

慣性センサを併用した複合型位置検知システムの開発

岩田 浩司* 山道 孝** 杉山 陽一*
北野 隆康*

A Train Position Detection System Using Inertial Sensors Together with Tachometer Generators

Koji IWATA Takashi YAMAMICHI Yoichi SUGIYAMA
Takayasu KITANO

Generally tachometer generators are used to calculate the train running distance under on-board systems, and transponders are used to detect the train position. However, as for this configuration it is required to compensate the effects caused by wheel slips and skids, and it is necessary to put a lot of transponders. Therefore, we are developing a method using both tachometer generators and inertial sensors to calculate train running distances independent of the number of wheel rotations and to detect train positions with the curvatures of rails. The results of simulation analysis using managed time stamped data show that it is possible to compensate the train running distance, even though there are wheel slips and skids, and to detect train positions with this method.

キーワード：走行距離算出，滑走・空転補正，慣性センサ，特徴点補正

1. はじめに

一般に鉄道車両における走行距離算出は，速度発電機のパルス数の積算を用いて行われる。その代用センサには，GPS，ドップラーセンサなどが検討されているが，GPSはトンネル内では衛星からの電波を受信できず，また，ドップラーセンサは設置角度のずれに対する補正が必要¹⁾という課題がある。そこで，使用条件や設置の制約が小さい慣性センサの適用を検討している。

2. 開発の背景

慣性センサは，加速度と角速度を積分して距離や速度を算出するので，時間経過とともに誤差が蓄積し，定期的な誤差のリセット処理が必要となる。航空機等で使用される高精度なセンサを用いた場合には，リセット間隔を長時間とすることができ，慣性センサ単体での使用も可能性がある。しかし，高価格であるため鉄道車両への適用は現実的ではない。そこで，より汎用的な慣性センサを用いるため，常時慣性センサで距離を算出するのではなく，滑走・空転を検知した時のみ慣性センサの加速度と角速度を併用して補正する距離算出方式を開発する。また，近年の列車制御システムにおいては位置補正のための絶対位置の取得に別途地上子を設けるが，地上設備

の増加となる。そこで，線路の曲線箇所などの特徴点を，速度パルスと慣性センサとを併用することで認識し，地上設備を増やすことなく位置補正する方式を提案する。

列車制御においては，位置検知精度が高いほどより緻密な制御が可能になる。この位置の信頼性確保に加えて，安全性確保の面で，列車が在線する可能性のある位置は誤差などを見込んだ範囲を在線状態とする必要がある。本提案方式は，非駆動軸でブレーキ力を弱めた速度検出軸の設置が難しい短編成車両においても，比較的簡易かつ安価に発生しうる誤差を小さくでき，また，センサ誤差をもとに発生しうる最大の誤差を見積もることができる点が特長である。

以下，本報告では速度パルスに加えて慣性センサを複合させて用いる複合型位置検知システムとして，滑走・空転検知時の補正方式，ならびに，特徴点補正方式を述べる。また，現車試験で時刻管理して記録したデータにもとづくシミュレーション解析により，提案手法の有効性を検証した結果について述べる。

3. 提案手法

3.1 慣性センサを併用した距離算出方式

本提案方式においては，距離算出において使用する慣性センサと速度パルスの切替は，相互の加速度を常時比較し，差がしきい値を超過した時を車輪の滑走・空転状態と判断することによる。補正処理は，進行方向加速度の積分によるが，路線の勾配による重力加速度成分を除去するため，車両の姿勢角を算出する。以下，詳細を述べる。

* 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

** 信号・情報技術研究部 列車制御研究室
(現 株式会社京三製作所)

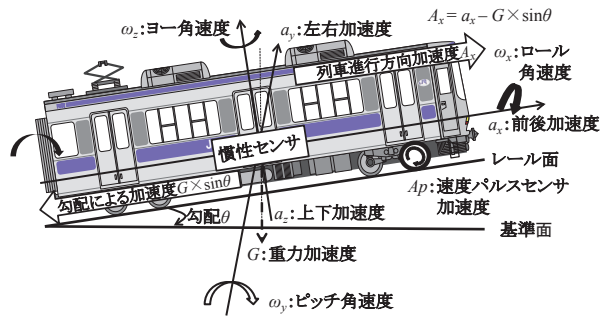


図1 滑走・空転補正に用いる慣性センサと速度パルスセンサ

3.1.1 滑走・空転検知方式

車輪の滑走・空転時の慣性センサでの距離算出と、粘着状態での速度パルスによる距離算出の切替を行うため、常時相互の加速度の差を比較する。具体的には、慣性センサが検出する進行方向の加速度 (a_x) と速度発電機による加速度 (A_p) を比較し、その差 (加速度判定値) が一定値 (Ta) を超過した時に滑走・空転と判定する (式 (1))。 Ta は、路線の勾配による重力加速度の変化を見込んで誤判定することがない値とする。

$$|a_x - A_p| > Ta \quad (1)$$

滑走・空転検知は、従来の速度発電機単体による速度変化でなく、慣性センサの加速度との差分による比較判定であり、早期の段階での滑走・空転検知が期待できる。

3.1.2 提案する滑走・空転検知後の距離算出方式

(1) 補正処理

滑走・空転を検知した場合には、慣性センサで検出した進行方向成分の加速度 (a_x) をもとに速度・距離の算出 (以下、補正処理) を行う (図 1)。進行方向加速度は、路線の勾配 (θ) による重力加速度 ($G \times \sin \theta$) の影響を受ける (式 (2))。これを補正するために、地球中心の座標系を基準とする車両の姿勢角 (θ) を算出する。この姿勢角は、まず、滑走・空転検知前に粘着状態と推定される地点を補正開始点と定め、その地点での初期姿勢角 (θ_0) を速度発電機の加速度成分 (A_{p0}) と時刻 $t=0$ での慣性センサでの検出加速度 (a_{x0}) との差をもとに算出する (式 (3))。その状態からの姿勢角 ($\theta(t)$) は、慣性センサが検出したピッチ角速度 (ω_y) の時間積分値をもとに、式 (4) で車輪が再粘着と判定するまで算出する。

$$A_x(t) = a_x(t) - G \times \sin \theta(t) \quad (2)$$

$$\theta_0 = \arcsin \left(\frac{a_{x0} - A_{p0}}{G} \right) \quad (3)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega_y(t) dt \quad (4)$$

式 (4) に示すピッチ角速度 ω_y は、曲線区間でのカント等によりヨー角速度成分の影響を受ける。そこで、ピッチ角速度 ω_y に対して式 (5) ~ (7) の補正を適用する。

$$\omega_y'(t) = \omega_y(t) - (-\omega_z(t) \times \sin \psi(t)) \quad (5)$$

$$\psi(t) = \psi_0 + \int_0^t \omega_x(t) dt \quad (6)$$

$$\psi_0 = \arctan \left(\frac{-A_{y0}}{\sqrt{A_{x0}^2 + A_{z0}^2}} \right) \quad (7)$$

ψ_0 : 時刻 $t=0$ のロール角度

ψ : ロール角度

ω_x : センサ検出値のロール角速度

ω_y : センサ検出値のピッチ角速度

ω_y' : 補正後のピッチ角速度

ω_z : センサ検出値のヨー角速度

t : 補正時間

A_{x0} : 時刻 $t=0$ の姿勢角算出用の進行方向加速度 (補正後)

A_x : 姿勢角算出用の進行方向加速度 (補正後)

A_{y0} : 時刻 $t=0$ の姿勢角算出用の左右方向加速度 (補正後)

A_{z0} : 時刻 $t=0$ の姿勢角算出用の上下方向加速度 (補正前後で同一と仮定)

式 (7) に示す A_{x0} の最大値 (35%, 1.23km/h/s) は、重力加速度の 3.5% 程度であり、 A_{z0} に対して十分小さいので、式 (7) は式 (8) で近似される。

$$\psi_0 = \arctan \left(\frac{-A_{y0}}{A_{z0}} \right) \quad (8)$$

また、姿勢角算出用の左右方向加速度 A_y は、遠心力の成分の影響を受ける。よって、センサ検出値 (a_y) に対して遠心力成分を補正する (式 (9))。

$$A_{y0} = -(a_{y0} - (v_0 \times \Omega_{z0} \times \cos \psi_0)) \quad (9)$$

a_{y0} : 時刻 $t=0$ の左右方向加速度 (センサ検出値)

Ω_{z0} : 時刻 $t=0$ の水平面でのヨー角速度

v_0 : 時刻 $t=0$ の速度パルス検出速度

ψ は小さいと仮定すると $\Omega_{z0} \times \cos \psi_0 = \omega_{z0}$ となる (式 (10))。

$$A_{y0} = -(a_{y0} - v_0 \omega_{z0}) \quad (10)$$

ω_{z0} : 時刻 $t=0$ のセンサ検出値のヨー角速度

よって、式 (8) に式 (10) を代入すると式 (11) を得る。

$$\psi_0 = \arctan \left(\frac{a_{y0} - v_0 \omega_{z0}}{A_{z0}} \right) \quad (11)$$

式 (11) に示す速度 v_0 は滑走・空転補正の適用前の速度であり、滑走・空転はないので速度パルスの速度で算出する。

また、ピッチ角速度は、曲線部通過時の車体のロールによる遠心力 (ロール角速度) の影響も受ける。そこで、式 (5) に示すピッチ角速度に対してさらに補正し、最終的には式 (12) とする。

$$\omega_y''(t) = \omega_y(t) + \omega_z(t) \times \sin \psi(t) - k \times \omega_x(t) \times \sin \psi(t) \quad (12)$$

k : 進行方向右側への曲線時の係数 -1,

進行方向左側への曲線時の係数 +1

(2) 補正開始点の選定

滑走・空転を検知した状態は、慣性センサの進行方向加速度と速度パルスによる加速度との差がしきい値 (Ta) を超過した時であることから、厳密には粘着状態ではない。この点を補正初期値とした場合には姿勢角を正しく算出できず、距離誤差が発生する。そこで、滑走・空転検知点より、さかのぼって補正開始点を設ける。この補正開始点は、滑走・空転の影響を小さくするため、加加速度が一定値以下であることを条件に選定する。

具体的には、補正開始点は、滑走・空転検知点以前で、慣性センサの進行方向の加加速度 (Ji) が一定値以下、かつ、速度パルスの加加速度 (Jp) が一定値以下の状態で、さらに、 Ji と Jp の変化タイミングのずれによる影響防止のため、これらの差 ($|Ji-Jp|$: 加加速度判定値) が一定値以下である点を、補正開始点として選定する。

なお、補正開始点は、一時的な変動で誤って確定することを防ぐため、3 処理周期連続で条件を満たしている点とする。また、微小滑走・空転時に加加速度判定しきい値以下となり、誤判定となることを軽減するため、位置補正開始点の探索は一定の戻り時間をさかのぼった時点から開始とする。

この補正開始点を設けることで、下り勾配での滑走時や上り勾配での空転時には慣性センサ加速度と速度パルス加速度との差が小さくなることに起因する、滑走・空転の検知遅れを軽減でき、距離算出の誤差を低減できる。

3.1.3 再粘着判定

補正処理開始後、滑走・空転検知に用いる加速度判定値 ($|a_x - Ap|$) が検知しきい値以下、かつ、速度差が一定値 ($\beta \text{km/h/s} \times t$: 補正時間) 以下の場合に再粘着と判定する。

3.1.4 距離の最大誤差の見積もり

提案方式は、滑走・空転検知後の距離の最大誤差を、センサに固有の誤差から見積もることができる点に特徴がある。提案方式において滑走・空転時に発生しうる距離誤差 (Δd) は、式 (13) で算出できる。なお、ヨー角速度、ロール角速度はピッチ角速度の補正に関係するが、距離算出への影響は小さいので、慣性センサの出力のうち、ピッチ角速度と進行方向加速度を検討対象とする。

$$\Delta d = \frac{1}{2} \times \Delta a \times t^2 \quad (13)$$

t : 補正時間

Δa : ①角速度誤差+②加速度誤差+③しきい値誤差

以下、処理周期を 0.1s とした場合の、各パラメータの設定例を示す。

(1) 角速度誤差

0.1deg/s (0.0615km/h/s) (定置実測値の 100ms 平均)

10 秒間での最大誤差: 0.0615km/h/s \times 10=0.615km/h/s

10 秒間での平均誤差: 0.0615/2 \times 10=0.31km/h/s

(2) 加速度誤差

0.1km/h/s (定置実測値の 100ms 平均)

(3) 補正開始点の選定時のしきい値に伴う誤差 (しきい値誤差)

しきい値誤差 (加加速度判定での誤差): 1.23km/h/s

加加速度判定を実施するものの、微小滑走・空転による影響を考慮し、勾配変化の最大値である 1.23km/h/s を加算した値とする。

なお、補正開始点の選定に、加速度での検知しきい値 (Ta) のみを用いる場合は、勾配変化の最大値が 1.23km/h/s であれば、しきい値誤差 (加速度判定での誤差) は 2.46km/h/s となる。

(4) 補正時間

補正時間は、補正開始点から再粘着判定点までの時間であり、最大 10 秒と仮定する。この値は約 90% が 10 秒以下の滑りであるとの報告²⁾ を参考に設定した。

以上の結果、最大発生しうる距離誤差は以下となる。
距離誤差 = 0.5 \times (0.31+0.1+1.23) / 3.6 \times 100 = \pm 22.8m となる。

この誤差をもとに列車制御システムなどの安全余裕距離を設定することで、再粘着を正しく判定しない場合においても、列車を停止することで安全側制御が可能となる。なお、最大誤差の見積もりは線区の勾配、使用するセンサの性能に応じて設定する。

蓄積した誤差のリセットは、近年の列車制御システムと同様に地上子を検出した時に行う。また、センサのリセットは一般的な運行における駅停車時を想定し、30 分程度の間隔で補正することを想定している。

3.2 絶対位置補正

地上設備削減のため、速度パルスに加えて慣性センサを用いることで地上設備によらない位置補正を行うシステムを提案する。提案システムは、慣性センサにより軌道の曲線区間を線路特徴点として検出し、この特徴点を仮想的な地上子として、車上制御装置の位置補正を行う。

具体的には、車上制御装置に搭載した、キロ程と曲線半径とを対とする特徴点データベースと、車上制御装置で検出した曲率 (曲線半径の逆数) を照合して絶対位置を検知し、速度パルス情報の距離誤差を補正 (以下、位置補正) ならびに、仮想的に延伸させた列車長のリセットを行う。

曲率は、慣性センサでのヨー角速度と速度発電機等から得られる速度で算出する。これら特徴点とキロ程を対応させた特徴点データベース (表 1) を用意し、このデータベースに登録した曲率とを照合することにより、対応する絶対位置を特定して位置補正する。

表1 特徴点データベースの例

キロ程 [m]	曲線半径 [m]	属性	備考
827	0	直線	入口側直線診断の開始地点
847	0	緩和	入口側直線診断の終了地点
881	300	左カーブ	入口側曲率の下限值超過
953	0	緩和	出口側曲率の下限值未満
987	0	直線	出口側直線診断の開始地点
1007	0	なし	出口側直線診断の終了地点

位置補正時には以下の診断をこの特徴点データベースをもとに実施する。

(1) 特徴点補正の開始地点診断

特徴点診断の開始位置であるかを確認する。

(2) 直線長診断 (入口側)

入口側において特徴点データベースに定めた直線長 (例えば 20m) があることを、曲率値が直線と判断できる間の距離で診断する。

(3) 本曲線長診断

(a) 曲率符号診断

検出した曲率値の符号が、特徴点データベースの属性欄に示すカーブの向きと合致することを確認する。

(b) 曲率上限値診断

検出した曲率値が、特徴点データベースの曲線半径と余裕値 (例えば +20%) にもとづき定めた曲率上限値を越えていないことを確認する。

(c) 曲率下限値間距離

検出した曲率値が、特徴点データベースの曲線半径と余裕値 (例えば -20%) にもとづき定めた曲率下限値を超過した時 (曲線の入口側) から下回った時 (曲線の出口側) までの曲線長が、データベース上の曲線長と比較して許容誤差以下であること。

曲率下限値の地点については、診断を強固にするために GPS での検出した絶対位置診断を適用することもできる。

なお、特徴点での補正は曲率下限値を下回った地点とし、当該地点での位置補正量を算出する。

(4) 直線長診断 (出口側)

出口側において特徴点データベースに定めた直線長 (例えば 20m) があることを、曲率値が直線と判断できる間の距離で診断する。

特徴点補正は、これら診断で異常を検出しないうちに、算出した位置補正量を加算して行う。なお、特徴点補正処理中に、滑走・空転を検知した場合は、曲率値が正しく算出できない可能性があるため補正しない。また、停止時には曲率を正しく算出できないので、低速時 (例、時速 10km/h 以下) には補正しない。

表2 試験車両の仕様

	在来線用車両 (3 両編成)	軸重制御車両 (1 両編成)
車輪径	816mm	502mm
速度パルス センサ取付軸	先頭車の駆動軸 (第 1 軸)	・遊軸 (後軸ガイド輪) ・制動軸 (前軸ガイド輪)
速度パルス	歯数：90 型式：AG20B (速度発電機)	歯数：102 型式：SOCS-1594 (磁気式ギア速度センサ)
その他	特になし	軸重制御によるピッチ角 制御機構

表3 走行線区の概要

	在来線用車両	軸重制御車両
区間長	約 14.5km (複線) 最高速度約 100km/h	約 8km (単線) 最高速度約 70km/h
勾配	+15.9‰ ~ -14.2‰ (下り方向基準)	+25‰ ~ 0‰ (下り方向基準)
試番数	18 走行	7 走行
その他	一部試番で散水実施	降雪あり

4. 提案手法の検証結果

4.1 試験方法

試験車両の仕様を表 2 に、走行線区の概要を表 3 に示す。

滑走・空転補正処理を実装するハードウェアは、電子運動などでも使用されているフェールセーフ処理装置である。処理周期は 100ms の定周期駆動である。本試験では当該装置内で記録する 10ms 単位での慣性センサ検知結果と速度発電機等の速度パルスの 100ms サンプリングの結果をもとに解析する。

速度パルス信号としては、車両に既設の速度発電機等の出力を用いている。距離を微分して速度を算出し、さらに微分して加速度を算出するので、必然的に加速度の分解能は悪くなる。滑走・空転補正処理に用いる慣性センサの加速度と比較する際には分解能を向上させる必要があり、3 秒の移動平均を適用した。

慣性センサ (ANALOG DEVICES 製 ADIS16480, 図 2) は加速度 (前後, 上下, 左右), 角速度 (ピッチ, ヨー, ロール) の合計 6 軸を有する。滑走・空転補正に使用するのは、前後加速度, ピッチ角速度である。慣性センサの車両内での設置位置は解析の容易化のため、前後方向では前台車と後台車の中間、また、左右方向では中央の車両床面とした。

慣性センサと、速度パルスとの同期のため、ともに 3 秒の移動平均を適用している。この移動平均を適用することで、車両に起因する振動等の影響がないことを周波数解析により確認している。

なお、滑走・空転補正論理は、信号処理の位相ずれの影響を受ける。加減速時のセンサ間の同期ずれの測定結果にもとづき、速度パルス出力を 3 周期 (300ms) 分遅延させ、

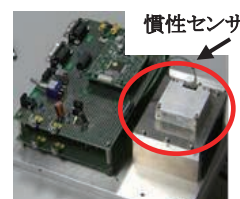


図2 慣性センサ

慣性センサ出力との同期を調整した。

4.2 試験項目

4.2.1 慣性センサを併用した距離算出方式

(1) 滑走・空転検知

滑走・空転検知しきい値を決定するため、滑走・空転検知のしきい値である慣性センサでの前後加速度 (a_x) と速度パルス加速度 (Ap) の差 (加速度判定値) を測定する。

(2) 滑走・空転時の距離補正

距離補正が正しいことを確認するため、絶対距離との比較を行い補正後の距離誤差を算出する。絶対距離は、既設の地上子間距離を用いて算出する。

提案方式は、勾配や曲線通過時における重力加速度成分の除去を目的としたものであり、当該箇所を含む区間での滑走・空転時の距離補正を確認する。

これら提案方式の確認を目的とするため、在来線用車両を対象に試験を実施する。

4.2.2 絶対位置補正

曲線箇所の特徴点で補正した時に発生しうる誤差は、複数回の走行結果を重ねあわせてばらつきの幅で解析する。曲線箇所での特徴点を用いた絶対位置補正は、ヨー角速度を用いるので、在来線用車両ではなく前後方向への車体傾斜を行う軸重制御車両による結果を用いるが影響はない。

4.3 試験結果

4.3.1 慣性センサを併用した距離算出方式

(1) 滑走・空転検知

滑走・空転検知のしきい値は標準的な路線の最大勾配が±35%であるので±1.23km/h/sとした。

本線走行にて滑走・空転を発生させて試験した結果、車輪の滑走時には、慣性センサ加速度と速度パルス加速度の差 ($a_x - Ap$) は大きく変化し、滑走検知可能である。また、下り勾配 (15.9%) と曲線 (半径 400m) が組み合わさった箇所でも滑走・空転を検知し、補正開始点を選定できることを確認した。

(2) 滑走・空転時の距離補正

滑走・空転検知時の補正開始点の選定は、3.1.2 節で述べた方式で行う。加加速度のしきい値は、実測の結果、 J_p (速度パルス加加速度) の分解能が 0.15km/h/s/0.1s、 J_i (慣性センサ加加速度) の分解能が 0.1km/h/s/0.1s であり、 $|J_i - J_p| < 0.05\text{km/h/s/0.1s}$ としている。

本線走行での滑走補正例を図3に、また、地点間距離を基準とした滑走・空転時の誤差を図4に示す。地点間距離は、滑走・空転が発生していない状態での地上子間距離にもとづく。地上子検知

時の信号の立ち上がりから次の地上子検知時の信号の立ち上がりまでに走行した距離で算出した。誤差率は (計測距離-地上子間距離) / 地上子間距離 × 100 で算出した。

当初想定していた10秒の補正時間を超過する事例はあるものの、約±2%程度の距離誤差である。勾配と曲線が組み合わさった箇所において、ピッチ角速度の計測値のみを用いた論理 (ピッチ角補正なし) では再粘着判定ができないが、このピッチ角速度に対してヨー角速度補正やロール角速度補正を行う論理 (ピッチ角補正あり) の適用により、レールと車輪との再粘着を正しく判定可能であり (図3)、一定の精度 (約±2%程度) で補正可能であることを確認した (図4)。

なお、滑走・空転を検知した箇所は44箇所あり、その内4箇所は、最初の位置補正開始点では粘着状態でない箇所を誤って選定し、正しく再粘着と判定しなかった。これらは、微小滑走・空転の影響を受け、加速度差判定で滑走・空転検知した後の、加加速度による位置補正開始点の判定処理において、位置補正開始点を誤って検出したことに起因する。このため、当該の位置補正開始点を避ける対策として、加加速度判定処理の開始点を滑走・空転検知点からではなく、車輪とレールがより粘着した状態となるように一定時間戻した点とした。この一定時間は、現地試験の結果をもとに加加速度判定で誤って位

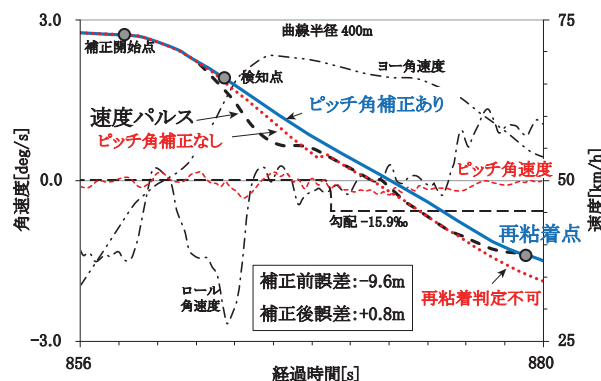


図3 勾配かつ曲線箇所での滑走補正例

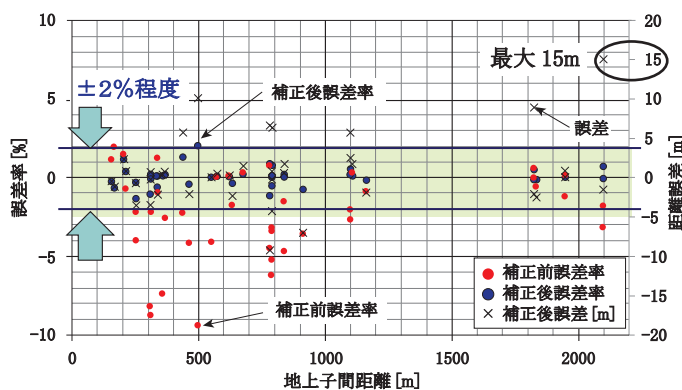


図4 地点間距離を基準とした滑走・空転時の誤差

置補正開始点を検出することを避けるのに必要な最小時間（2.1秒）とした。全滑走・空転検知箇所はこの対策を適用した結果、1箇所を除き、再粘着を正しく判定している。なお、当該の1箇所については、さらにさかのぼって加加速度判定処理を行うことにより、正しく再粘着判定可能な位置補正開始点を検出することは可能である。しかし、これを考慮して上述の一定時間を拡大設定した場合には補正時間が長くなるため適用は難しい。再粘着を判定できない場合には、予め定めた補正継続時間の最大値で安全側制御として列車停止とする。一方、アベイラビリティ確保のための対策としては複数箇所の位置補正開始点に対して同時に補正処理を行い、先に再粘着判定した方を利用するなどの対策が考えられる。

再粘着判定点は、滑走・空転検知時と同様に加加速度判定を行うことで、さらに距離誤差は低減可能と考える。

4.3.2 絶対位置補正

試験区間に特徴点を設定し、現車試験でのセンサ出力の記録をもとに、シミュレーション解析により補正可能であることを確認した。特徴点は、軸重制御車両での列車速度を考慮し、曲線半径300～500mの箇所としたが、原理的にはより曲線半径が大きい箇所にも適用可能である。一例として、ある線内の一部区間における曲率測定値の推移を図5に示す。特徴点は走行距離8km程度の区間に5箇所設定した。特徴点での曲率測定値は、3走行の軌跡を重ねた結果では、約10m程度の誤差に収まる。

この曲率推移をもとに、先に述べた表1に示す距離程と曲率変化点とを対とした形式で定めた特徴点データベースを作成した。

この特徴点補正を適用することで、走行距離に対して2%の安全余裕距離を設定した場合、8km走行時に180m程度（全区間で、1回分の滑走・空転時の補正余裕20mを含む）となる余裕距離を、地上設備を新たに追加設置しなくても、80m程度（特徴点間で、路線勾配を考慮した1回分の滑走・空転時の補正余裕20mを含む）までに短縮できることが期待できる（図5）。

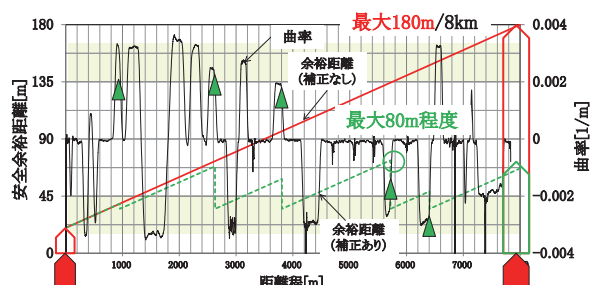


図5 半径300～500mの特徴点5箇所に対して補正を適用した場合の余裕距離の推移

5. おわりに

速度パルスに加えて慣性センサを複合させて用いる複合型位置検知システムとして、速度パルスと慣性センサを併用した距離算出方式、ならびに、絶対位置補正方式を提案した。

距離算出方式については、速度発電機等を用いた距離の算出方式が車輪の滑走・空転の影響を受けることから、滑走・空転の検知時は慣性センサを用いて算出する方式とした。路線勾配と曲線が組み合わさった区間での補正処理における誤差低減のために、慣性センサの加速度（3軸）と角速度（3軸）を用いた補正処理を提案し、現車試験で記録したデータにもとづくシミュレーション解析を行い、位置補正処理の高精度化において本手法が有効であることを確認した。

絶対位置補正方式としては、絶対位置の取得のため地上子を別途設けた場合、地上設備の増加が課題と考える。そこで速度パルスと慣性センサとを併用することで、線路の曲線箇所を特徴点として認識し、その結果に対する診断の一部にGPSを活用する位置補正方式を提案した。現車試験で記録したデータにもとづくシミュレーション解析で提案方式の有効性を確認した。今後、現車試験にて実使用環境での動作を確認する予定である。

本提案手法は、アベイラビリティの向上が今後の課題となるものの、短い編成で空転・滑走しにくい軸（ブレーキ力を弱めた非駆動軸など）を設けることが難しい場合でも、比較的簡易かつ安価に誤差を小さくでき、また、センサの精度（誤差の大きさ）をもとに最大発生しうる距離誤差を見積もることができる点において有効と考えている。

謝辞

本試験を実施するにあたり多大なるご協力をいただいた西日本旅客鉄道株式会社、北海道旅客鉄道株式会社に謝意を表す。

文献

- 1) 北野隆康, 富田雅昭, 他: ミリ波を用いたドップラー速度計の実用化へ向けた性能評価, 第50回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号535, 2013.11
- 2) 池田昌俊: 列車位置検知手法の動向, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp.1-6, 1999.8