

車両プローブ情報及び上流の信号パラメータに基づく 信号待ち車列長推定手法の提案

Estimation of Queue Length at Signals Using Vehicle Trajectories and Upstream Signal Control Parameter

丹下 智之[†] 廣森 聡仁[†] 梅津 高朗[‡] 山口 弘純[†] 東野 輝夫[†]
Tomoyuki Tange Akihito Hiromori Takaaki Umedu Hirozumi Yamaguchi Teruo Higashino

1. はじめに

都市部における交通流の把握は、その都市における渋滞を引き起こすボトルネックとなる交差点や道路を発見し、都市における交通の諸問題の改善に役立つだけでなく、リアルタイムに交通流を把握することができれば、事故やイベントにより生じる突発的な渋滞などを早急に把握し、それによる影響を軽減させることが期待できる。都市部における交通流を把握する様々な取組が実施されており、アンケートによる調査である都市 OD 調査だけでなく、全国規模で実際の交通量を計測する国道路・街路交通情勢調査が実施されている [1]。しかしながら、これらの取組は数年毎に実施され、また、その期間は限られているため、都市部における定性的な交通流の理解に留まる。交通流を常時把握するために、交差点や道路にセンサを配置し、それらにおける交通量を計測する方法も取られている [2, 3] が、都市部に存在する多くの交差点や道路上にセンサを設置することはコストの面から現実的ではなく、都市部の一部の領域を把握するに留まる。

一方、道路上に設置されたインフラに頼らないシステムとして、プローブカーシステムが注目されている。プローブカーとは、GPS や速度計などのセンサに加えて無線通信機器を搭載し、位置情報や速度情報などの様々な情報を収集する車両である。プローブカーシステムでは、個々のプローブカーが走行した道路についての交通状況を把握できるため、複数のプローブカーを組み合わせることで広範囲の道路状況を把握することができる。例えば、Google Map においては、Android OS を搭載したスマートフォン端末から位置情報を集約することにより、地図上で道路毎の走行速度を表示しており、現状の交通状況の把握に役立つものである。一般に、車両全体に占めるプローブカーの割合は、現状では数%程度であり、僅かな走行軌跡情報から、都市部における交通状況を把握することは容易ではない。文献 [4, 5] においては、過去に蓄積されたプローブカーデータと現在のプローブカーデータを比較することで、現在の交通状況

を把握する手法を提案している。また、Ryan [6] らは、マルコフモデルを用いて、プローブカーの走行軌跡情報から交通状況の推定、予測を行っている。これらの手法では、過去に収集した車両走行軌跡情報を用いてモデルのパラメータを推定しているため、交通事故の発生時など、交通状況が通常時と大きく異なる場合に適応することは困難である。我々の研究グループでは、広域にわたる交通状況を正確に把握するために、都市部の最小単位の交通状況である道路リンクレベルでの交通量を推定する取組をすすめている [7]。この取組の中で、近隣に別の交差点が存在しないような、単独の交差点において形成される信号待ち車列の長さを推定する手法を過去に提案しており、信号機の制御タイミングとプローブカーの停止位置及び停止時刻から車両の到着率を算出することで、信号サイクル毎の車列長を推定できることを示している。

本稿では、都市部における交通流を把握するために、単独の交差点に留まらず、都市部などに見られる、近隣に複数の信号機が存在する交差点において形成される車列の長さを求める手法を提案する。提案手法では、対象交差点の上流に位置する信号機の状態に応じ、上流の交差点に接続するいずれのリンクから車両が流入するかを判断し、かつ、その流入期間に応じて、プローブカーの停止位置及び停止時刻から、前方に存在する車両数を把握するとともに、信号サイクル中に到着する車両数を予測する。これにより、ある交差点において推定した車列長に基づいて、さらに下流の交差点における車列長を推定していくことで、広範囲にわたる道路状況の把握が可能である。

提案手法の性能を評価するため、交通シミュレータ Vissim [8] を用いて信号待ち車列長の推定を行い、推定精度について考察を行った。評価実験では、走行する車群から無作為に抽出した走行軌跡情報をプローブカーデータとみなし、この情報に対して提案手法を適用した。評価実験の結果、全車両におけるプローブカーの混入率が 5% 存在すれば、誤差約 30% で車列長を推定できることを確認し、提案手法が有効であることを示した。

2. 関連研究

交通状況を把握する手法としては、道路や交差点に設置された車両感知器など固定型のセンサを利用する手法

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

[‡] 滋賀大学 経済学部, Faculty of Economics, Shiga University

が挙げられる。これらの手法は、同一車両を道路に配置された二つのセンサで感知し、その走行速度を把握することで、交通状況を把握するものである。交通状況を表す指標の一つとして、ある地点からある地点の移動に要する通行時間を旅行時間が挙げられ、固定型センサを利用し、旅行時間を推定する手法がいくつか提案されている [2,3,9]。Kwon らの手法 [2] は、過去に蓄積された旅行時間と車両検知器から取得した車両の存在情報から、線形回帰により旅行時間を予測する手法であり、20 分後の旅行時間であれば高精度に予測できることを示している。また、Rice ら [3] は、未来の旅行時間が現在の旅行時間に線形に依存する性質を利用し、高速道路の各セグメントにおける現在の旅行時間を予測する手法を提案している。隣接するセグメントの旅行時間も考慮することにより、一時間後の旅行時間を 10 パーセント程度の誤差で予測できることを示している。Wang ら [9] は、カルマンフィルターを用いることにより、天気、速度規制などの外部要因の動的な変動を考慮しており、様々な状況に応じて、適切に旅行時間を予測可能なモデルを提案している。一方、都市部の交通量を推定する手法として、都市に密に配置されたセンサの接続関係を考慮し、これらを状態空間モデルとしてモデル化することで、交通量の変化を予測する手法も提案されている [10]。性能評価実験では、単純な自己回帰移動平均モデル (ARIMA) による交通量の予測と比較し、提案手法により、最大で平均絶対誤差率を 8 パーセント改善できたことを示している。このように、あらかじめ道路に設置された様々なセンサを用いることによって交通状況を予測する手法は数多く提案されており、特定の道路に対しては、交通状況を高精度に予測できることが示されている。しかしながら、これらの手法は、センサが設置されていることを前提としており、広範囲の交通状況を把握するためには、多数のセンサを配置する必要があり、センサ自体のコストだけでなく、センサを設置するコストも問題となる。

プローブカーシステムを活用した特徴的な取り組みとして、都市を対象とした広域の交通調査が挙げられる [11–13]。Fabritiis ら [11] は、ローマの環状高速道路において、600,000 台以上の車両から収集された 3 分間隔のプローブカーデータから、ニューラルネットワークを利用したパターンマッチングに基づく手法で、30 分後の平均速度を 3.5 から 9.5 [km/h] 程度の誤差で予測できることを示している。Yokota ら [12] は、300 台のトラックからプローブカーデータを収集し、プローブカーが通過する頻度に基づき道路網を二つのモデルに分類する手法を提案しており、京阪神におけるプローブデータの密度、平均通過時間、平均通過スピードを精度よく推定できることを示している。Shan ら [13] は、プローブデータの欠損部分を、シチュエーション毎に異なるパラ

メータで補完するヒューリスティックな手法を提案している。

また、より詳細に交通状況を把握するために、リンクレベルでの交通状況を推定する取り組みも多数実施されている。例えば、交差点における車列の長さを推定することにより、各交差点の混雑の程度を把握する手法がいくつか提案されている [14,15]。Comert ら [14] は、各リンクにおいて観測されたプローブカーの停止位置に基づき、交差点における車列の長さを確率モデルとして定式化することにより、車列長を予測している。Cheng ら [15] はショックウェーブ理論 [16] に基づき、プローブカーにより得られる走行軌跡から、車列が伸縮する様子を数理的にモデル化することにより、車列の長さを推定する手法を提案している。Uno ら [4] は長期間蓄積したプローブカーデータを活用し、定められたスケジュールに基づき運行するバスから得られるプローブカーデータを蓄積することで、地理空間と時空間の両方を網羅したデータベースを構築し、高い精度でリンク旅行時間を予測できることを示している。Lee ら [5] は、蓄積されたプローブカーデータから、データマイニング手法を活用することで、交通量の変化パターンを発見し、それらに基づきリアルタイムにリンク旅行時間を予測する手法を提案している。このように、プローブカーデータを用いて交通状況を把握及び予測する手法は多数提案されているが、これらの多くが過去に蓄積したプローブデータとリアルタイムなデータを比較することで実現されており、交通事故などの突発的な状況変化を適切に把握できない。これに対し、本研究では、過去のデータを蓄積及び分析することなく、個々のプローブカーの詳細な走行軌跡を分析することで、詳細な信号待ち車列の把握を実現している。

リンクや交差点における交通のモデルを作成し、それに基づき車列長を推定する手法も多く提案されている [17–20]。Tiaprasert ら [17] は、車列長の数学的モデルを作成し、センサーネットワークからの情報により、信号の切り替えタイミングや交通状況に関する事前情報無しに、信号における車列長を推定する手法を提案している。Sumaryo らは、一本道の交通をモデル化し、緊急車両が通過する際の影響を評価した研究 [18] や、単独の信号における交通状況を再現可能なシミュレーションモデル [19] の提案を行っている。これら既存の研究は、単独の交差点の詳細なモデルであり、近隣交差点との影響はあまり考慮されていない。また、Du ら [20] は、リアルタイムに得られた交通情報から、不足している部分を推定する手法を提案している。こちらは逆に比較的広範囲な交通モデルを用いており、個々の交差点のリアルタイムな状況の推定は考慮されていない。本研究では、隣接する交差点間の影響を詳細に考慮し、特定の交差点の

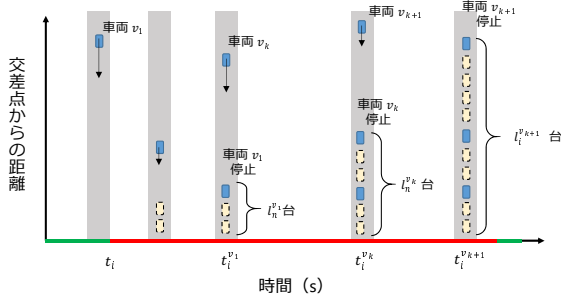


図 1: i 番目サイクルにおける交差点でのプローブ車両の挙動

詳細な車列長推定を行う。

3. 信号待ち車列長の推定

提案手法では、都市部の各地点における交通流を推定するために、プローブカーから得られる速度情報及び位置情報を基に、交差点に接続する各リンクにおける交通量を推定する。ここでは、赤信号時にリンク上で形成される車列長を、そのリンクにおける交通量とする。ある信号サイクル中の赤信号において、プローブカーが赤信号のために停止した際、プローブカーが停止した位置と赤信号の経過時間から、その信号サイクル中における車両の到着率を計算し、赤信号が終了するまでに車列に加わるであろう車両数を推定し、これをその信号サイクルにおける交通量とする。さらに、青信号においては、プローブカーが停止していた位置と、プローブカーが青信号になってから経過した時間から、その交差点の交通量を推定する。但し、リンクに流入してくる車両の到着率は、上流の交差点やリンクにおける交通流に大きく依存する。特に、上流の交差点が信号機を有する場合には、その信号の間隔やオフセットに応じて、下流のリンクに対し、車両の流入元になるリンクと、流入する期間が定まるため、ある信号サイクル内における一定の到着率を定められるわけではない。本章では、まず、周辺に信号機を有する交差点が存在せず、信号サイクル中は一定の到着率で車両が流入してくるリンクにおける車列長を推定する手法について説明した後、上流の交差点が有する信号機の制御方針とその交差点に接続する各リンクの交通量から、下流のリンクにおける車列長を推定する手法を説明する。

3.1 独立した交差点における車列長推定

本節では、プローブカーの速度情報と位置情報から、周辺に信号機を有する交差点が存在せず、独立している交差点のリンクにおいて車列長を推定する手法について説明する。図 1 は、プローブカーが交差点に進入する際の挙動を示したもので、横軸が時間、縦軸が交差点からの距離を表している。また、横軸の緑と赤の色は、交差点に設置されている信号機の状態を示している。信号機

が設置された交差点においては、その信号が赤信号の間はその交差点を通過できないことから、交差点を先頭に車両がリンク上に列を形成し、車両が到着するに従ってそれが伸びていく。時刻 t_i において、プローブカー v^1 は道路上にある速度で走行しているが、前方の交差点では、赤信号により既に停止している車両が存在するため、その後、速度を低下させ、 $t_i^{v_1}$ の時点で車列の後方で停止する。プローブカーの停止はプローブカーの速度情報から検知でき、また、その車両の位置情報から、車列において $l_n^{v_1}$ 台目に停止していることを把握することができる。周辺に交差点がないため、個々の車両はポアソン過程に従って到着すると仮定できることから、プローブカー v^1 が到着した $t_i^{v_1}$ において、信号サイクル i の車両到着率は以下の式で求めることができる。その信号サイクル内において、プローブ車両が一台のみ到着した場合、この $\lambda_i^{v_1}$ を信号サイクル i の到着率 λ_i とする。

$$\lambda_i^{v_1} = \frac{l_i^{v_1} - r_{i-1}}{t_i^{v_1}} \quad (1)$$

ここで、 r_{i-1} は信号サイクル $i-1$ において青信号中に交差点を通過することのできなかった車両台数を表しており、求め方は後述する。一方、同じ信号サイクル内に複数のプローブカーが到着する場合、これらのプローブカーからそれぞれ到着率を算出することで、より正確な到着率を推定することができる。あるプローブカー v_k が時刻 $t_i + t_i^{v_k}$ に $l_i^{v_k}$ 台目で停止した後、別のプローブカー v_{k+1} が時刻 $t_i + t_i^{v_{k+1}}$ に $l_i^{v_{k+1}}$ 台目で停止したとする。この時、プローブカー v_k が到着してから、プローブカー v_{k+1} が到着するまでの間における到着率は下記の式で求めることができる。

$$\lambda_i^{v_{k+1}} = \frac{l_i^{v_{k+1}} - l_i^{v_k}}{t_i^{v_{k+1}} - t_i^{v_k}} \quad (2)$$

m 台のプローブカーから求めたそれぞれの到着率に基づき、式 (3) で与えられるポアソン分布におけるパラメータの最尤推定を行うことで、信号サイクル i 全体における車両の到着率 λ_i を求める。

$$\lambda_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \lambda_{v_k} \quad (3)$$

信号サイクル i において、最後に停止したプローブカー v_m の停止位置と停止時刻をそれぞれ $t_i + t_i^{v_m}$ 、 $l_i^{v_m}$ で表すと、この信号サイクルにおける到着率 λ_i から、赤信号サイクル終了時の車列長の確率分布 $Q_i^{red}(x)$ は下記の式で表すことができる。

$$\lambda_i^{red} = \lambda_i \cdot (R - t_i^{v_m})$$

$$Q_i^{red}(x) = \frac{\lambda_i^{red} e^{-\lambda_i^{red}}}{(x - l_i^{v_m})!} \quad (x \geq l_i^{v_m}) \quad (4)$$

ここで R は、赤信号サイクル長を表している．この確率分布の期待値を信号サイクル i における信号待ち行列長 q_i とする．

一方、信号が青信号に変化すると、先頭に待機していた車両から交差点を通過し、車列は短くなっていく．交差点の通行容量が十分である場合には、その車列の車両が全て交差点を通過することができるが、十分でない場合には、車列は解消されず、再び赤信号で待機する捌け残り車両となる．単位時間あたりにリンクから流出可能な車両数を示すキャパシティ c_i は、プローブカーから得られる情報で推定することができる．ある信号サイクルにおける赤信号中、プローブカー v が l_i^v 台目に停止し、青信号に変わった後 t_i^v 秒後に交差点を通過した際、 t_i^v 秒内に l_i^v 台の車両が通過したことがわかることから、キャパシティ c_i は以下の式で算出することができる．

$$c_i = \frac{l_i^v}{t_i^v} \quad (5)$$

このキャパシティは、信号サイクル毎大きく変化することはないと考えられるので、本研究では複数の信号サイクルで算出されたキャパシティの平均値を用いている．また、信号サイクル i 中に交差点に流入する車両数の確率分布は、到着率 λ_i により、以下の式で表される．なお、 T はサイクル長を表している．

$$\lambda_i^{cycle} = \lambda_i \cdot (T - t_i^{v_m})$$

$$Q_i^{cycle}(x) = \frac{\lambda_i^{cycle} e^{-\lambda_i^{green}}}{(x - l_i^{v_m})!} \quad (x \geq l_i^{v_m}) \quad (6)$$

このように求めた Q_i^{cycle} 及び、キャパシティ c_i を基に、信号サイクル i において青信号中に交差点を通過することのできなかつた捌け残り車両の台数 r_{i+1} は、式 (7) で与えられ、信号サイクル中に到着した車両数と、その交差点における交通量の差として表すことができる．

$$r_{i+1} = E(Q_i^{cycle}(x)) - c_i \cdot (T - G) \quad (7)$$

以上のように、信号サイクル i においてプローブカーが到着した際には、 q_i を適切に求めることができる．

しかしながら、どの信号サイクルにおいても、プローブカーが到着するわけではないため、プローブカーが到着しない信号サイクルにおいては、信号待ち車列長を求めることができない．また、プローブカーが到着したとしても、赤信号期間の直後にプローブカーが到着した場合、必ずしも、信号サイクル全体における到着率を示しているわけではない．一方、信号サイクル全体における到着率は、信号サイクル間では大きく変化しないと考えられるため、過去の信号サイクルにおける平均的な到着率を用いて、信号待ち車列長 q_j の補正を行う．補正

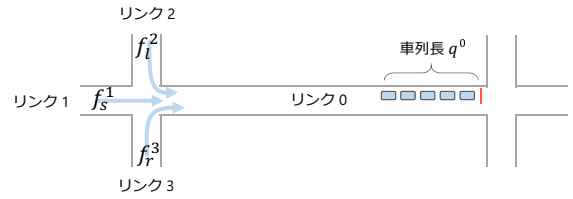


図 2: 上流交差点から下流交差点への車両の流入

後の車列長 q_j' は、式 (8) で表される．

$$Q_j'(x) = Q_j(x) + Q_{j-1}(x) + \dots + Q_{j-k}(x) \quad (8)$$

$$q_j' = E(Q_j'(x))$$

ここで、 $Q_j'(x)$ は過去 k サイクル分の車列長分布を混合した確率分布である．この混合によって、よりサイクル全体の到着率に合致したサイクルの推定結果を有効に活用し、車列長の補正を行うことができる．なお、プローブカーが到着せず、車列長分布が得られなかったサイクルについては、過去 k サイクルにおける車列長分布を混合した確率分布のみを用いて車列長を推定する．

3.2 上流に信号機のある交差点における車列長推定

次に、上流に信号機が設置されている交差点に隣接するリンクにおける車列長を求める手法について説明する．

図 2 は、上流に位置する交差点から下流交差点への流入車両を示したものである．図中の f_s^1 、 f_l^2 、 f_r^3 は、それぞれ単位時間あたりにリンク 1 から直進する車両数、リンク 2 から左折する車両数、リンク 3 から右折する車両数を表している．図中のリンク 0 において形成される車列長 q^0 は、上流に位置するリンク 1, 2, 3 よりリンク 0 へ流入する車両によって形成される．流入する車両数は各信号サイクル毎に変化するため、リンク 0 におけるサイクル i の車列長は以下のように表される．

$$q_i^0 = \int_{T^0 \cdot i}^{T^0 \cdot i + R^0} f_s^1(t) + f_l^2(t) + f_r^3(t) dt \quad (9)$$

T^0 及び R^0 は、それぞれリンク 0 に設置された信号機のサイクル長と赤信号サイクル長を示す．式 (9) の右辺が表す流入率は、上流交差点の信号状態に大きく影響を受ける．よって、この流入率の時間経過による変動をモデル化することにより、 q_i^0 を推定することができる．

q_i^0 を正確に求めるためには、各リンクから流入する車両の挙動を適切にモデル化する必要がある．なお、本節では、リンク 0 の交差点で形成される車列長についての説明であるので、リンク 0 への車両流入とは、リンク 0 の交差点に車両が到着することを意味する．図 3 は、ある信号サイクルにおいて、リンク 1 からリンク 0 へ流入する車両の累積台数の時間変化を示したものである．ある信号サイクルにおける赤信号の開始時間を 0 とし、

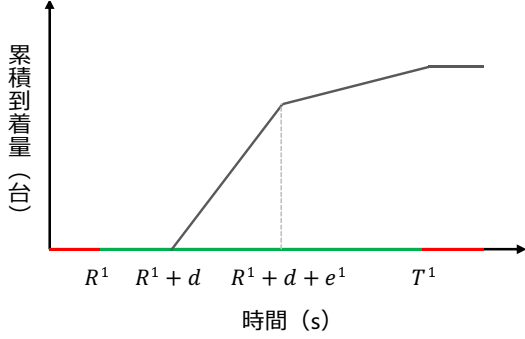


図 3: 上流リンク 1 から下流リンク 0 に流入する累積車両台数の時間変化

次の信号サイクルが開始される時間を T^1 とする．図 3 における累積到着量の傾きから分かるように，リンク 1 からの車両流入には三つの状態が存在する．最初の状態は，リンク 1 の交差点に設置された信号機の状態が赤であるために，リンク 1 からリンク 0 へ車両が流入しない状態である．また，リンク 1 の信号が青信号に変化しても，直ちにリンク 0 の交差点に車両が到着するわけではなく，車両がリンク 0 の交差点に到達するまでの旅行時間 d の間もリンク 0 への車両は流入しない状態は持続する． d はリンク 0 の長さ l_0 及びリンク 0 における平均通行速度 v_{l_0} から求めることができる．

$$d = \frac{l_0}{v_{l_0}} \quad (10)$$

二つ目の状態は，リンク 1 において車列を形成していた車両群がまとまって，リンク 0 に流入する状態である．リンク 1 における流出キャパシティを c^1 ，リンク 1 の交差点を直進し，リンク 0 に流入する車両の割合を p_s^1 とすると，この状態における流入率は， $c^1 \cdot p_s^1$ と表すことができる．リンク 1 において形成された車列が解消されると，リンク 0 へのまとまった車両流入はなくなるため，この状態はリンク 1 における車列が解消に要する時間 e^1 だけ持続する．また，リンク 1 には，更に上流のリンクから到着率 $\lambda^1(t)$ で車両が到着し，流出率 c^1 で車列から車両が退出する．この条件のもとで，青信号サイクルが開始してから車列が解消される時間 e^1 に関し，式 (11) で与えられる関係が成り立つ．左辺は，赤信号サイクル終了時点で形成されていた車列の長さとして，その後時刻 e^1 までに流入して来る車両数の和を表しており，右辺は青信号サイクル開始時点から時刻 e^1 までに車列から流出する車両数を表している．この式 (11) を e^1 について解くことで，二つ目の状態が持続する時間を求めることができる．

$$q^1 + \int_{R^1}^{R^1+e^1} \lambda^1(t) dt = c^1 \cdot e^1 \quad (11)$$

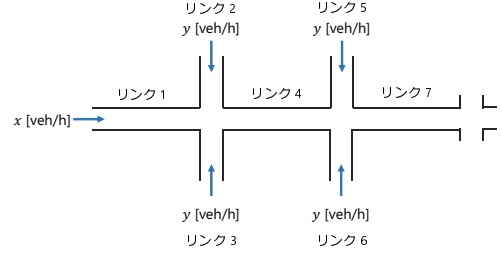


図 4: シミュレーション実験における道路構造

3 つ目は，リンク 1 への流入車両がそのままリンク 0 に流入する状態である．リンク 1 への車両流入率を $\lambda^1(t)$ とすると，リンク 0 への流入率は $\lambda^1(t) \cdot p_s^1$ となる． $\lambda^1(t)$ は，これまで記述した方法で，さらに上流の信号状態を考慮して求めれば良い．

以上の三つの状態をまとめると， $f_s^1(t)$ は下記の式として表すことができる．

$$f_s^1(t) = \begin{cases} 0 & (t' \leq R^1 + d) \\ c^1 \cdot p_s^1 & (R^1 + d < t' \leq R^1 + d + e^1) \\ \lambda^1(t) \cdot p_s^1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

$$t' = t \bmod T^1$$

また， $f_l^2(t)$ および f_r^3 についても，リンク 1 と同様にして車両の流入率をモデル化することができる．このようにして求めた上流リンクからの流入モデル及び式 (9) を用いることにより，各サイクル毎に信号待ち車列長を推定することができる．

4. 性能評価

提案手法の有効性を検証するため，ミクロ交通シミュレータ Vissim [8] を用いて評価実験を行った．実験では，交通状況の異なる複数のシナリオのもとで，Vissim により生成した車両群のうち，一部の車両の走行軌跡情報を用いて提案手法による車列長の推定を行った．その後，実際にシミュレーションで形成された車列長と，推定結果を比較し，その推定精度について評価した．また，プローブカーとして抽出する車両の組み合わせによって推定結果が変動すると考えられるので，複数回異なる組み合わせでプローブカーの抽出を行うことで，より一般的な性能について評価を行った．

4.1 シミュレーション環境

図 4 は，シミュレーション実験における道路構造を示したものである．リンク 1 からリンク 7 までの 7 つのリンクが存在し，リンク 4，リンク 7 を除く 5 つのリンクには，それぞれ図で示す流入交通量があるものとする．また，各リンクの長さは 150m であり，道路ネットワークには，3 つの信号交差点が存在する．上流に位置する信号のサイクル長が同じ場合と，そうでない場合の両方

表 1: 実験シナリオ

シナリオ	流入交通量 [veh/h]			
	x	y		
A. 交通量一定 (非混雑)	500	300		
B. 交通量一定 (やや混雑)	600	400		
C. 交通量一定 (混雑)	650	500		
D. 交通量変動 (増加)	500	650	300	500
E. 交通量変動 (減少)	650	500	500	300

における性能を評価するため、各信号のサイクル長を上流から順にそれぞれ 120 秒, 120 秒, 80 秒として、サイクル長が 120 秒である 2 つの信号は同期しているものとする。このような環境のもとで、複数のシナリオのもとで 3600 秒間のシミュレーションを行った。表 1 は、シミュレーション実験の各シナリオにおける交通量を表したものである。ここで、やや混雑とは、各リンクにおいて捌け残り車両が発生しない程度の交通量を意味し、混雑は、捌け残り車両が発生する状況を表している。シナリオ A ~ C により、一般的な交通量の際における提案手法の性能を確かめるとともに、シナリオ D, E により、3600 秒間で大きく交通量が変化する場合に、その車列長変動を捉えることができるかを確認した。なお、各交差点において、車両が直進・左折・右折するそれぞれ割合は既知であるものとして推定を行う。

4.2 リンクの種別ごとの推定精度

本節では、3.1 節および 3.2 節で述べた方法で車列長推定を行った際における、それぞれの推定精度について考察を行う。図 5 は、シナリオ B のもとで、プローブカー混入率が 7.5 % の条件で各サイクルごとの車列長推定を行った際に生じた推定誤差をヒストグラムとしてまとめたものであり、図 5a は上流に信号機がないリンク 1 における推定誤差を、図 5b は上流に信号機があるリンク 7 における推定誤差をそれぞれ表している。

リンク 1 における推定誤差の平均値と標準偏差はそれぞれ -1.1 と 3.86 であり、リンク 7 の平均値と標準偏差は -1.5 と 2.74 であった。リンク 7 における推定結果の方が精度が高いのは、上流に位置する信号の状態に応じて適切な流入率を算出できているからであると言える。また、リンク 1 およびリンク 7 における平均絶対誤差は、それぞれ 27.5 %、25.8 % であり、高い精度で推定できていると言える。

また、図 6 は、3.1 節で述べた車列長の補正を行わず、プローブカーが到着しなかったサイクルについては、前サイクルの推定結果をそのまま利用する手法によって生じた推定誤差をヒストグラムとしてまとめたものである。平均値と標準偏差はそれぞれ -1.4 と 4.39 であり、図 5a と比較すると誤差の分散が非常に大きいことが分かる。これは、赤信号サイクル開始直後に停止したプローブカーの情報に基いて求める到着率と、サイクル全

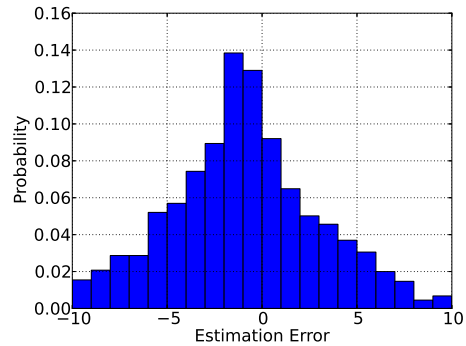


図 6: 補正を行わない場合のリンク 1 における推定誤差分布

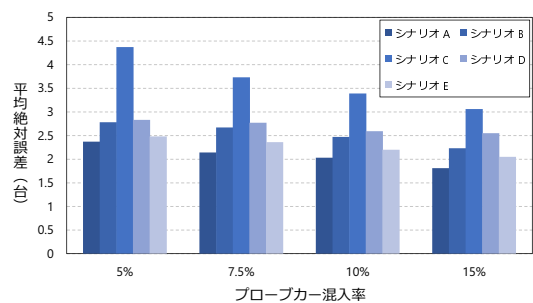


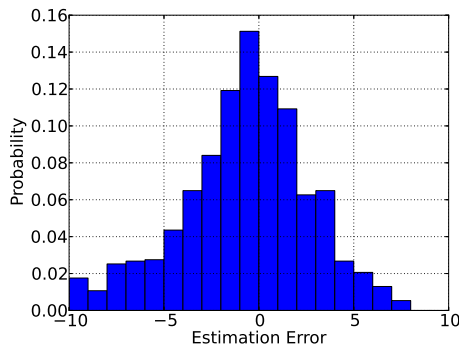
図 7: 各シナリオのもとでの平均絶対誤差

体における到着率との間に大きなばらつきがあったためであると考えられる。3.1 節で述べた方法を用いて誤差の分散を低減できていることから、過去のサイクルにおいて求めた車列長分布を混合することで、性能の向上が実現されていると言える。

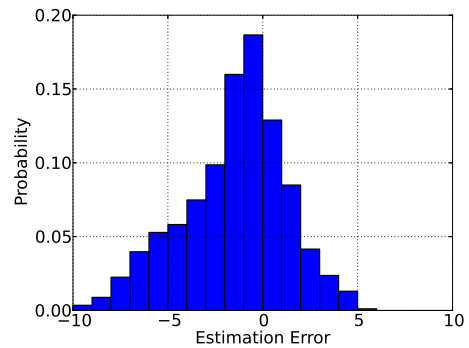
4.3 推定精度

本シミュレーション実験における交差点の種類として、上流に信号機がない交差点、上流に同期した信号機がある交差点、上流に同期していない信号機がある交差点の 3 種類が存在する。この 3 種類の交差点における推定精度を評価するため、リンク 1、リンク 4、リンク 7 において各信号サイクルで形成された車列長を推定し、それらの平均絶対誤差を評価指標とする。図 7 は、各シナリオにおいて形成された車列長を、複数のプローブカー混入率のもとで推定したときの平均絶対誤差を表したものである。

交通量が固定であるシナリオ A ~ C において、全車両におけるプローブカーの混入率が 5 % のとき、推定値の平均絶対誤差はそれぞれ 2.37 台、2.78 台、4.37 台となった。なお、実際に形成された車列長の平均は、それぞれ 7.2 台、10.2 台、13.5 台であった。シナリオ C における平均絶対誤差は他のシナリオと比較して大きい値であるが、平均絶対誤差の値は 29% であり、十分車列長変動の傾向を捉えている。このことから、交通量が変



(a) リンク 1 における推定誤差



(b) リンク 7 における推定誤差

図 5: 各サイクルの車列長推定で生じた推定誤差のヒストグラム

化しない状況において、提案手法は一般的な交通量のもとで形成される車列の長さがある程度正確に推定できると言える。

図 7 に示すように、交通量が変動するシナリオ D, E において、プローブカー混入率が 5% のとき、平均絶対誤差はそれぞれ 2.83 台, 2.48 台となった。それに対して、実際に形成された車列長の平均はそれぞれ 11.0 台, 10.2 台であった。交通量が増加するシナリオ D においては、シミュレーションの前半部分における交通量が少ないため、プローブカーの絶対量も少なくなり、推定誤差が大きくなる。さらに、誤差の大きい前半部分のサイクルにおける車列長分布を用いて補正を行うことで、推定精度に悪影響を与える。これがシナリオ D での平均絶対誤差が大きい原因であると考えられる。一方で、相対誤差の値は約 28% であり、交通量が変動する状況においても車列長をある程度正確に推定できると言える。

5. おわりに

本研究では、対象交差点の上流に位置する信号機の状態に応じた車両流入モデルを構築し、近隣に複数の交差点が存在する交差点において形成される車列の長さを推定する手法を提案した。提案手法の性能を評価するためにミクロ交通シミュレータ Vissim を用いたシミュレーション実験を行い、性能評価を行った。実験の結果、プローブカー混入率が 5% 程度の場合においても、平均車列長が 11 台程度の車列に対して、誤差約 30% 程度で車列長を推定できることを確認した。

今後の課題として、より大規模な道路ネットワークにおける性能評価を行う予定である。本手法の実用性を考えると、各交差点において車両が直進・左折・右折を行う確率を与えずとも車列長推定が可能な方法を検討する。また、実際の道路における複雑な環境においても、本手法が適用可能であることを確認する必要があると考え

られる。

参考文献

- [1] 国土交通省 都市・地域整備局 都市計画課都市計画調査室. 都市交通調査・都市計画調査. <http://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/od/>.
- [2] Jaimyoung Kwon, Benjamin Coifman, and Peter Bickel. Day-to-day travel-time trends and travel-time prediction from loop-detector data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1717, No. 1, pp. 120–129, 2000.
- [3] John Rice and Erik van Zwet. A simple and effective method for predicting travel times on freeways. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 200–207, 2004.
- [4] Nobuhiro Uno, Fumitaka Kurauchi, Hiroshi Tamura, and Yasunori Iida. Using Bus Probe Data for Analysis of Travel Time Variability. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, Vol. 13, No. 1, pp. 2–15, 2009.
- [5] Wei-Hsun Lee, Shian-Shyong Tseng, and Sheng-Han Tsai. A Knowledge Based Real-Time Travel Time Prediction System for Urban Network. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, No. 3, pp. 4239–4247, 2009.
- [6] Ryan Herring, Aude Hofleitner, Pieter Abbeel, and Alexandre Bayen. Estimating arterial traffic conditions using sparse probe data. In *Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2010)*, pp. 929–936, Madeira Island, Por-

- tugal, 2010. IEEE.
- [7] 丹下智之, 廣森聡仁, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫. 車両プローブ情報に基づく信号待ち車列長変動の分析モデル. マルチメディア, 分散, 強調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム, pp. 1751–1759, 2014.
- [8] Vissim. Traffic Simulation with PTV Vissim for Efficient Junction Design.
- [9] Yibing Wang, Markos Papageorgiou, Albert Messmer, Pierluigi Coppola, Athina Tzimitzi, and Agostino Nuzzolo. An adaptive freeway traffic state estimator. *Automatica*, Vol. 45, No. 1, pp. 10–24, 2009.
- [10] Anthony Stathopoulos and Matthew G. Karlaftis. A multivariate state space approach for urban traffic flow modeling and prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 11, No. 2, pp. 121–135, 2003.
- [11] Corrado de Fabritiis, Roberto Ragona, and Gaetano Valenti. Traffic estimation and prediction based on real time floating car data. In *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2008)*, pp. 197–203, Beijing, China, 2008. IEEE.
- [12] Takayoshi Yokota and Dai Tamagawa. Constructing Two-Layered Freight Traffic Network Model from Truck Probe Data. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 1–11, 2011.
- [13] Zhenyu Shan, D. Zhao, and Yingjie Xia. Urban road traffic speed estimation for missing probe vehicle data based on multiple linear regression model. In *2013 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pp. 118–123, Oct 2013.
- [14] Gurcan Comert and Mecit Cetin. Analytical Evaluation of the Error in Queue Length Estimation at Traffic Signals From Probe Vehicle Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 563–573, 2011.
- [15] Yang Cheng, Xiao Qin, Jing Jin, Bin Ran, and Jason Anderson. Cycle-by-Cycle Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Sampled Trajectory Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2257, pp. 87–94, 2012.
- [16] M. J. Lighthill and G. B. Whitham. On Kinematic Waves, I. Flood Movement in Long Rivers. In *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, pp. 281–316, 1955.
- [17] K. Tiaprasert, y. zhang, X.B. Wang, and X. Zeng. Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. PP, No. 99, pp. 1–12, 2015.
- [18] S. Sumaryo, A. Halim, and K. Ramli. Simulation and analysis of traffic flow models with emergency vehicles distortion on a single road. In *2nd International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering, and Environment (TIME-E)*, pp. 163–168, Aug 2014.
- [19] S. Sumaryo, A. Halim, and K. Ramli. Improved discrete event simulation model of traffic light control on a single intersection. In *QiR (Quality in Research), 2013 International Conference on*, pp. 116–120, June 2013.
- [20] Rong Du, Cailian Chen, Bo Yang, and Xinpeng Guan. Vanet based traffic estimation: A matrix completion approach. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pp. 30–35, Dec 2013.