

離散ウェーブレット変換を用いた 省リソース車両検出システムの設計と評価

久保 一雄¹ 李 承諭¹ 内野 雅人¹ 石田 繁巳¹ 田頭 茂明² 福田 晃¹

概要: ITS (Intelligent Transportation System: 高度道路交通システム) において, 道路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た低コスト車両検出システムの省電力化のため, ウェイクアップ機構を有する省電力車両検出システムを開発している. このシステムは, 超低消費電力マイコンを用いた省リソース車両検出ブロックで車両を検出した上で高性能な車両検出システムをウェイクアップさせ, 同時通過車両の検出や車両進行方向の推定を行う. 本稿では, 超低消費電力マイコン上に省リソース車両検出ブロックを設計・実装した. 九州大学伊都キャンパス内の片側1車線計2車線の道路において省リソース車両検出モジュールの実証評価を行い, 晴天では0.96, 雨天では0.95, 豪雨では0.79という高い網羅度で車両検出が可能であることを確認した. また, ウェイクアップ機構を有する省電力車両検出システムの消費電力評価を行い, 従来の方法と比べ晴天では0.46, 雨天では0.48, 豪雨では0.49倍の消費電力でシステムを運用可能であることを確認した.

キーワード: 離散ウェーブレット変換, 車両検出, ロジスティック回帰.

1. はじめに

ITS (Intelligent Transportation System: 高度道路交通システム) の重要度が高まるに伴い, ITSを支える基盤として道路を走行する車両情報の重要度が増加している. 走行車両は一般に車両検出システムを利用して検出される. 既存の車両検出システムの導入・運用は対象区間・車線の道路を封鎖しての工事を必要とすることからコストが高く, 導入は交通量の多い一部の道路に偏っている.

筆者らは, マイクロフォンを用いた低コスト車両検出システムの開発を進めている. このシステムでは車両走行時にタイヤから発生する音を用いて車両を検出する. 道路脇の歩道上に低い高さで設置した低コストなマイクロフォンを用いて複数車線の車両を検出することができるため, 対象区間を封鎖せずに設置・管理が可能である.

提案する車両検出システムの実現に向け, 2台のマイクロフォンに車両走行音が到達する時間差を描いた「サウンドマップ」を利用する車両検出手法を報告した [1]. この手法は, サウンドマップ上の軌跡をロバスト推定手法の1つ

であるRANSAC (Random Sampling Consensus) を用いてモデル式にフィッティングする. 評価の結果, F値0.83という高い精度で車両と車両進行方向の検出を確認した.

しかしながら, 提案した車両検出システムは消費電力が大きいという問題がある. 提案した車両検出システムは, RANSACを用いたフィッティングや逐次的な車両検出に多数の積和演算を必要とするために計算処理能力の高いマイコンへの実装が不可欠となり, 大きな電力を要する. 電源の限られた環境への導入を考えると, バッテリー・環境発電での駆動に向けて車両検出システムの省電力化が重要である.

高性能な車両検出システムの省電力化に向け, 本稿では高性能な車両検出を省電力で実現するウェイクアップ型省電力車両検出システムを提案する. 具体的には, 超低消費電力マイコン上で実装可能な省リソース車両検出ブロックを新たに開発し, 車両検出時に高性能な車両検出システムを起動させる. 省リソース車両検出ブロックは常時起動させるが, 高性能な車両検出システムと比べ十分に省電力化させることでシステム全体としての省電力化を達成する.

省リソース車両検出ブロックの実現に向け, 本稿では超低消費電力マイコン上でも実装可能な離散ウェーブレット変換とロジスティック回帰分析を用いた車両検出手法を示す. 離散ウェーブレット変換から求まるウェーブレット係

¹ 九州大学大学院システム情報科学府/研究院
Graduate School and Faculty of 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

数の大小関係には車両を検出できるだけの特徴が含まれていることが知られている [2]。離散ウェーブレット変換は基底関数（マザーウェーブレット）として Haar ウェーブレットを用いることで加算及び減算で実現できる。また、ロジスティック回帰分析についてはモデルの構築時に大きなリソースを要するものの、モデルを用いた車両検出は省リソースで実現できる。

九州大学伊都キャンパス内の片側 1 車線の計 2 車線道路において収集した車両走行音データを用いて省リソース車両検出モジュールの実証評価・ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力評価を行った。実証評価の結果、晴天では 0.96、雨天では 0.95、豪雨では 0.79 という高い網羅度での車両検出を確認した。消費電力評価の結果、高性能車両検出モジュール単体で運用した場合と比較し、晴天では 0.46、雨天では 0.48、豪雨では 0.49 倍の消費電力でウェイクアップ型省電力車両検出システムが運用可能であることを確認した。

本稿の構成は以下の通りである。2 では、既存の車両検出システム及び関連研究について概観する。3 では、提案するウェイクアップ型省電力車両検出システムについて概観し、その実現に向けて新たに必要となる省リソース車両検出ブロックについて詳述する。4 では、省リソース車両検出ブロックの超低消費電力マイコンへの設計手法について詳述する。5 では、省リソース車両検出ブロックの初期的評価結果、超低消費電力マイコンを用いた実証評価結果、ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力評価結果について述べる。最後に 6 でまとめとする。

2. 関連研究

既存の車両検出システムは、その設置方法より大まかに埋設型と非埋設型に分類される。

埋設型とは、センサを道路に直接埋め込む車両検出システムである。センサには主にループコイルや地磁気センサが利用されている。埋設型の特徴として、センサ自体にダメージを受ける機会が少なく寿命が長いこと、ゴミやホコリの影響を受けにくく定期的なメンテナンスが不要ということが挙げられる。しかし、センサ 1 つあたりの車両検知範囲が狭く、精度のよい車両検出を実現するためには複数箇所にセンサを設置する必要がある。また、導入時に工事が必要となり導入コスト高いという問題がある。

非埋設型とは、センサを道路側面や上方に設置する車両検出システムのことである。センサには超音波センサや赤外線センサ、カメラなどが利用されている。非埋設型の特徴として、埋設型よりもセンサ 1 つあたりの車両検知範囲が広範囲であることが挙げられる。しかし、誤検出を防ぐためにセンサを道路上方または側面に設置する必要があることやゴミやホコリなどの影響を受けやすいという点から、導入・運用コストが高くなってしまいう問題がある。

このような既存の車両検出システムの導入・運用コストの問題から、平成 27 年度道路交通量調査において、一般国道の約 50 % 程度しか車両検出システムを用いた機械観測が用いられておらず、地方道においては更に低い [3]。交通量の少ない道路に対しては人手観測や前回の道路交通調査の観測データをそのまま活用しているのが現状である。

一般国道や地方道に対する道路交通センサのための次世代情報収集システムとして、安価な費用で同時多点計測が可能な携帯型交通量計測装置も研究されている [4]。長距離型の測距センサを採用し、簡易な解析手順で高精度な交通量に関連する情報（台数、車長、車速）が得られることが確認されている。しかし、この手法では片側 1 車線計 2 車線道路を測定するためにゲートウェイセンサとセンサユニット（メインセンサ、サブセンサ）2 組の計 5 つのセンサが必要となる。複数箇所の一般道や地方道に設置・回収を考えた場合、必ずしも導入しやすいとは言えない。

筆者らもマイクロフォンを用いた低コストな車両検出システムをこれまでに報告した [1]。このシステムは、2 台のマイクロフォンに車両走行音が到達する時間差を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。車両が同時または連続で通過した場合に車両検出精度が低下するため、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、検出車両の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。

しかしながら、マイクロフォンを用いた低コスト車両検出システムは大きなリソースを要し、消費電力が大きいという問題がある。車両検出システムの省電力化が難しい理由として、サウンドマップを描くための一般化相互相関やロバスト推定手法である RANSAC を用いたフィッティング時に多くの積和演算を必要とすることが挙げられる。

3. ウェイクアップ型省電力車両検出システム

図 1 に提案するウェイクアップ型省電力車両検出システムの概要を示す。このシステムは、

- 車両走行音取得ブロック（Sound Retriever）
- 高性能車両検出ブロック（HP-VD）
- 省リソース車両検出ブロック（ULP-VD）

の 3 つのブロックで構成される。

以下に各ブロックについて詳述する。

3.1 車両走行音取得ブロック（Sound Retriever）

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は道路脇の歩道に設置し、車両走行音データを取得する。LPF は、環境雑音の影響を低減させるために用いる。走行車両のタイヤが発する音の主成分は 2.0 kHz 以下である事が知られているため [5]、LPF のカットオフ周波数は余裕を持たせて 4.0 kHz とした。

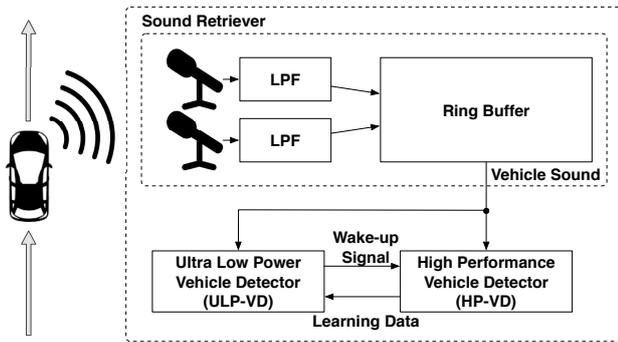


図 1 ウェイクアップ型省電力車両検出システム

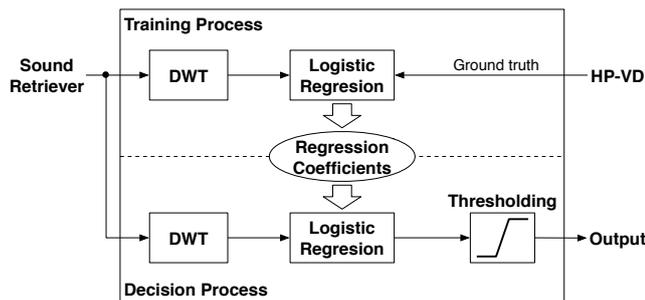


図 2 省リソース車両検出ブロック (ULP-VD) の概要図

2 台のマイクロフォンから収集した車両走行音データは一定の時間リングバッファに保存される。リングバッファは ULP-VD の車両検出時から HP-VD の解析開始までのタイムラグを解消するために使用される。また、ULP-VD に用いる超低消費電力マイコンは処理速度が遅いため、処理する車両走行音を一時的に保管するために使用される。

3.2 高性能車両検出ブロック (HP-VD)

HP-VD は、サウンドマップを用いた低コスト車両検出システムに該当する [1]。ULP-VD の学習プロセスの際と ULP-VD が車両検出した際のウェイクアップ要求時に起動する。走行車両検出付近の車両走行音データをリングバッファから読み出し、同時通過車両検出や車両進行方向の推定などを含めた高性能な車両検出を行う。HP-VD をウェイクアップ要求時以外の時は物理的にシャットダウンさせることによりウェイクアップ型省電力車両検出システム全体の平均消費電力を抑える。

3.3 省リソース車両検出ブロック (ULP-VD)

ULP-VD は、Sound Retriever から取得したマイクロフォン 1 台分の車両走行音データを用いて車両の有無のみを判定し、車両通過時に HP-VD を起動させる。ULP-VD は常時起動するが、超低消費電力マイコン上で稼働させることで消費電力を抑える。

図 2 に ULP-VD の概要図を示す。ULP-VD は学習プロセスと判定プロセスで構成される。以下に学習プロセス・判定プロセスについて詳述する。

3.3.1 学習プロセス

学習プロセスでは、DWT (Discrete Wavelet Transform) を用いて車両走行音から特徴量を抽出し、ロジスティック回帰分析を行う。

特徴量を抽出するために、マイクロフォン 1 台分の車両走行音データを短い時間間隔ごとに分割し、分割された車両走行音データごとに DWT を適用する。DWT の適用後、車両走行音データの周波数成分を含む複数のウェーブレット係数群を抽出する。そして、得られたウェーブレット係数群から最大値を一つずつ抜き出し、特徴量とする。

離散ウェーブレット変換から求まるウェーブレット係数の大小関係には車両を検出できるだけの特徴が含まれている事が知られている [2]。図 3 に抽出された特徴量と実際の周波数成分の比較例を示す。例の車両走行音データにはバイク音が含まれている。車両走行音データは 8kHz でサンプリングされた 512 点データである。Haar マザーウェーブレットを用いた 5 階の DWT を適用され、最終的に 6 点の特徴量となった。図 3 を見ると、絶対値は異なるが 6 点の特徴量はおおよそ元の車両走行音データの周波数成分を表している事がわかる。

図 3 を見ると、各特徴量には特徴量が示す周波数成分帯域がある事がわかる。表 1 にサンプリング周波数 8kHz、512 点の車両走行音データに対して Haar マザーウェーブレットを用いた 5 階の DWT (5 階 Haar-DWT) を適用した際の階数、周波数帯域、特徴量数間の関係を示す。特徴量数とはウェーブレット係数群の事であり、最終的な特徴量は各特徴量数の中の最大値となる。

階数とは、DWT においてどれだけ細かく周波数成分を解析するかを表すパラメータである。1 階 Haar-DWT で車両走行データを解析した場合、隣り合う 2 点の平均を求める LPF (Low Pass Filter) と隣り合う 2 点間の差を求める HPF (High Pass Filter) を適用する事でウェーブレット係数群を 2 つ作成する事ができる。このウェーブレット係数群は元のデータ列の半分の周波数成分をそれぞれ含むため、周波数領域の解像度は 2 倍になる。逆に、データ数は元のデータ列と比べ半減するため、時間領域の解像度は半減する事になる。2 階 Haar-DWT を用いて車両走行音データを解析する場合、1 階 Haar-DWT の LPF から出力された結果に対して、再帰的に 1 階 Haar-DWT と同じ処理を行う。つまり、 N 階 Haar-DWT は隣り合う 2 点の差と平均を求める計算の組み合わせで実現する事ができ、FFT (Fast Fourier Transform) と比べて少ない計算処理で大まかな周波数成分を求める事が可能になる。

ULP-VD は最終的に超低消費電力マイコン上に実装される。超低消費電力マイコンは処理能力も低いため、できるだけ少なく単純な計算処理で車両走行音データの特徴量抽出が必要となる。本稿では、車両走行音データの効率的な特徴量抽出のため DWT を用いる。また、本稿の提案手法

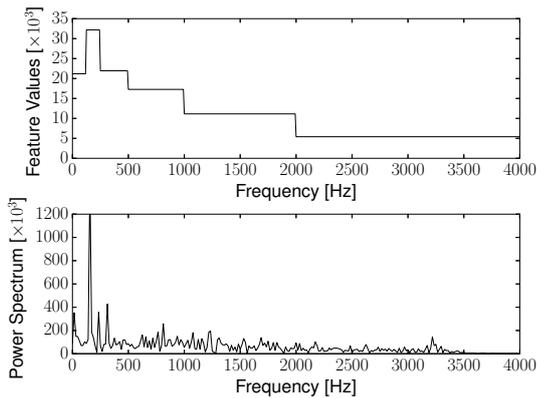


図 3 バイク音の周波数成分と特徴量間の比較 (5 階 Haar-DWT, 512 サンプル)

では最も単純な Haar マザーウェーブレットであっても十分な性能を出す事が可能なため [6], 本稿ではマザーウェーブレットとして Haar を用いる。

DWT を用いた特徴量抽出の後, 特徴量と車両通過の真値を用いてロジスティック回帰分析を行う。車両通過の真値は HP-VD から得る事ができる。ロジスティック回帰分析とは, 線形回帰分析の一種であり説明変数から目的変数が 1 となる確率を求める事ができる。本稿では, 抽出した走行車両音の特徴量を x_1, x_2, \dots, x_n とし, 車両通過を表す確率変数を $Y = \{0, 1\}$ とする。車両通過確率は式 1 によって求める事ができる。

$$P(Y = 1|X) = \frac{1}{1 + e^{-\mathbf{A}\mathbf{X}}} \quad (1)$$

この時, $\mathbf{X} = {}^t[1, x_1, x_2, \dots, x_n]$ は入力ベクトル, $\mathbf{A} = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_n]$ は回帰係数ベクトルを表す。回帰係数ベクトルはコスト関数 $C(\mathbf{A})$ を最小にする事で計算する事ができる。

$$C(\mathbf{A}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log P(Y = Y_i | \mathbf{X}_i) \quad (2)$$

この時, $\{X_i, Y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ は HP-VD から得た学習データである。

ロジスティック回帰分析を用いて回帰係数ベクトルを求めた後, 車両通過確率を車両通過か車両通過でないかを分類するための最適な閾値を求める。最適な閾値の導出には ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線を用いる。ROC 曲線とは, 真陽性率 TPR (True Positive Ratio) を

表 1 階数・周波数帯域・特徴量数の関係 ($f_s=8\text{kHz}$, 512 点)

階数	周波数帯域	特徴量数
5	0 - 0.125 kHz	16
5	0.125 - 0.25 kHz	16
4	0.25 - 0.5 kHz	32
3	0.5 - 1.0 kHz	64
2	1.0 - 2.0 kHz	128
1	2.0 - 4.0 kHz	256

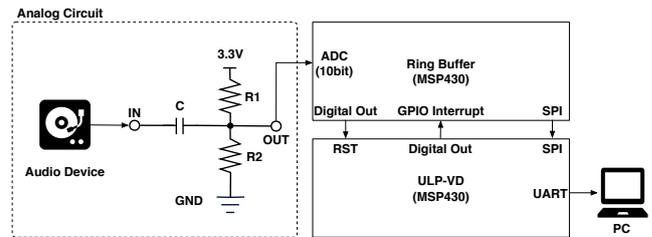


図 4 実証評価環境の概要 ($C = 1\mu\text{F}$, $R1 = 25\text{k}\Omega$, $R2 = 25\text{k}\Omega$)

縦軸に, 偽陽性率 FPR (False Positive Ratio) を横軸に設定し, 閾値を連続的に変化させた時の TPR, FPR の変化をプロットした図の事である。ROC 曲線は検査手法間の有用性の比較や最適な閾値の設定に有用な手法である [7]。TPR 1.0 と FPR 0.0 地点から最短距離に位置する閾値が最適な閾値である。ROC 曲線を求める際に必要となる学習データは HP-VD から得る事ができる。

3.3.2 判定プロセス

判定プロセスでは, 車両走行音データの特徴量と学習プロセスで求めた回帰係数ベクトル・閾値を用いて車両通過の有無を判定する。

車両走行音データの特徴量抽出においては, 特定サンプルごとに分割した車両走行音データに対して 3.3.1 と同様に処理する。特徴量抽出の後, 車両通過確率を計算する。車両通過確率の計算には, 学習プロセスで求めた回帰係数ベクトルと特徴量, 式 1 を用いて導出する。その後, 車両通過確率に学習プロセスで求めた閾値を適用し特定サンプルごとに分割した車両走行音データごとに車両通過の有無を決定する。その後, 移動平均・ヒステリシス曲線を用いて精度を向上させる。移動平均幅は 1 秒, ヒステリシス曲線の閾値は 0.1 と 0.9 を用いた。

4. 実装

提案した ULP-VD を超低消費電力マイコンへ実装し, 車両検出精度を評価するための実証評価環境を構築する。図 4 に構築した実証評価環境の概要を示す。実証評価環境は

- アナログ回路モジュール
- リングバッファモジュール
- ULP-VD モジュール

で構成される。

使用する超低消費電力マイコンは MSP430G2553 を選択した。MSP430G2553 は TI (TEXAS INSTRUMENTS) 社が提供しているマイコンであり, レモン電池でも稼働するほどの超省電力性が特徴である。本稿では, リングバッファブロックと ULP-VD ブロックの計 2 台を使用した。表 2 に MSP430G2553 の細かな性能を示す。以下に各モジュールについて詳述する。

表 2 MSP430G2553 の仕様

性能	消費電力
動作周波数	Active Mode
1–16 MHz	230 μ A
動作電圧	Standby Mode
1.8–3.3 V	0.5 μ A
RAM	Off Mode
512 Byte	0.1 μ A

4.1 アナログ回路モジュール

アナログ回路モジュールは、Audio Device とバイアス回路で構成される。

Audio Device では、ダウンサンプリングした車両走行音データを再生する。ダウンサンプリングする量は図 1 の LPF のカットオフ周波数に合わせて適切に調整される。本稿では、車両走行音のサンプリング周波数が 8 kHz になるようにダウンサンプリングを行った。

バイアス回路では、再生された車両走行音データに直流成分を加算し車両走行音データを 0–3.3V 間に変換する。本稿では、リングバッファブロックに MSP430 を用いており、ADC (Analog to Digital Converter) を利用して車両走行音データをサンプリングするため、MSP430 がサンプル可能な範囲である 0–3.3V 間に車両走行音データを変換する。図 4 に使用したバイアス回路図を示す。バイアス回路は抵抗とコンデンサで構成され、HPF (High Pass Filter) の機能を有している。本稿では、バイアス回路内の HPF は不要であるため、キャパシタンスを十分に上げる事でカットオフ周波数を下げた。コンデンサは $C = 1\mu\text{F}$ 、抵抗は $R1 = R2 = 25\text{k}\Omega$ に設定した。

4.2 リングバッファモジュール

リングバッファモジュールは図 1 の Sound Retriever 中に存在するリングバッファに対応する。リングバッファの役割は、HP-VD と ULP-VD への車両走行音データの提供である。しかし本稿では、ULP-VD の実証評価環境の構築が目的であるため ULP-VD への車両走行音データ提供部分のみを実装した。

リングバッファモジュールに車両走行音を入力する際、MSP430 の ADC を用いた。サンプリング周波数は 8 kHz、量子化ビット 10 bit でサンプリングを行った。リングバッファに保存する車両走行音データは、ADC の値ブレを防ぐため下位 2 bit を捨て 8 bit とした。

リングバッファモジュールから ULP-VD モジュールへ車両走行音データを出力する際、MSP430 の SPI (Serial Peripheral Interface) 通信を用いた。転送速度は 500 kbps に設定した。ULP-VD モジュールから GPIO 割り込みがあった時に転送を開始し、転送中はリングバッファの更新を停止した。



図 5 実験設備

4.3 ULP-VD モジュール

ULP-VD モジュールは、ULP-VD の判定プロセスに該当する処理を実行する。車両走行音データに対して特徴量抽出から車両通過判定までに一定の処理時間が必要なため、全ての車両走行音データに対して車両通過判定を行うことができない。そこで本稿では、MSP430 の処理能力を考慮し約 0.2 秒間ごとに車両通過判定を行うよう設定した。

車両通過判定に使用した階数、DWT を適用するサンプル幅、回帰係数ベクトル、閾値は初期的評価実験の結果で得られた最適なパラメータを用いた。詳細については、5.3.1 にて述べる。

車両通過の判定結果を出力する際、MSP430 の UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 通信を用いた。転送速度は 9600 bps に設定し、ログ取得用の PC を用いてデータを収集した。

5. 評価

階数・サンプル幅を決定するための初期的評価、省リソース車両検出ブロックの実証評価、ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力評価を行った。

初期的評価では、ULP-VD の階数・サンプル幅を変化させた時の精度・網羅度を各天候ごとに調査し、最適な階数・サンプル幅を定義した。実証評価では、初期的評価で求めた最適な回帰係数ベクトル・閾値を利用し、超低消費電力マイコンである MSP430G2553 を用いて車両検出精度を評価した。消費電力評価では、実証評価で求めた車両検出精度を元に、ウェイクアップ型省電力車両検出システムが高性能車両検出システム単体で運用した際と比較しどの程度の省電力性が見込めるのか評価した。

5.1 評価環境

九州大学伊都キャンパス内の片側 1 車線計 2 車線道路において、晴天・雨天・豪雨における車両走行音データを収集した。各天候の検証に用いた車両通過台数はそれぞれ 151 台、88 台、164 台となった。雨天は 2018 年 5 月 2 日 14 時頃に車両走行音を収集し、その時の福岡市の降水量は

3mm/hであった[8]。豪雨は2018年7月6日15時頃に車両走行音を収集し、その時の福岡市の降水量は31.5mm/hであった[8]。豪雨は「平成30年7月豪雨」間に収集した[9]。

図5に本稿で用いた実験設備を示す。1台のマイクロフォン(AZDEN SGM-990)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(SONY HDR-MV)でサンプリングレート48kHz、量子化ビット16bitで車両走行音データを記録した。また、録音と同時に道路をカメラで撮影し、この動画を真値として利用した。車両走行音データには普通車の他に大型車や二輪車が含まれている。また、雑音としてセミの鳴き声、会話、風切り音、雨音などが含まれている。評価には8kHzにダウンサンプリングした車両走行音データを用いた。

5.2 評価手法

ULP-VDは、車両通過の有無のみを検出するシステムである。そのため、車両通過台数による評価を用いる事ができない。本稿では、評価手法として車両検出・車両非検出のタイミングによる評価を行った。具体的には、車両がマイクロフォン正面を通過した前後2秒計4秒を車両通過タイミングと定義し、その区間内で1度でもULP-VDが車両通過を検出すればTrue Positive (TP)、そうでなければFalse Negative (FN)と定義した。また、車両がマイクロフォン正面を通過した前後4秒計8秒以外を車両非通過タイミングと定義した。車両非通過タイミングを4秒ごとに分割し、それぞれの区間内において1度でもULP-VDが通過車両を検出すれば、False Positive (FP)、そうでなければTrue Negative (TN)と定義した。

その後、TP, FN, FP, TNの値を用いて以下で定義される精度(Precision)、網羅度(Recall)を算出した。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

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、網羅度を表す値である。

本稿ではRecallを最重要視して評価する。ULP-VDは車両検出時にHP-VDを立ち上げ、高性能な車両検出を行う。Recallが低かった場合、ULP-VDはHP-VDを立ち上げることができず、走行車両を検出できない。また、Precisionは次点で重要な指標である。ウェイクアップ型省電力車両検出システムはHP-VDの誤起動が少なければ少ないほど省電力性が高い。Precisionが低い場合にはHP-VDの誤起動が増加し、電力を浪費する。

Weather and Time-Window	1	2	3	4	5	6	7							
128	0.96	1.0	0.98	1.0	0.97	1.0	0.97	1.0	0.98	1.0	0.96	1.0	0.96	0.99
256	0.99	1.0	0.98	1.0	0.98	1.0	0.98	1.0	0.98	1.0	0.96	0.99	0.95	0.99
512	0.97	1.0	0.96	1.0	0.96	1.0	0.96	1.0	0.97	1.0	0.96	0.99	0.94	0.99
1024	0.97	1.0	0.97	1.0	0.97	1.0	0.96	1.0	0.97	1.0	0.96	0.99	0.96	0.99
2048	0.98	1.0	0.96	1.0	0.95	1.0	0.96	1.0	0.95	1.0	0.95	0.99	0.96	0.99
4096	0.85	1.0	0.85	1.0	0.84	1.0	0.88	1.0	0.87	1.0	0.87	1.0	0.84	0.99
128	0.86	1.0	0.86	1.0	0.86	1.0	0.88	1.0	0.91	1.0	0.85	0.98	0.8	0.98
256	0.86	1.0	0.89	1.0	0.89	1.0	0.91	1.0	0.89	1.0	0.79	0.97	0.83	0.97
512	0.88	1.0	0.85	1.0	0.9	1.0	0.89	1.0	0.91	1.0	0.92	0.99	0.85	0.96
1024	0.82	1.0	0.87	1.0	0.85	1.0	0.87	1.0	0.87	0.99	0.89	0.96	0.84	0.96
2048	0.79	1.0	0.81	1.0	0.81	1.0	0.82	1.0	0.85	0.98	0.82	0.95	0.84	0.97
4096	0.58	0.99	0.65	1.0	0.61	1.0	0.65	1.0	0.64	1.0	0.65	0.98	0.66	0.97
128	0.63	0.98	0.62	0.98	0.63	0.98	0.64	0.98	0.63	0.97	0.63	0.94	0.65	0.92
256	0.65	0.98	0.64	0.98	0.61	0.95	0.62	0.96	0.62	0.97	0.67	0.93	0.67	0.93
512	0.65	0.98	0.66	0.98	0.64	0.96	0.64	0.93	0.63	0.98	0.66	0.9	0.67	0.9
1024	0.62	0.98	0.63	0.97	0.61	0.95	0.66	0.9	0.61	0.95	0.67	0.88	0.64	0.86
2048	0.59	0.93	0.61	0.96	0.59	0.92	0.6	0.92	0.59	0.97	0.59	0.9	0.61	0.92
4096	0.42	0.94	0.45	0.97	0.45	0.93	0.45	0.92	0.42	0.99	0.44	0.9	0.42	0.93

図6 ULPVDの晴天・雨天・豪雨に対する精度・網羅度の変化(縦軸は上から晴天・雨天・豪雨の順に分類)

5.3 評価結果

5.3.1 階数・サンプル幅を決定するための初期的評価結果

ULP-VDにおいて、DWTを適用する階数・サンプル幅は精度・網羅度の結果に影響する重要なパラメータである。最適な階数・サンプル幅を決定するための初期的評価として、様々な階数・サンプル幅に対する精度・網羅度の検証を行った。図6に初期的評価結果を示す。

網羅度に関してはどの天候においても高い値を維持している。これは雨音などのノイズがある場合でもULP-VDがHP-VDを正しく立ち上げることを示す。精度に関しては晴天では高い値を維持しているが、雨天や豪雨では低下していることがわかる。これは雨音などのノイズがある場合、ULP-VDがHP-VDを誤検出で立ち上げ無駄な消費電力が増加することを示す。

最適な階数・サンプル幅の選択方法として、各階数・サンプル幅における晴天・雨天・豪雨の精度・網羅度の合計値が最大であるパラメータを選択した。ULP-VDの最も重要なパラメータは網羅度であるが、どの天候においても網羅度の低下が少なかったためこの手法を用いた。合計値が最大値であったパラメータは階数5・サンプル幅128であった。本稿では、階数5・サンプル幅128を今後基準として評価を行う。

5.3.2 省リソース車両検証ブロックの実証評価結果

階数5・サンプル幅128におけるULP-VDの実証評価を行った。用いた閾値・回帰係数ベクトルなどは5.3.1で求めた結果を用いた。表3に4で述べた実証評価環境を用いた評価結果を示す。

網羅度においては、晴天・雨天時はほぼ初期評価結果と同様の結果が得られた。豪雨時においては、初期的評価よりも大きく低下する結果となった。精度においては、網羅度とは対象的に晴天・雨天・豪雨のどの天候であっても初期的評価結果と比べ大きく低下する結果となった。

初期的評価環境とMSP430を用いた実証評価環境での大きな差として、車両走行音データ収集の際の量子化ビツ

表 3 超低消費電力マイコンを用いた実証評価結果

	TP	TN	FP	FN	Precision	Recall
晴天	149	150	111	2	0.57	0.96
雨天	84	114	96	4	0.46	0.95
豪雨	131	175	229	33	0.36	0.79

表 4 平均消費電力量

使用スレッド数	0	1	2	3	4
RaspberryPi[W]	0.58	0.74	0.91	1.10	1.29
MSP430G2553[mW]	8.25				

ト数と処理リソース差が挙げられる。本稿の MSP430 を用いた実証評価では、バッファに車両走行音データを格納する際車両走行音データを 8bit で収集している。また、MSP430 の処理リソースの問題から約 0.2 秒ごとに 1 度車両検出の有無を判定しており、全ての車両走行音データの特徴量を計算し、検証を行う初期の評価と大きく環境が異なる。このような差から、精度・網羅度の低下が起こったと考えられる。

5.3.3 ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力評価

実証評価で求めた各天候における精度・網羅度を用いて、ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力評価を行った。具体的には、高性能車両検出モジュール単体で運用した際の消費電力と比較しどの程度省電力化が可能か消費電力予測モデルを作成し評価を行った。

消費電力予測モデルでは、車両通過頻度はポアソン分布に従うとし、各天候の車両検出精度は実証評価結果を用いた。また、車両通過頻度の変化によって車両検出精度は変化しないものとした。

ULP-VD の消費電力値は、実際に MSP430G2553 に省リソース車両検出モジュールの判定プロセスを実行させた時の消費電力を測定した。HP-VD は、現段階でマイコンなどに実装されていない。そのため本稿では、実装予定環境に積和演算を実行させ、その時の消費電力を高性能車両検出モジュールの消費電力とした。具体的には、RaspberryPi 3 model B 上に Toppers/FMP カーネルを導入し 1~4 スレッドで積和演算処理を実行させた際の消費電力を用いた。Sound Retriever の消費電力値は、ULP-VD の 3 倍とした。表 4 に、測定した消費電力値を示す。

図 7 に、高性能車両検出ブロック単体で運用した際と比較した、ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力予測結果を示す。九州大学伊都キャンパス内で収集した車両走行音の車両通過頻度は 1 時間あたり約 300 台であった。1 時間あたり 300 台の結果では、晴天では 0.46、雨天では 0.48、豪雨では 0.49 倍の電力で運用が可能であることがわかった。

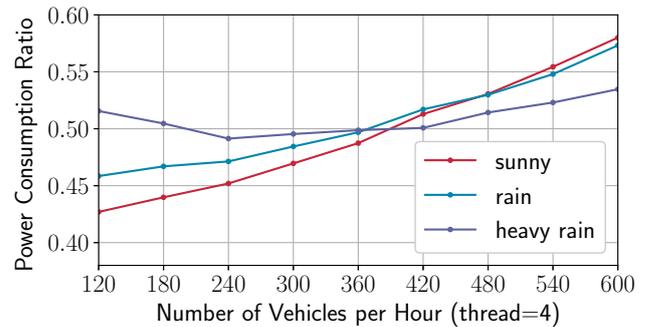


図 7 ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力予測結果

6. おわりに

本稿では、高性能車両検出システムの省電力化に向け、ウェイクアップ型省電力車両検出システムと、新しく開発が必要な省リソース車両検出モジュールを提案した。九州大学伊都キャンパス内の片側 1 車線の計 2 車線道路において収集した車両走行音データを用いて省リソース車両検出モジュールの実証評価・ウェイクアップ型省電力車両検出システムの消費電力評価を行った。実証評価の結果、晴天では 0.96、雨天では 0.95、豪雨では 0.79 という高い網羅度で車両検出を確認した。消費電力評価の結果、従来の手法と比べ晴天では 0.46、雨天では 0.48、豪雨では 0.49 倍の消費電力で提案システムを運用可能であることを確認した。

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の助成で行われた。

参考文献

- [1] 梶村順平, 石田繁巳, 内野雅人, 田頭茂明, 福田晃: 路側設置マイクロフォンを用いた逐次検出型車両検出システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 1, pp. 76–86 (2019).
- [2] Averbuch, A., Zheludev, V. A., Rabin, N. and Schclar, A.: Wavelet-based acoustic detection of moving vehicles, *Multidimensional Systems and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 55–80 (2009).
- [3] 国土交通省道路局企画課: 平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査一般交通量調査結果の概要について (2015).
- [4] 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, No. 0, pp. 103–110 (2006).
- [5] 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).
- [6] 久保一雄, 李承諭, 内野雅人, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田晃: 離散ウェーブレット変換を用いた車両検出時の窓関数の影響, pp. 1–2 (2018).
- [7] 眞重文子: ROC 曲線の作成と最適なカットオフ値の求め方, 生物試料分析, Vol. 28, pp. 133–139 (2005).
- [8] 国土交通省気象庁: 気象庁 過去の気象データ検索.
- [9] 福岡管区気象台: 災害時気象資料 平成 30 年 7 月豪雨 (2018).