

# グルービング上を走行する車両の通過音を用いた交通状態観測手法の開発

森脇 洸太<sup>1</sup>・三谷 卓摩<sup>2</sup>・日下部 貴彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: k.moriwaki@csis.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学空間情報科学研究センター特任助教 (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: mitani@csis.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京大学空間情報科学研究センター講師 (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: t.kusakabe@csis.u-tokyo.ac.jp

本研究では、走行音を用いた車両検知及び速度検出手法を構築する。構築する手法では、音響道路などに利用され、特定の速度で走行すると特定の音階を発することができるグルービング施工を行った舗装を利用する。これにより、車両から通常の走行音とは異なった、速度に応じた音を意図的に発生させることができる。この音を観測することで、車両を検知し、音階から速度を検出する方法を提案する。検出・検出方法は、異なる音階を発する2区間で発生した走行音を解析することで行う。具体的には、観測音を時刻ごとにフーリエ変換し、パワースペクトルを解析することにより、検出を行う手法を構築した。グルービング施工がされた道路での走行実験を行うことにより、提案手法での検出特性を分析し、提案手法の性能及び今後の改善の方向性を示した。

**Key Words :** *Traffic flow, Vehicle detection, Pavement grooving*

## 1. はじめに

交通流の観測手法は、車両感知器（トラカン）等を用いた定点観測とGPS(Global Positioning System)等を用いた移動体観測に分けることができる。定点観測手法では、定点での機器の設置が必要になるため設置地点の情報に限定されるが、道路断面を通過するすべての車両の交通量や速度といった交通状態を把握することができる。一方で、移動体観測では、機器の普及率に応じて取得できる対象の車両数が異なることになるが、定点での観測装置を設置することなくネットワーク全体の情報を取得できる可能性がある。後者での情報取得の精緻化のためには、技術的な側面だけでなく、プローブカー・コネクティッドカーの普及など、社会的な情勢に影響される。このことから、移動体観測に必要な車両の普及が十分でない場合には、道路・交通管理者が定点での観測機器を設置する必要がある。このときに、従来の機器に比べて簡易かつ安価に設置でき、継続的な観測が行える機器があれば、より広範囲あるいは高密度での交通流観測を行うことが可能になり、より精緻な渋滞把握や交通対策に資すると

考えられる。

近年、IoT (Internet of Things)の進展により、簡易かつ安価に用いることができる汎用的な機器での定点交通観測が可能となってきている。例えば、Wi-FiやBluetoothを用いた観測<sup>1)2)</sup>では、これまでの手法で取得が難しかった2地点間の旅行時間や観光地での周遊パターンなどが解析されている。一方で、それらの観測に対応している機器を搭載している車両等のうち信号の送受信に成功したものののみ観測できることから、断面等を通過する車両の全数をとらえることや、地点での交通状態を求めるには適していない。ビデオカメラを用いた観測では、AI (Artificial Intelligence)の活用により従来と比べ精緻な交通把握等も可能になりつつある<sup>3)</sup>が、取得されるデータ量が膨大であり、車両認識等のコンピューティングに要する消費電力が大きく、オンサイトでの自律的な解析は難しいという問題がある。そこで本研究では、これまで交通流の定点観測方法として着目されてこなかった走行音を利用した観測方法を構築する。音声は、一般に画像と比較してデータ量が小さく、解析に必要な消費電力も小さいため、オンサイトでの解析も可能と考えられる。

走行音から交通状態を把握するためには、自動車の通過を検知するとともに走行速度を検出する必要がある。一方で、自動車の走行音の音源は、エンジン音等の機械音や吸排気音、タイヤと路面の摩擦音（道路摩擦音）、風切り音などが考えられる。これらの音源の特徴は車種等によって異なることから、これらを用いて車両の検出を行おうとすると検出方法が複雑になることが想定される。そこで本研究では、車種等に依存しない音を抽出する手法として、グルーピング施工された路面上でのタイヤと路面の摩擦音を用いる。グルーピングとは、排水などを目的に路面に溝を施工したものであるが、一部のグルーピングは、タイヤと路面の摩擦音から特定の音階を発生してメロディを奏でることを目的とした音響道路にも利用されている。グルーピング舗装を利用することにより、通常の走行音とは異なる音を意図的に発生させることができることから、これにより、音声を用いた車両の検知が容易になると期待できる。また速度に応じて特定の音階を発生させることが可能であるため、速度の検出にも利用できる可能性がある。

本研究の目的は、グルーピング施工を利用した交通状態観測のための走行音観測手法を提案し、このような観測データから車両の検知し速度を検出するための方法を構築する。さらに、グルーピング施工がされた道路での走行実験を行うことにより、提案手法での検出特性を分析し、提案手法の性能及び今後の改善の方向性について議論を行う。

## 2. 観測方法・検出方法

本研究の方法では、車両を検知するためのグルーピング施工、グルーピング施工された路面上を走行する車両の走行音の観測、観測データから車両の検知及び速度の検出を行う方法が必要となる。(1)では、本研究での車両検知に必要なグルーピング施工について述べ、(2)では走行音の観測手法、(3)で車両の検知及び速度の検出手法について述べる。

### (1) 車両検知に必要なグルーピング施工

グルーピング施工を行った路面を走行する車両の道路摩擦音の周波数は、式(1)のように走行車両の速度とグルーピング施工で施された溝間隔に依存する。

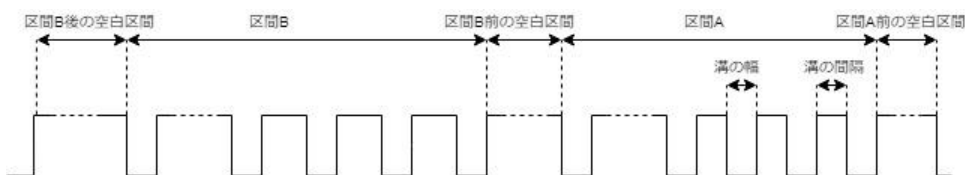


図-1 グルーピング舗装の模式図

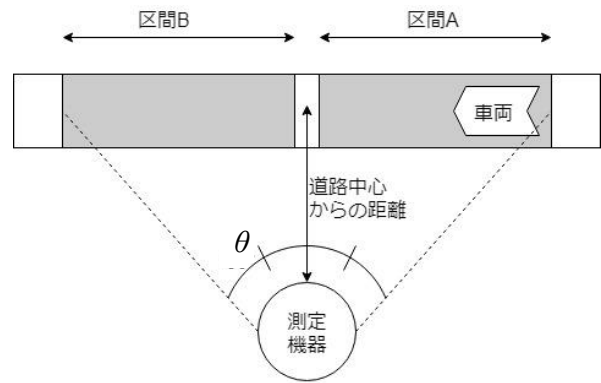


図-2 観測機器の設置方法

$$f = 1000 \times \frac{v}{d} \quad (1)$$

ただし、 $v$  [m/s]は車両の走行速度、 $d$  [mm]は溝間隔であり図-1の溝の間隔と幅の和である。例えば、35mmの溝間隔のグルーピングを施工した路面を50 km/hで走行すると、車両は1秒間に13.8m進むことから、396.8Hzの道路摩擦音が発生する。

本研究では、図-1に示すように、空白区間を挟み、異なる溝間隔をもつ2区間以上の区間での観測を行う。これは、2種類以上の周波数の組み合わせを検知することにより、道路摩擦音以外の音声と区別することを意図している。なお、車両の進行方向の上流側を区間A、下流側を区間Bとする。

### (2) 走行音の観測手法

グルーピング施工がなされた道路区間の路側で、走行音を観測する手法について述べる。図-2に示すように、路側上に指向性のマイク（ダイナミックマイク）を設置する。指向性マイクの使用は、集音が可能な角度を限定することで、周辺の環境音等の雑音を集音しないことを意図している。観測機器の設置位置は、マイクの收音角を考慮し、区間Aと区間Bの両方で收音できるように式(2)のように車線中心と測定機器の距離より求めた。

$$Y = \frac{X}{2 \tan \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

$Y$  [m]は車線の中心からの距離、 $X$  [m]は区間Aの起点から区間Bの終点までの距離、 $\theta$ は集音可能な角度である。

### (3) 検出方法

グルーピング施工を行った路面を走行する車両から発生する道路摩擦音は、車両の速度に応じた特定の周波数成分をもつ。そこで本研究では、観測された音声を時刻毎離散フーリエ変換しパワースペクトルを解析することにより、車両の検知及び速度の検出を行う。本研究では、溝間隔が異なる 2 区間のデータから検出を行うが、本節では、1 区間（区間 A, B のどちらか一方）のデータを用いた検出方法を説明したのち 2 区間（区間 A, B の両方）のデータを用いた検出方法について述べる。

1 区間のデータを用いた検出手法は以下である。

Step 1 音声データを  $\Delta t$  秒毎で分割する。

Step 2 Step 1 で得られた  $\Delta t$  秒間隔の各時刻の音声データに対して離散フーリエ変換を行い、時刻毎に Step 3-1 ~ Step 3-3 を行う。

Step 3-1 離散フーリエ変換で得られた各時刻の各周波数  $f$  のパワースペクトル  $A(f)$  をあらかじめ決めた速度帯  $v \in V$  に対応した、周波数帯  $F_v$  ごとに整理する。具体的には、周波数帯に毎にパワースペクトルの最大値  $A_v = \max_{f \in F_v}(A(f))$  を求める。

Step 3-2 Step 3-1 で求めた  $A_v$  があらかじめ設定している速度帯ごとの閾値  $p_v$  に対して  $A_v > p_v$  を満たすとき、仮検出とし  $d_v = 1$  とする。また、 $A_v > p_v$  満たさないとき、 $d_v = 0$  とする。

Step 3-3  $A^* = \max_{v \in V}(A_v)$ ,  $v^* = \operatorname{argmax}_{v \in V}(A_v)$  を求め、

Step 3-2 で求めた  $d_{v^*}$  が、 $d_{v^*} = 1$  を満たす場合検知とし、 $v^*$  を検出速度とする。

Step 4 Step 3 の方法で複数の時間帯で連続して車両が検知された場合は、それらの検知のうちの一つを最終的な通過時刻とする。具体的には、 $A^*$  が最も大きい時間帯を通過時刻とし、その時刻の  $v^*$  を通過速度とする。

2 区間のデータを用いた検出手法では、1 区間のデータを用いた方法での Step 3-2 の仮検出の際に、溝間隔が異なる 2 区間両方の検出状況を用いることで、特定の周波数で発生している雑音の影響を軽減し、より正確な検出をすることを意図している。

Step 1 音声データを  $\Delta t$  秒毎で分割する。

Step 2 Step 1 で得られた  $\Delta t$  秒間隔の各時刻の音声データに対して離散フーリエ変換を行い、時刻毎に Step 3-1 ~ Step 3-3 を行う。

Step 3-1 離散フーリエ変換で得られた各時刻の各周波数  $f$  のパワースペクトル  $A(f)$  をあらかじめ決めた速度帯  $v \in V$  に対応した区間ごとの周波数帯  $F_{Av}$ ,  $F_{Bv}$  に整理する。具体的には、周波数帯に毎にパ

ワースペクトルの最大値  $A_{Av} = \max_{f \in F_{Av}}(A(f))$ ,

$A_{Bv} = \max_{f \in F_{Bv}}(A(f))$  を求める。

Step 3-2 Step 3-1 で求めた  $A_{Av}$ ,  $A_{Bv}$  があらかじめ設定している速度帯・区間ごとの閾値  $p_{Av}$ ,  $p_{Bv}$  に対して  $A_{Av} > p_{Av}$  かつ  $A_{Bv} > p_{Bv}$  の条件を満たすとき、仮検出とし  $d_v = 1$  とする。また、この条件を満たさないとき、 $d_v = 0$  とする。

Step 3-3  $A^* = \max_{v \in V}(A_{Av})$ ,  $v^* = \operatorname{argmax}_{v \in V}(A_{Av})$  を求め、

Step 3-2 で求めた  $d_{v^*}$  が、 $d_{v^*} = 1$  を満たす場合検知とし、 $v^*$  を検出速度とする。

Step 4 Step 3 の方法で複数の時間帯で連続して車両が検知された場合は、それらの検知のうちの一つを最終的な通過時刻とする。具体的には、 $A^*$  が最も大きい時間帯を通過時刻とし、その時刻の  $v^*$  を通過速度とする。

### 3. 検証実験

グルーピング施工を行った既設の道路区間を走行することにより音声データを収集し、2章で提案した方法について検証を行う。検証実験では、あらかじめ指定した速度で車両を走行させ、その走行音を録音して実験データを収集した。ビデオカメラでも走行状況を撮影しておき、ビデオ画像から得られる通過時刻と車両の速度計による速度を真値として、実験データを用いた2章(3)節の検出結果を比較することで検証を行う。

(1)で実験内容の詳細について述べ、(2)で検証結果について述べる。

#### (1) 実験方法

検証実験は、群馬県高崎市の県道33号線渋川松井田線「榛名湖メロディーライン」で実施した。グルーピング施工された区間の全長は280メートルあり、その中の23.63メートルの部分を使用した。周辺環境は、山地であり、主な雑音の音源は、風切り音や虫・鳥等鳴き声、対向車の走行音などが想定される状況であった。実験で用いた区間Aと区間Bのグルーピング施工の状況を表-1にまとめる。なお、法定速度は50km/hであり、この速度で走行した場合に発生する周波数の理論値は区間Aと区間Bでそれぞれ263.2Hzと219.3Hzである。なお、観測機器は、車線中心から210cm、高さ90cmの位置に設置した。

実施日時は、2018年6月4日の午後であり、天候は晴れで、路面は乾燥している状況であった。

実験機器は、ダイナミックマイクとしてAudio-Technica

製AT-X3した。なお、收音可能な角度 $\theta$ は160度とした。録音機器は、SONY製ICD-PX470Fを使用しニアPCM(pulse code modulation)形式で録音した。車両は、国産のミニバン車両（日産セレナ）を使用した。

実験では、車両を20km/hと35km/h、50km/hを目安とし、それぞれの速度で3回走行した。ビデオ画像から求めた通過時刻及び、車両搭載の速度計による通過時の速度を真値とする。なお、時速20km/hの走行のうち1回は真値となるビデオ画像が欠測したため、利用しない。したがって、表-2の走行データを用いて検証を行う。

表-1 区間Aと区間Bのグルーピング施工の状況

	溝の間隔	溝の幅	区間の長さ	前の空白区間	後の空白区間
区間A	37.5 (mm)	10 (mm)	3.43 (m)	50 (cm)	50 (cm)
区間B	47 (mm)	10 (mm)	18.7 (m)	50 (cm)	50 (cm)

表-2 走行実験の概要

走行番号	指示速度 (km/h)	実測速度 (km/h)
1	35	34
2	50	49
3	20	21
4	35	34
5	50	48
6	20	22
7	35	33
8	50	49

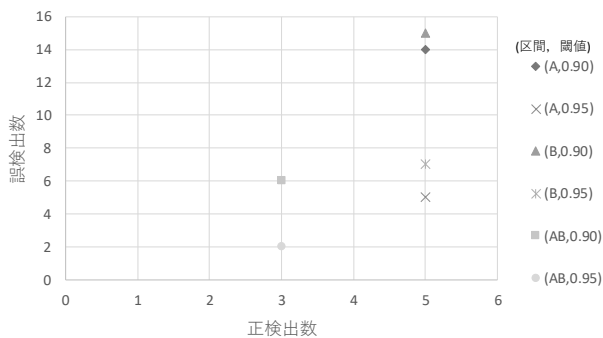


図-3 通過時刻の検出結果

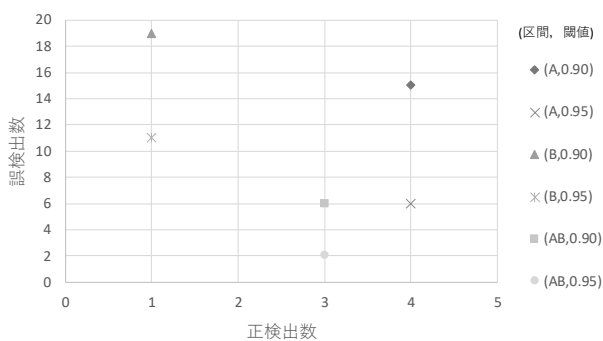


図-4 通過時刻と速度の検出結果

(2) 検証結果

検証では、表-2に示した各走行に対して、通過時刻が真値の±1秒以内に検知されたものを車両検知の正検出と定義する。さらに、検出速度帯が、真値の±2.5km/hを含む速度帯であるものを速度の正検出と定義する。なお、通過時刻について正検出ではない検出は速度にかかわらず誤検出と定義する。

2章(3)節で提案した検出方法のパラメータとして、音声ファイルを区切る時間幅 $\Delta t$ は1秒とした。速度帯 $V$ は20~75km/hの5km/h刻みで設定した。検出の閾値 $p_v$ 、 $p_{Av}$ 、 $p_{Bv}$ は、それぞれの速度帯について、その速度帯を代表するパワースペクトル( $A_v$ )の90%タイル値、95%タイル値を設定した。

検証では、提案手法の特性とともに、前章で提案した2区間の音声を用いた検出方法を、A、Bのそれぞれの1区間の音声を用いた検出方法と比較することによって、2区間で検出することの有効性を示すことを意図している。このために、これらの方法での車両検知についての結果を比較(図-3)したうえで、速度も含めた検出結果を比較(図-4)する。また、各走行実験での誤検出の状況を表-3に示すとともに、誤検出時の検出速度を(図-5)に示す。

通過時刻の検出結果を示した図-3によると、閾値について90%タイル値、95%タイル値を比較すると、90%タイル値の方が誤検出数が多くなるのがわかる。また、1区間のみによる検出に比べ、2区間の検出を用いた区間ABの結果での誤検出数が少なくなっている。この傾向は、通過時刻・速度の同時検出結果を示した図-4でも同様である。正検出数に着目すると、図-4では、2区間のデータを用いた検出結果は、必ずしも1区間の検出結果と比べて正検出が減るものではないことが読み取れる。

表-3によると、20km/hの指示速度での走行での正検出数は0であり、また、図-5によると20km/hの速度帯での誤検出が多いことがわかる。このことの原因として、20km/hの速度帯に相当する周波数帯での雑音が多く、誤検出が発生するとともに雑音と道路摩擦音を判別できず正検出ができないことが推察される。

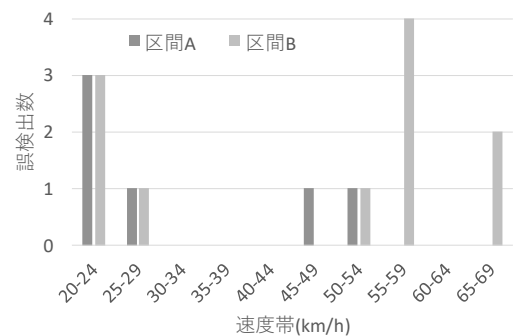


図-5 誤検出の速度帯分布



表-3 走行別の検出結果.

走行番号	走行速度 (km/h)	検出方法A			検出方法B			検出方法AB		
		正検出数	正検出 (通過時 刻のみ)	誤検出数	正検出数	正検出 (通過時 刻のみ)	誤検出数	正検出数	正検出 (通過時 刻のみ)	誤検出数
3	21									
6	22			1						
1	34		1			1	1			
4	34	1			1					
7	33			1			1			1
2	49	1		1		1	2	1		
5	48	1		2		1	3	1		1
8	49	1				1		1		

50km/h以上の高い速度帯で発生している誤検出は、今回の実験では、閾値をパーセンタイル値によって指定していることに起因していると考えられる。走行実験では、該当の速度帯で走行している車両はないことから、閾値として設定している値が低いために誤検出が発生していると推察される。

#### 4. おわりに

本研究では、グルーピング施工を利用した車両検知及び速度検出手法を提案し、走行実験による検証を行った。

走行実験での検証結果より、本研究の実験で使用したグルーピング施工の区間では、比較的高い速度帯(30km/h以上)での車両の検知が行えることが分かった。このことは、20km/hの速度帯に対応する200Hz前後の雑音が多く発していることに起因していると考えられる。

1区間のみの音を利用した検出方法と2区間のものを利用した検出方法の比較では、2区間を利用した検出方法の方が、正検出数を保ちつつ誤検出を低減できることが示された。このことより、複数の溝間隔の区間を設定することが誤検出の低減には有効であることが示された。

今回の実験では、既設のグルーピング施工の道路区間を利用したため、最適な溝間隔等を求めることはできなかった。一方で、実験結果からは、本研究の実験区間より溝間隔を短くすることで、誤検出を軽減できる可能性が示唆される結果となった。また、2区間の溝間隔の差についても、本研究の実験区間では、2区間で同一の周

波数帯が同一の速度帯に含まれている。一方で、区間A、Bでそれぞれ発生する音を明確に識別するためには、同一の速度帯では、区間A、Bでそれぞれ異なる周波数帯となるような設定が望ましいと考えられ、今後検証を行いたい。

**謝辞:** 本研究はJSPS科研費 16H06102の助成を受けたものです。本研究の推進にあたり、(株)地域未来研究所、菅芳樹氏に多くの助言をいただきました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 壇辻貴生, 杉下佳辰, 福田大輔, 浅野光行: Wi-Fi パケットデータを用いた観光客の滞在時間特性把握の可能性に関する研究 奈良県長谷寺参道における試み. 都市計画論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 247-254, 2017.
- 2) Nishida, J., Adachi, T. and Makimura, K.: Traffic flow analysis by the use of Wi-Fi packets receiver, IRF Asia, Indonesia, 2014.
- 3) Tsubota, T., Bhaskar, A., Chung, E. and Billot, R.: Arterial traffic congestion analysis using Bluetooth duration data. Aust Transp Res Forum, Adelaide SA, 2011.
- 4) Zhang, S., Wu, G., Costeira, J. and Moura, J.: Understanding Traffic Density from Large-Scale Web Camera Data, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017.

(2018. 7. 31 受付)

## TRAFFIC FLOW OBSERVATION USING NOICSE OF MOVING VEHICLES ON PAVEMENT GROOVING

Kota MORIWAKI, Takuma MITANI and Takahiko KUSAKABE