

位置情報と速度情報の特性に基づくプローブデータ補正手法の検討

Repairing Floating Car Data Based on Location and Velocity Error Characteristics

赤井 優真^{†1}

廣森 聡仁^{†1}

梅津 高朗^{†2}

山口 弘純^{†1}

東野 輝夫^{†1}

Yuma Akai

Akihito Hiromori

Takaaki Umedu

Hirozumi Yamaguchi

Teruo Higashino

1. はじめに

近年、情報技術を活用することにより、安全かつ快適な道路交通環境を実現する高度交通システム (ITS: Intelligent Transportation Systems) について様々な研究開発が行われている。なかでも、GPS、速度センサ、方位センサなど様々なセンサを搭載したプローブカーと呼ばれる車両を走行させることにより、それらのセンサから得られる車両の位置や速度、進行方向などの多様な情報 (プローブカーデータ) を集約し交通状況などを推定するプローブカーシステムが注目されている。様々な車両をプローブカーとして利用し、それらが走行した場所についての情報を収集することで、固定センサの設置が必要となる従来の定点観測に比べ、低コストで広範囲の情報を収集できる。

プローブカーシステムの一つとして、2003年に本田技研工業株式会社により開発されたカーナビゲーションシステムであるインターナビが挙げられ、車両に搭載されたセンサにより収集された走行情報を定期的にサーバに送信するとともに、収集された情報を解析し VICS 情報として提供するシステムが実用化されている [1]。また、プローブカーデータに含まれる走行経路、速度から、現時点の道路混雑状況を推定する [2]、経路ごとに集約されたプローブカーデータの履歴を用いて、移動に要する時間を予測する [3]、災害時において、プローブカーデータに含まれる経路を、通行実績がある経路として提示する [4] など、プローブカーを活用した様々な取り組みがなされている。オランダの TomTom 社 [5] も自社のナビゲーションシステムを利用し、ヨーロッパ各国で 7 千万人を超える契約者からプローブカーデータを収集しており、このデータに基づいて得られた旅行時間履歴が交通傾向の解析や交通におけるボトルネックの識別に有効であることが示されている [6, 7]。

このようにプローブカーデータを活用することにより、様々な観点から交通状況を分析することができるが、基となるプローブカーデータに含まれる位置情報と速度情報は常に正確な値を示しているわけではない。例えば、一般的に位置情報はグローバル・ポジショニング・システム (GPS) によって取得されるが、ビルが密集する地域では GPS 衛星からの信号を正常に受信できないため、位置情報の精度が悪化することが多い。一般にデジタル道路地図は、交差点などの結節点とその間を繋ぐ道路リンクで表現されており、マップマッチングにより走行中の道路リンクを識別する方法も提案されており、実用的な精度が実現されているが、複数の車線が存在する場合の走行車線の識別や、道路に沿った前後方向の位置を正確に把握すること

は困難である [8]。また、一般的に速度情報はタイヤの回転数とタイヤ径から求められるが、タイヤ径はタイヤ自体の交換や車速などにより変化するため、正確な車速を測定できていないことも多い。このような誤った位置情報と速度情報は、サービスの質に影響を及ぼし、安全かつ快適な交通環境を十分に実現できない恐れがある。例えば、急ブレーキや急ハンドルの発生した箇所を交通事故が発生するリスクの高い場所として評価する取り組み [9] が為されているが、事故リスクの高い場所の判定や原因の解明には、精度の高い位置情報が求められる。また、道路の交通状況を推定する研究 [10, 11] では、プローブカーデータから得られた速度を、対象道路の交通状況を評価する代表値として扱っており、あるプローブカーの車速センサが小さめの速度を示しやすいのであれば、このプローブカーが走行した道路は全体的に進みづらい、すなわち混雑していると推定されることとなる。このように、プローブカーデータを利用する上で、位置情報や速度情報の精度を考慮することが望ましいが、プローブカーデータに含まれる情報の補正、特に速度情報の補正は、明瞭な異常値の除去やその補間 [12-14] に留まっており、時系列で多様な情報を有するプローブカーデータの特性を十分に活かしていない。

本研究では、より高精度なプローブカーデータを得るために、位置情報と速度情報の誤差特性、および直進道路や交差点といった走行道路に関する地図情報に基づき、プローブカーデータの位置情報、速度情報を補正する手法を提案する。この手法では、プローブカーデータが取得された状況に基づき、位置情報および速度情報いずれかの精度が高いと判断できる場合には、その情報には誤差がないものとし、他方の情報を補正する。例えば、上空が開けた高架上の道路であれば捉えられる GPS 衛星の数が多くなるため、位置情報の精度は高いと想定される。また、交差点における右左折時のように車両軌跡の線形が大きく変化する点では、マップマッチングの性質上、高精度に位置を把握することができる [15]。

次章以降の構成は以下の通りである。まず 2 章で関連する先行研究について述べる。次に 3 章でプローブカーデータ補正手法について説明する。最後に 4 章で本研究のまとめを述べる。

2. 関連研究

車両の位置を計測する際は、一般に GPS が利用され、地球を周遊する複数の GPS 衛星から送信される信号をユーザの持つ受信機で得ることにより 3 次元 (緯度、経度、標高) の測位を可能としている [16]。しかしながら、GPS の位置測位精度は受信機から捉えられる GPS 衛星の個数や、建物に反射した信号の影響 (マルチパスと呼ばれる) に大きく依存する [17] ため、走行位置の環境によっては大きな誤差が発生する可能性がある。走行環境による GPS 測位精度の違いを図 1 に示す。図 1 (a) の走行環境では周囲に建物が多いため、一部の GPS 衛星からの信号は建物に阻まれて捉えられなくなっているほ

^{†1} 大阪大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 滋賀大学 経済学部 情報管理学科

Department of Information Processing and Management, Faculty of Economics, Shiga University

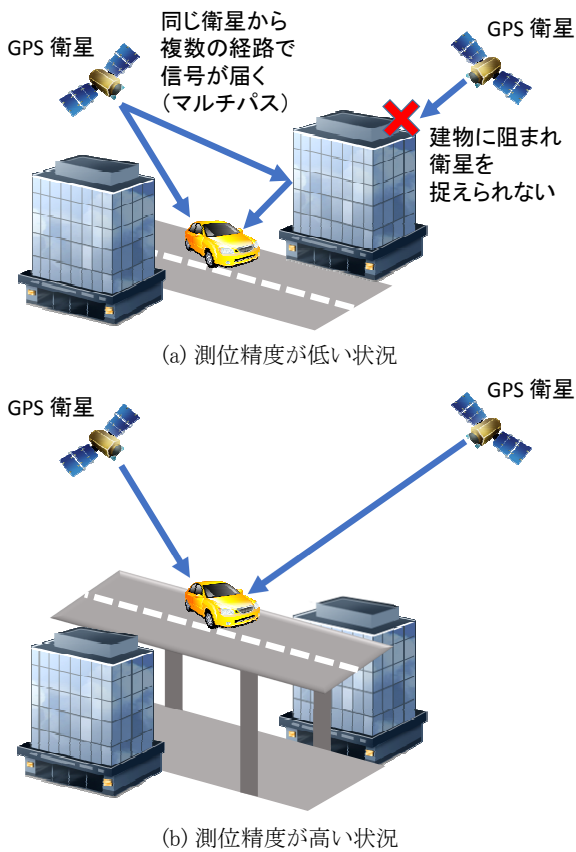


図 1 走行環境による GPS 測位精度の違い

か、捉えられている衛星についても信号の反射による影響が表れており、十分な測位精度が得られない。一方で (b) の走行環境では建物よりも高い位置にある道路を走行しているため、上空を遮るものがなく、複数の GPS 衛星から信号を受信でき、精度よく測位できる。

車両の速度は、一般に車速パルスを利用した車速センサにより計測される。車速パルスとはタイヤの回転数に比例して発生するパルス信号であり、車速センサは車速パルスとタイヤ径から車速を算出する [18, 19]。すなわち、タイヤが 1 回転するとタイヤの外周分だけ車両が前進することを利用して、単位時間当たりのタイヤの回転数 (車速パルスの発生数) とタイヤの外周を乗じることで車速を計算している。文献 [18] では、車速センサにより計測された速度に含まれる誤差には、スリップや路面の凹凸等の路面状況に起因する誤差と、主に車両特性に起因する誤差が含まれるとしている。後者の原因としては、ホイールベース (前輪の軸と後輪の軸との距離) の影響や車速パルスの分解能が挙げられるが、特に大きな原因となるのがタイヤ径の影響である。前述の通り、車速は車速パルスとタイヤの外周を乗じることで求まるが、タイヤの外周はセンサ側で標準値に固定されている。しかし、タイヤ径はタイヤの交換や速度などによって変化するため、センサの想定するタイヤ外周値と実際の外周値の違いが誤差として現れる。このように、車両特性に起因する誤差は、全車両に対して同様に表れるわけではなく、個々の車両や移動状況によってその影響が変化する複雑な誤差となっている。

以上のように、位置、速度情報ともに何らかの誤差を有するため、プローブカーデータの用途によっては十分な精度を確保することができず、補正が必要となる。以下、位置、速度情報それぞれについて既存の補正手法を紹介する。GPS による位置情報の補正に関しては、速度、加速度や進行方向など、他の車載センサから得られる情報を用いた自律航法 (デッドレコニング、以下 DR と呼ぶ) や、地図上の道路リンクと位置の対応付けを行うマップマッチングなど様々な補正手法が提案されている。DR は時系列の速度、加速度、進行方向情報により車両の移動軌跡を再現する手法であり、移動開始位置が正確に測位できていれば、以降の位置情報も精度よく再現できる [18]。マップマッチング [20–26] はカーナビゲーションシステムなどのナビゲーションや交通状況の推定などに必要不可欠であり、特に、位置情報が数十秒から数分単位でしか得られない場合は各点の間を繋ぐ経路が複数存在する可能性が高くなってマッチングが困難となるため、多くの手法が提案されている。三輪ら [20] は理論上の最短旅行時間や道路リンクの長さなどを指標にマッチング先の道路リンクを決定する手法を提案している。また、Hunter ら [21] は位置情報の列を動的ベイジアンネットワークで表現して最尤な経路にマッチングする手法を提案している。その一方で、数秒単位で継続的にデータを取得できる場合は DR を併用できるため、実用上不便の無い精度で道路リンク上に位置情報をマッチングできるようになっている [19]。現在はレーン単位でのマッチングを可能にするための研究が Rafael ら [22] によって進められている。

一方で、速度情報の補正に関しては、プローブカーデータを応用する上で不適切な異常値の検出および除去と、その結果生じる欠損の補間について研究が為されている。例えば、Chung ら [14] は個々の車両の継続的な軌跡を得る目的のために、長時間の停止や U ターンを検出して除去している。Yu ら [13] はデータの欠損を線形補間により補正する手法を提案しており、Zhang ら [12] は統計的な外れ値を異常値として除去し、リンクの接続関係に基づいて重みづけした速度で補正している。しかし、前述の通り車速センサによる測定値には車両特性に起因する誤差が含まれるが、これらの手法ではそれを軽減することはできていない。また、DR において利用される速度情報は十分に補正されたものではないため、速度情報の高精度化が位置情報の高精度化に寄与することも期待される。

3. プローブカーデータ補正手法

本研究で対象とするプローブカーデータは、現在普及しているカーナビゲーションシステムで収集可能なデータを想定する。各レコードは数秒単位の短い間隔で取得でき、1 つのレコードは少なくとも情報取得日時、位置、速度の情報を含む。位置情報に関しては、2 章で述べた通り、現在のカーナビゲーションシステムでは DR、マップマッチングによって実用的な精度で走行道路リンクの識別は可能であるため、本研究ではその道路リンクに沿った前後方向の位置を補正することを目的とする。そのため、位置情報は緯度、経度といった座標ではなく、先頭レコードが取得された位置からの累積移動距離で表わす。また、速度情報に関しては、路面状況に起因する誤差は既存手法 [12–14] により除去できているものとし、車両特性に起

因する誤差を補正することを目的とする。

以下、補正対象とするプローブカーデータ P を以下のように表現する。

$$P = \{(t_i, x_i, v_i)\}_{i=0}^n. \quad (1)$$

ここで、各 $i = 0, 1, \dots, n$ に対し、 t_i は情報取得日時、 x_i は位置情報、 v_i は速度情報を示す。位置情報 x_i は先頭レコードからの累積移動距離として表現する ($x_0 = 0$)。また、 P に含まれる全レコードはエンジンオフや道路リンク外（駐車場など）への離脱なく走行した一連の走行記録となっており、連続する2つのレコードの情報取得日時間隔は一定値 Δt である。

以上の前提の下で、以下に示すようなアイデアで、プローブカーデータの補正を行う。計測が誤差なく行われた場合、GPS から取得された位置情報から求めた移動距離と、速度情報を累積することにより求めた移動距離は一致するはずである。実際には位置情報、速度情報のどちらにも誤差が含まれるため、これらは必ずしも一致しないが、位置情報と速度情報はそれぞれ異なるセンサにより得られる情報であるため、誤差の現れ方にはそれぞれの特徴が存在すると考えられる。例えば、上空に障害物が少なく GPS の測位精度がよい道路では、位置誤差はほとんど存在せず、速度誤差のみが表れると考えられる。このように、それぞれの誤差特性を分析し、いずれかの誤差のみが観測される状況を探し出し、誤差を把握することで、位置情報、速度情報を一方ずつ補正していく。以後、位置から求めた距離を位置距離、速度から求めた距離を速度距離と呼ぶ。

3.1 位置距離および速度距離に基づいた誤差の算出

まず、補正対象となる位置情報 x_i 、速度情報 v_i は、それぞれ真値 \hat{x}_i, \hat{v}_i と誤差 $\varepsilon_i^{(x)}, \varepsilon_i^{(v)}$ の和として以下のように表現する。

$$x_i = \hat{x}_i + \varepsilon_i^{(x)}, \quad (2)$$

$$v_i = \hat{v}_i + \varepsilon_i^{(v)}. \quad (3)$$

この仮定の下で、プローブカーデータから計算可能な位置距離と速度距離を利用し、位置、速度情報の持つ誤差の影響を算出する方法を示す。プローブカーデータから位置距離 $L^{(x)}$ を求めると以下ようになる。

$$L^{(x)} = x_n - x_0. \quad (4)$$

一方、プローブカーデータの速度情報は時間的に連続でないため積分ができず、厳密には速度距離を求めることはできない。そこで、ここでは図2に示す台形近似によって速度距離を求める。台形近似による速度距離 $L^{(v)}$ は以下のように求められる。

$$L^{(v)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_{i-1} + v_i}{2} \Delta t \right). \quad (5)$$

いま、真の移動距離を $\hat{L} (= \hat{x}_n - \hat{x}_0)$ とすると、位置距離 $L^{(x)}$ と速度距離 $L^{(v)}$ はそれぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} L^{(x)} &= (\hat{x}_n + \varepsilon_n^{(x)}) - (\hat{x}_0 + \varepsilon_0^{(x)}) \\ &= \hat{L} + \varepsilon_n^{(x)} - \varepsilon_0^{(x)}. \end{aligned} \quad (6)$$

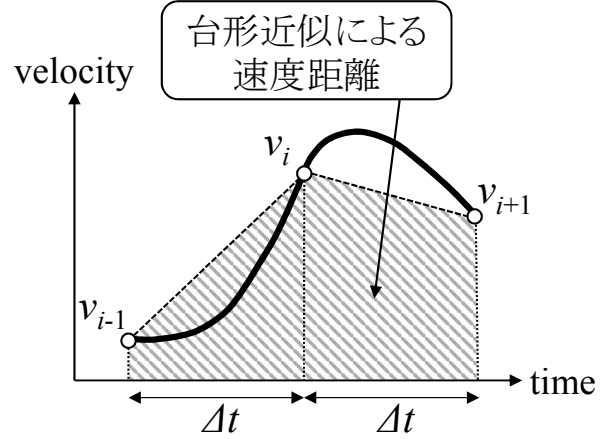


図2 台形近似による速度距離

$$\begin{aligned} L^{(v)} &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(\hat{v}_{i-1} + \varepsilon_{i-1}^{(v)}) + (\hat{v}_i + \varepsilon_i^{(v)})}{2} \Delta t \right\} \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{v}_{i-1} + \hat{v}_i}{2} \Delta t \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon_{i-1}^{(v)} + \varepsilon_i^{(v)}}{2} \Delta t \right) \\ &= \hat{L} + \zeta + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^{(v)} \Delta t - \frac{\varepsilon_0^{(v)} + \varepsilon_n^{(v)}}{2} \Delta t. \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 ζ は速度の真値によって台形近似した距離と真の距離との誤差（以後、台形近似誤差と呼ぶ）であり、以下のように表される。

$$\zeta = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{v}_{i-1} + \hat{v}_i}{2} \Delta t \right) - \hat{L}. \quad (8)$$

さらに、位置距離と速度距離の差は、

$$\begin{aligned} L^{(v)} - L^{(x)} &= \left\{ \hat{L} + \zeta + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{(v)} \Delta t - \frac{\varepsilon_0^{(v)} + \varepsilon_n^{(v)}}{2} \Delta t \right\} \\ &\quad - \left\{ \hat{L} + \varepsilon_n^{(x)} - \varepsilon_0^{(x)} \right\} \\ &= \zeta + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^{(v)} \Delta t - \frac{\varepsilon_0^{(v)} + \varepsilon_n^{(v)}}{2} \Delta t \\ &\quad - \varepsilon_n^{(x)} + \varepsilon_0^{(x)} \end{aligned} \quad (9)$$

となり、距離の真値が消えて位置および速度情報の誤差と、台形近似誤差のみが残る。よって、左辺をプローブカーデータから求めれば、右辺が示す誤差の影響を確かめられることがわかる。

3.2 位置誤差、速度誤差、台形近似誤差を無視できる状況

式(9)の右辺に表れる各項は、走行状況やセンサ性能などが特定の条件を満たしている条件下では無視できる程度に小さくなる可能性がある。一部の項を無視できれば、位置誤差、あるいは速度誤差の影響のみを残し、その情報を補正できると期待される。本節では、位置誤差、速度誤差、台形近似誤差の各誤差の特性を考慮し、式(9)の右辺に表れる各項を無視できる条件を検討する。

初めに、位置、速度情報が得られた経緯からわかるそれぞれの誤差の特徴を確認する。位置情報の誤差 $\varepsilon_i^{(x)}$ は、本来の測

定値である GPS 測位座標に DR, マップマッチングを施して道路リンク上にマッチングさせた結果と真の位置との差異を示す。そのため, GPS 測位による誤差, DR で用いられる速度や進行方向の誤差, マップマッチングで扱う地図情報の精度が複雑に関わり合い, 最終的な位置情報の誤差を系統的に説明することは困難である。一方, 速度情報の誤差 $\varepsilon_i^{(v)}$ については, 前述の通り路面状況に起因する誤差はすでに除去されており, 残る車両特性に起因する誤差はタイヤ径や車速パルスの性能に依存するため, 同一の車両であれば同じ傾向の値を示すと想定される [18]。

第 1 項 “ ζ ” は, 速度距離を求めるために台形近似を利用したことにより現れる誤差である。台形近似とは, 連続する 2 レコード間の速度変化が曲線的ではなく直線的であると考えて速度を時間積分した値といえる。すなわち, ある区間内で, 連続する 2 レコード間の速度変化が常に直線的であれば第 1 項は無視することができる。速度変化が直線的になるのは, 等しい加速度で加速, 減速している場合, あるいは等速走行 (加速度 0) している場合が挙げられる。また, 台形近似における各台形の高さを 0 に近づけたときの面積の極限が速度の積分となることから, レコードの収集間隔 Δt が十分小さければ無視できるといえる。

第 2 項 “ $\sum_{i=0}^n \varepsilon_i^{(v)} \Delta t$ ” は速度誤差の総和にレコード収集間隔を乗じたものとなっており, 速度情報の有する誤差の影響が強く表れる項となっている。そのため, 車速センサが非常に高精度であれば, 各 $\varepsilon_i^{(v)}$ をほぼ 0 とみなすことができ, 第 2 項を無視できる。それ以外に無視できる場合として, 車両が停止している場合が挙げられる。車両が停止している場合, タイヤが回転しないため車速パルスは発生しない。2 章で説明した通り, 車速センサでは車速パルスから得られるタイヤの回転数とタイヤの外周を乗じて車速を求めているため, その間の速度測定値 v_i は 0 となり, 真値との差もないため誤差 $\varepsilon_i^{(v)}$ も 0 で第 2 項を無視できる。

第 3 項 “ $-\frac{1}{2}(\varepsilon_0^{(v)} + \varepsilon_n^{(v)})\Delta t$ ” に現れる誤差も速度誤差であるため, 第 2 項と同じ条件下で無視することができる。また, 第 3 項に現れるのは先頭レコードと末尾レコードの速度誤差であるため, 例えば 1 回の発車から停車までを 1 つのレコード収集区間とすれば, 第 2 項を無視することは必ずしもできないが第 3 項を無視することは可能となる。

第 4 項 “ $-\varepsilon_n^{(x)}$ ”, 第 5 項 “ $\varepsilon_0^{(x)}$ ” は末尾レコード, 先頭レコードの位置誤差を示している。そのため, 位置情報が非常に高精度であれば, 両項とも無視できる。それ以外に無視できる場合として, マップマッチングが高精度に行われる場合が挙げられる。例えば, 図 3 に示すように, GPS 位置と DR によって得られた移動軌跡が直角に曲がるのは交差点での右左折であると考えられるため, 曲がる際のレコードを近傍の交差点の位置にマッチングすれば, その際の位置精度が高くなることわかる [15]。その他, 標高情報が得られるならば, 橋梁の前後や坂の頂上, サグ部などの勾配が変化する地点の位置情報は高精度と考えられる。このような点 (以下, 高精度マッチング点と呼ぶ) をレコード収集区間の先頭あるいは末尾にすれば, 第 4, 5 項のいずれかを無視することができる。また, レコード収集区間の走行距離が十分に長い場合は第 4, 5 項ともに無視

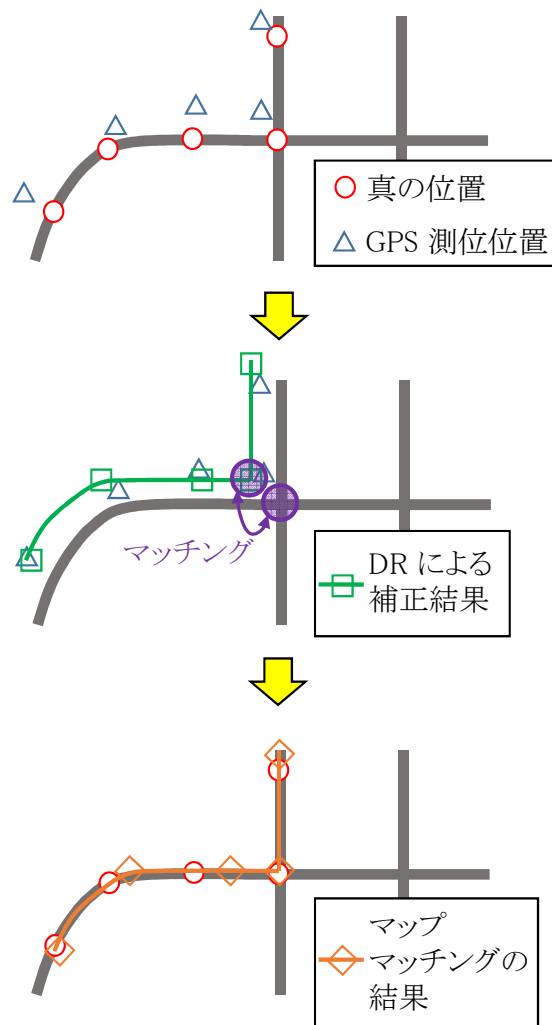


図 3 交差点右左折時のマップマッチング例

できる。これは, 第 2 項が区間全体を通じた総和となっているため, 走行距離が長いほど大きくなるのに対し, 第 4, 5 項の値は収集区間の走行距離の大小にかかわらず, 先頭, 末尾のレコードのみに依存することから, 走行距離が長くなるにつれて第 4, 5 項の値が相対的に小さくなっていくためである。速度誤差の値が正, 負双方で均等に分布していれば第 2, 3 項の値は 0 付近になってこの性質は利用できないが, 前述の通り, 車速センサによる誤差は同一車両であれば同じ傾向を持つため, この性質が成り立つと想定される。

3.3 走行環境や測定性能に応じた補正

本節では, 以上の検討に基づいた理想的な状況に対し, プローブカーデータから求められる位置距離と速度距離の差 $L^{(v)} - L^{(x)}$ を用いて位置, 速度情報を補正する手順を述べる。

3.3.1 速度情報が高精度に得られる場合

現実的にはまれであるが, タイヤのサイズが変わらず, 進行方向の変化も少ないなど, 車速センサの精度が高精度であれば, 測定された車速は真の値に十分近い値と考えられる。ここで, 補正対象となるプローブカーデータ P を連続する 2 レコードずつ n 個の区間 $P_i = \{(t_{i-1}, x_{i-1}, v_{i-1}), (t_i, x_i, v_i)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ に分割し, 各 P_i に対して位置距離と速度距離の差 dd_i を求め

ると、式(9)の第1項はレコード収集間隔 Δt が十分小さいと仮定して無視し、第2, 3項は速度情報が高精度であるため無視できるので、

$$dd_i \approx -\varepsilon_i^{(x)} + \varepsilon_{i-1}^{(x)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

となる。これにより、 $n+1$ 個の位置誤差を未知数とする連立方程式が得られるが、式は n 個しか存在しないため、このままでは解くことができない。ただし、1つのレコードの位置が高精度マッチング点であれば、そのレコードの位置誤差 $\varepsilon_i^{(x)}$ は0と考えられ、未知の位置誤差は n 個となって全ての位置誤差を求めることができるようになる。それらを測定位置 x_i から除去すれば、位置を補正できる。

3.3.2 位置情報が高精度に得られる場合

橋上や高架上のようにGPS衛星を捉えやすい上空が開けた道路など、位置情報が高精度であれば、測定された位置は真の値に十分近い値と考えられる。ここで、3.3.1節と同様に、補正対象となるプローブカーデータ P を連続する2レコードずつ n 個の区間 $P_i = \{(t_{i-1}, x_{i-1}, v_{i-1}), (t_i, x_i, v_i)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ に分割し、各 P_i に対して位置距離と速度距離の差 dd_i を求めると、式(9)の第1項はレコード収集間隔 Δt が十分小さいと仮定して無視し、第4, 5項は位置情報が高精度であるため無視できるので、

$$dd_i \approx \frac{\varepsilon_{i-1}^{(v)} + \varepsilon_i^{(v)}}{2} \Delta t \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

となる。これにより、 $n+1$ 個の速度誤差を未知数とする連立方程式が得られるが、式は n 個しか存在しないため、このままでは解くことができない。しかし、例えば先頭レコードが停車状態であったとすれば、3.2節で述べた通り、先頭レコードの速度誤差 $\varepsilon_0^{(v)}$ を0と考えることができ、未知の速度誤差は n 個となって全ての速度誤差を求めることができるようになる。それらを測定速度 v_i から除去すれば、速度を補正できる。

3.3.3 長距離の等速直進走行を行った場合

渋滞、カーブの少ない幹線道路や高速道路などであれば、ある程度長い距離を等速で走行できると考えられる。この場合における位置距離と速度距離の差 $L^{(v)} - L^{(x)}$ を求めると、式(9)の第1項は等速走行であるため無視でき、第4, 5項は長距離走行であるため相対的に小さくなって無視できるため、

$$L^{(v)} - L^{(x)} \approx \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^{(v)} \Delta t - \frac{\varepsilon_0^{(v)} + \varepsilon_n^{(v)}}{2} \Delta t \quad (12)$$

となり、速度誤差の影響のみが残る。速度誤差のうち、路面状況に起因する誤差は除去されていると仮定しているため、式(12)に現れた速度誤差は車両特性に起因する誤差と考えられる。さらに、2章で述べたように、この誤差の原因はタイヤ径による影響が強いため、等速直進走行時であれば速度誤差の値はほぼ同じ値 $\varepsilon^{(v)}$ になると想定される。この事実を利用すれば、式(12)を用いて速度誤差は以下のように求められる。

$$\bar{\varepsilon}^{(v)} = \frac{L^{(v)} - L^{(x)}}{n \Delta t} \quad (13)$$

この速度誤差を各レコードにおける速度 v_i から除去することで速度情報を補正できる。

位置情報については、先頭または末尾レコードの位置が高精

度マッチング点であれば、補正された速度情報を用いて再度DRを行うことで補正できる。等速で通過できる高精度マッチング点はまれであるが、比較的緩やかなカーブやY字型の三叉路を“Y”に対して上下方向に通過した場合、速度変化は小さいが進行方向の変化を見ることができるため、高精度にマッチングを行うことができると想定される。あるいはGPS信号の受信強度がわかるならばトンネル出入口や立体交差の下側などが高精度マッチング点として利用できると考えられる。

3.3.4 短距離の等速直進走行を行った場合

一般都市街路の多くをはじめとして、短距離であっても等速直進走行できる道路は多く存在する。3.3.3節では、ある程度長い距離を走行したと仮定したため位置誤差の影響を無視できたが、この場合は無視することができず、位置距離と速度距離の差 $L^{(v)} - L^{(x)}$ は以下ようになる。

$$L^{(v)} - L^{(x)} \approx n \bar{\varepsilon}^{(v)} \Delta t - \varepsilon_n^{(x)} + \varepsilon_0^{(x)} \quad (14)$$

この際、先頭および末尾レコードの位置が高精度マッチング点であれば、3.3.3節と同様に速度、位置の順で補正できる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、プローブカーデータの有する位置情報と速度情報に着目し、その特性を活用して情報を補正する手法について検討した。検討した手法では、位置、速度情報の有する精度やプローブカーの走行環境を考慮して補正状況を場合分けし、信頼できる情報を積極的に利用することで各情報を補正することとし、その理論的根拠について論じた。

今後は、検討した手法の有用性を確かめるため、実世界でのプローブカーデータを利用した評価実験を行う予定である。また、今回検討した手法では、一部の理想的な状況下にあるプローブカーデータの補正に止まっているため、多様な走行環境下のプローブカーデータを一括して補正できる手法の構築を目指す。例えば、蓄積したプローブカーデータから車速センサの車両特性に起因する誤差を速度や進行方向などの要因も考慮したモデルを構築し、個々の車両の速度誤差を走行状況によらず補正できる手法の構築などが考えられる。

謝辞 本研究は文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業 - 次世代IT基盤構築のための研究開発 - 「社会システム・サービスの最適化のためのIT統合システムの構築」(2012年度~2016年度)の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 今井 武, 柘植正邦, 菅原愛子: インターナビ・フローティングカーシステムと渋滞予測について, 国際交通安全学会誌, Vol.31, No.1, pp.39-45 (2006).
- 2) Honda Motor Corp: internavi (online). <http://www.honda.co.jp/internavi/> (2013.06.25).
- 3) Simroth, A. and Zahle, H.: Travel time prediction using floating car data applied to logistics planning, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.12, No.1, pp.243-253 (2011).
- 4) 秦 康範, 鈴木猛康, 下羅弘樹, 目黒公郎, 小玉乃理子: 新潟県中越沖地震における通れた道路マップの提供とプローブカー情報の減災利用実現に向けた課題と展望, 日本地震工学会論文集, Vol.9, No.2, pp.2.148-2.159 (2009).

- 5) TomTom International BV.: TomTom – At the Heart of the Journey (online). http://www.tomtom.com/en_gb/ (2013.07.23).
- 6) de Boer, G. and Krootjes, P.: The Quality of Floating Car Data Benchmarked – An alternative to roadside equipment?, *19th World Congress on ITS* (2012).
- 7) TomTom International BV.: TomTom News (online). <http://www.tomtom.com/news/category.php?ID=4&NID=1350&Year=2012&Language=1> (2013.07.23).
- 8) 渋谷奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬 洋, 小島祥子, 高橋 新: 車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.92, No.2, pp.215–225 (2009).
- 9) 樋口恒一郎, 益子輝男, 中嶋康博, 牧村和彦: ヒヤリハットデータを用いたアウトカム指標の一考察, *土木計画学研究・講演集* (CD-ROM), Vol.30, No.228 (2004).
- 10) de Fabritiis, C., Ragona, R. and Valenti, G.: Traffic estimation and prediction based on real time floating car data, *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.197–203 (2008).
- 11) Yoon, J., Noble, B. and Liu, M.: Surface street traffic estimation, *Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, Vol.11, No.13, pp.220–232 (2007).
- 12) Zhang, Z., Yang, D., Zhang, T., He, Q. and Lian, X.: A study on the method for cleaning and repairing the probe vehicle data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.14, No.1, pp.419–427 (2013).
- 13) Yu, L., Yu, L., Qi, Y., Wang, J. and Wen, H.: Traffic incident detection algorithm for urban expressways based on probe vehicle data, *Journal of Transportation systems engineering and information technology*, Vol.8, No.4, pp.36–41 (2008).
- 14) Chung, E., Sarvi, M., Murakami, Y., Horiguchi, R. and Kuwahara, M.: Cleansing of probe car data to determine trip OD, *21st ARRB Conference in Cairns, Australia*, pp.18–23 (2003).
- 15) 池田博榮, 小林祥延, 平野和夫: いかにしてカーナビゲーションシステムは実用化されたか, *Synthesiology*, Vol.3, No.4, pp.292–300 (2010).
- 16) Faouzi, N.-E.E., Leung, H. and Kurian, A.: Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges—A survey, *Information Fusion*, Vol.12, No.1, pp.4–10 (2011).
- 17) Meguro, J., Murata, T., Takiguchi, J., Amano, Y. and Hashizume, T.: GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.10, No.1, pp.22–30 (2009).
- 18) Skog, I. and Handel, P.: In-car positioning and navigation technologies – A survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.10, No.1, pp.4–21 (2009).
- 19) 角田政一: 移動体における高精度地図データの活用, *高度交通システム 2013 シンポジウム論文集*, Vol.2013, No.1, pp.43–60 (2013).
- 20) Miwa, T., Kiuchi, D., Yamamoto, T. and Morikawa, T.: Development of map matching algorithm for low frequency probe data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.22, pp.132–145 (2012).
- 21) Hunter, T., Abbeel, P. and Bayen, A.M.: The path inference filter: model-based low-latency map matching of probe vehicle data, *Algorithmic Foundations of Robotics X*, pp.591–607 (2013).
- 22) Toledo-Moreo, R., Bétaille, D. and Peyret, F.: Lane-level integrity provision for navigation and map matching with GNSS, dead reckoning, and enhanced maps, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.11, No.1, pp.100–112 (2010).
- 23) Griffin, T., Huang, Y. and Seals, S.: Routing-based map matching for extracting routes from GPS trajectories, *Proceedings of the 2nd International Conference on Computing for Geospatial Research & Applications*, Vol.24, pp.1–6 (2011).
- 24) Quddus, M.A., Ochieng, W.Y. and Noland, R.B.: Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.15, No.5, pp.312–328 (2007).
- 25) Ochieng, W.Y., Quddus, M. and Noland, R.B.: Map-matching in complex urban road networks, *Revista Brasileira de Cartografia*, Vol.2, No.55 (2009).
- 26) Lou, Y., Zhang, C., Zheng, Y., Xie, X., Wang, W. and Huang, Y.: Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories, *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pp.352–361 (2009).