

## 講演 2. 車上主体型列車制御システムにおける列車位置検知技術の評価に関する取組

交通システム研究部 ※山口 大助 工藤 希 竹内 俊裕 長谷川 智紀  
篠田 憲幸 (客員研究員)

### 1. はじめに

鉄道ではこれまで軌道回路や地上子を用いて列車の位置検知を正確に行う列車制御システムによって安全を確保してきた。しかしながら、地方鉄道をはじめとする採算性の厳しい路線では、軌道回路のような地上主体の設備の維持や更新に係るコストが大きな負担となっている。これを解決する手段として、軌道回路によらない車上主体型の列車位置検知を基本とした無線式列車制御システムが期待されている<sup>1)</sup>ほか、慣性センサと速度発電機の併用により車上で位置検知するシステムの開発が進められている<sup>2)</sup>。

交通安全環境研究所では列車位置検知を衛星測位システム (GNSS; Global Navigation Satellite Systems) で行い、これと汎用無線を組み合わせた列車制御システムを提案してきた<sup>3),4)</sup>。この過程で GNSS の測位精度が課題となり、精度向上を図る手法の検討<sup>5)</sup>を行ってきたが、精度向上の効果が一定ではなかったことから、引き続き検討が必要となっている<sup>6)</sup>。

本稿では、車上主体型の列車位置検知を基本とする列車制御システムへの活用等を想定して、既に列車位置検知に活用されているセンサと今後活用される可能性のあるセンサについて技術的な観点での整理や、GNSSをはじめとする複数の位置検知センサの組み合わせの整理を試みるとともに、列車位置検知技術の評価に関する取組について述べる。

## 2. 車上主体型位置検知技術

### 2. 1. 軌道上の列車位置

位置には「絶対位置」と「相対位置」の二つがあり、本節では鉄道における絶対位置と相対位置を考える。

絶対位置はキロ程や緯度・経度が該当する。列車制御における軌道回路や地上子、架線柱等の構造物の位置はキロ程に紐付けられており、これに基づく管理が

行われている。また、曲線通過速度を高めるための車体傾斜制御もキロ程情報に基づいて行われているケースがある<sup>7)</sup>。軌道中心を点と捉えると、軌道は列車走行方向にこの点が無数に連なったものと見ることができる。この点を介してキロ程と測量等で得た緯度・経度を紐付けることができる。

相対位置は列車の走行距離、列車と構造物 (架線柱、信号機柱、建築物等) の間の距離が該当する。無線式列車制御システムでは、車両に備わった速度発電機や速度センサから得られる速度情報を基に列車位置を演算している。この方法は車輪の滑走・空転や車輪の摩擦による車輪径の変化によって算出結果に誤差が生じるため、走行距離を補正するために一定間隔に軌道に地上子を設置している<sup>8)</sup>。

列車制御は軌道回路や地上子を使って行われることが多い。いずれもキロ程に紐付けられていることから、列車制御は絶対位置に基づいて行われるといえる。無線式列車制御システムでは、先述の列車位置と地上子の組み合わせで絶対位置を得て、前後の列車の各絶対位置から算出される相対距離 (間隔) により列車制御が行われている。

### 2. 2. 位置検知センサの併用

列車制御システムには、万が一システムを構成する装置に故障が発生した場合にも故障後の事象が安全側に遷移するフェールセーフ性が求められる。鉄道で安全側に働く対策の基本は列車を止めることにある。無線式列車制御システムでは、列車位置検知ができなくなった場合には速やかに列車を停止させる措置が取られる。ATS (自動列車停止装置) 等の保安装置に使われる地上子については、車両側の読取機である車上子が地上子を検知しない場合 (空振り) を考慮して、地上子が複数隣接して設けられる場合もある。

車上主体で列車位置を検知するシステムにおいて、

位置検知が困難になった場合は速やかに停止措置を取ることが最もシンプルな安全対策である。しかし、位置検知システムの点検や安全確認を経て再発車するまでには時間を長く要する場合も考えられる。よって、停車せずに走行を続けられ、走行の継続が困難な状況に陥った場合に限り停車させるような対策の方が望ましい。位置検知の確実性を高め、列車の走行を極力継続する手段として、位置を検知するセンサを複数組み合わせることが有用と考えられる。

複数のセンサは2個以上の構成が想定されるが、個数が増えるほど導入コストや維持管理コストも増加するため、個数には上限がある。2個の場合は1個目のセンサが位置検知機能を喪失しても2個目のセンサが正常作動していれば列車の位置検知を継続できる可能性が高い。3個の場合は各センサの検知結果に基づく多数決により列車位置検知を正確に行える可能性がある。先述のコスト等も踏まえると、複数のセンサは2個ないし3個が適当かつ現実的といえる。検討を容易にするため、本稿では2個のセンサを使用するケース

を対象に述べる。また、2個の位置検知センサをそれぞれⅠ系、Ⅱ系と呼ぶことにする。

### 2. 3. 位置検知機能を有するセンサ

本節ではⅠ系、Ⅱ系になり得るセンサについて技術的な観点での整理を試みる。

#### 2. 3. 1. 列車位置検知に活用されているセンサ

先述のように、列車の位置検知手段として、軌道回路、地上子、速度発電機が既に活用されている。このほかにも、ループコイル、アクスルカウンタ（車軸検出器）、RFID（Radio Frequency IDentification）、トロリコンタクタ、無線測距、GNSSがある。これらのセンサについて、設置箇所（地上／車上）、計測可能な項目等を整理したものが表1である。アクスルカウンタや路面電車で使われているトロリコンタクタは地上側のみの設備であるため、検討の対象外とする。GNSSについては交通安全環境研究所の取組事例があり、3章で後述する。

#### 2. 3. 2. 列車位置検知に活用できる可能性のあるセンサ

表1 列車位置検知に活用されているセンサ

センサ	地上側	車上側	絶対位置／ 相対位置	位置／速度		分類	備考
				位置	速度		
軌道回路	○	○(ATC受電器)	絶対位置	○	—	面で検知	
ループコイル	○	○	絶対位置	○	—	面で検知	複数の種類あり
アクスルカウンタ (車軸検出器)	○	—	絶対位置	○	—	点で検知	
地上子	○	○(車上子)	絶対位置	○	○	点で検知	2点間で速度検知可能
RFID	○(タグ)	○(読取機)	絶対位置	○	○	点で検知	2点間で速度検知可能
トロリコンタクタ	○	—	絶対位置	○	○	点で検知	2点間で速度検知可能
無線測距	○(沿線無線機)	○(車上無線機)	絶対位置	○	—	電波で検知	SPARCS <sup>9)</sup> の場合
衛星測位(GNSS)	—	○	絶対位置	○	○	電波で検知	電波のドップラ効果で速度検知可能
速度発電機	—	○	相対位置	◇	○	速度で検知	

(凡例)○:設置 —:非設置 (凡例)○:測定可 —:測定不可  
◇:計算等を介して間接的に取得可

表2 列車位置検知に活用できる可能性のあるセンサ

センサ	地上側	車上側	絶対位置／ 相対位置	位置／速度		分類	備考
				位置	速度		
磁気マーカ	○	○(読取機)	絶対位置	○	○	点で検知	2点間で速度検知可能
慣性計測装置(IMU)	—	○	相対位置	◇	◇	速度で検知	加速度、角速度の積分により位置と速度を算出
レーザドップラ速度計	—	○	相対位置	◇	○	速度で検知	
レーザドップラ速度計	—	○	相対位置	◇	○	速度で検知	
カメラ (単眼, ステレオ)	○ (地物, ターゲット)	○	相対位置 絶対位置	○	—	周辺環境 認識で検知	絶対位置検知は地物やターゲットの絶対位置との紐付けが必要
レーザセンサ (LIDAR)	○ (地物, ターゲット)	○	相対位置 絶対位置	○	—	周辺環境 認識で検知	絶対位置検知は地物やターゲットの絶対位置との紐付けが必要

(凡例)○:設置 —:非設置 (凡例)○:測定可 —:測定不可  
◇:計算等を介して間接的に取得可

列車位置検知に活用できる可能性のあるセンサとして、磁気マーカ、慣性計測装置（IMU：Inertial Measurement Unit）、レーダドップラ速度計、レーザドップラ速度計、カメラ、レーザセンサ（LiDAR）が挙げられる。表1と同様に、これらについて設置箇所、計測可能な項目等を整理したものが表2である。

自動車分野では、車両挙動を加速度・角速度で検出する慣性計測装置がカーナビゲーションシステムに内蔵され、加速度・角速度を時間積分し、走行距離に換算して自車位置をモニタ上に表示している。これは同じ移動体である鉄道にも応用可能と考えられる。

また、現在、自動車の自動運転の技術開発が非常に盛んで、開発を担う自動車メーカー等が所有する試験車両には、カメラやレーザセンサ（LiDAR）<sup>10</sup>が搭載されている。これらは自動運転のセンシングデバイスとして自車周辺の環境認識のために使われる。自動車の自動運転ではダイナミックマップと呼ばれるデジタル地図に収録された建築物等の形状や位置の情報とカメラやLiDARから得られる情報を照合しながら自車の走行位置を推定する。

この技術を鉄道に当てはめると、まず車両に設置したカメラやLiDARが地物（構造物、建築物等）やターゲット（キロポスト、数字が書かれた標識等）の映像を記録する。この映像から列車との間の距離を検出できるが、この距離は相対位置となる。先述の通り、列車制御に用いる位置は絶対位置であることから、絶対位置を測定できる他のセンサとの組み合わせによってカメラやLiDARを列車位置検知に活用できる可能性がある。交通安全環境研究所ではLiDARによって列車と建築物等の間の相対位置を検出できることを確認している<sup>11</sup>。LiDARがリアルタイムで記録するのは建築物等の形状であり、それがどこの建物かまでは認識できない。LiDARやカメラを位置検知に活用するには、これらが検出した形状や物体と絶対位置を紐付けるものが必要となる。

## 2. 4. 位置検知センサの組み合わせ方

2.1節で述べたように、列車制御はキロ程に基づく絶対位置の情報を用いて行われる。I系、II系ともに

表3 I系センサとII系センサの組み合わせ方

		II系センサ	
		絶対位置	相対位置
I系センサ	絶対位置	○	○
	相対位置	○	×

相対位置を出力するセンサでなければ、I系、II系のどちらかに相対位置を出力するセンサの使用は可能である。これを整理したものが表3である。表中の○は組み合わせ可、×は不可を示す。I系を主、II系を副とする組み合わせ、I系とII系の出力結果を常に比較するような組み合わせなど、様々なI系とII系の構成が考えられるが、これは列車制御システムの設計コンセプトや全体構成により決定される。

2.2節で述べたように、I系のセンサが位置検知機能を喪失してもII系のセンサが正常作動していれば列車の位置検知を継続できる可能性が高い。これを実現するには、I系とII系が共通原因故障に至らないよう、I系とII系は特性の全く異なることが望ましい。

## 2. 5. 列車位置検知技術の評価方法の検討

前節まで車上主体型の列車位置検知に有用なセンサの組み合わせについての整理を試みた。個別の組み合わせの評価については以下の手順が考えられる。

適用線区の状況（列車密度や列車編成長等）や列車制御システムの設計コンセプトより要求性能が定められる。この要求性能としては、検知精度やリアルタイム性のほか、信頼性（要求された機能を果たせる能力）、アベイラビリティ（継続して稼働できる能力、可用性）、保全性（要求された機能を修復させる能力）、安全性（フェールセーフ性、故障検知機能等）、環境性能（耐振動性、耐環境性等）がある。コストや寿命の観点も組み合わせを評価していく上で重要になる。

更に、要求性能を満たすことの検証・評価方法も必要であるが、これについては今後検討を進めていく。

## 3. GNSSに関する取組

本章ではGNSSに関する交通安全環境研究所の取組について述べる。

### 3. 1. 衛星測位

衛星測位とは、少なくとも4機の衛星からの電波を受信して、衛星から受信機に到達するまでの時間を求め、電波の速度を乗じて距離を得て現在位置を算出することである<sup>6</sup>。GNSSとして最も有名な米国のGPSをはじめ、日本も準天頂衛星を4機打ち上げており、これらの衛星の電波を受信して測位することができる。

しかし、GNSSによる測位は誤差が生じやすい。誤差の要因には、電波が通過する電離層や対流圏の影響のほか、時々刻々変化する衛星の配置やマルチパス<sup>6</sup>によるものがある。また、トンネル内では電波を受信

できず測位が困難である。GNSS を活用するには GNSS の誤差やデメリットを補完する必要があり、これには他のセンサとの併用が有用と考えられる。

### 3. 2. 他のセンサとの併用例

GNSS を補完するセンサは複数あると考えられ、その一つに慣性計測装置 (IMU) が挙げられる。IMU は 3 軸の加速度及び角速度を検出し、さらにこれらから姿勢角 (ロール、ピッチ) と方位角 (ヨー) を演算する装置である。

GNSS を補完するセンサとして IMU を併用し、実車走行時に測位を行った結果の一例を図 1 に示す。本図は立体交差の下を列車が通過したときの結果である。図中の青線は GPS で測位した結果、水色線は IMU で補完した結果、黄色矢印は列車の進行方向を示す。

僅かな時間ながら列車が立体交差下を通過することで電波の受信が遮断され、その影響を受けて GPS の測位結果は軌道から大きく離れている。これに対して、IMU で補完した測位結果は軌道に沿っている。列車位置は軌道に沿って検知されていることが望ましい。本結果から、IMU は GNSS を補完するセンサになり得ることを確認した。

GNSS については「鉄道における準天頂衛星等システム活用検討会」<sup>12)</sup> (座長：中村英夫 日本大学名誉教授、事務局：国土交通省鉄道局、交通安全環境研究所) にて準天頂衛星をはじめとする GNSS の鉄道への活用が検討されている。列車位置検知に GNSS を適用する場合については同検討会の議論を参照しながら今後検討を進めていくこととしたい。

## 4. おわりに

本稿では、既に列車位置検知に活用されているセンサと今後活用される可能性のあるセンサについて技術的な観点での整理や、GNSS をはじめとする複数の位置検知センサの組み合わせの整理を試みるとともに、

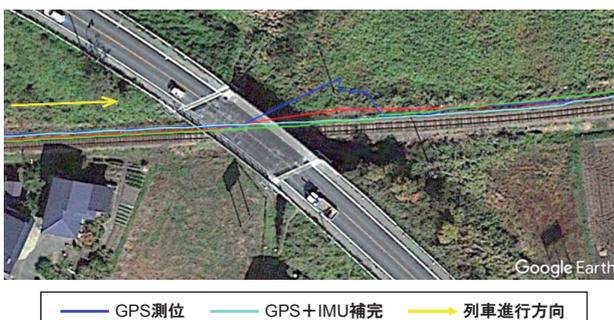


図 1 IMU で補完した場合の測位結果例

列車位置検知技術の評価に関する取組について述べた。今後は検知精度や信頼性などの観点から複数のセンサの適切な組み合わせについて検討を進めるとともに、車上主体型の列車位置検知技術に求められる要件やその評価方法などを検討する。

今後検討を進めていくにあたり、関係各位のご意見やご知見を多く賜れば幸いです。

## 謝辞

3.2 節で示した測位結果は多摩川精機株式会社との共同研究によって得られたものです。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局, 令和元年 9 月 6 日付報道発表
- 2) 北野ほか, “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”, 鉄道総研報告, Vol.33, No.7, pp.29-34 (2019)
- 3) 田中ほか, “鉄軌道における衛星測位の活用技術に関する研究”, 交通研フォーラム 2015 講演概要集, pp.121-124
- 4) 工藤ほか, “列車制御システムにおける衛星測位利用に関する取組”, 交通研フォーラム 2016 講演概要集, pp.65-68
- 5) 篠田ほか, “列車制御に衛星測位を利用する際の処理方法の検討”, 第 24 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017), S7-5-1
- 6) 山口ほか, “車上主体型列車制御システムにおける列車位置検知技術の評価に関する基礎検討”, 交通研フォーラム 2018 講演概要集, pp.59-60
- 7) 篠田ほか, “2000 系車体傾斜制御装置の開発”, 第 41 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, (2004)
- 8) 馬場ほか, “無線による列車制御システム (ATACS)”, JR EAST Technical Review, No.5, pp.31-38 (2003)
- 9) 日本信号株式会社ホームページ
- 10) 竹内ほか, “地方鉄道を対象とした自動運転技術活用に関する基礎検討”, 交通研フォーラム 2018 講演概要集, pp.3-6
- 11) 篠田ほか, “LiDAR センサを用いた絶対位置の把握について”, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), SS7-3-2303
- 12) 国土交通省ホームページ