

Dynamic Time Warpingを用いた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設計と初期的評価

石田 繁巳^{1,a)} 劉 嵩¹ 三村 晃平¹ 田頭 茂明² 福田 晃¹

概要: 高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transportation Systems) において, 道路を通過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, 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一部の道路に限られている. 本稿では, 歩道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. 本システムは, 2台のマイクロフォンを歩道に設置して車両が発する音がマイクロフォンに到達する時間差から「サウンドマップ」を描き, 通過車両を検出する. 車両をカウントするためのアルゴリズムとして, DTW (Dynamic Time Warping) を用いたリアルタイムテンプレートマッチング手法を開発した. 実環境で収集した車両の音声を用いた初期的評価実験の結果, 提案する車両カウントシステムが精度 0.92 で高精度に車両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, DTW (Dynamic Time Warping), 音響センシング, サウンドマップ.

Design and Initial Evaluation of Acoustic Vehicle Count System utilizing Dynamic Time Warping

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

Abstract: Vehicle counting is one of the fundamental tasks in the intelligent transportation systems (ITS). Although automatic vehicle counters have been proposed to retrieve realtime traffic data, current automatic vehicle counters are suffered 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 sound map, which is a time-difference map of vehicle sound on the two microphones. We developed a vehicle count algorithm using sound map. Our vehicle count algorithm performs template matching utilizing dynamic time warping (DTW) to adapt to vehicle speed variation. We herein describe the design and implementation of our vehicle count system. Experimental evaluations reveal that our vehicle count system successfully counted vehicles with a precision of 0.92.

Keywords: Vehicle count, DTW (dynamic time warping), acoustic sensing, sound map.

1. はじめに

情報技術・交通の発展とともに, 高度道路交通システム

(ITS: Intelligent Transportation Systems) の重要性が高まっている. ITS の主な目的は, 道路交通の安全性・信頼性・効率・コストパフォーマンス等を向上することである. 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言える.

ITS の実現に向けては道路の交通状況をリアルタイムに取得することが重要であるため, 道路上を通過する車両を

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

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 年から概ね 5 年毎に全国道路・交通情勢調査（道路交通センサス）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、これまでもに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。また、車両カウントシステムには二輪車の検出が困難であるという問題もある。カメラを用いた車両カウントシステムでは二輪車の検出も可能であるが、カメラの角度や設置位置が検出性能を大きく左右するため、現実的な環境で十分な精度を確保するのが困難である。

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カウントシステムの開発を進めている。道路脇の歩道に 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く、回折が起こるためマイクロフォンを低い位置に設置して複数レーン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の通過を検出できることから、道路工事や安全性を確保するための設置という観点から低コストでの設置が可能となる。また、走行音が生じる全ての車両が検出対象となるため、二輪車の検出も可能である。

走行音を用いた車両カウントに関してはこれまでもに研究が行われている [1]~[4]。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することで車両を検出できることが示されている。

本研究では、上述した走行音を用いた車両カウント手法を拡張し、自動的に車両をカウントするシステムの実現を目指している。筆者らは、これまでにサウンドマップに簡素な画像処理を適用することで車両をカウントする手法を報告した [5]。画像処理を用いた車両カウントでは処理する走行音データの増加とともに計算量が増加し、リアルタイムのカウントが困難であるという課題があった。

本稿では、DTW (Dynamic Time Warping) を用いたテンプレートマッチングにより少ない計算量で車両を検出する手法を提案する。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走行音を収集し、提案する車両カウント手法を適用する実証評価を行った結果、精度 0.92 で通過車両をカウント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 では車両カウントに

関する関連研究について概観し、3 で提案する車両カウントシステムを示す。4 では車両カウントシステムの実装について述べ、実環境での初期的評価について示す。最後に 5 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 [6]。

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を閉鎖して行う道路工事が必要であり、設置・運用コストは膨大なものとなる。また、ループコイルや光電センサは検出領域が狭いため、二輪車の検出が困難であるという問題がある。

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ではセンサを支えるポールやアームに加え、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トの導入は 1 ヶ所あたり約 1,000 万円のコストを要する [7]。側方に設置する場合にも複数レーン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り、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二輪車の検出が困難となる。

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も提案されているが [8]~[10]、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。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が、CCTV では設置角度を変更することができないため天候の影響などを考慮すると精度を確保することが難しい。

このような車両カウントシステムに対し、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。道路脇の歩道に設置したマイクロフォン・アレイを用いることで車両という音源の位置を特定することができる。音響センサを用いるアプローチでは道路側方から複数レーンに渡って車両をカウントできる。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

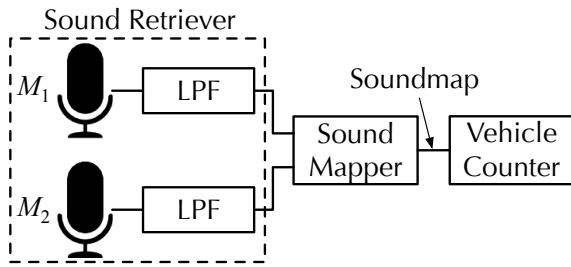


図 1 システム構成

Fig. 1 Overview of acoustic vehicle count system

る [1]~[3]. 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設計の一部が示されているのみである。また、複数レーン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。

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 [4]. このセンサネットワークでは道路側方にマイクロフォンを具備したセンサノードを配置し、車両の走行音を収集する。各センサノードは収集した走行音を処理してサウンドマップを描き、サウンドマップと音の大きさの情報を合わせることで交通量を推定する。交通量の推定値をセンサネットワークを通じて収集することで、道路上における車両の分布を観測する。このセンサネットワークは車両分布の取得を主眼としており、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、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（音響パワー）を用いて車両の通過を検出する手法も報告されている [11], [12]. 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、機械学習によって車両の通過を検出する。しかしながら、音響パワーのみを用いるために環境音や歩行者の声などによって車両が通過していない場合にもカウント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. 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

3.1 システム概要

図 1 に、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

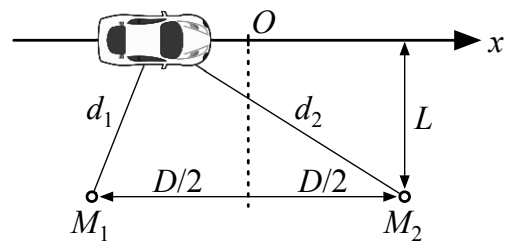


図 2 マイクロフォンの設置

Fig. 2 Microphone setup

(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側方の歩道上に設置し、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、車両カウントブロックにおいて DTW (Dynamic Time Warping) を用いたテンプレートマッチングをサウンドマップに適用し、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。

3.2 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 を道路と並行になるように設置する。

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大きな影響を及ぼす。2 台のマイクロフォンが受信する走行音の時間差が最大となるのは図 2 において $x = \pm\infty$ のときであり、その最大値 Δt_{max} は音速を c として

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

となる。このため、マイクロフォン間の距離 D が増加するとサウンドマップ上での変化が大きくなり、車両カウントの精度を向上できる。一方、 D を増加させると観測可能な範囲が広くなり、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 についても同様の効果があるため、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するため、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 2.0 kHz 以下であることが報告されているため [13], [14], LPF のカットオフ周波数はマージンを持たせて 2.5 kHz とした。タイヤからの走行音は全ての車両において発生するため、本システムではバス、トラック、二輪車、電気自動車等を含む全ての種類の車両を検出することができる。

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 及び 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時間差 Δt の同じ音響信号を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、 $R(t)$ のピークを探すことで音の到達時間差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一般化相互相関 (GCC: Generalized Cross-Correlation) 関数を用いて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 [15]。取得した走行音データを小さいウィンドウで区切り、各ウィンドウのデータにGCCを適用して到達時間差を求める。サウンドマップは各ウィンドウにおける音の到達時間差を描くことで得られる。

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字の方向は車両の通過する方向によって定まる。

3.4 車両カウントブロック

本システムでは、DTW (Dynamic Time Warping) を用いたテンプレートマッチングによってサウンドマップ上

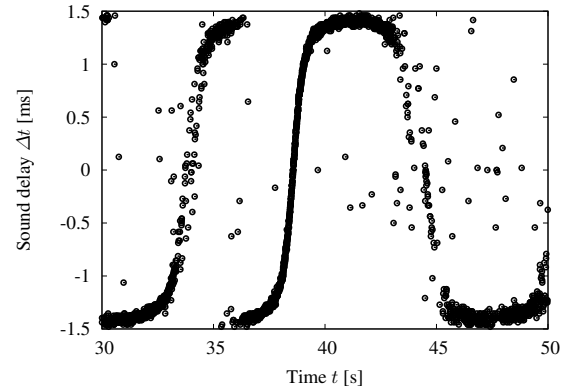


図3 サウンドマップの例

Fig. 3 Example of sound map

で車両を検出する。DTWは長さの異なる2つの系列の類似度を計算するアルゴリズムである。サウンドマップ上のS字カーブは車両の速度によって時間方向の長さが変化する。DTWを使用することによって車両速度の違いによる影響を大きく受けずに車両を検出することができる。

テンプレートマッチングを行うため、S字カーブのテンプレートを用意する。実環境で収集した車両の走行音データからS字カーブの部分を手動で抽出した。S字カーブの方向は車両の進行方向によって異なるため、それぞれの方向のS字カーブに対してテンプレートを用意し、各方向で個別にテンプレートマッチングを行う。

図4に、DTWを用いた車両カウントの概要を示す。サウンドマップとS字カーブのテンプレートを比較するためサウンドマップをウィンドウで区切る。まず、ウィンドウで区切られた最初のデータ(1)とテンプレートをDTWを用いて比較する。DTWによる類似度が閾値を上回った場合、データ(1)とテンプレートは一致しなかったと判断され、次のデータ(2)と連結して再び比較を行う。連結したデータ(1)+(2)がテンプレートと一致した場合には、次のデータ(3)とテンプレートの比較を行う。

DTWを用いたテンプレートマッチングによって車両速度の影響を受けずに車両を検出することが可能となるが、S字カーブが単純な形状をしているために多くの誤検出が生じる。図5に示すようにS字カーブの先端部分は $\Delta t = \pm \Delta t_{max}$ に漸近するため、車両が連続して通過した場合に部分的な一致を見せる。

車両が連続して通過した場合の誤検出を削減するため、L2ノルムを用いたフィルタリングを適用する。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ノルムが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ノルムは以下のように定義される：

$$\|\Delta t_{det}\| = \sqrt{\sum_k (\Delta t_{det}[k])^2}. \quad (6)$$

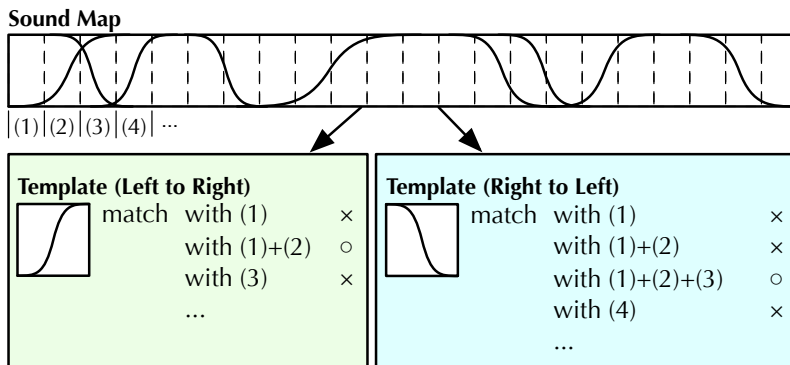


図 4 DTW を用いた車両カウントの概要
Fig. 4 Vehicle count using DTW

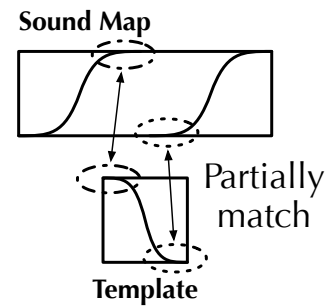


図 5 DTW を用いたテンプレートマッチングにおける誤検出
Fig. 5 False positive detection on template matching using DTW

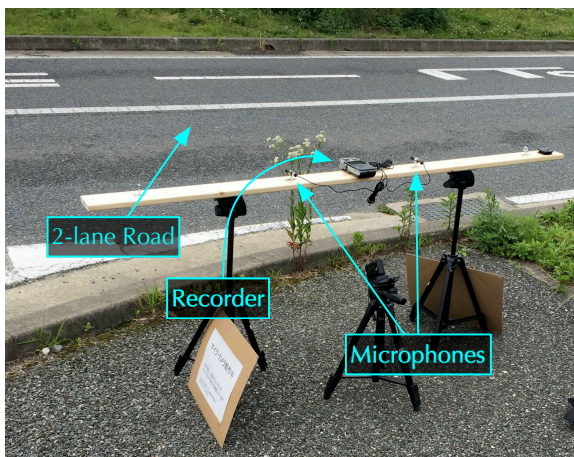


図 6 評価環境
Fig. 6 Experiment setup

図 5 に示すように、誤検出部のサウンドマップには到達時間差 Δt が Δt_{max} から $-\Delta t_{max}$ まで変化する遷移部分が存在しないため L2 ノルムが大きくなる。車両検出部のサウンドマップ系列長は一定ではないため、閾値との比較の前に系列長で L2 ノルムを正規化する。

4. 評価

提案システムの有効性を検証するための初期的評価として、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。

4.1 評価環境

図 6 に評価環境を示す。対象となる道路は片側 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高さ 1m、道路の中心から約 2m 離れた歩道上に設置し、IC レコーダで車両の走行音を約 25 分間録音した。IC レコーダは SONY 社製 PCM-D100、マイクロフォンは OLYMPUS 社製 ME-30W である。走行音はサンプリング周波数 48 kHz、16 bit 長のステレオデータとして録音した。また、録音と同時に道路をカメラで撮影し、この映像を真値として利用

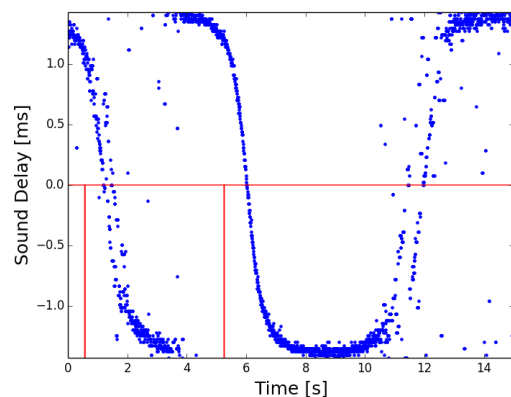


図 7 車両検出の例 (右から左へ進む車両)
Fig. 7 Example of vehicle detections (right to left vehicles)

した。

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 分間に渡って走行音データを収集し、検出率を比較した。

録音した走行音を元にサウンドマップを描き、提案する車両カウント手法を適用して車両を検出した。図 7 に提案システムによる車両検出の例を示す。赤い縦線が車両の通過を示している。提案システムでは車両の進行方向別にテンプレートマッチングを行って車両を検出するため、それぞれの方向の検出結果を加算して総合の検出結果を算出した。

検出結果をカメラ画像と比較することで True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) の回数を評価した。TP, FN, FP, TN はそれぞれ、走行車両があるときに車両をカウントした場合、走行車両があるときに車両をカウントしなかった場合、走行車両がないときに車両をカウントした場合、走行車両がないときに車両をカウントしなかった場合である。TN の回数を数えるため、車両の通過と車両の通過の間の状態を非検出状態と定めた。左右個別の検出結果とそれらを加算

表 1 True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) の回数

Table 1 Number of true positives (TP), false negatives (FN), false positives (FP), and true negatives (TN)

	TP	FN	FP	TN
Left to Right	32	7	4	—
Right to Left	63	14	4	—
Total	95	21	8	109

した総合の検出結果の整合性を保つため、TN は総合の検出結果のみで定義した。

また、TP, FN, FP, TN の値を用いて以下で定義される正確度 (Accuracy), 精度 (Precision), 網羅率 (Recall), F 値 (F-measure) を算出した。

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}} \quad (7)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (8)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (9)$$

$$F_{\text{measure}} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (10)$$

正確度は判定結果全体のうち答えが正であった割合である。精度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る。網羅率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 評価結果

表 1 に TP, FN, FP, TN の回数を示す。正確度, 精度, 網羅率, F 値はそれぞれ 0.88, 0.92, 0.82, 0.87 である。提案システムによって 0.92 という高い精度で車両のカウントが可能であることが確認された。人手による車両カウントにおいても数%~数十%の誤差があることから [16], 提案システムは実用上十分な精度を実現できると言える。

False Negative は、主に車両が連続して通過した場合に発生した。2 台の車両が連続して通過したときに最初の 1 台のみが検出され、2 台目が False Negative となった。DTW を用いた車両カウント手法では、テンプレートマッチングにおいて重ね合わせが起こらないようにウィンドウを移動させるため、ウィンドウの区切り位置によって 2 台目も 1 台目の検出結果に含まれてしまったと考えられる。

5. おわりに

本稿では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脇の歩道に設置し、車両走行音が 2 台のマイクロフォンに到達する時間差の時間変化を示すサウンドマップを描く。その上で、Dyanamic Time Warping (DTW) を用いたテンプレートマッチングによりサウンドマップ上で車両を検出

する。提案システムを実装し、九州大学伊都キャンパス内の道路において初期的な実証評価を行った結果、精度 0.92 で高精度に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。

参考文献

- [1] Forren, J. F. and Jaarsma, D.: Traffic Monitoring by Tire Noise, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 177–182 (1997).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 三村晃平, 劉 嵩, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田 晃: 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, 信学技報, 知的環境とセンサネットワーク研究会 (ASN2015-98), pp. 111–116 (2016).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Nurhadiyah, 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).
- [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 (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 (2014).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).