

# 路側設置マイクロフォンを用いた 逐次検出型車両検出システム

石田 繁巳<sup>1,a)</sup> 梶村 順平<sup>1</sup> 内野 雅人<sup>1</sup> 田頭 茂明<sup>2</sup> 福田 晃<sup>1</sup>

受付日 2018年4月9日, 採録日 2018年10月2日

**概要:** ITS (Intelligent Transport System: 高度道路交通システム) において, 道路上の走行車両検出は重要なタスクの1つである. 筆者らはマイクロフォンを用いる低コストな車両検出システムの開発を行っている. 路側に設置した2台のマイクロフォンに車両走行音が到達する時間差の時間変化を描いた「サウンドマップ」を解析して車両を検出する手法をこれまでに開発した. しかしながら, 車両が同時または連続で通過する場合に車両検出精度が低下するという問題があることから, 本論文では逐次検出型車両検出システム SAVeD を示す. SAVeD では, 車両をサウンドマップ上の点群と対応させながら検出し, 検出車両に対応する点群をサウンドマップ上から消去しながら逐次的に車両検出処理を行うことで検出車両が他の車両の検出に与える影響を軽減させる. 片側1車線道路において SAVeD の実証評価を行い, F 値 0.83 という高い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)

## Sequential Acoustic Vehicle Detector Using Sidewalk Microphones

SHIGEMI ISHIDA<sup>1,a)</sup> JUMPEI KAJIMURA<sup>1</sup> MASATO UCHINO<sup>1</sup> SHIGEAKI TAGASHIRA<sup>2</sup> AKIRA FUKUDA<sup>1</sup>

Received: April 9, 2018, Accepted: October 2, 2018

**Abstract:** Vehicle detection is one of the core tasks in the ITS (intelligent transport systems). We are developing a low cost acoustic vehicle detector. The acoustic vehicle detector relies on two microphones installed at a sidewalk to draw a *sound map*, which is a map of time difference of sound arrival on the two microphones. Our previous studies have presented vehicle detection algorithms that analyze a sound map. However, the detection algorithms highly fail to detect multiple vehicles simultaneously or sequentially passing in front of the microphones. We therefore present *SAVeD*, a sequential acoustic vehicle detector. The SAVeD associates vehicles with curves drawn on a sound map and sequentially detects vehicles while removing the curves associated with the detected vehicles. Experimental evaluation on a two-lane road reveals that the SAVeD successfully detected vehicles with an F-measure of 0.83.

**Keywords:** vehicle detection, acoustic sensing, sound map, RANSAC (random sampling consensus)

### 1. はじめに

情報技術および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, 道路交通の安全性, 機能性, 効率的な

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. 近年ではカーナビゲーションシステムや自動車の自動ブレーキシステムなどの普及が進み, ITS がより身近になりつつあるといえる.

ITS においては道路の交通状況を認識することが1つの重要なタスクであることから, 道路を通行する車両の検出技術が必要不可欠である. 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おおむね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

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究所  
ISEE, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

<sup>2</sup> 関西大学総合情報学部  
Faculty of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka  
569-1095, Japan

<sup>a)</sup> ishida@f.ait.kyushu-u.ac.jp

的としているために一時的な交通状況を収集しており、リアルタイムな用途でのみ利用可能である。

リアルタイムな交通状況を利用する ITS アプリケーションの例として、交通渋滞を回避する道案内のようにすでに実現されているものをはじめ、緊急車両の経路探索、渋滞削減に向けたリアルタイム交通信号制御などがあげられる。このようなアプリケーションでは車両を 100% 検出する必要はないが、80% 以上など比較的高い検出精度でどの車線をどのくらいの数の車両が通過したかという交通量を把握する必要があると考えられる。

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。これらのシステムは導入・運用コストが高く、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], [2], [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], [5], [6], [7], [8], [9], [10] など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。

これらに対し、筆者らはマイクロフォンを用いた低コスト車両検出技術の開発を進めている [11], [12], [13]。この検出技術では、道路横に設置した 2 台のマイクロフォンで取得した音声を用いて描いた「サウンドマップ」を解析することで通過車両を検出する。サウンドマップは 2 台のマイクロフォンで観測した音声信号の受信時間差が時間とともにどのように変化するかを描いたものである。これまでに、ステートマシンや Dynamic Time Warping を用いた検出アルゴリズムを用いて最大で F 値 0.92 の精度で車両を検出できることを確認した。

しかしながら、これまでの車両検出アルゴリズム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。本論文では片側 1 車線、合計 2 車線の道路における両車線の車両を検出対象としている。進行方向の異なる複数の車線があることから 1 つの車線を車両が「連続」して通過する場合に加えて、進行方向の異なる複数の車両が「同時」に通過する場合が存在する。このような場合、これまでの車両検出アルゴリズムではサウンドマップ上の各点と通過車両の対応がとられておらず、サウンドマップ上に描かれた各車両の軌跡が互いに干渉して検出精度が低下する。

このような観点から、本論文では逐次検出型の車両検出システム SAVeD (Sequential Acoustic Vehicle Detector) を示す。SAVeD では、サウンドマップ上に描かれる通過車両の軌跡をモデル化したうえで検出し、検出した通過車両に対応する点群をサウンドマップ上から消去しながら逐次的に車両検出処理を繰り返すことで複数台の車両を分離して検出する。検出車両とサウンドマップ上の点群との対応は、サウンドマップ上の軌跡をロバスト推定手法の

RANSAC (Random Sampling Consensus) を用いてモデル的にフィッティングすることで推定する [14]。

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、SAVeD 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を採用した車両検出システムと比べて検出精度を 10 ポイント以上向上させることができることを確認した。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章ではマイクロフォンを用いた車両検出システムの概要と同時通過車両が存在する場合の課題を示す。3 章では同時通過車両の検出精度を向上させる逐次検出型車両検出システム SAVeD を示し、4 章で SAVeD の実証評価を行う。5 章では評価において発生した誤検出に関して議論する。6 章では関連研究について述べ、最後に 7 章でまとめとする。

## 2. マイクロフォンを用いた車両検出システム

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 (Sound Retriever)、サウンドマップ描画ブロック (Sound Mapper)、車両検出ブロック (Vehicle Detector) の 3 つのブロックから構成される。

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) を接続したものである。道路横に設置された 2 台のマイクロフォンで車両の走行音を取得する。取得した走行音は LPF を適用して環境音などのノイズを削減したうえでサウンドマップ描画ブロックに送られる。

サウンドマップ描画ブロックでは相互相関関数を用いて 2 台のマイクロフォンにおける走行音の受信時間差を算出し、サウンドマップを描画する。2 台のマイクロフォンが受信した音声信号を  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  とすると、相互相関関数  $R(t)$  は

$$R(t) = \int s_1(t) s_2(t + \tau) dt \quad (1)$$

と定義される。2 台のマイクロフォンが時間差  $\Delta t$  の信号を受信し  $s_1(t) = s_2(t + \Delta t)$  であるとする  $R(t)$  は  $t = \Delta t$  において最大値をとる。このため、 $R(t)$  のピークを探すことで走行音の受信時間差  $\Delta t$  を算出できる。受信時間差  $\Delta t$  の時間変化を描くことでサウンドマップが得られる。

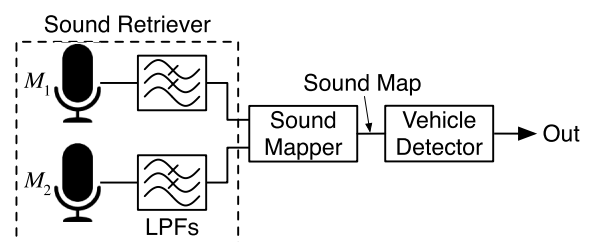


図 1 マイクロフォンを用いた車両検出システムの概要  
Fig. 1 Overview of acoustic vehicle detection system.

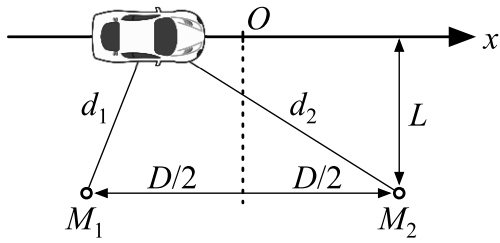


図2 マイクロフォンの配置  
Fig. 2 Microphone setup.

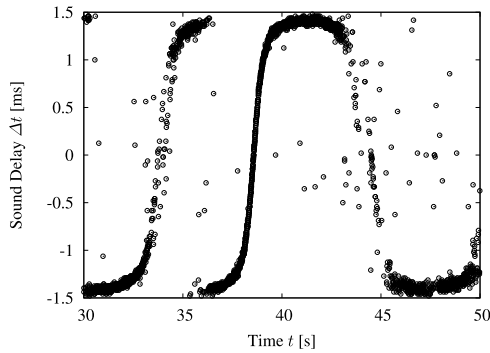


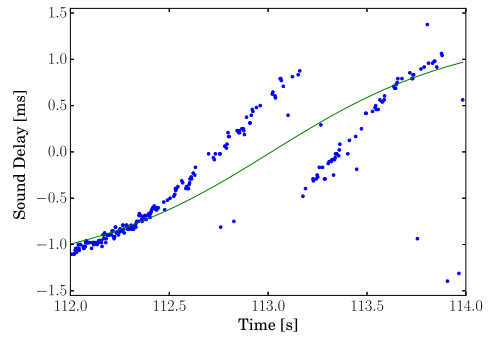
図3 サウンドマップの例  
Fig. 3 Example of sound map.

車両が一定速度でマイクロフォンの前を通過する場合、サウンドマップ上にはS字のカーブが描かれる。図2に示すように2台のマイクロフォン  $M_1$ ,  $M_2$  が間隔  $D$  で道路中心から距離  $L$  だけ離れたところに道路と平行に設置されている場合を考える。マイクロフォン  $M_1$ ,  $M_2$  における車両走行音の受信時間差 (Sound Delay)  $\Delta t$  は、走行音が各マイクロフォンに到達するまでの距離  $d_1$ ,  $d_2$  の差から以下のように求められる。

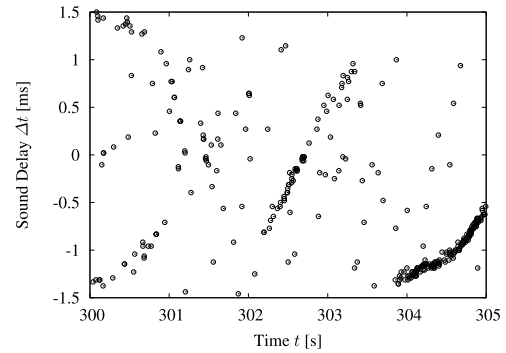
$$\Delta t = \frac{d_1 - d_2}{c} = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $x$  は走行車両の位置、 $c$  は音速である。式(2)より、 $x$  が線形に増加または減少するとサウンドマップ上にはS字のカーブが描かれることが分かる。図3は実際のサウンドマップの例を示している。S字カーブの向きは  $x$  の増加・減少の向き、すなわち車両の進行方向によって定まる。

車両検出ブロックではサウンドマップを解析してS字カーブを検出することで通過車両を検出する。これまでに、ステートマシンベースのアルゴリズムによる検出手法 [11], [12] およびDTW (Dynamic Time Warping) を用いた類似度計算による検出手法 [13] を報告した。これらの手法では複数の車両が同時にマイクロフォン前に存在することを考慮していないため、複数車両がサウンドマップ上に描く軌跡が互いに干渉して検出精度が低下する。



(a)



(b)

図4 マイクロフォン前をほぼ同時に通過する複数車両の検出に向けた課題。(a) S字カーブの分離、(b) ノイズの影響軽減

Fig. 4 Issues toward detection of vehicles simultaneously or successively passing in front of microphones: (a) S-curve separation and (b) Robustness to noise.

マイクロフォン前をほぼ同時に通過する複数車両の検出に向け、文献 [11], [12], [13] の手法には以下の2つの課題がある。

(1) 各車両のS字カーブをどのように分離するか？

サウンドマップ上でS字カーブを検出すれば車両を検出できるが、1台の車両を検出する際には他の車両の描くS字カーブはノイズとなり、検出精度の低下を招く。このため、サウンドマップ上のS字カーブを車両ごとに分離して他の車両検出への影響を軽減させる必要がある。

図4(a)は2台の車両が連続して通過した場合に1台の車両として検出される例を示している。図中の緑の線は検出した車両に対応するS字カーブであり、2台の車両が描くS字カーブの間で1つのS字カーブが推定されていることが分かる。図4(a)に示すような2台の場合には容易に誤検出を判定できるが、連続、同時に多数の車両が通過した場合には複数台の車両に対応するサウンドマップ点間でS字カーブが推定され、誤検出を判定することが困難となる。

(2) 車両以外のノイズの影響をどのように軽減するか？

サウンドマップを描く際には相互相関関数のピークを探すことで音の到達時間差を算出する。複数車両の走行音に対して相互相関を計算すると各車両の走行音

が互いに干渉することで相関が弱まり、ピーク探索時に環境ノイズの影響を受けやすくなる。この結果、サウンドマップ上のノイズが増加する。このため、サウンドマップ上のノイズに対してロバストな検出手法が必要となる。

図 4 (b) は、3 台の車両がほぼ同時に通過した場合のサウンドマップの例を示している。時刻  $t = 301.4$  [s] に左右から同時に 2 台の車両が、 $t = 302.6$  [s] に左から右へ 1 台の車両が通過している。3 台の車両が通過していることから 3 つの S 字カーブが描かれるはずであるが、互いの車両走行音が干渉して相関が弱まった結果として本来 S 字カーブが存在する場所とは異なる場所にサウンドマップの点が現れていることが分かる。

次章では、これらの課題を解決する逐次検出型車両検出システム SAVeD を示す。

### 3. 逐次検出型車両検出システム SAVeD

#### 3.1 アプローチ

前章で示した各課題に対して、逐次検出型車両検出システム SAVeD (Sequential Acoustic Vehicle Detector) では 2 つのアプローチによって解決を図る。

1 つ目のアプローチは、サウンドマップ上で検出した車両に対応する点群を消去することである。図 5 に示すようにサウンドマップ上で、(a) 左側から順に車両を検出し、(b) 検出した車両に対応する点群を消去したうえで、(c) 後続の車両を逐次的に検出する。複数台の車両が同時に同一方向に通過してサウンドマップ上の S 字カーブが完全に重なる頻度は低いと予想されることから逐次的な検出処理によって後続車両の検出精度を向上させ、課題 (1) の解決を図る。

2 つ目のアプローチは、ロバスト推定手法を用いて S 字カーブを検出することである。ロバスト推定手法はノイズの多いデータに対して未知のパラメータを含むモデル式をフィッティングするパラメータ推定手法である。通過車両が描く S 字カーブがどのような形状になるのかは既知の情報であることから、S 字カーブをモデル化したうえでサウンドマップにフィッティングすることで課題 (2) の解決を図る。SAVeD では適用するロバスト推定手法を限定しないが、本論文では代表的なロバスト推定手法として RANSAC (Random Sampling Consensus) を用いたモデルフィッティングを行う。

#### 3.2 概要

逐次検出型車両検出システム SAVeD では、図 1 で示した車両検出ブロック (Vehicle Detector) において先行車両の検出結果を差し引いて逐次的に車両を検出する。図 6 に、SAVeD における車両検出ブロックの構成を示す。SAVeD における車両検出ブロックは、RANSAC フィッティング

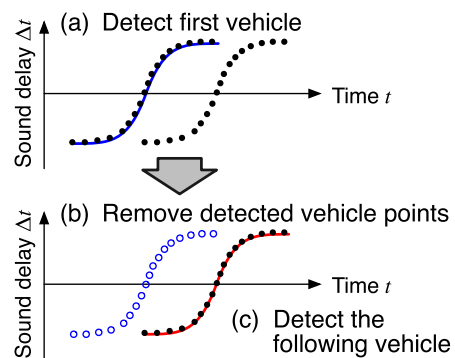


図 5 SAVeD の基本アプローチ。(a) 先行する車両を検出し、(b) 検出した車両に対応する点群を消去したうえで (c) 後続車両の検出処理を逐次的に行う

Fig. 5 Key idea of the SAVeD. (a) SAVeD first detects preceding vehicle (b) and remove points associated with the detected vehicle. (c) SAVeD keeps detection process for the following vehicles.

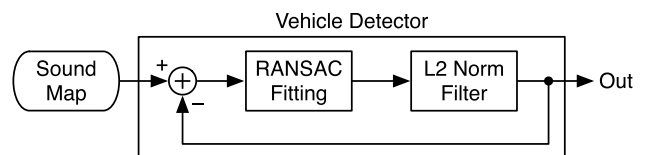


図 6 SAVeD における車両検出ブロックの構成  
Fig. 6 Overview of vehicle detector in SAVeD.

ブロック、L2 ノルムフィルタブロックという 2 つのブロックから構成される。

RANSAC フィッティングブロックでは、式 (2) で示したサウンドマップ上の車両通過モデルをサウンドマップ上の S 字カーブに RANSAC を用いてフィッティングすることで車両を検出する。RANSAC によるフィッティングでは車両が連続で通過した場合の連続した S 字カーブによって誤検出が発生することから、L2 ノルムフィルタブロックにおいて L2 ノルムを用いたフィルタリングを行い、最終的な車両検出結果として出力する。検出された車両の情報はフィードバックされ、サウンドマップ上から検出車両に対応する点群を消去したうえで検出処理を繰り返す。

以降では各ブロックについて詳述する。

#### 3.3 RANSAC フィッティングブロック

RANSAC フィッティングブロックでは、式 (2) で表されるサウンドマップ上の車両通過モデルをサウンドマップ上に描かれた点群にフィッティングする。式 (2) では走行音の到達時間差  $\Delta t$  が車両の位置  $x$  を用いて表されているが、サウンドマップの横軸は時刻  $t$  であるため式 (2) を時刻の関数に書き換える。車両がマイクロフォンの目の前を時刻  $t = 0$  で速度を変化させずに通過するものと仮定すると、式 (2) は



$$\Delta t = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left( vt + \frac{D}{2} \right)^2 + L^2} - \sqrt{\left( vt - \frac{D}{2} \right)^2 + L^2} \right\} \quad (3)$$

と書き換えられる．ここで， $v$  は車両の速度である．RANSAC を用いて式 (3) の速度  $v$  を推定することで車両通過モデルをフィッティングする．

式 (3) のモデルではマイクロフォン前を車両が速度を変化させずに通過するものと仮定したが，車両が加減速する前提でモデル式を定めれば車速の変化が想定される高速道路の出入口などでの検出も可能である．本論文では，車両速度の変化が小さいと想定される環境において速度変化を考慮しない式 (3) を用いたフィッティングを行った場合にどの程度の検出性能を達成できるか 4 章において評価する．

図 7 に，RANSAC を用いたフィッティングの概要を示す．RANSAC を用いたフィッティングは 4 つのステップで実現される．

- 1) サウンドマップ上の点からランダムに 1 点をサンプルする．パラメータ推定の計算量を考慮し，サンプルの点数はフィッティングするモデル式においてパラメータを求めるために必要となる最小限の数に設定することが一般的である．速度  $v$  は実数であるから，1 点のサンプルから式 (3) の速度  $v$  を推定できる．速度変化を考慮するモデルを用いる場合など，推定するパラメータ数が 2 つ以上の場合には 2 点以上のサンプルからパラメータを推定する．
- 2) 選択されたサンプルを用いて式 (3) の速度  $v$  を推定する．推定された速度を  $\hat{v}$  とする．速度の推定値  $\hat{v}$  を用いてサウンドマップ上に車両通過モデル式による S 字カーブを描く．
- 3) 描かれた S 字カーブとサウンドマップ上の各点との距離の総和を求める．計算の簡単化のため SAVeD ではサウンドマップ上の各点と S 字カーブとの距離として縦軸  $\Delta t$  方向の距離を用いる．
- 4) ステップ 1)~3) を繰り返し，距離の総和が最も小さくなる速度  $\hat{v}$  を最終的なフィッティング結果として処理を終了する．

ステップ 1)~3) の繰り返しの中ではランダムにサンプリングしたサンプルのみを用いてパラメータ  $v$  を推定する．サウンドマップに含まれるノイズをサンプリングした場合には大きく外れた  $v$  が推定されることとなるが，RANSAC では繰り返しで推定されたパラメータ群の中からモデルと尤も一致するパラメータを最終的なフィッティング結果とする．これにより，繰り返し数が十分に大きければノイズの影響を受けることなくモデルフィッティングを行うことができる [14]．

通過車両の有無は，RANSAC によるフィッティング結果に対して距離の総和に基づくフィルタリングを適用する

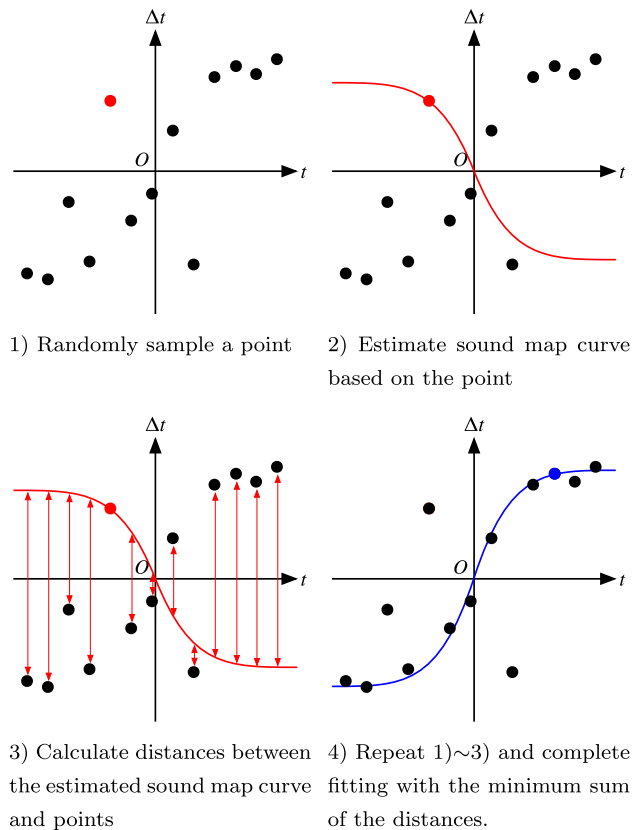


図 7 RANSAC によるフィッティングの概要

Fig. 7 Overview of RANSAC fitting.

ことで判定する．RANSAC によるフィッティングはサウンドマップ上の点群と最も近い S 字カーブを推定するものである．点群が S 字カーブを形成していない場合にも推定結果は得られるため，ステップ 3) で求めた距離の総和に基づいて S 字カーブが形成されているかどうかを判定する．

### 3.4 L2 ノルムフィルタブロック

RANSAC によるフィッティングでは車両が連続または同時に通過した場合に誤検出が発生する．通過車両が描く S 字カーブの先端部分は  $\Delta t = \pm \frac{D}{c}$  に漸近するため，2 台の車両が同じ方向に連続して通過した場合あるいは反対方向に同時に通過した前後では図 8 の (a), (b) の赤線で示すような車両通過モデルが推定される．推定された車両通過モデルと各 S 字カーブの一部は重なっていることから，通過車両軌跡とサウンドマップ上の点との距離に基づくフィルタリングが難しい．

このような誤検出を削減するため，L2 ノルムフィルタブロックでは RANSAC フィッティングブロックで得られた通過車両の検出結果に対して L2 ノルムに基づくフィルタリングを適用する．RANSAC によるフィッティングで得られた S 字カーブに対応するサウンドマップ上の点群に対して L2 ノルムを計算し，L2 ノルムが閾値を上回った場合は誤検出であると判定する．S 字カーブに近接するサウンドマップ点群の集合を  $\mathbf{D}$  とすると，L2 ノルムは以下の

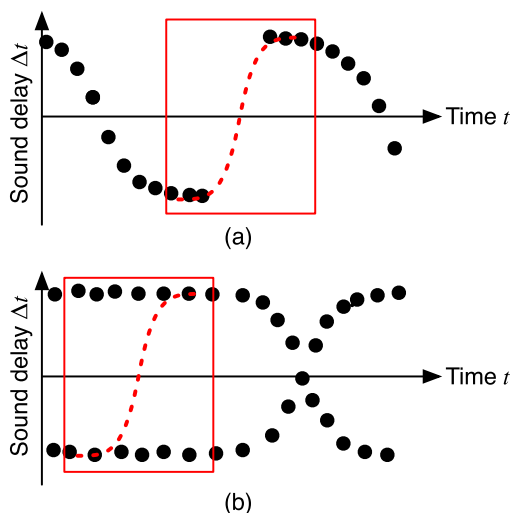


図 8 (a) 連続および (b) 同時通過車両による誤検出  
**Fig. 8** False positive detection by (a) successive and (b) simultaneous passing vehicles.

ように定義される.

$$\|D\| = \sqrt{\sum_{i \in D} i^2} \quad (4)$$

図 8 に示すように、誤検出部分のサウンドマップには到達時間差  $\Delta t = 0$  付近のデータが存在しないために L2 ノルムが大きくなる。車両検出部のサウンドマップ点群の数  $|D|$  は一定でないため、閾値との比較の前に L2 ノルムを点群の数で規格化する。

### 3.5 設計上の制約

SAVeD は車両が道路上を移動していることを前提として車両を検出するため、渋滞や信号待ちなどで車両が完全に停止している場合には検出することができない。また、車両の速度が遅い場合には S 字カーブの横幅が長くなること、タイヤから発せられる走行音が小さくなることから検出が困難となることが予想される。筆者らは、車両走行音を解析して車両を検出する方式を組み合わせるなどすることで低速車両の検出も実現できると考えている。

速度の速い車両に関してはこのような制約は存在しないが、S 字カーブの変化が急激になるために検出が困難となることも予想される。どの程度の速度まで検出可能であるかは実環境で評価する必要がある。

## 4. 評価

逐次検出型車両検出システム SAvE D 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取得した車両走行音を用いて車両検出性能および検出時刻誤差を評価した。

### 4.1 評価環境

図 9 に評価環境を示す。対象の道路は片側 1 車線、合計

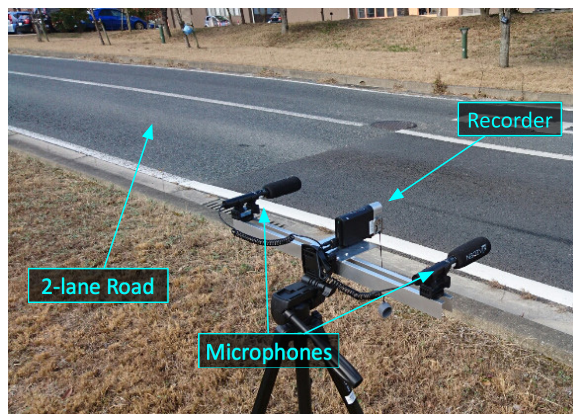


図 9 評価環境  
**Fig. 9** Experiment setup.

2 車線の道路であり、両車線の車両を検出対象とした。2 台のマイクロフォンを道路横の歩道上に設置し、ビデオカメラに接続して車両の走行音を約 20 分間記録した。走行音は交通量が多く同時または連続した通過車両の多い時間帯に取得した。ビデオカメラは SONY 社製 HDR-MV1、マイクロフォンは AZDEN 社製 SGM-990 である。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。文献 [11] と同様にマイクロフォンの間隔は 50 cm、高さは 1 m である。

ビデオカメラを用いて走行音と同時に映像も記録し、この映像を真値として 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ときに車両を検出した場合、車両が走行しているときに車両を検出できなかった場合、車両が走行していないときに車両を検出した場合である。

また、TP, FN, FP の回数を用いて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。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$F_{\text{measure}} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (7)$$

精度は車両を検出した回数のうち実際に車両が通過した割合、再現率は通過した車両のうち検出できた割合である。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。

本論文ではアプリケーションを限定していないが、1 章で例示した交通渋滞回避、緊急車両の経路探索、リアルタイム交通信号制御などでは交通量を把握する必要があることから検出結果が総合的に見て正しいことが重要である。この観点から本論文では F 値によって車両検出性能を評価した。アプリケーションを想定していない場合にはアプ

リケーション設計者が本手法を利用可能であるかどうかを判断するための指標を提供することが重要となる。このため、本論文では精度および適合率の評価も示した。

車両検出性能を相対的に評価するため、以下に示す3つの方式で性能を比較した。

(1) 逐次検出方式 (SAVeD)

本方式は3章で示した提案方式である。検出車両に対応する点群をサウンドマップ上で消去しながら逐次的に車両検出を行う。

(2) 連続検出方式 (Non Removal)

本方式は、検出車両に対応する点群をサウンドマップ上で消去せずにそのまま後続車両の検出を行う方式である。

(3) ステートマシン方式 (State Machine)

本方式は、文献[11]で示したステートマシンベースのアルゴリズムをサウンドマップに適用して車両を検出する従来方式である。

走行音を取得した約20分間で合計178台の車両が通過した。表1に、通過車両に占める連続、同時通過車両の台数を車両の進行方向別に示す。連続または同時に通過した車両の合計は95台であった。走行音の取得は、マイクロフォンから離れている車線を左から右方向へ通過する車両が多い時間帯に行った。信号待ちをしていた車両が連続して通過することが多い場所であり、左右どちらの方向も通過車両の約半数が連続または同時通過車両である。なお、連続または同時に通過した車両の定義は文献[11]と同様に「通過の前後2秒以内に別の車両が通過した車両」である。実験中に通過した車両の速度はおおよそ25~50km/hであり、普通車やバスなど複数種別の車両が通過した。表2

表1 通過車両全体 (All) に占める連続 (Successive)、同時 (Simultaneous) 通過車両の台数

Table 1 Numbers of successive and simultaneous passing vehicles among all passing vehicles.

Direction	All	Successive	Simultaneous
Left to Right	124	54	15
Right to Left	54	8	18

に、通過車両の進行方向別、種別ごとの台数を示す。

4.2 車両検出性能

表3に、TP, FN, FPの回数とこれらから算出した精度、再現率、F値を示す。表3より以下の4つのことが分かる。

- (1) 逐次検出方式のF値は3方式中で最も大きい0.83である。人手による観測においても十数%の誤差があることから[15]、人手とほぼ同等の精度で車両を検出できたといえる。従来のステートマシン方式と比べてF値は10ポイント以上改善された。
- (2) 逐次検出方式・連続検出方式の再現率は、ステートマシン方式に比べて大幅に大きい。逐次検出方式・連続検出方式ではRANSACによるフィッティングを用いることで同時・連続で通過する車両を検出できる割合が増加したためと考えられる。
- (3) ステートマシン方式の精度は3方式中で最も高い1.00である。ステートマシン方式ではサウンドマップ上にはほぼ完全なS字カーブが現れた場合にのみ車両が検出されるために高い精度となったと考えられる。
- (4) 逐次検出方式の精度は連続検出方式に比べて大幅に大きい。逐次検出方式では検出した車両に対応する点群が消去されるため、複数台の車両が区別されて検出される。これに対し、連続検出方式では1つのS字カーブを複数回検出して複数の車両と認識するために精度が低下したものと考えられる。

以上の結果から、逐次検出方式 (SAVeD) によって既存のステートマシン方式に比べてFPの回数を大きく増加させることなくFNの回数が大幅に削減され、高いF値での車両検出を実現できることを確認した。

筆者らは、F値0.83という値から交通量を把握するとい

表2 車両種別ごとの通過車両台数

Table 2 Number of passing vehicles for each vehicle type.

Direction	All	Bike	Bus	Truck	Normal
Left to Right	124	77	15	0	32
Right to Left	54	17	10	2	25

表3 車両検出性能の評価結果

Table 3 Experiment results of vehicle detection performance.

	SAVeD			Non Removal			State Machine		
	Left to Right	Right to Left	Total	Left to Right	Right to Left	Total	Left to Right	Right to Left	Total
TP	103	44	147	103	41	144	62	37	99
FN	21	10	31	21	13	34	62	17	79
FP	18	11	29	70	47	117	0	0	0
Precision	0.85	0.80	0.84	0.60	0.47	0.56	1.00	1.00	1.00
Recall	0.83	0.81	0.83	0.83	0.76	0.81	0.50	0.69	0.56
F-measure	0.84	0.81	0.83	0.69	0.58	0.66	0.67	0.81	0.71



う目的に向けて SAVeD は実用的であると考えている。本論文ではアプリケーションを限定していないが、1章で例示した交通渋滞回避、緊急車両の経路探索、リアルタイム交通信号制御などに向けては十分であると考えている。一方で、ステートマシン方式に比べて FP が増加していることから FP が少ないことが重要となるアプリケーションへの適用は難しいといえる。

### 4.3 検出時刻誤差

SAVeD がどの程度の時刻誤差で車両を検出できるのかを評価するため、検出時刻誤差を評価した。検出時刻誤差は実際の車両通過時刻とシステムが検出した車両通過時刻との差である。車両  $i$  の前後車輪の midpoint がマイクロフォンの目の前を通過した時刻を  $t_i$ 、システムが検出した車両通過時刻を  $\hat{t}_i$  とすると、車両  $i$  の検出時刻誤差  $\varepsilon_i$  は以下のよう

$$\varepsilon_i = \hat{t}_i - t_i \tag{8}$$

図 10 に検出時刻誤差 (Detection Time Error) のヒストグラムを示す。赤、青の線はそれぞれ検出時刻誤差の平均値、中央値を示している。平均値、中央値はそれぞれ 24.3 ミリ秒、38.7 ミリ秒であり、検出時刻誤差の絶対値は最大でも 0.6 秒未満であった。4.1 節で示した評価環境ではほとんどの車両はおおよそ 40 km/h で通過しており、マイクロフォンが車両走行音を拾える範囲をおおよそ 2 秒で通過していた。車両通過時間のおおよそ 2 秒と比べて小さい誤差で車両を検出できたといえる。

高速道路のように速度の速い車両が存在する場合には車両の通過時間が短くなることから、車両検出誤差は必ずしも十分に小さいとはいえない。許容される検出時刻誤差はアプリケーションによって異なると予想されるため、アプリケーションごとに必要な精度を実現するための改良が必要であると考えられる。たとえば、3.3 節で示し

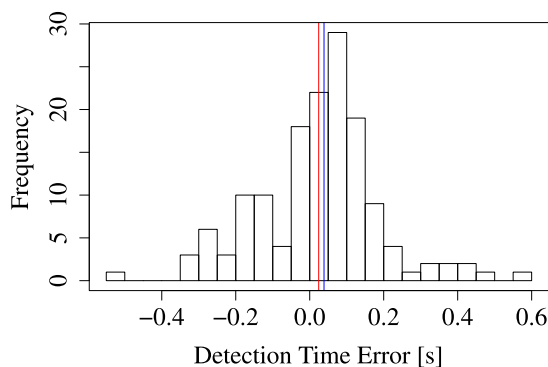


図 10 検出時刻誤差のヒストグラム。赤、青の線はそれぞれ平均値、中央値を示している

Fig. 10 Distribution of detection time error. Red and blue lines indicate mean and median of the time error, respectively.

た RANSAC フィッティングブロックにおいて最終フィッティングを行うなどの改良が考えられる。最終フィッティングでは、3.3 節のステップ 4) で得られた S 字カーブに近いすべての点を用いてモデル式に再度フィッティングを行う。これにより、サウンドマップ上のより多くの点に一致したモデルを推定することが可能となり、検出時刻誤差を削減できる。

## 5. 議論

### 5.1 False Negative に関する議論

31 回の False Negative を精査したところ、いずれも同時または連続通過車両の影響によりサウンドマップ上の S 字カーブが希薄となっていて検出できないものであった。図 11 に False Negative が発生したサウンドマップの例を示す。図の範囲では、時刻  $t = 141.09$  [s] において左から右へ普通車が、時刻  $t = 141.79$  [s] において右から左へバスが通過している。このうちバスは検出されたが普通車は検出されなかった。普通車の通過による S 字カーブは確認しにくいいため FN となったと考えられる。このような FN を削減するためにはサウンドマップそのものの描き方を変更して複数台の車両が存在する場合にも S 字カーブが描かれるように改善する必要があると思われる。

このような状況は車種や車線、速度に依存せずに発生していた。3.5 節で述べたように提案している SAVeD は車両速度の影響を受ける可能性があるが、本論文で評価した範囲、すなわち評価実験において通過したおおよそ 25~50 km/h の車両の速度が検出に与えた影響は確認できなかった。

### 5.2 False Positive に関する議論

29 回の False Positive を精査したところ、いずれも大きな検出時刻誤差に起因するものであった。図 12 に False Positive が発生したサウンドマップの例を示す。図の範囲では、時刻  $t = 504.15$  [s] に左から右へバスが通過している。しかしながら、SAVeD では時刻  $t = 503.47$  [s],  $t = 504.32$  [s] の 2 回それぞれ左から右へ通過する車両を検

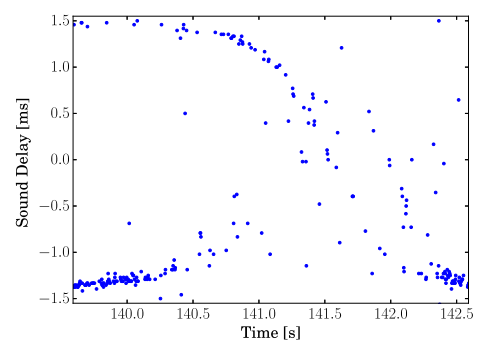


図 11 False Negative が発生したサウンドマップ例

Fig. 11 Example of sound map with false negative detection.



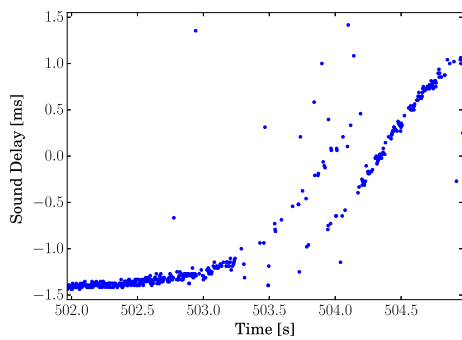


図 12 False Positive が発生したサウンドマップ例

Fig. 12 Example of sound map with false positive detection.

出していた。

時刻  $t = 503.47$  [s] の検出は図中の左側の S 字カーブを検出したものと推測できるが、検出時刻が実際の通過時刻から大きく乖離している。3.1 節で示したとおり SAVeD では検出した S 字カーブに対応する点群をサウンドマップ上から消去してから後続車両の検出処理を行う。「検出した S 字カーブに対応する点群」は検出した S 字カーブに近接している点としているため、検出時刻が大きく乖離している場合には対応する点群が少なくなる。この結果、1 度検出した車両を再び検出し、FP となったと考えられる。本論文では式 (3) で示したように S 字カーブが原点を通るモデルを用いてフィッティングを行ったが、S 字カーブが時刻方向に移動する前提のモデルを用いることで検出時刻誤差を削減することが可能となり、このような FP を削減できると考えられる。

FP はバスのような大型車で多く発生していた。大型車では車両走行音の主要な発生源である前後車輪の間隔、すなわちホイールベースが長いいため図 12 で示したように S 字カーブが 2 つに分離し、FP を招いたと考えられる。

## 6. 関連研究

音響車両センシング分野においてサウンドマップ上で複数台の車両を識別しながら検出する試みは、筆者らの調査した範囲ではこれまでのところ行われていない。本章では、これまでに報告されている車両検出技術について俯瞰する。

現在用いられている車両検出システムは、埋設型と非埋設型に大別できる [16]。

ループコイルや光電センサを用いた車両検出システムは埋設型に分類される。埋設型の車両検出システムは道路表面または道路下に埋設した車両検出用センサを用いて車両を検出する。設置・メンテナンスのためには設置場所周辺の道路を封鎖した道路工事が必要となるため、導入・管理コストが高いという問題がある。また、ループコイルや光電センサは検出領域が狭いため、二輪車などの小型車両を検出するために多数のセンサを導入する必要がある。

非埋設型の車両検出システムは、レーザや赤外線、超音波、電波、カメラなどの車両検出センサを用いて車両を検出する。これらの車両検出システムは障害物によって遮蔽された場合に車両を検出できないため、車両検出センサを道路上方または側方の高い位置に設置する必要がある。センサの導入にはセンサを支えるポールやアームに加えて落下防止装置などの安全対策を必要とし、安全性を考慮すると設置場所周辺の道路を封鎖する道路工事が必要となることから導入・管理コストが高くなる。実際、一般に多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には多額の費用を要することが報告されている [17]。このため、道路を封鎖しての工事を避けるなど、道路工事に要するコストを削減することが重要である。

設置・運用コストを削減する手法として CCTV (Closed-Circuit Television) を用いた画像解析による車両検出手法も提案されているが [1], [2], [3], CCTV は主に市街地などのみで利用可能である。また、画像解析に基づく検出手法はカメラの設置角度や設置位置が大きく精度に影響を与えるため、設置角度・設置場所を変更できない CCTV を用いて高い精度を担保することは困難である。

これらの手法に対して、走行音を用いた車両検出技術は新たな低コスト車両検出手法として注目されている。これまでに、マイクロフォン・アレイを設置して「サウンドマップ」を描くことで車両を検出する手法 [18], [19], [20], [21] が報告されている。これらの手法ではサウンドマップをどのように解析して車両を検出するかが示されていないことから、筆者らは DTW (Dynamic Time Warping) による類似度計算やステートマシンを用いた車両検出アルゴリズムを適用することで車両を検出する手法を報告した [11], [12], [13]。

しかしながら、これらの車両検出技術は複数台の車両がマイクロフォンの前をほぼ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。これまでの車両検出技術ではサウンドマップ上に描かれた S 字カーブをモデル化せずに検出を行っており、サウンドマップ上の各プロット点と通過車両との対応がとられていない。このため、複数台の車両の S 字カーブをそれぞれ認識することが困難である。サウンドマップを用いずに受信音の大きさをを用いて車両を検出する手法も報告されているが [22], [23]、環境音や歩行者の声などによる誤検出のために高い精度の実現が困難である。

## 7. おわりに

本論文では、低コストな車両検出システムとしてマイクロフォンを用いた逐次検出型車両検出システム SAVeD を示した。路側に設置した 2 台のマイクロフォンに車両走行音が到達する時間差の時間変化を示すサウンドマップを描き、サウンドマップ上の点群と車両とを対応させながら車

両を検出する。検出結果をフィードバックし、検出車両に対応する点群をサウンドマップ上から消去しながら逐次的に車両検出処理を行うことで複数の車両を高精度で検出する。九州大学伊都キャンパス内の片側1車線道路においてSAVeDの実証評価を行い、F値0.83という高い精度で車両を検出できることを確認した。

謝辞 本論文の研究の一部は、科研費(JP15H05708, JP17K19983, JP17H01741)およ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。

### 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] Nurhadiyah, 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, *Proc. Int. Conf. on Information Technology and Software Engineering, LNEE*, Vol.210, pp.497–508 (2012).
- [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] 石田繁巳, 三村晃平, 劉 嵩, 田頭茂明, 福田 晃: 路側設置マイクロ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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Fischler, M.A. and Bolles, R.C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Comm. ACM*, Vol.24, No.6, pp.381–395 (1981).
- [15] 井坪慎二: ITを用いた交通調査の高度化・効率化に関する研究, 博士論文, 京都大学 (2009).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] Forren, J.F. and Jaarsma, D.: Traffic Monitoring by Tire Noise, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.177–182 (1997).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] 平松義崇, 加藤ジェーン, 渡邊豊英: ステレオマイクを用いた自動車走行音の認識, 交通工学, Vol.40, No.6, pp.68–79 (2005).
- [23] 豊田卓矢, 小野順貴, 宮部滋樹: 分散型マイクロホンアレイを用いた交通車両検出とその車線推定の検討, 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.643–646 (2014).



石田 繁巳 (正会員)

2006年芝浦工業大学工学部卒業。2008年東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程修了。2012年同大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。2008年(株)アクティス入社。2013年米国ミネソタ大学客員研究員。2013年九州大学システム情報科学研究院助教。無線通信, センサネットワークに関する研究に従事。2016年度山下記念研究賞。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



梶村 順平

2016年九州大学工学部電気情報工学科卒業。2018年九州大学大学院システム情報科学府修士課程修了。研究遂行当時, 同大学院修士課程在学中。音響センシング, 屋内測位の研究に従事。



内野 雅人

2018年九州大学工学部電気情報工学科卒業。現在、同大学大学院システム情報科学府修士課程在学中。高度道路交通システムに関する研究に従事。



田頭 茂明 (正会員)

1996年龍谷大学理工学部電子情報学科卒業。1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2000年同大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2000年広島大学工学部助手。2007年同大学大学院工学研究科助教。同年九州大学高等研究院特別准教授。2012年関西大学総合情報学部准教授。2014年同大学教授。モバイル・ユビキタスコンピューティングの研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



福田 晃 (正会員)

1977年九州大学工学部情報工学科卒業。1979年同大学大学院工学研究科修士課程情報工学専攻修了。同年日本電信電話公社(現, NTT)武蔵野電気通信研究所入所。1983年九州大学助手。1989年同大学助教授。1994年奈良先端科学技術大学院大学教授。2001年九州大学大学院システム情報科学研究院教授, 2008年九州大学システムLSI研究センター長(兼任), 2015年九州大学主幹教授, 2016年九州大学スマートモビリティ研究開発センター長(兼任), 現在に至る。工学博士。組込みソフトウェア, ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。情報処理学会研究賞(1990年), Best Author賞(1993年)等を受賞。情報処理学会フェロー, 電子情報通信学会, ACM, IEEE Computer Society, 日本OR学会各会員, 「NPO法人九州組込みソフトウェアコンソーシアム(QUEST)」理事長, 「九州IoTコミュニティ」会長等。