

空間フィルタを用いた線路曲率照合による 自車位置検出システムの開発

原田 康平* 真木 康隆* 風戸 昭人* 石栗 航太郎*

Development of a Train Positioning System Using Track Curvature Collation Applied with Spatial Filtering

Kohei HARADA Yasutaka MAKI Akihito KAZATO Kotaro ISHIGURI

The train positioning system by means of the ATS beacon used in the tilting train requires sorting out the ATS beacon and updating the in-vehicle database according to the relocation of ATS beacons. Under the method proposed, track curvature data calculated by means of dividing the yaw rate of the carbody by the running speed are held as the on-board database, and the position of the train is detected based on the comparison with the track curvature data during running. In this case, applying a spatial filter improves detection accuracy and reduces database updating frequency. This paper presents the outline of the system and the detection accuracy.

キーワード：列車走行位置検出，線路曲率，空間フィルタ

1. はじめに

曲線区間を多く含む線区において、制御付自然振り子方式をはじめとする車体傾斜車両が広く導入され、速達性の向上に寄与している。これらは走行する線区の曲線の情報を車上側で保持しており、現在の自車位置と照合することにより、次の曲線へ進入する時機を予測することができる。これにより、曲線の進入・進出に合わせて車体の傾斜角を制御することで、曲線通過速度と乗り心地を向上させている。

多くの車体傾斜車両では、車軸に取り付けられた速度発電機の発生パルス、すなわち車輪の回転数から算出する移動距離の累積（以下、速発累積距離とする）を基準に自車位置を保持し、ATS 地上子を検出した際に、その地上子の地点情報により自車位置を補正している。

この ATS 地上子を用いた方式では、あらかじめ地上子の地点情報を車上のデータベースに登録し、実際の走行時に検出された地上子の位置と比較し、補正する。そのため、実際の地上子の設置位置に応じて車上データベースを正しく整備すれば、高精度に自車位置を検出できる。しかしながら、空転や滑走等により速発累積距離に大きな誤差が発生した場合は、検出すべき地上子の見落としが発生する。さらに、地上設備側の都合や安全性向上のために地上子の移設や増設が発生した場合も、補正の基準となる地上子を取り違えて検出する可能性があることから、その都度車上データベースの更新が必要となるという課題も存在する。

地上子のような地上設備に依存せず、自車位置を特定するための方法としては、GPS による位置情報を利用する方法と、車体のヨー角速度を走行速度で除して求める線路曲率を利用する方法が考えられる。

GPS はカーナビゲーションシステムや携帯電話等、多数の機器に搭載されている。絶対的な位置情報が得られ、周囲に遮蔽物がない場合など条件次第では非常に高い測位精度が得られる。しかし、ビルや山などの遮蔽物がある場合は測位精度が低下し、トンネルや地下区間では電波を全く受信できないという欠点がある。車体傾斜車両は、トンネルの多い山岳区間で運転されることが多いため、測位精度を常時維持するのは困難となる。また、GPS で得られる位置情報（経緯度）と線路上の曲線情報を紐付ける作業が必要という課題もある。

一方、線路曲率を利用する方法は、曲率の変化がある箇所が特徴点となるため、曲線を通る度に照合を行う事ができ、曲線の多い区間を走行する車体傾斜車両の制御に適していると考えられる^{1) 2)}。

走行中に車上で観測される線路曲率は、車体の振動特性や、軌道変位による影響を受けるため、今回開発した手法では、線路曲率データに空間フィルタを適用することで、これらの影響を除去し、検出精度の向上と車上データベースのメンテナンス頻度の低減を可能とした。また、車上データベースの曲率データと異なる線路に列車が進入した場合や、長距離の直線走行時等における検出精度低下の防止策についても検討を行った。本報ではこのシステムの概要と、検出精度の検証結果を述べる。

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

2. 現状のATS地上子による自車位置検出方式

2.1 速発累積距離と誤差

多くの自車位置検出方式では、「車輪回転数×車輪径×円周率」で表される速発累積距離を基準として自車位置を常時算出している。この速発累積距離は駆動・制動時の微小なすべり（クリープ）や、空転や滑走による影響を受け、実際に列車が移動した距離と異なってくる。また、車輪には踏面こう配が存在することから、車輪1回転毎の実際の移動距離が常に「車輪径×円周率」になるとは限らない。特に、曲線通過時には、各台車の前軸が後軸よりも曲線の外側に変位しやすくなるため、どの車軸に速度発電機を設置するかによっても、実際の移動距離に対する速発累積距離の誤差の特性が変わってくる。

車体傾斜制御を適切なタイミングで行うためには、これらの誤差の影響を抑え、自車位置を補正する仕組みが必要である。

2.2 ATS地上子による自車位置の補正方法

列車の保安装置として都市部で多く採用されているATCやATS-P方式、車体傾斜制御専用の地上子を設置する場合などにおいては、車両と地上子で通信を行い、検出した地上子の設置位置を識別することができる。これに対して、JR各社の地方路線で多く採用されているATS-Sx方式においては、地上子を検出したことのみを認識するため、それだけでは検出した地上子の設置位置を識別することができない。このため、既存のATS地上子による自車位置の補正方法では、直近に検出した補正基準となる地上子からの設置間隔を逐次照合することにより識別している。

実際の補正方法は次の手順の通りである。事前に、走行する線区に設置されている地上子の中から、補正基準として使用する地上子（以下、使用地上子）を選定した上で、表1のように選定したそれぞれの使用地上子間の間隔と検出範囲を示すデータ等を車上データベースに登録する。

走行前には、始発駅にて乗務員が現在の駅名と、行先駅名を装置に設定する。このとき、車上データベース内の始発駅の地点情報が自車位置として設定され、該当する線区の使用地上子の情報が読み込まれる。

走行中は速発累積距離を自車位置に加算し続けるが、図1(1)、(2)のように、使用地上子の検出範囲内に地上子を検出したときは、自車位置の地点情報をその使用地上子に紐付けられた地点情報に補正する。そして、次の使用地上子の検出を予定する検出範囲を設定し、列車がその検出範囲に到達するまでの間は、地上子を検出しても補正には使用しない。その後、列車が検出範囲に到達し、最初に地上子を検出したとき、それを次の使用地上子と

表1 地上子データベースの例

地上子番号	地上子間隔	検出範囲
B	440m	± 40m
C	600m	± 60m

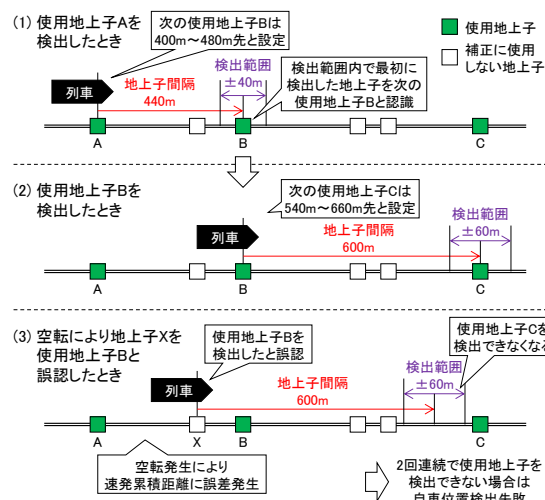


図1 ATS地上子の照合と地上子検出失敗の例

して認識する。この動作を繰り返し続けることとなる。

2.3 自車位置検出失敗の原因と課題

この方法では、設定された検出範囲内に使用地上子が正しく検出された場合のみ、補正を行うことができる。しかし、地上子の移設や増設が行われると、想定した地点と異なる地点を自車位置として認識する場合や、検出範囲に地上子が存在せず、使用地上子を認識できない場合がある。また、空転や滑走が発生したときも、車輪の回転数と実際の移動距離が乖離するため、程度によっては同様の事象が発生する可能性がある。図1の(3)は、空転により、速発累積距離が実際の移動距離よりも過大となったときの例を示している。この例では、使用地上子Bの手前にある地上子Xを使用地上子Bと誤認することとなる。この地点情報の誤差により、その先にある使用地上子Cが検出範囲から外れ、検出できなくなる。

これらの影響により、2回連続して検出範囲内に地上子が検出されなかった場合は、自車位置検出に失敗したと判定される。それ以後は、曲線情報を基にした車体傾斜の制御を中止し、自然振子方式のような自車位置検出が不要な方式に切り替えることとなるが、それに伴い乗り心地は悪化する。

地上子の移設や増設に関しては、車上データベースを適切にメンテナンスすることで対処することができる。しかし、各線区に設置された膨大な地上子の中から、問題のある地上子を見つけ出し、地上子間隔の関係を維持しながら、適切な使用地上子を選定する煩雑な作業を、

人の手により行う必要があるという課題がある。なお、実際の作業では、地上子の地点情報のほか、車体傾斜制御に必要な、地上子から曲線までの距離や曲線長、曲線半径等を含む曲線データも含めたメンテナンスを行う必要がある。

また、自車位置検出精度については、線路上に設置されるATS地上子の間隔が、線区によって大きく異なることも影響を及ぼす。地方でも比較的輸送量の多い線区では、信号機が多数設置されているため、それに付随する地上子の多くが数km以内の間隔で設置されているのに対し、閑散線区では次に行き違い可能な駅までの間に地上子が全く存在しない場合もあり、地上子の設置間隔が10km以上に及ぶ箇所も存在する。地上子の設置間隔が長距離になるほど、自車位置の補正頻度が少なくなり、速発累積距離の誤差も累積しやすくなる。その結果、自車位置の補正に失敗する可能性が高くなる。

3. 線路曲率照合による自車位置検出システム

3.1 曲率照合方法の概要

本報で提案する方法は、車両に搭載したジャイロセンサーによって車体ヨー角速度を測定し、それを走行速度で除することにより得られる線路曲率を使用する。あらかじめ、実際に走行する全区間において、縦軸を線路曲率、横軸を速発累積距離とした波形データを1m間隔で測定し、これをマップ曲率データとして車上のデータベースに登録する。

実際の走行時も、ジャイロセンサーにより1m間隔で常時線路曲率を測定し、現在位置から過去 N_r [m]までの間の線路曲率の履歴（以下、走行曲率データ）を保持し続ける。そして、速発累積距離を基準とした自車位置を保持しつつ、一定周期でマップ曲率データと走行曲率データとの照合処理を行い、自車位置の補正を行う。

なお、マップ曲率データ内には、複数の箇所類似した曲率パターンが含まれることがある。そのため、マップ曲率データの全範囲ではなく、現在の自車位置付近に絞った範囲に対して走行曲率データとの照合を行うことで、曲率パターンが類似した箇所を誤検知する可能性を低減している。具体的には、走行曲率データに対応する

N_r [m]に加え、前後方向に N_s [m]分のマージンをとった N_m [m]のマップ曲率データを切り出して使用する。このとき、 N_r, N_s, N_m は、式(1)の関係となる。

$$N_m = N_r + 2N_s \quad (1)$$

照合の方法は次の通りとなる。走行曲率データを $C_r(x), x = 1, 2, \dots, N_r$ とし、切り出されたマップ曲率データを $C_m(x), x = 1, 2, \dots, N_m$ としたとき、曲率照合に用いる評価関数 $f(i)$ を、式(2)で定義する。

$$f(i) = \sum_{x=1}^{N_r} |C_m(x + N_s + i) - C_r(x)| \quad (2)$$

この評価関数 $f(i)$ は、マップ曲率データに対して走行曲率データを i [m]ずらしたときの、曲率の差の総和を示すもので、評価関数 $f(i)$ が最小となるときのずらし量 i を求めて、照合結果とする。

図2は、 $N_r = 600\text{m}$, $N_m = 1000\text{m}$, $N_s = 200\text{m}$ としたときの曲率照合過程の例である。橙色線がマップ曲率データを、青色線が走行曲率データを表し、灰色部の面積が評価関数 $f(i)$ の値を表している。走行曲率データの開始位置をマップ曲率データに対して相対的にずらしていくと、この例ではずらし量 $i = -40\text{m}$ としたときに、曲率データがほぼ重なり、灰色部の面積で表される評価関数 $f(i)$ が最小値をとることがわかる。また、このときのずらし量 i の -40m とは、それまでに車両が認識していた自車位置と、マップ曲率データ内で対応する自車位置との誤差を表すものである。従って、車両が認識している自車位置にこのずらし量 i を加算することで自車位置を補正することができる。

走行曲率データの更新は、車両が1m走行する毎に行う必要があるが、曲率照合を行う頻度については、用途に応じて、任意の走行距離間隔もしくは時間間隔とすることができる。

3.2 曲率照合方式の利点

3.1節で述べたとおり、車上データベースに登録するデータは実際に走行する線区の曲率の波形データとなる。この自車位置検出システムは車体傾斜制御に使用



図2 曲率照合過程の例

特集：車両技術

することを目的としているが、車体傾斜制御自体も走行する線区の曲率の情報を使用することから、両者で曲率データを共用とすることができる。

また、曲率の照合処理は、マップ曲率データに対し走行曲率データを前後に± N_s [m]の範囲でずらしながら行うことから、速発累積距離に大きな誤差が発生したとしても、その大きさが N_s [m]以下であれば補正することができる。これに対してATS地上子による補正方法では、付近に別の地上子が近接しているなど、場所によっては検出範囲を10m程度とせざるを得ない箇所も存在する。このような箇所では空転・滑走による誤差の累積で自車位置検出に失敗する可能性が高くなる。

なお、曲率照合の際のずらし量の最大値である N_s は走行線区や車両の特性、処理装置の性能等に合わせて変更が可能である。 N_s を大きくすることで、それに応じて計算量が増えることになるが、更に大きな速発累積距離の誤差に対応することができる。

3.3 空間フィルタ処理の適用

ヨー角速度と走行速度により車上で観測される線路曲率データは、車体のヨー方向の振動特性や線路上のゆがみ(軌道変位)の影響を受ける。また、車体の振動特性は、車両の形式や走行速度によって大きく異なり、軌道変位は列車の走行や保線作業により日々変化している。同じ車両、同じ速度で走行した場合は、車上で得られる曲率の波形はほぼ同一となるが、そうでない場合は曲率の波形が変化し、照合結果に誤差が生じる可能性がある。そこで、曲率波形にフィルタ処理を行い、これらの影響を低減する方法を検討した。

図3の上段は同一区間を2回走行した際に、実際に車上で観測された曲率を表している。なお、1回目と2回目では走行速度が異なっているため、得られた曲率波形も変化が見られる。

このように、車上で観測された曲率波形について、様々な条件で比較したところ、概ね波長が25m以下の帯域においては、走行条件や経年によって変動する成分が見られた。これは車両の振動特性や軌道変位に起因すると考えられる。逆に、波長が50m以上の帯域においては、10年ほどの期間を経ても変化が少ないことが分かった。これは、軌道の保守作業が管理台帳上に表されている線形に沿うように行われているためである。よって、線形が変化するような大規模な工事が行われな限り、適切なフィルタ処理を行うことによってマップ曲率データの更新頻度を低減することができる。

なお、時間軸上でサンプリングされた曲率波形に対しフィルタ処理を行うと、軌道変位に対するフィルタの特性が走行速度によって変動するという欠点がある。これに対して、空間フィルタを適用することにより、走行速度の違

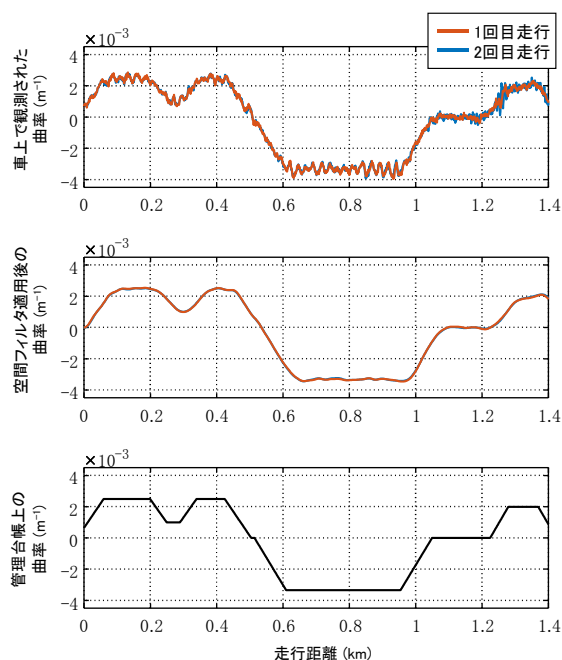


図3 曲率データへの空間フィルタ適用

いによる影響を抑えることが可能となる。これは、測定時に時間軸上で得られた線路曲率波形を、距離軸上でサンプリングし直した後に、フィルタを適用するというものである。

フィルタの特性については、車両の振動や軌道変位に起因する短波長成分をできるだけ減衰させ、かつ観測された曲率波形をより速く曲率照合結果に反映させるため、できるだけ低遅延のものを採用する必要がある。図3の中段は、車上で観測された曲率データに空間フィルタを適用した曲率波形を表している。1回目と2回目の走行での差異が小さくなるとともに、管理台帳上の曲率波形に近づいていることが分かる。

この空間フィルタをマップ曲率データおよび走行曲率データの双方に適用し、線路曲率の経年変化や車両の振動に影響を受ける波長成分を除去することで、マップ曲率データを車上データベースに登録後、長期間にわたりデータの更新が不要となる。

3.4 直線区間と円曲線区間の検出

長い直線区間や円曲線区間を走行中は、曲率が継続して一定値を取り続けることとなる。この場合、緩和曲線などの曲率照合を行う上で必要な特徴点が少なくなり、曲率照合結果に誤差を生じる可能性が高くなる。この影響を防ぐためには、自車位置が長い直線区間や円曲線区間を走行中であるかを常時確認し、もしそのような区間を走行中と判定した場合は曲率照合による自車位置検出結果を採用しないようにする必要がある。

直線区間や円曲線区間では、走行曲率データの距離軸上での変化に対応する曲率変化率が小さな値をとり続ける。逆に、緩和曲線部では曲率が大きく変動するため、

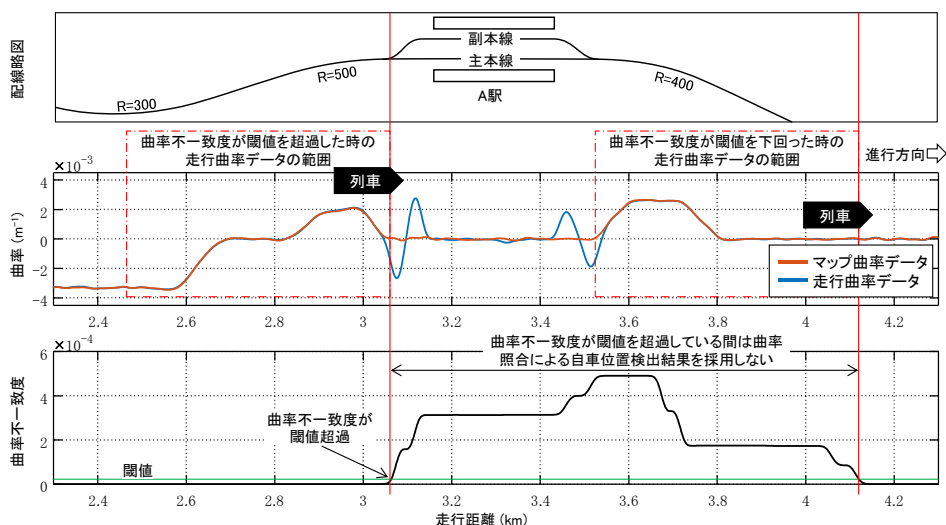


図4 曲率不一致度による異曲率区間の検知方法

曲率変化率も大きくなる。これにより、曲率変化率が閾値を超えた部分を緩和曲線部と見なすことができる。走行曲率データに含まれる緩和曲線部の距離の総和を常時把握することで、現在の自車位置が曲率照合に適した区間であるか判定できる。

3.5 曲率不一致度による異曲率区間の検出

列車は通常あらかじめ決められた運転線路を走行するが、列車の遅延や運用の変更等に伴い、急遽別の線路を運転することがある。このとき、マップ曲率データと異なる経路に進入することとなるが、その際に通過する分岐器やその付帯曲線等により、マップ曲率データと走行曲率データの間で曲率の乖離が発生する。この曲率の乖離が発生した部分を異曲率区間と呼ぶこととする。図4の上段は、単線1線スルーの駅付近の配線略図を示している。中段は、マップ曲率データが主本線を、走行曲率データが副本線を通じたときの曲率データを表している。この駅では、多くの特急列車は主本線を通すが、時間帯や運用が変更された場合には列車の行き違いのため、副本線に進入する。このとき、曲率データには分岐器とその付帯曲線により大きな乖離が生じていることが分かる。異曲率区間が走行曲率データの中に存在した場合、曲率照合を行った際に得られる補正量に誤差が多く含まれたり、曲率が類似する別の箇所を現在地として誤判定したりする可能性がある。

異曲率区間が走行曲率データの中に存在するかどうかは、3.1節において曲率照合処理で使用した評価関数 $f(i)$ を、式(3)に定義する評価関数 $g(i)$ に置き換え、その最小値で判定することができる。

$$g(i) = \sum_{x=1}^{N_r} (C_m(x + N_s + i) - C_r(x))^2 \quad (3)$$

この評価関数 $g(i)$ の値は曲率の差に対して2乗の割合で増加することから、外れ値に対してより反応しやすいという特徴がある。マップ曲率データと走行曲率データが同一線路を走行し、かつ空転や滑走が発生していない場合、両データの曲率波形がほぼ一致する。このとき、評価関数 $g(i)$ の最小値は0に近い値をとり続ける。しかし、異曲率区間に進入したときは、曲率の乖離部分により評価関数 $g(i)$ の最小値が急増する。これにより、評価関数 $g(i)$ の最小値を異曲率区間への進入の判定に利用することができ、これを曲率不一致度と呼ぶこととする。そして、曲率不一致度があらかじめ定めた閾値を超過している間は、走行曲率データ中に異曲率区間が含まれていると判断し、曲率照合結果を採用せず、代わりに速発累積距離を加算することにより、異曲率区間の影響を抑えることが可能である。

図4の下段は異曲率区間の曲率データに対する曲率不一致度の例を表している。走行曲率データに異曲率区間が含まれている間、曲率不一致度が閾値を超過するが、このときの曲率照合による自車位置検出結果には誤差が含まれている可能性があるため、速発累積距離の加算のみを行う。

なお、曲率不一致度が閾値を超過したとき、わずかではあるが、既に異曲率区間の一部が走行曲率データの中に含まれており、3.1節での曲率照合で使用する評価関数次第では、曲率照合結果に影響を与える場合がある。曲率照合で使用する評価関数は、異曲率区間の影響を抑えつつ、異曲率区間ではない部分の曲率データを重視して照合を行う必要がある。これに対して、異曲率区間の判定には異曲率区間へ進入したことを迅速に判断する必要があることから、両者はあえて別の評価関数を採用している。

特集：車両技術

4. 自車位置検出精度の検証

本システムの性能確認のため、営業線にて走行試験を実施し、車体ヨー角速度と走行速度を取得した。また、ATS 地上子検出信号を同時に取得し、定点情報として用いることで、本システムの自車位置検出精度の検証を行った。

図5はシステムの自車位置検出結果の誤差の分布を表したものである。走行距離 88.5km の区間を走行中に通過した ATS 地上子 200 箇所の定点情報と自車位置検出結果を比較し、誤差を算出した。4 回の走行を行った結果、検出結果の誤差の標準偏差は 0.65m であった。また、合計 800 箇所の地上子通過時における検出結果の誤差は、全て ± 2m 以内に収まっている。

また、走行試験中、比較的長時間の滑走が発生した。図6はこの例である。走行距離 4.45km 付近で速度が急激に減少し、一時的に車輪が固着している様子がうかがえるが、このとき速発累積距離に 127m の誤差が発生した。滑走により速度や速発累積距離が変化することから、曲率の波形も大きく変形するため、一時的に異曲率区間進入と判定される。滑走から復帰後、マップ曲率デー

タと走行曲率データの乖離がなくなり、曲率不一致度が閾値を下回った時点で、曲率照合を再開する。その後、5.25km 付近に存在する曲線を通る際、両者の曲率波形が重なっていることと、同時に取得した ATS 地上子の定点情報より、正確な位置へ復帰したことを確認した。

5. まとめ

車上で観測された曲率データを用いる自車位置検出システムを開発した。曲率データには空間フィルタを適用することで、線路曲率の経年変化や車両の振動特性、走行速度の影響を抑えることが可能となった。これにより、これまで車両保守現場で行っていた、煩雑な車上データベースのメンテナンス頻度を大幅に低減することができる。また、異曲率区間や長い直線区間といった曲率照合に不向きな箇所は速発累積距離に切り換えることで、これらの影響を抑えることができる。走行試験で取得したデータで検出精度を検証した結果、車体傾斜制御に十分である良好な結果が得られた。

今後、現車にこのシステムを搭載し、さらなる精度検証および実用化に向けた改良を行う計画である。

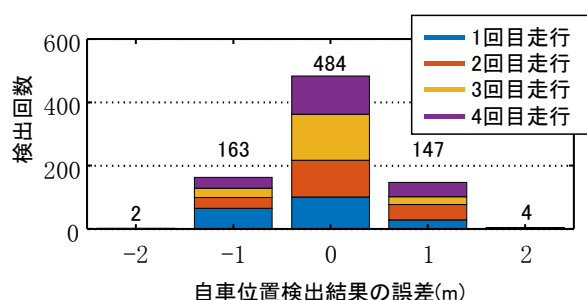


図5 自車位置検出誤差の分布

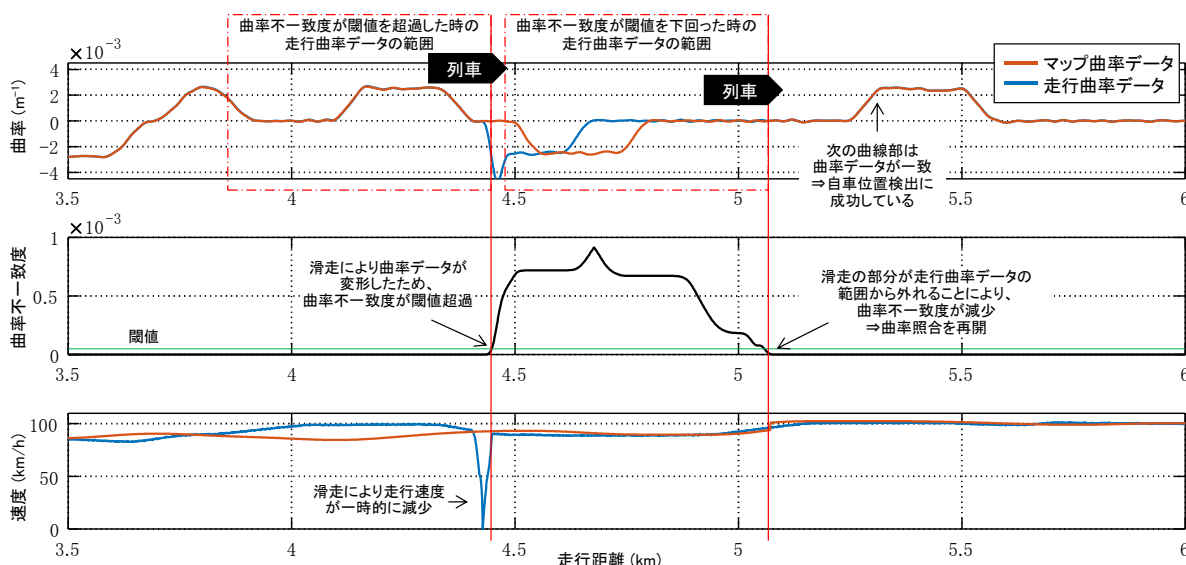


図6 車輪滑走時における曲率照合処理による自車位置補正の一例

文献

- 1) 真木康隆, 榎本衛, 佐々木君章, 辻野昭道: GPS と線形情報を併用した地点検出システム, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, pp.11-16, 2003
- 2) 辻野昭道, 真木康隆, 佐々木君章, 榎本衛: GPS を利用した列車走行位置自立検出システム, 第 11 回交通・物流部門大会講演論文集, Vol.2002.11, pp.269-270, 2002