

スマートフォンによる車線推定手法

牧野 友哉¹ 伊藤 嘉博¹ 白石 陽^{2,a)}

受付日 2013年5月14日, 採録日 2013年10月9日

概要: 近年, 道路交通における安全化・効率化システムの中でも自動車に関するセンサデータを収集・蓄積し, サービスに活用するプローブ情報システムが注目されている. そして, このプローブ情報システムにおいて車両の位置情報は非常に重要とされており, 走行している車両の位置推定技術に関する研究がさかに行われている. 一方, 携帯端末の中でも多種のセンサを内蔵したスマートフォンの普及が進んでおり, そのような携帯端末を利用して低コストかつ広域にわたりセンサデータを収集する参加型センシングが注目されている. この参加型センシングの考えから, 収集した大量のセンサデータを集合知としてとらえることで新しい発見や価値を創造することができると考えられている. そこで, 本論文では, 車両の走行車線を推定することを目的とし, スマートフォンに内蔵されている多種のセンサを用いて車線推定を低コストで実現する手法を提案する. 推定する位置情報に関して, 対象とする車両がどの車線を走行しているかという情報を把握することができれば, 様々なサービスへの活用が可能である. 提案手法では加速度センサおよび方位センサのログデータを利用して, 右左折の検知と車線変更の検知を行い, これらの検知結果に基づいて走行車線の推定を実現する. 提案した車線推定システムを実装し, 既存手法との精度比較を行い, 提案手法の有効性について検証する.

キーワード: 高度交通システム, プローブ情報システム, 車線推定, スマートフォン, センサデータ

A Method of Traffic Lane Estimation with a Smartphone

TOMOYA MAKINO¹ YOSHIHIRO ITO¹ YOH SHIRAISHI^{2,a)}

Received: May 14, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: In recent years, probe information systems have been attracting attention to realize safety and efficiency of transport systems. Probe information systems collect and store sensor data of vehicles, and provide useful services by using these data. Location information of vehicles is very important in such systems, and various kinds of techniques for estimating location information of a vehicle have been developed. On the other hand, smartphones with a variety of sensors become widespread, and participatory sensing that collects sensor data over a wide area with low cost by using mobile devices such as smartphones has been attracting attention. From the point of view of participatory sensing, the collected and accumulated sensor data are regarded as collective intelligence will bring some findings and production of new values. In this paper, we propose a method for traffic lane estimation with low cost by using a variety of sensors on a smartphone. If we can traffic lane information as location information of vehicles, these information will be applicable to various kinds of services. The proposed method detects turns and lane changes of a vehicle by using log data of direction and an acceleration sensor, and estimates traffic lane based on these detected results. We implement the proposed method for lane estimation on a smartphone, and show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: intelligent transport systems, probe information system, lane estimation, smartphone, sensor data

¹ 公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

² 公立はこだて未来大学システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

a) siraisi@fun.ac.jp

1. はじめに

道路交通の安全化・効率化を目的としたシステムとして, プローブ情報システムが現在注目されている [1], [2], [3]. プローブ情報システムは自動車に内蔵されているセンサ

から得られる位置情報や外気温、エンジン回転数、ワイパなどのプローブ情報を収集し、ナビゲーションや安全運転支援などに活用するシステムである。プローブ情報は時間的に粒度が高く、多種多様なセンサデータであるため、リアルタイム性の高いデータだけでなく蓄積したデータも有効に活用可能であり、多くの活用例があげられている [4], [5]。プローブ情報システムを実用化した例として VICS (Vehicle Information and Communication System) が有名である [6], [7]。VICS の特徴として、走行中に収集したプローブ情報を専用カーナビから路上ビーコン、FM 多重放送基地局を介してデータベースに収集し、加工した情報を再びカーナビ向けに配信することで渋滞ナビゲーションや天候情報提供、エコドライブ支援などを実現している。しかし、VICS のような従来のプローブ情報システムを利用するためには専用機器の導入や路上ビーコン、通信基地局の設置が必要であるため、そのコストの削減に向けた代替法の提案が課題となる。さらに、路上ビーコンや通信基地局などのインフラが設置されていない場所ではプローブ情報の収集ができない。プローブ情報の利用価値をより高め、様々なサービスに活用するためには、空間的に粒度の高い情報を低コストで収集・蓄積する必要がある。

一方、近年 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の発展によるセンサデバイスの小型化、高性能化にともない、私たちの身の回りのあらゆるものにセンサが組み込まれている [8], [9]。それにより、スマートフォンを持ち歩く歩行者や自動車、Web サービスなどをセンサと見なし、広範囲のセンサ情報を収集する参加型センシング (Participatory Sensing) 技術の研究が進んでいる [10], [11]。参加型センシングはセンサと見なす媒体の数が多く、またその種類も豊富であるため、プローブ情報よりもさらに広域かつ多種多様な情報を容易に収集できる。このような特徴から、都市規模のセンシングも可能であり、様々な事象を解析・理解するアプローチとして現在注目を浴びている。つまり、参加型センシングにより収集した情報を交通の安全化・効率化に活用することで、従来のプローブ情報システムの問題を解決することができると考えられる。そこで、本論文では参加型センシングの観点から、現在普及率の高いスマートフォンに内蔵されているセンサを利用することで、大量のプローブ情報を低コストで収集・蓄積するとともに、その蓄積した情報を走行車線の推定に活用する手法を提案する。交通の安全化・効率化のためのシステムの基盤となる技術の中でも車両の位置推定はナビゲーションや交通分析などの様々な活用の要素技術となるため、重要である。そして、その位置推定精度の水準として、どの車線を走行していたかという車線レベルの位置推定が実現できれば、推定した情報は十分活用が可能であると考えられる。例として、交差点を結ぶ区間ごとの車線情報を大量に収集することで車線別の渋滞の把握が可能になり、さらに粒度の高い

ナビゲーションや交通量統計などに活用できる。以上より、本研究では対象とする車両がどの車線を走行したかを推定することを目的とする。

2. 関連研究

本章では、本研究の目的である車線推定を実現するための要素技術として、既存の位置推定技術に関する関連技術、関連研究について述べる。なお、各手法を車線推定に応用するにあたって以下の 4 つの観点で比較、検討を行う。

- 導入コスト

各手法で用いる機器や設備を実環境に適用する際に生じるコストであり、普及率の観点で実用性を評価する指標となる。本研究における車線推定は参加型センシングの考え方から多くの車両にシステムを搭載し、都市規模の車線情報を収集・蓄積することを想定している。そのため、普及率の低い機器を用いる手法では導入コストの観点で実用性が低い。

- 計算コスト

事前に必要な処理量の観点から、前処理や事前準備にかかるコスト。学習モデルの構築のような複雑で計算量の多い処理を運転者ごとに行う必要がある場合はこの計算コストの観点で実用性が低い。

- ロバスト性

車両が走行中に起こる外的環境の変化に対する各手法の安定性を評価する指標である。走行中に起こる環境変化として、日照量や天候による視界環境の変化や、都市部の高層ビル群やトンネル内における通信障害などが考えられる。そのため、これらの視界不良時や劣通信環境において各手法が安定して機能するかを評価する。

- 位置推定精度

各手法における位置推定精度の観点から本研究で目標としている車線推定が実現可能であるかを評価する。本研究の目標としている位置推定精度の水準は、対象とする車両がどの車線を走行したかを推定することである。

2.1 GPS を用いた位置推定

GPS (Global Positioning System) は、地球上を周回する約 24 個の GPS 衛星から電波を受信し、位置情報を取得するシステムである。GPS 単体の測位で発生する位置誤差を補正し、精度を向上させる技術として、DGPS (Differential GPS) や AGPS (Assisted GPS)、準天頂衛星を利用した位置測位技術が存在する。基地局が発信する FM 放送の電波から補正を行う DGPS に関しては、2008 年に民生用の配信が停止しているため、ここでは今後普及していくと考えられる AGPS と準天頂衛星を用いた位置測位技術について説明する。

AGPSは携帯電話の基地局からの位置情報を補正に利用することで精度を向上させており、近年普及率が高いスマートフォンなどの携帯端末に組み込まれている[12], [13]. AGPSはGPS単体よりも測位時間が短く、位置測位誤差は5~10mである。一方、準天頂衛星は特定の地域の上空を巡回する人工衛星であり、2010年には宇宙航空研究開発機構(JAXA)が国内初の準天頂衛星「みちびき」を打ち上げるなど、実用化が進みつつある[14], [15]. 準天頂衛星を利用した位置測位では、位置測位誤差が数m~数cmであることから[16], さらに高精度なナビゲーションなどの活用に期待されている。

しかし、これらの位置測位技術を用いて走行車線の推定を実現する際に、問題が生じると考えられる。まず、AGPSによる単独測位では前述の位置測位誤差から、車線推定の実現が困難であると考えられる。片側2車線道路における各車線の幅員は道路交通法により3m以上と規定されている[17]. 車線の幅員が3mである片側2車線道路において車線推定を行う場合、AGPSでは5~10mの誤差が発生するため、車線レベルで位置を推定することは困難である。準天頂衛星を用いた位置測位技術では、高精度な位置測位が可能であるため、走行した経路の位置を車線レベルで推定可能であると考えられる。しかし、準天頂衛星を用いた位置測位を行うためには専用のモジュールが必要であるため、普及している携帯端末などに内蔵されているGPSモジュールのままでは使用することができない。つまり、参加型センシングの観点から、様々なデバイスから豊富な情報を収集するためには、それらにモジュールを追加する必要があるため、導入コスト(普及率)の面で問題がある。また、AGPS単体による位置推定および準天頂衛星による位置推定のどちらの手法においても衛星からの電波を受信することが前提となっているため、都市部や山岳地、トンネル内などの受信環境が悪い場所では位置測位が行うことができない。

2.2 車載カメラを用いた位置推定

車載カメラを利用することで走行中の車両の位置を既存のGPSによる位置推定よりも高精度に推定する研究がある[18]. 文献[18]では画像のトラッキングを利用して走行している車線の領域を認識するM-CubITS(M-sequence Multimodal Markers for ITS)というシステムを応用して複数車線時における車両の位置推定を実現している。推定手順として、まず走行中に車両の位置情報を用いてデータベースに問い合わせることで走行している道路の車線数を取得する。取得した車線数の情報は、白線および隣接領域を認識する際に左右の領域における車線の有無を判定するために利用する。次に、走行中に車線の境界線となる白線と隣接領域(ガードレールや中央分離帯など)を認識することで車両の位置推定を実現している。そして、位置

推定精度向上のために、走行中の白線をまたいだことを認識することで車線変更を検知し、走行している車線を求めることで補正を行っている。この手法における車線認識の精度に関して、約40mの区間を走行した際の認識率を計測する実験を行っており、車線変更を行った際の認識率は96.19%と十分高い結果であった。

しかし、この手法により車線推定を実現するにあたって、車載カメラを用いた手法は多くの車両に設置するカメラの導入コストが大きいという問題があげられる。また、夜間や雨天時などの視界不良時において白線の認識ができない場合は車線の推定を行うことができないため、視界不良時におけるロバスト性(安定性)の向上が課題となる。

2.3 ログデータを用いた位置推定

文献[19]では、ドライブシミュレータを用いて、仮想環境下を走行した際に収集した車両の速度と周辺車両との車間距離のログデータを用いて車線変更時における走行軌跡の推定を行っている。走行軌跡の推定手順として、まず、仮想環境における事前の走行実験により、速度と前後左右4方向の周辺車両との車間距離のログデータを大量に収集し、運転者ごとの走行モデルを生成する。この走行モデルは、速度および周辺車両との車間距離の様々な組合せにおいて個々の運転者が描く走行軌跡の仮説群である。次に、車間距離のログデータを用いて認知的に危険な行動や車線変更が困難である状況を関数で表したハザードマップを生成する。そして、仮想環境下における本実験を行い、この実験で収集したログデータ(速度および車間距離のログデータ)と事前の実験で生成した走行モデル(仮説群)からハザードマップを用いてもっともらしい仮説を選択することで走行軌跡の推定を実現している。この手法の有効性を検証するために仮想環境下において収集したログデータを用いた評価実験を行っている。実験の結果、速度、および車間距離のログデータのみにより車両の走行軌跡を推定できていることが示されている。

しかし、この手法で用いる4方向の車間距離のログデータを実環境で収集するには専用機器の追加が必要であると考えられるため、導入コストの面で問題がある。また、推定を行うためには事前に収集したログデータから運転者ごとの走行モデルとハザードマップを生成する必要があり、その学習コスト(計算コスト)が大きい。

文献[20]では、自転車に設置したAndroid端末の内蔵センサ(加速度センサ、地磁気センサ、GPS)を利用することで走行中の情報を収集・共有する機構sBikeを提案している。この手法で推定する自転車の状態は、停止、直進、右折、左折、蛇行の5状態であり、まず、収集した走行ログデータを用いて各状態におけるセンサ値の変化を割り当て、学習データを作成する。そして、本走行実験で収集したログデータの走行状態を隠れマルコフモデルによる学習

表 1 各手法の利点・欠点

Table 1 Advantages and disadvantages of each method.

手法		導入 コスト	計算 コスト	ロバスト 性	位置推定 精度
GPS を用いた 位置推定	AGPS	○	○	×	×
	準天頂衛星	×	○	×	○
車載カメラを用いた 位置推定[18]		×	○	×	○
確率的手法を用いた 走行軌跡推定[19]		×	×	○	-
自転車走行状態推定[20]		○	○	○	-
先行手法[21]		○	○	○	×

○：可

×：不可

処理を施すことで走行状態を推定する。この手法では、加速度センサ、地磁気センサ、GPS といった普及率の高いスマートフォンに内蔵されているデバイスのみを用いて自転車の走行状態を実現しているため、システムを安価に導入可能である。また、得られたセンサデータのみを用いているため、車載カメラを用いた手法に比べて視界不良時でも安定した推定ができると考えられる（ロバスト性の考慮）。そのため、この手法の考え方を用いた車線推定手法が実現できれば、以上で紹介した関連研究の導入コスト、計算コスト、ロバスト性の問題を解決できると考えられる。

著者らの先行研究として、文献 [21] ではスマートフォンから収集したセンサログデータを用いることで計算コスト、ロバスト性を考慮した車線推定を実現している。文献 [21] の手法では、地磁気センサから得られる車体の方位ログデータを用いて車両が行った右左折、車線変更を検知し、その検知した情報から対象とする車両がどの車線を走行したのかを推定している。この右左折、車線変更は、各動作時に方位ログデータに現れる波形の変化を複数の閾値を設定することで検知している。しかし、道路の凹凸やエンジンの振動などの要因により、方位の波形には微弱な振動（ノイズ）が多く含まれていたため、車線変更の誤検知が多く発生していた。また、交差点付近において車線変更時に現れる波形に類似した波形が現れていたため、多くの誤検知が発生していた。そのため、推定精度の指標である正答率の平均が 67.5% と低い結果となっており、車線推定精度の向上に向けた車線変更検知精度の向上が研究課題としてあげられている。

2.4 問題点とアプローチ

本章で紹介した関連研究に関して、利点・欠点をまとめたものを表 1 に示す。

準天頂衛星の追加モジュールやカメラなどの専用機器が必要な手法においては導入コストの面で問題があり、文

献 [19] では、その手法を多くの運転者に適用させる際に計算コストが大きい点が問題であった。また、AGPS、準天頂衛星による位置推定手法および車載カメラを用いた手法 [18] では劣通信環境や視界不良時におけるロバスト性の考慮が課題としてあげられていた。そこで、これらの導入コスト、計算コスト、ロバスト性の問題を解決するアプローチとして、スマートフォンに内蔵されているセンサを用いて車線推定を実現する。スマートフォンは十分な普及率があり、加速度センサや地磁気センサといった様々な種類のセンサが組み込まれている。そのため、車線推定にスマートフォンを用いることで車載カメラを用いた手法 [18] に比べて導入コストが軽減され、天候や時間帯などの外的要因に左右されないセンサデータを用いることでロバスト性の問題が解決できると考えられる。そして、収集したセンサログデータのみから車線推定が実現できれば文献 [19] の手法の計算コストの問題を解決できると考えられる。

また、AGPS 単体での位置推定や先行手法 [21] では位置推定精度の面で問題がある。特に文献 [21] の手法では、道路の凹凸などによるセンサ波形のノイズや交差点付近での車線変更の誤検知により車線推定精度が低かった。そこで、本論文では精度向上の課題解決に向けて、センサ波形に含まれるノイズの除去および交差点付近の車線変更検知の補正について検討を行った。ノイズ除去処理および車線変更検知に関する補正処理についてはそれぞれ 3.4.1 項、3.5 節でその詳細を説明する。

以上より、スマートフォンのセンサログデータを用いて車線推定を行うことで既存研究の問題が解決できると考えられる。また、推定結果である走行情報をログデータとして大量に収集・蓄積することでその情報を集合知として扱うことができ、様々なサービスへの活用が期待できる。車線推定の精度に関して、準天頂衛星やカメラを用いた手法のように道路上の走行位置を正確に求めるのではなく、本研究では車両の走行した車線を推定することを目的とする。

3. 提案手法

3.1 システム構成

提案するシステムの構成を図 1 に示す。

本システムは、ログデータ収集システムと車線推定システムから構成される。ログデータ収集システムは、スマートフォンに内蔵されている加速度センサ、地磁気センサおよび GPS を利用し、車内にスマートフォンを設置して走行することで走行中の車両の加速度、方位、位置情報（緯度、経度）をログデータとして収集する。車線推定システムは、収集した走行ログデータから右左折を行った地点と車線変更を行った地点をそれぞれ検知し、その結果をもとに走行した車線を推定する。

本システムにおける処理手順を図 1 に示す流れに沿って説明する。まず、スマートフォンを車内に設置してログ

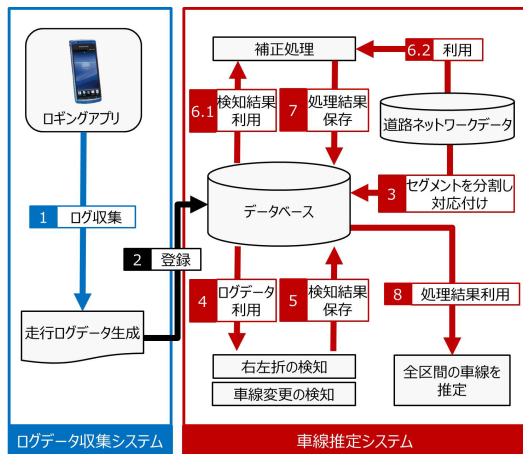


図 1 提案システムの構成
Fig. 1 An overview of the proposed system.

ングアプリケーションを起動しながら走行することで走行ログデータを収集する (1)。収集した走行ログデータは端末内に保持し、走行後にデータベースに登録する (2)。車線推定の前準備として、道路ネットワークの各セグメントを分割したテーブルを生成し、データベースに登録する (3)。そして、走行ログデータを利用して右左折と車線変更の検知を行い (4)、検知した地点を分割したセグメントの属性データとしてデータベースに再度保存する (5)。右左折、車線変更検知の際にはセンサログデータに含まれるノイズの除去処理を行う。このノイズ除去処理に関しては、3.4.1 項で説明する。次に、検知した車線変更に含まれる誤検知を除去する補正処理を行い (6.1, 6.2)、その処理結果をデータベースに保存する (7)。この補正処理の詳細については 3.5 節で後述する。そして最後に、(7) の処理結果を利用し、全区間の車線を推定する (8)。提案システムの中でも重要となる右左折、車線変更検知処理および車線推定の処理の流れについて以下で説明する。

3.2 車線推定

車線推定システムにおけるデータベーステーブルと処理手順について図 2 に示す。

車線推定システムは道路ネットワークデータと収集したログデータおよび推定結果を格納するためのデータベースで構成されている。道路ネットワークデータはオープンソースである OpenStreetMap [22] を利用し、構築した。提案手法では、道路セグメントテーブルに車線数が道路属性として格納されていることを前提としている。OpenStreetMap はだれもがデータを編集・追加可能であるため、地図データの更新頻度が高く、道路属性の追加を柔軟に行うことができる。そのような特徴から、既存のナビゲーションサービスや研究レベルにおいても広く利用されている [23], [24], [25]。現状の OpenStreetMap には車線数の属性が存在しないが、今後様々な道路属性が追加されていくことを想定し、今回

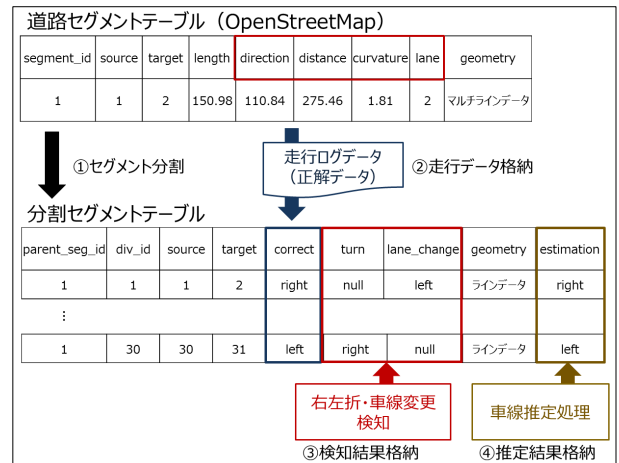


図 2 データベーステーブルおよび処理手順
Fig. 2 Database tables and the processing flow.

は道路セグメントテーブル (図 2) の枠線部 (direction: 方位, distance: 経路長, lane: 車線数) を手入力で追加したものを用いた。道路セグメントテーブルに格納されている道路データは、実際の道路に存在する交差点を基点とし、それらの点を結んだ道路セグメント群により構成されている。そして、その点と点の間で湾曲している地点をさらに細かな基点とし、その点が道路セグメントテーブルの中にマルチラインデータとして入れ子構造で道路データが格納されている。車線推定を行う際は、この道路セグメントテーブルのうち走行した道路セグメントを一定距離で分割した分割セグメントテーブルを生成し (図 2 ①)、走行データ (図 2 ②)、検知結果 (図 2 ③)、推定結果 (図 2 ④) を各属性に格納していくことで推定を行う。

本節では、3.1 節で述べた車線推定システムの中でも最も重要となる右左折の検知、車線変更の検知、および検知結果を利用した車線推定について説明する。また、具体的な車線推定処理手順については 3.3 節で述べる。

3.2.1 右左折検知

右左折の検知は車両に固定されているスマートフォン内蔵センサにより収集した加速度センサ、地磁気センサのログデータを利用して行う。加速度センサは端末の瞬間的な速度の変化量を取得できる。地磁気センサは端末の傾きに応じて 0 度~359 度の方位角が取得できる。なお、用いる地磁気センサは車体の方位角を取得するものであるため、以後では方位センサと記述する。右左折を行う際に車体の向きが大きく変化するとともに、車体の横向きに速度の変化が現れると考えられる。この横向きの速度変化と車体の向きの変化をそれぞれ加速度センサ、方位センサで検知することで右左折の検知を行う。また、GPS からの位置情報と道路データとのマッチングにより右左折を検知した交差点を特定し、結果をデータベーステーブルに格納する。右左折検知結果の車線推定への利用方法については 3.2.3 項で述べ、詳細な検知方法については 3.4.2 項で述べる。

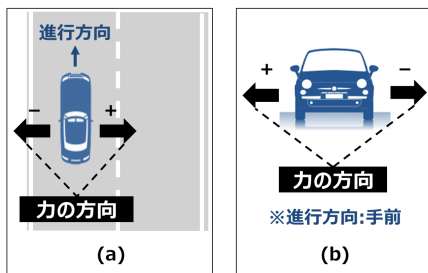


図 3 車体に加わる力の方向

Fig. 3 Directions of a force that acts on a vehicle.

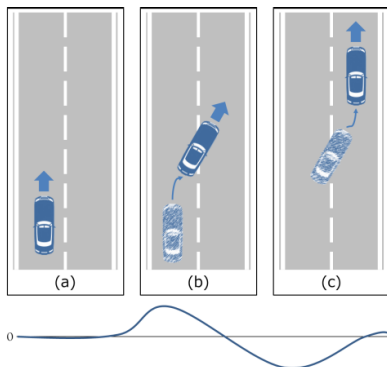


図 4 車線変更時における車体の向きの変化

Fig. 4 The change of direction of a vehicle at lane change.

3.2.2 車線変更検知

車線変更は右左折検知と同様に加速度ログおよび方位ログの変化量から検知する。加速度，方位センサから取得する力の方向を図 3 に示し，車線変更時の車体の向きの変化を図 4 に示す。

加速度および方位センサから図 3 に示す進行方向に垂直であり (図 3 (a))，路面に垂直 (図 3 (b)) な方向の力を取得し，取得したセンサ値を用いて車線変更を検知する。図 4 の上部には車線変更時の車体の向きの変化を，下部にはそれともなう力の変化をグラフで示している。車線変更時における車両の動きとして，道路と並行に走行している状態 (図 4 (a)) から車体に変更先の車線へ傾き (図 4 (b))，車線変更後に再び道路と並行に車体を戻す (図 4 (c)) という特徴がある。加速度および方位センサから図 3 に示す進行方向，道路に垂直な方向の力を取得したとき，車線変更時には図 4 下部に示すような正弦波 (図 4 と逆方向への車線変更時には余弦波) が現れると考えられる。そのため，走行中に取得した加速度，方位センサの垂直成分からこの正弦波 (余弦波) を検知することで車線変更の検知を行う。車線変更検知結果の車線推定への利用方法について 3.2.3 項で述べ，詳細な検知方法については 3.4.3 項で述べる。

3.2.3 右左折，車線変更の検知結果利用法

本論文では想定環境の道路における車線数を片側 2 車線と片側 1 車線の 2 つに限定し，右左折は交差点のみで行われるものとする。交差点の形状は次の 3 種類を想定する。

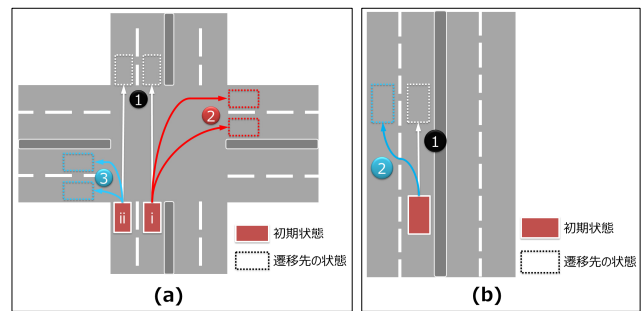


図 5 道路状況別の車両の動作 (a: 2-2 交差点, b: 片側 2 車線道路)

Fig. 5 Behaviors of a vehicle in typical road situations (a: 2-2 intersection, b: four-lane road).

- 2-2 交差点
片側 2 車線と片側 2 車線の交わる交差点
- 2-1 交差点 (1-2 交差点)
片側 2 車線と片側 1 車線の交わる交差点 (交差点進入時に走行している車線数が 2 車線の場合は 2-1 交差点, 1 車線の場合は 1-2 交差点とする)
- 1-1 交差点
片側 1 車線の交差点と片側 1 車線の交わる交差点

これらの交差点形状に加えて，交差点に進入する際の自車両の車線を考慮した場合，2-2 交差点では 2 つ，2-1 交差点では 2 つ，1-2 交差点では 1 つとなり，全部で 6 つの条件が考えられる。例として，図 5 の (a) に 2-2 交差点進入の際の条件を示す。

2-2 交差点 (図 5 (a)) の場合，まず進入する際の車線が右車線と左車線の 2 つの条件に分けられる。そして，各条件での交差点進入後の動作が限定される。たとえば，進入の際の車線が右車線であればその状態から左折することはないため，直進または右折の 2 択になる。同様に進入の際の車線が左車線であれば，直進または左折の 2 択に限定される。そして，この性質を考慮することで，右左折以前の車線が推定できる。つまり，右折以前に走行していた道路が片側 2 車線道路であった場合，その車線は右車線と推定し，左折以前は左車線と推定できる。

次に，車線変更の際の条件として，車線変更を行うのは直進道路に限定される。直進道路とは右左折が不可能であり直進することしかできない道路を指す (湾曲している道路も含む)。そして，直進道路を走行している際の車線によって次の車両の動作が限定される。直進道路における車両の条件として，片側 2 車線の場合の右車線および左車線走行時が考えられる。車線変更を行った地点が分かれば，その地点を起点として前後の走行車線が推定可能である。たとえば，図 5 (b) の ② の車線変更が検知できた場合，検知前は「左車線」，検知後は「右車線」と推定できる。

以上より，片側 2 車線以下の交差点および直進道路において右左折，車線変更を検知することができれば，検知結果から相対的に走行車線を推定することができる。

3.3 車線推定処理手順

車線推定は次の手順で行う。

- (i) 走行中に右左折，車線変更を監視する。
- (ii) 右左折をした時点で遡って車線推定を行う。
- (iii) (i), (ii) を終点の目的地まで繰り返す。
- (iv) 終点に到着した時点で再び遡って車線推定を行う。

まず，走行中にセンサ値から右左折，車線変更を監視し，車線変更を検知した地点を保持する (i)。走行中に右左折を行ったタイミングでその右左折と検知した車線変更の結果を利用し，走行した車線を遡って推定する (ii)。なお，遡る区間は右左折を行った地点から出発点となる始点または，直前に右左折を行った地点までである。(i), (ii) の処理を目的地となる終点まで繰り返し (iii)，終点に到着した時点で再び遡って車線推定を行い (iv)，全区間の推定を完了する。先行手法 [21] における車線推定手順では，目的地となる地点に到達するまで車線推定が行えず，走行後のログ解析処理による推定であった。これに対し，提案手法では右左折を行ったタイミングで車線推定を行うため，そのつど車線情報を得ることができる。

右左折，車線変更検知結果および車線推定結果は車線推定システム内のデータベースに格納される。このとき，走行した道路を 5m ごとに分割した分割道路セグメントを生成し，分割した各セグメントに車両の動作（直進，右折，左折，車線変更）および推定結果を格納する。道路セグメントの分割幅が 5m である理由として，一般的な自動車の車体長は 5m 以下であること [26]，また，時速 60km で走行した際の 1 秒あたりに進む距離は約 16.7m であるため，車線推定結果の活用を考えた場合，5m 間隔での推定結果があれば十分活用可能であると考えられるためである。

3.4 検知処理

実際に走行した際に収集したログデータから，右左折および車線変更の検知について検討を行った。走行ログデータの調査のための予備実験について 3.4.1 項で説明し，その結果を受けて 3.4.2 項，3.4.3 項で右左折，車線変更の検知方法について検討を行った。

3.4.1 予備実験

右左折，車線変更検知のためのログデータの特徴量について調査し，詳細な検知手法の検討を行った。

ログデータ収集にあたって，Android 端末でロギングアプリケーションを実装した。スマートフォンを図 6 のように画面が正面を向くように車内前方のダッシュボードに設置し，走行した際の 3 軸加速度，3 軸方位，GPS の補測値（緯度，経度，高度，速度，方位）を 20 ミリ秒間隔で記録した。

また，記録したログ波形にはエンジンの振動や道路の凹凸により小さなノイズが含まれていたため，分析を行う前にローパスフィルタを用いてノイズ除去処理を行った。



図 6 スマートフォンの設置方法

Fig. 6 The image of a smartphone mounted on a car for the experiment.

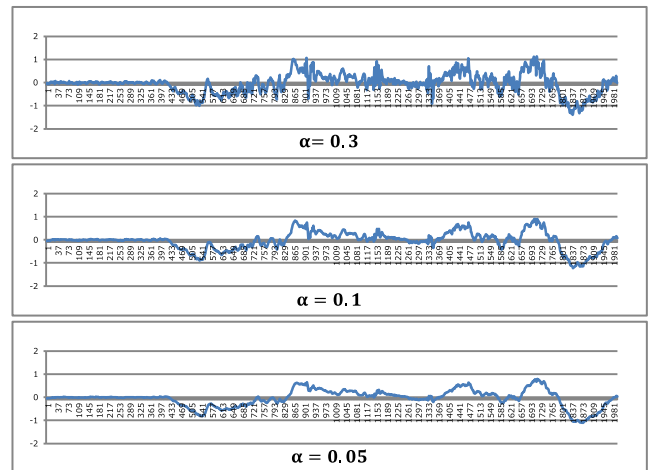


図 7 加速度波形におけるローパスフィルタの処理結果

Fig. 7 Results of acceleration waveform with low-pass filter.

ローパスフィルタとはある周波数信号の低域周波数のみを通過させるフィルタであり，今回は式 (1) に示すフィルタを用いてノイズ除去を行った。なお，式 (1) における， α はフィルタの強度を， $x[i]$ ， $y[i]$ はそれぞれ時刻 i における入力，出力を示している。

$$y[i] = \alpha \cdot y[i - 1] + (1 - \alpha) \cdot x[i] \quad (1)$$

ここで，強度 α の設定に関して予備実験を行った。予備実験では 50 Hz のサンプリングレートで取得した加速度に対し， $\alpha = 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ の 5 つの場合におけるフィルタ処理を行った際の波形の特徴について比較を行った。その結果， α の値が小さくなるにつれて波形の高周波成分が除去され，曲線が滑らかに整形されていることが分かった。しかし， α の値が小さくなるのと同時に波形に遅延が発生し，変化量も減衰してしまうという傾向が見られた。例として， $\alpha = 0.05, 0.1, 0.3$ におけるセンサ波形を図 7 に示す。なお，図 7 における縦軸と横軸はそれぞれ加速度 (m/s^2)，時刻 (msec) を表している。

右左折，車線変更の検知を実現するにあたって，波形に遅延や減衰が大きいと検知できない場合があると考えられる。そのため， $\alpha = 0.1$ の場合において高周波成分の除去が十分であり，遅延および減衰が過剰にならない値であったため，本手法ではフィルタの強度を $\alpha = 0.1$ に設定した。

次に，右左折および車線変更時の各センサログの波形の分析を行う。まず，右左折時における加速度センサおよび

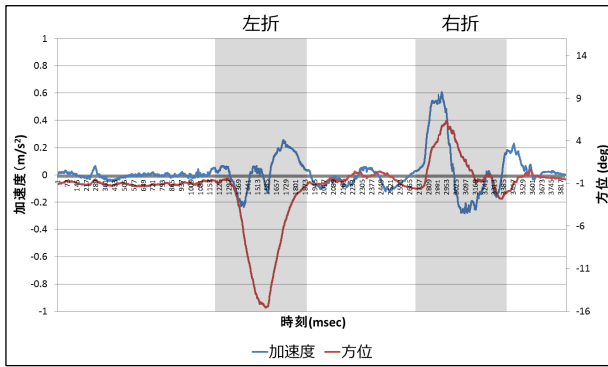


図 8 右左折時の加速度, 方位の波形

Fig. 8 Characteristic patterns of acceleration and direction sensor data at left or right turn.

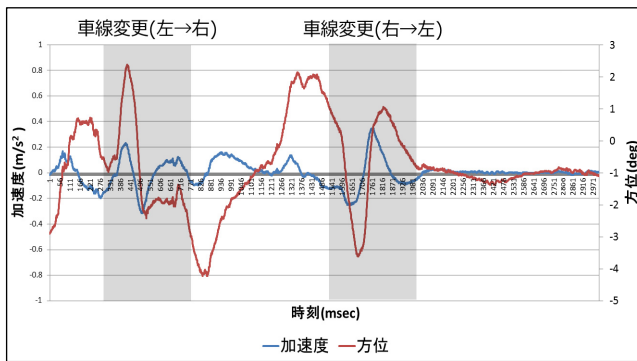


図 9 車線変更時の加速度, 方位の波形

Fig. 9 Characteristic patterns of acceleration and direction sensor data at lane change.

方位センサの値をローパスフィルタにより整形した波形を図 8 に示す。

図 8 のグラフの縦軸はセンサ値の変化量を、横軸は時刻を表しており、影部が右左折を行ったタイミングを表している。縦軸のうち、左軸は加速度センサの値を、右軸は方位センサの値をそれぞれ m/s^2 , degree で示している。また、図中の青線が加速度の値の変化を、赤線が方位の値の変化を表している。なお、加速度および方位センサから取得した値の軸方向は図 3 に示した力の方向と同じ方向である。グラフから分かる通り、右折を行った際には各センサの値が正の方向へ、左折を行った際には負の方向へ値が変化している。したがって、各センサの変化量に対して右左折の閾値を設け、この変化を検知することで右左折の検知を行う。

車線変更時における加速度センサおよび方位センサの値をローパスフィルタにかけたものを図 9 に示す。

図 9 のグラフでは図 8 のグラフ同様、縦軸は各センサ値の変化量を、横軸は時刻を表しており、影部が車線変更を行ったタイミングを表している。また、各センサ値の表示も同様に、青線が加速度の値の変化を、赤線が方位の値の変化を表している。車線変更時の車両の動きの特徴として、3.2.2 項で述べたとおりセンサの波形に正弦波または余

弦波が現れている。つまり、この正弦波(余弦波)を検知することで車線変更の検知を行う。

3.4.2 右左折検知処理

予備実験の結果から、右左折検知の処理について検討を行った。予備実験から、方位センサおよび加速度センサにおいて、右折の際には各センサの値が正の方向へ、左折の際には負の方向へ値が変化することが分かった。したがって、各センサの値がある一定以上増加していれば右折、逆に一定以上減少していれば左折を検知する。

具体的な検知方法について説明する。まず、右左折の時間窓 T_t (sec) を設け、ローパスフィルタをかけた加速度ログおよび方位ログを時系列にスキャンしていく。スキャン時に時間窓内の加速度、方位センサログそれぞれの最大値 $amax_t$ (m/s^2), $dmax_t$ (deg) と最小値 $amin_t$ (m/s^2), $dmin_t$ (deg) を求め、右左折検知に用いる閾値 aT_t (m/s^2), dT_t (deg) と比較を行う。右左折検知を行う条件式を式 (2) に示す。

$$\begin{aligned} \text{右折: } & amax_t > aT_t \wedge dmax_t > dT_t \\ \text{左折: } & |amin_t| > aT_t \wedge |dmin_t| > dT_t \end{aligned} \quad (2)$$

3.4.3 車線変更検知処理

次に、車線変更の検知手法について説明する。車線変更時のログ波形として、図 9 に示したとおり正弦波または余弦波が現れる。具体的には、左車線から右車線への車線変更を行う場合には正弦波が、右車線から左車線への車線変更を行う場合には余弦波が現れる。つまり、ログ波形中に現れる正弦波および余弦波を検知することで車線変更を検知する。

詳細な検知手法について述べる。右左折検知同様、車線変更の時間窓 T_l (sec) を設け、ローパスフィルタをかけた加速度ログおよび方位ログを時系列にスキャンしていく。スキャン時に時間窓内の加速度、方位センサログそれぞれの最大値 $amax_l$ (m/s^2), $dmax_l$ (deg) と最小値 $amin_l$ (m/s^2), $dmin_l$ (deg) を求め、車線変更検知に用いる閾値 aT_{l1} (m/s^2), dT_{l1} (deg) と比較を行う。また、正弦波・余弦波のより正確な波形を検知するために、1 周期の末端部において値が 0 に近似する特徴の検知も行う。正弦波の場合は最小値の後の時間窓内における最大値を、余弦波の場合は最大値の後の時間窓内における最小値を基準値 $astd_l$ (m/s^2), $dstd_l$ (deg) とし、閾値 aT_{l2} (m/s^2), dT_{l2} (deg) との比較を行う。例として、車線変更検知時の加速度センサの波形と各パラメータについて図 10 に示す。

図 10 に示す条件を満たす波形が加速度ログに現れた場合は、その波形を正弦波・余弦波と認識し、求めた最大値・最小値をそれぞれ極大値・極小値とする。また、ログ波形中に現れる最大値・最小値を時系列で比較し、最大値が先に現れた場合は正弦波を、最小値が先に現れた場合は余弦波を検知する。車線変更検知に用いる条件を式 (3) に示す。

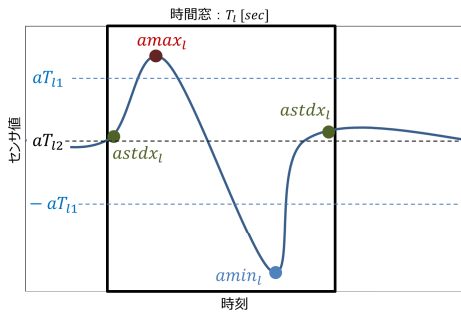


図 10 車線変更検知時の各パラメータ

Fig. 10 Parameters for detecting lane change.

なお、式 (3) の上段が加速度ログからの検知を、下段が方位ログからの検知を示している。

$$\begin{aligned}
 & (amax_l > aT_{l1} \wedge |amin_l| > aT_{l1} \wedge |astd_l| > aT_{l2}) \wedge \\
 & (dmax_l > dT_{l1} \wedge |dmin_l| > dT_{l1} \wedge |dstd_l| > dT_{l2}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

3.5 車線変更検知結果の補正

先行手法 [21] では、交差点付近における車線変更の誤検知が多く、それが原因で全体の車線推定精度も低いという結果であった。そこで、その車線変更の誤検知を取り除き、車線推定精度を向上させるために以下の3つの補正処理を行う。

- ① 道路交通法の規定に基づく補正
- ② 右左折検知結果の正確性に基づく補正
- ③ 車線数に基づく補正

各補正処理について説明する。まず①について、道路交通法において「交差点手前の車両通行帯において、30m以内は指定された車両通行帯を通行しなければならない」と定められている [27]。そのため、この道路交通法に基づき、交差点 30m 手前は車線変更を行わないものとし、もしこの区間で車線変更を検知した場合は、その検知を誤検知として除去する。

次に②について、車線変更の検知は右左折の検知に比べて波形の変化が微量であり、道路形状による類似した波形も発生する場合があるため、正確な検知が難しい。つまり、右左折の方が車線変更に比べて正確に検知できる。そのため、検知した右左折に矛盾する車線変更の検知は誤検知として除去する。例として、右折を行った交差点以前に走行していた経路は右車線であるという推定を行う際に、その経路内で右車線から左車線への車線変更の検知は矛盾することになる。つまり、このような場合には車線変更の検知をノイズとして除去する。

最後に③について、車線変更回数に矛盾した誤検知をノイズとして除去する。本論文では車両の走行環境を片側2車線以下の道路に限定しているため、同じ方向への車線変更を2回以上行うことは物理的に不可能である。そのため、片側2車線の直進道路内で同方向に2回以上車線変

更を検知した場合は2回目以降の検知を誤検知として除去する。

車線推定処理を行う直前に以上の3つの車線変更に関するノイズ除去処理を行うことで、先行研究 [21] の課題であった車線推定精度の向上を実現する。

① および②の処理はGPSによる位置情報から交差点の判別を行うため、GPSが正しく機能することが前提となる。GPS単体による位置推定では劣受信環境において位置測位が行えない問題があるため、これらの補正処理もそのような環境下では機能しないことが考えられる。しかし、GPSが正しく機能しない環境においてもセンサから車両の動作(右左折、車線変更)は検知可能であり、GPSが測位可能な環境に移動した際に得られたセンサ情報から車線情報を補完することができると考えられる。そのため、劣受信環境において位置推定を行うことができないGPS単体に比べて、提案手法は安定した推定が実現できる。

また、①、②の処理は右左折を行った交差点の30m以内で車線変更を行うことや、左車線から無理に右折を行うような違法運転者には適用できない処理である。しかし、大量の車両から車線情報を収集する場合、そのような違法運転者の占める割合は少ないと考えられる。本手法における推定した車線情報は集合知として大量に収集することを想定しているため、提案手法において対象とする車両は道路交通法の規定に従う違法運転者によるものとする。

4. 実験および考察

本章では、提案手法の有効性を検証するための実験と実験結果から得られた考察について述べる。実験では、提案手法における車線推定の精度を算出し、GPSとマップマッチングによる車線推定手法および先行手法 [21] との精度比較を行う。

4.1 実験環境

右左折、車線変更検知および走行区間の車線推定処理はJavaとデータベース接続のAPIであるJDBC (Java Database Connection) を用いて実装した。検知結果および推定結果は可視化や評価に利用しやすいように汎用性の高いマークアップ言語であるXML (Extensible Markup Language) を用いて出力するようにしている。扱う道路データに関して、位置情報および道路セグメントの長さ、方位はデータベースシステムのオープンソフトウェアであるPostgreSQLの地理空間情報を扱うための拡張機能であるPostGISを利用して定義している。セグメントの位置情報は線データ (MULTILINE)、中点の位置情報は点データ (POINT) であり、各地点の緯度、経度が格納されている。また、3章で述べたとおり、道路ネットワークはOpenStreetMapを利用して構築しており、追加した属性である経路長はPostGISのDistance関数を、方位は

表 2 実験パラメータ

Table 2 Parameters in the experiments.

右左折	方位閾値: $dmax_t, dmin_t$	1.0, 2.0, 3.0, ..., 20.0 (deg)
	方位時間窓: dT_t	3.0, 3.3, 3.6, ..., 5.7 (sec)
	加速度閾値: $amax_t, amin_t$	0.1, 0.2, 0.3, ..., 1.0 (m/s^2)
	加速度時間窓: aT_t	3.0, 3.3, 3.6, ..., 5.7 (sec)
車線変更	方位閾値: $dmax_t, dmin_t$	1.0, 2.0, 3.0, ..., 10.0 (deg)
	方位時間窓: dT_t	4.5, 4.8, 5.1, ..., 7.5 (sec)
	加速度閾値: $amax_t, amin_t$	0.1, 0.2, 0.3, ..., 1.0 (m/s^2)
	加速度時間窓: aT_t	4.5, 4.8, 5.1, ..., 7.5 (sec)

Azimuth 関数を利用し、算出した数値をそれぞれメートル単位、度単位で格納している。

4.2 車線推定精度評価

車線推定の精度評価実験を行うにあたって、まず試験データとなるログデータの収集を行った。用いるログデータは、片側 1 車線道路と 2 車線道路が混在する約 2~4 km の区間を実際に走行した際に収集した 10 個のログデータである。なお、10 個のログデータに含まれる片側 2 車線区間はのべ 22.3 km であり、この 22.3 km の区間における車線推定の精度評価を行った。また、走行経路における GPS の受信環境は良好であり、3.5 節で説明した 3 つの補正処理を行った際の推定精度を評価する。ログ収集の際には 3.4.1 項の予備実験と同様、図 6 のようにスマートフォンを画面が正面向きになるようにホルダに設置した。また、正解データの収集にあたって、GPS 内蔵の車載カメラを別途設置し、動画から右左折、車線変更を行った場所、タイミングを目視で確認し、正解データとした。

次に、右左折、車線変更のパラメータを表 2 に示す。なお、表 2 に示した各パラメータは、事前に 1 つのログデータに対して右左折、車線変更検知処理を行った際に良好な結果が得られたパラメータの近傍を選定したものである。

車線推定の評価を行う際に、3.3 節で述べたとおり、走行した経路を 5 m ごとのセグメントに分割し、各セグメントに推定結果（直進、右左折、車線変更のいずれか）を割り当てる。また、正解データも同様に分割したセグメントに割り当て、この正解データと推定結果を比較することで精度評価を行う。車線推定の評価指標に用いる正答率を式 (4) のように定義する。なお、正答率を $R_{correct}$ 、正解数を N_{cor} 、道路データの分割数を N_{div} とする。実験では表 2 のパラメータのすべての組合せについて車線推定処理を行い、正答率を算出した。

$$R_{correct}(\%) = N_{cor} / N_{div} \cdot 100 \quad (4)$$

実験結果について、まず右左折の各パラメータにおける組合せと正答率について集計した結果、パラメータによる大きな違いが見られなかった。そのため、実験結果の中で

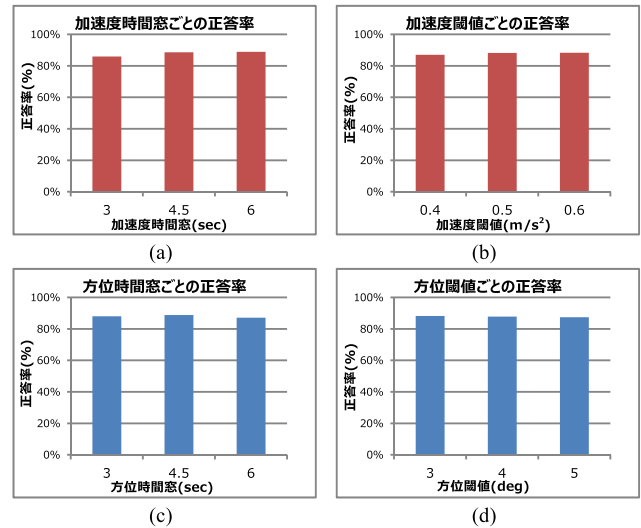


図 11 車線変更の各パラメータにおける正答率

Fig. 11 The rates of correct answers at each parameter of lane change.

表 3 提案手法における正答率が最大となった検知パラメータ

Table 3 Proposal method parameters when the correct rate become max.

右左折	方位閾値: $dmax_t, dmin_t$	15.0 (deg)
	方位時間窓: dT_t	4.5 (sec)
	加速度閾値: $amax_t, amin_t$	0.5 (m/s^2)
	加速度時間窓: aT_t	4.5 (sec)
車線変更	方位閾値: $dmax_t, dmin_t$	3.0 (deg)
	方位時間窓: dT_t	6.0 (sec)
	加速度閾値: $amax_t, amin_t$	0.6 (m/s^2)
	加速度時間窓: aT_t	6.0 (sec)

も車線変更の各パラメータについて、10 個のログデータの正答率の平均値の集計結果を図 11 に示す。なお、示した結果は加速度、方位の各パラメータの中でも正答率が高かったパラメータを選定し、集計を行ったものである。

図 11 の (a), (b) では、それぞれ加速度の時間窓、閾値ごとの正答率の平均を示しており、(c), (d) ではそれぞれ方位の時間窓、閾値ごとの正答率の平均を示している。グラフから分かるとおり、選定したパラメータのすべてにおいて正答率が 80% を超えており、全体の正答率平均は 87.3% という結果であった。また、表 3 に示す検知パラメータにおいて車線推定処理を行ったときに、正答率が最大となる 90.6% という結果が得られた。

車線変更の各パラメータと正答率に関して、まず加速度、方位の各閾値がそれぞれ 0.4, 0.5, 0.6 (m/s^2) のとき、3, 4, 5 (deg) のときを中心に正答率が高くなっており、その値から遠ざかるに従って徐々に正答率が低下していく傾向が見られた。また、右左折、車線変更の各時間窓に関しては、正答率との相関性が見られなかった。

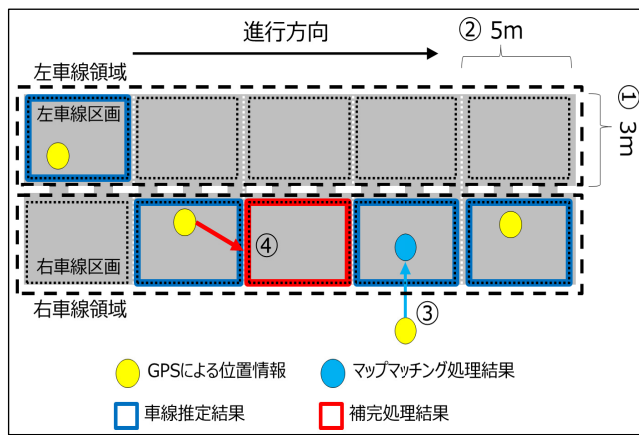


図 12 GPS とマップマッチングによる車線推定手順

Fig. 12 Lane estimation by using GPS and map matching.

4.3 既存手法との精度比較

提案手法の有効性を検証するにあたって、GPS とマップマッチングによる位置推定手法および先行手法 [21] を用いて車線推定実験を行い、提案手法との比較を行った。

まず、GPS とマップマッチングによる車線推定手法について推定手順を図 12 に示す。

一般的なカーナビゲーションシステムでは、GPS により取得した位置情報と地図データを対応付けるマップマッチング処理が施される。今回の実験では同様に、GPS による位置情報をマップマッチングにより誤差を補正する処理を追加した。

GPS とマップマッチングによる車線推定の処理手順として、まず走行した道路の中心線から 3m ずつのバッファ領域を設ける (①)。これは、2.1 節で述べたとおり、道路の幅員が 3m 以上と道路交通法で規定されているためである。この設けた幅 3m のバッファ領域を右車線領域、左車線領域とする。次に、走行した経路を 5m ごとのセグメントに分割する (②)。この①、② の処理で生成された 3m×5m の矩形を右車線区画、左車線区画とする。そして、各車線区画と GPS により取得した位置情報を参照し、GPS による位置情報が収まる車線区画を車線推定結果とする (図 12 青枠)。

次に、マップマッチング処理として、GPS による位置情報が車線領域外である場合は、最も近い車線区画に補正する (③)。また、GPS の測位間隔が長く、車線区画に対応する位置情報が存在しない場合がある。そのような場合は、時系列で直前の推定結果と同様の車線区画を推定結果とし、補完する (④)。以上の手順により、GPS による車線推定を完了する。なお、① のバッファリング処理は PostGIS の ST_Buffer 関数を利用して実現した。

先行手法 [21] の車線推定についても提案手法同様、走行経路を 5m ごとのセグメントに分割し、各領域における車線を推定する処理を実装した。先行手法 [21] における右左折、車線変更検知のパラメータは論文 [21] 中の実験で設定した最適パラメータを利用した。各手法における実験で用

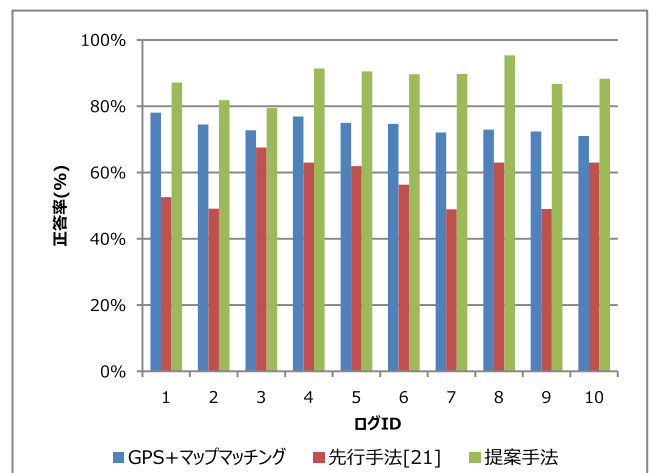


図 13 正答率の比較 (GPS とマップマッチングによる車線推定手法, 先行手法 [21], 提案手法)

Fig. 13 Comparison of the rate of correct answers (lane estimation by GPS and map matching, Previous work [21], the proposed method).

いるログデータおよび評価指標の正答率は 4.2 節の既存手法の精度評価と同様のもの (式 (4)) を用いる。

各手法を用いて車線推定を行った結果を図 13 に示す。

まず、GPS とマップマッチングによる車線推定結果について、正答率の平均が 74.03% という結果が得られた。次に、先行手法 [21] による車線推定結果について、正答率はログデータによって異なるが、全体の平均は 56.56% と比較的低い結果となった。この要因として、右左折の誤検知は両手法において発生しなかったが、車線変更の誤検知が提案手法に比べて先行手法 [21] で多く発生していたためであると考えられる。最後に、提案手法における正答率の平均は 87.10% であった。これらの結果から、GPS とマップマッチングによる車線推定手法および先行手法 [21] と比べて提案手法は正答率が高く、有効性が検証された。

4.4 考察

4.3 節の既存手法との精度比較により、GPS とマップマッチングによる車線推定手法および先行手法 [21] に比べて提案手法の有効性を確認することができた。GPS とマップマッチングによる車線推定について、2.1 節で述べたとおり GPS 単体による位置推定では、その位置測位誤差から車線レベルで位置推定を行うことが困難であると考えていたが、マップマッチング処理および補完処理を行うことで約 7 割の正答率が得られた。また、先行手法 [21] では右左折、車線変更の誤検知が多いために、車線推定精度が低かったと考えられる。その点、提案手法では入力として加速度センサを加え、ローパスフィルタの処理と車線変更検知に関する補正処理を新たに加えたことによって車線推定精度が向上したと考えられる。

GPS とマップマッチングによる位置推定手法および先

表 4 車線変更検知処理結果における分割表

Table 4 Contingency table in lane change detection.

		正解データ	
		車線変更	直進
検知結果	車線変更	TP	FP
	直進	FN	TN

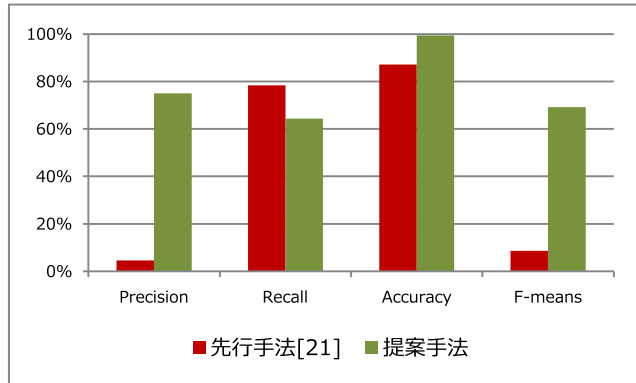


図 14 車線変更検知における性能比較結果

Fig. 14 The performance comparison of lane change detection.

先行手法 [21] に比べて提案手法は車線推定精度に優位性が見られたが、精度指標である正答率平均が 9 割程度であった要因について分析を行い、考察する。4.2 節で述べたとおり、正答率と右左折、車線変更の検知精度には関係性があるため、右左折に比べて検知精度が低かった車線変更の検知について分析を行った。車線変更を行う環境である直進道路において、検知処理時は 5m ごとに分割した各セグメントに「車線変更」または「直進」のどちらかが割り当てられる。分析ではその「車線変更」を *Positive* (陽性)、「直進」を *Negative* (陰性) とした 2 値の事象ととらえ (表 4)、正解データと検知結果における *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP), *False Negative* (FN) の各件数を集計した。そして、集計結果を利用し、学習性能の評価など [28], [29] で一般的に用いられる *Precision* (適合率), *Recall* (再現率), *Accuracy* (適中率), および *F-measure* (F 値) を算出し、結果について考察を行う (式 (5)~(8))。先行手法 [21] と提案手法における各性能指標の比較結果を図 14 に示す。

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

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

$$F\text{-measure} = 2 \cdot \frac{Recall \cdot Precision}{Recall + Precision} \quad (8)$$

まず、*Precision* (適合率) について、先行手法 [21] では 4.56% に対し、提案手法では 75.00% と大幅な向上が見られた。*Precision* は、正解に対する検知結果のばらつきを示

している。先行手法 [21] は提案手法に比べて直進地点を車線変更と誤検知した件数 (FP) が非常に多かったため、*Precision* が低下したと考えられる。その要因として、提案手法ではセンサ入力にローパスフィルタによる整形処理や車線変更検知に関する補正処理を追加したため、FP の件数が大幅に減少したと考えられる。

次に、*Recall* (再現率) の結果に関しては、*Precision* とは異なり、先行手法 [21] の方が提案手法に比べて高い結果となった。*Recall* は実際の車線変更回数に対して正しく検知された割合を示す指標である。この結果から、先行手法 [21] の方が提案手法に比べて実際の車線変更を漏れなく検知できていることを表している。しかし、前述のとおり、先行手法 [21] では FP の件数が非常に多く、正答率も低い結果であった。その結果の裏付けとして、*Precision* と *Recall* の調和平均を示す *F-measure* (F 値) を見ると、提案手法の方が高い結果であり、これは先行手法 [21] に比べて提案手法の安定性が向上していることを表している。

最後に、車線変更検知の正確さを示す *Accuracy* (適中率) について、提案手法の方が先行手法 [21] に比べて高く、99.48% という結果であった。これは、前述の考察で述べた理由から、提案手法における車線変更検知が先行手法 [21] に比べて正確に行えており、提案手法の方が有効であるといえる。

しかし、提案手法において FP (誤検知件数), FN (検知漏れ件数) が残存しており、さらに車線推定精度を向上させるためにはこれらの件数を減らす必要があると考えられる。そこで、FP, FN が残存する要因について、走行時にドライブレコーダで記録した動画や地図を用いて分析を行った。その結果、湾曲した形状の直進道路で FP が多いことが分かった。また、走行中に加減速を行った地点でも FP, FN が発生していた。そのため、これらの FP, FN の件数を減らすために道路の湾曲具合や速度変化を考慮した車線推定手法へと改良していく必要がある。また、実験で用いたログデータについて、収集時に利用した車両は 1 種類であり、1 人の運転者がすべて収集していた。提案手法における右左折、車線変更の検知は車両に設置したスマートフォンのセンサ値を利用しているため、車両の個体差や運転者の個人差に影響を受ける可能性がある。そのため、この個体差、個人差と提案手法の依存性について検証を行い、提案手法の実用性向上させていく必要がある。さらに、本手法で想定していなかった片側 3 車線以上の道路や右左折専用レーンといった特殊環境下における車線推定手法も今後検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、スマートフォンに組み込まれているセンサ機器を利用し、従来手法よりも低コストでロバスト性の高い車線推定手法を提案した。また、提案手法をログデータ

収集システム, 車線推定システムとして実装し, 車線推定結果の精度および車線変更検知の性能について実験, 評価, 考察を行った. 実験により, GPS とマップマッチングによる手法および先行手法 [21] に比べて提案手法の有効性を示すことができた.

今後は, 右左折, 車線変更の誤検知数をさらに減らすために, 湾曲した道路や走行中の速度に依存しないような改良手法を提案し, 車線推定精度を向上させていく. また, 車両の個体差および運転者の個人差が及ぼす提案手法への影響について調査を行う. そして, 片側 3 車線以上の道路や右左折専用レーンといった特殊環境下における車線推定手法も今後検討していく.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (23500093) の助成によるものである.

参考文献

- [1] 和田光示: プローブ情報システム (IPCAR) プロジェクト, 情報処理, Vol.43, No.4, pp.363-368 (2002).
- [2] 村田利幸: カーナビゲーションにおけるプローブ情報の活用, JACIC 情報, Vol.25, No.2, pp.57-60 (2010).
- [3] 植原啓介: プローブ情報システム: 車載センサを活用した環境情報の取得, 情報処理, Vol.51, No.9, pp.1144-1149 (2010).
- [4] 渡辺恭人: 交通の IT 化とプローブ情報の利活用, *CUC view & vision*, Vol.27, pp.43-47 (2009).
- [5] 森川高行: プローブ情報を活用した新しい道路交通サービスの可能性, システム制御情報学会誌, Vol.54, No.9, pp.366-370 (2010).
- [6] VICS Web Site, 財団法人道路交通情報通信システムセンター, 入手先 (<http://www.vics.or.jp/index1.html>) (参照 2011-07-31).
- [7] 柴崎裕昭: カーナビゲーションにおける ITS 対応の動向, 自動車技術, Vol.65, No.2, pp.80-83 (2011).
- [8] 前中一介: MEMS センサ MEMS 技術の動向と応用, 科学と工業, Vol.85, No.2, pp.57-67 (2011).
- [9] 植橋祥一, 岡崎浩司, 福田敦史: 携帯電話と MEMS 技術, マテリアルステージ, Vol.8, No.10, pp.28-33 (2009).
- [10] 安本慶一, アーメドアサド: Participatory Sensing の研究動向, 電子情報通信学会研究報告, 情報ネットワーク, Vol.111, No.245, pp.25-30 (2011).
- [11] 武山政直, 植木淳朗: 参加型都市センシングによる価値共創モデルの可能性, 情報処理, Vol.51, No.9, pp.1164-1170 (2010).
- [12] 森信一郎, 峰野博史: 携帯電話向け測位技術の動向サーベイと新技術の紹介, 情報処理, Vol.51, No.1, pp.43-46 (2010).
- [13] 関本義秀, Teerayut Horanont, 柴崎亮介: 携帯電話を活用した人々の流動解析技術の潮流, 情報処理, Vol.52, No.12, pp.1522-1530 (2011).
- [14] 準天頂衛星初号機「みちびき」, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 入手先 (http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index_j.html) (参照 2013-07-29).
- [15] 明神絵里花: いつでも, 「どこ」が正確に—準天頂衛星初号機「みちびき」によって変わる未来, 情報処理, Vol.52, No.8, pp.990-997 (2011).
- [16] 則島景太, 小熊 博, 山形文啓, 亀田 卓, 末松憲治, 高木直, 坪内和夫: 準天頂衛星による位置捕捉精度の検討, 情報処理学会第 75 回全国大会論文集, pp.203-205 (2013).
- [17] 道路交通法施行令第四条第一項三号, 内閣府, 入手先 (<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S35/S35SE270.html>) (参照 2013-07-31).
- [18] 西村明彦, 金 帝演, 長谷川孝明: 複車線における M-CubITS での車両位置特定について, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.33, No.6, pp.115-119 (2009).
- [19] 西脇由博, 宮島千代美, 北岡教英, 武田一哉: 確率的手法を用いた車線変更軌跡のモデル化, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.1, pp.131-140 (2010).
- [20] 齊藤裕樹, 菅生啓示, 間 博人, テープウィロージャナボン・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 (2012).
- [21] 牧野友哉, 伊藤嘉博, 中村嘉隆, 高橋 修, 白石 陽: スマートフォンを用いた車線推定手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム論文集, pp.1361-1374 (2012).
- [22] OpenStreetMap, available from (<http://www.openstreetmap.org/>) (accessed 2013-07-31).
- [23] Foursquare, Foursquare Labs, Inc., 入手先 (<https://ja.foursquare.com>) (参照 2013-07-31).
- [24] iPhone, Apple Inc., 入手先 (<http://www.apple.com/jp/ilife/iphoto/>) (参照 2013-07-31).
- [25] Redirected from Scholar Research, OpenStreetMap Foundation, available from (http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Scholar_Research) (accessed 2013-07-31).
- [26] CARS JAPAN Data base of car performance & specs, Cars Japan, available from (<http://cars.jpn.org/index.html>) (accessed 2013-07-31).
- [27] 道路交通法第三十五条, 内閣府, 入手先 (<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S35/S35HO105.html>) (参照 2013-07-31).
- [28] Powers, D.M.W.: Evaluation: From Precision, Recall and F-measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation, *Journal of Machine Learning Technologies*, Vol.2, No.1, pp.37-63 (2011).
- [29] 元田 浩, 津本周作, 山口高平, 沼尾正行: データマイニングの基礎, 株式会社オーム社 (2009).



牧野 友哉 (学生会員)

2012 年公立ほこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業. 現在, 同大学大学院システム情報科学研究科システム情報科学専攻修士課程在学中. モバイルセンシング, 高度道路交通システムの研究に従事.



伊藤 嘉博

2013 年公立ほこだて未来大学大学院システム情報科学研究科修了. 同年株式会社 NEC 情報システムズに入社. データベース, 歩行者ナビゲーションに関する研究に従事.



白石 陽 (正会員)

2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学。東京大学空間情報科学研究センター研究機関研究員，助手，助教を経て，2009年より公立はこだて未来大学助教，2011年より同大学准教授。博士（工学）。デー

タベース，高度交通システム，都市センシング，地理情報システムに関する研究に従事。電子情報通信学会，地理情報システム学会，ACM等会員。