

# プローブカーデータからの交差点状況推定手法の提案

赤井 優真<sup>1</sup> 廣森 聡仁<sup>1</sup> 梅津 高朗<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

**概要:** 近年、各種センサを搭載したプローブカーを走行させて収集したプローブカーデータが注目されており、定点観測に代わって低コストで広範囲の情報を収集できる手段として期待されている。このデータからリンク走行時間と比較し走行時間の正確な推定が難しい交差点の走行時間を調査する方法なども提案されてきているが、それに影響を受ける要因が何かの推測は容易ではない。本研究では、交差点走行時間を決定するいくつかの要因をパラメータ化して、走行時間を式表現化することで、そのモデルを活用し、いくつかのプローブカーデータによる交差点遅延時間がわかったときに、交差点の未知の要因値（パラメータ値）を推定する方法を提案する。提案手法では、2段階の線形回帰により、要因と交差点走行時間との関係をモデル化する。この目的のため、要因値を様々に変化させた網羅的な交通流シミュレーションを実施し、データセットを取得している。さらに、この線形回帰モデルにおいて、プローブカー混入率（全車両数に対してプローブカーが占める割合）を変化させ、モデルの推定精度特性を解析している。

**キーワード:** プローブカー, 交差点状況

## A Method for Estimating Intersection Characteristics Using Floating Car Data

YUMA AKAI<sup>1</sup> AKIHITO HIROMORI<sup>1</sup> TAKAAKI UMEDU<sup>1</sup> HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>1</sup> TERUO HIGASHINO<sup>1</sup>

**Abstract:** In recent years, probe-car data has attracts a lot of attention. It is expected as a means of lower cost data collection than fixed point observation. Although previous work on the estimation of trip time and passing delay through intersections from such a dataset exists, estimating dominant factors that affect on of the delay has not been well-investigated so far. In this study, we propose the method of modeling and analyzing such fundamental factors. This method focuses on all the factors (parameters) that may potentially affect the intersection delay, but their levels of influence are unknown. We conduct exhaustive simulations changing those parameters and build a model to present the relationship. As a result, we have found that there are several dominant factors, and the intersection passing delay can be expressed by those factors.

**Keywords:** Floating Car, Intersection Characteristics

### 1. はじめに

走行車両に関する情報を収集する手段としては、道路上に設置されたセンサによる定点観測が主流で、例えば、路側機から発信される電波ビーコンや光ビーコンにより道路を走行する車両を検知する方法が広く用いられている。このように取得された情報は、渋滞状況や目的地までの所要

時間といった情報として、道路情報掲示板やカーナビゲーションシステム等を通じて運転手へ提供される。センサによる定点観測は、センサが配置された場所を走行する車両の情報を常に取得できる一方、様々な場所で車両情報を取得するためには、多くのセンサを導入する必要がある。この一方で、近年ではGPS、速度センサ、方位センサなど様々なセンサを搭載したプローブカーを走行させることにより、それらのセンサから得られる車両の位置や速度、進行方向などの多様な情報（プローブカーデータ）を集約し交通状況などを推定するプローブカーシステムが注目され

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

ている。このシステムでは、特定の道路におけるデータを常に取得できるわけではないが、プローブカーは様々な場所を走行するため、低コストで広範囲の情報を収集できる。

プローブカーシステムの一つとして、2003年に本田技研工業株式会社により開発されたカーナビゲーションシステムであるインターナビが挙げられ、車両に搭載されたセンサにより収集された走行情報を定期的にサーバに送信するとともに、収集された情報を解析し VICS 情報として提供するシステムが実用化されている [1]。また、各社のカーナビゲーションシステムにおいても、プローブカーデータが利用されており、渋滞を回避できるような経路や災害時における道路通行実績の提供などに活用されている [2], [3]。

プローブカーデータの別の利用事例として道路交通調査が挙げられ、調査対象の道路網を走行した車両のプローブカーデータから走行に要した時間（旅行時間）等の道路通行状況を計測し、対象道路網の混雑状況や車両の動きの把握等に活用されている [4]。特に、車両の円滑な走行を妨害し、旅行時間に大きな遅延を与えやすい交差点に関する調査は重要である。周辺環境や予測される交通需要等に基づき交差点は設計されている [4], [5], [6], [7] が、経年的または突発的な変化が周辺環境や交通需要に生じることは避けられないため、継続的な交差点の調査により、交差点通過に影響を及ぼす原因を特定する必要がある。しかしながら、交差点での遅延に影響する要因は、交差点の形状や流入する交通量等多く存在し、プローブカーデータにより、ある交差点での旅行時間が長いと判断されても、その原因が何でかの推測は容易でない。

本研究では、交差点走行時間を決定するいくつかの要因をパラメータ化して、走行時間を式表現化することで、そのモデルを活用し、いくつかのプローブカーデータによる交差点遅延時間がわかったときに、交差点の未知の要因値（パラメータ値）を推定する方法を提案する。提案手法では、2段階の線形回帰により、要因と交差点走行時間との関係をモデル化する。この目的のため、要因値を様々な変化させた網羅的な交通流シミュレーションを実施し、データセットを取得している。さらに、この線形回帰モデルにおいて、プローブカー混入率（全車両数に対してプローブカーが占める割合）を変化させ、モデルの推定精度特性を解析している。

次章以降の構成は以下の通りである。まず2章で交差点における妨害要因に関連する先行研究について述べる。次に3章では提案手法について説明し、4章で提案手法の評価実験について述べる。最後に5章で本研究のまとめを述べる。

## 2. 関連研究

交差点において車両通行が妨害されている度合（以下、妨害度）を表現する指標には様々なものがあり、その推定

に関する研究は古くから行われている。Webster[8]は妨害度を表現する指標の一つである交差点遅延時間に関し、シミュレーション実験に基づいて式(1)に示す実験式を導出している。交差点遅延時間とは、車両が停止や加減速なく交差点を通過した場合の所要時間と実際の通過に要した所要時間との差である。

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left( \frac{c}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5\lambda} \quad (1)$$

ここで、 $d$ は平均遅延時間[s]、 $c$ は信号機のサイクル長[s]、 $\lambda$ はスプリット( $\lambda = g/c$ 、 $g$ は有効青時間[s])、 $q$ は交差点に流入する交通量[台/s]、 $s$ は飽和交通流率[台/s]、 $x = q/(\lambda s)$ は飽和度である。飽和交通流率とは、信号機が青になった後、円滑に車両が流れ始めた際の停止線における交通量である。飽和度は需要度とも呼ばれ、飽和交通流率に対する需要交通量の比率である。すなわち、Websterは交差点の遅延時間には主に交差点に流入する交通量と信号設定が影響することを示している。

この実験式は非飽和交通時（信号待ち車両が1回の青信号ですべて通過できる状態）の平均遅延時間算出に限ったものであるが、実際の信号設計もこの式に基づいて行われ、文献[7]では、交差点に流入する道路のレーン数や右左折レーンの有無のような交差点構造等を考慮して飽和交通流率を補正したうえで、Websterの実験式による遅延時間を最小化する信号パラメータを決定している。すなわち、遅延時間には交差点構造も影響することが示されている。

また、河合ら[9]は左折車両に影響を及ぼす歩行者・自転車の特性を定量化している。ここで着目された特性としては、単純な歩行者交通量だけでなく、その進行方向、速度、さらには歩行者用信号が青になる前に横断を開始するフライングについても挙げられている。

さらに、ZhangとTong[10]は右側通行における左折レーンの長さ（左側通行における右折レーンに対応）が短い場合に着目して交通容量のモデル化を行っている。交通容量の増加は妨害度の減少に寄与するため、結果として右折レーンの長さも遅延の要因と考えることができる。また、挙動の変化により遅延も変動すると考えられるため、左折時の二輪車巻き込み防止挙動に影響する路肩幅[11]、右折するタイミングに影響する右折時停車位置[12]なども遅延の一因となりうる。

一方、車両交通量をプローブカーデータを用いて推定する研究も行われている。Yoonら[13]はGPS座標のトレースのみから車両の停止時間を抽出してクラスタリング処理を行い、交通量が著しく低下している状態をリアルタイムに推測する手法を提案している。また、三輪ら[14]はプローブカーから得られた速度情報に基づき、OD交通量（ある出発地から目的地への交通量）を推定する手法を提案している。これらの研究では地点間の交通量を対象とし

ているが、個々の交差点の状況を細かく考慮しているわけではなく、交差点における妨害の影響により正しく推測できない場合も想定される。これに対し、本研究では、単一の交通量だけでなく、その対向車線や歩行者の交通量、信号設定情報など、様々な要因を対象に、より詳細に交差点環境を評価することで、交差点遅延と要因値との関係の推定精度向上を目的としている。

### 3. 提案手法

本手法では、まず、交差点における車両通行に対し、通過時間、遅延時間、総停車時間の3つの妨害度を表し、これらの妨害度へ影響を及ぼす要因を選定した。妨害度にはそれぞれ特徴があるが、妨害要因を抽出する上で最も利用価値が高い指標を検討するために3種類用意している。選定した要因とこれらの妨害度の関係についてモデル化を試みた。しかしながら、影響の度合いが大きい要因（以下、**大要因**）と小さな要因（以下、**小要因**）が存在する場合、小要因による影響の変動は、大要因による影響の変動により隠されてしまうため、これらを単一のモデルで表現することは困難であると予想される。そこで、各要因の影響度を分析し、大要因と小要因に分類した後、大要因のみの線形和により妨害度を表す第1のモデルと、大要因の値を固定した個々の状況における小要因の影響を表現する第2のモデルを構築した。さらに、第1のモデルで得られた妨害度を第2のモデルで補正するモデルを提案し、このモデルにプローブカーデータから得られた妨害度を適応させることにより、各妨害要因を抽出する手法を提案する。

#### 3.1 要因の選定

本研究では、交差点は2本の直線道路が互いに直交する四差路とし、9個の要因を選定した。以下、選定した要因と、妨害度への影響について説明する。

まず、進入経路の道路規模（以下、**進入道路タイプ**）および、その道路と交差する道路規模（以下、**交差道路タイプ**）が挙げられる。進入道路の規模が大きい、すなわちレーン数が多いと、ある車両が右左折のために停止したとしても、その後続車両はほかのレーンに移動することで停止することなく前進できるため、妨害度は下がると期待される[4], [7]。また、交差道路のレーン数が多い場合、横断歩道も長くなり、左折車が歩行者と交錯する場面が少なくなるため、この場合も妨害度は下がると考えられる。ただし、歩行者の交通量が多くなるにつれ、その減少度は低下する傾向にある[4], [7]。

また、道路に関する要因として、右左折それぞれの専用レーンの有無（以下、**左折レーン有無**、**右折レーン有無**）が挙げられる。このような専用レーンがある場合も先程の例と同様に、右左折のための停止が、後続直進車両の通行を妨害しないため、妨害度の軽減に寄与する[4], [7]。

信号に関する要因として、**全赤時間**（1つの交差点に存在する全信号機が赤を表示する時間）が挙げられる。信号設定には、サイクル長、スプリット等多くの要因が存在する[4], [7]が、より妨害との関係が大きい赤信号に関する要因である全赤時間を要因として選定する。

交差点を通過する車両交通量に関する要因として、進入経路における交通量（以下、**進入交通量**）およびその対向車線の交通量（以下、**対向車線交通量**）が挙げられる。流入交通量は式(1)に示した Webster の実験式にも現れる妨害度に対する基本的な要因である。また、右折車両は対向車線を直進する車両群の車両間隔に応じて右折タイミングを決定する[15]ため、対向車線交通量が大きくなると妨害度は増加する。さらに、交差道路を横断する歩行者の人数（以下、**歩行者交通量**）も要因として挙げられる。交差道路を横断する歩行者は、右左折車両と交錯するため、歩行者交通量が大きくなると妨害度は増加する[4], [7], [9]。また、通過する車両自身に関する要因として、車両が交差点に進入する際の速度（以下、**進入速度**）が挙げられる。進入速度は進入道路の制限速度である程度定まるものであるが、この速度が大きいと交差点内の移動時間が短縮される。ただし、交差点遅延時間への影響は少ないため、この要因は通過時間を評価する際に利用する。

#### 3.2 要因による妨害度のモデル化

大要因と小要因の妨害度への影響を同時に表現すると、小要因による小さな影響を表現することは困難であるため、大小の要因はそれぞれ別のモデルとして定式化することが好ましい。本研究では、まず、全要因の線形和により妨害度を表現し、その結果得られる各要因の係数値により、大要因か小要因のいずれかに分類する。

交差点を直進、左折、右折する際の妨害度を、全要因の線形和により表現した式は以下のようになる。

$$T_t = \sum_{i \in I} a_{t,i} \cdot x_i + b_t. \quad (2)$$

ここで、 $t \in \{S, L, R\}$  は、S:直進、L:左折、R:右折に対応するシンボルであり、 $T_S, T_L, T_R$  は直進右左折それぞれの妨害度である。 $I = \{IR, CR, LL, RL, AR, IQ, OQ, PQ, IV\}$  は要因の集合であり、進入道路タイプ (IR)、交差道路タイプ (CR)、左折レーン有無 (LL)、右折レーン有無 (RL)、全赤時間 (AR)、流入交通量 (IQ)、対向車線交通量 (OQ)、歩行者交通量 (PQ)、進入速度 (IV) の9要素を表す。 $\mathbf{X} = (x_i)_{i \in I}$  は要因の組を示し、 $\mathbf{A}_t = (a_{t,i})_{i \in I}$  がそれらの係数、 $b_t$  が定数項とすると、 $|a_{t,i}|$  がある閾値以上になる要因は大要因、ならない要因は小要因と表すことができる。これらの係数値、定数項は、シミュレーションデータを利用した線形回帰分析により算出する（後述）。以下、直進右左折それぞれの要因、小要因の集合を  $I_{t,M}, I_{t,m} \subset I$  ( $t \in \{S, L, R\}$ )

と表現する。

まず、大要因のみから妨害度を大まかに決定する第1モデルを構築する。このモデルは大要因の線形和により表現するもので、下記の式(3)のように $f_t(\mathbf{Y}_t)$ で表現する。

$$f_t(\mathbf{Y}_t) = \sum_{i \in I_{t,M}} a'_{t,i} \cdot y_{t,i} + b'_t \quad (3)$$

ここで、 $t \in \{S, L, R\}$ であり、 $\mathbf{Y}_t = (y_{t,i})_{i \in I_{t,M}}$ は大要因組の値を示し、 $\mathbf{A}'_t = (a'_{t,i})_{i \in I_{t,M}}$ がそれらの係数、 $b'_t$ が定数項である。これらについても同様に、 $T_t = f_t(\mathbf{Y}_t)$ としてシミュレーションデータを利用した線形回帰分析により算出する(後述)。

第1モデルは大要因による大まかな妨害度を推定するもので、小要因による影響は表現していない。この第1モデルにおいて、小要因による影響は、ある大要因組の値に対して、実際の妨害度との誤差に含まれると考えられる。そこで、ある大要因組の値が固定された時、この誤差、つまり小要因の影響を小要因の線形和で表現し、これを第2モデルとする。大要因組がある値 $\mathbf{Y}_t$ に固定されたときの誤差の線形和は以下ようになる。

$$T_t - f_t(\mathbf{Y}_t) = \sum_{i \in I_{t,m}} a''_{t,\mathbf{Y}_t,i} \cdot z_{t,i} + b''_{t,\mathbf{Y}_t} \quad (4)$$

ここで、 $T_t$ は実際の妨害度の値、 $\mathbf{Z}_t = (z_{t,i})_{i \in I_{t,m}}$ は小要因組の値を示し、 $\mathbf{A}''_{t,\mathbf{Y}_t} = (a''_{t,\mathbf{Y}_t,i})_{i \in I_{t,m}}$ がそれらの係数、 $b''_{t,\mathbf{Y}_t}$ が定数項である。これらについても同様に、シミュレーションデータを利用した線形回帰分析により算出する(後述)。得られた定数項 $b''_{t,\mathbf{Y}_t}$ は大要因により定まる定数値 $h_{t,\mathbf{Y}_t}$ 、残りの部分は小要因の影響値 $g_{t,\mathbf{Y}_t}(\mathbf{Z}_t)$ と定義し、第2モデルを $g_{t,\mathbf{Y}_t}(\mathbf{Z}_t) + h_{t,\mathbf{Y}_t}$ と表現する。以上を1つのモデル $F_t(\mathbf{X})$ にまとめると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} T_t &= F_t(\mathbf{X}) \\ &= f_t(\mathbf{Y}_t) + g_{t,\mathbf{Y}_t}(\mathbf{Z}_t) + h_{t,\mathbf{Y}_t} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{X} = (\mathbf{Y}_t, \mathbf{Z}_t)$ であり、全要因の値を示す。

### 3.3 シミュレーションデータに基づく要因解析

#### 3.3.1 シミュレーションデータの収集

本研究では、モデルを構築するためのデータとして、ミクロ交通シミュレータ Vissim[16]により得られたデータを利用した。シミュレーションでは、3.1節で選定した9個の要因について、表1に示した2段階のパラメータの組み合わせにより、多様な交差点環境を構築した。ただし、簡単化のため非幹線道路同士の交差、左折専用レーンを有する非幹線道路については構築していない。結果として、320通りの要因の組み合わせによる交差点環境を対象にシミュレーションを実施した。構築した全ての交差点はサイクル長100[s]の信号制御下にあり、右折レーンを有する

表1 要因の変動値

Table 1 Intersection Model Parameters.

要因	第1段階値	第2段階値
進入道路タイプ	非幹線*1	幹線*2
交差道路タイプ	非幹線*1	幹線*2
左折レーン有無	無	有
右折レーン有無	無	有
全赤時間 [s]	3	5
流入交通量 [台/h]	(非幹線) 300 (幹線) 750	(非幹線) 600 (幹線) 1500
対向車線交通量 [台/h]	(非幹線) 300 (幹線) 750	(非幹線) 600 (幹線) 1500
歩行者交通量 [人/h]	400	800
進入速度 [km/h]	30	50

リンクには右方向の矢印信号が5秒間有効となるように設定した。流入交通量と対向車線交通量の変動値は、過度の渋滞が起きない範囲から選択した。各交差点環境においてシミュレーション時間は1時間とし、その間に環境内に存在する車両の時刻、位置、速度、進行方向を1秒ごとに取得した。そして、進入リンクの始点から退出リンクの終点まで通過できた車両について交差点における妨害度を算出し、通過した交差点の要因とともに記録した。妨害度としては、交差点通過時間、交差点遅延時間、総停車時間の3種類の指標を用意した。交差点通過時間は進入時刻と退出時刻の差である。交差点遅延時間は、進入速度を維持したまま交差点を通過したと仮定した場合の時間と、実際の交差点通過時間の差である。総停車時間は、クリーブ現象によって前進する際の速度である5[km/h][17]を閾値と考え、車両がそれ以下の速度であった時間の総和である。以上により得られた直進右左折それぞれのシミュレーションデータを、妨害度 $T_{t,j}$ と要因値の組 $\mathbf{X}_j$ を合わせて $D_t = (T_{t,j}, \mathbf{X}_j)_{j=1}^{n_t}$  ( $t \in \{S, L, R\}$ )として表す。ただし、 $n_t$ は直進右左折それぞれの車両数である。

#### 3.3.2 大要因と小要因の分類

まず、シミュレーションデータに基づいて全要因と妨害度を線形回帰分析し、大要因と小要因に分類する。ここで、式(2)における係数の組 $\mathbf{A}_t$ と定数項 $b_t$ を求める際には最小二乗法を使用した。すなわち、直進右左折それぞれ $n_t$ 組のシミュレーションデータ $D_t = (T_{t,j}, \mathbf{X}_j)_{j=1}^{n_t}$ に対し、要因値の組 $\mathbf{X}_j$ を与えたときの式(2)による推定値 $\hat{T}_{t,j}$ と測定値 $T_{t,j}$ の誤差をすべての $j$ について2乗和をとり、その値が最小になる係数の組 $\mathbf{A}_t$ と定数項 $b_t$ を求めた。以後の線形回帰分析でも同様の手法を利用する。

分析において、各要因の値は第1段階値のときは0、第2段階値のときは1を取るよう設定した。また、分析は車両の直進右左折別、そして妨害度の指標別に行った。交差点通過時間に対する分析結果を表2に、交差点遅延時間

\*1 レーン数: 1本

\*2 レーン数: 3本

表 2 交差点通過時間に対する線形回帰分析の結果

Table 2 Linear Regression Analysis for Travel Time.

直進右左折	$t$	直進	左折	右折
定数項	$b_t$	235	231	228
進入道路タイプ	$a_{t,IR}$	-153	-149	-139
交差道路タイプ	$a_{t,CR}$	12.3	12.7	14.2
左折レーン有無	$a_{t,LL}$	-0.418	-2.39	2.54
右折レーン有無	$a_{t,RL}$	3.28	3.44	0.781
全赤時間	$a_{t,AR}$	10.4	10.5	12.6
流入交通量	$a_{t,IQ}$	29.2	29.6	34.7
対向車線交通量	$a_{t,OQ}$	0.108	0.294	17.0
歩行者交通量	$a_{t,PQ}$	-0.726	2.67	3.02
進入速度	$a_{t,IV}$	-39.6	-34.4	-41.9
決定係数	$R^2$	0.616	0.594	0.556

に対する分析結果を表 3 に、総停車時間に対する分析結果を表 4 に示す。分析結果には、回帰式の元データに対する当てはまりの良さを示す決定係数  $R^2$  も掲示している。決定係数は、元データの値を  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、それらに対応する回帰式からの推定値を  $\hat{y}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、元データの平均値を  $\bar{y}_i$  とすると、

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

と定義される。回帰式の当てはまりが良ければ元データの値と推定値の誤差は小さくなり、第 2 項が 0 に近づくため、決定係数の値は 1 に近いほど回帰式の当てはまりが良い。

これらの結果より、3 種類の妨害度指標について分析した各係数値の傾向がほぼ同様であることがわかる。唯一の違いとして、進入速度にかかる係数の絶対値は交差点通過時間に対する結果のみ大きくなっているが、交差点遅延時間・総停車時間に進入速度が関わらないことは定義からも明らかである。すなわち、妨害度を評価する指標として 3 つの中のどれを使用しても問題ないと言える。そこで、決定係数が最大のため最もシミュレーションデータを再現できており、プローブカーデータからの算出も最も容易な交差点通過時間を妨害度の指標として以後使用する。

また、各要因にかかる係数値の絶対値には大きな違いがあることがわかる。例えば、直進時の進入道路タイプの係数 ( $a_{S,IR}$ ) は -153 と非常に絶対値の大きな数値となっている一方で、左折レーン有無の係数 ( $a_{S,LL}$ ) はわずか -0.418 である。つまり、進入道路タイプが非幹線から幹線に変わるだけで交差点通過時間の推定値は 153 秒も減少するが、左折レーンの有無が変わっても通過時間は 1 秒も変動せず、左折レーン有無による影響は隠されてしまう可能性が高い。以後、表 2 の中で係数値の絶対値が 10 を超える要因を大要因、それ以外を小要因と区別して交差点通過時間のモデル化を進める。表 5 に直進右左折それぞれにおける大要因と小要因を示す。

表 3 交差点遅延時間に対する線形回帰分析の結果

Table 3 Linear Regression Analysis for Delay.

直進右左折	$t$	直進	左折	右折
定数項	$b_t$	137	133	128
進入道路タイプ	$a_{t,IR}$	-153	-149	-140
交差道路タイプ	$a_{t,CR}$	10.8	12.4	13.7
左折レーン有無	$a_{t,LL}$	-0.325	-2.34	2.57
右折レーン有無	$a_{t,RL}$	3.20	3.38	0.792
全赤時間	$a_{t,AR}$	10.1	10.4	12.5
流入交通量	$a_{t,IQ}$	28.2	29.0	34.4
対向車線交通量	$a_{t,OQ}$	0.0478	0.246	16.7
歩行者交通量	$a_{t,PQ}$	-0.742	2.52	2.90
進入速度	$a_{t,IV}$	-0.0284	4.14	-1.37
決定係数	$R^2$	0.583	0.571	0.517

表 4 総停車時間に対する線形回帰分析の結果

Table 4 Linear Regression Analysis for Sum of Stoppage Time.

直進右左折	$t$	直進	左折	右折
定数項	$b_t$	125	122	119
進入道路タイプ	$a_{t,IR}$	-135	-132	-125
交差道路タイプ	$a_{t,CR}$	9.61	11.2	11.7
左折レーン有無	$a_{t,LL}$	-0.226	-2.35	2.49
右折レーン有無	$a_{t,RL}$	3.51	3.84	0.892
全赤時間	$a_{t,AR}$	9.32	9.48	11.4
流入交通量	$a_{t,IQ}$	23.4	24.1	28.4
対向車線交通量	$a_{t,OQ}$	-0.0621	0.268	16.4
歩行者交通量	$a_{t,PQ}$	-0.691	2.11	2.51
進入速度	$a_{t,IV}$	-4.29	-3.28	-9.79
決定係数	$R^2$	0.568	0.559	0.509

表 5 大要因と小要因の分類

Table 5 Major and Minor Factors.

直進右左折	大要因	小要因
直進・左折	進入道路タイプ、交差道路タイプ、全赤時間、流入交通量、進入速度	左折レーン有無、右折レーン有無、対向車線交通量、歩行者交通量
右折	進入道路タイプ、交差道路タイプ、全赤時間、流入交通量、対向車線交通量、進入速度	左折レーン有無、右折レーン有無、歩行者交通量

### 3.3.3 大要因による線形回帰式の構築

次に、大要因による線形回帰式  $f_t(\mathbf{Y}_t)$  ( $t \in \{S, L, R\}$ ) を構築する。そのために、大要因のみを変数として線形回帰分析を行った結果を表 6 に示す。全要因からの結果である表 2 と、大要因のみからの結果である表 6 を比較すると、各要因に対する係数値はほぼ同様の値となっていることがわかる。また、決定係数の差異もほとんどなく、大要因のみでも同等のモデルを得られることがわかる。

表 6 大要因のみによる線形回帰分析の結果

Table 6 Linear Regression Analysis for Major Factors.

直進右左折	$t$	直進	左折	右折
定数項	$b'_t$	237	235	231
進入道路タイプ	$a'_{t,IR}$	-154	-152	-138
交差道路タイプ	$a'_{t,CR}$	12.3	12.7	14.2
全赤時間	$a'_{t,AR}$	10.4	10.5	12.6
流入交通量	$a'_{t,IQ}$	29.2	29.6	34.7
対向車線交通量	$a'_{t,OQ}$	-	-	17.0
進入速度	$a'_{t,IV}$	-39.6	-34.4	-41.9
決定係数	$R^2$	0.615	0.593	0.555

### 3.3.4 小要因による補正式の構築

さらに、大要因が  $\mathbf{Y}_t$  として固定されたときの小要因による補正式  $g_{t,\mathbf{Y}_t}(\mathbf{Z}_t), h_{t,\mathbf{Y}_t} (t \in \{S, L, R\})$  を構築する。そのために、各大要因を変動させながら算出した第 1 モデルによる推定値の誤差を小要因により線形回帰分析した。各大要因ごとの分析結果は紙面の関係上割愛するが、いくつかの補正値は固定した大要因に対してある傾向が現れることがわかった。例えば、直進で、進入道路タイプが幹線 ( $x_{IR} = 1$ ) かつ流入交通量が少ない ( $x_{IQ} = 0$ ) とき (以下、例示ケース) に、残りの大要因を

$$x = 4\bar{x}_{AR} + 2x_{IV} + \bar{x}_{CR} \quad (7)$$

と結合するとともに、新たな評価値  $x$  を導入し、この評価値の変化に対する定数項  $b''_{S,\mathbf{Y}_S} (= b'')$  の変化をグラフ化すると図 1 のようになり、明らかな線形関係が現れることがわかる。ただし、 $\bar{x}_i$  は  $x_i$  の 0 と 1 を反転する演算を意味する。回帰分析を行うと  $b'' = 1.9338x + 7.4905$  という式が得られ、決定係数も 0.9934 と非常に高い値である。これは、例示ケースのときのみ残りの大要因の間でさらなる線形関係が成立するものの、他の場合では成立しないために  $f_t(\cdot)$  では隠されて誤差となってしまったが、いま大要因を固定することで関係が再び現れたと考えられる。

また、このときの左折レーン有無に対する係数値 ( $a''_{S,\mathbf{Y}_S,LL}$ ) の各大要因に対する値を表 7 に示す。これより、係数値は非常に小さな値を取ることがわかるため、例示ケースのときには、左折レーン有無による誤差の変動はほぼ存在しないと言える。よって、この場合の左折レーン有無の係数値には代表値として 0 を与えることにする。

以上のような明らかな傾向の存在するものについては、前者のようなさらなるモデル化、後者のような代表値の導入により係数値を整理した。一方で、特に進入道路タイプが非幹線の場合や右折の場合にはこのような傾向がほとんど現れなかったため、当初の係数値 ( $a''_{t,\cdot}$ )、定数項 ( $b''_{t,\cdot}$ ) をそのまま利用した。これにより得られたモデルである式 (5) と、元となったシミュレーションデータから求まる決定係数を表 8 に示す。これより、表 6 に示した大要因のみによる線形回帰式の決定係数と比較してモデルの当てはま

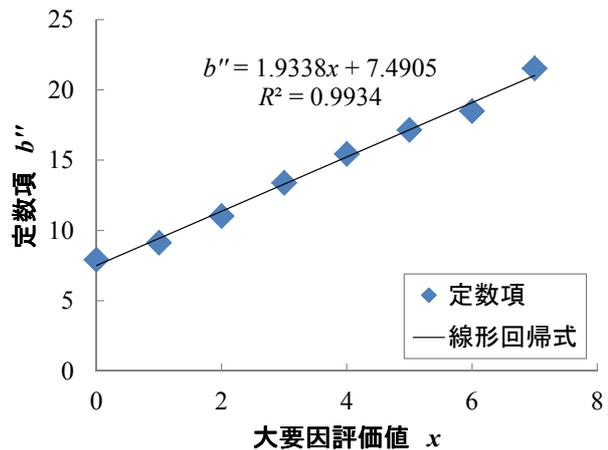


図 1 例示ケースにおける大要因評価値に対する定数項の変動とその回帰直線

Fig. 1 Constant Term vs. Major Factor at an Example Case.

表 7 例示ケースにおける左折レーン有無にかかる係数値

Table 7 Coefficient for Left Lane Existence at an Example Case.

交差道路タイプ	$x_{CR}$	全赤時間	$x_{AR}$	進入速度	$x_{IV}$	左折レーン有無の係数値 $a''_{S,\mathbf{Y}_S,LL}$
0	0	0	0	0	0	0.237
0	0	0	1	1	1	0.114
0	1	0	0	0	0	-0.274
0	1	0	1	1	1	-0.134
1	0	0	0	0	0	-0.269
1	0	0	1	1	1	-0.009
1	1	0	0	0	0	-0.291
1	1	0	1	1	1	-0.085

表 8 補正を加えたモデル式の決定係数

Table 8 Determinant Coefficient of Model after the Correction.

直進右左折	$t$	直進	左折	右折
決定係数	$R^2$	0.877	0.865	0.801

りが大きく改善されていることがわかる。

### 3.4 要因の抽出

以上で定めた交差点通過時間の要因によるモデル  $F_t(\mathbf{X})$  に基づき、プローブカーデータから要因 (表 1 に示した段階値) を抽出する方法を説明する。ただし、直進右左折すべてで小要因に属する要因はモデルの性質上抽出が困難と考えられるため、対象外とする。ここで想定するプローブカーデータは、少なくともデータ記録時刻、車両位置の座標、車両速度を含むとする。また、マップマッチング処理により通過した道路は識別できると仮定し、通過した道路の関係から直進右左折も判断できるとする。

まず、得られたプローブカーデータから、各車両について交差点通過時間を算出する必要がある。データを記録す

る時間間隔によっては、交差点領域に車両が存在した最初の時刻と最後の時刻の差異では不十分であるため、位置情報や速度情報などを利用して交差点領域の境界を通過した時刻を算出し、その差異を通過時間としなければならない。こうして導出した直進右左折それぞれの交差点通過時間の集合を  $P_t = (T_{t,j})_{j=1}^{n_t}$  ( $t \in \{S, L, R\}$ ) とする ( $n_t$  は直進右左折それぞれの交差点通過プローブカー台数)。以下、各  $T_{t,j}$  を観測値と呼ぶ。

ここで、進入道路タイプなどの地図情報から既知となる要因の集合を  $I_G \subset I$ , 値を抽出したい要因を  $k \in I$ , これら以外の要因の集合を  $I_V = I \setminus (I_G \cup \{k\})$  とする。抽出の方針は、抽出したい要因値  $x_k$  の値を 0, 1 それぞれに固定し、 $I_V$  に属す全要因値の組み合わせに対して、モデルから得た交差点通過時間の推定値と全観測値の誤差 2 乗和を算出し、その総和が小さい  $x_k$  を推定要因値とする。すなわち、 $I_G$  に属す要因の値の組を  $\mathbf{X}_G$  とすると、推定要因値  $\hat{x}_k$  は次式により求められる。

$$\hat{x}_k = \arg \min_{x_k \in \{0,1\}} \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{\substack{\mathbf{X}_V \in \\ \{0,1\}^{|I_V|}}} \{F_t((\mathbf{X}_G, \mathbf{X}_V, x_k)) - T_{t,j}\}^2. \quad (8)$$

ただし、右折の場合のみ大要因となる対向車線交通量の抽出においては、直進、左折車両に関する加算は行わない。

#### 4. 評価実験

本手法の有用性を評価するため、プローブカーデータから要因を推定する以下のような実験を行った。推定する要因は、地図情報からは分からないが、大要因に含まれる全赤時間、流入交通量、対向車線交通量の段階値とした。まず、モデル化に利用したデータとは別のシミュレーションデータを用意し、指定したプローブカー混入率に応じて車両をランダムに選択して、プローブカーデータを選択した。プローブカー混入率は 2, 10, 25, 50, 75, 100 [%] と変動させている。プローブカーデータとして収集する情報はモデル化の際と同じとした。また、通過した交差点の要因も正解データとして記録した。データ取得間隔は 3 [s] とし、データ収集時間はデータ量による比較をできるように 15 分, 60 分で変動させた。そして、進入道路タイプ、交差道路タイプ、左折/右折レーン有無、進入速度は既知であるとして 3.4 節に基づき推定を行った。さらに、推定した段階値 (0 または 1) が正解データと一致した割合を推定成功率として求めた。

本実験の結果を表 9 に示す。この中に示した平均台数とは、多様な要因を割り当てて実現した各交差点を通過したプローブカーの平均通過台数のことである。また、プローブカー混入率と推定成功率のグラフを図 2 に示す。これらより、収集時間 60 分の流入交通量については混入率 10 [%] 程度でも 80 [%] に近い成功率を達成できた。その後、

表 9 収集時間、プローブカー混入率に対する推定成功率  
Table 9 Probe-Car Data Acquisition Time and Mix Rate vs. Estimation Success Rate.

収集時間 [min]	プローブカー混入率 [%]	平均台数 [台]	推定成功率 [%]		
			全赤時間	流入交通量	対向車線交通量
15	2	7.49	59.7	65.7	53.7
15	10	36.36	65.0	68.4	61.9
15	25	90.91	65.0	71.9	62.5
15	50	181.84	66.6	72.5	70.0
15	75	273.93	65.6	72.5	71.6
15	100	365.05	64.7	72.8	68.8
60	2	30.44	64.4	73.4	62.5
60	10	150.50	64.7	79.1	69.4
60	25	376.75	65.3	80.6	73.8
60	50	752.53	62.8	81.6	75.6
60	75	1132.46	64.4	80.3	75.6
60	100	1509.76	64.1	81.6	76.6

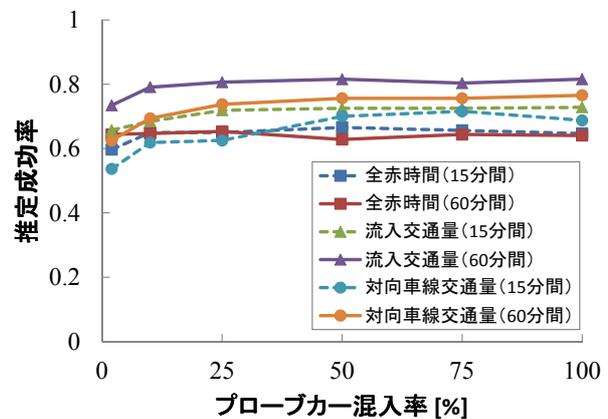


図 2 プローブカー混入率による推定成功率の変化  
Fig. 2 Estimation Success Rate vs. Probe-Car Mix Rate Trace.

混入率を上げても成功率の変動は少なく、80 [%] 付近が本モデルによる成功率の上限値であると推測される。また、収集時間が 15 分、混入率が 100 [%] の場合と収集時間が 60 分、混入率が 25 [%] の場合では平均プローブカー通過台数はほぼ同じにもかかわらず、推定成功率は収集時間が 60 分の方が良いことから、同じ台数のプローブカーが存在する場合、短時間に密集しているよりも、長時間に広く分布している方が推定成功率は向上することがわかる。

以上の結果に関して、まず、表 2 に示した線形回帰分析の結果、すなわち推定に利用した提案モデルにおける各要因の交差点通過時間への影響度について考察する。大要因の影響度についてはほぼ既存研究で示されている通りの結果といえるが、進入道路と交差する道路が幹線か否かを示す交差道路タイプが正の係数を持つことは既存研究とは異なる。この原因として、モデル構築用のシミュレーションシナリオにおける歩行者交通量が、2 段階とも大き過ぎた可能性が挙げられる。歩行者交通量が十分大きい場合、横

断歩道全体に歩行者が存在しやすくなるため、交差点のレーン数の増加により、左折待ち車両が直進車両、右折車両も妨害し、影響度が全体的に増加したと考えられる。歩行者交通量が小要因となったことも同様の理由と思われる。また、右左折レーンの有無が小要因となった原因は、右左折車の割合や専用レーンの長さなどのパラメータが影響していることも考えられる。ゆえに、これらのパラメータをさらに検討してシミュレーションを実行し、そのデータからモデルを構成すれば、さらに適合度を高められると考えられる。

次に、提案手法の有用性について考察する。本研究ではその要因の値が大きい小さいかの推定に限定したため、連続値としての交通量推定に利用するには不適切である。しかし、ある要因の第1段階値に理想値、第2段階値に異常値を設定してモデル化を行えば、交通状態が異常か否かの推定が、プローブカー混入率が低い場合でもある程度可能であると考えられる。成功率については、収集時間の増加によるデータ量増加に対しては向上する傾向が表れたため、数時間単位での交通調査では有用性を見込める。しかし、収集時間が同じ場合は、成功率が混入率にほとんど依存しておらず、成功率向上のためにはデータ量増加ではなくモデルそのものの改良が必要と考えられる。そのための手段として、更なる要因の追加や、要因を連続値としてモデル化する等が考えられる。また、本手法で利用したモデルは単純な線形モデルであり、推定時の計算量は比較的小さい。プローブカーデータは非常に大きなデータ量となり、リアルタイムでの利用を想定すれば計算処理は可能な限り抑えることが望ましく、この点は本手法の利点といえる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、交差点に関わる要因が車両の通過に与える影響をプローブカーデータに基づきモデル化するとともに、そのモデルを活用し、いくつかのプローブカーデータから、交差点通過を妨害する要因を推測する手法を提案した。本手法では、シミュレーション上で要因を様々に変化させ、その上を通過したプローブカーの交差点通過時間に基づき要因の影響度を評価し、その大小による2段階の線形回帰モデルを利用して要因と交差点通過時間の関係をモデル化した。さらに、この線形回帰モデルにおいて、プローブカー混入率を変化させ、要因を推定する実験を行った。その結果、複数の要因の異常値を低い混入率でも推定できる可能性を示すと同時に、更なる推定成功率向上のため、対象とする要因の追加やシミュレーションパラメータの調整等によるモデル改良の必要性も認識した。

今後は、右左折車の割合や専用レーンの長さといった要因の追加や、交通量の値を連続化する等の改良をモデルに行い、モデルの適合度を改善して要因の推定成功率向上を目指す。将来的には多様な要因を網羅したモデルを構築

し、信号設備だけでなく、リバーシブルレーンのように交差点構造が可変となっても柔軟に交通状況を推定し、交差点環境の改善のためにリアルタイムにフィードバックできるシステムへの応用が考えられる。

**謝辞** 本研究は文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業一次世代 IT 基盤構築のための研究開発「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012年度～2016年度)の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] 今井武, 柘植正邦, 菅原愛子: インターナビ・フローティングカーシステムと渋滞予測について, 国際交通安全学会誌, Vol.31, No.1, pp.39-45, (2006).
- [2] Honda | internavi (online): 入手先 (<http://www.honda.co.jp/internavi/>)(2012.10.19)
- [3] 秦康範, 鈴木猛康, 下羅弘樹, 目黒公郎, 小玉乃理子: 新潟県中越沖地震における通れた道路マップの提供とプローブカー情報の減災利用実現に向けた課題と展望, 日本地震工学会論文集, Vol.9, No.2, pp.148-159, 2009.
- [4] 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, オーム社 (2008).
- [5] 福田正, 遠藤孝夫, 武山泰, 堀井雅史, 村井貞規: 交通工学 第3版, 朝倉書店 (2011).
- [6] 交通工学研究会: 交通工学ハンドブック (2005).
- [7] 交通工学研究会: 改訂 交通信号の手引き, 交通工学研究会 (2009).
- [8] Webster, V.: Traffic Signal Settings, *Road Research Technical Paper*, No.39(1958).
- [9] 河合芳之, 鹿田成則, 片倉正彦, 大口敬: 信号交差点における左折交通に及ぼす横断歩行者及び自転車の特性と定量化について, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.4, pp.957-966(2003).
- [10] Zhang, Y. and Tong, J.: Modeling Left-Turn Blockage and Capacity at Signalized Intersection with Short Left-Turn Bay, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol.2071, pp.71-76(2008).
- [11] 兼田実, 日野泰雄, 稲垣具志, 白田鉄也: 左折時二輪車巻込事故防止のための路肩縮小対策に伴う交通挙動変化, 第27回交通工学研究発表会論文報告集, pp.17-20(2007).
- [12] 浜岡秀勝, 八重樫大樹, 萩原亨: 右折停止位置の後退による交差点右折時の安全性の評価, 第27回交通工学研究発表会論文報告集, pp.101-104(2007).
- [13] Yoon, J., Noble, B. and Liu, M.: Surface Street Traffic Estimation, *Proc. of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, Vol.11, No.13, pp.220-232(2007).
- [14] 三輪富生, 山本俊行, 竹下知範, 森川高行: プローブカーの速度情報を用いた動的 OD 交通量の推定可能性に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.2, pp.252-265(2008).
- [15] Ching-Yao, C.: Characterization of Driving Behaviors Based on Field Observation of Intersection Left-Turn Across-Path Scenarios, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.7, No.3, pp.322-331(2006).
- [16] PTV Vissim (online): 入手先 (<http://www.ptv-vision.com/en-uk/products/vision-traffic-suite/ptv-vissim/>)(2012.10.19)
- [17] 共和電業: くるまのクリーブ現象 その力と速度を測る, 共和技報, No.525(2003).