

# 音響車両検出システムの風影響下における 精度向上に関する検討

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

**概要** : ITS (Intelligent Transport System : 高度道路交通システム) において, 道路を走行中の車両を検出することは重要な課題の1つである. 交通量の少ない道路に対応した車両検出の実現を目指して, 筆者らはマイクロフォンを用いた車両検出システムの開発を進めている. このシステムは低コストかつ高い精度での車両の検出が可能であることが確認されているが, 風が吹いている際には風ノイズの影響により検出精度が低下するという問題がある. 本稿では風ノイズ低減型車両検出システムを提案する. マイクロフォンを用いた車両検出システムでは走行音の一部の周波数成分を用いて検出が可能である. そこで風の周波数成分を低減させるフィルタを適用し, 風影響下での検出精度を向上させる. 風ノイズ解析実験で風の周波数解析を行った結果に基づき, 風ノイズを低減するフィルタの一例として高域通過フィルタを適用する. 九州大学伊都キャンパス内の片側1車線道路で実証評価を行い, 本システムの精度を既存のシステムと比較したところ F 値最大 10 ポイントの精度の向上を確認した.

**キーワード** : 車両検出, 音響センシング, 風ノイズ

## 1. はじめに

道路交通の発展に伴い, 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 は情報通信技術を用いて道路交通の安全性, 交通性, 快適性の向上を実現させるとともに事故や渋滞を軽減させることを目指している. また, 最適な交通管理, 有料道路での料金支払いの自動化, 道路環境の保全, 自動運転の支援等を図ることも ITS の目的である [1].

ITS の発展のために取り組むべき課題の中でも, 道路を走行中の車両を検出することは重要な課題の1つである. 車両の検出によって道路交通の安全性, 効率性, 快適性の向上を実現させるとともに, 事故や渋滞の軽減を可能にする.

車両検出においては媒体や原理の異なる多くの方式が開発されている. その中でも現在のリアルタイム車両検出システムの主流となっているのは, 超音波やループコイルを用いた点側定量検出方式, CCTV 等のカメラベースの画像処理を用いた車両検出方式である [2], [3], [4], [5], [6]. こ

れらのシステムの設置には工事のための道路封鎖や交通管制が必要であり, 導入・運用コストが大きいことから交通量の多い一部の道路にのみ導入されている.

交通量の少ない道路にも対応した低コストリアルタイム車両検出の実現を目指して, 筆者らはマイクロフォンを用いた車両検出システムの開発を進めている [7], [8], [9]. このシステムでは道路横に設置した2台のマイクロフォンを用いて通過する車両のタイヤから発せられる走行音を取得する. そして, 2台のマイクロフォンにおける走行音の受信時刻の差から「サウンドマップ」を描くことによって車両検出を行う.

しかしながら, このシステムは風が吹いている場合に検出精度が低下する. サウンドマップを描く際には2台のマイクロフォンが受信した走行音信号の相互相関を計算することで受信時間差を推定する. 風の影響下では風ノイズが走行音に混ざることによって受信時間差の推定に失敗し, サウンドマップを正しく描画することが困難となる.

風影響下での車両検出精度向上に向け, 本稿では風ノイズ低減型車両検出システムを提案する. マイクロフォンを用いた車両検出システムでは走行音の一部の周波数成分を用いて検出を行うことが可能である. そこで, 走行音の主成分が含まれる周波数帯を避けて風ノイズを低減させるフィルタを構成することで車両検出精度を向上させる. 本

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究院  
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, Osaka, 569-1095, Japan

a) uchino@f.ait.kyushu-u.ac.jp

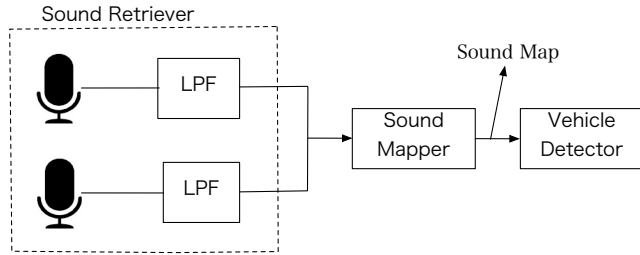


図 1 マイクロフォンを用いた車両検出システムの概要  
Fig. 1 Overview of acoustic vehicle detector

手法では風ノイズを低減させるフィルタを限定しないが、本稿では一例として予備実験の結果に基づいた高域通過フィルタを適用した。その上で、風影響下で取得したデータを本システムと既存のシステムを用いて検出精度を比較した。実際に風が吹いている時間帯に九州大学伊都キャンパス内の片側 1 車線、合計 2 車線の道路にて実証評価を行い、本システムを用いることで既存のシステムと比べて F 値を 10 ポイント向上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. では、マイクロフォンを用いた車両検出システムと風ノイズによる影響を示す。3. では提案する風ノイズ低減型車両検出システムについて示す。また、風ノイズ低減フィルタの一例として予備実験に基づく高域通過フィルタについて示す。4. では、実証評価を通じて提案する風ノイズ低減型車両検出システムの有用性を示す。5. では風ノイズの低減に関する関連研究を示し、最後に 6. でまとめる。

## 2. マイクロフォンを用いた車両検出

図 1 にマイクロフォンを用いた車両検出システムの構成を示す。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)、サウンドマップ作成ブロック (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。2 台のマイクロフォンを道路横に設置し走行音を取得する。取得した走行音はカットオフ周波数 2.5 kHz の LPF を適用して環境ノイズを削減した上でサウンドマップ作成ブロックに送られる。

サウンドマップ作成ブロックでは、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、サウンドマップを作成する。サウンドマップは、2 台のマイクロフォンが受信した車両走行音の受信時間差が時間とともにどのように変化したかを描いたものである。音の受信時間差は、2 台のマイクロフォンが受信した信号  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  として以下で定義される相互相関関数  $R(t)$  から求められる。

$$R(t) = \int s_1(t) s_2(t+r) dr \quad (1)$$

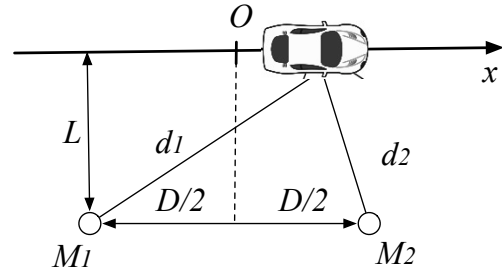


図 2 マイクロフォンの配置  
Fig. 2 Microphone setup

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。このため、 $R(t)$  は  $t = \Delta t$  において最大値を取る。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。本システムでは、相互相関関数ではなく音源定位の分野で一般的に利用されている GCC (Generalized Cross-Correlation: 一般化相互相関) 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、各分割データに GCC を適用する。

通過車両はサウンドマップ上に S 字のカーブを描く。図 2 に示すように道路と並行に 2 台のマイクロフォン  $M_1$ ,  $M_2$  を間隔  $D$  で道路中心から距離  $L$  だけ離して設置する場合を考える。マイクロフォン  $M_1$ ,  $M_2$  に到達する走行音の到達時間差  $\Delta t$  は、音速を  $c$  として

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

と求められる。ここで、 $x$  は車両の位置である。車両が一定速度  $v$  で時刻  $t = 0$  に  $x = 0$  の地点を通過すると仮定すると  $x = vt$  であるから式 (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。式 (3) より、 $vt$  の値が車両の通過により増加または減少することによってサウンドマップ上に S 字カーブが描かれることが分かる。

図 3 はサウンドマップの一例である。車両の通過によってサウンドマップ上に S 字のカーブが描かれていることが確認できる。サウンドマップ上に描かれる S 字カーブの数から通過車両の数を検出できる。また、カーブの向きから車両の通過方向を判定できる。

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の検出を行う。解析にはロバスト推定手法の 1 つである RANSAC (Random

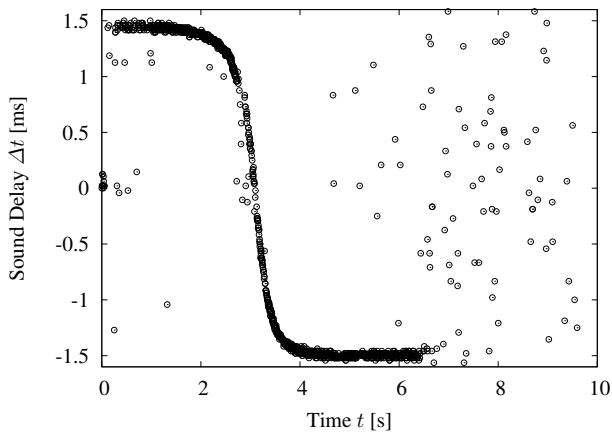


図 3 サウンドマップの例  
 Fig. 3 Sound map example

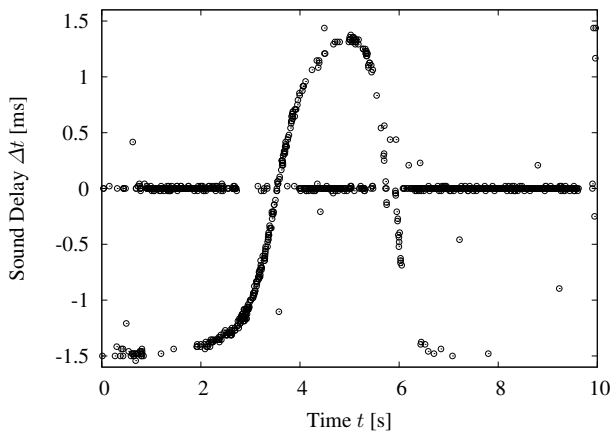


図 4 風影響下でのサウンドマップ  
 Fig. 4 Sound map example in windy environment

Sample Consensus) アルゴリズムを用いる [10]. RANSAC アルゴリズムを用いて, 実データからランダムに選択したサンプルを用いて車両速度  $v$  をを推定し, 推定された  $v$  を代入した式 (3) と実データとの距離の総和を計算する. 速度  $v$  の推定と距離計算を繰り返す, 距離の総和が最小になる場合を抽出してその総和が閾値を下回った場合に車両が通過したと判定する.

車両検出ブロックはサウンドマップ上に描かれた S 字カーブを検出することで車両を検出する. 風影響下ではサウンドマップ上の S 字カーブが「疎」となり, 車両検出精度が低下する. 風が吹いている場合には走行音に加えて各マイクに風が衝突して発生する風ノイズが受信信号に加わる. 2 台のマイクロフォンにおける風ノイズは無相関であるため [11], 風ノイズの含まれる信号は受信時間差  $\Delta t = 0$  において高い相関を示す. このため, 車両走行音の相関が弱い場合にはサウンドマップ上の  $\Delta t = 0$  に点が描かれることとなり, S 字カーブが薄くなる.

図 4 は風影響下でのサウンドマップの一例である. 車両が通過していない時, サウンドマップは風ノイズが無相関

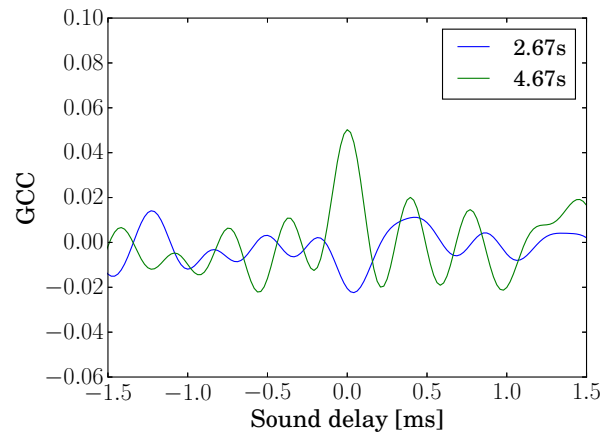


図 5 風影響下での GCC (一般化相互相関) 関数  
 Fig. 5 GCC (generalized cross-correlation) result in windy environment

であることによって到達時間差  $\Delta t = 0$  付近に集中している. 車両が通過している時にも一部の点が  $\Delta t = 0$  付近に描かれており, サウンドマップの S 字カーブが薄くなっていることが分かる.

図 5 は, 図 4 に示したサウンドマップを描く際に計算した時刻  $t = 2.67, 4.67$  s における GCC (一般化相互相関) 関数を示したものである. 時刻  $t = 2.67, 4.67$  s は, 走行音の受信時間差  $\Delta t = -1.23, 1.46$  ms に対応している. 時刻  $t = 2.67$  s においては  $\Delta t = -1.23$  ms 付近に GCC のピークを確認できるが, 時刻  $t = 4.67$  s においては無相関の影響による  $\Delta t = 0$  にピークが確認できる. GCC の計算においては帯域を制限しているため,  $\Delta t = 0$  のピークに加えて sinc 関数形状のピークが確認できる. 車両検出精度の向上に向けてはこのようなピーク群の影響を軽減して車両走行音の相関に基づいてサウンドマップを描画する仕組みが必要である.

### 3. 風ノイズ低減型車両検出システム

#### 3.1 アプローチ

風ノイズ低減型車両検出システムの基本アプローチは非常にシンプルである. 風の影響が大きい周波数成分を除外した上で音の到達時間差を推定し, 車両を検出する. マイクロフォンを用いた車両検出では車両走行音の一部の周波数成分のみを用いてもサウンドマップを描いて車両を検出可能である. そこで, 走行音の主成分が含まれる周波数帯を避けて風ノイズを低減させるフィルタを構成し, 無風時の検出への影響を小さく抑えながら風への耐性を高める.

#### 3.2 概要

風ノイズ低減型車両検出システムでは, 図 2 で示した走行音取得ブロックにおいて風ノイズの影響を削減するフィルタを適用する. 図 6 に, 風ノイズ低減型車両検出シス

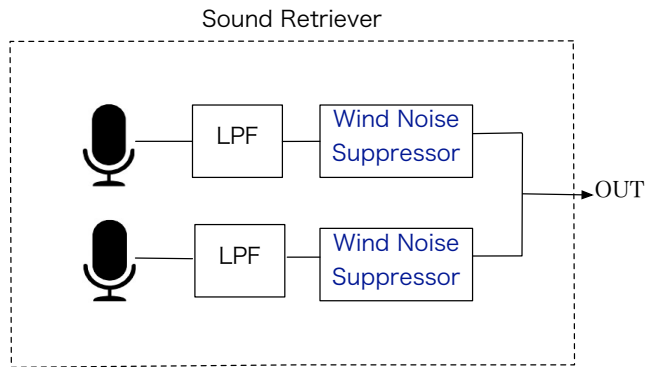


図 6 風ノイズ低減型車両検出システムにおける走行音取得ブロックの構成

Fig. 6 Overview of sound retriever in acoustic vehicle detection system with wind noise suppression

テムにおける走行音取得ブロックの構成を示す。風ノイズ低減型車両検出システムの走行音取得ブロックは、マイクロフォンにLPFに加えて風ノイズ低減フィルタ (Wind Noise Suppressor) を接続する。

以降では風ノイズ低減ブロックの設計について述べる。

### 3.3 風ノイズ低減ブロック

風ノイズ低減ブロックでは、風ノイズを低減するフィルタを構成する。このとき、車両走行音の主成分が含まれる周波数帯の成分を減衰させないようなフィルタを設計する。

タイヤから発生する車両走行音の主成分は1kHzから2kHzに集中している [12], [13]。参考までに、風がほぼない日に取得した走行音データに対して1Hzから2kHzの帯域のみを取り出すフィルタを適用してからサウンドマップを描いたところS字カーブが描画されることを確認した。

1Hzから2kHzのみを取り出す帯域制限を加えたサウンドマップを用いて車両検出まで行ったところ、帯域制限の有無で車両検出精度には大きな差は見られなかった。しかし、他のノイズの影響を考慮すると車両検出精度への影響を小さくするためには主成分の含まれる周波数帯以外の周波数帯も可能な限り利用することが望ましい。風ノイズ低減型車両検出システムでは、車両走行音の主成分が含まれる1kHzから2kHzを除外して風ノイズを低減するフィルタを適用する。

提案する風ノイズ低減型車両検出システムでは風ノイズ低減フィルタを限定しない。風ノイズ低減フィルタとしては画像処理や音声信号処理における一般的なノイズ低減手法の適用を想定している。例えば、主成分分析やWavelet変換、特異値分解 (SVD: Singular Value Decomposition)、経験的モード分解 (EMD: Empirical Mode Decomposition) を利用してノイズを削減する手法などが報告されている [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]。これらの手法において、ノイズ成分の解析時に車両走行音の主成分が含まれる1kHzから2kHzを除外した信号を用いることで車両

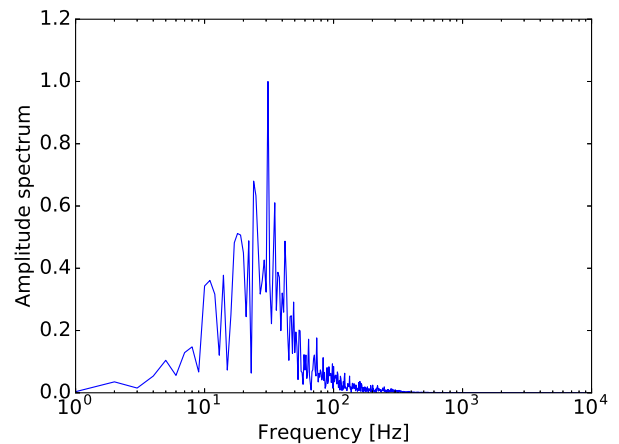


図 7 風ノイズの周波数スペクトラム (AZDEN 製 SGM-990 マイクロフォン, 風速 8.0 m/s の例)

Fig. 7 Spectrum of wind noise (AZDEN SGM-990 microphone, wind speed of 8.0 meters per second)

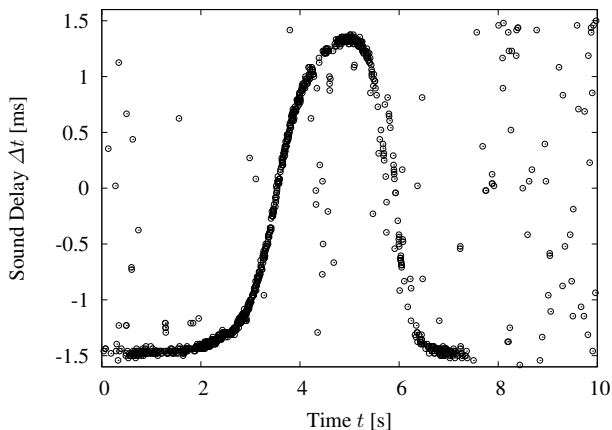
走行音の主成分を減衰させないフィルタを設計できる。

### 3.4 実験的手法に基づく風ノイズ低減フィルタの設計

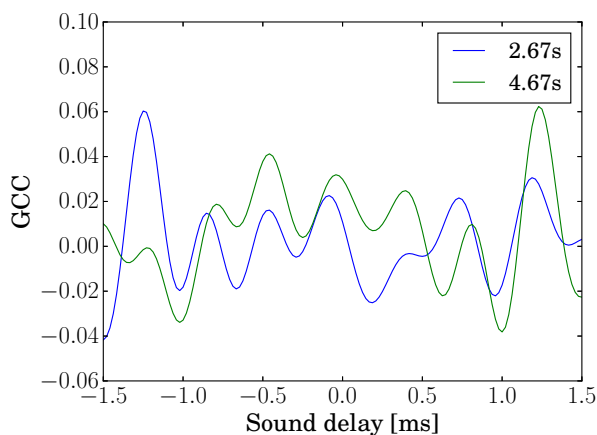
前節で述べたように、風ノイズ低減型車両検出システムでは風ノイズ低減フィルタを限定しない。提案手法の基本性能を実証するための一例として、本稿では実験的手法に基づいて設計した風ノイズ低減フィルタを適用する。実験的に取得した風ノイズの周波数分析を行い、風ノイズ成分を低減する帯域制限フィルタを構成する。

風ノイズの周波数分析を行うため、風洞内にマイクロフォンを設置して風ノイズの取得実験を行った。大気圧連続循環式の低騒音風洞内に2台のマイクロフォンを間隔50cmで設置し、風速を1.0m/sから15.0m/sまで1.0m/sずつ変化させながら各風速で30秒ずつ風ノイズを取得した。サンプリング周波数は48kHz、データ長は16bitである。マイクロフォンへの依存性を排除するため、実験にはAZDEN製SGM-990、Audio Technica製AT9944とAT9942、SONY製ECM-CG60という形状の異なる4種類のマイクロフォンを用いた。各マイクロフォン、各風速で取得したそれぞれの風ノイズを解析し、ノイズ成分が多く含まれる周波数帯を分析した。

図7に取得した風ノイズの周波数スペクトラムの一例を示す。図は、風速8.0m/sにおけるAZDEN製SGM-990マイクロフォンの風ノイズの周波数スペクトラムを示している。マイクロフォンの種類や風速によって風ノイズの周波数スペクトラムに差は見られたが、全てのマイクロフォン・風速において図7に示したように風ノイズは500Hz以下の低い周波数帯に集中していることが分かった。この結果に基づき、本稿ではカットオフ周波数500Hzの高域通過フィルタを風ノイズ低減フィルタとして用いることとした。



(a) サウンドマップ



(b) GCC

図 8 風ノイズ低減フィルタの適用後のサウンドマップ及び GCC 関数

Fig. 8 (a) Sound map and (b) GCC result with wind noise suppression

図 8 は、設計した風ノイズ低減フィルタを走行音データに適用した上で図 4 及び図 5 と同様にサウンドマップ、GCC 関数を描いた例を示している。図 8 (a) と図 4 とを比較すると、風ノイズ低減フィルタによって  $\Delta t = 0$  付近の点が削減され、車両通過時の S 字カーブが「密」になっていることが確認できる。また、図 8 (b) と図 5 とを比較すると風ノイズ低減フィルタによって時刻  $t = 2.67, 4.67$  s においてそれぞれ  $\Delta t = -1.23, 1.46$  ms 付近にピークが出現したことが確認できる。

#### 4. 評価

風ノイズ低減型車両検出システムを用いることで既存のシステムに比べて車両検出精度を向上できていることを検証するため、九州大学伊都キャンパス内の道路で実証評価を行った。

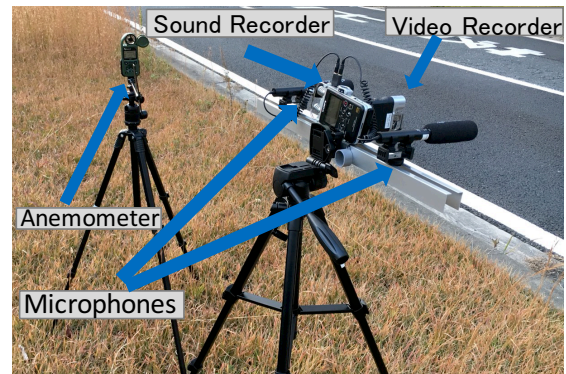


図 9 評価環境

Fig. 9 Experiment setup

#### 4.1 評価環境

図 9 に評価を行った環境を示す。風が吹いている時間帯に片側 1 車線、合計 2 車線の道路にて 2 台のマイクロフォンを設置し、約 20 分間にわたって走行音データを記録した。走行音データの記録はサウンドレコーダで行い、実際に車両が通過したことを確かめるため、真値の動画をビデオレコーダで記録した。本評価においては風が吹いていることが重要であるのでシステム横に風速計を設置して風速を測定した。マイクロフォンは AZDEN 製 SGM-990、サウンドレコーダは SONY 製 PCM-D100、ビデオレコーダは SONY 製 HDR-MV1、そして風速計は Kestrel5500 を使用し、測定においてサンプリングレートは 48kHz、量子化ビットは 16bit に設定した。マイクロフォンの間隔は 50cm、地面からの高さは 1m に設置した。

評価には混合行列を用いた。車両が通過した時に実際に検出をした時を True Positive (TP)、車両が通過した時に検出をしなかった時を False Negative (FN)、車両が通過していない時に検出をした時を False Positive (FP) としてその回数を抽出した。

また抽出した TP, FP, FN の値を用いて精度 (Precision)、網羅率 (Recall)、F 値 (F-measure) をそれぞれ算出した。定義式は以下の通りである。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$F_{\text{measure}} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (6)$$

精度は車両の通過と判定したデータの中で実際に車両の通過した割合を示す。網羅率は通過した車両のうち車両通過と判定された割合を示す。そして F 値は総合評価に用いる指標である。検出性能を相対的に評価するため、本システムと既存のシステムとで性能を比較した。ビデオレコーダで確認した車両の通過を真値とし、サウンドレコーダで取得したデータに対して既存のシステムと風ノイズ低減型のシステムで検出性能を比較した。走行音を取得した約 20

分間で合計 133 台の車両が通過した走行音データ取得時の平均風速は 5.2m/s であった。

## 4.2 車両検出性能

表 1 に TP, FN, FP の回数およびこれらから計算された精度, 網羅率, F 値を示す。表 1 では風ノイズ低減ブロックを適用した。本システムと既存システムのそれぞれについて, 車両の通過方向別で結果を示している。表 1 より以下のことがわかる。

- 風ノイズ低減型車両検出システムでは既存システムと比べて F 値が 10 ポイント上昇した。
- 風ノイズ低減型車両検出システムでは精度が大きく向上した。風ノイズ低減フィルタによって FP の値が既存システムに比べて大きく減少したためと考えられる。既存手法で多発している誤検出が半減した理由としてはサウンドマップの改善が挙げられる。
- 網羅率に大きな差は見られない。FN の値は車両の連続通過によって増加する。網羅率の向上にはサウンドマップではなく検出アルゴリズムの改善が必要である。

以上の結果から, 風の影響が大きい環境において本システムが有効であることが確認された。

## 5. 関連研究

音響センサを用いた車両検出分野においてサウンドマップでの検出に対する風の影響を考慮している研究は, 筆者らの調査ではこれまで行われていない。本節ではこれまでに報告されている音響センサに対するノイズ削減手法及び風ノイズ低減手法について俯瞰する。

### 5.1 音響センサに対するノイズ削減手法

音響センサにおけるノイズを削減する研究はこれまでにいくつか行われている。Moragues と Machmer はマイクロフォン・アレイを用いたノイズ削減手法を報告している [21]。これらの手法では音源位置推定法の 1 つである SRP-PHAT (Steered Response Power with the Phase Transform) と GCC (Generalized Cross-Correlation) を組み合わせることによって音源以外のノイズを削減している。しかしながら, 風のように非定常な環境ノイズにおいては精度が低く, また複数台の無指向性マイクロフォンを設置するため設置の制約がある。

非定常な環境ノイズに適応した手法として, EMD (Empirical Mode Decomposition) を用いたノイズ削減手法も報告されている [19], [20]。音声信号を EMD を用いて異なる周波数に分解し, 信号とノイズの IMF (Intrinsic Mode Function: 固有モード関数) を判断して分けることによってノイズを削減している。この手法は汎用性が高く効率的にノイズを削減することができるが, 測定には少なくとも 3 つ以上の音響センサが必要であり設置・運用のコストが

増加する。

### 5.2 風ノイズ低減手法

風ノイズに対応したマイクロフォンの設置方法として JIS (日本工業規格) が規定している「JIS C1400-11 風力発電システム:騒音測定方法」がある [22]。マイクロフォンを設置し, それを主防風スクリーンと 2 次防風スクリーンの大きさの異なる 2 種類のスクリーンで覆うことで風ノイズを低減させるという設置方法である [23]。この方法は一般的に風切り音と言われる自己発生乱流雑音には効果があるといわれているが大気の流れにより生じる流下乱流雑音のような超低周波領域にはその効果が不明である。また, 地面に設置する方法は 2 台のマイクロフォンを用いて検出を行う本システムにおいてはスクリーンが 2 倍必要になり, 設置においても場所に制約を生んでしまうため適切とは言えない。

風ノイズ対策として主流となっているのはウィンドジャマーを用いた方法である。マイクロフォンに向かって流れる乱流のエネルギーを無数の毛やスポンジが動くことによって運動エネルギーとして消費・分散させることで風ノイズの影響を軽減させている。一方で走行音や声といった風のように強くない音は毛やスポンジを動かすほどの運動エネルギーを保持していないので減衰せず通過させ, マイクロフォンに届くという原理である。ウィンドジャマーは比較的安価に手に入り, マイクロフォンに装着するだけで一定の効果が得られるため現在の風ノイズ対策の主流となっている。しかしながら風速が大きいものには対応しきれず風ノイズを起こしてしまうという問題点がある。実際に先行研究でもマイクロフォンに標準装備されているウィンドジャマーを用いて検出を行なっているが精度低下を防げずにいることが確認されている。

## 6. おわりに

本稿では, 風影響下に対応したリアルタイム車両検出システムとしてマイクロフォンを用いた風ノイズ低減型車両検出システムを示した。本システムでは車両走行音の 2 台のマイクロフォンに到達する時間差を「サウンドマップ」として描くことによって車両の検出を行う。検出は走行音の一部の周波数成分で実現可能である。そこで風ノイズの周波数帯を削減した上で音の到達時間差を推定し検出を行う。九州大学伊都キャンパス内の片側 1 車線道路において実証評価を行い既存システムとの比較を行ったところ, 本システムにより F 値最大 10 ポイントの向上を確認した。

謝辞 本稿で示した研究の一部は, 科研費 (JP15H05708, 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。また, 風洞での実験にご協力頂いた九州大学大学院工学研究院の谷泰寛准教授に謝意を表す。

表 1 車両検出性能の評価結果

Table 1 Experiment results of vehicle detection performance

	Proposed system			Conventional system		
	Left to Right	Right to Left	Total	Left to Right	Right to Left	Total
TP	69	37	106	67	37	104
FN	15	12	27	17	12	29
FP	27	8	35	49	23	72
Precision	0.72	0.82	0.75	0.58	0.62	0.59
Recall	0.82	0.76	0.80	0.80	0.76	0.78
F-measure	0.77	0.79	0.77	0.67	0.68	0.67

参考文献

- [1] 小泉寿男：ITSと情報処理技術，情報処理，Vol. 40, No. 10, pp. 978–981 (1999).
- [2] 金山憲司：都市交通と映像メディア，映像情報メディア学会誌，Vol. 53, No. 1, pp. 55–61 (1999).
- [3] 橋本浩良：常時観測データを利用した幹線道路の交通量データの収集方法に関する研究，博士論文，筑波大学 (2014).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Nurhadiyahna, 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 梶村順平，石田繁巳，内野雅人，田頭茂明，福田晃：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，情報処理学会研究報告，高度交通システムとスマートコミュニティ研究会 (ITS-72-5)，pp. 1–8 (2018).
- [10] Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Commun. ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395 (1981).
- [11] 山崎展博，長倉清，宇田東樹：風洞の主流近傍に設置したマイクロホンアレイによる音源位置同定精度の改善，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 74, No. 743, pp. 1548–1556 (2008).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Aminghafari, M., Cheze, N. and Poggi, J.-M.: Multivariate Denoising using Wavelets and Principal Component Analysis, *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 50, No. 9, pp. 2381–2398 (2006).
- [15] Chen, G. and Qian, S.-E.: Denoising of Hyperspectral Imagery Using Principal Component Analysis and Wavelet Shrinkage, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 49, No. 3, pp. 973–980 (2011).
- [16] Du, L., Wang, B., Wang, P., Ma, Y. and Liu, H.: Noise Reduction Method Based on Principal Component Analysis With Beta Process for Micro-Doppler Radar Signatures, *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, Vol. 8, No. 8, pp. 4028–4040 (2015).
- [17] Shin, K., Hammond, J. K. and White, P. R.: Iterative SVD Method for Noise Reduction of Low-Dimensional Chaotic Time Series, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 13, No. 1, pp. 115–124 (1999).
- [18] Guo, Q., Zhang, C., Zhang, Y. and Liu, H.: An Efficient SVD-Based Method for Image Denoising, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, Vol. 26, No. 5, pp. 868–880 (2016).
- [19] Xiaofeng, L. and Mingjie, L.: The De-noising Method for EMD Threshold Based on Correlation, *Proc. IEEE Int. Conf. Signal Processing (ICSP)*, pp. 2613–2616 (2010).
- [20] Kopsinis, Y. and McLaughlin, S.: Development of EMD-Based Denoising Methods Inspired by Wavelet Thresholding, *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 57, No. 4, pp. 1351–1362 (2009).
- [21] Moragues, J., Vergara, L., Gosálbez, J., Machmer, T., Swerdlow, A. and Kroschel, K.: Background Noise Suppression for Acoustic Localization by Means of an Adaptive Energy Detection Approach, *Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 2421–2424 (2008).
- [22] 日本工業規格：JIS C1400-11: 2017: 風力発電システム第 11 部：騒音測定方法 (2017). <http://www.jisc.go.jp>.
- [23] 志村正幸，野村卓史，長船寿一，上明戸昇，長谷部寛，岩吹啓史：自然風の中での低周波音の測定，日本風工学会誌，Vol. 39, No. 1, pp. 42–49 (2014).