

修士論文

自転車搭載のスマートフォンから収集した
環境音を用いた走行時安全性情報推定手法

河中 祥吾

2018年3月15日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

河中 祥吾

審査委員：

安本 慶一 教授 (主指導教員)

中村 哲 教授 (副指導教員)

荒川 豊 准教授 (副指導教員)

藤本 まなと 助教 (副指導教員)

自転車搭載のスマートフォンから収集した 環境音を用いた走行時安全性情報推定手法*

河中 祥吾

内容梗概

近年、環境保全や健康増進、観光用途といった観点から自転車利用者が増加している。しかし、我が国においては国土の狭さや複雑な地形が原因で、自転車道や自転車専用道といった自転車が安全に走行できる道路は全道路のうち約 0.3% しか存在しない。多くの場合自転車利用者は車道を走行する必要があり、道路の状況によっては自動車との接触事故のリスクがあり、自転車乗車中の安全性を大きく損なう要因となっている。そのため、安全な経路を選択することが自転車乗車中の安全性の向上のために重要であると言える。しかし、現状安全な経路を選択するために必要となる 道路毎の通過車両数・車種・車両速度・側方距離（自転車と車道を走行する車両との距離）といった走行安全性情報が不足している。また、これらの情報を収集するには大きな時間的・金銭的コストがかかるため、網羅的な情報収集が困難である。

本研究では、上記の問題を解決するために、自転車ユーザが所有するスマートフォンから収集されるセンシングデータを用いたユーザ参加型センシングによる走行安全性情報の収集を試みる。これまでに自転車に取り付けたスマートフォンのみを用いて、車道を走行している車両の検出を行っている研究は我々が調べた限り存在しない。そこで、本研究で取り扱う課題として、課題 1：車両検出のために適切なセンサを明らかにすること、課題 2：検出車両に車種に制限がないこと、課題 3：車両速度や側方距離を含めた走行時安全性情報を検出が可能なこと

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, NAIST-IS-MT1651037, 2018 年 3 月 15 日.

の3点をあげる．まず，課題1を解決するために，スマートフォンに搭載されている地磁気センサ，マイクを用いて走行安全性情報を収集する事前実験を行い，マイクによる環境音が有望であることが突き止めた．次に，課題2および課題3を解決すべく，自転車のハンドルバーに取り付けたスマートフォンから収集される走行音を用いた2種類の接近車両検出手法を提案する．1つ目は，走行中のモノラル環境音に対して周波数解析と機械学習により接近車両を検出する手法，2つ目はスマートフォンに搭載されている上下2つのマイクから収集されるステレオ環境音の到着時間差を利用した接近車両を検出する手法である．

それぞれの提案手法の検出性能を明らかにするために，評価実験を行った．モノラル環境音および機械学習を用いた手法では，接近車両をF値0.97で接近車両を検出できることが分かった．また，ステレオ環境音の到着時間差を利用した手法では，接近方向別に車両数をF値0.80で検出可能であることが分かった．加えて，今回提案した2つの手法を組み合わせることで，走行安全性情報のうち，車種，車両速度の推定可能性を示唆する結果が得られた．

キーワード

自転車，スマートフォン，走行時安全性情報，環境音センシング，音響解析

Cycle Safety Information Estimation Method using Environment Sound Collected from Smartphone Attached to A Bicycle*

Shogo Kawanaka

Abstract

The number of cyclists has increased from the viewpoints of environmental conservation, health promotion, tourism use and so on. However, there are very few roads in which a cyclist can travel safely, due to the small national land and complicated topography of Japan. The cyclist needs to travel on the roadway in many situations. There is a risk of collision with other vehicles because of narrow roads and sometimes the conditions of the road are not adequate for cycling. These factors are major concerns regarding safety during cycling. Therefore, selecting a safe route is important for improving safety during cycling. However, there is a shortage of cycle safety information such as the number of passing vehicles, types of vehicle, vehicle speed and lateral distance (the distance between the bicycle and the vehicle) required for selecting the safe route. It takes significant time and money to collect such information, which makes it difficult to collect exhaustive information.

In this thesis, to solve above mentioned problems, we try to gather cycle safety information by user participatory sensing using sensing data collected from cyclist's smartphones. There are no existing studies that use only smartphones

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651037, March 15, 2018.

attached to bicycles to detect vehicles that are driving on the roadway. Therefore, we present the following three challenges: Challenge 1: Clarification of useful sensors for vehicle detection ; Challenge 2: No restriction on the type of vehicle in the detection target ; Challenge 3 : Detection of cycle safety information including vehicle speed and lateral distance. First, in order to solve the challenge 1, we conducted preliminary experiments to select useful sensors for collecting cycle safety information from sensors mounted on a smartphone and it turned out that using a microphone is suitable. Next, in order to solve the challenges 2 and 3, which are necessary for evaluating the safety of the route, we propose two types of approaching vehicle detection methods using sound collected from the smartphone attached to the handlebar of the bicycle. The first method is to detect approaching vehicles by frequency analysis and machine learning for running monaural environmental sounds, and the second is the arrival of stereo environmental sounds collected from two microphones mounted on the top and bottom of the smartphone. This is a method of detecting an approaching vehicle using the time difference.

We conducted evaluation experiments to clarify the detection performance of each proposed method. In the method using monaural environmental sound and machine learning, it was found that approaching vehicles can be detected with an F-measure of 0.97 for approaching vehicles. Moreover, it was found that with the method using the arrival time difference of the stereo ambient sound, the number of vehicles can be detected with an F-measure of 0.80 for each approaching direction. In addition, by combining the two proposed methods, it is suggested that it is possible to estimate the vehicle type and vehicle speed among the cycle safety information.

Keywords:

Bicycle , Smartphone , Safety cycling information , Environment sound sensing , Acoustic analysis

目 次

1. 序論	1
2. 関連研究	5
2.1 自転車を用いたセンシングに関する既存研究	5
2.1.1 走行状態や環境認識・経験共有に関する研究	5
2.1.2 事故防止のための危険検知・通知に関する研究	7
2.2 走行時安全性情報に関する既存研究	8
2.2.1 磁気センサを用いた車両検出に関する研究	8
2.2.2 マイク・カメラを用いた車両検出に関する研究	8
3. 走行時安全性情報の収集における課題およびセンサの選定	10
3.1 本研究で取り扱う課題	10
3.2 接近車両検出に有用なセンサの選定	11
3.2.1 事前実験概要	12
3.2.2 事前実験結果	14
4. モノラル環境音を用いた接近車両検出手法	17
4.1 提案手法	17
4.2 モデルの評価	18
5. ステレオ環境音を用いた接近車両検出手法	20
5.1 提案手法	20
5.1.1 環境音収集 (STEP1)	22
5.1.2 サウンドマップ描画 (STEP2)	22
5.1.3 接近車両検出 (STEP 3)	24
5.2 実験概要	26
5.3 実験結果	28
6. 結論	31

謝辭	34
參考文獻	36
研究業績	41

図 目 次

1	データ収集に使用した実験コース	12
2	スマートフォンおよび GoPro カメラの配置	13
3	収集した地磁気データの結果	15
4	収集した音圧レベルの結果	15
5	車両接近時のスペクトログラム	16
6	車両非接近時のスペクトログラム	16
7	機械学習により生成された接近車両検出モデル	19
8	スマートフォンのマイク位置の一例 (左 : Nexus 6 , 右 : Xperia XZ1)	21
9	システム構成図	21
10	自動車・スマートフォン・マイクの位置関係	23
11	サウンドマップの一例	24
12	テンプレートマッチングを用いた接近車両検出	25
13	実験で使用した自転車	26
14	ハンドルバー部分の詳細	26
15	ステレオ環境音の収集のために使用した実験ルート	27
16	テンプレートマッチングによる前方接近車両の検出結果の一例 . .	29
17	テンプレートマッチングによる後方接近車両の検出結果の一例 . .	29
18	誤検出および検出漏れが生じたサウンドマップの例	30

表 目 次

1	環境雑音および車両接近の混合行列	19
2	10 分割交差検証による評価結果	19
3	True Positive, False Negative, False Positive, True Negative の回数	30

1. 序論

自転車は、子供から高齢者まで、日々の生活で手軽に利用される交通手段である。地球温暖化などといった環境問題への注目が高まる中、環境への負担が小さい交通手段として見直され、近年の健康志向の高まりや震災時の自転車の活躍とともにその利用が拡大している [1]。さらに近年では、首都圏や観光地を中心に、近距離の移動や観光目的などで手軽に自転車をレンタルできるサイクルシェアリングが普及して始めている [2] [3]。国内サービスとしては、株式会社ドコモ・バイクシェアの docomo bike share¹ を始めとして、OpenStreet 株式会社とソフトバンク株式会社が行っている HELLO CYCLING²がある。2017 年内では、中国発の世界最大乗り捨て型サイクルシェアサービスの Mobike³や同じく中国発で世界で提供されているシェアバイクサービスの ofo⁴が日本参入を果たしたり、メルカリ⁵や LINE⁶といった IT ベンチャー企業がサイクルシェア事業に新規参入を表明するなど、国内でのサイクルシェアの普及が加速しており、今後ますます自転車利用者が増加すると考えられる。しかし、我が国においては、国土の狭さや複雑な地形が原因で、自転車道や自転車専用道といった自転車が安全に走行できる道路は、全道路のうち約 0.3% しか存在しない。現在、日本国内での自転車事故件数は減少傾向にあるものの、交通事故発生件数の内一定割合を自転車乗車中の事故が占めており、今後自転車利用者の急速な増加に伴い、自転車事故の発生件数も増加すると考えられる [4]。これらの状況を踏まえて、日本政府や各自治体も自転車の安全に対する対応を始めている。その一例として 2020 年に開催が予定されている東京オリンピックへ向けた“2020 年の東京”計画があげられる [5]。この計画では、自転車走行空間の整備があげられているが、自転車レーンを新たに整備するには膨大なコストがかかるうえ、大規模な工事を行う必要があることや地形上適応できないこともあるため、我々の生活圏にくまなく適用するのは難しい。そこで、現在の日本においては、安全な経路を選択することが自転車乗車

¹<http://www.d-bikeshare.com/>

²<https://www.hellocycling.jp/>

³<https://mobike.com/jp/>

⁴<http://www.ofo.so/>

⁵<https://merchari.bike/>

⁶<https://linecorp.com/ja/pr/news/ja/2017/1995>

中の安全性の向上のために重要であると言える。現状，安全な経路を選択するために必要となる，道路毎の車両別車両数・車種・車両速度・側方間隔（自転車と車道を走行する車両との距離）といった走行時安全性情報を収集するような方法として，国土交通省がおおむね5年毎に実施されている道路交通センサス（全国道路・交通情勢調査）があげられる。センサスは一時的な交通量を測定するものであり，得られるデータは，主要道路のみが対象となっており，さらに将来の道路設計計画などの用途にのみ利用される。

自転車に関する従来研究として，快適な走行経路を明らかにするためにハンドル操作や路面状況といった走行情報や走行環境を収集し共有するような研究 [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] や，自転車事故防止のための危険検知・通知に関する研究 [15, 16, 17, 18, 19, 20] も行われている。しかし，自転車操作の解析や，路面形状の推定，接近車両の危険度判定を行う研究が主で，走行経路の車道を走行する車両情報を考慮した経路の安全性評価を対象とした研究は非常に少ない。一方で，走行時安全性情報収集に関する関連研究としては，車両接近時に生じる磁界の変化を磁気センサにより検出する研究 [21, 22, 23, 24, 25, 26] と，車両接近をマイクやカメラを用いて検出する研究 [27, 28, 29, 30, 31, 32] があげられる。いずれの研究においても，磁気センサやマイク・カメラといったデバイスを道路に設置する必要があるため，網羅的な情報収集のためには，時間的コストや経済的コストが高い。

本研究では，自転車の安全な経路を選択するため必要となる車両数・車種・車両速度・側方間隔といった走行安全性情報を，自転車利用者が所有するスマートフォンから収集されるセンシングデータを用いたユーザ参加型センシングによる走行時安全性情報収集システムを想定する。その上で，本研究で取り扱う課題として以下の3点をあげる。

課題1：車両検出のために適切なセンサを明らかにすること

これまでに，自転車に取り付けたスマートフォンのみを用いて，車道を走行している車両の検出を行なっている研究は我々が調べてた限り存在しない。そこで，スマートフォンに搭載されているセンサから接近車両検出を検出するために有用なセンサおよび手法を明らかにする必要がある。

課題 2：検出車両に制限がないこと

従来研究では，電気自動車のみ検出可能な手法や，二輪車の検出が不可能な手法など，検出対象が限られているものもある．しかし，正確な車両数を把握するためには，検出車両に制限がない必要がある．また，経路の安全性を考える際に，大型車両との事故時と二輪車との事故時では，致死確率が大きく異ると考えられるため，車種別に検出可能なことが望ましい．

課題 3：車両速度や側方距離を含めた走行時安全性情報を検出が可能なこと

検出した車両の更に詳細な情報として，速度と側方距離（自転車と車両との間隔）があげられる．車両速度も車種と同様に，速度により事故発生時の致死確率に大きく関わるパラメータとなる．また，自転車と車道を走行する車両との間隔である側方距離は，接触事故の発生確率に大きく関わると考えられる要素である．

そこで，課題 1 を解決を目指して，スマートフォンに搭載されているセンサ類から走行時安全性情報の収集に有用なセンサを選定を行う．既存研究を参考に，地磁気センサとマイクを用いて事前実験を行い，その結果，マイクを用いることが適していることが明らかとなった．本論文では，自転車のハンドルバーに取り付けたスマートフォンから収集される走行中の環境音に対して周波数解析と機械学習により接近車両を検出する手法と，スマートフォンに搭載されている上下 2 つのマイクへの環境音の到着時間差を利用した走行時安全性情報を推定する手法を提案する．1 つ目の手法では，スマートフォンから得られたモノラル環境音に対して周波数解析を行うことで得られるスペクトログラムを特徴量とした機械学習により車両接近モデルを作成する．作成した接近車両検出モデルを 10 分割検証交差法を用いてモデル評価を行った所，F 値 0.97 で車両の接近を検出出来ることが明らかとなった．2 つ目の手法では，車両の発する音がスマートフォンの上部と下部に内蔵されている 2 台のマイクに到達するまでに生じる時間差から，サウンドマップを作成し，得られたサウンドマップに対してテンプレートマッチングを行うことで接近車両を検出する．片側 1 車線の道路で実際にステレオ環境音を収集し，サウンドマップを作成し，テンプレートマッチングによる接近車両検出を行った所，F 値 0.80 で接近方向別に接近車両検出が可能であることが分かっ

た．また，自転車と車両との相対速度により得られる S 字カーブの幅が変化することや，車種によりスペクトログラムの特性が異なることが明らかとなり，これらを特徴として用いることで，車両速度および車種を推定することが可能であると示唆される結果が得られた．

本論文の構成は以下の通りである．まず，第 2 章で関連研究を述べる．第 3 章では，第 2 章を踏まえて本研究で取り扱う課題をまとめたうえで，走行時安全性情報の収集に使用するセンサを選定するために行った事前実験を説明する．第 4 章と，第 5 章では今回提案する走行時安全性情報収集手法および実験結果について述べる．第 6 章で結論および今後の課題を述べ本論文をまとめる．

2. 関連研究

本章では、既存の自転車を用いたセンシングに関する既存研究 および 車両数や車両速度など走行時安全性情報の収集に関する既存研究について紹介する。

2.1 自転車を用いたセンシングに関する既存研究

従来の自転車に関する研究は、自転車走行状態や環境を取得・共有するための走行状態認識に関する研究と、自転車事故防止のための危険検知・通知に関する研究の2種に大別できる。それぞれの研究の詳細を以下に述べる。

2.1.1 走行状態や環境認識・経験共有に関する研究

これまで、自転車に様々なセンサを取り付けて自転車の走行状態情報を計測するプローブバイシクルを用いた研究がなされている [6] [7] [8] [12]。土岐ら [6] は、三軸加速度センサやサイクルコンピュータ、ビデオカメラを自転車に取り付け、速度や振動など走行状況を計測し、自転車利用空間の快適性を効率的な評価方法の提案を行っている。また、Eisenman ら [7] は、自転車に加速度センサや地磁気センサ、温度センサを始めとした8種類のセンサや通信モジュールを取り付け、速度や移動距離、道路の傾き、消費カロリー、CO₂ 濃度などを取得し、モバイル端末や環境に取り付けたアクセスポイントを介して、リアルタイムかつ遅延なくデータをアップロードする BikeNet というシステムを提案している。得られたデータは、Web ポータルサイトから閲覧・共有可能となっている。山中ら [8] の研究では、三軸加速度センサなどに加えて騒音センサやレーザ距離センサを取り付け、自転車を追い越して行く自動車の速度や自転車との間隔などの交通情報を収集し、経路に対する安全感を評価するモデルを開発している。Takahashi ら [12] の研究においては、詳細な自転車の制御挙動解析の二次元視覚化モデル生成に、ロータリーエンコーダやフォトランジスタ、ひずみセンサを用いて実現している。プローブバイシクルを用いた場合、多数のセンサを自転車や運転者、環境に設置することで、走行状態や環境情報など様々な情報を詳細に収集することが可能となって

いる．しかし，多数のセンサを取り付けた自転車は一般普及性に問題があり，日常的に利用することは難しく，適用範囲や収集できる情報量が限られてしまう．

近年では，多数のセンサや GPS，通信モジュールを搭載したスマートフォンの普及に伴い，スマートフォンを用いた走行状態認識に関する研究も行われている [9, 10, 13, 14]．斉藤ら [9] は，スマートフォンを利用した参加型センシングによる自転車走行状態収集・共有機構 sBike を提案している．本提案では，自転車にスマートフォンを取り付けるだけでよく，スマートフォンから得られる三軸地磁気センサと三軸加速度センサの値に統計的認識手法を用いて解析することで走行状態の認識を行っている．また，システムで得られた走行状態の情報は，Web 上で確認でき，人混みや障害物により蛇行走行の多い道や，停止時間の多い交差点などの情報を直感的に取得ができる．小花ら [10] は，路面状況の調査を低コストかつ網羅的に行うために，自転車利用者のポケットに入れたスマートフォンを用いた一般利用者向けの路面調査手法を提案している．実環境において実験を行ったところ，3 種類の異常箇所を 70% 程度の精度で検出可能という結果が出ている．Kato ら [13] の研究では，前項で紹介した高橋ら [12] が提案している可視化手法をスマートフォンの三軸加速度センサ，三軸ジャイロセンサ，三軸地磁気センサを用いることで同等の結果が得られることを明らかにしている．

Zhao ら [14] の研究においては，スマートフォンと組み込みシステムを組み合わせた IoT システムに基づく自転車を用いた経路情報収集システムを提案している．本システムでは，「スマートフォンベースイベントデータレコーダ」と「自転車ベースのリアルタイム情報フィードバックシステム」の 2 部で構成されている．これらを組み合わせることで，サイクリング中の加減速，方向変更といった操作情報や総走行距離や総カロリー，勾配変化，危険経路といったサイクリング経路に関する情報をリアルタイムに提示，共有可能なシステムを実現している．

スマートフォンを用いることで，プローブバイシクルと比較すると収集可能な情報にある程度制限が生じてしまうが，現在スマートフォンの一般普及率が 70% を越えていることから，一般の自転車利用者も比較的容易にセンシングに参加可能なことが想定でき，網羅的に情報を収集可能であると考えられる．

2.1.2 事故防止のための危険検知・通知に関する研究

自転車事故防止を目的とした研究においても，センサ等を自転車に取り付けたプローブバイシクルを用いた研究が行われている [16] [17]．Stephen ら [16] は，サドルにカメラを取り付け，得られる映像に対して画像処理を施すことで接近車両の自動検出と危険度判定が可能な Cyber-Physical Bike を提案している．本提案では，後方を監視しているカメラから得られる映像に対してリアルタイムに画像処理技術を適用することで，接近する車両の自動検出および接近車両の危険度判定を行い，危険な接近に対してはユーザに危険通知を行うことが可能となっている．また，下山ら [17] は，自転車の走行状態に加えて天候や周囲の明るさといった走行環境も自転車事故の発生原因となり得ると考え，プローブバイシクルを用いて走行状態・走行環境を推定し，必要に応じて運転者や周囲に危険運転を警告する自転車事故防止システムを提案している．スマートフォンを用いた研究としては，吉田ら [18] が，歩行者と自転車との事故防止のために，歩行者と自転車利用者双方が専用のアプリケーションをインストールしたスマートフォンを所持していることを前提に，スマートフォンの GPS から得られる位置情報から衝突可能性を算出し，衝突の危険性を検出した場合はバイブレーションによる通知を行う手法を提案している．また，Weixi ら [20] は，スマートフォンの三軸加速度センサおよび三軸ジャイロセンサを用いて危険運転を検出した際には，ユーザへ通知を行うような自転車操作モニタリングシステム BikeSafe を提案している．本提案では，通常の運転と危険運転となる立ち漕運転および，蛇行運転を約 90% の精度で識別することが可能となっている．更に，Theodoros ら [19] は，信号機の制御が動的に可能なスマートシティにおいて，自転車利用者のスマートフォンを利用して進行方向の信号機を青信号へ変化させ，自転車利用者が効率的かつ安全に走行可能なシステムを提案している．

2.2 走行時安全性情報に関する既存研究

走行時安全性情報を収集するための従来研究として、車両接近時に生じる磁界の変化を磁気センサにより検出する研究 [21, 22, 23, 24, 25, 26] と、車両接近をマイクやカメラを用いて検出する研究 [27, 28, 29, 30, 31, 32] に大きく分類できる。それぞれの研究の詳細を以下に述べる。

2.2.1 磁気センサを用いた車両検出に関する研究

Caruso ら [21] の報告では、磁気センサを用いた車両検出や経路ナビゲーションに関するシステムがまとめられている。ここで、地中に埋められた磁気センサの上方を車両が走行した際に、車両の有無や、走行方向、車両の種類によって特徴的な値が得られることが報告されている。また、He ら [22] の研究では、磁気センサの変化からより正確な車種判別を行うために、機械学習を用いている。4 種類の手法を比較した所、PSO-C-SVM を用いることで 99% 以上の精度で判別可能なことが明らかとなっている。Koszteczky ら [24] は、磁気センサを道路に埋め込むことなく車両検出と、速度推定を可能にしている。Markevicius ら [26] は、2 つの磁気センサを一定の距離を離して配置し、車両接近時に得られる磁気変化の位相相関を用いることで高精度に車両速度を推定する手法が提案されている。結果として、磁気センサを 2m 離して配置することで平均誤差 1.5% で車両速度を推定可能であることが報告されている。

2.2.2 マイク・カメラを用いた車両検出に関する研究

マイクやカメラを用いた車両検出システムもこれまでに多数行われており、Chellappa ら [27] は、音響データから接近車両の目標到来方向を概算し、ビデオデータに目標位置を与えることで車両の追跡するような、音響および視覚追跡装置の異なる特性に基づいて車両検出および追跡するための融合手法が提案されている。また、George らや Takagi ら [29] [30] の手法では、音響データに対して機械学習を用いて車両の接近を検出する手法が提案されている。これらの手法では、車両接近時の音響データにフーリエ変換を施し得られるスペクトログラムから特徴量

を抽出し，機械学習を用いて車両検出モデルを作成している．一方で，Severdaksら [28] や Zu ら [31], 石田ら [32] は，複数のマイクロフォンを一定間隔毎に配置したマイクロフォン・アレイを用いた交通情報収集手法が報告している．これらの手法では，マイクロフォン・アレイを道路側方に設置し，受信した車両走行音の時間差を示すサウンドマップをサウンドマップ上の軌跡を解析することで交通状態を収集している．

3. 走行時安全性情報の収集における課題およびセンサの選定

本章では、2章で述べた既存研究の課題についてまとめたうえで、それらを解決するため本研究で取り扱う課題について述べる。その後、設定した課題の実現可能性を明らかにするために行った事前実験について述べる。

3.1 本研究で取り扱う課題

既存の自転車を用いたセンシングに関する研究でも、スマートフォン等を用いたユーザ参加型センシングを志向した研究はいくつか報告されている。しかし、それらは主に、走行中の加減速やハンドル操作、路面状況といった経路情報の収集のみで、車道を走行する他車両を検出対象とした経路安全性に関する研究は非常に少ない。その中で、車道を走行する車両を検出対象とした研究においては、カメラやマイク、加速度センサを始めとしたセンサ類を自転車に取り付けたプローブバイクを用いるものである。プローブバイクは一般的に普及することは難しいと考えられ、網羅的な情報収集のためには問題が残る。

次に、従来の車両数を始めとした走行時安全性情報を収集する研究では、磁気センサや音響センサを用いた手法が取られている。これらは、道路の中にセンサを埋め込んだり、道路の側道や高所に設置したりする必要がある。そのため、現状実用化されているものは主要幹線道路のみで、普段自転車が走行するような一般道路には普及しておらず、網羅性に問題が残る。また、電気自動車のみ検出可能な手法や、二輪車の検出が不可能な手法など、検出対象が限られているものもある。

以上の問題点を踏まえて、本研究では、自転車の安全な経路を選択するために必要となる 車両数・車種・車両速度・側方間隔 といった走行時安全性情報を、自転車利用者が所有するスマートフォンから収集されるセンシングデータを用いたユーザ参加型センシングにより網羅的に収集することを想定する。その上で、本研究で取り扱う課題として以下の3点をあげる。

課題 1：車両検出のために適切なセンサを明らかにすること

これまでに、自転車に取り付けたスマートフォンのみを用いて、車道を走行している車両の検出を行なっている研究は我々が調べた限り存在しない。そこで、スマートフォンに搭載されているセンサから接近車両検出を検出するために有用なセンサおよび手法を明らかにする必要がある。

課題 2：検出車両の車種に制限がないこと

従来研究では、電気自動車のみ検出可能な手法や、二輪車の検出が不可能な手法など、検出対象が限られているものもある。しかし、正確な車両数を把握するためには、検出車両に制限がない必要がある。また、経路の安全性を考える際に、大型車両との事故時と二輪車との事故時では、致死確率が大幅に考えられるため、車種別に検出可能なことが望ましい。

課題 3：車両速度や側方距離を含めた走行時安全性情報を検出が可能なこと

検出した車両の更に詳細な情報として、速度と側方距離（自転車と車両との間隔）があげられる。車両速度も車種と同様に、速度により事故発生時の致死確率に大きく関わるパラメータとなる。また、自転車と車道を走行する車両との間隔である側方距離は、接触事故の発生確率に大きく関わりと考えられる要素である。

3.2 接近車両検出に有用なセンサの選定

本節では、課題 1 を解決するために、自転車に搭載したスマートフォンを用いて車両接近を検出するために用いるセンサの選定を行う。関連研究において述べたように、車両検出を行うためにカメラ、赤外線、超音波、地磁気、マイクロフォンといったセンサが用いられている。これらの中で、スマートフォンに搭載されているセンサとして、カメラ、地磁気、赤外線、マイクロフォンがあげられる。しかし、カメラは自転車乗車中、常時後方を録画し続ける必要があるうえ、自転車後方部に取り付けることは容易でない。また、スマートフォンに搭載されている赤外線センサは数センチ程度の至近距離の測定しかできず、分解能がとても低い。そのため車両接近を検出するには不適である。以上の制約条件から本研究では地磁気



図 1 データ収集に使用した実験コース

およびマイクロフォンに対象を絞りそれらのセンサを用いて車両検知が可能かを
確認するため事前実験を行った。

3.2.1 事前実験概要

スマートフォンに搭載された地磁気センサおよびマイクロフォンを用いて車両
検知が可能か確認するため，スマートフォンを自転車にマウントを用いて取り付
け 図 1 に示す片側一車線の直線コースを走行し計測を行った．スマートフォン
には，Nexus 6（モトローラ社製，XT1100，Android 6.0）を用い，センサデータ
取得アプリケーションにてデータを収集した．この時，地磁気データはサンプリ
ング周波数 10 Hz でデータを取得し，音響データの録音形式は，サンプリング
周波数 16.0 kHz，16bit リニア PCM とした．また，車両の通過やその他走行中の
変化を確認するために，同時に GoPro カメラを取り付けて走行中の動画を撮影し
た．図 2 にスマートフォンおよび GoPro カメラの配置を示す．なお，自転車はサ
スペンションなどがない一般的な自転車を使用した．

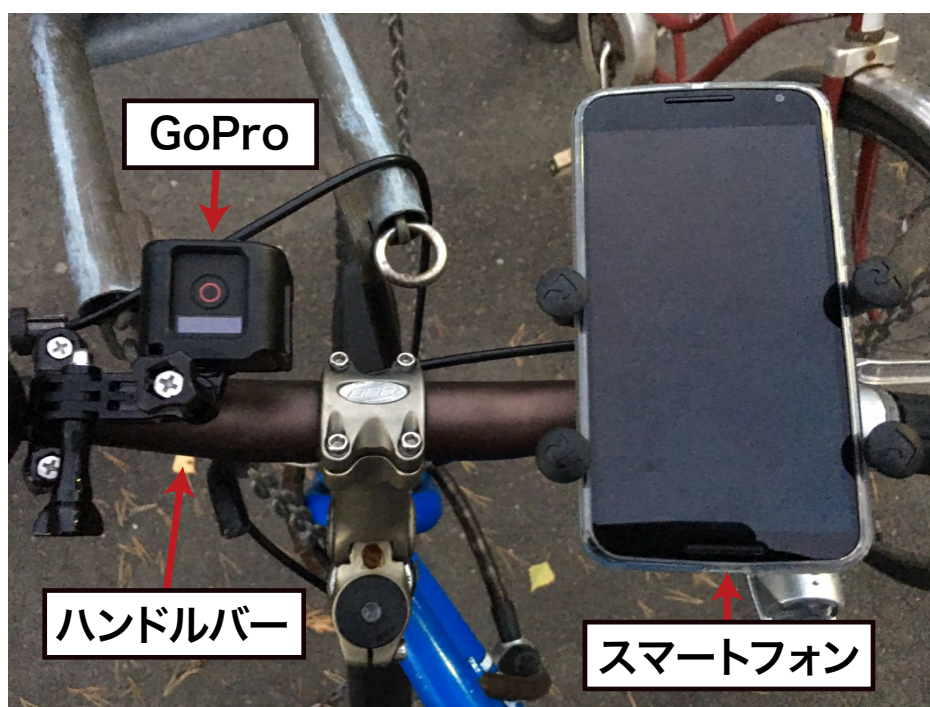


図 2 スマートフォンおよび GoPro カメラの配置

3.2.2 事前実験結果

図3に収集した地磁気データの結果を示す．図中赤色背景で示す箇所が車両接近期間を表している．図から見てわかるように，車両接近時に変化をしている箇所も見られるが，車両接近時以外にも大きく変化している部分が見られる．この結果は，車両通過による地磁気の揺らぎ以上に自転車走行中の障害物を回避する行動やハンドル操作の揺れによる変化が上回っている事に起因すると考えられる．

図4に次に，収集した音圧レベルの結果を示す．こちらも同様に図中赤色背景で示す箇所が車両接近期間を表しており，車両接近時以外にも大きく変化している部分が見られる．この結果は，スマートフォンのマイクロフォンには特に風切り音対策をしておらず，自転車走行時に発生する風切り音の影響を受けているものだと考えられる．

最後に，図5および図6に収集した音響データをフーリエ変換し，得たスペクトログラムを示す．図5は車両接近時を図6はそれ以外の時のスペクトログラムを示している．図5では図6と比べて常時2000 Hz以下のスペクトルが強くなっており，更に最接近時である2.0秒周辺では8000 Hz程度までスペクトルが強く出ていることが見て取れる．

これらの結果から，車両接近検出には音響データの解析を行うことが有用であるということがわかった．そこで，本研究では，自転車に取り付けたスマートフォンに搭載されている1つのマイクから収集されるモノラル環境音に対して周波数解析により接近車両を検出する手法と，2つのマイクへの到着時間差を利用した道路環境情報収集手法の2種類の手法を提案する．

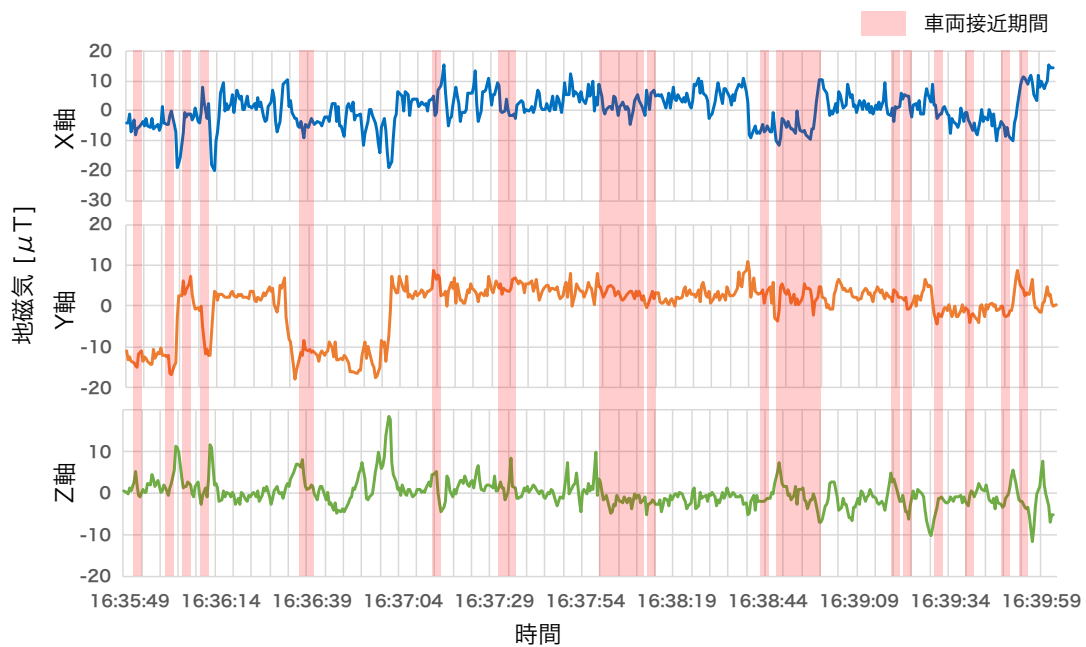


図 3 収集した地磁気データの結果

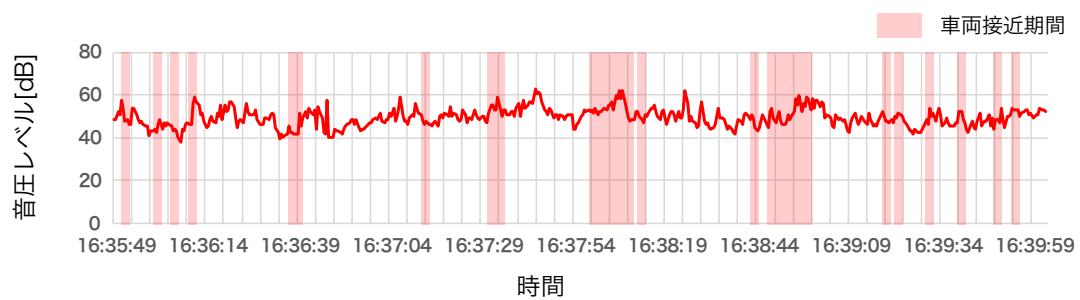


図 4 収集した音圧レベルの結果

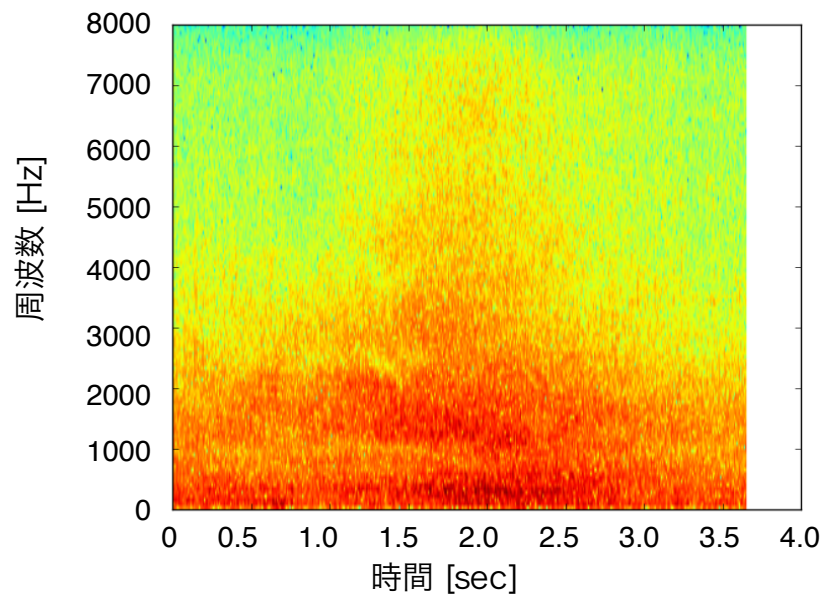


図 5 車両接近時のスペクトログラム

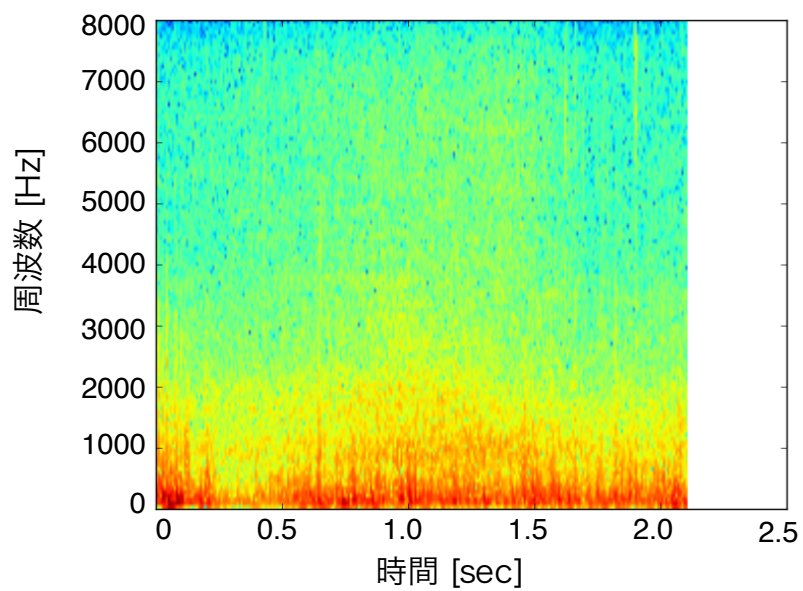


図 6 車両非接近時のスペクトログラム

4. モノラル環境音を用いた接近車両検出手法

本章では，スマートフォンから収集されたモノラル環境音を用いた接近車両検出手法およびその評価結果について述べる．

4.1 提案手法

本提案手法では，スマートフォンから収集されたモノラル環境音に対して，フーリエ変換を施し得られるスペクトログラムから特徴量を抽出し，機械学習により車両接近モデルを作成し，車両の接近を検出する．機械学習の適用過程は，(1) 学習に使用するデータの収集 (2) トレーニングデータの作成 (3) 取得データの特徴量抽出 (4) 接近車両検出モデルの構築，の4つの過程から構成される．以下にそれぞれの過程について述べる．

(1) 学習に使用するデータの取得

機械学習を行うにあたって，まず学習データが必要となる．そこで，学習に使用する音響データの収集を行った．収集方法および録音形式は3.2節で述べた実験方法と同様で，自転車のハンドルバーにスマートフォンとGoProカメラを取り付けてデータ収集を行い，図1に示す実験コースを6往復し，合計34分17秒の音響データを取得した．この時，合計158回車両とのすれ違いが発生した．

(2) トレーニングデータの作成

次に，あらかじめどの周波数特性が車両接近に対応するかのラベルがついたトレーニングデータが必要となる．グランドトゥールースとして撮影していたビデオを照合しつつ，一連の音響データを一つ一つ手作業で車両接近中とそれ以外の部分へ分割し，それぞれ車両接近 (car) と環境雑音 (noise) のラベルリングを行った．

(3) 取得データの特徴量抽出

取得したデータより，近接車両を検出するための特徴量を抽出する．手順として，まずセンサから得られたデータを一定の時間間隔 (以降 Time window

と呼ぶ) に分割する．次に，各 Time window 区間ごとのデータから特徴量を抽出する．本研究では経験的に Time window の大きさを 0.5 秒 (8000 サンプルごと) に設定する．特徴量については，FFT を用いて得られた 20 ～ 8000 Hz 周波数スペクトル強度を 1.0 Hz ごとに分割したものを特徴量として用いる．

(4) 接近車両検出モデルの構築

ラベル付けした音響データの周波数特徴量をトレーニングデータとする機械学習モデルを構築する．分類器の構築にはデータマイニングツールである Weka を用いた．Weka は多数の機械学習アルゴリズムに基づく分類器を実装しており，本研究では，スマートフォンアプリケーションへの実装を簡単化するために浅い階層の二分木を作成する REPTree を用いて接近車両検出モデルを構築した．この時，学習データは合計 1072 サンプルであった．図 7 に学習を行った結果作成された分類器を示す．

4.2 モデルの評価

学習データ全てを用いて 10 分割交差検証を行い，検出性能を評価した．表 1，表 2 にそれぞれ結果を示す．適合率 (Precision) は，車両接近音または環境雑音であると認識されたデータのうち，実際にその音であった正しいデータの割合である．再現率 (Recall) は該当する音のうち，その接近状況であると正しく認識されたデータの割合である．F 値は，適合率と再現率の調和平均であり，次式で表される．

$$F_{value} = \frac{2 \cdot Recall \cdot Precision}{Recall + Precision} \quad (1)$$

結果，平均 F 値が 0.97 と高精度で車両接近を識別できた．

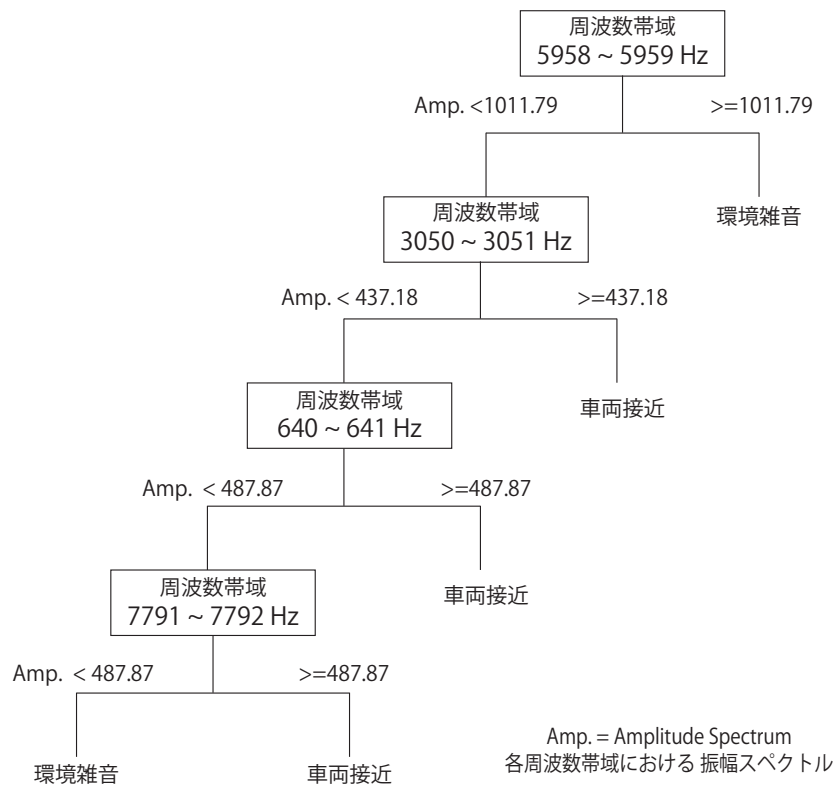


図 7 機械学習により生成された接近車両検出モデル

表 1 環境雑音および車両接近の混合行列

	環境雑音	車両接近
環境雑音	353	23
車両接近	5	691

表 2 10 分割交差検証による評価結果

状態	適合率	再現率	F 値
環境雑音	0.98	0.94	0.96
車両接近	0.97	0.99	0.98
平均	0.97	0.97	0.97

5. ステレオ環境音を用いた接近車両検出手法

本章では，スマートフォンから収集されたステレオ環境音を用いた接近車両検出手法およびその評価結果について述べる．

5.1 提案手法

提案手法では，スマートフォンに搭載されている2つのマイクから収集されるステレオ環境音の到達時間差を利用して車両を検出する。近年発売されているスマートフォンは，録音音質向上や音声認識精度向上のため，2つ以上のマイクが搭載されており，ステレオ録音も可能となっている．これらのマイクは，図8に一例として示すように，端末本体の上部と下部にそれぞれ配置されている．

図9に提案手法の一連の処理フローを示す．本提案手法では，以下の3ステップから構成される：1）環境音収集，2）サウンドマップ描画，3）接近車両検出．環境音収集ステップでは，地面に対して平行かつ自転車のハンドルバーに対して垂直にスマートフォンを固定し，2台の内蔵マイクから走行中のステレオ環境音を収集する．次に，サウンドマップ描画ステップでは，収集した環境音にLow-pass Filter（LPF）を適用することで走行音以外の環境雑音を削減する．その後，2台のマイクが受信した走行音の相互相関を計算することで，それぞれのマイクに到達するまでの時間差を求め，サウンドマップを描画する．最後に，描画されたサウンドマップに画像マッチング処理を行うことで，走行中にすれ違った車両の検出を行う，

次項より，各ステップの詳細を述べる．



図 8 スマートフォンのマイク位置の一例（左：Nexus 6，右：Xperia XZ1）

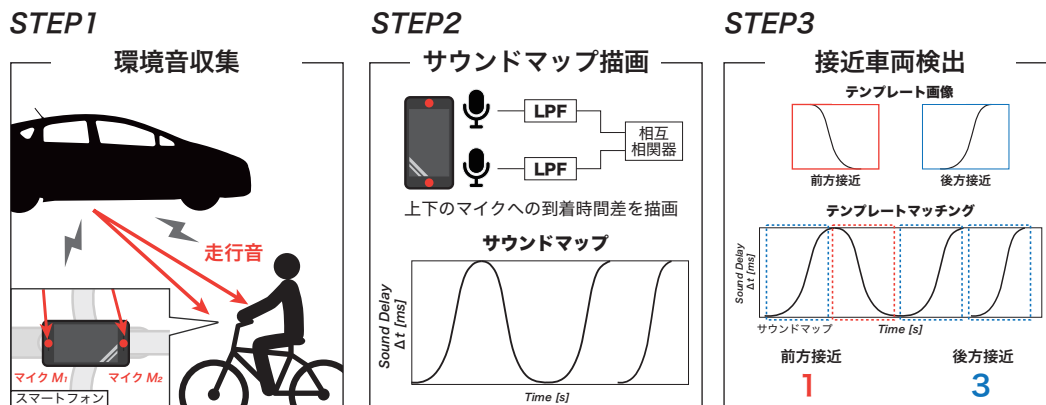


図 9 システム構成図

5.1.1 環境音収集 (STEP1)

本ステップでは、自転車のハンドルバーに対して垂直にスマートフォンを固定し、2台のスマートフォン内蔵マイクから走行中のステレオ環境音を収集する。図10に、本手法の想定環境における自動車・自転車・スマートフォン・マイクの位置関係を示す。図中、 M_1 と M_2 は、スマートフォンに搭載されている上部のマイクと下部のマイクをそれぞれ示し、マイク間距離を D 、自転車・道路間の距離を L で示している。図10において $x = \pm\infty$ のとき、 M_1, M_2 それぞれのマイクへ到達する走行音の時間差が最大となる。その最大値 Δt_{max} は音速 c として式(2)で表される。

$$\pm\Delta t_{max} = \pm\frac{D}{c} \quad (2)$$

ここで、マイク間距離 D は、端末の大きさにより個体差はあるが、概ね 130 mm ~ 160 mm となっており、使用する端末により決定される。

自転車・道路間の距離 L は、増加するとサウンドマップ上での変化が大きくなり、車両検出精度を向上できる。しかし、 L を増加させると観測可能な範囲が広くなり、走行音以外のノイズの影響も大きくなるため、精度が低下する。したがって、物理的制約を考慮して L を決定する必要がある。

5.1.2 サウンドマップ描画 (STEP2)

サウンドマップは、一定の間隔をとって配置した2台のマイクが受信した走行音の到達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10に示すように、スマートフォンの上部マイク M_1 と、下部マイク M_2 は、間隔 D だけ離れており、道路から L だけ離れた所に設置されている。車道を走行する車両が発した音は、それぞれのマイクへ異なった経路で到達する。走行車両の位置を x とすると、車両と各マイクの距離 d_1 および d_2 は、式(3)と式(4)で表される。

$$d_1 = \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \quad (3)$$

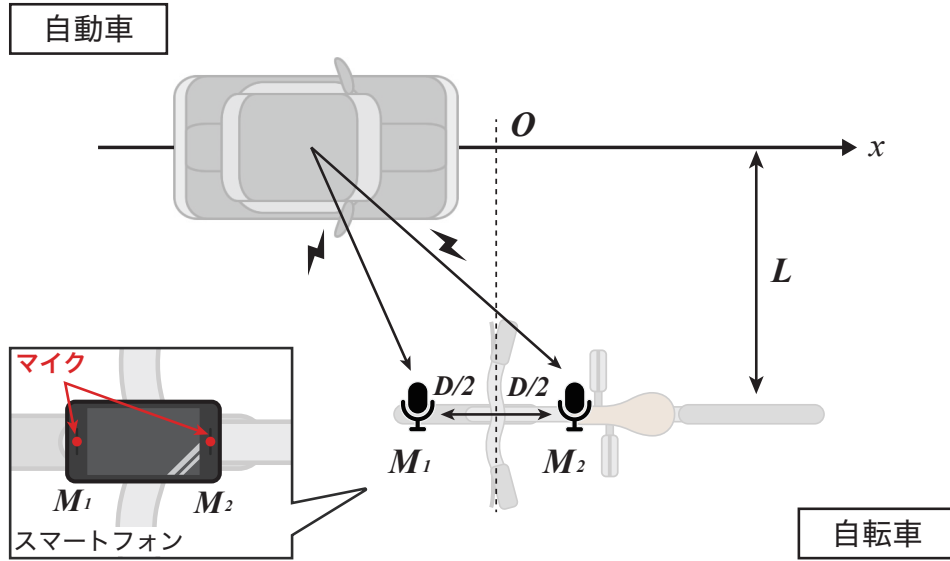


図 10 自動車・スマートフォン・マイクの位置関係

$$d_2 = \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \quad (4)$$

したがって、2 台のマイクにおける走行音の到達時間差 Δt は、音速を c として式 (5) で表される。

$$\Delta t = \frac{d_1 - d_2}{c} = \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + L^2} \right\} \quad (5)$$

式 (5) を用いることで、音源である車両の位置を走行音の到達時間差から求められる。音の到着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。

$$R(t) = \int s_1(\tau) s_2(t + \tau) d\tau \quad (6)$$

2 台のマイクが時間差 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。この時、 $R(t)$ 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 を求められる。

本提案では、2 台のマイクへの環境音の到達時間差を、音源定位の分野におい

て一般に利用される 一般化相互相関 (GCC : Generalized Cross-Correlation) を用いて求める [33] . 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 11 にサウンドマップの一例を示す . 車両の接近とともに音の到達時間差 Δt が変化し , S 字カーブを描いていることが分かる . S 時カーブの向きは , 車両の進行方向によって定まる .

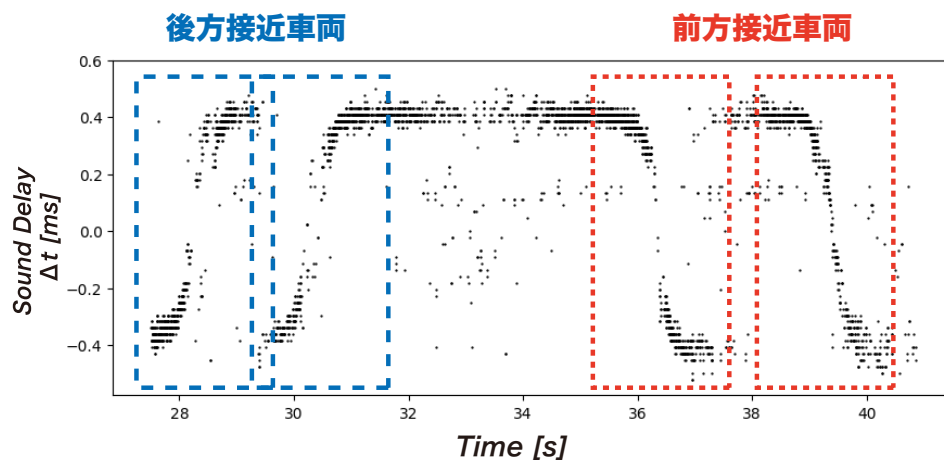


図 11 サウンドマップの一例

5.1.3 接近車両検出 (STEP 3)

本提案手法では , テンプレートマッチングにより前ステップで得られたサウンドマップ上で車両を検出する . テンプレートマッチングは , テンプレート画像を入力画像で走査させ , 入力画像上の各位置における類似度を算出し , 最大もしくは , 閾値以上の類似度をとる位置を検出する手法である . 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画像が必要となる . 実環境で収集した車両走行音データから 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画像を用意し , 各方向でそれぞれテンプレートマッチングを行う . そ

の結果，それぞれにおいて設定した閾値以上の類似度をとった回数を数えることで，前方からの接近車両，後方からの接近車両の台数を推定可能となる．図 12 にテンプレートマッチングを用いた接近車両検出方法を示す．

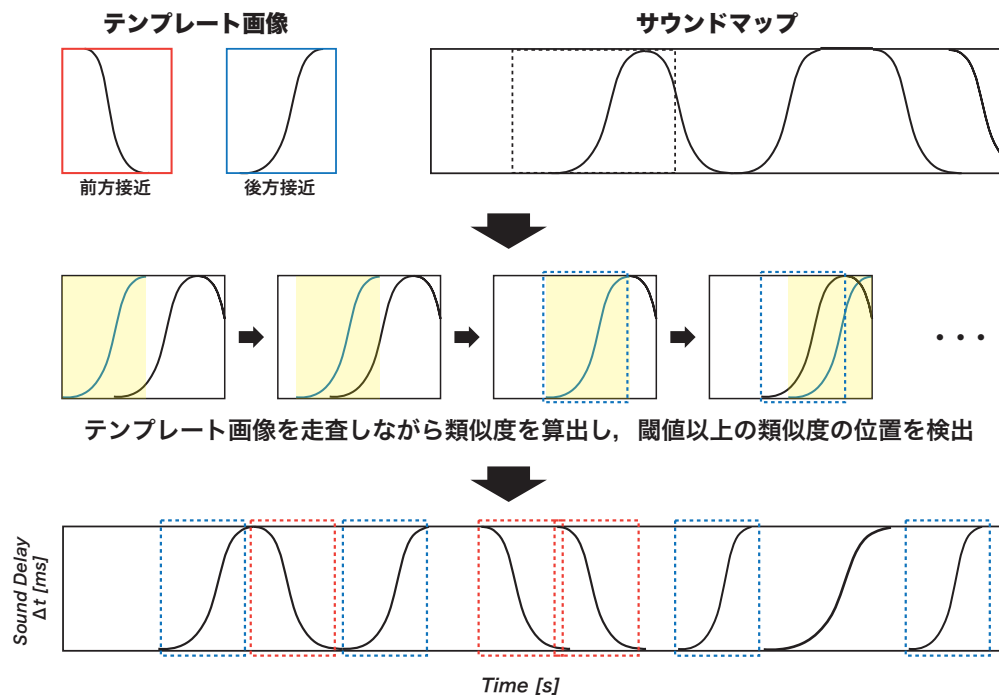


図 12 テンプレートマッチングを用いた接近車両検出

5.2 実験概要

ステレオ環境音を用いた車両検出手法の検出性能評価を行うため，評価実験を行った．図 13 に実験で使用した自転車を，図 14 にスマートフォンおよびカメラを取り付けたハンドルバー部分の詳細を示す．本実験では，シティサイクル用自転車を使用し，スマートフォンには，Nexus 6（モトローラ社製，XT1100，Android 6.0）を使用した．ここで，録音時の風切り音防止用としてスマートフォンを麻布で覆っている．録音アプリケーションとして，Sony 社が配信している音声レコーダー⁷を使用し，サンプリング周波数 44.1 kHz，16bit 長のステレオデータとして録音した．また，録音と同時に走行中の様子をカメラ（Sony 社製，HDR-MV1）で撮影し，この映像をグランドトゥールースとして利用した．

図 15 に実験で使用したコースを示す．実験に使用した道路は，歩道のない片側 1 車線の道路で，道路の中心から 2m（道路・マイク間距離 $L = 2$ ）を目安として左車線を走行し，環境音の収集をした．マイク間距離 D は，今回使用した Nexus6 の場合 15cm であった．これらの値を用いて録音した走行音を元にサウンドマップを描き，テンプレートマッチングを用いた接近車両検出手法を適用して車両を検出した．



図 13 実験で使用した自転車

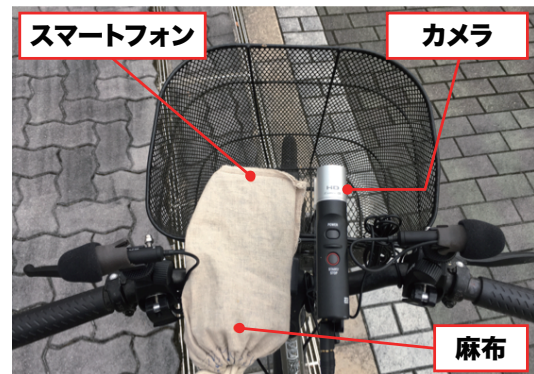


図 14 ハンドルバー部分の詳細

⁷<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sonymobile.androidapp.audiorecorder&hl=ja>



図 15 ステレオ環境音の収集のために使用した実験ルート

検出結果をカメラ映像と比較し，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，それぞれ接近車両がある時に車両を検出した時，接近車両がある時に車両を検出なかった時，接近車両がない時に車両を検出した時，接近車両がない時に車両を検出なかった時である．TN の回数は，車両の接近と接近の間の状態を非検出状態として回数を数えた．前方からの接近と後方からの接近の個別の検出結果とそれらを加算した合計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)，適合率 (Precision)，再現率 (Recall)，F 値 (F-measure) を算出した．正確度は，判定結果全体の内答えが正しかった割合を示し，適合率は車両接近を検出したデータのうち実際に車両接近であった割合を示す．また，再現率はすれ違った車両のうち車両であると判定された割合を示す．F 値は適合率と再現率の調和平均であり，総合的な評価を表す指標である．

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

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

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

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

5.3 実験結果

図 16 に、テンプレートマッチングによる前方接近車両の検出結果の一例を、図 17 に、後方接近車両の検出結果の一例を示す。また、表 3 に TP, FN, FP, TN の回数を示す。この結果から、正確度、適合率率、再現率、F 値はそれぞれ 0.83, 0.90, 0.72, 0.80 となった。

車両検出精度は 0.90 と高精度で接近車両の数量および方向が検出可能であることが明らかとなった。4 章で述べたモノラル環境音と機械学習を用いた車両検出手法の F 値は 0.97 であったため、今回の結果のほうが F 値が 0.17 低くなる結果となった。しかし、本手法では車両の接近方向も識別することが可能である。車両の接近方向は経路の安全性を考慮する際に必要となる情報であり、本手法の非常に優位な点であるといえる。

次に、今後検出精度の向上を目指すため、誤検出 (FP) や検出漏れ (FN) となった原因を考察する。図 18 に、誤検出および検出漏れが生じたサウンドマップの例を示す。

まず (a) は車両が同一方向に短時間に連続で通過したことにより誤検出が生じた例である。次に (b) ~ (d) は検出漏れの例である。(b) は、自転車と接近車両との相対速度の差の影響により検出漏れが発生した例である。自転車と接近車両との相対速度の変化により S 字カーブの傾きおよび幅が変化する特性がある。今回の場合においては、テンプレート画像より対象のサウンドマップの方が

緩やかな変化が見られるため，相対速度差が大幅に小さい状態で自転車と接近車両がすれ違ったためであると考えられる．(c) は，雑音の影響により相関が低くなり，検出漏れが生じた例である．雑音としては，風切り音を始めとした環境雑音と，蛇行走行のような自転車のハンドル操作による雑音が考えられる．また，前方からの車両接近が短時間で連続的に発生した場合は，自転車との相対速度が大きいことから車両接近周期が非常に短くなり，満足な S 字カーブが得られなくなり，検出漏れが生じてしまうと考えられる．最後に，(d) は前後両方から同時に車両が通過した事により検出漏れが生じた例である．サウンドマップを描く上で，GCC は最大になる点を取得しているため，前後同時に車両が通過する場合も各時刻において 1 台の車両の軌跡しかサウンドマップ上に描かれず，波形が薄くなってしまう．

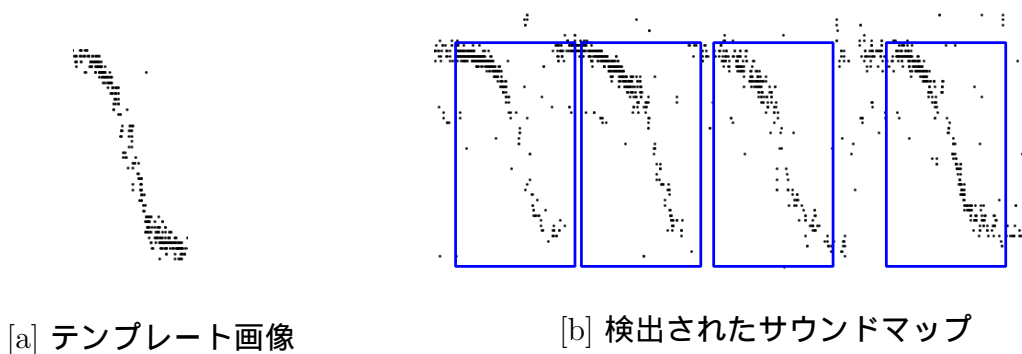


図 16 テンプレートマッチングによる前方接近車両の検出結果の一例

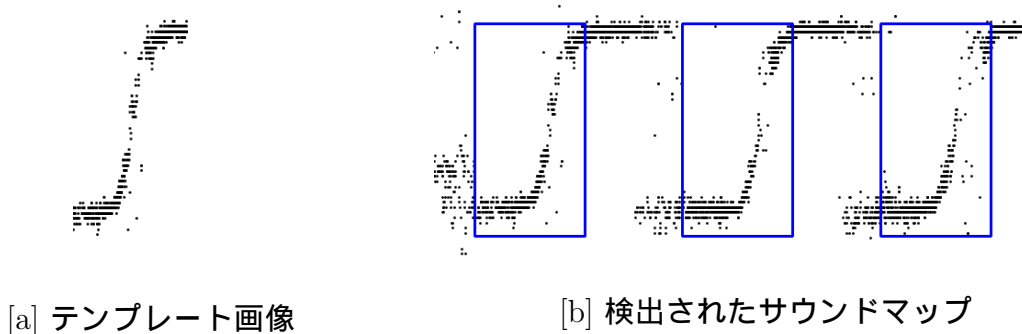


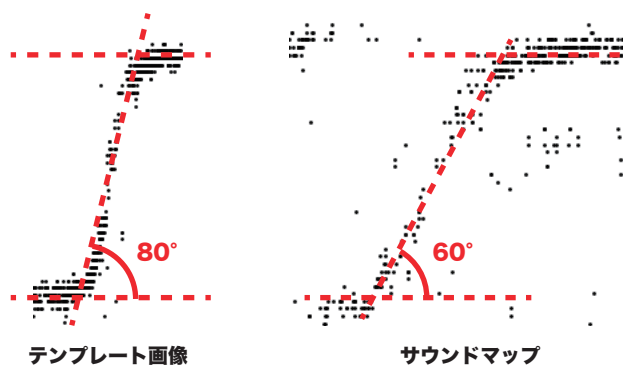
図 17 テンプレートマッチングによる後方接近車両の検出結果の一例

表 3 True Positive, False Negative, False Positive, True Negative の回数

	True Positive	False Negative	False Positive	True Negative
前方接近	30	13	2	—
後方接近	14	4	3	—
合計	44	17	5	67



(a) 車両が連続で通過した場合



(b) 車両速度の影響を受けた場合



(c) 雑音により相関が低い場合



(d) 前後から車両が同時に通過した場合

図 18 誤検出および検出漏れが生じたサウンドマップの例

6. 結論

本研究では、自転車の安全経路を選択するため必要となる 車両数・車種・車両速度・側方距離といった経路の走行安全性情報を網羅的に収集するために、ユーザが保有するスマートフォンから収集されるセンシングデータを用いたユーザ参加型センシングによる走行安全性情報の収集を目的とする研究に取り組んだ。目的達成のため、本研究で取り扱う課題を 3 つ（課題 1：車両検出のため適切なセンサを明らかにすること、課題 2：検出車両に制限がないこと、課題 3：車両速度や側方距離を含めた走行時安全性情報を検出が可能なこと）設定し、まず課題 1 を解決するため事前実験を行った結果、マイクによる環境音が有効であることを明らかにした。次に、課題 2、課題 3 を解決するため、自転車に取り付けたスマートフォンから収集される環境音を解析することで、接近車両を推定する手法を 2 つ提案した。1 つ目の手法は、スマートフォンから収集されるモノラル環境音および、機械学習を用いた接近車両検出手法であり、環境音に対して周波数解析を行うことで得られるスペクトログラムを特徴量とした機械学習により車両接近モデルを作成する。作成した接近車両検出モデルを 10 分割検証交差法を用いてモデル評価を行った所、F 値 0.97 で車両の接近を検出出来ることが明らかとなった。2 つ目の手法は、スマートフォンから収集されるステレオ環境音を用いた接近車両検出手法であり、車両の発する音がスマートフォンの上部と下部に内蔵されている 2 台のマイクに到達するまでに生じる時間差から、サウンドマップを作成し、得られたサウンドマップに対してテンプレートマッチングを行うことで接近車両を検出する。片側 1 車線の道路で実際にステレオ環境音を収集し、サウンドマップを作成し、テンプレートマッチングによる接近車両検出を行った所、F 値 0.80 で接近方向別に接近車両検出が可能であることがわかった。また、自転車と車両との相対速度により得られる S 字カーブの幅が変化することや、車種によりスペクトログラムの特性が異なることが明らかとなり、これらを特徴として用いることで、車両速度および車種を推定することが可能であると示唆される結果となった。しかし、走行安全性情報のうち側方距離に関しては、有益な結果を得ることができなかったため、今後の課題とする。

今後の課題として、提案手法の一般化による車両検出精度の向上 および 検出

項目の拡張があげられる。

まず、提案手法の一般化による車両検出精度の向上について述べる。本研究で提案した2つの車両検出方法どちらにおいても、1種類の自転車で1人の運転者により1種類のスマートフォンを用いて特定の環境下で収集された環境音を用いて検証を行っている。そのため、他種のスマートフォンを搭載した自転車で、他の運転者により様々な環境で収集された環境音に対しても同等の結果を得られるかどうかは定かではない。1つ目の周波数解析による車両検出手法では、現状学習データを収集した環境下以外において、作成したモデルが正常に動作しない可能性が考えられる。そのため、今後は様々な環境において適用できるような車両検出モデルの一般化に向けて、複数の端末・自転車・運転者により様々な環境で環境音を収集する必要があると考えている。その後、収集されたデータに統計的処理を施し、より一般化されたモデルの作成を目指す。2つ目のステレオ音源の到着時間差を用いた手法においては、5.3節において明らかにしたサウンドマップに対してテンプレートマッチングを行う際に、検出漏れや誤検出が生じる複数の原因へ対処し、精度の向上をはかる。具体的には、車両速度の影響を受ける場合や前後から車両が同時に通過した場合に検出漏れが生じないように、それぞれのサウンドマップの特徴を明らかにした上で適応するテンプレート画像を用意することで対応が可能であると考えられる。その他の影響として、壁やトンネルのような場所においては、一度通り過ぎた車両の走行音が反響し、再度集音される可能性が考えられる。ただし、反響して返ってくる走行音は、通常時に収集される環境音と異なる経路を通過して上下のマイクに集音されるため、通常時に得られるようなS字波形を示さない可能性が考えられる。更に、距離減衰が発生し音圧が低下することが考えられる。そのため、音圧レベルや周波数解析を組み合わせることで、反響音を判別することが可能であると考えられる。

次に、検出項目の拡張があげられる。まず、図17(b)で示されるように車両速度によりS字波形の幅が変化することが明らかになっており、これを用いることで接近車両と自転車との大まかな相対速度が算出可能である。これに加えて、スマートフォンのGPSから自転車の自車速度を算出し、考慮することで車両速度を推定することが可能であると考えられる。今回有益な結果を得ることができな

かった側方距離に関しては，測距センサを用いて正解値を取得し，音圧レベルやスペクトログラムなどに相関関係があるかを調査する．

本研究では，一般の自転車利用者を主な対象としたユーザ参加型センシングによるデータ収集を想定しており，一般普及性を考慮してスマートフォンに搭載されているセンサのみを使用することを前提としていた．しかし，近年ではサイクルシェアサービスの普及に伴い，プローブバイクのようなセンサ群を搭載した自転車の普及が見込まれる．そのため，今後は全方位カメラから得られる画像などスマートフォン以外の機器から収集されるデータを利用した検出手法の検討も行う．

謝辞

本研究を進めるにあたり，奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 安本慶一教授には，研究全般に関し，多大なるご指導・ご助言を賜りました．また，博士後期課程進学や学術振興会特別研究員および留学奨学金の申請にいたるまで手厚いご指導をいただきましたことに，感謝の意を表すとともに，心より厚く御礼申し上げます．

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 中村哲教授には，ご多忙の中，論文審査委員を引き受けてくださったうえで，中間発表においては的確なアドバイスを賜りました．感謝の意を表すとともに，心より感謝申し上げます．

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 荒川豊准教授には，本研究を進めるにあたり，多忙の中議論の時間を設けて頂きご指導・ご助言を賜りました．また，共同研究や Code for Ikoma を始めとした対外的な活動にも，積極的にお声がけして頂き様々な経験をさせていただきました．ここに感謝の意を表すとともに，心より厚く御礼申し上げます．

九州大学大学院 システム情報科学研究院 石田繁巳 助教には，本研究を進めるにあたり，音響解析における様々な知見やご助言を賜りました．ここに感謝の意を表すとともに，心より厚く御礼申し上げます．

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 藤本まなと 助教には，学生に非常に近い立場から，研究者の先輩として，論文誌や学術振興会申請書の執筆のコツなどさまざまなご指導をしていただきました．心より感謝申し上げます．

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 諏訪博彦 助教には，データ分析やアンケート方法を始めとした社会学的な立場からのご指導・ご助言をいただきました．心より感謝申し上げます．

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 水本旭洋 特任助教には，学生に非常に近い立場から進路の相談など相談に乗っていただきました．心より感謝申し上げます．

Oulu University, Faculty of Information Technology and Electrical Engineering, Professor Petri Pulli ならびに Mr. Aryan Firouzian には，異国の地で本研究を進めるにあたり，暖かく受け入れてくださったうえで，貴重なご意見を賜り

ました。また、国際会議へ論文を投稿する際には、適切な修正をご支持いただき、論文の質を高めることができました。心より感謝申し上げます。

金岡恵 事務補佐員、山内奈緒 事務補佐員、尾川恵理 事務補佐員には、学会や出張に関する事務処理を始めとし、様々な面で研究生活を支えていただきましたこと、謹んで感謝申し上げます。

また、研究全般において的確なアドバイスをくださった松田裕貴 先輩、中村優吾 先輩を始めとする先輩の皆様、共に研究生活を過ごした同輩、慕ってくれた後輩の皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、今日までの学生生活を様々な面から支えてくださった父母に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省. 自転車活用の推進に向けて～多様なモビリティへの対応～, 2017.
<http://www.mlit.go.jp/common/001174751.pdf>.
- [2] 国土交通省. 自転車の活用の推進に関する現状の取り組みについて, 2017. <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/bicycle-up/01pdf/05.pdf>.
- [3] 国土交通省. コミュニティサイクルの取組等について, 2017. <http://www.mlit.go.jp/common/001181682.pdf>.
- [4] 警察庁. 平成 28 年における交通事故の発生状況, 2017. <https://www.npa.go.jp/toukei/koutuu48/toukei.htm>.
- [5] 東京都庁. 東京都自転車走行空間設備推進計画, 2012.
- [6] 土岐源水, 山中英生, 二神彩, 亀谷一洋. プローブバイシクルを用いた自転車利用環境の評価. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 第 71 巻, pp. 623–628, 2002.
- [7] S. B. Eisenman, E. Miluzzo, N. D. Lane, R. A. Peterson, G-S. Ahn, and A. T. Campbell. The bikenet mobile sensing system for cyclist experience mapping. In *Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '07, pp. 87–101, New York, NY, USA, 2007.
- [8] 山中英生, 亀井壤史. プローブバイシクルを用いた車道走行自転車の安全感評価モデルの開発. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 第 71 巻, pp. 623–628, 2015.
- [9] 斉藤裕樹, 菅生啓示, 間博人, テープウィロージャナポンニワット, 戸辺義人. sbike : 参加型センシングを志向したモバイルセンシングによる自転車走行状態収集・共有機構. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 2, pp. 770–782, 2 月 2012.

- [10] 小花祐輔, 高橋淳二, 宇佐美格, 狐崎直文, 戸辺義人, Guillaume Lopez. 自転車走行時の路面情報抽出: 基本検討および実測定. 情報処理学会, 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), 第 2014-MBL-71 巻, pp. 1–7, 5 月 2014.
- [11] Sven Fröhlich, Thomas Springer, Stephan Dinter, Sebastian Pape, Alexander Schill, and Jürgen Krimmling. Bikenow: A pervasive application for crowdsourcing bicycle traffic data. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, UbiComp '16, pp. 1408–1417, New York, NY, USA, 2016.
- [12] R. Takahashi, K. Miki, and S. Kaneda. Visualization method using probe bicycle to analyze bicycle rider's control behavior. In *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, Vol. 2, pp. 360–365, July 2017.
- [13] H. Kato, Y. Sakajyo, and S. Kaneda. Visualization method for bicycle rider behavior analysis using a smartphone. In *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, Vol. 2, pp. 354–359, July 2017.
- [14] Y. X. Zhao, Y. S. Su, and Y. C. Chang. A real-time bicycle record system of ground conditions based on internet of things. *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 17525–17533, 2017.
- [15] 久保田彰人, 北島規雄, 小林祐貴, 市村哲. 口コミと路面状況を共有できる自転車用安全運転支援システム. 情報処理学会, 研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN), 第 2009 巻, pp. 1–6, 5 月 2009.
- [16] Stephen Smaldone, Chetan Tonde, Vancheswaran K. Ananthanarayanan Ahmed Elgammal, and Liviu Iftode. The cyber-physical bike: A step towards safer green transportation. In *In Proceedings of*

the 12th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, HotMobile'11, pp. 56–61, 2011.

- [17] 下山直起, 安藤輝, 山崎和人, 石井貴拓, 平山雅之. マルチセンサを用いた走行解析による自転車事故防止システムの検討. 情報処理学会研究報告, 組込みシステム, 2015–EMB–36, pp. 1–6, 2015.
- [18] 吉田裕幸, 中野美由紀, 渡辺柚佳子, 菅谷みどり. 移動体位置情報を利用した接近検知による自転車と歩行者の事故防止システム. 情報処理学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム, 2015–UBI–46, pp. 1–8, 2015.
- [19] Theodoros Anagnostopoulos, Denzil Ferreira, Alexander Samodelkin, Muzaamil Ahmed, and Vassilis Kostakos. Cyclist-aware traffic lights through distributed smartphone sensing. *Pervasive Mob. Comput.*, Vol. 31, No. C, pp. 22–36, sep 2016.
- [20] Weixi Gu, Yunxin Liu, Yuxun Zhou, Zimu Zhou, Costas J. Spanos, and Lin Zhang. Bikesafe: Bicycle behavior monitoring via smartphones. In *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, UbiComp '17*, pp. 45–48, New York, NY, USA, 2017.
- [21] Michael J. Caruso and Lucky S. Withanawasam. Vehicle detection and compass applications using amr magnetic sensors. 1999.
- [22] Yao He, Yuchuan Du, and Lijun Sun. Vehicle classification method based on single-point magnetic sensor. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 43, pp. 618 – 627, 2012.
- [23] A Daubaras and Mindaugas Zilys. Vehicle detection based on magneto-resistive magnetic field sensor. Vol. 118, pp. 27–32, 02 2012.

- [24] B. Koszteczyk and G. Simon. Magnetic-based vehicle detection with sensor networks. In *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 265–270, 2013.
- [25] Marcin Bugdol, Zuzanna Miodonska, Michal Krecichwost, and Paweł KASPEREK. Vehicle detection system using magnetic sensors. Vol. 9, pp. 49–60, 03 2014.
- [26] Vytautas Markevicius, Dangirutis Navikas, Mindaugas Zilys, Darius Andriukaitis, Algimantas Valinevicius, and Mindaugas Cepenas. Dynamic vehicle detection via the use of magnetic field sensors. *Sensors*, Vol. 16, No. 1, 2016.
- [27] R. Chellappa, Gang Qian, and Qinfen Zheng. Vehicle detection and tracking using acoustic and video sensors. In *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 3, pp. iii–793–6, May 2004.
- [28] A Severdaks and M Liepins. Vehicle counting and motion direction detection using microphone array. Vol. 19, pp. 89–92, 10 2013.
- [29] J. George, L. Mary, and Riyas K S. Vehicle detection and classification from acoustic signal using ann and knn. In *2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC)*, pp. 436–439, 2013.
- [30] Masaru Takagi, Kosuke Fujimoto, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asam. Detecting hybrid and electric vehicles using a smartphone. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 267–275, 2014.
- [31] Xingshui Zu, Shaojie Zhang, Feng Guo, Qin Zhao, Xin Zhang, Xing You, Huawei Liu, Baoqing Li, and Xiaobing Yuan. Vehicle counting and moving direction identification based on small-aperture microphone array. *Sensors*, Vol. 17, No. 5, 2017.

- [32] 石田繁巳, 三村晃平, 劉嵩, 田頭茂明, 福田晃. 路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム. 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 1, pp. 89–98, 1月 2017.
- [33] C. Knapp and G. Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, pp. 320–327, Aug 1976.

研究業績

学術論文

1. 河中祥吾，高橋雄太，雨森千周，藤本まなと，荒川豊，藤原晶，福島徹也，松原敬信：“競技者の負担を軽減した自転車競技向け参加型位置共有システムの実装と評価，” 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS)，Vol. 7, No. 2, pp.12-23, 2017 年 5 月.

国際会議

1. Shogo Kawanaka, Yukitoshi Kashimoto, Aryan Firouzian, Yutaka Arakawa, Petri Pulli, Keiichi Yasumoto: “Approaching Vehicle Detection Method with Acoustic Analysis using Smartphone for Elderly Bicycle Driver,” The Tenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2017), Oct. 2017.
2. Masato Hidaka, Yuki Matsuda, Shogo Kawanaka, Yugo Nakamura, Manato Fujimoto, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto: “A System for Collecting and Curating Sightseeing Information toward Satisfactory Tour Plan Creation,” The Second International Workshop on Smart Sensing Systems (IWSSS '17), Aug. 2017.

国内会議

1. 河中祥吾，高橋雄太，雨森千周，藤本まなと，荒川豊，藤原晶，福島徹也，松原敬信：“競技者の負担を軽減した参加型位置共有システムの提案と実装，” 第 17 回コンシューマ・デバイス&システム研究会 (CDS)，2016 年 8 月．
2. 河中祥吾，柏本幸俊，Firouzian Aryan(Oulu Univ)，荒川豊，Pulli Petri(Oulu Univ)，安本慶一：“高齢者の自転車操作支援を目的としたスマートフォン

による接近 車両検知手法の提,” 情報処理学会 第 81 回モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会, 2016 年 12 月 .

3. 河中祥吾, 高橋雄太, 雨森千周, 藤本まなと, 荒川豊, 安本慶一: “自転車競技向け参加型位置共有システムにおける BLE ビーコンの出力変化による捕捉率の影響,” 第 82 回モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会, 2017 年 3 月 .
4. 日高真人, 松田裕貴, 河中祥吾, 中村優吾, 藤本まなと, 荒川豊, 安本慶一: “実時間観光コンテンツ提供に向けた観光情報収集・キュレーションシステムの提案,” 第 68 回高度交通システムとスマートコミュニティ研究発表会, 2017 年 3 月 .
5. 松田裕貴, 河中祥吾, 諏訪博彦, 荒川豊, 安本慶一: “ユーザ参加型センシングの割り込みに対する応答性調査 ~時空間データとタスク難易度およびユーザ属性による考察~, ” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2017) シンポジウム, 2017 年 6 月 .
6. 河中祥吾, 松田裕貴, 藤本まなと, 荒川豊, 安本慶一: “スマートフォンで撮影した近接群衆画像からの混雑度推定手法に関する一検討,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2017) シンポジウム, 2017 年 6 月 .
7. 金谷勇輝, 河中祥吾, 日高真人, 諏訪博彦, 荒川豊, 安本慶一: “直感的な観光ルート計画のための観光動画キュレーションシステムの提案” 第 86 回モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会 (MBL2018), 2018 年 2 月