

# 速度発電機と慣性センサを併用した 車上位位置検知・列車完全性管理システム

北野 隆康\* 太田 佑貴\* 谷口 茂\* 岩田 浩司\*  
齋木 翔太\*\* 記虎 正幸\*\*\* 浅野 晃\*\*\*

On-board Train Positioning and Train Integrity Management System by  
Combination of Tachometer Generators and Inertial Sensors

Takayasu KITANO Yuki OTA Shigeru TANIGUCHI Koji IWATA  
Shota SAIKI Masayuki KITORA Akira ASANO

In order to detect the train position and existence area in the radio train control system, the on-board train positioning and train integrity system by the combination of inertial sensors and tachometer generators have been developed. In this system, curves and ramp excursions which are registered as track distinctive point on-board database are used for detecting the train position and calculating the train length. Additionally, the occurrence of train split can be detected by the difference of the acceleration between the head vehicle and the tail vehicle. The running test using fail-safe processors equipped with these functions shows the feasibility of this system.

キーワード：車上位位置検知，トレインインテグリティ，列車長算出，列車分離検知，慣性センサ

## 1. はじめに

近年，地上設備の削減や，より柔軟な列車間隔制御を目的として，無線を用いた列車制御システムの導入が進んでいる<sup>1) 2)</sup>。これは，車上で位置検知に基づいて間隔制御を実施する点が従来の保安システムとは異なっており，車上における在線範囲の管理が重要な要素となっている。列車在線範囲の管理機能としては，欧州の列車制御システムの規格である ETCS Level 3<sup>3)</sup>でもトレインインテグリティとして要件定義されているが，列車の最後尾位置の把握のために列車長を算出する機能と，列車分離を検知する機能がある。本稿においても，列車長算出機能と列車分離検知機能を合わせて，列車完全性管理と定義する。

鉄道総研では，車上で列車位置検知および列車完全性管理のため，慣性センサと速度発電機を併用した車上位位置検知・列車完全性管理システムについて開発を進めている。このシステムにおける車上位位置検知のため，滑走・空転の検知<sup>4)</sup>と，曲線・勾配変化などの線路特徴点検知を用いた車上位位置検知機能を開発した<sup>5) 6)</sup>。また，列車完全性管理機能として，線路特徴点検知によ

る位置検知を活用した列車長算出機能<sup>5)</sup>と，先頭車両と最後尾車両に生じる加速度の比較により列車分離を検知する機能<sup>7)</sup>を開発した。

上記の機能についてフェールセーフ CPU を搭載したハードウェアに実装し，走行試験により機能の有効性と実現性を確認した。本稿ではこれらの機能の概要と試験の結果について報告する。

## 2. 車上位列車位置検知

### 2.1 滑走・空転検知および補正

速度発電機の出力による積算距離をベースに，慣性センサを併用して滑走・空転を検知して補正する構成とする。以下，滑走・空転の検知および補正論理の概要について述べる。

速度発電機の出力を基に算出した加速度  $a_p$  と，慣性センサで計測した進行方向加速度  $a_m$  を比較し，その差がしきい値  $T_a$  以上となる場合，すなわち下式を満たす場合に滑走・空転の発生を検知する。

$$|a_m - a_p| > T_a \quad (1)$$

ただし，勾配などの傾きがある箇所では慣性センサで計測する加速度に重力加速度が加わることから，進行方向加速度の計測において重力加速度の成分を取り除く必要がある。

\* 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)

\*\*\* 株式会社京三製作所

特集：信号通信技術

ここで、勾配走行中に慣性センサで計測される進行方向加速度と重力加速度  $g$  の関係を図 1 に示す。勾配の角度を  $\theta$  とすると、慣性センサで計測する加速度に対して、重力加速度の進行方向成分である  $g\sin\theta$  が加減算されることとなる。勾配  $\theta$  については、滑走・空転を検知していない状態での速度発電機の加速度と、同時に計測した慣性センサの加速度の差から算出することができる。

滑走・空転を検知すると、その直前の地点を基準として慣性センサの加速度による速度補正および積算距離の算出を行う。

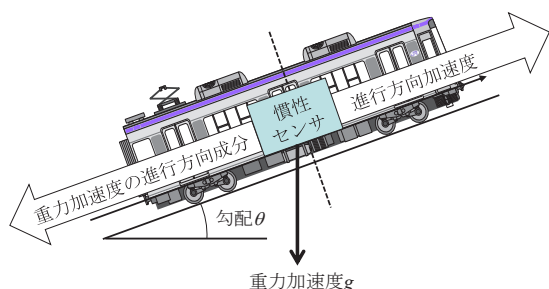


図 1 慣性センサで計測される加速度成分

## 2.2 線路特徴点による位置検知

### 2.2.1 手法

慣性センサと速度発電機を併用して、曲線や勾配変化を線路特徴点として検知して位置補正を行う。本システムは保安システムへの適用を想定するものであり、誤検知を防ぐため、ひとつの線路特徴点あたり複数箇所にて照合を行う。照合する箇所は、あらかじめ車上データベースに登録しておき、慣性センサと速度発電機による計測値との比較・照合により位置検知および位置補正を行う。

### 2.2.2 曲率の算出

線路特徴点を検出するために使用する曲率  $\kappa$  [1/m] は以下の式により算出される。

$$\kappa = \omega / v \quad (2)$$

なお、式 (2) の  $v$  は速度発電機による走行速度 [m/s] である。 $\omega$  は、曲線の場合はヨー角速度 [rad/s]、勾配変化（縦曲線）の場合はピッチ角速度 [rad/s] であり、慣性センサにより計測される。

### 2.2.3 線路特徴点の検知・位置補正の手段

線路特徴点の検知および位置補正の手順を図 2 に示す。列車位置については速度発電機の積算距離をベースとし、2.1 節に示した滑走・空転検知論理を使用する。

列車がデータベースに登録された線路特徴点照合区間の入口にある検知開始点に到達すると、直線区間の判定

を開始する。曲線区間では、曲線長と曲率をデータベースの登録値と照合する。照合の結果、両者の一致が確認されると、車上で認識している位置とデータベース上の位置を比較して、位置補正量を決定する。曲線終了後の直線区間にて出口直線を判定し、位置補正を実施する。

曲線通過前の直線区間、曲線の曲率と曲線長、曲線通過後の直線区間の複数区間の照合を実施することで誤った特徴点での補正を防止している。

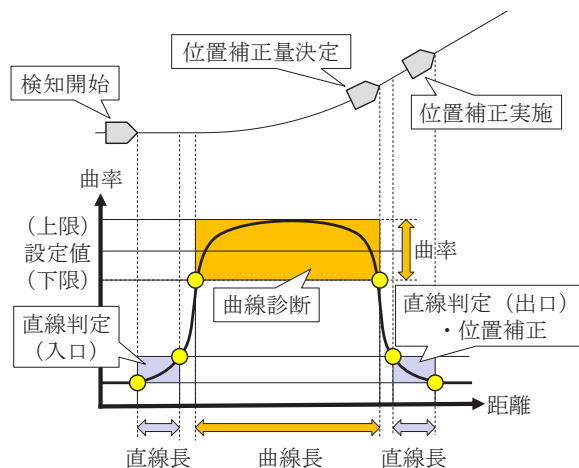


図 2 線路特徴点の検知・位置補正

## 3. 列車完全性管理

### 3.1 トレインインテグリティの要件

欧州の ETCS Level 3 において、トレインインテグリティが定義されており、この中では、列車の編成長を把握した上で、全車両が揃っており、列車の分離がないことを常時監視することがシステムの要件となっている。

また、列車検知に車上で位置認識を使用しているシステムでは、列車の間隔制御や踏切などにおける列車通過判定のため、列車の先頭位置と最後尾位置を在線範囲として管理する必要がある。最後尾位置は、列車の先頭位置に編成長（列車長）を加えた位置により管理できることから、列車長算出機能が重要となる。列車分離については、システムが認識している在線範囲外に車両が遺留されている可能性があることから検知が重要とされている。

なお、列車分離については、列車走行中に常時監視する必要があるが、列車長については、一度検知すると組成に変更が生じるまで算出は原則不要である。列車長を算出する箇所については、例えば、車両基地から出区前、および、分割併合がある駅・停車場構内の分岐、などが考えられる（図 3）。

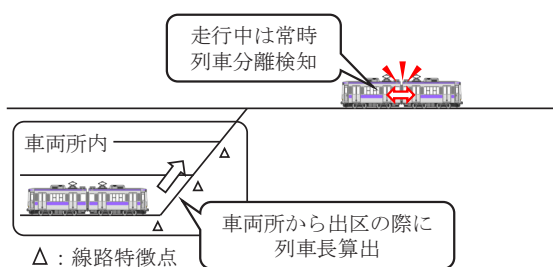


図3 列車長算出箇所と列車分離検知

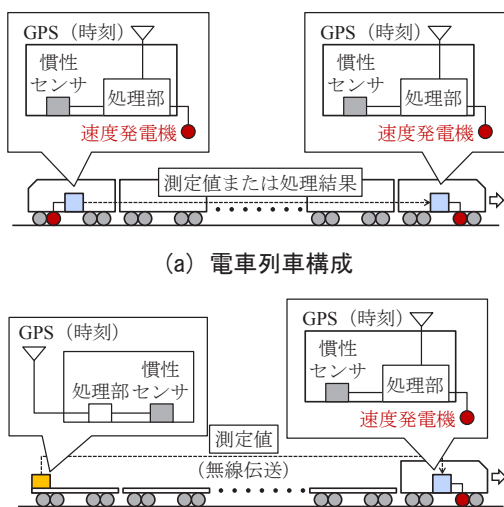
### 3.2 システム構成

先頭車両と最後尾車両に速度発電機と慣性センサを併用した車上位置検知システムを適用することで、列車長算出および列車分離検知を行うことが可能となる。システム構成については、図4に示すように、システムを適用する編成に応じて、電車列車構成と、客車・貨物列車構成が想定される。

電車列車構成は、先頭車両だけでなく最後尾車両にも速度発電機がある場合の構成であり、先頭車両と最後尾車両に同じ装置を設置する。この場合、先頭車両と最後尾車両で独立して処理を実施し、最後尾車両の処理結果を先頭車両に伝送することとなる。

一方、客車・貨物列車構成は、速度発電機は先頭車両にのみ搭載されている場合の構成であり、先頭車両にはシステムの処理装置と慣性センサおよび伝送装置を設置し、最後尾車両には慣性センサと伝送装置を設置する。最後尾車両では慣性センサのデータを取得し、先頭車両に伝送して、先頭車両で処理を実施する構成となる。

最後尾車両から先頭車両への伝送については、車両間に有線の伝送路がある場合はそれを利用することが可能であるが、有線伝送路がない場合は、無線伝送の使用を想定する。



(a) 電車列車構成

(b) 客車・貨物列車構成

図4 システムの構成

### 3.3 列車長算出

先頭車両と最後尾車両が同じ地点を通過したことを検知できる場合、同じ地点を先頭車両が通過した後に最後尾車両が通過するまでの間に走行した距離から列車長を算出することができる。ここで、時刻  $t$  における先頭車両の列車位置を  $p(t)$  とし、先頭車両がある地点  $P$  を通過する時刻を  $t_h$ 、最後尾車両が地点  $P$  を通過する時刻を  $t_t$ 、最後尾列車の車両長を  $L_c$  とすると、列車長  $L$  は次式にて表される。

$$L = p(t_t) - p(t_h) + L_c \quad (3)$$

なお、最後尾列車の車両長  $L_c$  については、センサの設置位置によらずに同じ値となる<sup>5)</sup>。

列車長算出における同じ地点  $P$  の通過検知に、慣性センサと速度発電機の併用による特徴点検知による位置補正の手法を適用することが可能である。図5に示すように、先頭車両と最後尾車両が検知する同じ地点として、曲線を選択することとなる。

列車長を算出するため、最後尾車両で検知した線路特徴点、もしくは、慣性センサで計測した角速度と GPS 時刻が先頭車両に伝送される。列車長は、本線に進入するまでの時間内に算出される必要があるが、電文が未達などの理由で列車長が算出できない場合には、線区ごとに事前に設定した最大列車長となる。

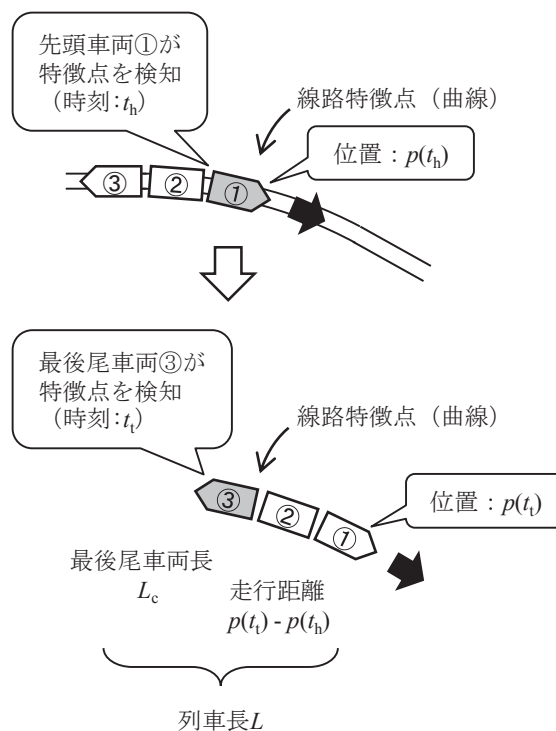


図5 線路特徴点検知による列車長算出の概要

特集：信号通信技術

3.4 列車分離検知

慣性センサを利用した進行方向加速度の監視による列車分離検知手法の構成を図6に示す。本手法では、後尾側の車両に設置した慣性センサの進行方向加速度と、先頭側に設置した慣性センサまたは速度発電機の加速度を常時比較する。通常、組成されている車両は一体となって移動しているため加速度差は生じないが、列車分離が発生し、それに伴う大きな衝撃や加速度差が検知された場合に、分離を検知する。

列車分離検知では、最後尾車両の慣性センサで計測した前後加速度およびGPS時刻が伝送される。列車分離を検知すると非常停止などの取扱いが必要となるため、列車長算出とは異なり、無線を用いた列車制御システムで使用されているものと同等の仕様の伝送が要求される。

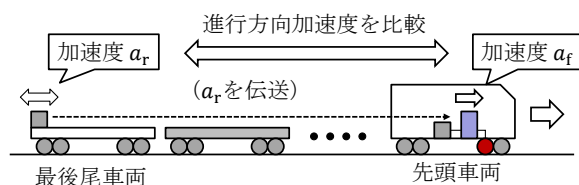


図6 加速度差による列車分離検知の概要

4. 走行試験による機能確認

4.1 試作装置

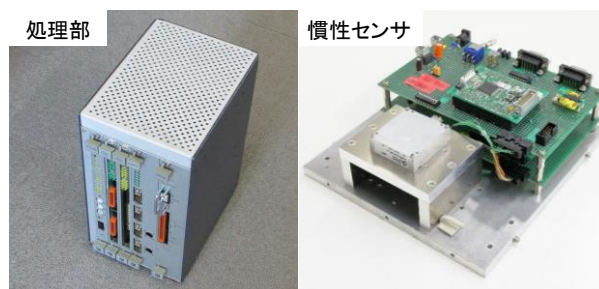
車上位置検知・列車完全性管理システムの機能確認にあたって、図7に示す装置を試作した。図7(a)は先頭車両または電車列車の最後尾位置車両に搭載する装置であり、図7(b)は客車・貨物列車構成の最後尾車両に搭載する装置である。図7(a)の装置は処理部に搭載したフェールセーフCPUにて演算を行う。図7(a)(b)両方の装置に共通して、慣性センサと時刻同期のためのGPSアンテナ・受信機、および、情報伝送用の無線機を有する。

4.2 試験装置構成

試作装置における試験装置構成を図8に示す。

電車列車構成の場合は、図8(a)に示すように、先頭と最後尾の車両に処理部および慣性センサを設置する。列車長を算出する際は、最後尾車両にて線路特徴点を検知し、検知時刻と線路特徴点を先頭車両に送信する。

客車・貨物列車構成の場合は、図8(b)に示すように、最後尾車両には最後尾車両用装置を車両進行方向の左側と右側に合計2個設置して冗長性を確保する。最後尾車両用装置では線路特徴点を検知せずに慣性センサで測定したデータとその時刻を都度、先頭車両に送信する。列車長算出、列車分離検知は、先頭車両の処理部にて行う。

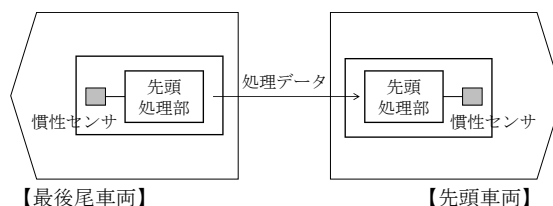


(a) 先頭車両用装置

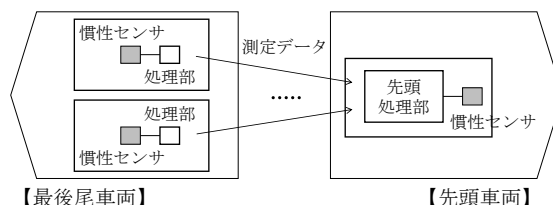


(b) 客車・貨物列車構成の最後尾車両用装置

図7 試作装置



(a) 電車列車構成



(b) 客車・貨物列車構成

図8 試験構成

4.3 走行試験

4.3.1 車上位置検知

線路特徴点にて位置検知・位置補正を実施した結果例を図9に示す。図9では、同じ地点で実施した4試番の結果をまとめて示している。

また、複数の線区にて線路特徴点を設定して走行試験を実施した際の、位置補正の実施回数と線路特徴点の検知に失敗した回数の総数を表1の通りまとめる。設定したのべ741ヵ所の線路特徴点の中で94.3%に相当する699箇所にて位置補正が実施できた。検知に失敗した箇所については、走行速度が線路特徴点の検知に必要な速度を下回ったこと、曲率変化に設定した閾値の範囲を瞬

時的に超過したこと等が原因となっていた。

なお、位置補正失敗の場合は、仮想的な列車在線範囲に余裕を持たせる処理を行うことで、危険側とされない対策とすることが可能である。

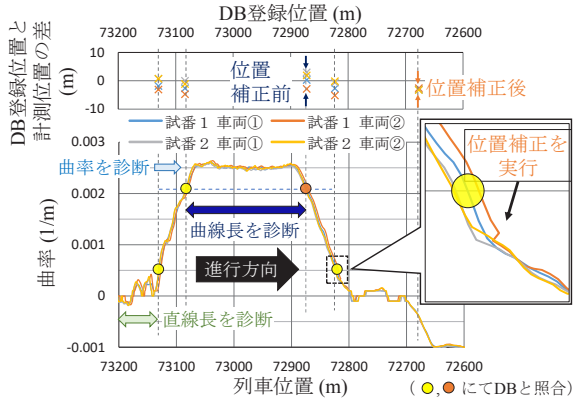


図9 位置補正結果の一例

表1 位置検知・位置補正機能の確認

線路特徴点総数	741
線路特徴点検知 (位置補正実施)	699
線路特徴点での検知失敗	42
位置補正実施率	94.3%

4.3.2 列車長算出

6両編成の電車列車(列車長120m)の先頭車両と最後尾車両に装置を設置して電車列車構成と客車・貨物列車構成で走行試験を実施し、線路特徴点ごとに列車長を算出した。その結果を図10に示す。

図10からは、算出した列車長は、真値である120mを中心として、109~129mの範囲内に収まるよう分布していることが確認できる。なお、算出列車長の誤差については、センサの精度に限らず処理装置の取り込み周期や線路特徴点検知の誤差によっても生じる。これらの誤差発生要因および、走行速度に最高130km/hを想定した場合の誤差を表2にまとめる。表2に示した誤差を合計すると、最大±13m程度の誤差が生じることが想

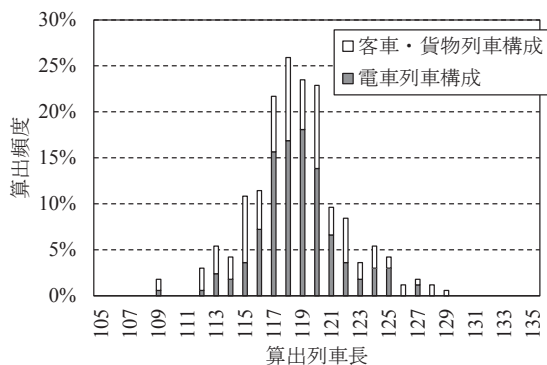


図10 列車長算出結果

表2 列車長算出における最大誤差

誤差要因	130km/h 時の誤差
データ取込み周期 (100ms)	± 3.61 m
車両ごとの処理開始時間差	± 3.61 m
移動平均処理 (1.5 秒)	± 0.78 m
センサ検出誤差	± 5 m
合計	± 13 m

定される。この誤差については、図10の走行試験結果における誤差の発生範囲とも合致している。

4.3.3 列車分離検知

列車分離検知については、客車・貨物列車構成を対象とした。列車走行中に、最後尾車両のユニットを強制的に傾けることで最後尾車両の前後加速度を変化させ、疑似的に列車分離を模擬する試験を実施した(図11)。その結果、前後加速度差が設定閾値を超え、列車分離が検知できることを確認した。列車分離を検知した前後の各車両の加速度、加速度差およびシステムによる分離検知結果を図12に示す。

なお、図12において、前後車両間の加速度差が分離検知閾値を超えてから、分離検知フラグにて分離検知が認識されるまで約2秒程度の遅延があるが、これは加速度計測値の異常処理を除去するために実施している1.5秒の移動平均の半分である0.75秒と、伝送や処理に伴う遅延が含まれていると考えられる。

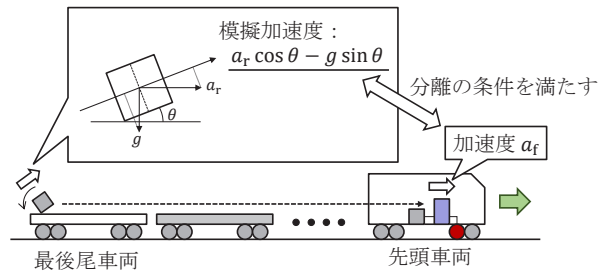


図11 列車分離模擬試験

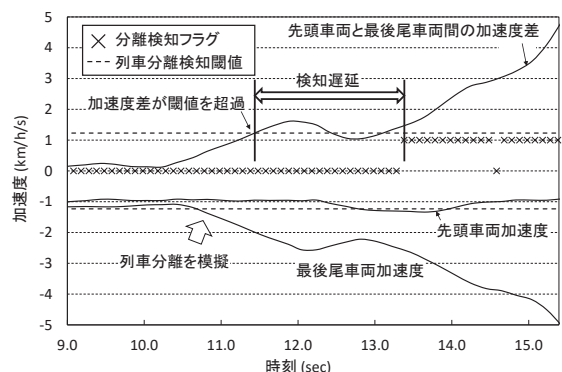


図12 列車分離の検知

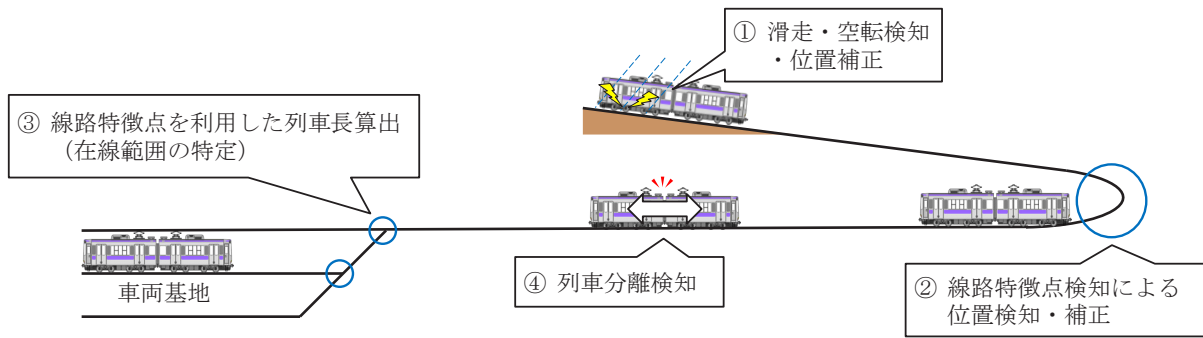


図 13 慣性センサを併用したシステムの機能

また、擬似的に列車分離を模擬した箇所以外では、列車分離を検知しないことを確認した。

適用により、無線を用いた列車制御システムにおける位置補正地上子の削減と適用線区の拡大が見込まれる。

## 5. 列車位置検知・完全性管理システムの提案

## 謝 辞

速度発電機と慣性センサを併用した車上位置検知・列車完全性管理システムでは、慣性センサと速度発電機を併用した装置により図 13 に示す 4 つの機能が実施できる。すなわち、速度発電機と慣性センサを併用した車上位置検知・列車完全性管理システムを導入することで、地上子によらない位置検知機能に加えてトレインインテグリティの要件を満たすことが可能となる。

本研究を遂行するにあたり、東日本旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社には多大なるご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

車上位置検知を要件とする列車制御システムにおいて地上子を削減するだけでなく、車上での列車在線把握に関する要素技術をひとつの車上位置検知システムで実現するため、全体としてのコスト削減を図ることができると考えられる。

## 文 献

## 6. おわりに

本報告では、無線を用いた列車制御システムなど、車上における位置検知と在線範囲の特定が重要となるシステムを対象として、速度発電機と慣性センサを併用した車上位置検知・列車完全性管理システムの開発について述べた。車上位置検知機能として、滑走・空転検知および線路特徴点検知による位置補正手法について提案した。列車完全性管理機能として、線路特徴点検知を用いた列車長算出と、先頭車両・最後尾車両間の加速度差を用いた列車分離検出手法を提案した。車上位置検知・列車完全性の両機能について走行試験を実施して機能を確認したところ、所期の性能が確認された。本システムの

- 1) 八木 圭介, 山口 智敬, 内山 大輔: デジタル無線を用いた列車制御システム (ATACS) の導入について, 計測と制御, Vol. 55, No. 5, pp. 443-447, 2016
- 2) 松本雅行: 無線を用いた列車制御システムの動向, 計測と制御, Vol. 56, No. 2, pp. 99-104, 2017
- 3) “ERTMS/ETCS, Glossary of Terms and Abbreviations,” SUBSET-023, 3.1.0, 2014.
- 4) 祇園昭宏, 菅原宏之, 北野隆康, 平栗滋人: 慣性センサを用いた車上位置検知システム, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, Vol. 49, 527, 2012
- 5) 岩田浩司, 齋木翔太, 太田佑貴, 記虎正幸, 浅野 晃: 慣性センサと速度発電機を併用した線路特徴点検出による列車長算出手法, 信学技報, DC2016-70, 2016
- 6) 谷口茂, 岩田浩司, 太田佑貴, 記虎正幸, 浅野晃: 慣性センサと速度発電機を併用した勾配変化点検出手法の基礎検討, 信学技報, DC2017-68, 2017
- 7) 太田佑貴, 谷口茂, 岩田浩司, 記虎正幸, 齋木翔太: 慣性センサと速度発電機を用いた列車分離検知装置の基礎検討, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, 2017