t 推進協議会: ITS Connect システム車車間通信メッセージ仕様 ITS Connect TD-001 1.1 版, 2019.
- 20) 和田健太郎, 瀬尾亨, 中西航, 佐津川功季, 柳原正実: Kinematic Wave 理論の近年の展開: 変分理論とネットワーク拡張, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_1139–I_1158, 2017.
- 21) Zito, R., D’Este, G., and Taylor, M. A. P.: Global positioning systems in the time domain: How useful a tool for intelligent vehicle-highway systems? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 3, No. 4, pp. 193–209, 1995.
- 22) 三輪富生: プロブカーデータを用いた道路ネットワーク上の交通行動分析, 博士論文, 名古屋大学, 2005.
- 23) 日下部貴彦: データオリエンテッド交通研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 71, No. 5, pp. I_21–I_31, 2015.
- 24) Shladover, S. E.: Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2017.