

速度発電機と慣性センサ・GNSS を併用した 車上位位置検知システム

北野 隆康* 中澤 幸弘* 太田 佑貴*
谷口 茂** 岩田 浩司* 山本 春生*

On-board Train Positioning System Combining Tachometer Generators with Inertial Sensors and GNSS

Takayasu KITANO Yukihiro NAKASAWA Yuki OTA
Shigeru TANIGUCHI Koji IWATA Haruo YAMAMOTO

We have been developing an on-board positioning system with combination of tachometer generators and inertial sensors to recognize the position of a vehicle. The system is capable of correcting the train position in general line where curves and points exist at certain intervals. However, in the case of long straight line sections, the position correction by detecting curves cannot be possible, and it is necessary to correct the position by balises. In this paper, we propose a position correction method for the developed vehicle position detection system, which can be applied to straight lines by utilizing GNSS positioning.

キーワード：車上位位置検知，速度発電機，慣性センサ，GNSS，位置補正

1. はじめに

近年，無線式列車制御システム^{1) 2) 3)}や，車上データベースに基づくATS⁴⁾など，車上主体で制御を行う保安システムが普及しており，車上で列車位置を認識する技術が重要な要素技術のひとつとなっている。鉄道総研では，速度発電機と慣性センサを併用して位置を認識する車上位位置検知システムを提案し，開発を続けてきた⁵⁾。曲線や分岐，勾配変化が散在する一般的な線区において車両運動状態の観測を行うことにより，車上で列車位置補正が可能であるが，十数kmにわたって曲線等が存在しないような長い直線区間に対しては，必要とする位置認識の精度に応じて，地上子による位置補正を行うなどの対応が必要となっていた。

そこで本稿では，開発した車上位位置検知システムに対して，必要に応じてGNSSによる測位⁶⁾を追加することで，直線区間への対応も可能となる位置補正手法を提案する。本稿で提案する手法では，既開発のシステムで慣性センサを用いて曲線を検知していたことと同様の位置付けでGNSSの測位を適用させる^{7) 8)}。これにより，GNSSの測位結果を追加することで直線区間への対応が可能となる。本稿では，開発したシステムにGNSSの測位を追加する手法の概要について述べた後，走行試験

で取得したデータを用いて検証を行った結果，直線での位置認識精度の向上が確認できたので報告する。

2. 車上位位置検知システム

2.1 概要

2.1.1 車上位位置検知システムの目的

地上設備の削減と保安制御の高度化を目的として，車上主体で制御を行う保安システムの導入が進んでいる。これらのシステムでは，列車位置に基づいて保安制御を行うため，車上で列車位置認識が重要となっている。現在は，速度発電機と位置補正用の地上子を用いて列車位置を認識しているが，地上子の設置および管理が課題となっている。そこで本稿では，地上子に依らない位置補正手法である速度発電機と慣性センサを併用した手法にGNSSを追加することで，線形によらず車上で位置検知が可能となるシステムを提案する。

2.1.2 システムの前提と構成

本システムを適用する前提として，速度発電機もしくはそれに準ずる信頼できる速度センサ（これらを以下，まとめて速度発電機と記載する）を有しており，計測した速度や位置に関する情報を上位の車上保安装置に出力する構成を対象とする。

本稿で対象とする車上位位置検知システムは，図1に示すように，位置検知処理装置，データベース，慣性センサ，GNSS受信機およびそのアンテナから構成される。

* 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)

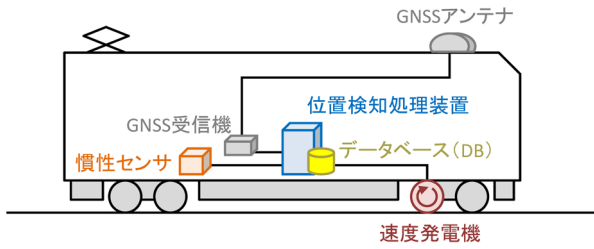


図1 車上路検知システムの装置構成

2.1.3 処理概要

データベースには、走行位置（走行距離）と慣性センサによる計測値やGNSS測位による座標を用いて位置を特定するための情報を、それぞれ照合できるように対応付けて登録する。

列車走行中、位置検知処理装置は、速度発電機の出力を基準として走行位置を認識する。走行位置がデータベースに登録された走行位置に接近すると、データベースに登録された情報と、慣性センサによる計測値やGNSS測位による座標を照合する。これらの情報が一致すると、認識している位置をデータベースの値で補正する。

2.2 速度発電機と慣性センサを併用した位置補正

2.2.1 曲線での位置補正手法

速度発電機と慣性センサを併用して位置補正を実施する手法の概要⁵⁾を図2に示す。この手法では、各装置等の処理と入出力の概要を図2(a)に示すように、走行速度と慣性センサの出力である加速度から曲率を算出してデータベースと照合する構成となっている。データベースには、走行位置と、位置補正を実施する曲線の曲率およびその長さを対応付けて登録しておく。

位置検知処理装置は、列車走行時に、式(1)のように速度発電機の出力から得られる速度 v [m/s] と、慣性センサから得られる角速度 ω [rad/s] から曲率 κ を算出する。

$$\kappa = \frac{\omega}{v} \quad (1)$$

曲率の照合にあたっては、図2(b)に示すように、「曲線進入前の直線」と「曲線」、「曲線通過後の直線」の3点にて曲率とその長さを用いる。上記の3点での照合の結果、走行中に算出した曲率とデータベースに登録されている曲率が一致する場合は、データベースに登録されている位置情報を用いて位置補正を実施する⁵⁾。

2.2.2 課題

図2(b)および式(1)に示す通り、曲率が小さい場合や算出した曲率が安定しない場合は、補正箇所の照合にて異なる位置と認識され（照合不一致）、位置補正が実施されない可能性がある。また、直線区間においては位置補正が行われず、速度発電機の積算距離のみで位置を

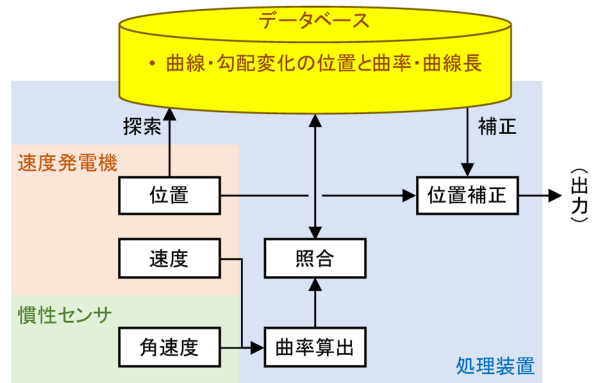
認識するため、長い直線区間において位置補正を実施する手法が課題となる。

速度発電機の積算距離には、滑走・空転の発生や車輪径設定や曲線を走行する際における距離差などが原因となる誤差が含まれ、走行距離に応じて誤差が蓄積する。この蓄積誤差の解消を目的として一定間隔で列車位置を補正するため、速度発電機と慣性センサを併用した構成に、さらにGNSSの測位結果を併用する手法を以下で提案する。

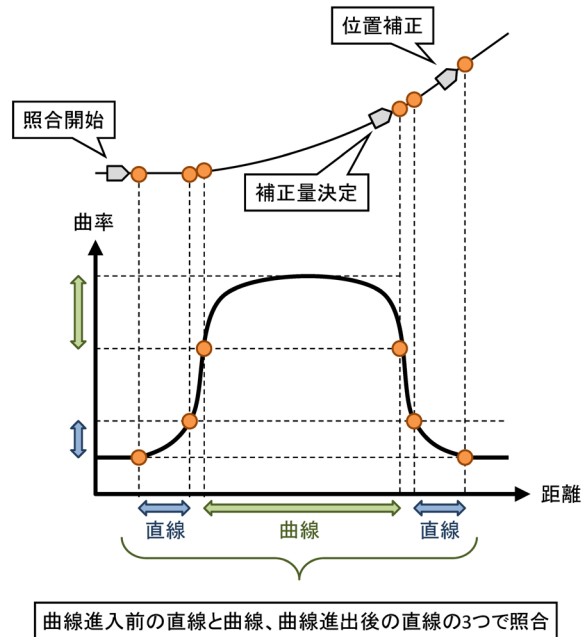
2.3 速度発電機とGNSSを併用した位置補正

2.3.1 構成

速度発電機に慣性センサを併用したシステムにGNSSを追加で適用した構成を図3に示す。列車位置を基にデータベースを探索して照合するという処理は同じである。ただし、速度発電機と慣性センサを併用する方式においては、速度と角速度から算出した曲率をデータベー



(a) 処理と入出力



(b) 曲線の照合

図2 速度発電機と慣性センサを併用した位置補正

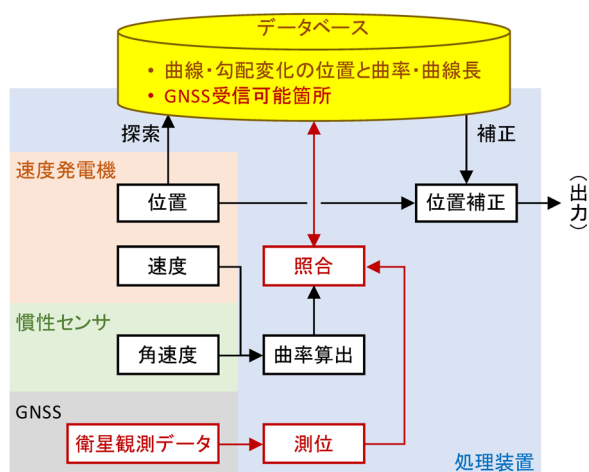


図3 長い直線が多い線区向けにGNSSを追加で併用した位置補正手法

スと照合することに対して、GNSSを用いる場合は測位結果をデータベースと照合する点異なる。

GNSSの測位結果とデータベースとの照合は、位置補正実施箇所1カ所に対して、代表点1地点とその前後2地点の合計3地点で行う。これは、慣性センサを用いた曲線の照合において「曲線進入前の直線」「曲線」「曲線通過後の直線」の3点で照合するのと類似しており、アルゴリズムに大きな変更を加えることなくGNSSを適用することが可能となる。

2.3.2 車上での位置認識とデータベース登録情報

速度発電機とGNSSを併用して車上での位置補正を実施するため、速度発電機の出力を積算した距離に基づ

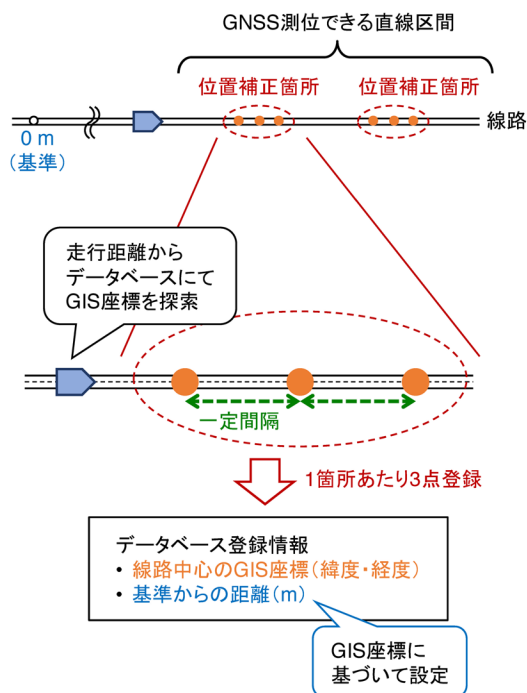


図4 GIS座標と速度発電機による列車位置認識

いてデータベースを探索する。そのため、事前にデータベースを作成し、速度発電機の積算距離と、その箇所の座標情報を対応付けておく必要がある。

データベースの作成にあたっては、キロポストなどの位置と座標が確立している箇所を基準点として設定し、そこからの距離と、GIS (geographic information system) に基づく線路中心の座標を対応付けて登録する(図4)。

2.3.3 適用する測位アルゴリズム

鉄道環境では列車進行方向の上空が開けていることが多く、GNSSの衛星の観測が可能となるケースが多い。しかし、沿線に構造物や高架橋といった構造物がある場合は、GNSS衛星から送信された電波がマルチパスの影響を受け、認識される位置に誤差が発生する。そこで、認識する位置の信頼性を高めるため、線路座標を活用する高信頼GNSS測位計算プログラム⁶⁾を適用して測位計算を行う。

2.3.4 位置認識および位置補正

位置補正を行う際のデータベースの探索では、図5に示すように照合処理が実施される。

- ① 登録箇所に接近した際、その座標について、データベース(DB)に登録されている値と、GNSSによる測位結果との離隔が設定した閾値以下であること
- ② 位置補正実施箇所1カ所に設定された3点間の距離について、データベースに登録されている各地点間の座標に基づく距離と、各地点間の積算距離の差が設定した閾値以下であること

上記の条件を満たす場合に、データベースに登録した地点を通過した時刻において、車上で認識している位置を、データベースの登録値で補正する(図5③)。

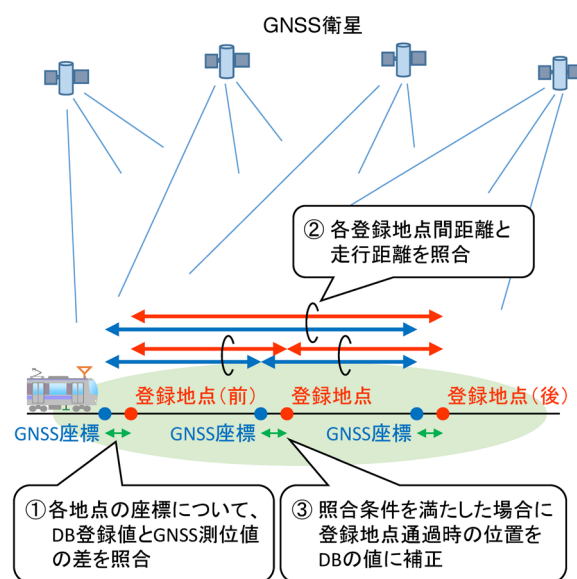


図5 GNSSを用いた位置検知および位置補正の概要

2.3.5 GNSS アンテナと受信機の故障検知

本システムを保安装置に適用する場合、GNSS 装置の故障を検知することが重要である。本位置検知システムでは、文献6で提案されている高信頼 GNSS 測位アルゴリズムをフェールセーフな処理装置に実装する。

このアルゴリズムは受信系が2重化されていることと、受信機が衛星観測データを出力することを前提としている。フェールセーフな処理装置では、各衛星の測位信号に対して、既定値、異なる物理現象、アンテナ・衛星の冗長性を利用した検定を行い、衛星の故障、受信機の故障のほか、受信環境の影響によるデータ誤り、計測誤差を極力排除するような処理がなされる。これにより、上記の検定を通ったタイミングでのみ高信頼な測位解が得られることとなる。

3. 機能検証

3.1 GNSS を併用した位置補正アルゴリズムの検証

2.3 節で提案した速度発電機と GNSS を併用した位置補正手法について、走行試験にて取得した速度発電機の出力および GNSS の衛星観測データを用いて性能を検証した。

データベースに登録する位置補正箇所としては、線路座標情報と航空写真に基づいて、以下の条件を満たす箇所を選定した。

- ・ 上空が開けており、衛星が観測できること
- ・ 沿線に構造物がないこと

定量的な性能検証にあたって、図5における①に相当するデータベース登録値と GNSS 測位値の差、②に相当する各登録地点間距離と走行距離量の差、および、③に示す位置補正量における各値の発生回数を確認した。

3.1.1 データベースの作成と閾値の設定

機能検証のため、走行試験を実施した区間（約 50km 程度）の線形に基づいて位置補正実施箇所を 45 カ所設定し、その 1 カ所に含まれる 3 地点の間隔をそれぞれ約 100m とした。実際にデータベースに登録する値としては、それぞれの地点に対して、基準となる位置から走行した距離と緯度・経度を対応付けて登録した。

各箇所での照合において一致と判定する条件を 1 地点あたりの差が 5m 以下であることとした。これは、在来線における最高速度である 130km/h に対して、処理装置の周期である 100ms の処理遅延を考慮した値をベースに、マージンを加えて設定した値であり、照合誤差が最大速度走行時に最大の処理遅延が発生する時の誤差 3.61m にマージンを加えた 5m 以下になると登録地点であると判定する。

3.1.2 データベース登録箇所到達検知の誤差

図5①に示した各照合地点の位置認識精度を確認するため、照合する 3 地点について、データベースの登録値と、その地点を通過した際の GNSS による衛星観測データに基づいて測位した座標との離隔を求めた。その結果を図6に示す。

同図に示すように、登録地点において離隔が 5m 以内（最大 3.11m）であることが確認でき、登録地点に到達したことの認識が可能であることを確認した。また、登録地点のうち最大の離隔となった 3.11m の離隔は、GNSS の測位計算の処理周期の 100ms の間に列車が走行する距離に相当し、処理周期以内に収まっている。

以上より、データベースに登録した地点に対して、GNSS の測位値を用いて照合することが可能であることを確認した。

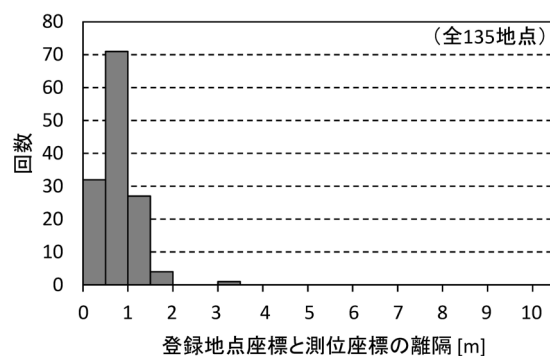


図6 登録地点座標と測位座標の離隔

3.1.3 登録地点間の距離と走行距離の差

図5②に示す照合の結果得られたデータベース登録地点間の距離と、この地点を走行した際の列車の走行距離の差を図7に示す。この差は平均 1.60m、最大で 3.87m となっており、登録地点 2 回分の測位誤差以下となっている。これより、すべての登録地点において、走行距離とデータベースによる距離の差が想定される範囲内に収まっていることが確認できる。また本提案手法では GNSS の測位処理周期の影響が大きいことを示している。

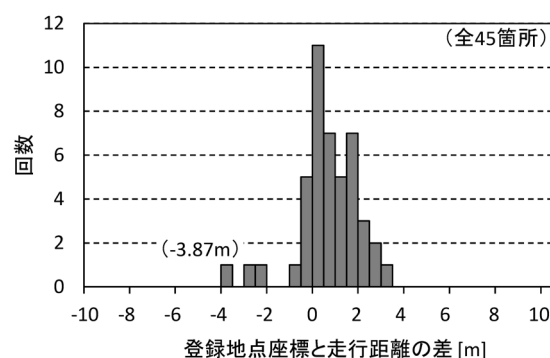


図7 登録地点座標と走行距離の差

3.1.4 位置補正量

図8に、位置補正を実施した際の位置補正量とその回数との関係を示す。同図より、補正量は平均4.06mで最大が23.2mとなっている。最大となった23.2mのケースについて確認すると、走行開始後、最初に位置補正を実施した箇所であり、走行開始地点の誤差が多く含まれているものであった。また、次に補正量が大きいものは13.5mであったが、この箇所も走行開始後の最初に位置補正を実施した箇所であった。走行開始地点を除く場合、平均補正量は3.24mであった。

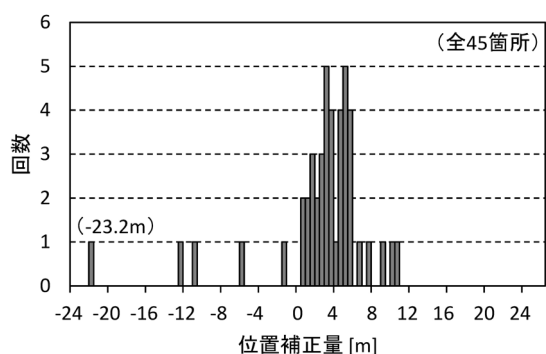


図8 位置補正量

3.2 位置補正箇所の追加に関する効果

GNSSを併用した直線での位置補正手法の有効性について、速度発電機と慣性センサを併用した手法に対し、さらにGNSSを併用することで、線形にかかわらず位置補正が可能となる効果について検証する。

3.2.1 位置補正箇所数の増加

直線区間での走行データを基に、速度発電機と慣性センサによる車上位位置検知を実施する場合と、それに加えてGNSSを併用する場合を比較して、位置補正の頻度が増えることを確認する。それぞれの手法を用いた場合における、位置補正に関する箇所数と位置補正が実施された割合を表1に示す。

表1より、速度発電機と慣性センサによる手法では位置補正箇所として設定できる箇所が最大でも10箇所であったが、GNSSの併用により45箇所が追加され、合計55箇所となる。

位置補正については、速度発電機と慣性センサを用いる場合においては曲線を検知できずに実施できなかったが、GNSSを併用することで位置補正が可能となった箇所がみられた。これはGNSSを併用しない場合、直線区間が長い区間において、位置補正せずに長い距離を走行したために速度発電機の積算距離に誤差が蓄積し、照合にて不一致と判定された箇所である。GNSSの併用で新たに追加された位置補正箇所にて補間的に位置補正されることで、このような箇所でも、照合にて不一致となることを回避でき、位置補正が実施できる。

また、位置補正箇所の平均間隔についても、速度発電機と慣性センサを用いる場合は平均で4.4kmであったのに対し、GNSSを併用することで、平均0.86kmまで短くすることができた。

表1 位置検知箇所数及び位置補正の実施状況

	速度発電機と慣性センサ併用		速度発電機と慣性センサ・GNSS併用	
	箇所数	割合	箇所数	割合
データベース登録箇所	10箇所	100%	55箇所	100%
位置補正実施	2箇所	20.0%	53箇所	96.4%
位置補正未実施	8箇所	80.0%	2箇所	3.6%
位置補正箇所平均間隔	4.4 km		0.86 km	

3.2.2 直線での位置補正の効果の検証

速度発電機と慣性センサを用いる方式にGNSSを併用することで、位置補正間隔が短くなる様子を図9に例示する。同図では、同じ位置補正箇所（曲線による位置補正を実施する箇所）に着目し、GNSSを併用する前と併用後でその位置補正量に変化する様子を示している。基準点から走行をはじめ、1つ目の曲線では位置補正量が26.1mから-0.2mとなり、2つ目の曲線では53.4mから-1.2mとなっており、速度発電機の誤差が拡大する前に補正されていることが確認できる。

以上の結果から、速度発電機と慣性センサを用いるシステムに、さらにGNSSを併用することで、線形を問わず車上位装置のみで位置補正が可能となることを確認できる。これにより、開発中の車上位位置検知装置に提案手法を導入することで、長い直線を含む区間での位置認識精

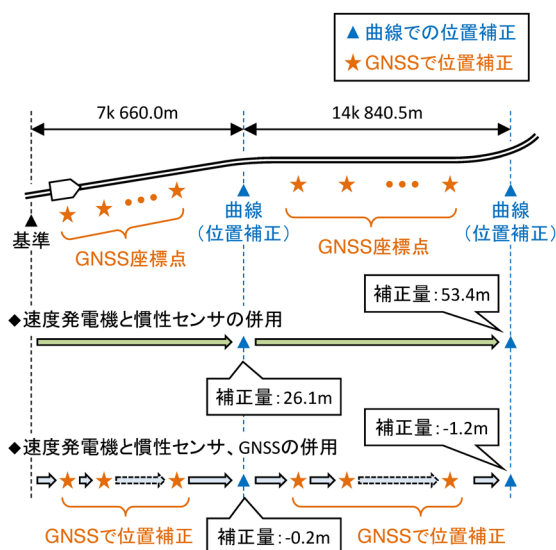


図9 位置補正量の改善

度が向上する。

4. まとめ

速度発電機と慣性センサを併用する車上位位置検知システムの課題であった、直線が長く継続する線区への対応として、GNSSを併用する手法を提案した。

提案手法について、走行中の速度発電機とGNSSで測位したデータを用いて検証し、直線が継続する区間を含む位置補正が可能であることを確認した。また、位置認識精度の向上を確認した。以上より、これまでは曲線が散在する線区のみで可能であった車上位位置検知が、本稿での提案手法を適用することにより、線区環境に依らず実施可能となる。

今後の課題としては、車上位装置とのインタフェースを定めてモニタランを実施し、精度および確度を実線区において定量的に評価することがあげられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社および西日本旅客鉄道株式会社および株式会社京三製作所に多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 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. 05, pp.443-447, 2016
- 2) 宮本慎司, 山本慎, 間崎光一郎: 無線式 ATC の開発および和歌山線への導入, JREA, Vol. 61, No. 8, pp.23-26, 2018
- 3) 関口慎一: 東京メトロの CBTC, 鉄道と電気技術, Vol. 27, No.10, pp. 24-28, 2016
- 4) 藤田浩由, 新井英樹, 鬼頭知彰, 中島正晶, 木藤信敏, 貞苅路也: 車上位速度照査式 ATS-Dx システムの開発, 電気学会産業応用部門大会, 3-19, 2009
- 5) 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: 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, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 7, pp.29-34, 2019
- 6) 山本春生, 高須知二, 久保信明: 三次元線路座標列を拘束条件とするマルチ GNSS による列車位置計測, 測位航法学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.12-21, 2015
- 7) 谷口茂, 岩田浩司, 北野隆康, 記虎正幸, 浅野晃: 地上子を用いない直線区間における列車位置検出手法の基礎検討, 信学技報, DC2018-66, 2018
- 8) 中澤幸弘, 山本春生, 谷口茂, 太田佑貴, 岩田浩司: GNSS 及び線路座標を併用した列車位置検知, 令和 2 年電気学会全国大会, 2020