

路側設置マイクによる車両検出における 連続車両検出精度向上に関する検討

梶村 順平¹ 石田 繁巳¹ 内野 雅人¹ 田頭 茂明² 福田 晃¹

概要: ITS (Intelligent Transport System: 高度道路交通システム) において道路を通行する車両を検出することは重要なタスクである。筆者らはマイクロフォンを用いた低コスト車両検出システムを開発している。本システムでは道路側部に設置した2台のマイクロフォンで車両走行音を取得して音の到達時間差を示す「サウンドマップ」を描き、その波形を解析することで車両を検出する。これまでにステートマシンやDTW (Dynamic Time Warping) を用いる検出手法を提案したが、車両が連続で通過した場合に検出精度が低下するという問題があった。本稿では、連続または同時通過車両の検出精度向上に向けた連続検出型車両検出システムを示す。連続または同時通過車両の検出においては検出対象以外の車両の波形が検出の妨げとなる。そこで、まずロバスト推定手法 RANSAC (Random Sampling Consensus) を用いて先行する車両を検出する。次いで、検出した車両に対応する点群をサウンドマップ上から取り除くことで後続車両の検出への影響を軽減する。実証評価を行った結果、先行研究よりも10ポイント高いF値0.83という精度で車両を検出できることを確認した。

キーワード: 車両検出, 音響センシング, サウンドマップ, RANSAC (Random Sampling Consensus)

Accuracy Improvement of Successive Vehicle Detection in Acoustic Vehicle Detection System

JUMPEI KAJIMURA¹ SHIGEMI ISHIDA¹ MASATO UCHINO¹ SHIGEAKI TAGASHIRA² AKIRA FUKUDA¹

Abstract: Vehicle detection is an important task in the ITS (Intelligent Transport System). We are developing a low cost vehicle detection system that consists of two microphones set up at a road side. The system acquires sound signals of moving car using the two microphones and draws a sound map that shows time difference of sound arrival. The system detects vehicles by analyzing curves drawn on the sound map. We have proposed two algorithms for sound map analysis based on a state machine and DTW (Dynamic Time Warping). However, the detection accuracy decreases when vehicles are successively passing in front of the microphones. This paper presents a successive vehicle detection system to improve detection accuracy for successive passing vehicles. Multiple vehicles draw multiple curves on the sound map, which works as noise in a detection process each other. The system therefore detects a curve of a preceding vehicle using a robust estimation method RANSAC (Random Sampling Consensus). Then, the system removes points on the sound map associated with the detected vehicle before continuing following vehicle detection process. Experimental evaluations reveal that our vehicle detection system successfully detected vehicles with an F-measure of 0.83, which is 10-point higher than that of our conventional detection system.

Keywords: Vehicle detection, acoustic sensing, sound map, RANSAC (Random Sampling Consensus)

1. はじめに

情報技術・交通の発展とともに ITS (Intelligent Transport System: 高度道路交通システム) の重要性が高まっている。ITS は、より良い交通システムとして道路交通の安

¹ 九州大学大学院システム情報科学研究院
ISEE, Kyushu University, Fukuoka, Japan

² 関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University, Osaka, Japan

全性、機能性、効率などを情報技術を利用して向上させるシステムの総称である。ITS の例としては安全性を向上させる事故防止・軽減システムや、機能性を向上させる渋滞回避システムが挙げられる。

ITS においては道路の交通状況を把握することが重要であるため、道路を通行する車両を検出する技術が必要不可欠となる。日本では、全国道路・街路交通量調査において車両や歩行者の数を計測する一般交通量調査が国土交通省によって概ね5年ごとに実施されている。一般交通量調査は道路の利用状況を調査することを目的としているために一時的な交通状況を収集しており、ITS のようにリアルタイムな制御に用いることはできない。

リアルタイムな交通状況の収集に向けて車両検出システムの導入が進められている。しかしながら、これらのシステムは導入・運用コストが高いことから導入は交通量の多い一部の道路に限られている。導入・運用コストを削減する手法として、既設のカメラを用いる手法 [1-3] やスマートフォンなどで取得した位置情報を用いる手法 [4-10] などとも報告されているが、カメラの設置位置や必要となる位置情報の数などの制約により市街地などの交通量の多い道路にのみ適用可能である。

これに対し、筆者らは音響センサ、すなわちマイクロフォンを用いた低コスト車両検出手法の開発を進めている。道路側方の歩道上に2台のマイクロフォンを設置し、車両走行音が2台のマイクロフォンに到達する時間差を利用してマイクロフォン前を通過する通過車両を検出する。可聴音の波長は車の大きさに比べて比較的に長いので、マイクロフォンを低い高さに設置しても複数レーンの車両走行音がマイクロフォンに到達することから道路の片側から複数レーンの車両を検出できる。

走行音を用いた車両検出技術はこれまでも研究が報告されている [11-14]。これらの研究ではマイクロフォン・アレイを設置して「サウンドマップ」を描くことで通過車両を検出する。サウンドマップは複数のマイクロフォンで観測した音声信号の受信時間差を描いたものである。

筆者らもこれまでにサウンドマップを利用した車両検出技術を報告した [15-17]。しかしながら、これらの車両検出技術は車両が連続または同時に通過した場合に検出精度が低下するという問題がある。これらの車両検出技術ではステートマシンベースのアルゴリズムまたはテンプレートマッチングを用いてサウンドマップを解析することで車両を検出する。しかしながら、車両が通過した際にサウンドマップ上に描かれる軌跡をモデル化されていないため、サウンドマップ上の点群と車両通過の軌跡の対応が取れておらず、複数台の車両の軌跡を分離することが困難である。また、ステートマシンベースのアルゴリズムによる車両検出ではパラメータ数が多いために高い精度の実現に向けた最適化が難しいという問題もある。

連続または同時通過車両の検出精度向上に向けて、本稿では連続検出型車両検出システムを示す。連続または同時

通過車両の検出においては検出対象の車両以外の車両がノイズとして検出処理の妨げとなることから、連続検出型車両検出システムでは検出した車両に対応するサウンドマップ上の点群を消去した上で検出処理を行う。サウンドマップ上の点群と検出車両の対応は、ロバスト推定手法のRANSAC (Random Sampling Consensus) を用いてサウンドマップの軌跡をフィッティングすることで推定する。

九州大学伊都キャンパス内の片側1車線、合計2車線の道路において車両の走行音を取得し、提案システムの実証評価を行った。その結果、先行研究で示したステートマシンベースの検出アルゴリズムに比べて10ポイント高いF値0.83という精度で車両を検出できることを確認した。

本稿の構成は以下の通りである。2で関連研究を紹介し、3でステレオマイクを検出した車両検出手法の概要を示す。4で提案するRANSACを用いた連続車両通過検出方式について述べ、5で提案手法の評価を行う。最後に6でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 音響センサを用いない車両検出システム

音響センサを用いない車両検出システムは大きく分けて埋没型と非埋没型に分けられる [18]。

埋没型の車両検出システムは道路下部もしくは道路表面に埋設して車両の通過を検出する。埋没型の車両検出システムではループコイルを利用しているものが一般的である。ループコイルを用いた車両検出システムは、金属がシステムの上部を通過するとループコイルのインダクタンスが変化するため車両の金属部分を検出できる。金属以外のものに反応することがないため誤検出が起りづらく、またセンサを埋没させているため表面の汚れなどの影響を受けず基本的にメンテナンスが必要ない。しかし、近くに金属がある場合には設置できないため設置場所が限られてしまう。また埋没型車両検出システムは設置のために道路を一時的に封鎖する必要があり、道路工事に多くのコストが必要となる。故障時の修理や定期点検でも同様に道路の封鎖が必要となるため、設置・運用コストは非常に大きい。

非埋没型車両検出システムは、設置場所によって2種類に分けられる。道路上部に設置する上部設置タイプと道路側部に設置する側部設置タイプである。

上部設置タイプの車両検出システムは道路上部から赤外線や超音波を射出し、真下を走行する車両を検出するものである。上部に設置するためシステムと車両の間を遮られることがなく、非常に高い精度で車両を検出できる。しかし、上部設置タイプの車両検出システムを設置するためにはポールやアームを設置する必要があり、また安全面を考慮して十分な落下防止措置も必要となる。これらにかかるコストは非常に高く、実際に運用されている超音波センサを用いた車両カウンタの導入は1ヶ所あたり約1,000万円のコストを要する [19]。そのため運用は交通量が多い主要道路に限られている。

側部設置タイプには超音波センサや赤外線センサを利用するものがある。側部設置タイプの車両検出システムは発信部と受信部の2つで構成され、発信部と受信部の間に物体が存在する場合と存在しない場合とで受信部での超音波や赤外線の受信量に変化することから車両を検出する。側部設置タイプの車両検出システムは道路側部に設置するため、特別な工事を必要とせず設置コストは低い。しかし、側部に設置するため前方レーンを車両が通過している時には、後方レーンを通過する車両を検出できない。また車両以外のものでも検出してしまうため、歩行者や自転車などによる誤検出も発生する。

車両検出システムの設置・運用コストを削減すべく、CCTV (Closed-Circuit Television) を用いたカメラベースの車両カウントシステムが提案されている [1-3]。しかしカメラベースの車両検出システムはカメラの角度や設置位置が精度におおきな影響を及ぼすことから、設置角度を変更できない CCTV では精度を担保することが困難である。

導入コストを下げるための新たなアプローチとして、GPS (Global Positioning System) を搭載したスマートフォンやカーナビゲーションシステムで車両の位置情報を示すフローティングカーデータを用いて交通量を推定する手法が報告されている [4-10]。フローティングカーデータを用いる手法では、プライバシーへの配慮や精度を担保するために同一の道路を通行する多くの車両のフローティングカーデータが必要となる。このため交通量が多い道路でのみこの手法は適用可能である。

2.2 音響センサを用いた車両検出

音響センサによって車両の走行音を取得し、車両を検出する研究はこれまでにいくつか行われている。Forren らと Chen らは、マイクロフォン・アレイを用いた交通モニタリング手法を報告している [11-13]。これらの手法ではマイクロフォン・アレイが受信した音声の到達時間差から「サウンドマップ」を描き、サウンドマップ上の波形を解析することで車両の交通状況をモニタリングする。しかし、サウンドマップの解析を自動的に行う手法については言及されておらず、車両検出システムとして動作させることは考慮されていない。また複数車線を走行する車両を検出するために道路側部の高い位置で音声を取得している。前述の通り音響センサを用いた車両検出では音の回折によって低い位置でも車両の走行音を取得することが可能であるが、低い位置での評価は行われていない。

サウンドマップの自動解析についてもこれまでにいくつかの研究が行われている。文献 [15, 16] ではステートマシンベースのアルゴリズムでサウンドマップを解析することで車両検出を実現できる示されている。しかし、ステートマシンベースのアルゴリズムは高い精度を実現するために設置場所に応じてパラメータを調整する必要があるが、精度を担保することができない。

また、文献 [17] では DTW (Dynamic Time Warping)

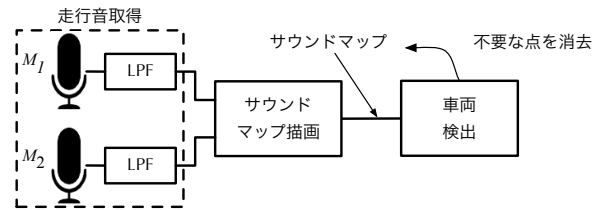


図1 車両検出システムの概要

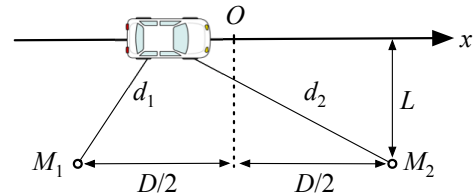


図2 マイクロフォンの設置状態

を用いたリアルタイムテンプレートマッチング手法による車両検出が示されている。DTW を用いることで少ない計算量で車両を検出することが可能であるが、複数台の車両が存在する場合が考慮されておらず、車両が連続して通過する場合に検出精度が低下する。

3. マイクロフォンを用いた車両検出手法

3.1 概要

図1にマイクロフォンを用いた車両検出システムの概要を示す。マイクロフォンを用いた車両検出システムは、走行音取得ブロック、サウンドマップ描画ブロック、車両検出ブロックという3つのブロックで構成される。

走行音取得ブロックは2台のマイクロフォンと LPF (Low-pass Filter) から構成される。2台のマイクロフォンで車両の走行音を取得した後、LPF によって走行音以外の雑音を軽減して車両のタイヤが発する音を抽出する。サウンドマップ描画ブロックでは、まず抽出した音声は2台のマイクロフォンに到達するまでの時間差を相互相関関数を用いて計算する。その後、得られた到達時間差を時刻の関数として描画することでサウンドマップが得られる。車両検出ブロックではサウンドマップを解析して車両の通過検出と通過方向の判定を行う。

以下では各ブロックの動作について詳述する。

3.2 走行音取得ブロック

図2にマイクロフォンの設置状態を示す。本システムでは、2台のマイクロフォン M_1 , M_2 を道路と並行に設置する。マイクロフォン間の距離 D とマイクロフォン・道路間の距離 L は、車両検出性能に影響する。図2において車両がマイクから遠い位置、すなわち $x \simeq \pm\infty$ を走行している場合には、車両の走行音は2台のマイクロフォンのほぼ真横から到来する。このとき、走行音が2台のマイクロフォ

ンに到達するまでの距離 d_1 , d_2 の差は $|d_1 - d_2| \simeq D$ で最大となるから、走行音が2台のマイクロフォンに到達する時間差の最大値 $|\Delta t_{max}|$ は音速を c として

$$|\Delta t_{max}| = \frac{D}{c} \quad (1)$$

となる。マイクロフォン間の距離 D が長くなると、走行音の到達時間差の変化が大きくなるため車両の検出が容易になる。しかし、より広範囲の音を取得するためサウンドマップに含まれるノイズの影響も大きくなってしまいう問題がある。マイクロフォン・道路間の距離 L が短くなるとより大きな車両走行音を取得できるようになるが、反対に風切り音や振動音などのノイズの影響も大きくなる。上記のようにマイクロフォン間の距離 D とマイクロフォン・道路間の距離 L の設定によって精度が変化することが想定されるため、これらの値は物理的な制約を考慮して適切な値に設定する。

2台のマイクロフォンに接続されている LPF は車両の走行音以外の雑音の影響を軽減するために利用される。本システムでは、電気自動車やハイブリッド車などの車種も検出するためエンジン音ではなくタイヤの走行音を対象とする。タイヤの走行音の周波数成分は 2.0 kHz 以下に集中している [20, 21]。本システムでは余裕を持って 2.5 kHz をカットオフ周波数とした。

3.3 サウンドマップ描画ブロック

サウンドマップは、2台のマイクロフォンに到達する音の時間差が時間ごとにどのように変化したかを示す図である。音源との距離によって音が到達するまでの時間が異なるため、2台のマイクロフォン間には音が到達するまでに時間差が生じる。

走行中の車両の位置を x とすると、2台のマイクロフォンにおける音の到達時間差 Δt はマイクロフォンと車両との距離 d_1 , d_2 から以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{d_1 - d_2}{c} \\ &= \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) より音源である車両の位置を音の到達時間差から求められることが分かる。音の到達時間差は相互相関関数によって求められる。2台のマイクロフォンが受信した音響信号を $s_1(t)$, $s_2(t)$ とすると、相互相関関数 $R(t)$ は以下で定義される。

$$R(t) = \int s_1(\tau) s_2(t + \tau) d\tau \quad (3)$$

2台のマイクロフォンが同じ音響信号を時間差 Δt で受信したものとすると、 $s_1(t) = s_2(t + \Delta t)$ である。このとき、 $R(t)$ は $t = \Delta t$ において最大値を取るため $R(t)$ のピー

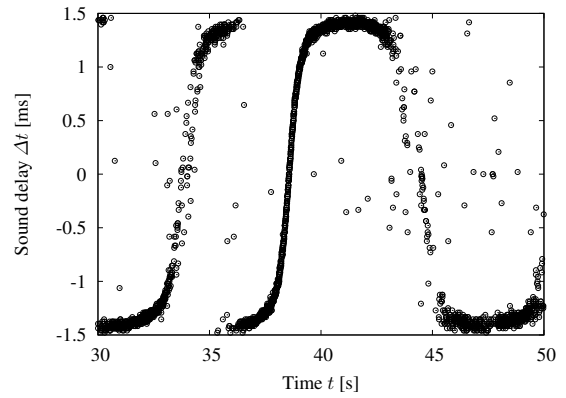


図 3 サウンドマップの例

クを探すことで音の到達時間差 Δt を求めることができる。

本システムでは、音源定位の分野において一般的に利用されている GCC (Generalized Cross-Correlation: 一般化相互相関) [22] を用いて2台のマイクロフォンにおける音の到達時間差を求める。取得した走行音データを小さいウィンドウで分割し、分割した各データに GCC を適用して到達時間差を求める。各データにおける音の到達時間差を描くことでサウンドマップが得られる。

図 3 にサウンドマップの例を示す。図 3 は、左から右に2台、右から左に1台の車両が通過する様子を示している。本システムでは左側のマイクを基準として到達時間差を計算している。左から車両が接近しているとき左側のマイクに右側のマイクより早く音が到達するため到達時間差 Δt は負の値をとる。その後 Δt は車両がシステムに近づくにつれて 0 に近づき、システムの真正面でちょうど 0 となる。その後は右側のマイクに早く音が到達するため Δt は正の値となり、遠ざかるにつれて値は大きくなる。そのため図のようにサウンドマップ上には S 字カーブが描かれる。右から左に車両が通過した場合は逆向きの S 字カーブが現れる。

3.4 車両検出ブロック

本手法ではサウンドマップの中から車両が通過した際にできる波形を検出するために RANSAC (Random Sampling Consensus) を用いる。RANSAC は外れ値を含むデータにモデル式をフィッティングするロバスト推定手法である。サウンドマップに含まれる車両以外のノイズに影響されことなく通過車両の描く S 字カーブに式 (2) をフィッティングする。

車両が通過した場合、サウンドマップには式 (2) で表される S 字カーブが描かれる。車両がマイクロフォン前の通過に要する時間は短いことから車両が等速で移動していると仮定すると、車両の速度を v として式 (2) は

$$\Delta t = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(vt + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(vt - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \quad (4)$$

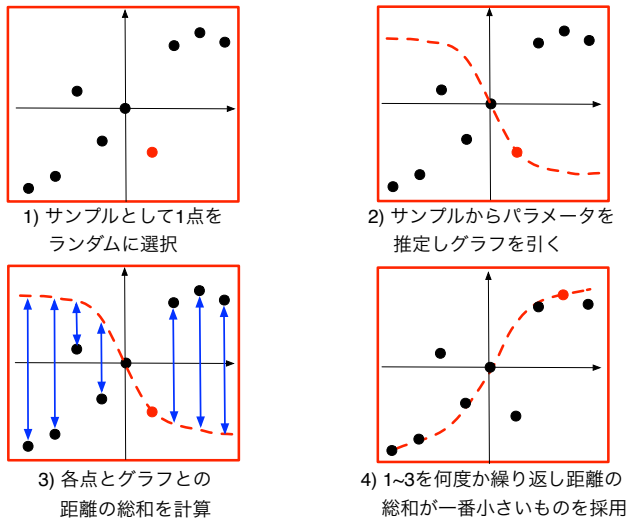


図 4 RANSAC の概要

と書き換えられる。RANSACではサウンドマップ上のデータを用いて速度 v を推定してフィッティングを行う。

図 4 に RANSAC におけるフィッティングの概要を示す。RANSAC におけるフィッティングは以下の手順で行われる。

- 1) サウンドマップを小さなウィンドウに区切る。その後ウィンドウ内の点からランダムにサンプル点を抽出する。サンプルの点数は外れ値の影響を軽減するためフィッティングに必要な最小の点数とする。本手法では1点のサンプルを抽出する。
- 2) 抽出したサンプル点を通る式 (4) を求める。すなわち、速度 v を推定する。
- 3) 推定された v を用いて式 (4) のカーブを描き、このカーブとサウンドマップ上の各点の距離の総和を算出する。
- 4) 手順 1~3 を何度か繰り返し、距離の総和が最も小さくなる速度 v を最適な推定値として採用し、フィッティングを完了する。

車両の通過判定は RANSAC によるフィッティング結果を利用して行う。フィッティング結果とサウンドマップ上の点との距離が閾値よりも小さい点数の割合に基づいてフィッティングが成否を判定する。フィッティングに成功した場合にはサウンドマップ上に S 字カーブが存在することを意味するため、車両が通過したと判定する。この手順をウィンドウを少しずつシフトさせながら繰り返すことで車両の通過を検出する。

4. 連続検出型車両検出方式

4.1 RANSAC によるフィッティングの問題点

RANSAC を用いたフィッティングによる車両検出には3つの問題がある。

1 目目の問題は、車両が連続通過した場合には RANSAC によるフィッティングを適切に行えないことである。車両

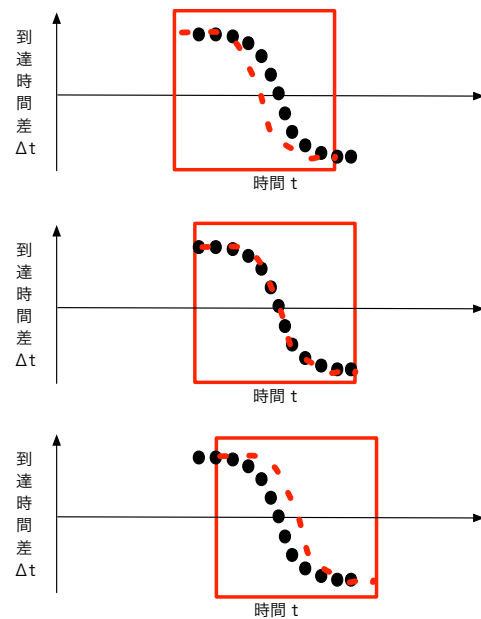


図 5 1 つの波形に対する複数回検出

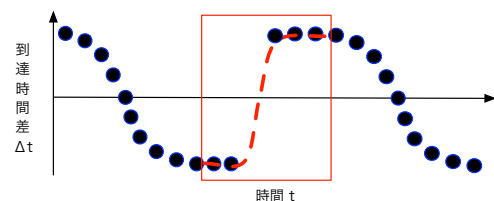


図 6 車両間での誤検出

が連続して通過した場合には、ウィンドウの中に先行車両と後続車両による2本の波形が現れる。この波形が干渉し合うことでフィッティングを適切に行えず、結果として検出に失敗する。

2 目目の問題は、1 つの波形に対して複数回検出を行ってしまうことである。本手法では式 (4) を用いて推定を行っているため、フィッティングしたカーブは必ず原点を通る。そのため、通過車両の描く S 字カーブがサウンドマップの中央付近に現れたときでないと検出できない。このことからウィンドウのシフト幅は小さい値に設定する必要があるが、カーブが明瞭に描かれた場合に図 5 のように中央付近で複数回検出されてしまう。

3 目目の問題は、同一方向に通過する2台の車両間で誤検出が生じることである。図 6 のように車両の通過前と通過後では Δt は大きな値を取る。このとき図 6 に赤い点線で示すような波形が推定され、車両が通過したと誤って判定してしまう。

4.2 連続検出型車両検出

車両の連続通過に対応するため、RANSAC によるフィッティング方法に3点の変更を加える。

1 目目の変更点は、ウィンドウ内で後方に位置する点をフィッティング対象から除外することである。図 7 の 1)

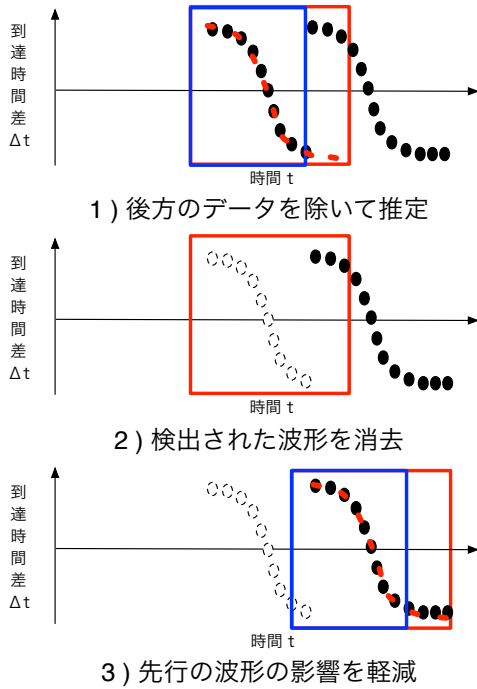


図 7 連続検出型車両検出

に青い枠で示したように、走行車両の車間距離に鑑みて車両 2 台の波形が同時に存在しないと考えられる範囲の点群のみを使用してフィッティングを行う。これにより後続車両の波形による先行車両の誤検出を防ぐことができる。

2 つ目の変更点は、図 7 の 2) に示したように車両検出時にサウンドマップ上からその通過に関与した点群を消去することである。図 7 の 3) のような場合を考えると、先行車両を検出した際にその車両に対応する点群をサウンドマップ上から消去した上で検出処理を続行すれば後続車両の検出において先行車両の影響を軽減できる。

3 つ目の変更点は、到達時間差の L2 ノルムを用いたフィルタリング処理を加えることである。車両が検出された部分のサウンドマップ Δt_{det} に対して L2 ノルムを計算し、L2 ノルムの閾値を上回った場合を誤検出とする。サウンドマップ上に描かれた到達時間差 Δt は離散値であり、車両が検出された部分のサウンドマップ系列 $\Delta t_{det}[k]$ に対して L2 ノルムは以下で定義される。

$$\|\Delta t_{det}\| = \sqrt{\sum_k (\Delta t_{det}[k])^2} \quad (5)$$

図 6 のような場合には、車両が通過している場合と比べて到達時間差 0 付近の点が少ないため L2 ノルムの値は大きくなる。ことから、L2 ノルムの値が大きいときは検出を行わないようにすれば同一方向に通過する車両間での誤検出を防ぐことが可能となり 3 つ目の課題が解決される。

変更 1 により先行車両の検出が可能となり、変更 2 によって後続車両の検出が可能となるため、4.1 で示した課題 1 は解決される。また、変更 2 によって 1 度検出された波形は消去されるため、課題 2 の 1 つの波形の複数回検出

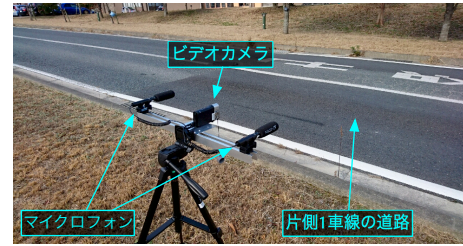


図 8 評価環境

を防ぐ。変更 3 の L2 ノルムによるフィルタリング処理によって課題 3 は解決される。

5. 評価

連続検出型車両検出方式の有効性を検証するため、九州大学伊都キャンパス内の道路において実証評価を行った。

5.1 評価環境

図 8 に評価環境を示す。対象の道路は片側 1 車線、計 2 車線の道路である。2 台のマイクを道路横の歩道上に設置し、ビデオカメラに接続して真値を記録するための映像と共に音声を約 20 分間録音した。マイクは AZDEN 社製 SGM-990 を用いた。走行音はサンプリングレート 48 kHz、量子化ビット数 16 bit で記録した。またマイクの間隔は 50 cm、道路とマイクとの距離は 2m、マイクの高さは 1m にそれぞれ設定した。

評価として走行音の取得時に記録した真値を元に True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP) の回数を評価した。TP, FN, FP は、それぞれ車両が走行している時に車両検出をした場合、車両が走行している時に車両検出をしなかった場合、車両が走行していない時に車両検出をした場合である。TP, FN, FP を評価する場合、True Negative (TN), すなわち走行車両がない時に車両検出をしなかった場合も評価に含めることが一般的であるが、走行車両がない状態の回数を数えることができないため評価から除外した。

また、TP, FN, FP の値を用い、以下で定義される精度 (Precision), 再現率 (Recall), F 値 (F-measure) をそれぞれ算出した。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$F_{\text{measure}} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (8)$$

精度は車両の通過と判定したデータのうち実際に車両が通過した割合である。網羅率は通過した車両のうち車両の通過と判定された割合である。F 値は精度と再現率の調和平均であり、総合的な評価を表す指標である。

5.2 提案手法の評価

表 1 に、TP、FN、FP の各値とそれらを用いて計算された精度、再現率、F 値を示す。表 1 は 4.2 で示した連続検出方式の変更 2 の処理、すなわち検出した点群を消去する場合としない場合とをそれぞれ示している。なお、点群の消去の有無にかかわらず、変更 1、3 の処理は適用した。表 1 から以下のことがわかる。

- 点群を消去することによって F 値は 0.67 から 0.82 まで増加した。RANSAC によるフィッティングにおいて同一の車両を複数回検出してしまう頻度が点群を消去したことによって低下し、FP の値が小さくなったためであると考えられる。
- 点群を消去することで検出点数は 4 台増加した。連続の車両通過において先に通過した車両の走行音による点群の影響によって後続の車両が検出できなかったものが、検出可能になったためと考えられる。これにより再現率の値も向上した。

以上の結果から、検出した車両に対応する点群を消去する処理によって連続通過車両の検出精度が向上することが確認できた。

5.3 既存手法との比較

連続検出型車両検出手法によって連続して通過する車両の検出精度が向上したことを確認するため、文献 [16] で示した既存手法と比較を行った。

表 2 に、提案する連続検出型車両検出手法と既存手法における TP、FN、FP の各値とそれらを用いて計算された精度、再現率、F 値を示す。表 2 から以下のことがわかる。

- 精度は既存手法が高い値となっている。これは既存手法の FP の値が小さいためである。既存手法ではサウンドマップ上に完全な S 字カーブが現れた場合にのみ検出を行うため、FP の値が小さい。
- 再現率は提案手法が高い値となっている。提案手法では 147 台の車両を検出できたのに対し、既存手法では 99 台の車両しか検出できなかった。既存手法では完全な S 字カーブのみを検出するため車両の連続通過によって波形の一部が失われた場合の検出が困難となる。これに対し、提案手法では不完全な波形に対してもフィッティングを行えるため検出車両の数が増加したと考えられる。
- 既存手法と比べて提案手法では F 値が 12 ポイント上昇した。

以上の結果から、車両の連続通過が多い環境において提案手法が有効であることが確認された。

5.4 検出時刻誤差

車両を検出した時刻が実際の通過時刻とどの程度のズレを生じるのかを検証するため、検出時刻誤差を評価した。検出時刻誤差は、カメラの画角の中央を車両が通過した時刻と提案手法で検出した車両の通過時刻との差である。検

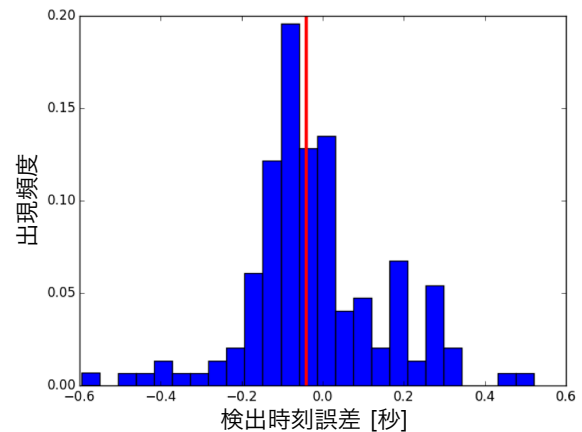


図 9 検出時刻誤差。赤い線は中央値を示している。

出時刻誤差は通過車両の車間距離やスピード推定などの応用の際に重要となる。

図 9 に検出時刻誤差のヒストグラムを示す。検出時刻誤差の絶対値の平均は 0.12 秒であった。また検出時刻誤差の絶対値は最大 0.6 秒であった。車両の通過、すなわち車両がカメラの画角に現れてから消えるまでの時間は約 2 秒であることから、検出時刻誤差は十分に小さいと言える。アプリケーションによってどの程度までの誤差が許容されるかは異なるが、渋滞回避システムなど秒単位で結果を反映する必要がないものにおいては十分に使用可能である。

6. おわりに

本稿では、ITS において重要なタスクである車両の検出に向けてマイクロフォンを用いた車両検出システムを示した。本システムでは車両の走行音が 2 台のマイクロフォンに到達するまでの時間差を描いた「サウンドマップ」を自動的に解析することによって車両の通過を検出する。車両が連続で通過した場合に複数の車両の走行音が干渉することによって誤検出及び未検出が発生するという問題があるため、これを解決する連続検出型車両検出方式を新たに提案した。連続検出型車両検出方式では検出した車両に対応する点群をサウンドマップ上から消去して検出処理を続行する。サウンドマップ上の点群と通過車両との対応は、ロバスト推定手法 RANSAC を用いてモデル式をフィッティングすることで行う。連続検出型車両検出方式の車両検出システムを実装して九州大学伊都キャンパス内の片側一車線道路において実証評価を行った結果、先行研究に比べて 10 ポイント高い F 値 0.83 という精度で車両を検出できることを確認した。

謝辞 本稿で示した研究の一部は、科研費 (JP15H05708, JP16K16048, JP17K19983, JP17H01741) 及び東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の助成で行われた。

表 1 連続検出方式の評価結果

	With successive detection process			Without successive detection process		
	Left to Right	Right to Left	Total	Left to Right	Right to Left	Total
TP	103	45	148	103	41	144
FN	21	9	30	21	13	34
FP	17	14	31	70	47	117
Precision	0.86	0.76	0.83	0.60	0.47	0.56
Recall	0.83	0.83	0.83	0.83	0.76	0.81
F-measure	0.84	0.80	0.83	0.69	0.58	0.66

表 2 既存手法との比較

	Proposed			Conventional		
	Left to Right	Right to Left	Total	Left to Right	Right to Left	Total
TP	103	45	148	62	37	99
FN	21	9	30	62	17	35
FP	17	14	27	0	0	0
Precision	0.86	0.76	0.83	1.0	1.0	1.0
Recall	0.83	0.83	0.83	0.5	0.69	0.56
F-measure	0.84	0.80	0.83	0.67	0.81	0.71

参考文献

- [1] 遠藤正樹, 川原克美, 今井ひとみ: CCTV を活用した新たな交通データ取得システムの提案, 国交省北陸地方整備局事業研究発表会資料集, pp. 1-4 (2007).
- [2] Buch, N., Cracknell, M., Orwell, J. and Velastin, S. A.: Vehicle Localisation and Classification in Urban CCTV Streams, *Proc. ITS World Congress*, pp. 1-8 (2009).
- [3] Nurhadiyatna, A., Hardjono, B., Wibisono, A., Jatmiko, W. and Mursanto, P.: ITS Information Source: Vehicle Speed Measurement Using Camera as Sensor, *Proc. Int. Conf. on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*, pp. 179-184 (2012).
- [4] de Fabritiis, C., Ragona, R. and Valenti, G.: Traffic Estimation and Prediction based on Real Time Floating Car Data, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 197-203 (2008).
- [5] Work, D. B., Tossavainen, O.-P., Blandin, S., Bayen, A. M., Iwuchukwu, T. and Tracton, K.: An Ensemble Kalman Filtering Approach to Highway Traffic Estimation using GPS Enabled Mobile Devices, *Proc. IEEE Decision and Control (CDC)*, pp. 5062-5068 (2008).
- [6] Calabrese, F., Colonna, M., Lovisolo, P., Parata, D. and Ratti, C.: Real-Time Urban Monitoring using Cell Phones - A Case Study in Rome, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 12, No. 1, pp. 141-151 (2011).
- [7] Zhou, X., Wang, W. and Yu, L.: Traffic Flow Analysis and Prediction Based on GPS Data of Floating Cars, *LNEE*, Vol. 210, pp. 497-508 (2012). *Proc. Int. Conf. on Information Technology and Software Engineering*.
- [8] Guido, G., Galleli, V., Saccomanno, F., Vitale, A., Rogano, D. and Festa, D.: Treating Uncertainty in the Estimation of Speed from Smartphone Traffic Probes, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 47, pp. 100-112 (2014).
- [9] Seo, T., Kusakabe, T. and Asakura, Y.: Estimation of Flow and Density using Probe Vehicles with Spacing Measurement Equipment, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 53, pp. 134-150 (2015).
- [10] Seo, T. and Kusakabe, T.: Probe Vehicle-based Traffic State Estimation Method with Spacing Information and Conservation Law, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 59, pp. 391-403 (2015).
- [11] Forren, J. F. and Jaarsma, D.: Traffic Monitoring by Tire Noise, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 177-182 (1997).
- [12] Chen, S., Sun, Z. P. and Bridge, B.: Automatic traffic monitoring by intelligent sound detection, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 171-176 (1997).
- [13] Chen, S., Sun, Z. and Bridge, B.: Traffic monitoring using digital sound field mapping, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 50, No. 6, pp. 1582-1589 (2001).
- [14] Barbagli, B., Manes, G., Facchini, R. and Manes, A.: Acoustic sensor network for vehicle traffic monitoring, *Proc. IEEE Int. Conf. on Advances in Vehicular Systems (VEHICULAR)*, pp. 1-6 (2012).
- [15] Ishida, S., Mimura, K., Liu, S., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of Simple Vehicle Counter using Sidewalk Microphones, *Proc. ITS EU Congress*, EU-TP0042, pp. 1-10 (2016).
- [16] 石田繁巳, 三村晃平, 劉 嵩, 田頭茂明, 福田 晃: 路側設置マイクフォンによる車両カウントシステム, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 1, pp. 89-98 (2017).
- [17] Ishida, S., Liu, S., Mimura, K., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of Acoustic Vehicle Count System using DTW, *Proc. ITS World Congress*, AP-TP0678, pp. 1-10 (2016).
- [18] 井坪慎二, 塚田幸広: 情報機器の道路交通調査への適用に関する検討, 土木技術資料, Vol. 47, No. 8, pp. 56-61 (2005).
- [19] 東 俊孝, 高田知典, 井坪慎二, 内田 淳: 道路交通センサのための次世代情報収集システムの開発, 土木情報システム論文集, Vol. 15, pp. 103-110 (2006).
- [20] Wu, H., Siegel, M. and Khosla, P.: Vehicle Sound Signature Recognition by Frequency Vector Principal Component Analysis, *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. (IMTC)*, Vol. 1, pp. 429-434 (1998).
- [21] 花塚泰史: 時間整合アルゴリズムに基づくタイヤ振動解析法—リアルタイム路面状態判別システムの開発—, 博士論文, 総合研究大学院大学 (2012).
- [22] Knapp, C. H. and Carter, G. C.: The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, Vol. 24, No. 4, pp. 320-327 (1976).