

列車制御のための車上で高精度な 位置検知手法の開発

福田 光芳* 菅原 宏之* 祇園 昭宏*
小野 雄人** 北野 隆康* 白井 稔人***

Development of Train Location Detection Methods for Signalling

Mitsuyoshi FUKUDA Hiroyuki SUGAHARA Akihiro GION
Yuto ONO Takayasu KITANO Toshihito SHIRAI

For the safety in train operation, it is necessary to detect the train location with certainty. Recently, in order to recognize the position more accurately and to reduce cost of ground equipment, systems which calculate the train position on board are in use. However, the existing on-board systems have some problems such as calculation errors caused by wheel spin and slide. So, we have developed a new train location detection method for signalling using inertial sensor and/or a millimeter wave. In this paper, we describe the outline of the method and report the results of the field tests.

キーワード：列車位置検知，列車速度検知，慣性センサ，ミリ波

1. はじめに

列車運行の安全を確保するためには確実な列車位置の検知が必須である。これまでの、軌道回路を用いた方式が主流であったが、安全性の向上や効率的な制御のためにより細かい単位での列車位置検知に対する要求が高まっている。例えば、デジタル ATC や ATS-X などでは、軌道回路主体の列車位置検知に加えて、車上においても位置を認識する方式を採用している。

また、効率性に加えて低コスト化のために、無線を用いた列車制御システムが実用化され、海外を中心に普及が進んできている。無線を用いた列車制御システムの多くは、原則として軌道回路を用いず、車上で主体的に位置検知を行っている。

車上で位置検知を行うシステムは今後も増えていくと考えられるが、その多くは地上子などで絶対位置を検出したうえで、速度発電機の出力を積算して絶対位置からの相対距離を算出する方式である。この方式は十分に実績のある方式であるが、輪軸の空転・滑走時に誤差が発生する、低速時に速度発電機の出力が得られない、車輪径の計測誤差や入力ミスにより誤差が発生する等の課題がある。既存システムでは、ブレーキ力を弱めた非駆動軸に速度発電機を取付け、空転・滑走を防止したり、一

定時間以上低速走行が継続した場合に非常ブレーキを動作させるなどの対策を実施しているが、本質的な解決には至っていない。

これらの課題を解決するために、新しいデバイスを活用した位置検知手法の開発を実施した。開発においては、慣性センサと速度発電機を併用した位置・速度検知手法の開発、ミリ波を用いた位置・速度検知手法の開発を行った。以下、各方式の概要を説明するとともに、現車を用いた走行試験結果について報告する。

2. 慣性センサと速度発電機を併用した方式

2.1 鉄道車両用慣性測位手法

航空分野において広く用いられている慣性航法は、慣性センサで計測した角速度を用いて連続的に移動体の姿勢角を演算し、この姿勢角と計測した加速度に基づき速度および移動距離を演算している。この慣性航法の実現にあたっては計測角速度が高精度かつ高安定であることが重要となる。しかし、慣性センサの計測する角速度はゼロ点のバイアスが時間変動するため、通常は、高精度かつ高安定な慣性センサを用いるとともに、アライメントと呼ばれる誤差補正を長時間掛けて行い、更に誤差推定アルゴリズムを適用している。費用等の観点で、列車制御用の位置検知に、この手法をそのまま適用することは難しい。そこで、鉄道車両の移動が前後方向の一次元であること、勾配が±35%程度以内に拘束されること、

* 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 信号システム研究室

*** 日本信号株式会社

特集：信号通信・運輸

車体振幅がピッチ方向には比較的微小であることに着目し、図1に示すように速度発電機と慣性センサを組み合わせた慣性測位手法を提案した^{1), 2)}。

これは、慣性センサから得られる加速度が入力軸方向に対する運動加速度成分と重力加速度の入力軸方向成分の合成であるのに対して、速度発電機の出力から算出される加速度が運動加速度であることを利用し、慣性センサと速度発電機の加速度の差を重力加速度成分と推定してピッチ角方向の姿勢角（車体が鉛直方向に対してなす角度）を推定するものである。

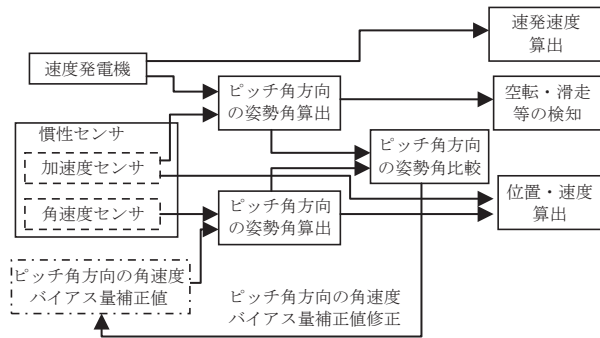


図1 提案した鉄道車両用慣性測位手法

まず、空転・滑走や低速域で速度発電機の出力が正しく得られず、誤差が発生する状況の検出方法を示す。車体前後方向の加速度を、加速度センサ及び速度発電機パルスから別々に求めたうえで、その差を算出する。前述した通り、加速度センサの加速度には、重力加速度の車体前後方向の成分が合成されているので、それぞれのセンサから得た加速度の差は、重力加速度の車体前後方向の成分となる。重力加速度は既知なので、車体のピッチ角方向の姿勢角を算出できる。

空転・滑走や低速域では、速度発電機が正しい出力をしないので、このアルゴリズムに基づき求めたピッチ角方向の姿勢角が異常値となるため、空転・滑走や車両の転動等（以下、空転・滑走等）を検出することが可能となる。また、発車直後や停止直前の低速域についても、同様に速度発電機からの適切な出力がないことを検出することが可能となる。

次に、前述した慣性センサの課題の一つである角速度バイアス量の変動の補正方法について示す。提案したアルゴリズムに基づき求めた姿勢角と、慣性センサの計測する角速度によるピッチ角方向の姿勢角を比較する。それぞれの姿勢角の差は、角速度センサのピッチ角方向のバイアス量の変動分に起因するので、逆算してピッチ角方向の角速度のバイアスを求める。空転・滑走等を検出した場合、速度発電機の出力ではなく、慣性センサの出力を用いて位置・速度を算出する。短い時間であれば、角速度のバイアス変動は無視できるので、安価な慣性センサでも精度良く距離積算可能である。

2.2 空転・滑走等発生時の速度補正の検証

提案手法が十分な性能を発揮することを確認するため、実車を用いた走行試験を行った。試験機器構成を図2に示す。慣性センサの出力として、加速度（3軸）、角速度（3軸）の6条件を記録するとともに、速度発電機出力（1軸）、時刻同期用のGPS出力を記録用PCで記録した。慣性センサは東京計器製MESAG-102を用いた。この慣性センサは、サーボ式であり、加速度の分解能は0.2mGである。試験後、記録したデータに対して開発した手法をオフラインで適用した。試験用の速度発電機は非駆動軸であったため、空転は発生していないが、前述の方法で角速度センサのピッチ角方向のバイアス量補正値の修正が可能であること、滑走及び低速時（起動、停止の前後等）に、速度発電機出力の異常（ピッチ角異常）を検出し、空転・滑走等を検出する手法が適切に動作することを確認した。

図3に散水状態でブレーキを動作させた場合の速度補正の結果、図4に停車状態からブレーキを外すことによって車両が転動した場合の速度検知の結果を示す。図3より、高速から繰り返し滑走が発生する場合にも適切に速度の補正が行われていることが確認できる。また、図4より、1km/h未満の領域で車両が移動・停止したことを提案手法で検出でき、さらに、その速度を算出できることがわかる。

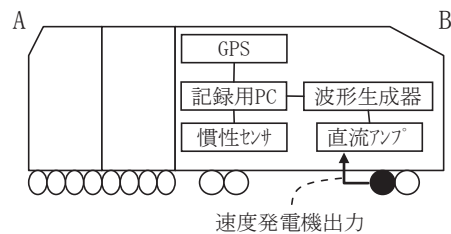


図2 走行試験時の機器構成の概要

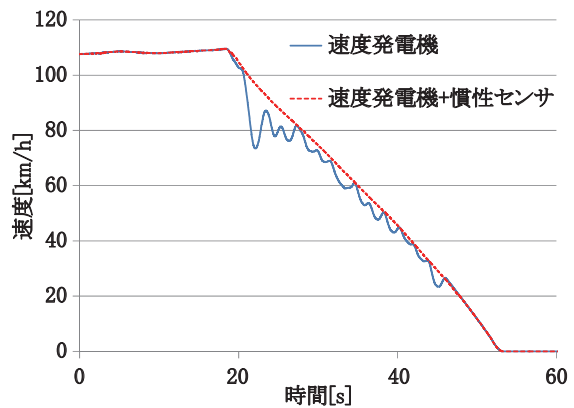


図3 滑走時の速度補正

一方、ノッチ扱いなど加速度が変化する場合に誤検知が発生する場合があった。これは、速度発電機で速度を算出する場合に移動平均を用いて平滑化することから、

速度発電機から得られる加速度の精度低下や遅延が発生することに起因することがわかった。そこで、速度発電機出力のパルス検出について、パルス数をカウントする一般的な手法ではなく、パルスの時間間隔を計測する方式として精度向上させ³⁾、平滑化処理を不要とした。

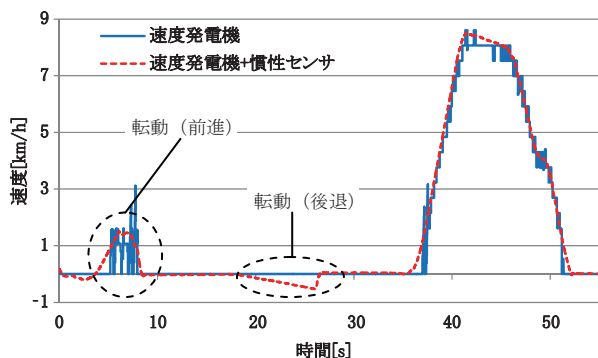


図4 転動時の速度検知

提案手法がオフラインの処理だけでなく、リアルタイムに適用可能であることを確認するために、空転・滑走等の検知と速度補正を行う機能について簡易的に試作を行った。実用時を想定し、小型で比較的廉価なMEMS (Micro Electro Mechanical System) の慣性センサとしてアナログ・デバイス製 ADXL362 (センサ単体約 3mm × 3mm) を選定した。このセンサは加速度計のみで構成され、角速度を計測する機能がないため、ピッチ角バイアス補正量修正の機能は実装していない。また、空転・滑走等を検知した場合の位置・速度演算のためのピッチ角は加速度センサと速度発電機出力から求めたピッチ角を用いることとした。

現車による走行試験時に試作装置がリアルタイムに行った速度補正の結果を図5に示す。図5は停止から走行開始した時のデータである。速度補正領域と示している範囲では、速度発電機からのパルスが正しく得られなかったため、提案した慣性測位手法により速度を算出した結果を示している。これより、速度発電機のパルスが十分に得られない低速域において、速度発電機と慣性センサの出力の乖離を空転・滑走等として検知し、補正できることが確認できた。

2.3 絶対位置の検知手法の検討

線路の曲率や勾配などを検知して、線路情報のデータベースと照合することにより、絶対位置を検知することが可能になる。この方式を用いることにより、駅中間などで地上子を用いなくても絶対位置の検知(位置補正)が可能となる。

このような絶対位置の検知手法としては、光ファイバージャイロ (Fiber Optical Gyro, FOG) と速度発電機を用い、曲率をマッチングして位置検知する方式が振り

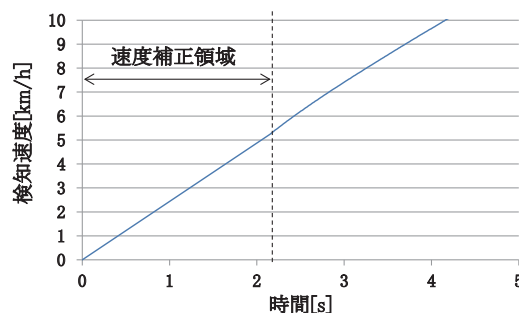


図5 試作装置での速度推移(力行)

子制御列車用に既に開発されている⁴⁾。MEMSのような、より安価なセンサを適用可能にすることで、振り制御で対象としないような低速域でも位置検知可能とするために、線路形状の相関に基づく連続的な位置検出ではなく、曲率の変化点を特徴点として離散的に位置検出する手法とした。また、曲線の少ない場合にも短い間隔で絶対位置検出を可能とするために、曲率に加えて勾配も対象とした。図1の提案手法では、ピッチ角以外の補正量を修正することはできないが、変化点に着目することにより、バイアス量の緩やかな変動は無視することが可能である。

図6に約1kmの試験線を走行した時に提案手法で算出した勾配推移を示す。特徴点としてA～Dの4点が抽出できる。この時の各特徴点間の距離を表1に示す。2回の走行における距離差は0.15m程度であり、当該走行条件の範囲では、高い精度で特徴点を検知できたことがわかる。

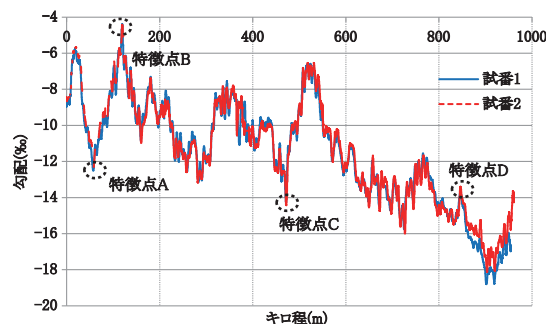


図6 試験線での勾配推移

同様にして求めたカント推移を図7に、曲率推移を図8に示す。カントは遠心力や空気バネの変位によって試験間で推移に違いが生じているが、曲率は空気バネ等の影響を受けにくく、詳細な地点検知への適用が見込める。

なお、列車制御に適用する場合は、特徴点とキロ程を対応させたデータベースを用意し、新たに検出した特徴点と、既に通過した特徴点の離隔がデータベースと比較して一定の誤差に収まっていることを確認したうえで、検出した特徴点により位置補正する。また、勾配や曲率

特集：信号通信・運輸

など複数情報の関係の妥当性を確認する必要がある。例えば、勾配の特徴点を検出した場合、データベースから同じキロ程の曲率を参照し、計測される曲率と一致することを確認する。必要に応じて、GPS等の他情報も併用して照合する線路の区間を限定し、誤った特徴点の認識を除外することも可能である。

表1 試番間の特徴点離隔

	試番1	試番2	差分
AB間	62.65m	62.69m	-0.04m
BC間	361.32m	361.17m	+0.15m
CD間	375.22m	375.37m	-0.15cm
BD間	736.54m	736.54m	± 0.00m
AD間	799.19m	799.23m	-0.04m

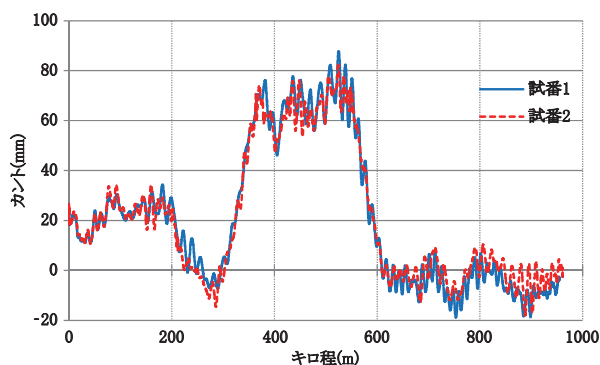


図7 試験線でのカント推移

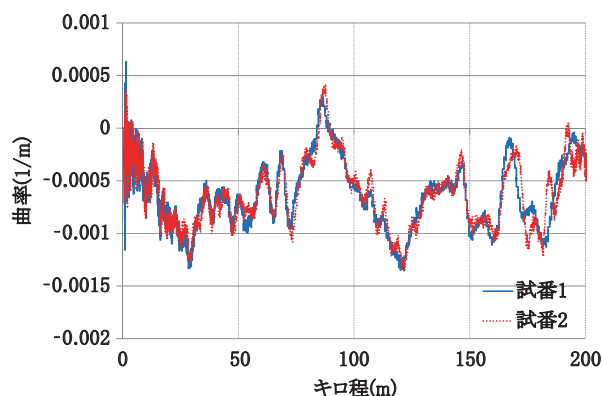


図8 試験線での曲率推移

3. ミリ波を用いた位置・速度検知

3.1 ミリ波速度計の原理と試作装置

走行する車両から軌道に向けてミリ波を送信して反射させ、ドップラー効果による周波数遷移（ドップラー周波数）を利用して、速度と走行方向を検知することができる（図9）。この原理を応用して速度検知し、距離積算するミリ波速度計の開発を行った⁵⁾。ミリ波速度計は、

原理的に空転・滑走の影響を受けないので、速度発電機の課題を解決することが可能である。停止を検出することは困難であるが、計測下限を設定すれば、必要な周波数分解能を得るための計測時間を確保することにより、1km/h以下でも計測可能である。

鉄道総研構内に敷設されている様々な軌道条件においてミリ波の反射強度を調査したうえで、2段階にわけて表2に示す2種類の装置を試作した。1号機で基本機能、性能の確認を行い、2号機では実用性を考慮して車外（床下）に設置する部分の小型化を図った。図10に2号機の外観を示す。ミリ波はレール面に向けて照射するが、実際には、レール以外の軌道部分からの反射も受信する。送信波は60GHz帯（10mW以下）であり、比較的減衰しやすいこと、床下で指向性の高いアンテナを下向きに用いること等から、意図的な妨害を除き、沿線他機器からの影響は小さいと思われる。

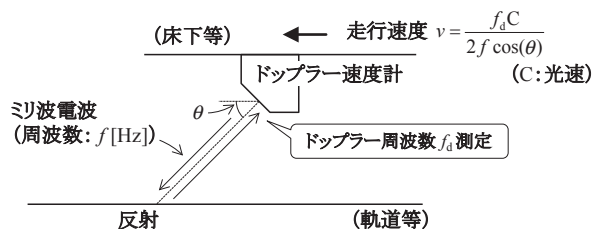


図9 ミリ波速度計の速度検知原理

表2 ミリ波速度計の主な諸元

項目	1号機	2号機
周波数帯	60GHz帯（10mW以下）	
検知方式	CW	CW/FM-CW併用
速度範囲	1km/h～200km/h	
外形 (W×D×H)	700mm×300mm×500mm	(車両外部) 400mm×280mm×400mm (車両内部) 300mm×210mm×150mm
重量	67kg	40kg



図10 ミリ波速度計2号機

3.2 現車試験

実際の使用環境下において、安定して速度を算出できることを確認するために、現車を用いた本線走行試験を

実施した。試験は慣性センサと同じ編成で実施し、図2の中間車両の車端床下にミリ波速度計を仮設した。1号機は130km/h以下、2号機は80km/h以下の条件で、それぞれ異なる線区で試験を実施した。

いずれの本線走行においても、速度が算出できない状態は発生しなかった。本線走行での速度推移の例を図11に示す。速度発電機から算出した速度と、ミリ波速度計で算出した速度をプロットしているが、ほぼ一致しているため、図11ではプロットが重なっている。ドップラー周波数から算出される速度は、短い時間単位で上下にばらつくことから、図11では移動平均で平滑化した結果をプロットしている。移動平均の幅は100msであり、一般的な速度発電機の平滑化処理と同等であるため、実用上は問題ないといえる。

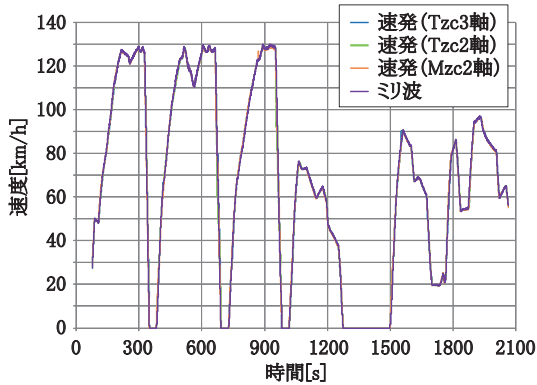


図11 本線走行での速度推移（1号機）

なお、図12のように移動平均で平滑化しきれない変動が記録される場合もある。要因の一つとして、車体の動揺（ピッチ角変動）の影響が考えられる。ただし、ピッチ角の変動は微小であること、図9の中に示す式では角度微小な θ の変化に対する速度 v の変化は線形とみなせる。したがって、車体動揺による速度変動は高速側と低速側で同等となり、距離積算上の誤差は概ね相殺される。

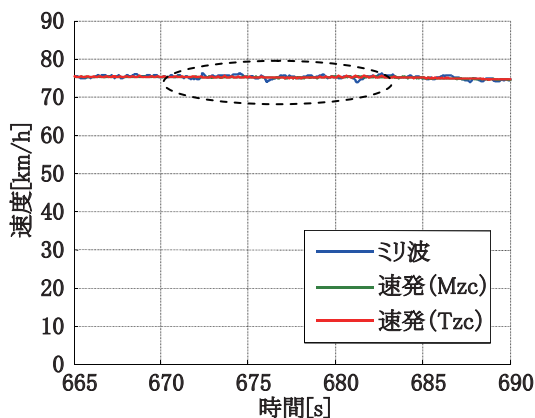


図12 平滑化処理後の速度変動（2号機）

また、図2のA端側の運転台にビデオカメラを仮設し、軌道状態の撮影を行った。ビデオカメラとミリ波速度計の記録装置の時刻をGPSで同期させ、時刻毎の軌道状態を確認できるようにした。ビデオ映像と突き合わせ、様々な軌道構造（バラスト、スラブ等）、曲線部（半径300m等）、分岐部、橋梁、踏切のそれぞれの状態において、安定して速度を算出していることを確認した。

実用に向けた課題としては、次の2点があげられる。

1つ目は、アンテナ部への着雪対策である。小雨・小雪の条件下では速度算出に影響はなかったが、水分を含む雪がアンテナ部に多量に付着すると、十分な反射波を受信することができなくなる可能性がある。

2つ目は、取付け角度の管理である。アンテナ取付角度の変位や誤差が、算出速度の誤差となるため、取付け角度を適切に管理する必要がある。

3.3 ミリ波測距装置による絶対位置検知

ミリ波を用いた測距には、片側だけに無線機を配置して反射物との距離を測定する方式、測定側と被測定対象の両側に無線機を配置して通信に要する時間から距離を測定する方式がある。反射物との距離を測定する方式では、他の障害物による誤反射の除外が困難であること、定点停止などのアプリケーションを想定した場合にデータ伝送機能が有用であることなどから、両側に無線機を配置する方式を採用し、ミリ波測距装置の開発を行った⁶⁾。

開発したミリ波測距装置の測距原理を図13に示す。無線機Bが受信してから送信するまでの時間 Δt_B を一定にすることにより、高精度に同期した時計を各無線機が保有することなく、距離を算出することができる。無線機Bの処理時間 Δt_B 、光速Cは既知であり、送信から受信までの時間 Δt_A は無線機Aで計測できるので、距離 r は無線機Aにおいて、次の(1)式より求めることができる。

$$r = \frac{(\Delta t_A - \Delta t_B) \cdot C}{2} \quad (1)$$

鉄道総研構内の試験線において、試作した無線機を地上と車上（運転台）に仮設して走行試験を実施した。地上の無線機は、直線区間に2台、曲線区間に2台仮設した。試作装置の主な諸元を表3に示す。ここでの測距精度は、マルチパス波が混在する場合に分別可能な距離を示すが、マルチパス波の受信レベルの方が大きい場合には、マルチパス波を除去できない場合がある。

直線区間を40km/hで走行した場合の測距結果のヒストグラムを図14に示す。測距差を求める際の基準は、GPSの干渉測位結果を用いた。2つの独立したGPSアンテナを1車両の両端に仮設し、2つの受信情報を、事後解析（基線解析）して得た測位位置に対して、チェックを行い、妥当な測位位置のみ採用した。チェックは、

特集：信号通信・運輸

2つの測位位置の間隔がアンテナの間隔に対して5cm以下の誤差であること、直前の測位位置からの距離が速度発電機による移動距離と整合することで行った。事後解析で適切な解（Fix 解）が得られた場合は、誤差は数cm程度以下になるが、Fix 解とならなかった解（Float 解）についても用いている。なお、GPSの測位点の間は速度発電機の出力で補完した。複数回の走行試験で取得した全測距値（約1.5万回）の測距差の標準偏差は直線区間約19cm、曲線区間約24cmであった。目標とした±30cmを超過する測距差が発生している。マルチパス波による誤差と考えられるが、少数であること、移動時には連続的に発生しないことから、時系列の処理で排除可能と考える。

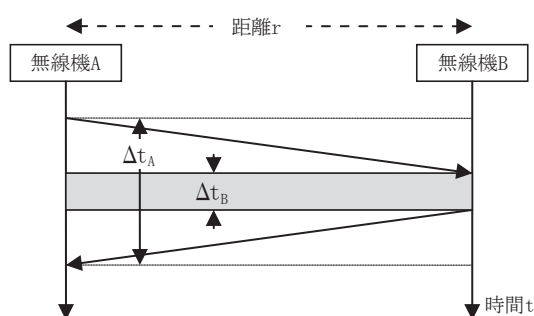


図13 測距原理

表3 ミリ波測距装置の主な諸元

項目	仕様
周波数帯域	57～64GHz
測距間隔	200ms
測距精度	±30cm以下
データ伝送速度	50Mbps
通信距離	約100m
重量	20kg以下

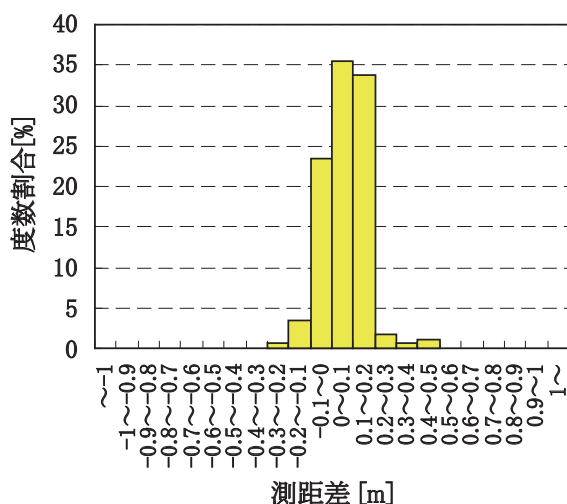


図14 測距結果のヒストグラム（40km/h）

4. 統合的な速度検知装置の検討

2章、3章で述べた慣性センサやミリ波を用いた方式を用いて統合的な速度検知装置の検討を進めている。多数のセンサを用いれば、より信頼性の高い結果を得ることが可能であるが、コストを考慮すると、速度発電機と慣性センサを用いた方式とし、補助的にGPSを用いるような構成が望ましいと考える。また、慣性センサを用いず、一部の速度発電機をミリ波速度計に置き換える方式も考えられる。この場合も、速度発電機の苦手とする領域（空転・滑走や低速域）をミリ波速度計が補うことが可能である。

5. まとめ

新しい検知方式として、慣性センサと速度発電機を併用した手法、ミリ波を用いた手法について、現車試験により機能の確認を行った。

これらの成果を活用し、様々な車両に適用可能で、空転・滑走等の影響を受けない速度検知装置の実用化のための研究を進めていきたい。

最後に、本研究開発を進める上で多大な協力をいただいた西日本旅客鉄道株式会社技術部の関係各位に感謝いたします。

文献

- 1) 祇園昭宏, 菅原宏之, 平栗滋人: 車上位位置検知への慣性センサの適用に関する検討, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL), 2011
- 2) 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位置検知システム, 第49回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2012
- 3) 渡辺朝紀, 長谷部武久: 高性能速度センサの開発, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 1998
- 4) 真木康隆, 榎本衛, 佐々木君章, 辻野昭道: GPSと線形情報を併用した地点検出システム, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, pp.11-16, 2003
- 5) 笠井貴之, 菅原宏之, 大橋忍, 藤田浩由, 小川善生, 小野雄人: ミリ波を用いた非接触式速度計の開発, 第49回「鉄道サイバネ・シンポジウム」論文集, 2012
- 6) 富田雅昭, 大泉拓, 丹羽順一, 白井稔人, 菅原宏之, 藤田浩由: ミリ波を用いた無線式測距通信装置の開発, 第49回「鉄道サイバネ・シンポジウム」論文集, 2012