

交通分野における高度な制御・管理システムの  
総合的な技術開発の推進

【研究成果概要】

---

平成27年3月

## 1 研究の目的

本研究概要は、国土交通省総合政策局による委託研究として交通安全環境研究所が実施した平成26年度までの研究成果をもとにとりまとめたものである。

本研究は、交通分野における制御・管理システムの高度化を進めるため、地上施設に頼らずに移動体の位置検知を行う技術を用いる上で必要となる技術要素等について検討を行い、事業者等における実用化を可能とする要件をとりまとめることを目的としたものである。

## 2 研究の方法

鉄道は一般的に専用敷を走行するため、踏切部を除いて周辺の交通状況を考慮せずに進行方向に特化した運行管理方法についての研究が可能である。また、固定された走行路を運行するため基本的に操舵が不要であり、列車の進行方向の安全性の確保に特化して研究を進めることができる。

そのため、まず鉄道を研究対象とし、地上設備に頼らずに運行を管理する機能を実現する手法を検討し、試験装置を構築して実証試験を行って検知性能等を把握することとした。また、研究については外部有識者を交えた連絡会を組織し、適宜意見を頂きつつ進めることとした。

## 3 陸上交通等に適したシステムの基本設計

地方中小鉄道では単線の路線が多いが、連動駅（行き違いのための分岐器のある駅を指す）間の長大な軌道回路及びその信号ケーブルの設置や維持・点検に費用を要している。そこで、連動駅間の軌道回路を列車上での衛星測位によって代替する方式を検討する（連動駅場内の軌道回路は存置する）こととする。連動駅場内と連動駅間の境界付近の位置精度及び必要な精度が得られない場合の対策が技術的課題である。

また、路面電車では、トロリーコンタクター（以下「トロコン」という。）による車両位置検知が用いられているが、トロコンは可動部があるため故障が多く、また、メンテナンスには高所作業が必要であるので、衛星測位に代替する方式により、トロコン及び付帯する信号ケーブルが不要となる利点がある。トロコンは「点」検知であるが、衛星測位では一定の範囲（エリア）での検知となるため、必要な精度の確保が技術的課題である。

## 4 中小鉄道線における位置検知技術の利用実証試験

典型的な中小鉄道線（単線）において、駅間の数 km 以上の電気回路や信号ケーブルの設置・維持コスト削減のため、駅間の軌道回路(図1参照)を準天頂衛星を利用した衛星測位による位置検知方式によって代替することを念頭に置き、列車運行の安全性を確保するため、必要な精度を得る方法及び精度が得られない場合の代替補完方法について、鉄道事業者（路線長 30km）の協力を得て、列車による実証試験を行った。

衛星測位による精度・信頼性を検証するため、図2に示す試験装置を構築した。位置検知に用いる装置は、検証のためにリアルタイムに真の列車位置を把握する装置（レーザドップラ車速計）、衛星測位受信機（全部で6台（前後2台で1組））及び衛星測位アンテナ（前後2台）である（図3）。



図1 地方中小鉄道線の一般的な構成

同一のアンテナから分配して衛星測位受信機に同じ信号を入れるが、二組は同一機種で準天頂衛星の使用・不使用の設定差があり、もう一組は異なる機種として、相互に比較する。各受信機の精度は、リアルタイムに解析する装置により線路方向の誤差量等を解析する（衛星信号判定ソフトウェアの画面を図4に示す）。

実証試験は全線2往復／1日を2日間走行し、途中の分岐器のある連動駅（2駅）について、衛星測位環境がよい場所、悪い場所における詳細な分析を行った。

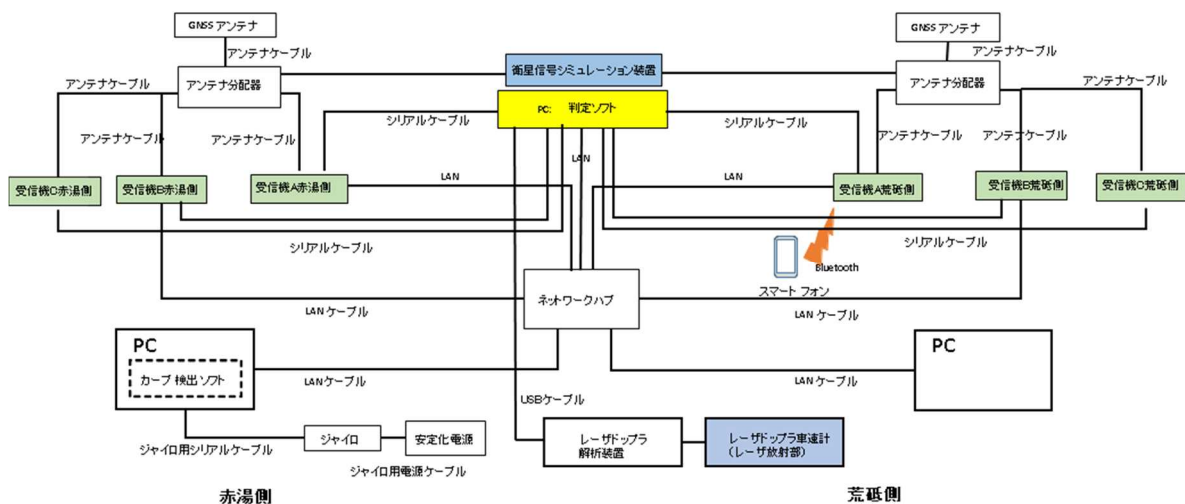


図2 地方中小鉄道線試験装置構成



図3 試験装置（左：レーザドップラ車速計 中：衛星測位受信機 右：衛星測位アンテナ）

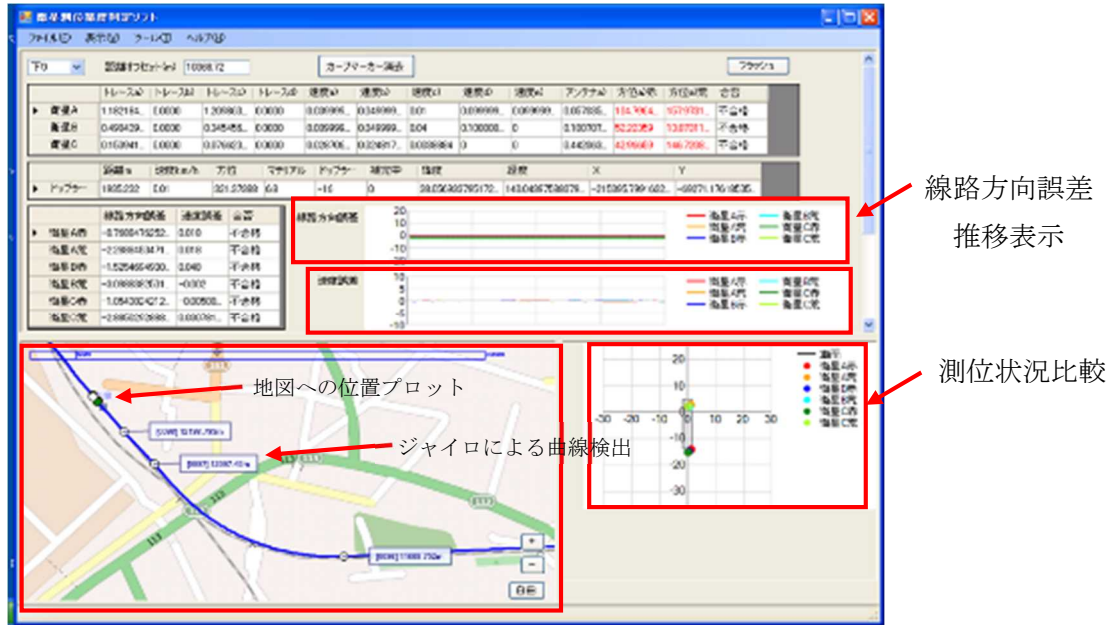


図4 リアルタイム衛星信号判定ソフトウェアの画面

路線のうちで最も精度が悪化し、かつ、衛星測位を行うべき信号機付近の場所（図5）において、衛星測位精度の向上を図るため、線路周辺の遮蔽物の状況に応じ、使用すべき測位衛星の方位・仰角をあらかじめ決めてデータベースを作成しておき、車上で実際の衛星配置に照らして測位に使用する衛星を判別する手法（図6）を考案し、試験により精度向上効果を確認した。線路方向誤差の試験結果を表1に示す。

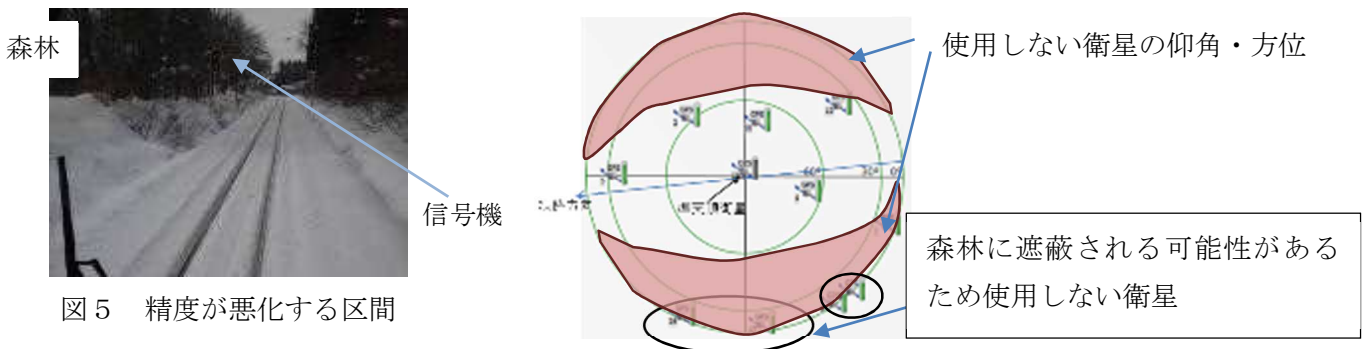


図5 精度が悪化する区間

図6 遮蔽される衛星を判別し精度向上する手法

表1 列車上で得られた線路方向誤差（駅間全体）（単位[m]）

長井	線路方向誤差（平均）		線路方向誤差（絶対値最大）		検定合格率
	検定前	検定後	検定前	検定後	
受信機 A (準天頂衛星補完)	0.247	0.250	-11.766	-9.717	96.5%
受信機 B (GPS 衛星のみ)	-1.452	-1.447	-13.302	-13.302	96.5%

準天頂衛星の使用有無による偏差等は表2のとおりであり、準天頂衛星の補完を利用する場合には平均値は大きく改善し、ばらつきも小さくなっている。誤差の最大値（絶対値）は15m程度の値が見られるが、橋梁の下など、誤差が大きくなることが予想される地点での瞬間的なものであり、これを除くと列車長と比較して安全上問題がない程度の高い精度が得られている。

表2 準天頂衛星（補完）による改善効果 (単位[m])

	受信機 A (準天頂衛星補完)	受信機 B (GPS 衛星のみ)
平均	-0.32	-1.91
絶対値最大	-14.97	-15.82
標準偏差	1.28	1.33

技術的課題である、連動駅場内と連動駅間の境界付近（場内信号機付近）での精度に関する分析結果は表3のとおりである。受信機A（準天頂衛星補完あり）、受信機B（GPS衛星のみ）とも最大でも3.5m以内の誤差であり、安全上の問題が生じない量である。線路方向誤差が正規分布を取ると仮定して $10^{-8}$ での発生頻度（最悪値）を算出したところ、 $\pm 17m$ となる。これを図7のように「安全上の余裕」として見込めば安全上支障の無い制御が可能と分かった。

表3 線路方向誤差（場内信号機付近） (単位[m])

受信機	受信機 A 赤湯側	受信機 A 荒砥側	受信機 B 赤湯側	受信機 B 荒砥側	受信機 C 赤湯側	受信機 C 荒砥側
分散	0.43	0.42	0.44	0.42	0.75	1.03
平均値	-1.33	-2.64	-1.11	-2.37	-1.19	-4.93
最大誤差	-2.05	-3.35	-1.85	-3.09	-2.66	-6.86

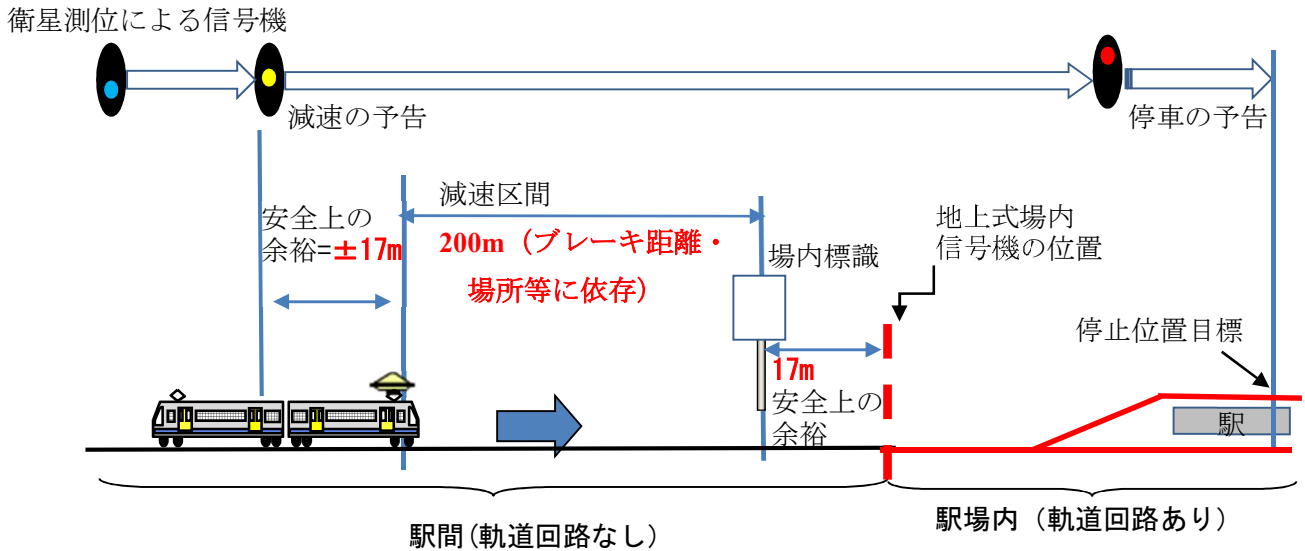


図7 境界部付近での安全上の余裕の設定例

衛星測位が利用できない場合の対策として、場内信号機付近の曲線をジャイロ装置により検知する代替補完については、ほとんどの曲線は正しく検出することができたため、ある程度の位置把握が可能と考えられる。ただし、同じ方向の曲線が連続する場合には半径300mの急曲線が不検知となる場合が見られた。また、今回の設定値では、曲線進入から30~50m（2秒程度）で検出する性能であり、衛星測位よりも検出精度としては劣る結果となった。

次に、山形鉄道の運転士の協力により、衛星測位誤差によって位置が決まらない場合における運転士への情報提示内容、位置誤差によって信号機の現示タイミングが遅れる場合等の環境を再現した試験を実施し、使用しやすさについてアンケート形式で評価を得た（図8）。

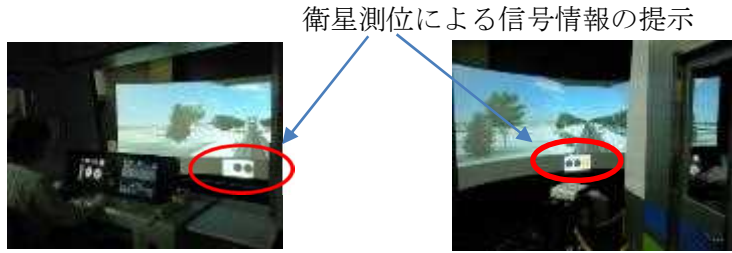


図8 運転シミュレータによる衛星測位による信号提示試験

衛星測位結果及びシミュレータによる信号提示試験結果を踏まえ、図7に示した安全上の余裕を確保することにより中小鉄道線を実現可能な衛星測位による運行保安システム構成をとりまとめた。

**5 路面電車環境における位置検知技術の利用実証試験**

路面電車環境に対する試験のため、前掲の図2の試験装置にトロコンの位置を検出するための光電センサ（図9）を追加し、トロコン位置に到達した際に路面に貼り付けたマーカを検出する手法により衛星測位位置の把握を行い、路面電車のトロコンを検出するために最低限必要な範囲を把握する実証試験を実施した。試験対象箇所は、図10のように周辺に建物がある場所2カ所（トロコン3機）及び建物が少ない場所の1カ所（トロコン1機）とした。



図9 光電センサ（トロコン位置検出）



図10 検出するトロコン及び周辺環境

試験結果では、トロコンの場所を通過する瞬間において、平均で3.2m程度の距離が開いている状況であった。しかし、通過前後1秒間における測位位置を時系列で整理したところ、トロコンから2m以内の位置を必ず通過していることが判明した。表4のように、測位位置がトロコンから2m以内の場合にはトロコン位置到達と判定できることを意味しているため、路面電車における衛星測位による運行保安システムの実現が可能と考えられる結果が得られた。

表4 路面電車環境による列車の到達を検知するエリアの幅について

真値からの距離	受信機 A (準天頂衛星 補強あり)	受信機 B (GPS 衛星のみ)
0.5m 以内	52.7%	54.9%
1m 以内	65.4%	59.1%
1.5m 以内	85.2%	80.4%
2.0m 以内	100.0%	100.0%

## 6 シミュレーションによる信頼性等を向上する手法の検討

走行する列車上で衛星信号を収録し、後日、収録した衛星信号を衛星測位受信機に入力することで列車走行環境を再現する手法を用いて、受信機の設定により精度向上を行う方法を研究した。

表5は線路方向誤差に関するマルチパス対策の効果の分析結果であるが、図6に示したように、線路周辺の森林等によりマルチパスを受ける位置にある衛星を事前に特定し、除去する対策を行った場合に精度が向上する効果を確認した。

表5 マルチパス対策による効果例 (単位[m])

	マルチパス対策なし (SV31 不使用)		マルチパス対策あり (SV14, 15, 31, 193 不使用)		精度向上効果	
	赤湯側	荒砥側	赤湯側	荒砥側	赤湯側	荒砥側
アンテナ						
平均	-2.21	-2.62	-1.04	-2.57	-1.17	-0.05
標準偏差	1.51	1.31	1.22	1.27	—	—
絶対値最大	-11.91	-13.70	-11.75	-13.05	-0.16	-0.65

## 7 新しい運行管理システムモデルの作成

中小鉄道線（単線自動閉そく式）において、現在の設備を単純に老朽更新するケース（〔a〕）と、衛星測位による信号保安装置を利用するケース（〔b1〕、〔b2〕）について、信号メーカーの協力を得て、必要な工事の推定結果からケーススタディを行った。駅数については3駅とした。

〔a〕 衛星測位によるシステムを導入せず、既存の信号保安装置を更新する（全線軌道回路あり）

〔b1〕 衛星測位によるシステムを導入し、駅間の列車検知に用いる（駅間は軌道回路なし）

〔b2〕 衛星測位によるシステムを導入し、駅間・駅場内の列車検知に用いる（全線に軌道回路なし）

表6はコストの比較結果であるが、最も一般的な〔a〕のケースと比較して、〔b1〕、〔b2〕については、〔b1〕の場合で1億2800万円、〔b2〕の場合で1億3500万円の導入コスト削減効果が見られることが分かった。

表6 コストの増減比較

単位 [円]

	単価 / 単位	(a) 既存設備の老朽更新		(b1) 駅間軌道回路なし		(b2) 全線軌道回路なし		
		数量	小計	数量	小計	数量	小計	
駅部	継電連動更新	15,000,000 / 駅	3	45,000,000	—	—	—	—
	軌道回路更新（駅構内）	1,000,000 / 軌道	10	10,000,000	10	10,000,000	—	—
	CTC駅装置更新	2,000,000 / 駅	3	6,000,000	—	—	—	—
	閉そく信号機更新	7,000,000 / 駅	3	21,000,000	—	—	—	—
	信号ケーブル更新（駅構内）	7,500,000 / 駅	3	22,500,000	—	—	—	—
	無線式CTC駅装置新設	3,000,000 / 駅	—	—	3	9,000,000	3	9,000,000
列車部	車上装置	4,000,000 / 両	—	—	4	16,000,000	4	16,000,000
駅間部	長大軌道回路更新（駅間）	2,500,000 / 軌道	2	5,000,000	—	—	—	—
	CTCケーブル更新	50,000,000 / 駅間 (1万円/km)	2	100,000,000	—	—	—	—
指令所	CTC中央装置更新	17,500,000 / 線区	1	17,500,000	—	—	—	—
	無線式CTC中央装置新設	60,000,000 / 線区	—	—	1	60,000,000	1	60,000,000
代替補完 装置部	ジャイロ装置	1,000,000 / 両	—	—	4	4,000,000	4	4,000,000
	無電源ATS地上子	1,000,000 / 駅 (2か所)	—	—	—	—	3	3,000,000

合計

227,000,000

99,000,000

92,000,000

## 8 新しい運行管理システムの導入方法

7で述べた導入モデルのうち、既存システムからの切り替え段階での導入を想定した、連動駅の場内のみ軌道回路を利用する方式〔b1〕について導入条件を整理したところ、以下のとおりである。

### ■衛星数を確保できる環境

軌道回路のある駅場内と、駅間の軌道回路のない区間の境界付近では、衛星測位による位置検知を行う必要があり、極端に仰角が悪い場所でないことが必要である。

### ■駅場内での通信

連動駅において、駅装置と列車（車載装置）との間で通信を行うための設備が必要となる。適用可能な通信設備を有しない駅に導入する場合には、新たに通信設備の設置が必要である。

### ■モニタリング期間の設定

列車上に車載装置を搭載し、モニタリングを行う期間が必要である。列車運行本数にもよるが1年程度の間で実施し、衛星測位の実績が良好でない場合には、場内信号機の設置場所を現在と異なる場所に変更する等により、衛星測位が適切に行えるように措置する必要がある。

モニタリング期間における試験方法については、実運用に当たって速度超過による冒進の発生を確実に防止できるようにするため、線路方向の誤差の発生状況を確認する必要がある。特に標識建植予定位置において、RFID タグ等の試験用位置把握装置を設置し、一定期間、列車の位置検知精度やデータ欠落等の発生の有無を把握する必要がある。

## 9 有識者会議の開催

本研究の方向性や試験の実施方法、試験結果の評価等については、外部の有識者のご意見を反映しながら進めるため、鉄道信号分野の学識経験者である日本大学 中村英夫教授を座長とする連絡会を設置した。連絡会では平成24年度（2012年度）～26年度（2014年度）の3年間の研究期間にわたり、研究の進め方や評価の方法について助言を得た。

平成26年度の連絡会は、会議形式の開催を2回、実証試験時における現地での開催を2回行い、準天頂衛星の活用を考慮しつつ、測位演算の精度を向上させる手法について検討するとともに、鉄道（特に中小鉄道）に適用する制御・管理システムに関し、効率化、省力化を踏まえたシステムのあり方に関する検討を行った。その結果、駅構内の既設の軌道回路を併用することにより既存システムからの移行の容易性と安全性を確保した上で、より効率化・省力化した社会的に受け入れられる信号システムについて提案することとなった。

## 10 まとめ

地方中小鉄道は、長大な線路に対して地上設備が多く点検及び保守に費用を要しているが、衛星測位を利用することにより、駅間の軌道回路及び路面電車のトロコンについては、1車両の長さ以下の安全余裕距離を設定することにより衛星測位によって代替し、運行管理装置としての利用が見込める結果が得られた。

今回開発した車上試験システムは、衛星測位で課題となる地理的な要因による精度悪化に伴う信頼性について、走行列車内で試験結果が得られるものである。また、列車環境を地上で再現する機能によって、ダイヤの制約を受けずに他の受信機パラメータ設定等を試験することが可能であり、効率的に個別



の路線への適用可能性や、個別の路線に応じたパラメータの決定が可能となる優れた装置であると考えられる。この装置によって、GPS のみの測位方法より、GPS に加えて準天頂衛星を利用した測位方法がより信頼性が高まり、その結果を定量的に示すことができた。

さらに、線路周辺の遮蔽物の状況に応じ、使用できる測位衛星の方位・仰角をあらかじめ決めておく手法によって列車上での精度向上効果を確認しており、鉄道向けの精度向上方法として非常に有用であると考えられる。

実証試験で得られた成果は、鉄道環境に適した衛星受信機の構成及び設定方法に関し、必要となる技術情報をとりまとめており、個別の路線における導入の検討や、個別適用のための試験を考える上での重要な技術要素となるものと考えている。

なお、今回得られた鉄道での衛星測位利用に関する成果は、鉄道の運行制御・管理システムのみならず、列車の運転士支援装置としての利用への展開が考えられる。また、バスのような走行路が定められている移動体での利用も有効と考えられる。