

路側設置マイクロフォンを用いた車両カウントシステムの設計と 初期的評価

三村 晃平[†] 劉 嵩[†] 石田 繁巳[†] 田頭 茂明^{††} 福田 晃[†]

[†]九州大学大学院システム情報科学研究所 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地

^{††}関西大学総合情報学部 〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

あらまし 本稿では、交通量調査の自動化ニーズに対応するシステムとして、路側設置マイクロフォンを用いた車両カウントシステムを提案する。本システムは道路の側部に設置したマイクを利用し、従来の超音波センサやカメラ画像を用いたシステムよりも低コストで広範囲の観測が可能である。先行研究に基づき、2本のマイクへの音の到達時間差から“sound map”を生成し、単純な画像処理を施してノイズの影響を軽減した上で自動カウントアルゴリズムを適用することで通過車両をカウントする。片側一車線の道路で提案システムの初期的評価を行い、F値0.92という高い精度で車両台数を得られることを確認した。

キーワード 音響センシング, サウンドマップ, 交通量計測

Design and initial evaluation of vehicle counting system using road-side microphone array

Kohei MIMURA[†], Song LIU[†], Shigemi ISHIDA[†], Shigeaki TAGASHIRA^{††}, and Akira FUKUDA[†]

[†] Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

^{††} Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract We present a vehicle counting system using a road-side microphone array. Our system uses two microphones on one side of the road to count vehicles coming from two directions, which drastically reduces the installation cost. Based on a previous work, we draw a “sound map”, which is time-difference map of vehicle sound on the two microphones. Prior to count vehicles, we apply a simple image processing technique on the sound map to minimize the effect of noise. We describe the design and implementation of our vehicle counting system. Experimental evaluation reveals that our system successfully counted vehicles with an F-measure of 0.92.

Key words vehicle count, traffic counter, microphone, soundmap

1. はじめに

日本では、国土交通省によって昭和3年から全国道路・交通情勢調査（以下、道路交通センサス）が概ね5年ごとに実施され、交通量データが取得されている。得られた交通量データは道路渋滞による損失時間や環境負荷などの定量的な評価に用いられ、現状の課題・実態の把握や今後の道路計画の策定に関わる重要なデータとなる。

現在、交通量調査は人手による観測が中心であり、コスト削減が重要な課題となっている。平成22年度に実施された道路交通センサスでは、全調査の8割以上が人手による観測という報告がされている[1]。調査対象となる交通調査基本区間は91,560区間（2.1km/1区間）であるため、道路交通センサスは膨大なコストを要する。

道路交通センサスのコスト削減に向け機械式調査の導入が進められているが、機械式調査で用いられる装置にはいくつかの問題がある。既存の装置は電柱や歩道橋を用いて道路上部に設置する上部設置タイプと道路面に貼付または埋込設置する下部設置タイプに分けられる[2]。上部設置タイプには超音波センサやカメラを用いたものがあるが、落下防止措置が必要なため設置・メンテナンスコストが非常に高い。下部設置タイプの多くは磁場センサを用いて地磁気の変化から車両を検知する装置であるが、設置・撤去時に道路交通規制を行わなければならないという問題点がある。また、装置に超音波センサや磁気センサを使ったものの多くは、二輪車を観測できないという問題点もある。

これに対し、我々は音響センシングを用いた車両カウントシステムを提案する。可聴音は回折する特性があり、広範囲でのデータの取得が可能であるため設置場所の制約が弱く、道路側

部の低い位置での設置などにより低コストで設置・運用することができる。マイクロフォンの価格や必要なストレージサイズなどのハードウェアコスト面でも低コストでの導入が可能である。また、可聴音を発する全ての車両が観測対象となるため二輪車の観測も可能となる。

可聴音を用いた交通モニタリングの研究として、道路上部に複数のマイクロフォンを垂直・水平方向に配置し、各マイクロフォンに到達する音の時間差からサウンドマップと呼ばれる図を生成する研究が行われている [3]~[6]。サウンドマップは音源の位置、すなわち道路上の車両の位置を表した図であり、最大4レーンまでの道路の走行車両について、サウンドマップを用いて車両の台数、速度、種類を判別できる可能性が示されている。しかし、自動的にカウントをする車両カウンタとしては実装されておらず、車両カウンタシステムの実現に向けては検討の余地が残されている。

本研究では上述のようなサウンドマップを用いた交通モニタリングに関する研究を拡張し、車両の通過を自動的に検出するシステムを実現する。具体的には、道路の側部に設置した2つのマイクロフォンで車両のタイヤが発する走行音を収集してサウンドマップを生成し、サウンドマップから車の台数を自動的にカウントするシステムを実装・評価した。

現実環境においては周辺の環境音や歩行者の声などによるノイズの影響や音の発生源が広範囲に渡る大型車の影響によりサウンドマップがきれいな曲線を描くことは稀である。このため、サウンドマップ上の点に縦幅・横幅・色の濃さを持たせる画像処理を行うことでサウンドマップからのカウント処理を行いやすい形に変換し、簡単なアルゴリズムでの車両カウントを実現した。

九州大学伊都キャンパス内の片側一車線、合計二車線の道路において車両の走行音を取得し、交通量計測を行った。その結果、走行車両176台中150台が正しくカウントされ、F値で0.92という高い精度でカウントできることを確認した。また、車両の進む方向については、全ての車両で正しく検出されることを確認した。

本稿の構成は以下の通りである。2.では交通量調査における既存手法について示し、その課題について概説する。3.では提案する車両カウンタシステムについて述べ、4.で実環境に適用する場合の課題及びそれを解決するためのサウンドマップ向け画像処理を示す。5.において提案する車両カウンタシステムの実証評価を行い、最後に6.でまとめとする。

2. 既存の交通量調査手法

人手に変わる交通量調査の手法として、様々な車両カウンタの開発や研究が行われている。車両カウンタは、設置場所によって道路面に設置する下部設置タイプ、ポールやアームを用いて道路の上部に設置する上部設置タイプ、標識やガードレールに設置する側部設置タイプに分類できる。

下部設置タイプの車両カウンタとして、平成17年の交通量調査の機械式調査で主に使用された簡易型トラフィックカウンタがある [7]。簡易型トラフィックカウンタは道路面に貼り付けて使用し、磁器センサを用いて車両が通過する際の地磁気の変化を感知することで交通量、地点速度、車長の計測を行なう。人手観測の調査コストは1地点あたり約16万円であるの対

し、簡易型トラフィックカウンタは1地点あたり約11万円の調査コストであるためコストを削減できる。しかしながら、初期導入費用の約50万円、設置撤去のために交通規制に要するコストなど別のコストを要するため、一部の計測対象地点でしか利用されていない。また、二輪車では磁気が大きく変化しないために二輪車の計測が困難であるという問題もある。

上部設置タイプの車両カウンタは、道路上部に超音波センサや赤外線センサ、カメラ、レーダー、レーザースキャナなどを設置して車両の通過を検出する。上部設置タイプの車両カウンタは障害物なく車両を検出できるため高精度であるが、上部設置のためにポールやアームに加えて安全のための落下防止措置が必要であり、導入・運用コストが非常に高い。実際、一般に多く用いられている超音波センサを用いた車両カウンタは1箇所あたり約1,000万円のコストを要する [8]。そのため、上部設置タイプの車両カウンタの導入は主要幹線道路の一部に限定されており、全国で行われる交通量調査には適していない。

側部設置タイプには超音波センサや赤外線センサなどを用いた車両カウンタが挙げられる。中でも、長距離型の赤外線センサを用いた車両カウンタは高い精度で交通データを取得できる上にセンサが安価かつ側部に設置するため、他の車両カウンタに比べて50%以上のコスト削減効果が得られる [8]。しかしながら、片側2車線の道路など複数のレーンがある道路においては手前のレーンしか交通データを取得できないため、複数レーンの道路では上部に設置することが必須となる。また、赤外線センサを用いているために車両の色や太陽光の影響により精度が低下するという問題がある。

設置コストを削減するために、既存設備を流用した車両カウンタの研究も報告されている。遠藤らは、街中に設置されたCCTV (Closed-Circuit Television) を用いた車両カウンタシステムを提案している [9]。CCTVを用いることで新たにカメラを設置せずに既存のカメラ画像から交通データを取得することが可能となる。また、非常電話標識や可変標識等の既設設備にカメラを設置する手法も報告されている [10]。CCTVを用いる場合に比べて設置場所の制約が緩く、速度や台数の算出精度を向上させることが可能となる。カメラを用いた車両カウンタでは精度向上のために設置場所・設置角度が重要な要素となるが、既存設備を利用するためにその制約が強く、天候、時間帯、車両の色や重なりによって精度にばらつきが大きいという問題がある。

筆者らは、これらに変わる手法として可聴音を用いた車両カウンタシステムに注目している。可聴音を用いれば道路側部の低い位置にマイクロフォンを設置するだけで車両カウントが可能となるため、低コストでの導入・運用が可能となる。また、低い周波数の可聴音の波長は車両の大きさに比べて長いので、回折により複数レーンの観測が側部から可能となることも期待できる。

可聴音を用いた車両カウンタに関する研究として、サウンドマップを用いる研究が報告されている [3]~[5]。サウンドマップは、2つのマイクロフォンが受信した音の時間差の時間変化を描いたマップである。サウンドマップを解析することで車両の通過を検出することができる。しかしながら、サウンドマップから車両の通過を自動的に検出する手法については検討されていない。また、受信した音の大きさを(音響パワー)を用いて

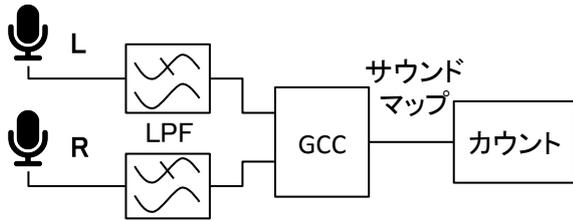


図1 システム構成

車両カウントを行う手法も報告されているが[11],[12], 音響パワーのみに注目しているために車両が通過していないときにカウントをしてしまう誤検出や, 進行方向を誤判定してしまうなどの問題がある。

3. サウンドマップを用いた車両カウントシステム

図1に, サウンドマップを用いた車両カウントシステムの構成を示す。車両カウントシステムは, 2つのマイクロフォンと, ローパスフィルタ(LPF), Generalized Cross-correlation(GCC), カウントの3つのブロックとで構成される。2つのマイクロフォンを道路側部に設置し, 車両の走行音を収集する。収集した走行音にローパスフィルタを適用して環境音などの高周波ノイズを除去し, 車両通過時にタイヤが発する音を抽出する。GCCブロックは2つのマイクロフォンの音の到達時間差を算出し, サウンドマップを描画する。最後にカウントブロックによってサウンドマップから車の台数, 走行レーン, 通過時刻を求める。

以降では各処理について詳述する。

3.1 走行音の取得

図2に, マイクロフォンの設置位置を示す。本システムでは, 2つのマイクロフォンを道路と並行になるように道路側部に設置する。

マイクロフォンの間隔 D_M 及びマイクロフォンと道路の距離 D_L は車両カウント性能に大きな影響を及ぼす。図2において車両の位置が $x = \pm\infty$ の場合, 車両が発した音が左右のマイクロフォンに到達する時間差は最大となり, その最大値はマイクロフォンの間隔 D_M で決定される。このため, マイクロフォンの間隔 D_M を大きくすると車両が通過する際のサウンドマップの変化が大きくなり, 1台の車両の通過を鮮明に描くことでカウント精度を向上できる。しかしながら, より遠くの車両までサウンドマップに現れるために複数台の車両が同時に通過した場合のカウントが困難となる。また, マイクロフォンと道路の距離 D_L を小さくすると車両が通過する際のサウンドマップの変化を大きくして高精度なカウントが期待できるが, 大型車の風切り音や振動音などのノイズが大きくなるというトレードオフがある。このような影響を考慮し, マイクロフォンの間隔 D_M 及びマイクロフォンと道路の距離 D_L は実験的に決定することが望ましい。

環境音などのノイズの影響を軽減するため, 取得した走行音にはローパスフィルタを適用する。電気自動車も検出対象とするため, 走行音としてタイヤが発する音を対象とする。タイヤが発する音の周波数成分を考慮し, カットオフ周波数 2.5 kHz のローパスフィルタを用いた[11],[13]。

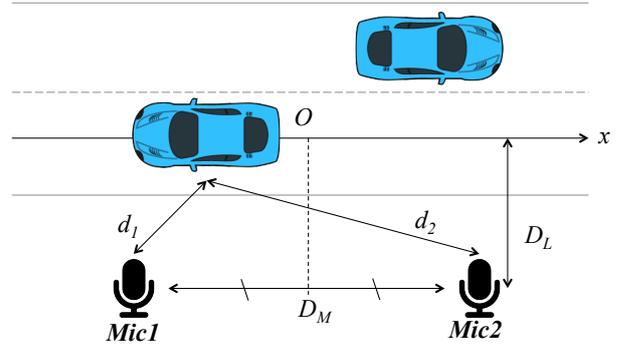


図2 マイクロフォンの側部設置

3.2 サウンドマップの描画

サウンドマップは, 2つのマイクロフォンに達した音の到達時間差が時間とともにどのように変化したかを表した図である。2つのマイクロフォンと音源との距離には差があるため音の到達時間差が発生する。図2のように, 道路からの距離 D_L , 間隔 D_M として2つのマイクロフォン $Mic1$, $Mic2$ を設置したとき, 車両が発する音はそれぞれ d_1 , d_2 の距離を進んで各マイクロフォンに到達する。音の発生源, すなわち車両の位置を x とすると, 音の到達するまでの距離 d_1 , d_2 はそれぞれ

$$d_1 = \sqrt{\left(x + \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} \quad (1)$$

$$d_2 = \sqrt{\left(x - \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} \quad (2)$$

と計算できる。空気中の音速を c とすると, 各マイクロフォンに車両の音が到達するまでの時間差 $\Delta t = (d_1 - d_2)/c$ であるから,

$$\Delta t = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} \right\} \quad (3)$$

となる。

式(3)を用いれば, 音の到達時間差から音源である車両の位置を特定することができる。音の到達時間差は相互相関関数によって求められる。各マイクロフォンが受信した音の信号をそれぞれ $s_1(t)$, $s_2(t)$ とすると, 相互相関関数 $R(t)$ は

$$\begin{aligned} R(t) &= s_1(t) * s_2(t) \\ &= \int s_1(\tau) s_2(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

で表される。ここで, $*$ は畳み込み積分である。2つのマイクロフォンには, 同じ音源からの同じ音が時間方向に Δt の差で入力されるため, $s_1(t - \Delta t) = s_2(t)$ であると仮定できる。このような場合, 相互相関関数 $R(t)$ は $t = \Delta t$ のときに最大となるため, 相互相関関数が最大となる点を探索することで音の到達時間差を求め, 車両の位置を特定することができる。

実際には音源定位において一般的に利用されている一般化相互相関(Generalized Cross-Correlation: GCC)関数[14]を用いて2つのマイクロフォン間の音の到達時間差を求める。2つのマイクロフォンで取得した信号を時刻ごとに短い時間に区切って切り出し, 切り出した信号にGCCを適用して音の到達

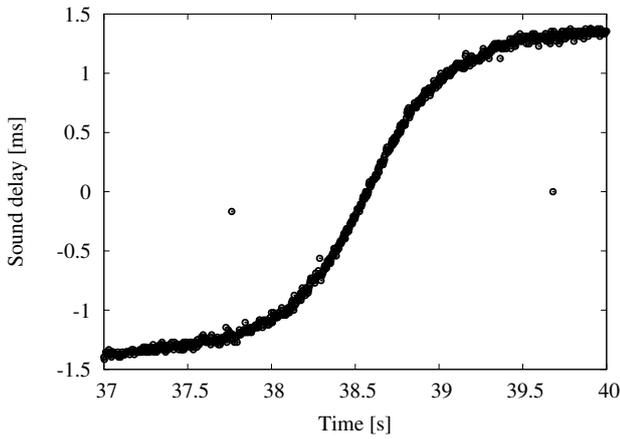


図3 車両通過時のサウンドマップ

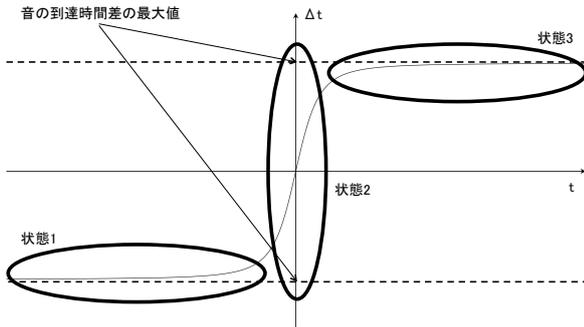


図4 車両通過時の波形の状態分け

時間差を算出する。音の到達時間差を時刻の関数として描けばサウンドマップが得られる。

図3に、車両がマイクロフォン前方を左から右へ通過した際に得られたサウンドマップを示す。1台の車両がマイクロフォン前方を通過したとき、音の到達時間差の時間的変化が一本の波形となりサウンドマップに現れ、図に示すようなS字形のカーブを示す。カーブの方向は車両が通過する方向によって変化するため、車両の方向も判定することができる。

3.3 カウントアルゴリズム

車両が通過した際に得られるサウンドマップ上の波形は図4に示すように3つの状態に分けられる。状態1は車両がマイクロフォンに近づいている際に観測される滞留、状態2は車両がマイクロフォン前方を通過する際に観測される波形、状態3は車両がマイクロフォンから離れている際に観測される滞留である。3.1で述べたように、車両がマイクロフォンから遠くにある場合には音の到達時間差はマイクロフォンの間隔で定まる最大値に漸近するため、状態1や状態3の滞留が観測される。

音の到達時間差の最大値 Δt_{max} はマイクロフォンの間隔 D_M と空気中の音速 c から以下のように求められる。

$$\pm \Delta t_{max} = \pm \frac{D_M}{c} \quad (5)$$

状態1と状態3の滞留は車両の進行方向によって順番が逆になる。左から右へ車両が通過した際のサウンドマップは図3のように右上がりであるが、右から左へ車両が通過した際のサウンドマップは右下がりの波形となる。このため、本システムでは各進行方向に分けて車両を検出する処理を行う。

ここでは、図3のようにマイク前方を左から右へ通過する車

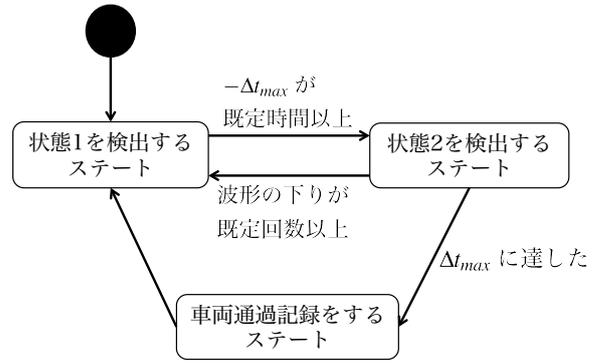


図5 カウント処理のステートマシン図 (左から右への通過車両の場合)

両をカウントする処理を例としてカウント処理を示す。カウント処理は上述の各状態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。カウント処理は状態1を検出するステートから始まり、サウンドマップを時間方向に読み進める。状態1の滞留は $-\Delta t_{max}$ の位置に現れるので、サウンドマップの値が規定時間だけ連続して $-\Delta t_{max}$ である場合、状態2を検出するステートに遷移する。状態2を検出するステートでは、サウンドマップの波形が右上がりになっている間だけサウンドマップを読み進める。サウンドマップが0と交差した時点はマイクロフォンの目の前を車両が通過した時刻であるから車両通過時刻として仮記録する。サウンドマップが Δt_{max} に達した時点で車両の通過を確定とし、先ほど仮記録した車両通過時刻で車両が通過したと判定する。車両の通過を検出した後は状態1を検出するステートに戻り、次の車両の通過の検出に備える。なお、状態2を検出するステートにおいて、サウンドマップが右上がりでなくなった場合には状態1を検出するステートに戻る。

4. サウンドマップを用いた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

通常、車両が通過した場合には図3の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、バスのように前輪から後輪までの距離が長い大型車両が通過した場合には図3のような1本の波形が得られない。簡単のため、図6のようにバスが2つのマイクロフォンの目の前を通過する場合を考える。バスの前後輪の間隔を D_W とすると、前輪・後輪の音の到達時間差 Δt_F 、 Δt_R は式(3)を用いてそれぞれ

$$\Delta t_F = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(-\frac{D_W}{2} + \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} - \sqrt{\left(-\frac{D_W}{2} - \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} \right\} \quad (6)$$

$$\Delta t_R = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(\frac{D_W}{2} + \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} - \sqrt{\left(\frac{D_W}{2} - \frac{D_M}{2}\right)^2 + D_L^2} \right\} \quad (7)$$

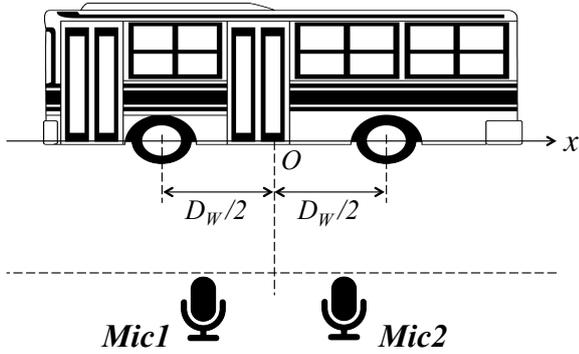


図6 バス通過時の例

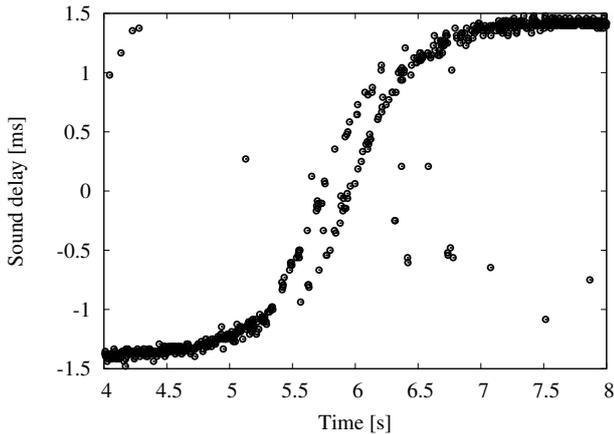


図7 大型車両通過時のサウンドマップ

と求まる。マイクロフォンの間隔を 0.5 m、マイクロフォンから道路までの距離を 2 m、バスの前後輪間隔を 4.5 m とすると、 $\Delta t_F = -1.1$ ms, $\Delta t_R = 1.1$ ms となる。図 3 に示したサウンドマップの縦軸が $-1.5 \sim 1.5$ ms であることに着目すると、前後輪音の到達時間差の差 $\Delta t_R - \Delta t_F = 2.2$ ms は無視できないことが分かる。

図 7 に、実際に大型車両が通過した際に得られたサウンドマップを示す。図より、サウンドマップの一部が二重になっており、最大で約 1 ms の差があるカーブとなっていることが分かる。サウンドマップ上での 1 本のカーブは 1 台の車両の通過を表しているため、図 7 のように 2 本の波形が観測された場合には 2 台としてカウントされてしまう。このため、大型車両を考慮したカウントアルゴリズムが必要となる。

4.2 波形の単一化

大型車両の通過時に 2 本の波形が観測される問題に対して、シンプルな画像処理を適用す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 に画像処理のイメージを示す。サウンドマップで描かれた各点に高さ、幅、色の濃さを持たせる。すなわち、サウンドマップの各点を、濃さを持った長方形でプロットすることで 2 つに分離した波形を 1 つにし、サウンドマップの連続性を確保することが可能となる。

図 9 に、実際の大型車両通過時のサウンドマップ (図 7) に提案する画像処理を適用した結果を示す。図 7 と図 9 を比べることにより、2 つに分かれた波形がよりくっきりとした 1 つの波形に変換されていることが分かる。

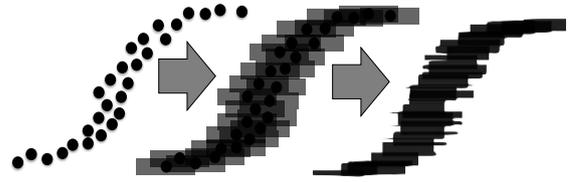


図8 画像処理のイメージ

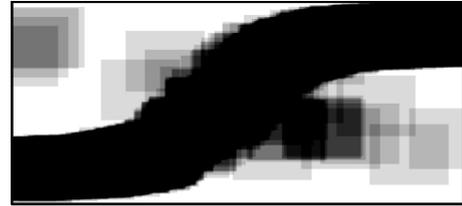


図9 画像処理後のサウンドマップ

5. 評価実験

5.1 評価環境

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初期的評価実験を行った。

図 10 に評価環境を示す。片側一車線の道路の中央線から約 2 m 離れた歩道上にマイクロフォン 2 台を設置して車両の走行音を約 30 分間収集した。マイクロフォンの間隔は予備実験の結果から 50 cm とした。IC レコーダはソニー社製の PCM-D100、マイクロフォンは OLYMPUS 社製の ME30W を使用した。サンプリングレートは 48 kHz、量子化ビット数は 16 bit である。

走行音の録音と同時にカメラを用いて道路を撮影し、この映像を真値として True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) を評価した。TP, FN, FP, TN は、それぞれ走行車両がある時に車両カウントをした回数、走行車両がある時に車両カウントをしなかった回数、走行車両がない時に車両カウントをした回数、走行車両がない時に車両カウントをしなかった回数である。

また、TP, FN, FP, TN の値を用いて以下で定義される Accuracy, Precision, Recall, F 値を算出した。

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (8)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (10)$$

$$F \text{ 値} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (11)$$

Accuracy は判定結果全体のうち答えが正であった割合であり、正確度を表す値である。Precision は車両と判定したデータのうち実際に車両であった割合であり、精度を表す値である。Recall は通過した車両のうち車両であると判定された割合であり、網羅率を表す値である。F 値は Precision と Recall の調和平均であり、総合的な評価を表す値である。

5.2 評価結果

表 1 に評価結果を示す。提案システムでは左から右への通過車両と右から左への通過車両を別々に検出するため、表ではそれぞれの TP, FN, FP, TN を示し、合計を算出した。

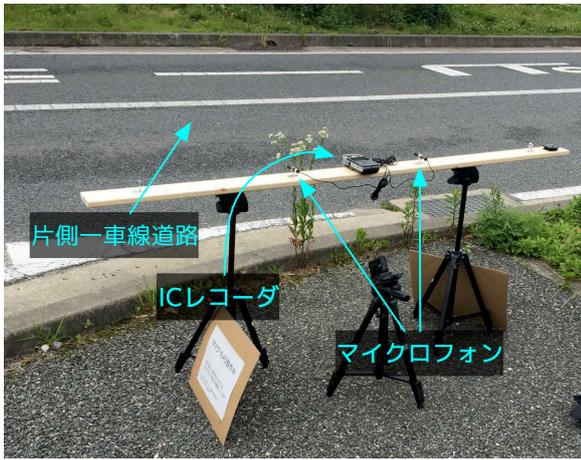


図 10 評価環境

表 1 評価結果

	TP	FP	TN	FN
左から右	63	0	-	11
右から左	87	0	-	15
合計	150	0	-	26

表 1 を用い、左から右、右から左への結果の合計を用いて計算した Accuracy, Precision, Recall, F 値はそれぞれ 0.85, 1.00, 0.85, 0.92 である。通過車両には既存の車両カウンタでのカウントが困難である二輪車も含まれているが、F 値 0.92 という高い精度で車両のカウントができることを確認した。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 [7], 本システムは実際の交通量計測への導入に一考の価値を有するものであると言える。

FP が 0 であったことから、本システムは風や周辺の人の会話音などを除去して車両を正しくカウントできると言える。車両の走行方向の誤判定も存在しないため、片側一車線の道路では走行レーンを間違いなく判定できる。

一方で、検出ができなかった車両に関して解析すると、FN の 26 回中 22 回が同一方向から車両が連続して通過する場合、または左右から同時に通過する場合であった。このため、精度向上に向けては観測領域に複数の車両が存在する場合に対応することが必須となる。左右から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図 11 に示す。図 11 より、片方の車両を検出してプロットするためにもう一方の車両の波形が薄くなっていることが分かる。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を描く処理を行うことで、このような問題を回避できると考えている。

6. おわりに

本稿では道路交通センサスのコスト削減ニーズに応えるため、音響センシングを用いた車両カウントシステムを提案した。音響センシングを用いることで設置時の制約が弱くなり、低コストに導入・運用可能な車両カウントシステムを実現した。提案する車両カウントシステムを実装し、九州大学伊都キャンパス内の片側一車線道路で収集した音データを用いて実証評価を行った結果、F 値 0.92 という高い精度で車両のカウントができることを確認した。また、本システムは車両の進行方向の誤

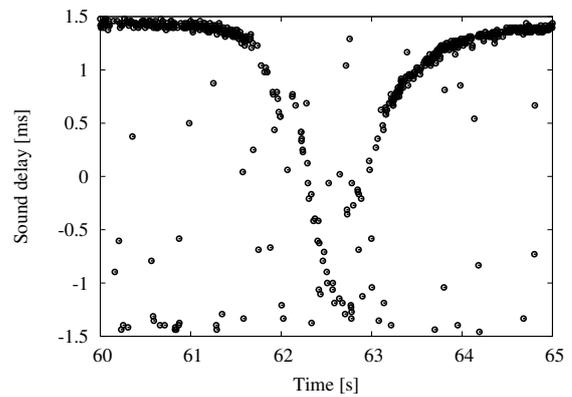


図 11 左右同時通過時のサウンドマップ

判定は無く、二輪車を含めた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 (25870928) の助成で行われた。

文 献

- [1] 門間俊幸, 松本俊輔, 橋本浩良, 水木智英, 上坂克巳, “道路交通センサス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, June 2012.
- [2] 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, Aug. 2005.
- [3] J.F. Forren and D. Jaarsma, “Traffic monitoring by tire noise,” Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.177-182, Nov. 1997.
- [4] S. Chen, Z.P. Sun, and B. Bridge, “Automatic traffic monitoring by intelligent sound detection,” Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.171-176, Nov. 1997.
- [5] S. Chen, Z. Sun, and B. Bridge, “Traffic monitoring using digital sound field mapping,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.50, no.6, pp.1582-1589, Aug. 2001.
- [6] B. Barbagli, G. Manes, R. Facchini, and A. Manes, “Acoustic sensor network for vehicle traffic monitoring,” Proc. IEEE Int. Conf. Advances in Vehicular Systems (VEHICULAR), vol.2429, p.16, June 2012.
- [7] 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,” PhD thesis, 京都大学, Sept. 2009.
- [8] 東俊孝, 高田知典, 井坪慎二, 内田淳, “道路交通センサス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, Dec. 2006.
- [9] 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, Sept. 2007.
- [10] 佐藤尚良, 内藤丈嗣, 杉村博之, 岩田武夫, 若井昌彦, “ステレオ方式速度検出用画像処理型トラカンの開発,” 信学技報, pp.1-6, ITS 研究会 (ITS2001-17), Sept. 2001.
- [11] 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, Nov. 2005.
- [12] 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, Sept. 2014.
- [13] 秦史, “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—,” PhD thesis, 総合研究大学院大学, Jan. 2012.
- [14] C.H. Knapp and G.C. Carter, “The generalized correlation method for estimation of time delay,” IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol.24, no.4, pp.320-327, Aug. 1976.