

光学式測距センサを用いた簡易型車両検出システム

恋塚 葵^{1,a)} 加藤 拓也¹ 植田 哲郎¹ 宇都宮 栄二¹

概要：モビリティの高度化はスマートシティを支える重要な要素であり、特に人口が密集した都市部においては、道路の渋滞や駐車場の混雑といった課題がある。これらの課題の解決には、交通状況や駐車場混雑度を取得することが必須であり、道路を走行する車両のカウントはその基礎技術となる。筆者らは比較的安価で高精度な測距が可能な光学式測距センサに着目し、精度や設置・メンテナンス性などの観点から実運用を想定した車両検出手法の開発を進めている。本手法では、路側の1ヶ所に設置した2台の光学式測距センサによる測距値の変化から、左右方向ごとの車両の通過を検出する。本稿では、駐車場出入口での実験により本手法の精度評価を示すとともに、車両カウンタや混雑度可視化アプリケーションなどから構成される簡易型車両検出システムを示す。

キーワード：車両検出, 光学式測距センサ, スマートシティ

Simplified Vehicle Detection System Using Optical Distance Sensors

Abstract: Mobility improvement is essential to realize a smart city. Especially in densely populated urban areas, there are issues such as road congestion and parking lot congestion. In order to resolve them, it is necessary to acquire the traffic situation and the parking lot congestion degree, and counting of vehicles traveling on the road is a basic technology. We have focused on optical distance sensors that are relatively inexpensive and capable of high precision distance measurement, and are developing a vehicle detection method in consideration of accuracy, installability, and maintainability. In this method, the passage of vehicles in each of the left and right directions is detected from the change in distance measurement values by two optical distance sensors installed at one place on the roadside. In this paper, we show the evaluation of this method in the experiment at a parking lot entrance. We also describe a simplified vehicle detection system consisting of a vehicle counter, a congestion degree visualization application and so on.

Keywords: vehicle detection, optical distance sensors, smart city

1. はじめに

ICTを用いて人々の生活の質を高めつつ持続的な都市の発展を可能とする「スマートシティ」を実現するための取り組みが世界的に進められている。Society 5.0を掲げる日本においても、スマートシティの実現を目指したプロジェクトが各地で行われている[1]。モビリティの高度化はスマートシティを構成する重要な要素の一つであり、特に人口が密集した都市部においては、道路の渋滞や駐車場の混雑といった課題がある。渋滞や混雑は、単に住民がストレスを抱える要因となるだけでなく、燃料や時間が浪費され

ることで商業的にも多大な損害を生む。

これらの課題の解決には、交通状況や駐車場混雑度を取得することが必須であり、道路を走行する車両のカウントはその基礎技術となる。実運用を想定した際、走行する車両の検出手法の要件には、以下の5点が挙げられる。

- **高精度：**正確な交通量及び駐車台数を把握するためには、道路の混雑状況に左右されず高精度な車両検出を行わなければならない。また、センサ前を人や自転車が通過する環境においても、車両を識別・検出する必要がある。
- **設置・メンテナンス性：**地中や路面上方にセンサを設置する手法では、センサの設置・メンテナンス時に道路や駐車場の利用を妨げる。路側にセンサを設置するなど、交通を妨げない手法が望ましい。また、センサ

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所

KDDI Research, Inc

^{a)} ao-koizuka@kddi-research.jp

と制御装置は省電力で動作し、内蔵電池で長期間稼働できれば、電源工事が不要となり一時的なセンサの設置も可能となる。

- 安価：あらゆる場所の渋滞や混雑を可視化するには、多数のセンサが必要となるため、センサと制御装置は安価であることが望ましい。
- 省スペース：センサは、道路や駐車場の出入口など多様な環境への設置が想定されることから、小型に実装可能であることが求められる。
- シンプルなアルゴリズム：上述のように、センサの制御装置は省電力かつ安価であるマイコンの使用が望まれる。このような低リソースなマイコンで車両検出判定を行うには、低サイズのセンサデータを利用した計算量の少ない判定アルゴリズムが必要となる。また、マイコン内部で車両検出判定ができれば、LPWA などにより外部へ送信するデータは、車両のカウント数のみでよく、通信量の低減が可能となる。

既存の車両検出手法には、ループコイル、カメラ、磁気センサ、マイクロフォン、モバイルデータを利用したものなどがある。しかしながら、いずれも上記の車両検出手法に求められる要件を全て満たすことが難しい。これらに対し、筆者らは比較的安価で高精度な測距が可能な光学式測距センサに着目し、車両検出手法の開発を進めている。本手法では、2 台の光学式測距センサを所定の角度をつけて路側に設置し、センサの測距値の変化から左右方向ごとの車両の通過を検出する。路側にセンサを設置するためメンテナンス性に優れ、光学式測距センサは 1 台 1 万円程度と比較的安価である。また、2 台の光学式測距センサは 1 ヶ所に設置するため省スペース性を有し、扱うセンサデータは 2 値の時系列測距データであるためアルゴリズムはシンプルに実装できる。

車両検出は、複数の人や自転車が通過する環境においても車両を識別・検出するために、側面判定と前後面判定の 2 つを併用した判定を行う。側面判定では、2 台のセンサにて物体を閾値回以上同時に連続検知した場合、車両の側面を検出したと判定する。前後面判定では、センサが車両の前面および後面を検出する際に観測される測距値の変化があった場合、車両の前後面を検出したと判定する。両判定とも、人や自転車に比べ、車両の側面長および前後面長（車幅）が長いことを利用する。最終的な車両検出判定は、側面検出と前後面検出の両方の判定を組み合わせ、誤検出を低減する。

本稿では、設計した車両検出手法により、多数の人や自転車が通過する中、通過車両 382 台を F 値 0.997 にて検出できることを示す。また、本車両検出手法を実装した車両カウンタと混雑度可視化アプリケーションなどから構成される簡易型車両検出システムを紹介する。

2. 関連研究

本章では、既存の車両検出手法について述べる。代表的な手法には、ループコイル、カメラ、磁気センサ、マイクロフォン、モバイルデータを利用するものがあり、それぞれに利点・欠点がある。

ループコイルを利用した車両検出手法は、1960 年代ごろより導入され、ゲート式駐車場や高速道路での車速計測に用いられるなど、車両検出手法の主流となっている [2], [3]。その検出手法は、ループコイルを道路下に埋設し、金属体である車両が通過する際に、コイルのインダクタンスが低下する性質を利用して検出を行う。天候に左右されず車両検出可能であるが、設置・メンテナンス時には道路を閉鎖する必要があるという課題や路面の劣化による検出精度低下の課題がある。また、近年では電気自動車の普及に伴い、金属部分を削減した車両が増え、ループコイルに反応しないといった問題も出てきている。

カメラを利用した車両検出手法では、車両検出に加えて車種分類を行う方法が提案されている [4], [5]。映像情報を用いることから観測環境が整えば高精度な車両検出・車種分類も可能であるものの、その精度はカメラの設置位置や角度に大きく左右される。また、判定を行うための画像処理には大きな計算リソースが必要となるため、低リソースなマイコンには適用できない。他には、プライバシーの問題もあり、設置場所が限られる。

磁気センサを利用した車両検出手法は、ループコイル式と同様に、金属体である車両が通過する際に発生する磁場の変化を利用し車両の検出を行う [6], [7], [8]。ループコイル式では設置・メンテナンス時に工事が必要であったが、磁気センサは一般的に路側に設置するため設置が容易であり、天候にも影響されにくい。しかしながら、車両に対する磁気センサの反応距離は数 m 程度であるため計測場所は 1 車線道路などに限られる。また、ループコイル式と同じく、その検出精度は車両の材質に左右される。

マイクロフォンを利用した車両検出手法では、車両が通過する際に生じる走行音を複数台のマイクロフォンで取得し、方向を含めた車両のカウントを行う [9], [10]。検出距離が長いこと、比較的安価に実装できること、必ずしも見通しを必要としないことなどの利点があるものの、高精度な車両検出には高頻度なサンプリングが必要となり、信号処理のための計算リソースも大きくなることから、低リソースなマイコンへの実装が難しい。

以上で紹介した車両検出手法は道路近くの一点にセンサを固定して測る形式であるが、モバイルデータを利用する手法も存在する [11], [12]。これらでは、車載 GPS を有するプローブカーや搭乗者のスマートフォンから得られた位置データなどを利用し、交通流量を推定する。追加のセン

サが不要なため、設置・メンテナンスの費用を抑えながら大まかな交通状況を把握することが可能である。しかし、台数単位で正確に推定することは困難であることから、駐車場の混雑度可視化などの用途には使用できない。

これらに対し、筆者らは比較的安価で高精度な測距が可能な光学式測距センサに着目した。光学式センサを利用した車両検出手法には、[13], [14] などがある。[13] では、路面上方に光学式測距センサ 2 台を設置し、車長及び車高を算出することで 99.2 % の精度で 2 車種判別を行っている。しかしながら、センサは路面上方に設置する必要があるため、設置場所が限られる。[14] では、2 台の光学式センサを路側に設置することで、左右方向ごとの車両の通過をカウントする。光学式センサは約 3 m の間隔を空けて道路方向に設置することで、歩行者が通過した際の誤検出に対処しているものの、複数人が通過した際の誤検出の低減には対応していない。また、センサは 2 ヶ所に設置するため、一定の設置スペースが必要となる。

3. 光学式測距センサを用いた車両検出

本節では、実運用に求められる要件を考慮し、光学式測距センサを用いた車両検出を示す。人や自転車が通過する環境での利用を想定し、誤検出を低減するため、車両検出判定は車両の側面判定と前後面判定を併用して行う。

3.1 基本設計

本手法では、図 1 のように、路側の 1 ヶ所に 2 台の光学式測距センサを角度をつけて設置する。これには、設置時の工事が不要で、2 台のセンサをまとめて配置することに

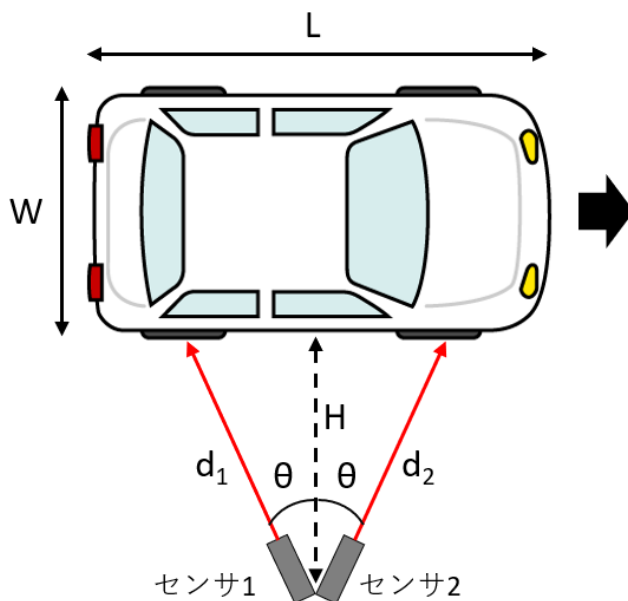


図 1 角度をつけて設置した 2 台の光学式測距センサによる車両検出
Fig. 1 Vehicle detection with two optical distance sensors installed at an angle.

より設置スペースをとらないという利点がある。

はじめに、各パラメータなどを定義する。図 1 において、道路に対し左側を測定する測距センサをセンサ 1、右側を測定するセンサをセンサ 2 とし、2 台のセンサがなす角度を 2θ 、検出対象の車両の最短車長を L_{min} 、検出対象の車両の最短車幅を W_{min} 、検出対象の車両から測距センサまでの垂直距離の最大値を H_{max} 、車両の最高速度を V_{max} 、2 台のセンサの測定間隔時間を T とする。また、測距センサは測距値が初期値から一定値 th_{detect} 以上減少した際に、センサ前に物体を検知したと判定する。2 台のセンサが同時かつ連続に、物体を検知している間のセンサ 1 及びセンサ 2 の平均測距値を d_1 , d_2 とする。時刻に関して、センサ 1 が物体を検知し始めた時刻を t_1 、センサ 2 が物体を検知し始めた時刻を t_2 、センサ 1 が物体の検知を終了した時刻を t_3 、センサ 2 が物体の検知を終了した時刻を t_4 とする。以下では、車両は等速走行し、2 台のセンサを備えた車両カウンタは車両の走行ルートに対し垂直方向に設置するものとする。

3.2 側面判定

人や自転車に比べ車両の側面長は長いことを利用し、車両の側面判定を行う。センサ間角度を適切に設定すれば、人や自転車が通過した際には 2 台のセンサが同時に物体を検知することはなく、車両が通過した場合にのみ同時に車両側面を検知する。そこで、2 台の測距センサにて連続かつ同時に物体を検知した回数が閾値 th_{both} 回以上となった場合に、車両の側面を検出したと判定する。ただし、側面判定には、連続同時検知中に少なくとも 1 度は、2 台のセンサの測距値の差が閾値 th_{diff} 以下とならなければならない。これは、誤検出を低減するためであり、車両通過時の連続同時検知中、車両側面までの距離を計測する 2 台のセンサ測距値は近い値をとることを利用している。

3.2.1 センサ間角度

側面判定には、2 台の測距センサがなす角度 2θ の設定が重要となる。 θ は、小さすぎる場合には人や自転車の通過時にも車両側面と誤検出する可能性が高まり、大きすぎる場合には車両が通過しても 2 台のセンサが同時検知しないため側面検出ができない。そこで、 θ を以下のように設定することで、車両通過時に 2 台の測距センサにて少なくとも 1 回以上同時検知しつつ、 θ を最大とできるため誤検出を最小にできる。

$$\theta = \arctan \left(\frac{L_{min} - V_{max}T}{2H_{max}} \right) \quad (1)$$

ただ、このような θ を設定した場合でも、センサの目の前を人や自転車が通過した場合に誤検出する可能性が残るため、測距センサの計測値が d_{min} 以下の際は物体の検知を行わない。

3.2.2 動的閾値

側面判定において、同一の物体でもセンサ近くを通過した際には連続同時検知回数が多くなり、速くを通過した際には少なくなるため、検出精度を高めるには閾値 th_{both} を距離に応じ動的に設定する必要がある。速度 V_{max} で走行する車両は、少なくとも $\{L_{min} - 2 \max(d_1, d_2) \sin \theta\} / V_{max}$ の時間だけ同時に2台のセンサ前を通過するため、閾値 th_{both} を以下のように決定する。ここで、距離に $\max(d_1, d_2)$ を用いたのは、車両通過時にセンサ前を人などが通過した際にも側面判定が可能な閾値を設定するためである。

$$th_{both} = \frac{L_{min} - 2 \max(d_1, d_2) \sin \theta}{V_{max} T} \quad (2)$$

3.3 前後面判定

人や自転車に比べ車両の前後面長（車幅）は長いことを利用し、車両の前後面判定を行う。図2のように、例えば車両が左から右へ通過する際、センサ1が車両の前面を検知している間はその測距値が次第に減少し、センサ2が車両の後面を検知している間は測距値が次第に増加する。人や自転車に対し車両は幅が広いから、これらの増減量が大きくなることから、車両の前後面の検出ができる。

図2において、時刻 t_1 から車両の前面はセンサ1によって検知が開始され、距離 $W \tan \theta$ だけ進んだところで前面の検知が終了する。さらに、距離 $2 \max(d_1, d_2) \sin \theta$ 進むと時刻 t_2 となる。このことから、車両は等速で走行することを前提とするため、センサ1による車両前面の検知時間は式(3)を用いて $t_1 \sim t_1 + width_time(t_2 - t_1)$ と表される。同様にして、センサ2による車両後面の検知時間は $t_4 - width_time(t_4 - t_3) \sim t_4$ と表される。ただし、実際には判定対象の車両の車幅 W は不明であるため、代わりに判定対象の車両のうち最も短い車幅 W_{min} の値を用いる。また、図2より、車両前後面の検知時間は少なくとも $W_{min} \tan \theta / V_{max}$ 以上であることから、前面判定における $width_time(t_2 - t_1)$ と後面判定における

$width_time(t_4 - t_3)$ がこの値以下である場合、各前後面は非検出とする。

$$width_time(\tau) = \frac{\tau W \tan \theta}{2 \max(d_1, d_2) \sin \theta + W \tan \theta} \quad (3)$$

続いて、上記検知時間における測距値の増減量を元に、車両前後面の検出判定を行う。はじめに、 $t_1 \sim t_1 + width_time(t_2 - t_1)$ におけるセンサ1の測距値を時系列に3つに分け、それぞれの平均測距値を d_i, d_{ii}, d_{iii} とする。増減量の閾値を th_w とし、 $th_w < d_i - d_{ii}$ かつ $th_w < d_{ii} - d_{iii}$ の場合に、車両前面を検出したと判定する。後面についても同様に、 $t_4 - width_time(t_4 - t_3) \sim t_4$ におけるセンサ2の平均測距値を d'_i, d'_{ii}, d'_{iii} とし、 $d'_i - d'_{ii} < -th_w$ かつ $d'_{ii} - d'_{iii} < -th_w$ の場合に、車両後面を検出したと判定する。

3.4 黒色車両への対応

光学式測距センサではセンサから光を発光し、発光した光が物体に反射して返ってくるまでの時間を測定することで測距を行う。反射物が車両のとき、黒色の車両は反射率が低いという課題があり、白色の車両は数10%以上の反射率を有するのに対し、黒色の車両は0.1%程度の反射率しか持たないことが知られている[13]。この課題に対し、本手法では、センサ前方に通過物体が存在しないときに測距値を取得可能な場所へセンサを配置することで対処する。具体的には、センサ前方の測距可能距離以内に、壁や建物などの物体が存在する位置にセンサを配置する。これにより、黒色車両がセンサ前を通過した際は、計測していた測距値が計測不能値へと変化するため、黒色車両がセンサ前に存在すると検知できる。ただし、実際には光学式測距センサは黒色車両に対し完全に機能しないわけではなく、一定の割合で測距が可能である。十分なサンプリングレートを確保することで、測距値を利用した3.2や3.3で述べた判定は黒色の車両へも適用可能である。

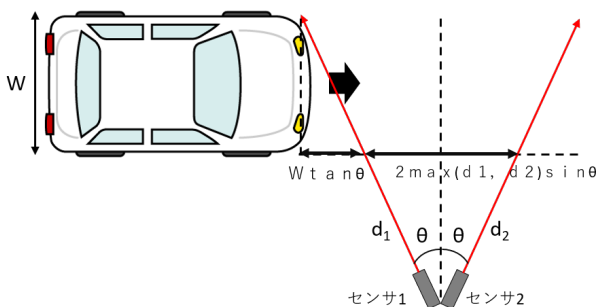


図2 時刻 t_1 における走行方向の各距離について

Fig. 2 Each distance in the passing direction at time t_1 .

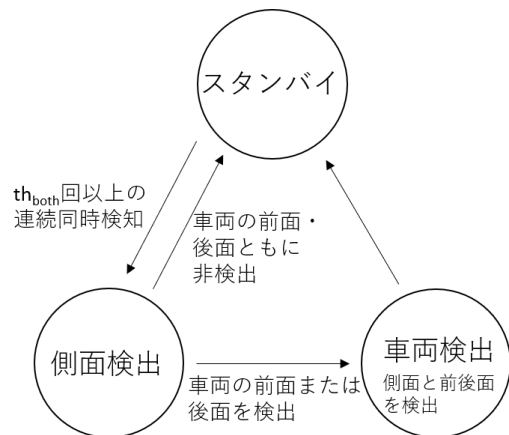


図3 車両検出判定の状態遷移図

Fig. 3 State transition diagram of vehicle detection judgment.

3.5 車両検出判定手法

上述した側面判定と前後判定を組み込んだ車両検出判定手法を、状態遷移図として図 3 に示す。

状態 1（スタンバイ）：3.2 の方法で 2 台のセンサにて閾値 th_{both} 回以上連続に物体を検知した際に、状態 2（側面検出）に遷移する。

状態 2（側面検出）：3.3 の方法で車両の前面及び後面の検出判定を行う。前面または後面のどちらかを検出した場合には状態 3（車両検出）に遷移し、ともに非検出の場合は状態 1（スタンバイ）に遷移する。

状態 3（車両検出）：車両の通過を検出したと判定する。ただちに、状態 1（スタンバイ）へ遷移し、次の車両検出判定を行う。

車両検出を判定した際、その走行方向判定は式 (4) に従って行う。

$$direction = \begin{cases} left \rightarrow right & (t_1 < t_2 < t_3 < t_4) \\ right \rightarrow left & (t_2 < t_1 < t_4 < t_3) \\ unknown & (otherwise) \end{cases} \quad (4)$$

4. 簡易型車両検出システム

本節では、3 の車両検出手法を実装した車両カウンタと計測したデータを可視化・活用するための WEB アプリケーション・API を紹介する。

4.1 車両カウンタ

車両カウンタは、簡単な設置のみですぐに車両計測を開始し、遠隔にてリアルタイムにデータを確認することが可能な設計とした。試作したカウンタを図 4 に示す。光学式測距センサは LIDAR-Lite v3 を利用し、マイコンボードである Lazurite Basic 上に実装した。また、省電力化に向け、測距センサ間に赤外線センサ EKMC1603112 を設け、



図 4 車両カウンタ

Fig. 4 Vehicle counter.

赤外線センサにて物体を検知した際に測距センサを起動することとした。計測されたカウントデータは、ゲートウェイ設置が不要な Sigfox による通信にてクラウド上のデータベースへ保管する。Sigfox モジュールには、UnaShield V2S を使用した。電源には乾電池を用い、カウンタ内部には乾電池を格納する電池ボックスを設けた。カウンタケースは、測距センサを可動式の防水ケースに格納することで自由にセンサ間角度を変更可能とし、背面はボールや杭に容易に括り付け可能な構造とした。

4.1.1 消費電流

本カウンタの各状態における消費電流を表 1 に示す。2 台の光学式測距センサは待機時・計測時ともに 200 mA 以上の電流を消費する。そのため、通常時は電源を落とし、代わりに赤外線センサで定期的に移動体の有無を検知する。移動体を検知した際に、光学式測距センサの電源を入れ計測を開始する。また、Sigfox モジュールも数十 mA の電流を消費することから通常時電源を落とし、通信時にのみ駆動させる。

4.1.2 計算リソース

Lazurite Basic 上では、3.5 の車両検出手法を実装した。Lazurite Basic で使用可能な ROM は 64KB, RAM は 6KB であるが、そのうち本手法の実装には ROM を約 16KB, RAM を約 3.4 KB 使用した。また、側面判定および前後判定を用いた車両検出に要する計算時間は約 13 ms となり、交通量の多い道路にて連続して車両を検出する際にも十分短い時間となった。

4.2 駐車場混雑度可視化用アプリケーション・API

データベースへ保管されたカウントデータを駐車場混雑度可視化へと応用するため、WEB アプリケーション及び WEB API を構築した。WEB アプリケーションの画面を図 5 に示す。画面左部では、車両カウンタを設置している施設と地点を地図にて確認できる。また、直近 1 時間のカウントデータから施設の駐車場混雑度をアイコンにて表示する。画面右部では、車両の入出数と駐車台数を 15 分毎・60 分毎のグラフで表示する。また、1 日毎の利用台数もグラフ表示する。

WEB API では、データ解析や他のアプリケーションとの連携を想定し、カウントデータを出力する API を構築し

表 1 車両カウンタの消費電流

Table 1 Consumption current of vehicle counter.

状態	消費電流 [mA]
スリープ	3.71
赤外線センサ計測時	6.72
光学式センサ待機時	221
光学式センサ計測時	245
Sigfox モジュール待機時	15.8
Sigfox モジュール通信時	70.1

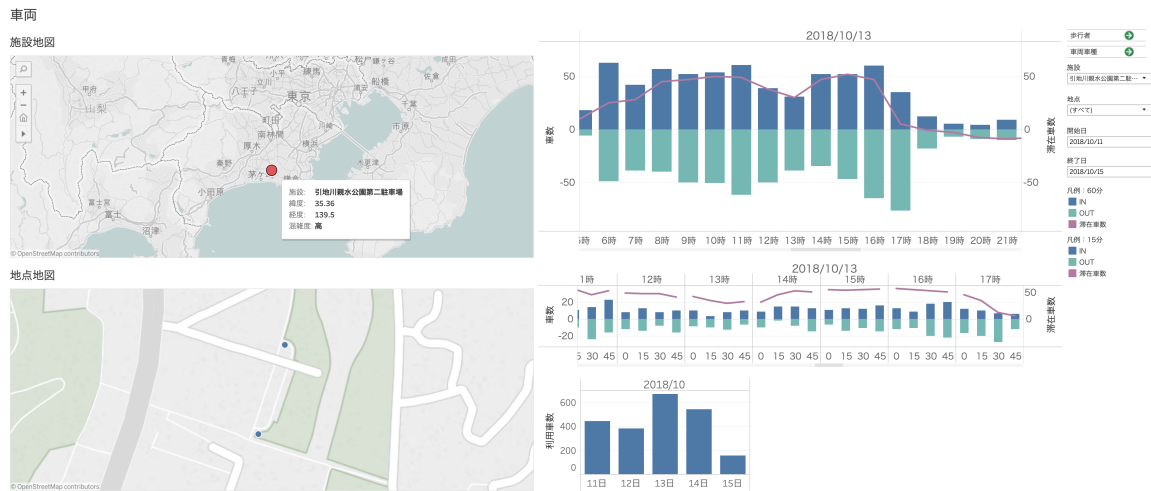


図 5 WEB アプリケーション

Fig. 5 WEB application.

た。デバイス ID やデータ取得時間範囲、施設名などを指定し、該当するカウントデータを JSON 形式と CSV 形式にて出力する。

5. 評価

3 で述べた車両検出手法の精度評価のため、図 6 のように、KDDI 総合研究所の正門から続く道路脇に 4.1 の車両カウンタと撮影用機器を設置した。この場所はカウンタに対して左右方向に、車両、歩行者、自転車、バイクなどが通過する。車両カウンタは、光学式測距センサが地上から 50 cm の高さになるように、道路に向けて垂直方向に設置した。 $L_{min}=340$ cm, $V_{max}=60$ km/h, $T=5$ ms, $H_{max}=570$ cm としたところ、式 (1) より $\theta=16^\circ$ が得られ、センサ間角度を調整した。また、 $W_{min}=140$ cm と設定した。

はじめに、事前実験にて得られた光学式測距センサデータ

から、各パラメータを $th_{detect}=50$ cm, $th_{differ}=100$ cm, $d_{min}=100$ cm, $th_w=5$ cm と設定した。事前試験中にカウンタ前を走行した車両は、映像データから左右方向合わせて 232 台であった。

本実験では、5 日間車両カウンタを設置し、映像データから左右方向合わせて 382 台の車両の通過を確認した。評価には混同行列を用い、車両が通過した際に正しく検出した回数を TP (True Positive)、車両が通過した際に検出できなかった回数を FN (False Negative)、車両の通過がないときに車両検出した回数を FP (False Positive) とする。また、3.2.2 の動的閾値による側面判定と 3.3 の前後面判定の効果を評価するため、「固定閾値による側面判定で車両検出を行う場合」、「動的閾値による側面判定で車両検出を行う場合」、「固定閾値による側面判定と車両前後面判定で車両検出を行う場合」、「動的閾値による側面判定と車両前後面判定で車両検出を行う場合」の 4 ケースで車両検出を行った。固定閾値では $th_{both}=1$ と設定した。

車両検出結果を表 2 に示す。固定閾値による側面判定のみでは FP が 103 であったが、動的閾値による側面判定と前後面判定により誤検出を低減でき、両者を組み合わせることで FP を 1 にまで抑えられ、F 値は 0.997 となった。最終的に 1 回の誤検出が残ったが、これは十数人ほどの人の集団が車両カウンタ前を通過する場合であった。また、4 ケースを通じて FN は 1 であったが、これは車両カウンタの前方を 2 台の車がすれ違う場合であり、カウンタから遠い方の車両はもう一方の車両によりセンサとの見通しがなくなり検出されなかった。

6. おわりに

本稿では、光学式測距センサを用いた簡易型車両検出システムにより、低リソースなマイコンで実装した車両カウンタを路側のポールなどに括りつけるだけで、簡易に車両



図 6 実験環境

Fig. 6 Experiment environment.

表 2 方向を含めた車両検出精度の結果

Table 2 Results of vehicle detection accuracy including direction.

	側面判定（固定閾値）	側面判定（動的閾値）	側面判定（固定閾値） + 前後面判定	側面判定（動的閾値） + 前後面判定
TP	381	381	381	381
FN	1	1	1	1
FP	103	21	12	1
Precision	0.787	0.948	0.969	0.997
Recall	0.997	0.997	0.997	0.997
F 値	0.880	0.972	0.983	0.997

検出ができることを示した。評価では、人や自転車などが通過する環境において、方向を含めた車両検出精度として F 値 0.997 を得た。今後、測距値から算出した車長による車種分類機能やカウントデータの利活用について検討を進めていく。

謝辞 本研究に多大なご協力をいただいた藤沢市様に深く感謝する。

参考文献

- [1] Fietkiewicz, K. J. and Stock, W. G.: How "Smart" Are Japanese Cities? An Empirical Investigation of Infrastructures and Governmental Programs in Tokyo, Yokohama, Osaka, and Kyoto, *2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE, pp. 2345–2354 (2015).
- [2] Kell, J. H., Fullerton, I. J. and Mills, M. K.: Traffic detector handbook, Technical report (1990).
- [3] Coifman, B.: Using dual loop speed traps to identify detector errors, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1683, pp. 47–58 (1999).
- [4] Wang, R., Zhang, L., Xiao, K., Sun, R. and Cui, L.: EasiSee: Real-time vehicle classification and counting via low-cost collaborative sensing, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 414–424 (2014).
- [5] Unzueta, L., Nieto, M., Cortés, A., Barandiaran, J., Otaegui, O. and Sánchez, P.: Adaptive multicue background subtraction for robust vehicle counting and classification, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 527–540 (2012).
- [6] Taghvaeeyan, S. and Rajamani, R.: Portable roadside sensors for vehicle counting, classification, and speed measurement, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 73–83 (2014).
- [7] Wang, Q., Zheng, J., Xu, H., Xu, B. and Chen, R.: Roadside magnetic sensor system for vehicle detection in urban environments, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 5, pp. 1365–1374 (2018).
- [8] Balid, W., Tafish, H. and Refai, H. H.: Intelligent vehicle counting and classification sensor for real-time traffic surveillance, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 6, pp. 1784–1794 (2018).
- [9] Na, Y., Guo, Y., Fu, Q. and Yan, Y.: An acoustic traffic monitoring system: Design and implementation, *2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Auto-nomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom)*, IEEE, pp. 119–126 (2015).
- [10] 石田繁巳, 梶村順平, 内野雅人, 田頭茂明, 福田晃ほか: 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).
- [11] 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).
- [12] Janeczek, A., Valerio, D., Hummel, K. A., Ricciato, F. and Hlavacs, H.: The cellular network as a sensor: From mobile phone data to real-time road traffic monitoring, *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, Vol. 16, No. 5, pp. 2551–2572 (2015).
- [13] 川瀬俊樹, 森川豊: ITS 用車種判別センサの開発, *レーザ研究*, Vol. 29, No. 6, pp. 359–363 (2001).
- [14] Chinrungrueng, J., Sunantachaikul, U. and Triamlumlert, S.: Smart parking: An application of optical wireless sensor network, *2007 International Symposium on Applications and the Internet Workshops*, IEEE, pp. 66–66 (2007).