

交通容量低下を考慮した プローブカーデータによる突発事象検出手法

牛木 隆匡¹・日下部 貴彦²・Nguyen Xuan Long³・朝倉 康夫⁴

¹学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail:ushiki.t@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学助教 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail:t.kusakabe@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学研究員 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail: nxlong@plan.cv.titech.ac.jp

⁴正会員 東京工業大学教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail:asakura@plan.cv.titech.ac.jp

速達性が要求される高速道路では、交通事故などの突発事象による交通障害の影響が極めて大きい。それらの事象を速く、正確に検出するために観測データから自動的に突発事象の有無を判断する手法の構築が必要とされている。車両感知器から得られる観測データを用いた手法が一般的であるが、高い精度の検出には高密度に車両感知器を設置する必要がある、都市間高速や発展途上国などではコスト面で困難な点が多い。そこで、本研究では移動体観測であるプローブカーを用いた突発事象検出手法の提案を行った。本手法はプローブカーの旅行時間の絶対的变化と相対的变化を確認することに加え、突発的ボトルネックの交通容量低下を考慮し、プローブカーの通過台数を手法に取り入れることで、車両感知器を用いず一定の検出精度を得られることを示した。

Key Words : incident detection, probe vehicle, Travel time, microscopic traffic simulation

1. 序論

速達性が要求される高速道路では、交通事故に代表される突発事象による交通障害の影響が極めて大きい。そのため、それらの事象を「即座に」「正確に」検出し、利用者への情報提供や事故処理を行い、安全・円滑な走行を支援することが重要である。広義に考えれば、突発事象の検出は利用者の通報や交通管制用のCCTVカメラ画像の監視などの人の目により行うことが可能であるが、人による検出を支援・強化する自動的な検出システムを導入することで、より速い突発事象の検出が可能となると期待されている。

従来の突発事象検出手法を分類すると、定点に設置されている観測機器を用いる検出手法とプローブカーなどの移動体による観測による検出手法に大別することができる。定点観測機器を用いた検出方法では、都市高速道路をはじめとした高速道路では密に設置されている車両

感知器（トラフィックカウンタ）から得られる交通量やオキュパンシなどの交通状態の時間的・空間的な変化を捉えることで検出を行う手法が開発されている。例えば、車両感知器により得られた交通流状態を累積データから推定した閾値と比較し検出を行う手法として、Payne¹⁾のCalifornia algorithmやLin et al.²⁾のUCB algorithmなどがある。また、累積データから交通流変数の確率分布を推定し、現在の交通流変数が確率分布に従うか否かを判断し検出を行う手法としてDudek et al.³⁾のSND algorithmなどがある。定点での検出方法では、車両感知器などの定点での観測装置が整備されている必要があり、比較的交通量が少なく定点観測機器の設置間隔が広い都市間高速道路などでは、高精度な突発事象の検出や発生場所の特定は難しいといえる。

プローブカーなどの移動体観測による方法は、自動車に搭載されたGPS等によって得られた位置情報を通信端末により管制システムにロードすることにより、車両一

台一台の走行データをもとに検出を行う方法である。この方法では、定点での観測機器が必要なく、都市間高速道路や発展途上国の道路など車両感知器の整備がされていない道路での突発事象検出に対応できると期待される。一方、プローブカーの普及率によっては、車両感知器から得られる集計値（例えば交通量、交通密度）を得ることは難しいことから、既往の定点観測による突発事象検出手法をそのまま適用することはできないと考えられる。また、位置情報などの各車両の走行データは大量のデータとなる一方で、通信網や演算機器の制約によりすべての車両の秒単位の情報を瞬時に管制システムで処理することは必ずしも容易ではないと考えられる。このことから、プローブカーの混入率だけでなく、プローブカーで観測可能な情報の内どのような情報を車載機器によって処理を行い、どのような方法で通信し、どのような処理を管制システムで行うかというプローブカーのシステムの構成によっても、適用できる手法や検出の精度に影響がでると考えられる。近年、プローブカーによる既存の突発事象検出手法はいくつかの手法が提案されている⁵⁶⁾が、個々のプローブカーによる検出処理と管制センターでの処理の双方を一体的にとらえた枠組みは十分に議論されていない。

本研究の目的は、プローブカーによる突発事象検出手法の枠組みと既往の検出手法を整理し、プローブカーでの検出処理と管制システムでの検出処理を組み合わせたプローブカーによる突発事象検出手法を構築することである。

2. プローブカーによる突発事象検出手法の整理

本章では、突発事象によって生じたボトルネック(BN)を検出するために必要な観測の要件をまとめたのち、突発事象検出のためのプローブカーシステムの類型をまとめ、既往のプローブカーによる突発事象検出手法について整理する。

(1) 突発事象によるBN検出のための要件の整理

自然渋滞と突発事象による渋滞は、どちらもBN部の交通容量が上流部の需要に対して小さい場合に発生することが共通しており、突発的事象によって発生したBNの検出を行うためには、自然渋滞の場合と同様、BN上流部・下流部の速度や旅行時間を比較することで判別することが可能であると考えられる。しかし、これらの性質は自然渋滞と突発事象で共通した性質であるため、BN上流部・下流部の速度や旅行時間のみからそのBNが突発的に発生したものか、サグ等の自然渋滞かを判別することは容易ではないと考えられる。

自然渋滞と突発事象による渋滞の相違点に着目すると、自然渋滞は、BN上流部での需要がBN容量を超過することを原因として発生する一方で、突発事象による渋滞は、需要に変動がない場合でも、突発事象を原因としてBN容量が低下することで発生するという違いがある。このことから、BN部の交通量の変化から突発的に発生したBNを判別できると考えられるが、このためには、複数台のプローブカーがBNを通過したという情報が必要となり、一台のプローブカーのみでは判別ができない。また、自然渋滞では、渋滞発生地点がサグなどを原因としているため、特定の区間・時間で発生することが多いと考えられるが、突発事象を原因とする場合には、区間や時間はその事象に依存するために普段と異なる地点にBNや渋滞が発生していることが判別できれば、突発的なBNの発生を検出できる可能性がある。この場合の検出には、普段からBN地点を通過するプローブカーによるデータが必要となる。

以上より、突発事象を原因とするBNを検出するための要件には、少なくとも、

- 1) BN直下流部の交通量低下が観測されたか
- 2) 普段とは違う場所にBNが存在するか
- 3) 速度などの交通状態の変化が普段と異なるか

のいずれか1つを検出する必要があると考えられる。1)については、同時に走行している複数台のプローブカーの情報が必要で有り、2)、3)については、一台のプローブカーの情報のみからでも検出を行えるが、同じ区間を過去に通過したプローブカーの情報など、普段の状況を得るための観測が必要がある。

(2) プローブカーによる突発事象検出システムの類型

プローブカーによる突発事象検出システムを構築する際には、各プローブカーが速度などの観測を行い、それらの観測情報を通信網を用いて管制システムにアップロードするというプローブデータのフローを考慮して、どのような処理をどの段階で行うかについても検討する必要がある。定点観測による方法では、定点で集めたデータをすべて管制システムで処理して検出するものであったが、プローブカーによる方法では、個々の車両の車載機器により高い時間解像度で詳細な情報が観測できる。一方、通信網や管制システムの処理能力の制約からそれらのデータすべてを転送した上で処理を行い、突発事象を検出することは不可能であったり非効率であったりする。例えば、プローブカーでは、容易に1秒毎の速度や加速度のデータを得ることができるが、それらのデータすべてをリアルタイムに転送し、瞬時に突発事象の検出を行うことは容易ではないと考えられる。そこで、プローブカーでの車載機器で観測できる大量のデータを活かしつつ、管制システムに伝送するデータ量を抑制するた

めには、車載機器で行う処理と管制システムで行う判別処理をそれぞれ想定した上で検出手法を構築する必要がある。また、プローブカーから管制システムに情報が送信される際の通信手段によっても、よりよい検出手法が異なると考えられる。例えば、携帯電話端末を用いてデータの転送を行うのであれば、一定の時間間隔でプローブカーからデータを送信することが可能である。これはDSRC⁴⁾を用いるITSスポットのシステムのように定位置でプローブカーからのデータが送信されるものとは異なり、通信手段の違いによっても適用可能な手法が異なると考えられる。

(1)で述べたように、BNは個々のプローブカーで観測される速度などの情報から検出できるが、そのBNが突発事象によるものであると判断するためには(1)に示した1)~3)のいずれかの判別の処理が必要となる。BN検出と突発事象によるBN検出の2段階の処理が必要となると考えられることから、プローブカーを用いた突発事象検出手法は、図-1のように分類できる。

分類Ⅰは、すべての処理をプローブカーに行わせる手法の区分である。個々のプローブカーが自車で観測した速度や加速度などの情報を処理して突発事象によるBNを検出し、管制システムに突発事象の検出場所と時刻を送信する。この手法では、突発事象によるBNと判別する際に他のプローブカーの情報を用いることができないため、(1)で示した1)~3)の条件のうち、2)または3)の条件を用いて突発事象によるBNであると判断する必要がある。つまり、通常時の走行に関する情報を各プローブカーが保有する必要がある。この手法では、すべての検出処理をプローブカーの車載機器で行うことから、管制システム側へ転送するデータは、最低限、位置情報と検出結果のみでよく、分類Ⅱ、Ⅲと比べて管制システムで収集する情報量は少なくなる。その一方でそれぞれのプローブカーで検出の処理が完結することから、分類Ⅱ、Ⅲと比較してプローブカーの混入率に依存しない方法となることが期待できる。

分類Ⅱは、BNの検出処理をプローブカーに行わせた上で、突発的なBNであるかどうかについては管制システム側で判断する方法である。個々のプローブカーが速度や加速度などの観測値からBN検出を行い、管制システムに、検出・非検出の結果と位置情報、時刻を送信する。この方法では、プローブカーで得られる高精度の大量のデータを扱う部分は、プローブカーの車載機器で処理を行い、検出結果や速度、位置情報などの情報を管制システムに転送し、管制システムで、突発事象によるBNであるかどうかの判断を行うものである。この方法では、(1)で述べた1)のような、複数台のプローブカーの情報が必要な処理を管制システムで行うので、分類Ⅰのような各車両の過去情報に依存しない方法の構築が可能

である。集計データとして、感知器データ等を用いることも想定でき、既往の定点データだけの検出手法をプローブカーからのBN検出結果を情報を用いて補正する手法もこの分類になる。

分類Ⅲでは、個々のプローブカーからは、通常のプローブ情報を定期的に転送するのみで、管制システム側ですべての検出処理を行うものである。この方法では、通信網や管制システムの性能によって利用できる情報量は制限され、車両で観測される情報のうち限定的な情報しか利用できない。しかし、管制システムで、集計することによって、これまでの定点での検出方法を適用することも可能であると考えられる。

(3) 移動体観測による突発事象検出手法の既存研究

Petty et al.⁵⁾はプローブカー個々の加速度と速度を用いて検出を行う手法を提案した。この手法は、突発事象による渋滞を経験し、低速で走行したプローブカーは突発的ボトルネックを通過後、自由流速度まで加速することを利用し、その加速度の変化とその時の速度が事前に設定した閾値を超えた場合に突発事象が発生したと見なす。加速度や速度の詳細な変動を確認し、すべての処理をプローブカーに行わせる手法であるため、図-1の分類Ⅰの手法に属される。図-2に手法の概念を示す。

この方法ではプローブカーのデータ蓄積期間を設けず、

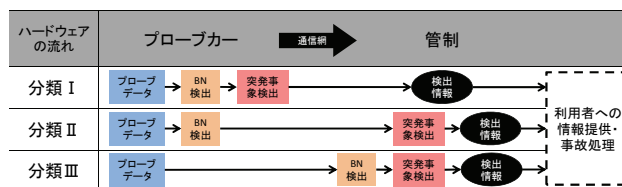


図-1 手法の分類

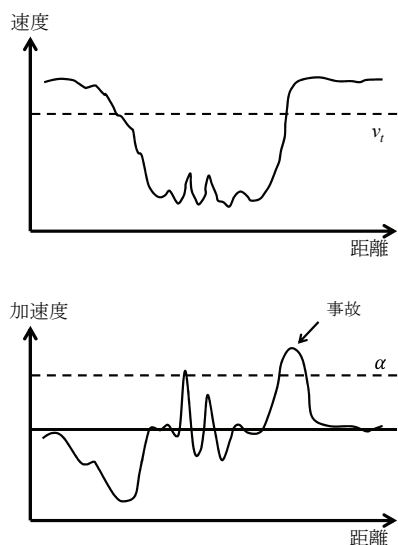


図-2 Petty et al.の手法

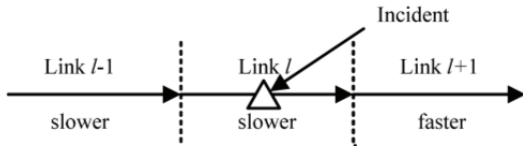


図-3 Zhu et al.による手法（空間的な特徴量の変化）

プローブカー1台で判断をするため、検出にかかる時間は速いが、突発事象と自然渋滞との区別が難しく、正しく検出できたのは全体の約5割未満と報告されている。

Li et al.⁶⁾は旅行時間の急激な変化を用いて検出を行う手法を提案した。この手法では、旅行時間の計算間隔（データの蓄積間隔）を5分と設定し、あるプローブカーの*i*番目の旅行時間 T_i と、 $l-1$ 番目の旅行時間 T_{i-1} と T_i との差分 $DT_i = T_i - T_{i-1}$ の2つの特徴量を用い、同様の過去のデータとの比較を行う。BN検出、突発的BNは複数台のプローブカーの集計値を用いるため、図-1の分類Ⅲに属する。

Zhu et al.⁷⁾は速度の時間的、空間的な変化を用い、そこから外れ値の抽出を行う手法を提案した。データの蓄積期間を定めるとある時間帯*t*、区間*l*におけるプローブカーの平均速度を $v(t, l)$ とする。空間的な変化は、突発事象発生区間よりも下流の区間では平均速度が上昇することから、その特徴量を $\Delta v_{down}(t, l) = v(t, l+1) - v(t, l)$ という速度の増加分を使って表す（図-3参照）。時間的な変化は、突発事象が発生した区間の平均速度は減少することから、その特徴量を $dv(t, l) = v(t, l) - v(t-1, l)$ という速度の減少分を使って表す。さらにこれらの特徴量から得られた特徴量ベクトルをフィルタリングし、過去データから得られる閾値により外れ値を抽出し、検出を行う。

3. 本研究の手法

(1) 手法の概要

本研究では、2章1節で述べた、分類Ⅱに相当する突発事象検出手法を構築する。分類Ⅱでは、個々のプローブカーで走行した区間でのBNの存在を判別し、管制システムでそのBNが突発的なものかどうかを判別するものである。本研究で構築する手法では、個々のプローブカーは、あらかじめ決められた走行区間毎の旅行時間の変化によりBNを判別するもので、判別結果を区間毎に管制システムにアップロードすることを想定する。管制システム側では、個々のプローブカーによってBNと判別されたリンクについて、プローブカーの通過台数を集計し、BN直下流部の交通量の変動を算出することで、BNが突発事象の発生によるものかサグなどの通常の要因によるものであるかを判別する。

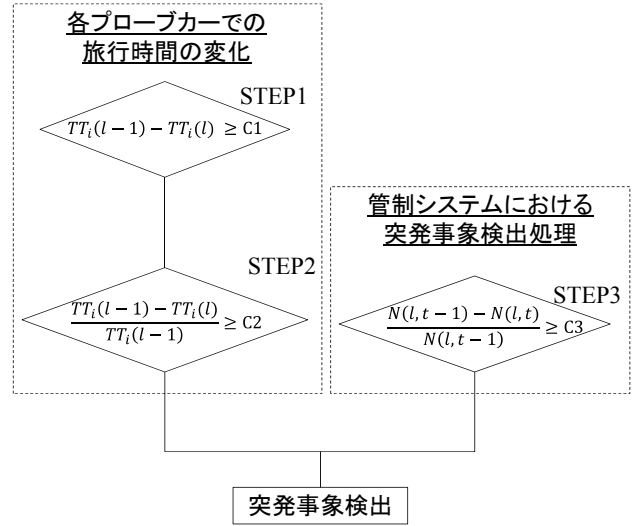


図-4 本手法のアルゴリズム

(2) 手法

本研究のプローブカーは、あらかじめ設定した区間であるリンクを通過し終える毎に、そのリンク番号とBNの検出結果の情報を管制システムと通信を行ってアップロードする。この際、リンク長は、各リンクで固定値とし、数百m程度とすることを想定している。各プローブカーは検出結果について、検出あり・なしのどちらの場合も管制システムにアップロードする。管制システム側では、あらかじめ設定したタイムステップ*t*毎に、プローブカーの通過台数を集計し、これを用いて突発事象によるBNの検出を行う。

図-4に本研究で構築するアルゴリズムを示す。この図の各記号は、以下のように定義する。

l : リンク番号であり、リンク*l-1*はリンク*l*の直上流のリンクを示す。

t : 通過台数の集計に用いるタイムステップ

$TT_i(l)$: プローブカー*i*のリンク*l*の旅行時間

$N(l, t)$: リンク通過*l*の台数であり、タイムステップ*t*にリンク*l*から出たプローブカーの台数とする。

また、*C1*, *C2*, *C3*は、閾値であり、全リンクで共通のものを経験的に与えるものとする。このアルゴリズムは、

STEP1 : 各プローブカーで $TT_i(l-1)$ と $TT_i(l)$ の差を計算し、閾値*C1*と比較し、*C1*より大きい場合はSTEP2へ進む。

STEP2 : 各プローブカーで $TT_i(l-1) - TT_i(l)$ と $TT_i(l-1)$ の比を計算し、閾値*C2*より大きい場合は、BNありと管制システムに報告し、小さい場合はBNなしと報告する。

STEP3 : 管制システムで $N(l, t-1) - N(l, t)$ と $N(l, t-1)$ の比を計算し、閾値*C3*と比較する。

STEP4 : STEP2を満たすプローブカーが存在し、STEP3

で算出した比が閾値C3より大きい場合は、突発事象の検出とする。

という構成になっている。

STEP1とSTEP2は、BNを検出することを目的としている。STEP1は、プローブカー*i*が、リンク*l* - 1とリンク*l*を通過した際にかかった旅行時間の差を計算することで、空間的な速度の変化からBNを検出することを意図したものである。これは、BNを含むリンクは渋滞流により旅行時間が大きくなり、その区間を抜けた後は、自由流になることから速度が回復し旅行時間が小さくなることを期待している。STEP2は、STEP1で用いた空間的な旅行時間の相対値的な変化を確認する。旅行時間の絶対値的な変化と相対値的な変化を確認する理由は、渋滞中の疎密波などの影響で、旅行時間の絶対値が大きくなっている場合には旅行時間の差も大きくなることも想定されるため、相対値的な変化でも判別することで、自由流への回復をより確実に捉え、BNを検出することを意図している。

STEP3では、BN下流のリンクに着目し、期間*t*と1つの期間*t* - 1に通過したプローブカー台数の相対的な変化を確認する。2章で述べた通り、突発事象によるBNは交通容量が低下するためBNの下流の地点で交通量が減少するため、これを判別することで、突発事象によるBNかどうかについて判断を行うものである。

STEP3では集計期間*t*を設定しているが、この集計期間は、プローブカー混入率によって調整する必要がある。プローブカー混入率が高ければ高いほど、断面の通過台数が多くなり、集計期間が短くてもBN直下流部のプローブカー台数の変化をとらえることができると期待される。プローブカーの混入率が低い場合には、集計期間が短すぎると、集計するのに十分なプローブカーの数が得られず、誤検出が増えると考えられる。また、リンク長はできるだけ短くする必要があるが、短すぎると旅行時間を得る際に加減速による影響を受けやすく、管制のデータ処理の負荷も大きくなる。

4. シミュレーションによる評価方法

突発事象検出手法の精度を確認するため、シミュレーションを用いた検証を行う。シミュレーションでは、TSS - Transport Simulation Systems 社のマイクロ交通流シミュレータAIMSUN7.0⁸⁾を用いた。(1)では、検証に用いるシミュレータの設定について示す。このシミュレータ上で、突発事象を模した車線閉塞を行い、これらの車線閉塞に対する検出結果を(2)で定義する評価指標を用いて(3)に示す手順で検証する。

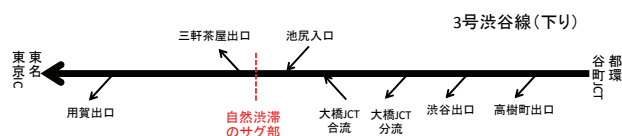


図-5 首都高速3号渋谷線路線図

(1) シミュレータの設定

a) 対象路線

本研究では、首都高速道路3号渋谷線下り、谷町JCT～用賀ICまでの11.7 km をシミュレータで再現した。対象の道路区間を図-5に示す。

対象区間は、2車線であり、日中の交通量が3000～4000台/h、制限速度は全区間60km/hである。池尻入口・三軒茶屋出口間の6.0 km付近にはサグがあり、深夜を除く多くの時間帯で自然渋滞が発生している。

本研究では、実際の平常時の車両感知器のデータを用いてシミュレータのキャリブレーションを行い、2012年8月平日の交通状況を再現した。実データとの適合度を表す平方平均二乗誤差率(RMSPE: Root mean squared percentage error)は0.33、相関係数は0.94であり、十分な再現性が確保できている。

b) シミュレータ上での突発事象の設定

a)に示した路線に対して、シミュレータAIMSUN7.0の突発事象発生モジュールを用いて、仮想の突発事象を発生させる。本研究では、15回の試行を行い、それぞれで発生場所、発生時刻の異なる1件の事故を発生させ、計15件の仮想の事故を用いて分析を行う。事故の継続時間は60分、車線閉塞は2車線ある内の左側車線で長さ100mとする。図-6に現況再現した対象路線の速度コンター図と発生させた事故の位置と時刻を示す。

c) シミュレータ上でのプローブカーの設定

プローブカー混入率は10%とする。旅行時間の算出や突発事象の判定を行うリンク長は200mとする。また、本手法のSTEP3で用いる集計期間は5分とする。

(2) 評価指標

本研究では突発事象検出手法の精度を評価する指標として正検出数と誤検出数を用いる。

正検出数は期間中に発生した突発事象の中で正しく検出された事象数である。本研究では前述の通り15件の仮想の突発事象を1日1件で発生させるため、正検出数は最大で15件となる。

誤検出数は検出手法によって突発事象の検出と判断されたものの内、実際には突発事象が発生していなかった数である。

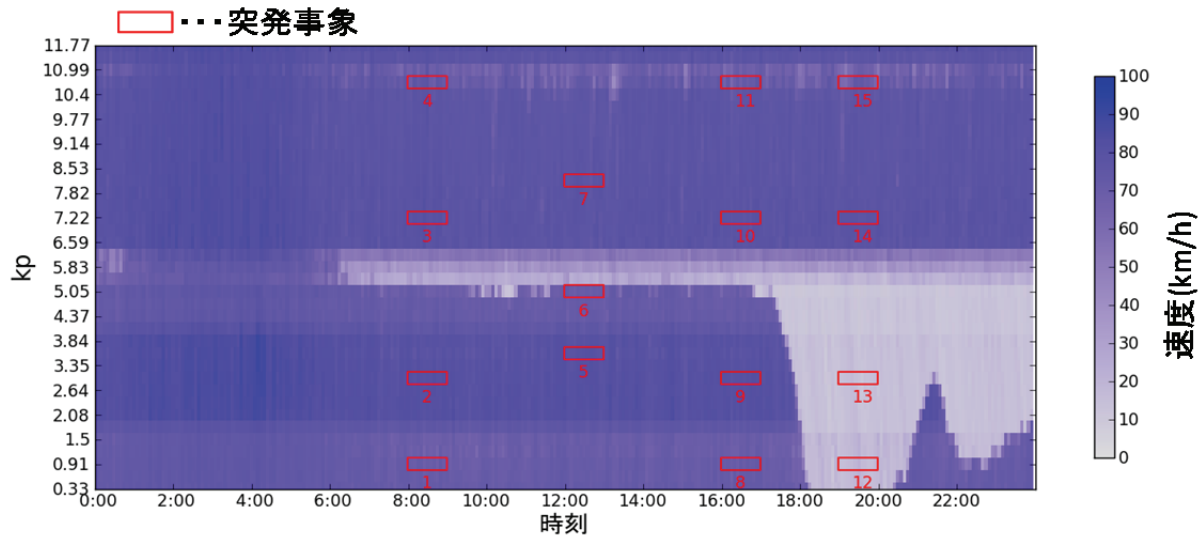


図6 現況再現したネットワークの速度コンター図と仮想突発事象の時間及び位置

正検出数は多く、誤検出数は少ないのが理想であるが、正検出数と誤検出数には関係があり、一般的に正検出数が多くなるほど誤検出数も多くなると想定されるため、双方の指標について評価を行う。

(3) 評価の手順

本研究の手法は、以下の(1)～(4)に示す手順で、評価する。

(1)では、検出手法のパラメータによる検出精度を評価するため、本手法のパラメータであるC1, C2, C3の3つの閾値を変化させ、正検出数と誤検出数の関係を確認する。閾値は、 $C1=\{30, 40, \dots, 140\}$, $C2=\{0.1, 0.2, \dots, 0.9\}$, $C3=\{0.1, 0.2, \dots, 0.9\}$ のすべての組み合わせで行う。手法の精度については3つの評価すべきポイントがある。1つ目は「嘘はあるが取りこぼしがない検出」、つまり最も正検出数が多く、最も誤検出数が少ない場合の閾値の組み合わせである。2つ目は「取りこぼしはあるが嘘がない検出」、つまり正検出数が1件以上あり、最も誤検出数が少ない場合の閾値の組み合わせである。また、誤検出数が多い場合、手法の信頼性が失われてしまう可能性があるため、1時間に誤検出数が1件以下（一日の平均誤検出数が24件以下）を信頼性が高いものと定義し、その中で最も正検出数が多い場合の閾値の組み合わせを「信頼性の高い検出」とする。

(2)では、閾値C1, C2, C3が精度に及ぼす影響について詳細に分析を行う。分析では、本手法の「各プローブカーでの旅行時間の変化」、「管制システムにおける突発事象検出処理」という2つのプロセスについてそれぞれ詳しく分析する。それぞれのプロセスに対して、閾値を変化させ、誤検出数及び正検出数を算出する。誤検出数の算出に関しては、本手法のパラメータ特性を確認するため、シミュレータにより仮想の突発事象を発生させていない状態に対して評価を行う。

(3)では、本手法がどのような場所に対して誤検出を

発生させやすいかを確認するため、実験で用いたネットワークにおける区間別の検出状況について分析する。

(4)では、本手法と既存の手法との比較を行う。既存の手法として、車両感知器による突発事象検出手法のPayne¹⁾のCalifornia algorithmを用いる。この手法は、定点で観測された集計値であるオキュパンシの時間的・空間的变化を3つの閾値を用いることで検出を行う手法であり、既存の研究においても精度の比較の際にも多く引用される手法である。

5. シミュレーションによる評価結果

(1) 本手法の精度

図-7は、本手法の正検出数と誤検出数を、様々な閾値の組み合わせで評価したものである。なお、横軸は平均誤検出数であり、各突発事象の検出の際に発生した誤検出数（一日に発生した誤検出数）の平均である。この図から全体の傾向として、誤検出数の増加に伴い正検出数が増加するという関係が見てとれる。詳細に精度を見ていくと、上記で定義した「嘘はあるが取りこぼしがない検出」を達成する閾値は、 $(C1, C2, C3) = (40, 0.5, 0.1)$ で正検出数が15件であり、一日平均113件の誤検出が発生し、1時間に4～5件の誤検出があったことになる。また、「取りこぼしはあるが嘘がない検出」を達成する閾値は、 $(C1, C2, C3) = (30, 0.2, 0.6)$ で、正検出数は1件、一日平均4件の誤検出が発生した。さらに「信頼性の高い検出」を達成する閾値は、 $(C1, C2, C3) = (60, 0.4, 0.3)$ であり、正検出数が10件、誤検出数が24件であった。なお、以降の分析においては、「信用性の高い検出」を達成する閾値を本手法の閾値として採用する。

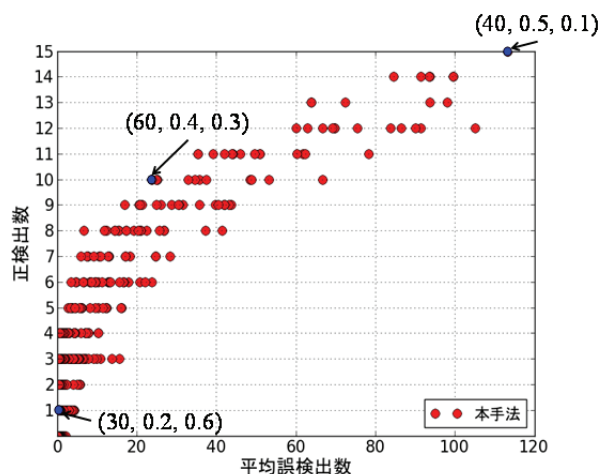


図-7 正検出率と誤検出率との関係

(2) 閾値の影響

図-8及び図-9は閾値C1, C2の変化による誤検出数と正検出数との関係を示したものである。ここから, C1, C2ともに大きくなればなるほど誤検出数と正検出数は減少する傾向にあることがわかる。特にC2の変化に関しては, 0.1の増加に対して誤検出数, 正検出数ともに件数が約1/2に減少しており, 閾値に対する反応が大きく, 小数点第2位以下のより細かな値の設定が必要であることが示唆される。

図-10及び図-11は, 閾値C3の変化による誤検出数と正検出数との関係を示したものである。図-10は, 手法のSTEP3のみを用いて判別したものであり, 図-11は, STEP1, 2, 3を組み合わせで検出したものである。これらの図より, STEP1, 2の検出の時と同様に, 誤検出は閾値の値が大きくなるにつれて減少する傾向にあることがわかる。図-10ではC3が0.5~0.6に変化したとき正検出数が大きく減少しているが, これは発生させた仮想の突発事象が2車線道路の片側1車線を閉塞させ, BN容量を1/2に低下させたためであり, C3に関しては閉塞車線数などの突発事象の規模によって精度が大きく変化する値が変わることが考えられる。また, 閾値 (C1, C2) = (60, 0.4) を用いてSTEP1, 2で評価した結果, 誤検出数は約167件, 正検出率は13件という結果であったが, 図-11のようにSTEP3を導入することにより, 正検出数をそれほど減少させず, 誤検出数を大きく減少させることがわかった。本研究ではBN容量の低下を一定にして実験したため, 様々な規模の突発事象についてC3の影響を評価することはできなかったが, STEP3のBN直下流部の通過台数を確認することが有効であることがわかった。

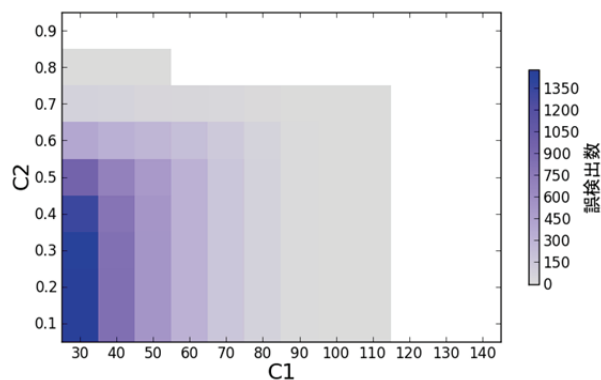


図-8 閾値C1, C2の変化による誤検出数の変化

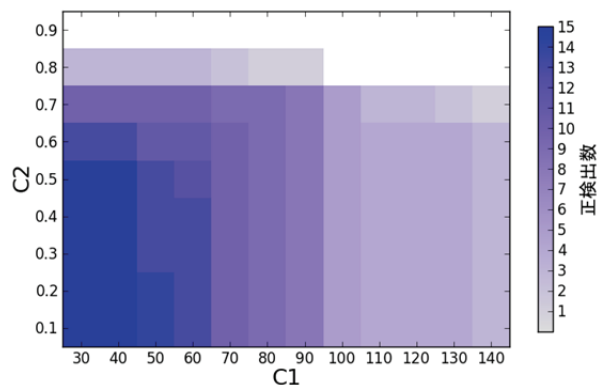


図-9 閾値C1, C2の変化による正検出数の変化

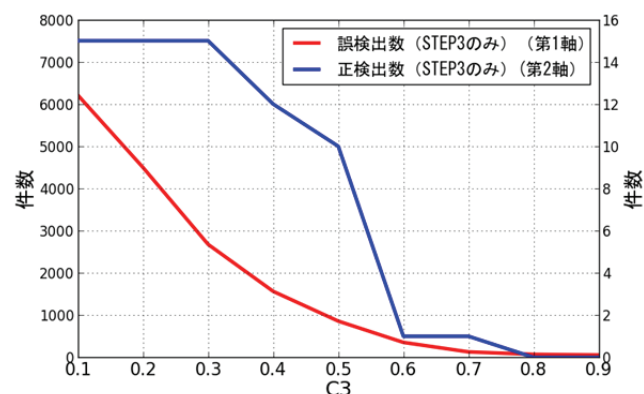


図-10 閾値C3の変化による誤検出数と正検出数の関係
(STEP3のみ適用した場合)

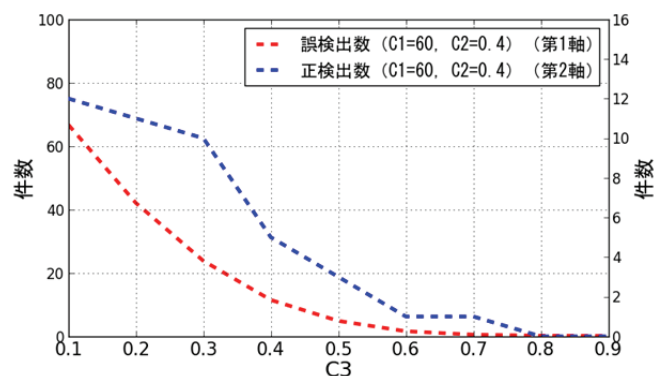


図-11 閾値C3の変化による誤検出数と正検出数の関係
(C1, C2を固定した場合)

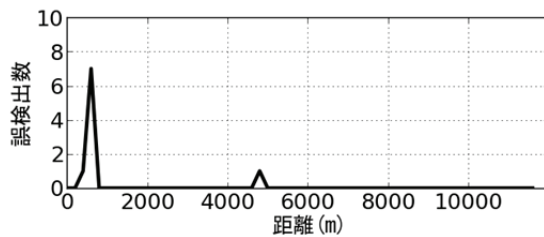


図-12 リンク別誤検出数

(3) 区間別の評価

図-12は(1)で得られた、 $(C1, C2, C3) = (60, 0.4, 0.3)$ を本手法の閾値に採用し、誤検出数をリンク別に確認したものである。ここから、谷町JCTから0.6km付近及び4.8kmで誤検出が多いことがわかる。0.6km付近の誤検出では、この区間が谷町JCTから流入する車両が速度を上げていく区間であるため、旅行時間に差が出やすくなってしまい、誤検出になったと考えられる。後者は、サグ部直上流に近く、渋滞の末尾の延伸によって旅行時間が大きく変動する区間であるため、誤検出が発生したと考えられる。これらの区間に関しては、事前に誤検出数が増えることが予想できるので、予め個別の閾値を設定しておくなどの対策の必要がある。

(4) 他の手法との比較

本手法と既存の手法との比較を行う。図-13は(1)と同様に様々な閾値で正検出数と誤検出数を算出したものである。ここから、正検出率が8件程度の場合には、本手法もCalifornia algorithmも同程度の誤検出数であり、5件以下の程度の誤検出になっている。しかし、本研究の手法の方が、正検出率が高くなるにつれて、同じ正検出率を出すための誤検出数が増える。これは、実験に用いた首都高速道路のような都市内高速では車両感知器が高密度で設置されており、高い精度でオキュパンシの変化を捉えられるため、California algorithmのような車両感知器を用いた手法の精度が高い結果になったと考えられる。本研究のプロブカーの混入率は10%であるが、このようなプロブカーのみの情報で、車両感知器が密に設置されている区間の半数程度の突発事象については、同等の精度で検出可能であることを示唆している。

6. 結論

本研究ではプロブカーを用いた突発事象検出手法として、旅行時間の空間的な変化と突発的BN直下流のプロブカー通過台数の時間的な変化を確認し検出を行う手法を提案し、その精度をシミュレータ実験で検証した。

プロブカーのような移動体観測では車両感知器のように各断面の交通量や交通密度などの観測が困難である

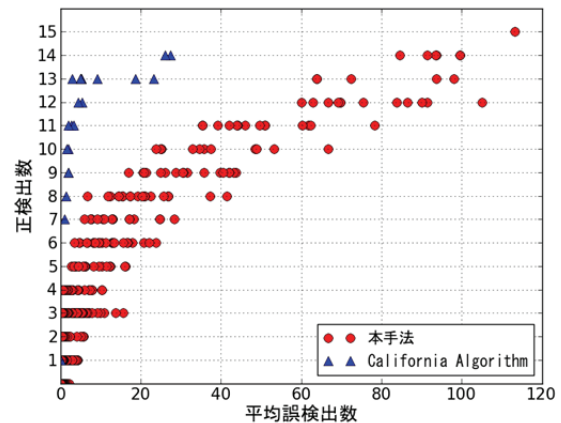


図-13 他の手法との比較

が、本手法のようにある断面で通信を行うプロブカーにより、旅行時間の絶対的変化と相対的変化、通過台数の変化を確認することで、車両感知器を用いずともプロブカーだけで突発事象の検出が一定程度可能であることを示した。また、本手法の精度は実験で用いた都市内高速では車両感知器を用いた検出手法に劣るものの、車両感知器が低密度である都市間高速や整備が十分でない発展途上国の高速道路などにおいても、今回と同程度のプロブカー混入率があれば、今回の実験と同様の結果が得られることが期待され、プロブカーだけで突発事象の検出を一定の精度で実現できているといえる。

今後の課題として、シミュレータ実験で発生させる仮定の突発事象にバリエーションをつける必要がある。具体的には、突発事象の発生場所・時間帯、車線閉塞時間・距離である。また、プロブカー混入率による手法の評価及び改良も行う必要がある。

謝辞：本研究で用いたシミュレータのキャリブレーションで用いた車両感知器のデータは、首都高速道路株式会社から提供していただいたものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Payne H.J. : Development and testing of incident detection algorithms, Volume 1: summary of results. Report No. FHWA-RD-76-19, FHWA, Washington D.C., April 1976.
- 2) Lin W.H. and Daganzo C.F. : A simple detection scheme for delay-inducing freeway incidents, Transportation Research Part A, Vol.31, No.2, pp.141-155, 1997.
- 3) Dudek, C.L., Messer, C.J. Nuckles, N.B.: Incident detection on urban freeway, Transportation Research Record, Vol.495, pp.12-24, 1974.
- 4) 一般社団法人 ITS サービス推進機構 : <http://www.dsrc-portal.jp/> (2013/08/02 アクセス)
- 5) Petty, K. F., Skabardonis, A. and Varaiya, P. P. : Incident detection with probe vehicles: performance, infrastructure

- requirements and feasibility, Transportation Systems 1997, A Proceedings Volume from the 8th IFAC/ IFIP/ IFORS Symposium, Chania, Greece, June 16-18, 1997, Vol. 1, pp. 125-130, 1997.
- 6) Y. Li, and M. McDonald. : Motorway incident detection using probe vehicles, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport, Vol.158, 11-15, February., 2005.
- 7) T. Zhu., J. Wang., W. Lv. : Outlier mining based automatic incident detection on urban arterial road, Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Technology, Application & Systems, Mobility '09, No. 29, 2009.
- 8) TSS - Transport Simulation Systems : AIMSUN 7.0, <http://www.aimsun.com/> (2013/08/02 アクセス)
- (2013.8.2 受付)

PROBE BASED INCIDENT DETECTION USING DIFFERENTIAL OF BOTTLENECK CAPACITY

Takamasa USHIKI, Takahiko KUSAKABE, Nguyen Xuan Long and Yasuo ASAKURA