

路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム

石田 繁巳^{1,a)} 三村 晃平¹ 劉 嵩¹ 田頭 茂明² 福田 晃¹

受付日 2016年4月7日, 採録日 2016年7月5日

概要: ITS (Intelligent Transportation Systems: 高度道路交通システム) において, 道路を走行する車両をカウントすることは重要なタスクの1つである. 車両の通過をリアルタイムに検出するために車両カウントシステムの導入が進められているが, 導入・運用コストが高いことから導入は一部の道路に限られている. 本論文では, 歩道上に設置したマイクロフォンを用いた低コスト車両カウントシステムを示す. 本システムでは2台のマイクロフォンを歩道に設置し, 車両が発する音を各マイクロフォンが受信した時刻の差を示す「サウンドマップ」を描くことで通過車両をカウントする. 環境ノイズなどの影響により実環境ではサウンドマップに多くのノイズが含まれるため, 本論文ではシンプルな画像処理手法を開発し, ノイズの影響を軽減したうえで自動カウントアルゴリズムを適用する. 片側1車線の道路で提案システムの実証評価を行い, F 値 0.92 という高い精度で通過車両の台数をカウントできることを確認した.

キーワード: 車両カウント, 音響センシング, サウンドマップ

Acoustic Vehicle Count System Using Sidewalk Microphones

SHIGEMI ISHIDA^{1,a)} KOHEI MIMURA¹ SONG LIU¹ SHIGEAKI TAGASHIRA² AKIRA FUKUDA¹

Received: April 7, 2016, Accepted: July 5, 2016

Abstract: Vehicle counting is one of the fundamental tasks in the ITS (intelligent transportation systems). Although automatic vehicle counters have been proposed to retrieve realtime traffic data, current automatic vehicle counters suffer from high deployment costs, resulting in limited number of deployments. In this paper, we present a vehicle counter using sidewalk microphones that are easily deployed at a low cost. Our vehicle counter only relies on two microphones and counts vehicles using a sound map, which is a time-difference map of vehicle sound on the two microphones. We developed a vehicle count algorithm using a sound map. In practical environments, a sound map becomes noisy due to environmental noise. We therefore developed a simple image processing technique for a sound map and apply an automatic count algorithm to the sound map. Experimental evaluation reveals that our system successfully counted vehicles with an F-measure of 0.92.

Keywords: vehicle count, acoustic sensing, sound map

1. はじめに

情報技術・交通の発展とともに, ITS (Intelligent Transportation Systems: 高度道路交通システム) の重要性が高まっている. ITS の主な目的は, 情報技術を用いて道路交通の安全性・信頼性・効率などを向上させることである.

近年では ETC (Electronic Toll Collection System) やカーナビゲーションシステムの普及により, 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リアルタイムに取得することが必要となるため, 道路上を走行する車両をカウントすることは ITS における最も重要なタスクの1つである. 日本においては国土交通省によって1928年からおおむね5年ごとに道路交通センサス (全国道路・交通情勢調査) が実施され, 交通量データの収集が行われている. 道路交通センサスは一時的な交通量を測定するものであり, 取得されたデータは将来の道路建設計画などの非リアルタ

¹ 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

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

^{a)} ishida@f.ait.kyushu-u.ac.jp

イムな用途にのみ利用可能である。

リアルタイムに交通量を収集するため、これまでも車両カウントシステムの導入が進められている。しかしながら、車両カウントシステムの導入・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。道路交通センサスにおいては可搬式の車両カウントシステムも併用されるが、車両カウントシステムが用いられているのは観測対象道路の20%未満である [1]。導入・運用コストの低い車両カウント手法として、既設のカメラを用いる手法 [2], [3], [4] 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 [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] 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。リアルタイムな車両検出は交通量の取得以外にも車車間・歩車間事故軽減などの応用が検討されているため [12]、交通量の比較的少ない住宅地などでも利用可能なことが望ましい。

このような観点から、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カウントシステムの開発を進めている。本システムでは道路横の歩道に2台のマイクロフォンを設置し、車両の走行音を取得して車両の通過を検出する。可聴音の波長は車の大きさに比べて長いから、マイクロフォンを低い位置に設置しても回折により複数車線の車両を観測できる。片側の歩道の低い位置にマイクロフォンを設置するだけで車両を検出できることから、通行を規制する道路工事が不要という点で低コストでの設置が可能となる。

走行音を用いた車両検出に関してはこれまでも研究が行われている [13], [14], [15], [16]。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車両走行音の受信時間差を描いたものである。これまでに報告された研究ではサウンドマップを手動で解析し、車両を検出できることが示されている。

本研究では、走行音を用いる車両検出手法を拡張し、自動的に車両をカウントするシステムを実現する。2台のマイクロフォンを用いて収集した車両のタイヤ走行音からサウンドマップを描き、サウンドマップ上に現れる車両の軌跡を解析するカウンタアルゴリズムによって通過車両をカウントする。

現実環境においては、周辺の環境音や歩行者の声などのノイズの影響、音源が広がっている大型車の影響などによりサウンドマップ上での車両カウントに誤差が生じる。このため、サウンドマップを画像として扱ってノイズなどの影響を軽減するシンプルな画像処理手法を開発した。

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、通過車両176台中150台が正し

く検出され、F値0.92という高い精度で通過車両をカウント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章では車両カウントに関する関連研究について概観し、3章で提案する車両カウントシステムを示す。4章では、提案する車両カウントシステムが実環境中で受ける問題について述べ、これに対応するための画像処理手法を示す。5章では実証評価を通じて提案する車両カウントシステムが高精度で通過車両をカウントできることを示し、最後に6章でまとめとする。

2. 関連研究

現在使用されている車両カウントシステムは、埋設型と非埋設型に分類できる [17]。

ループコイルや光電センサを用いた車両カウントシステムは埋設型に分類される。埋設型の車両カウントシステムでは車両検出用センサを道路表面または道路下部に埋設して車両を検出する。埋設には設置場所の道路区間の通行を規制して行う道路工事が必要であり、設置・運用コストが高い。また、ループコイルや光電センサは検出領域が狭いため、すべての二輪車を検出することが困難であるという問題もある。

非埋設型の車両カウントシステムは、レーザや赤外線、超音波、電波、カメラなどを用いて車両を検出する。非埋設型車両カウントシステムでは、十分な性能を得るために車両検出センサを道路上方または側方に設置する。道路上方へのセンサの設置は、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するために設置コストが高くなる。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は1カ所あたり約1,000万円のコストを要する [18]。側方に設置する場合にも複数車線を観測するために高い位置にセンサを設置する必要がある。高い設置コストを要する。また、非埋設型車両カウントシステムで多用されているレーザ、赤外線、超音波は検出領域が狭いため、埋設型と同様に二輪車の検出にも問題がある。

車両カウントシステムの設置・運用コストの削減に向け、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が [2], [3], [4]、CCTVは主に街中など限定された場所でのみ利用可能である。また、カメラベースの車両カウントシステムではカメラの角度・設置位置が精度に大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難しい。

導入コストを削減する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取得した車両の位置情報、すなわち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 [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. フローティングカーデータを用いた交通量推定では, プライバシー保護や精度担保の観点から同一の道路を通行する多数の車両のフローティングカーデータを必要とする. このため, 市街地などの走行車両の多い道路にのみ適用可能である.

このような車両カウント手法に対し, 音響センサを用いるアプローチは低コストでの設置・運用が可能であるという点で交通量の少ない道路のモニタリングに有用である. 音響センサを用いるアプローチでは道路横に設置した2台以上のマイクロフォンで複数車線の車両を検出できる. 可聴音は車両の大きさに比べて比較的波長が長いので, マイクロフォンと車両の間に別の車両がいる場合にも回折により走行音の一部がマイクロフォンに到達する.

走行音を用いた車両カウントに関していくつかの研究報告がなされている. 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 [13], [14], [15]. これらの手法では, マイクロフォン・アレイが受信した車両走行音の時間差を示すサウンドマップを描き, サウンドマップ上の軌跡を解析することで交通状態をモニタリングする. しかしながら, 車両を自動的にカウントする手法については示されておらず, 検討の余地が残る. また, 複数車線を観測するために道路側方の高い位置にマイクロフォン・アレイを設置しており, 安全性確保の観点から設置・運用コストが増加する. 走行音を用いるため低い位置にマイクロフォンを設置した場合にも車両の検出が可能と考えられるが, その評価は示されていない.

Barbagli らは, 音響センサを用いた交通モニタリング向けセンサネットワークを示している [16]. このセンサネットワークでは道路横にマイクロフォンを具備した複数のセンサノードを配置し, 交通渋滞を検出する. マスタノードと呼ばれるセンサノードを用いて1車線のみを監視し, 交通渋滞を検出した場合に他のセンサノードを動作させる. マスタノード以外のセンサノードでは走行音の大きさを収集し, 複数のセンサノードにおける走行音の大きさの変化から交通渋滞の位置を推定する. このセンサネットワークは交通渋滞の場所を特定する車両分布を得ることを目的としているため, 個々の車両の検出は行われていない. また, 道路両側にバッテリー駆動のセンサノードを多数設置することが必須となるため, バッテリー交換コストなどを考慮すると高い運用コストを要する.

サウンドマップを用いず, 受信した音の大きさを用いて車両の通過を検出する手法も報告されている [19], [20]. 車両がマイクロフォンに近づくと音の大きさが変化することを利用し, 機械学習した検出器によって車両の通過を検出する. しかしながら, 音の大きさのみを用いるために環境音や歩行者の声などによる誤検出や進行方向の誤判定などの問題が発生する.

3. 路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム

図1に, 路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステムの構成を示す. 提案する車両カウントシステムは, 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), 車両カウントブロック (Vehicle Counter) 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の歩道上に設置し, 道路を通過する車両の走行音を取得する. LPFによって環境音などのノイズを削減した後, サウンドマップ描画ブロックは2台のマイクロフォンが受信した走行音の相互相関を計算することで走行音を受信した時刻の差を求め, サウンドマップを描画する. 最後に, サウンドマップを解析するカウントアルゴリズムにより車両カウントブロックでマイクロフォンの前を通過した車両を検出する.

以下では各ブロックの動作について詳述する.

3.1 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, 車両カウントの性能に影響する. 図2において車両がマイクから遠い位置, すなわち $x \approx \pm\infty$ 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 $|d_1 - d_2| \approx D$ 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

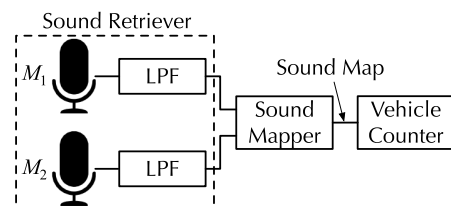


図1 システム構成

Fig. 1 System overview.

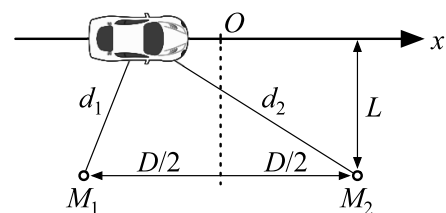


図2 マイクロフォンの設置

Fig. 2 Microphone setup.

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

となる。マイクロフォン間の距離 D が増加すると走行音の到達時間差を描いたサウンドマップ上での変化が大きくなるため、車両カウントの精度を向上させることができる。一方、 D を増加させると観測可能な音源の範囲が広くなり、環境ノイズの影響が大きくなるために精度が低下する。マイクロフォン・道路間の距離 L についても同様の影響があるため、物理的な制約を考慮して予備実験により D と L を決定することが必要である。

環境ノイズの影響を低減させるため、本システムでは取得した走行音に対して LPF を適用する。車両が走行するときにタイヤから発せられる音の主成分は 2.0kHz 以下であるため [21], [22], LPF のカットオフ周波数は余裕を持たせて 2.5kHz とした。タイヤからの走行音はすべての車両において発生するため、本システムは車種を問わず普通車、バス、トラック、二輪車、エンジン音の発生しない電気自動車も検出することができる。

3.2 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が受信した走行音の時間差が時間とともに変化する様子を描いた図である。図 2 に示したように、本システムでは 2 台のマイクロフォン M_1, M_2 を間隔 D を空けて道路から L だけ離して設置する。道路上を走行する車両が発した音は異なる距離を進んで 2 台のマイクロフォンに到達する。走行車両の位置を x とすると、車両と各マイクロフォンの距離 d_1 および d_2 は

$$d_1 = \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2}, \quad (2)$$

$$d_2 = \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \quad (3)$$

である。したがって、2 台のマイクロフォンにおける走行音の到達時間差 Δt は、音速を c として

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{d_1 - d_2}{c} \\ &= \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

と求まる。

式 (4) を用いれば、音源である車両の位置を音の到達時間差から求めることができる。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。

$$R(t) = \int s_1(\tau) s_2(t + \tau) d\tau \quad (5)$$

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 $t = \Delta t$ において最大値をとるため $R(t)$ のピー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) [23] 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。車両の通過とともに音の到達時間差 (Sound Delay) Δt が変化し、S 字カーブを描いていることが分かる。S 字カーブの向きは車両の進行方向によって定まる。

3.3 車両カウントブロック

サウンドマップ上の S 字カーブの向きは車両の進行方向に依存するため、車両カウントブロックでは車両の進行方向別にカウント処理を行う。ここでは左から右へ通過する車両を検出する例としてカウント処理を示す。

図 4 はサウンドマップ上に描かれた車両の通過を示したものである。車両の通過を示す S 字カーブは 3 つのサブ

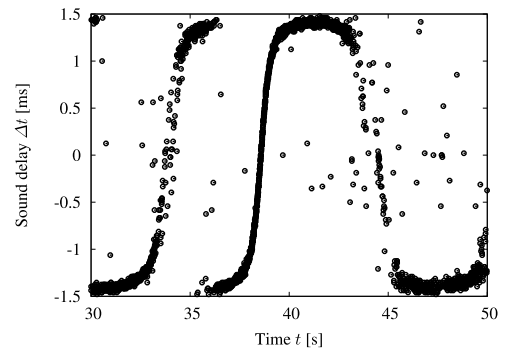


図 3 サウンドマップの例

Fig. 3 Example of sound map.

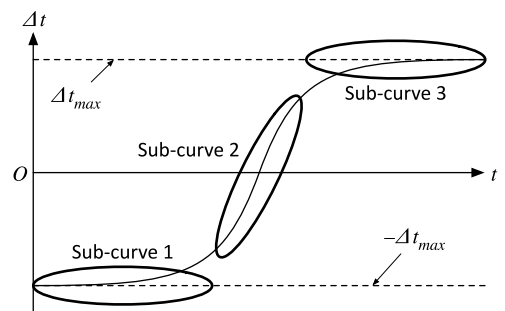


図 4 サウンドマップ上に描かれた車両通過

Fig. 4 Vehicle passing drawn on sound map.

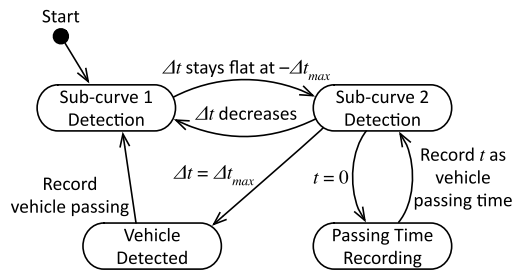


図 5 カウント処理のステートマシン図 (左から右への通過車両の場合)
Fig. 5 State machine diagram of vehicle count process (for left to right vehicles).

カーブに分解できる。サブカーブ 1, 2, 3 は、それぞれ車両がマイクロフォンに近づいてくるとき、車両がマイクロフォンの目の前を通過するとき、車両がマイクロフォンから遠ざかっていくときに観測される。サブカーブ 1 と 3 の漸近線は式 (1) で示した $\pm\Delta t_{max}$ である。

カウント処理は図 4 に示したサブカーブを検出するステートマシンとして実現される。図 5 に、カウント処理のステートマシン図を示す。カウント処理はサブカーブ 1 検出ステートから始まる。サブカーブ 1 は漸近線 $\Delta t = -\Delta t_{max}$ に近い曲線であるから、一定時間以上 $\Delta t = -\Delta t_{max}$ であるときカウント処理はサブカーブ 1 を検出したとしてサブカーブ 2 検出ステートに遷移する。

サブカーブ 2 検出ステートでは、時刻 t の増加とともに到達時間差 Δt が増加することを確認する。 $\Delta t = 0$ のとき、カウント処理は通過時刻記録ステートに一時的に遷移し、車両の通過時刻を記録する。

到達時間差 Δt が Δt_{max} に達したら、カウント処理は車両検出ステートに遷移する。この時点で車両の通過が確定され、通過時刻記録ステートで一時的に記録していた通過時刻を正式な通過時刻として確定する。カウント処理は再びサブカーブ 1 検出ステートに戻り、次の車両の通過に備える。なお、サブカーブ 2 検出ステートにおいて時刻 t の増加とともに到達時間差 Δt が減少した場合、カウント処理はサブカーブ 1 検出ステートに戻り、カウント処理をやり直す。

4. 車両カウントシステムの実環境への適用

4.1 実環境におけるサウンドマップの問題点

一般に、車両がマイクロフォンの前を通過した場合には図 3 に示したようにサウンドマップ上で 1 本の波形が観測される。しかしながら、バスなどの大型車両の場合には音源となる前輪・後輪間の距離が離れているため、図 6 に示すようにサウンドマップ上の波形が一部で 2 本に分離する。

簡単のため、図 7 に示すようにバスがマイクロフォンの目の前を通過する場合を考える。前輪・後輪間の距離、すなわちホイールベースを l とすると、前輪および後輪が発

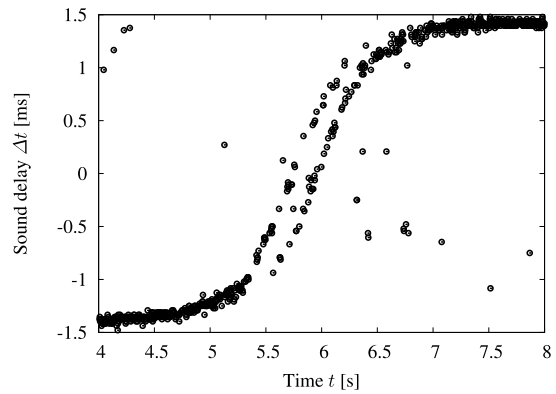


図 6 大型車両通過時のサウンドマップの例
Fig. 6 Example of sound map when big vehicle passes.

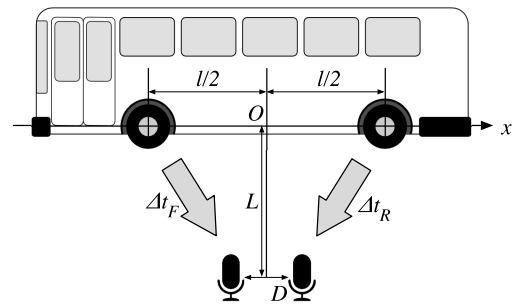


図 7 マイクロフォンの目の前を通過するバス
Fig. 7 Bus passing right in front of microphones.

した音の到達時間差 Δt_F , Δt_R は式 (4) によって計算できる。前輪・後輪の音の到達時間差 Δt_F , Δt_R の差 δ は、

$$\delta = \Delta t_R - \Delta t_F \tag{6}$$

$$\Delta t_F = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(\frac{-l+D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(\frac{-l-D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \tag{7}$$

$$\Delta t_R = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(\frac{l+D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(\frac{l-D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \tag{8}$$

と求まる。

ここで、 $l = 4.5 \text{ m}$, $D = 0.5 \text{ m}$, $L = 4 \text{ m}$ とすると、到達時間差の差 δ は 1.4 ms となる。図 3 における到達時間差の最大値 $\Delta t_{max} \approx 1.5 \text{ ms}$ と比べると、前輪・後輪の音の到達時間差の差は無視できないほど大きいといえる。3.3 節で示したカウント処理ではサブカーブ 2 検出ステートにおいて到達時間差 Δt が単調に増加、あるいは減少する場合に車両を検出するため、2 本の波形に分離しているサブカーブ 2 で車両を検出することは難しい。

4.2 実環境への適用に向けた画像処理

大型車両の通過時に 2 本の波形が観測されるという問題に対して、サウンドマップにシンプルな画像処理を適用す

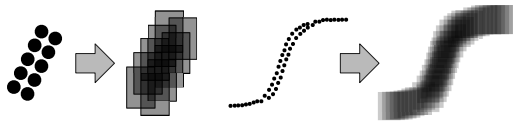


図 8 画像処理の概要

Fig. 8 Overview of image processing.

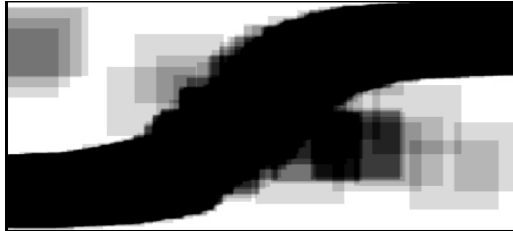


図 9 画像処理を施したサウンドマップ

Fig. 9 Sound map after image processing.

ることでカウントアルゴリズムに修正を加えることなく高精度なカウントを実現する。

図 8 に提案する画像処理の概要を示す。提案する画像処理ではサウンドマップ上の各点を半透明な長方形で置換する。半透明な長方形が重なり合うことで、サウンドマップ上で 2 本に分離していた S 字カーブが 1 本の太いカーブに変換される。

長方形の高さと幅は車両の最大長と道路の制限速度から決定する。長方形の高さは式 (8) で算出される到達時間差の差 δ の最大値から決定する。長方形の幅は、制限速度で通過する車両の移動距離が車長に比べて無視できる時間から決定する。

図 9 は、提案する画像処理を図 6 に適用した結果を示している。図 9 と図 6 を比較すると、2 本に分離していたサウンドマップ上の S 字カーブが 1 本の太い S 字カーブとなっていることが確認できる。トラックには 3 対以上の車輪を持つ大型のものも存在するが、画像処理の結果は 1 本の太い S 字カーブとなるためカウント処理への影響はないといえる。

5. 評価

提案する車両カウントシステム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 10 に評価環境を示す。対象の道路は片側 1 車線、合計 2 車線の道路である。2 台のマイクロフォンを道路横の歩道上に設置し、IC レコーダで車両の走行音を約 30 分間取得した。IC レコーダはソニー社製 PCM-D100、マイクロフォンは OLYMPUS 社製 ME30W 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。

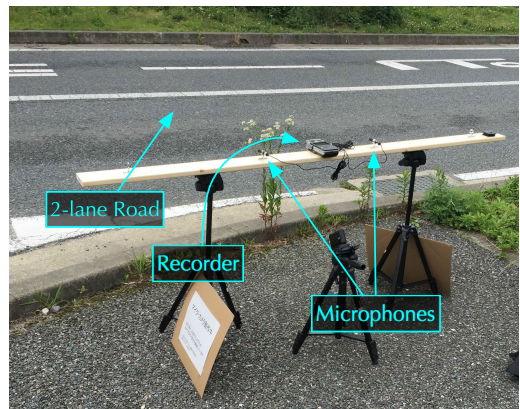


図 10 評価環境

Fig. 10 Experiment setup.

マイクロフォンの間隔 D は予備実験の結果から 50 cm とした。予備実験ではマイクロフォンの間隔を 50, 100, 150 cm と変化させながら約 20 分間にわたって走行音データを収集し、車両の検出率を比較した。マイクロフォンと道路の距離 L は道路のすぐ横に設置するという物理的制約から約 2 m とした。マイクロフォンの高さは低い方が路面に近くなり車両検出に有利となるが、現実的な設置のしやすさを考慮して 1 m とした。

走行音の取得と同時にビデオカメラで道路を撮影し、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、それぞれ走行車両があるときに車両カウントをした場合、走行車両があるときに車両カウントをしなかった場合、走行車両がないときに車両カウントをした場合である。TP, FN, FP を評価する場合、True Negative (TN), すなわち走行車両がないときに車両カウント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、以下で定義される正確度 (Accuracy), 精度 (Precision), 網羅率 (Recall), F 値 (F-measure) をそれぞれ算出した。なお、TN は 0 とした。

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}} \quad (9)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (10)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (11)$$

$$F_{\text{measure}} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (12)$$

正確度は判定結果全体のうち答えが正しかった割合である。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 値は精度と網羅率の調和平均であり、総合的な評価を表す指標である。

4.2 節で示した画像処理の効果を確認するため、提案手

表 1 評価結果

Table 1 Experiment results.

	Proposed system			w/o Image processing		
	Left to Right	Right to Left	Total	Left to Right	Right to Left	Total
TP	63	87	150	32	70	102
FN	11	15	26	42	32	74
FP	0	0	0	2	0	2
Accuracy	0.85	0.85	0.85	0.42	0.69	0.57
Precision	1.00	1.00	1.00	0.94	1.00	0.98
Recall	0.85	0.85	0.85	0.43	0.69	0.58
F-measure	0.92	0.92	0.92	0.59	0.81	0.73

法と画像処理を適用しない場合とで比較を行った。また、車種によってタイヤの発する音が異なることから車種別に評価を行った。

5.2 評価結果

表 1 に TP, FN, FP の回数およびこれらから計算された正確度, 精度, 網羅率, F 値を示す。表 1 では提案システムと 4.2 節で示した画像処理を適用しない場合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 4 つのことが分かる。

- (1) 提案システムの F 値は 0.92 である。人手による観測においても数%~十数%の誤差があることから [24], 提案システムは十分に高い精度を実現できたといえる。
- (2) 提案システムの画像処理によって F 値で 0.73 から 0.92 まで精度が向上した。FN が減少して TP が増加していることから, 画像処理によってサウンドマップ上のノイズの影響が軽減されて検出できる車両の数が増加したためと考えられる。
- (3) 画像処理の有無にかかわらず FP はほぼゼロである。特に提案システムの FP はゼロである。提案システムでは風や歩行者の会話音などの影響による車両の誤検出は発生せず, 車両の走行方向の誤判定も存在しなかったことが分かる。環境ノイズはサウンドマップ上で S 字カーブを描かないために車両として検出されないと考えられる。
- (4) 提案システムでは, 正確度, 精度, 網羅率, F 値のすべてについて車両の方向による差は見られない。左右同時に車両が通過した場合にもマイクロフォンから遠い方の車線の走行音が回折によりマイクロフォンに到達し, 車両の検出精度にほとんど差を生じなかったものと考えられる。

以上の結果から, 提案システムによって人手によるカウントと同等以上の精度で車両をカウントできることを確認した。F 値 0.92 という車両検出精度が十分であるかどうかを議論することは難しいが, 磁気抵抗センサを用いた既存車両検出手法の精度 95% [25] と同程度の精度を実現できるため, 既存センサを用いたアプリケーションに向けて有用

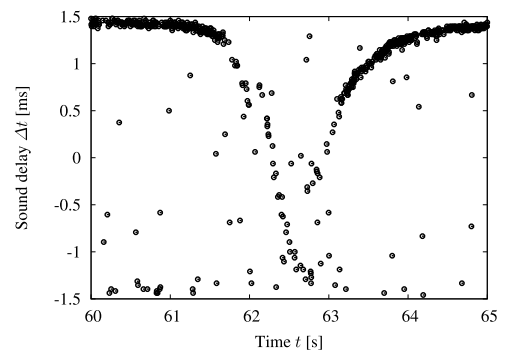


図 11 2 台の車両が同時に通過した場合のサウンドマップ

Fig. 11 Sound map when two vehicles are passing.

であるといえる。

FP がゼロであることから, 提案システムにおける精度低下の原因は主に FN, すなわち未検出車両が多いことにあるといえる。未検出車両に関して解析すると, 26 回の FN のうち 22 回で同一方向の車両が連続して通過する場合または左右同時に通過する場合であった。精度向上に向けてはこのような同時通過車両への対応が必須といえる。

図 11 に, 左右同時に車両が通過した際に得られたサウンドマップの例を示す。図より, 車両が同時に通過した場合にサウンドマップの一部の波形が薄くなっていることが分かる。3.2 節で示したように, サウンドマップを描く際には GCC (一般化相互相関) が最大となる点を取得しているため, 左右同時に車両が通過する場合にも各時刻において 1 台の車両の軌跡しかサウンドマップ上に現れない。また, 3.3 節で示したカウントアルゴリズムでは 1 台の車両を追跡する処理となっているため, 同一方向に 2 台の車両が連続している場合にいずれか 1 台が検出されない確率が高くなっているものと考えられる。このため, 複数台の車両が存在する場合を考慮してサウンドマップの描画と車両カウントを行うことで FN の削減が期待できる。

普通車や大型車などの車種によって発生する音が大きく異なることから検出精度に差が生じることが予想されるため, 車種別に正確度, 精度, 網羅率, F 値の評価を行った。車種の区分は, 普通車, バス・トラック, 軽自動車, 二輪車である。ハイブリッド車や電気自動車はエンジン音が発

表 2 車種別の評価結果

Table 2 Experiment results vs. vehicle types.

	Normal cars	Buses, trucks	Small cars	Motorbikes	All
TP	62	42	29	17	150
FN	17	4	1	4	26
FP	0	0	0	0	0
Accuracy	0.78	0.91	0.97	0.81	0.85
Precision	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Recall	0.78	0.91	0.97	0.81	0.85
F-measure	0.88	0.95	0.98	0.89	0.92

生しない場合があるために走行音が普通車と異なる可能性があるが、観測時間内に通過したハイブリッド車は少なかったために別区分とはせずに普通車に含めて評価した。また、観測時間内に電気自動車は通過しなかったため評価に含まれていない。

表 2 に、車種別の TP, FN, FP の回数およびそれらから計算した正確度、精度、網羅率、F 値を示す。表 2 より以下の 2 つのことが分かる。

- (1) 全車種に対して F 値 0.88 以上という高い精度が実現できている。提案システムはタイヤが発する走行音を対象としているため、車種の差に大きく影響されずに車両を検出できたと考えられる。
- (2) 精度が最も低いのは普通車である。これは、車両が連続して通過あるいは左右同時に通過する同時通過車両が多かったためである。同時通過車両の数は、普通車 27 台、バス・トラック 9 台、小型車 8 台、二輪車 6 台であった。絶対数が少ないため同時通過車両に対する評価は参考となるが、おおむね半分程度が FN、すなわち未検出となり精度が低下したと考えられる。なお、図 3 を参照すると車両が通過するのに要する時間はおおよそ 2 秒であるから、同時通過車両は「通過の前後 2 秒以内に別の車両が通過した車両」と定めた。

以上の結果から、観測したすべての種類の車両に対して提案システムにより人手によるカウントと同等以上の精度で車両をカウントできることを確認した。

6. おわりに

本論文では、ITS（高度道路交通システム）において重要となる低コスト・高精度な車両カウントシステムの実現に向け、マイクロフォンを用いた車両カウントシステムを示した。本システムでは 2 台のマイクロフォンを道路横の歩道上に低い高さで設置し、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示す「サウンドマップ」を描く。サウンドマップ上には音源の位置が示されるため、サウンドマップを解析して車両を検出するアルゴリズムを用いて通過車両の台数をカウントする。実環境においては複数の音源を有する大型車や環境ノイズの影響により誤検出および未検出が発生するため、本論文ではサウンドマップに対

するシンプルな画像処理手法を開発して検出精度を向上させた。提案システムを実装して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、F 値 0.92 という高い精度で車両をカウントできることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、科研費（15H05708, 15K12021）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] 門間俊幸, 松本俊輔, 橋本浩良, 水木智英, 上坂克巳: 道路交通センサ一般交通量調査の見直しと新たな展開, 土木計画学研究発表会講演集, pp.1-8 (2012).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Nurhadiyahna, A., Hardjono, B., Wibisono, A., Jatmiko, W. and Mursanto, P.: ITS Information Source: Vehicle Speed Measurement Using Camera as Sensor, *Proc. Int. Conf. Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*, pp.179-184 (2012).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] Zhou, X., Wang, W. and Yu, L.: Traffic Flow Analysis and Prediction Based on GPS Data of Floating Cars, *Proc. Int. Conf. Information Technology and Software Engineering, LNEE*, Vol.210, pp.497-508 (2012).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
 - [12] Basma, F., Tachwali, Y. and Refai, H.H.: Intersection Collision Avoidance System Using Infrastructure Communication, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.422-427 (2011).
 - [13] Forren, J.F. and Jaarsma, D.: Traffic Monitoring by Tire Noise, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.177-182 (1997).
 - [14] 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).
 - [15] 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).
 - [16] Barbagli, B., Manes, G., Facchini, R. and Manes, A.: Acoustic sensor network for vehicle traffic monitoring, *Proc. IEEE Int. Conf. Advances in Vehicular Systems (VEHICULAR)*, pp.1-6 (2012).
 - [17] 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).
 - [18] 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).
 - [19] 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).
 - [20] 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).
 - [21] 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).
 - [22] 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).
 - [23] 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).
 - [24] 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).
 - [25] Taghvaeeyan, S. and Rajamani, R.: Portable Roadside Sensors for Vehicle Counting, Classification, and Speed Measurement, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol.15, No.1, pp.73-83 (2014).



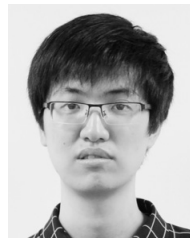
石田 繁巳 (正会員)

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。



三村 晃平

2014年徳山工業高等専門学校情報電子工学専攻卒業。2016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。音響センシングの研究に従事。



劉 嵩

2013年北京科学技術大学工学部卒業。2015年より九州大学大学院システム情報科学府修士課程在学中。センサネットワークの研究に従事。



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。2009年度山下記念研究賞。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。博士(工学)。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。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)」理事長等。本会フェロー。