

測域センサを用いた建築限界判定装置と 管理システムの開発

遠山 喬* 長峯 望** 大森 達也*
北尾 憲一* 中曽根 隆太**

Structure Gauge Measuring Equipment using Laser Range Scanners
and Structure Gauge Management System

Takashi TOYAMA Nozomi NAGAMINE Tatsuya OMORI
Kenichi KITAO Ryuta NAKASONE

Ensuring the safety of train operation, it is important to measure the structure gauge periodically. The measurement requires much labor and time because the number of wayside facilities is enormous. Hence, we have been developing an inexpensive and efficient measuring equipment using laser range scanners. Also we are developing a management system, which maps the measured three-dimensional point cloud data to the facilities data. In this report, we describe the problems and solutions for applying the laser range scanners to structure gauging, along with the experimental results. Moreover, we report the development of the management system and the further developments of measurement and management of the structure gauge in the future.

キーワード：測域センサ，LiDAR，建築限界，検測車，設備管理，3次元点群

1. はじめに

鉄道においては、列車運行の安全を確保するために、建造物等が支障してはならない領域として、建築限界を定めている。図1に建築限界の例を示す。建築限界は、車両動揺等を考慮し、車両の走行や旅客および係員の安全に支障を及ぼすおそれのないように、定期的な測定・管理が必要となっている。しかし、建築限界の測定対象となる設備点数は膨大であり、手検測では非常に多くの労力と期間を要するという問題がある。一方、専用の建築限界測定車を用いた車上検測では、建築限界測定車の導入コストが問題となる。

そこで我々は、測域センサを既存車両上に設置し、建

築限界支障の有無を判定する建築限界判定装置（以下、本装置）、および、測定された3次元点群データを設備に対応付けて管理する建築限界管理システムの開発を進めている^{1)~4)}。

本報告では、本装置の概要と、測域センサを建築限界測定に応用する際の課題と解決策について報告する。また、本装置の性能を試験により示す。そして、建築限界管理システムの開発、今後の展望について述べる。

2. 建築限界判定装置の概要

2.1 目標と位置付け

従来からの建築限界の手検測では、下げ振りやメジャーを用いて測定を行っている。近年では、組立型の走行式建築限界測定器やレーザ式建築限界測定装置の実用化により、初期の手検測と比較して効率は上がっているものの、基本的に設備1点毎の測定であるため、多大な労力と期間を要する。また、手検測では測定者による結果のばらつきが大きいという問題もある。一方、建築限界測定車による車上検測では、線区全体に亘る連続的な測定が可能であり、高精度化・高効率化を実現している⁵⁾。しかし、建築限界測定車の導入には多大なコストがかかるという問題がある。近年では、建築限界測定車の導入・所有コスト問題を解消するものとして、保守用車による3次元検測をサービスとして提供する業務形態も登

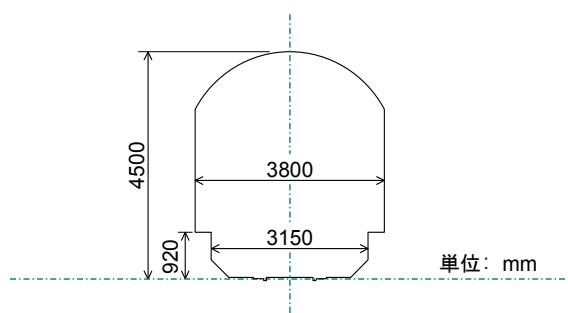


図1 建築限界の例

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

** 信号・情報技術研究部 画像・IT研究室

特集：信号通信技術

場している⁶⁾。ただし、運用上の制約が生じるほか、費用対効果はサービスの利用形態に依存すると考えられる。

上記の課題を踏まえ、本装置の開発では、建築限界支障の有無を連続的に判定可能にし、建築限界測定のコスト・高効率化を実現することを目標と定めた。図2に本装置の位置付けを示す。本装置の開発においては、建築限界測定車や手検測に対するコストの優位性を維持した上で、測定精度向上を図り、手検測の代替として十分な精度の実現を目指す。また、設計の自由度を確保し、さらに車上検測の運用の柔軟性を重視する。

2.2 建築限界判定装置の要件

2.2.1 早期実現

本装置は早期実現を前提とするため、実用化に時間を要する研究段階の要素技術は用いない。また、実用化済みの技術であっても、特注品の使用は可能な限り避けることとした。したがって、本装置に用いるセンサ等は、可能な限り市販の量産品で構成することが求められる。

2.2.2 装置の導入コスト

本装置は、導入コストが既存の建築限界測定車に対して十分に小さいことが求められる。そこで、簡単な改造で既存車両にセンサ類を取り付ける構成を前提とした。このため、センサ類は、それ自体が低価格であることに加え、小型・軽量であることが求められる。

2.2.3 測定対象と測定精度

建築限界を支障するおそれのある設備は、全て測定対象候補であるが、まずは、沿線の電気設備を対象を限定する。なお、車両の直上については、建築限界を支障した状態が潜在化する可能性のある設備が限られることから、本装置での測定対象には含めない。

電気設備は、電化柱等の柱状設備、器具箱等の箱状設備、標識等の板状設備のように形状が多岐に亘る。このため形状に依存せずに測定可能であることが求められる。

測定精度に関しては、手検測の代替とするため、手検測における測定精度の下限（100mm程度を想定）より、平均的に優れた精度を実現することが求められる。要件定義段階では誤差の分布が不明だが、中心極限定理を準用し、平均誤差100mm以下となるよう最大許容誤差を200mmと定めた。これに伴い、まくらぎ方向の幅が200mmに満たない設備については検知漏れを許容する。

運用の柔軟性を確保するため、本装置は昼夜問わず測定可能であることが望ましい。特に、ダイヤ設定の自由度の観点から、夜間に測定可能であることが求められる。一方、昼間は、直射日光下での測定能力、プラットホーム上の旅客等に対する安全性も考慮する必要がある。

2.2.4 昼夜対応

運用の柔軟性を確保するため、本装置は昼夜問わず測定可能であることが望ましい。特に、ダイヤ設定の自由度の観点から、夜間に測定可能であることが求められる。一方、昼間は、直射日光下での測定能力、プラットホーム上の旅客等に対する安全性も考慮する必要がある。

2.2.5 走行線区

測定対象の区間に関わる制約は、最小限にすることが求められる。すなわち、直流電化・交流電化・非電化区間、単線・複線区間、明かり・トンネル区間、保安装置種別を問わず、測定できる必要がある。

2.2.6 測定車両の連結運用

本装置は、走行線区の要件から、付随車に導入し、動力車によって牽引する方式が合理的である。このため、本装置は、導入車両に牽引車等が連結された状態で測定できることが求められる。また、連結箇所は導入車両の前後両方を想定する必要がある。これは、折り返し駅に転車台等の設備があるとは限らないためである。

2.2.7 走行速度

走行速度が低い場合、他列車のダイヤに影響を与えるため、営業時間帯に測定を行うことが困難となる。そこで、本装置では、ディーゼル機関車による牽引を想定し、80km/h以上の走行速度に対応できることを要件とした。

2.2.8 機器としての独立性

本装置の導入車両の制約を軽減し、装置故障時の影響範囲を最小化するため、本装置は車両の機器と独立していることが求められる。車上検測においては、列車位置検知が重要な技術であるが、速度発電機やATSの信号を必須としないことが望ましい。

2.3 センシング技術・センサの選定

2.2節の要件を踏まえ、本装置に用いるセンシング技術・センサの選定を行った¹⁾。

既存の建築限界測定車で実績のある光切断法ではセンサとしてカメラを用いる。カメラ自体は小型・軽量であるが、視野を確保するため車両側面に大きな開口部が複数必要になる。このため、光切断法は要件に適合しない。

また、同じくカメラを用いる技術として画像処理による形状認識技術⁷⁾があるほか、3次元計測に適したステレオカメラを用いる技術もある。しかしパッシブセンサとしてカメラを用いる場合、夜間の測定が困難である。また、列車前方映像を撮影する場合、連結車両が視野を遮るため、有効な視野が制限される問題もある。このため、一般的なカメラを用いた技術は要件に適合しない。

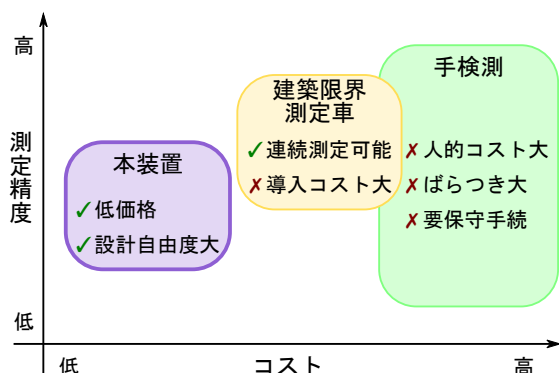


図2 建築限界判定装置の位置付け

そこで、測域センサやLiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる、レーザビームを用いた距離計測センサに着目した。測域センサは、ミラーでビーム方向を変える、あるいは装置自体を回転させることで2次元・3次元の距離計測を実現している。測域センサを車上検測に応用する場合、走行により線路方向の情報が付加されるため、2次元センサで3次元計測が可能である。先行研究⁸⁾で得た知見を踏まえ、2次元測域センサによる3次元計測を、本装置のセンシング技術として選定した。

測域センサには、位相差方式とTOF (Time-of-Flight) 方式がある。本装置では小型で低価格なTOF方式を選定した。なお、文献⁸⁾ではセンサを車内に設置する前提であったが、本装置では車外設置を前提とし、防塵・防水性能の高いセンサを選定した。選定した測域センサの諸元を表1に示す。選定した測域センサを付随車の妻面に複数台設置することで、本装置の要件を満足できる。

2.4 建築限界判定装置の構成

本装置のシステム構成を図3に示す。本装置は、主要な要素として、測域センサ、GNSS (Global Navigation Satellite System) センサ、IMU (Inertial Measurement Unit) センサ、PCにより構成される。

測域センサは、車両妻面に複数台設置され、図3のように牽引車と連結した状態でも測定可能な配置としている。GNSS センサは、アンテナと受信機から構成され、車両の絶対位置と時刻の取得を目的としている。また、IMU センサは速度 (相対位置) の取得を目的としている。PC は、測定データの記録・処理に用いる。

表1 選定した測域センサの諸元

使用場所	屋外仕様 (IP67)
光源	赤外線レーザ (波長: 905 nm)
レーザクラス	1, アイセーフ (IEC 60825-1 (2007-6))
視野角	190°
スキャン周波数	100 Hz
角度分解能	0.667° (100 Hz スキャン時)
最大測定距離	26 m (10%反射率において)
システム誤差	± 25 mm (距離 1 m - 10 m の範囲)
統計的誤差	± 7 mm (距離 1 m - 10 m の範囲)
重量	3.7 kg
寸法	160 mm × 155 mm × 185 mm

3. 測域センサ応用の課題と解決策

3.1 センサ設置位置の設計

測域センサは要件を満足する機種を選定したが、実際の性能は測域センサの設置位置・角度・台数に依存する¹⁾。このため測域センサの設置位置の設計は重要である。

図4にレール長手方向に対する測域センサのビーム照射角度と設備検知性能の関係を模式的に示す。建築限界の支障判定は、まくらぎ方向断面で行うため、レール長手方向に対し90°にビームを照射することは一定の合理性を有する。しかし、図4(a)に示すように、この場合、標識等のレール長手方向の幅が小さい設備に関し、検知漏れが発生するおそれがある。この標識類の検知漏れは、図4(b), (c)に示すように、レール長手方向に対し斜めにビーム照射することで低減可能である。一方、レール長手方向に対するビーム照射角度が小さい場合、図4(c)に示すように、手前の設備での遮蔽による検知漏れが発生しやすくなる。また、図4では省略したが、実際には遮蔽物となる連結車両が存在し、設置制約条件となる。

なお、斜めにビームを照射した場合、ビームは必ずしも設備の最もレール中心に近い箇所に当たるとは限らない。このため、真の最接近点に対し、測定データ上の最接近点の座標は、測域センサのスキャン周波数、ビーム照射角度、車両の速度に依存する曖昧さを含んでいる¹⁾。

本装置では、妻面の左右それぞれに測域センサを2台設置し、ビーム照射角度をレール長手方向に対し外側へ45°とする設計を提案した¹⁾。この位置・角度では、連

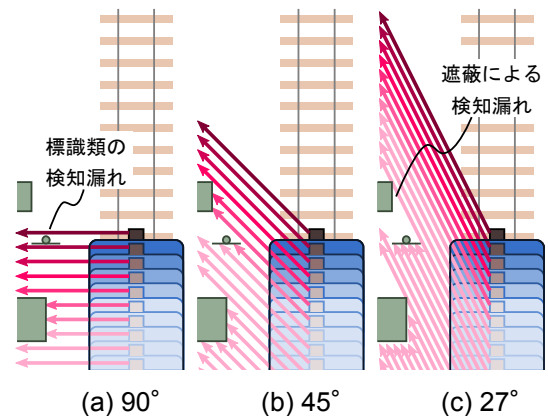


図4 ビーム照射角度と設備検知性能

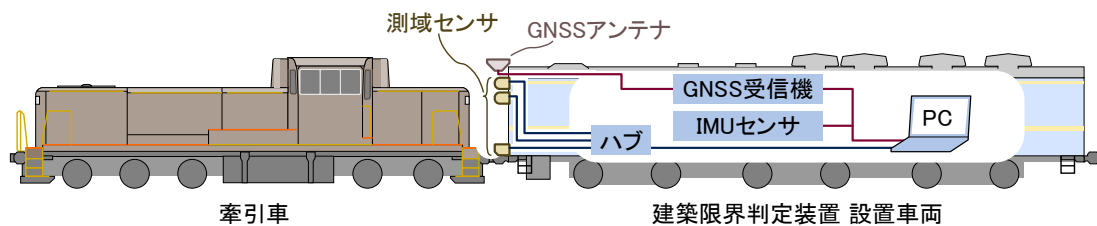


図3 建築限界判定装置のシステム構成

特集：信号通信技術

結車両による遮蔽が回避可能である。また、複数台設置による空間分解能向上により 80km/h 走行時の座標の曖昧さを 200mm 以下に低減可能である。

3.2 列車位置・速度検知

本装置では 2 次元測域センサを用いるため、測定データから 3 次元形状を復元するためには、走行速度を正確に検知する必要がある。また、建築限界管理においては、建築限界を支障している、または支障のおそれのある測定点が発見された場合に、設備を特定する必要がある。設備情報はキロ程で管理されているため、設備特定のために、列車のキロ程を正確に検知することが重要である。

本装置では、車両の走行速度を IMU センサおよび GNSS センサによって取得する。本装置では小型で安価な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 式の IMU センサの使用を想定しているが、3 次元形状復元の用途に対しては実用的な精度が得られる。

キロ程の検知においては、IMU センサによる慣性航法は精度不足であり、絶対位置情報に基づく補正が必要である。そこで本装置では GNSS センサによる緯度・経度情報を補正に用いる。緯度・経度からキロ程を得るため、鉄道事業者が保有している鉄道 GIS (Geographic Information System) データを利用する方法を実装した⁴⁾。

3.3 車体動揺補正

本装置では測域センサを車体に設置するが、車体は台車を介して輪軸と弾性体で接続されている。また、曲線通過時は、車体中心とレール中心の間に偏り(偏倚)が生じる。このため、列車走行中は、レールに対する測域センサの相対位置が変動する。建築限界はレールを基準とするため、車体動揺や偏りは補正しなければならない。

この課題に対しては、光切断法を用いてレールを抽出することで、車体動揺の補正を行う技術が開発されている⁵⁾。測域センサでも同様の技術が適用可能と考えられるため、本装置では、建築限界測定用の測域センサに加え、レール検出用に下向きの測域センサを設置した。

3.4 列車前方映像との対応付け

対応する設備やその部位を測定データから特定する際、列車検測区間と同一区間の沿線風景を撮影した可視光画像があると、作業の効率化が期待できる。しかし、本装置の測域センサを含む多くの測域センサは、単独では色情報が得られない。また、取得データも 2 次元画像ではなく 3 次元点群である。そして、2.3 節で述べたとおり、夜間の測定等を考慮すると、建築限界測定と同時にカメラで可視光画像を取得することも容易ではない。

そこで、同一区間を走行する営業列車に添乗し、ハンディカメラを用いて撮影した列車前方映像を活用する手

法を開発した⁴⁾。開発手法では、撮影された列車前方映像に対して画像処理技術を適用し、フレーム画像毎にキロ程の付与を行うことができる。建築限界測定データと列車前方映像は、キロ程を介して対応付けられる。

4. 建築限界判定装置の性能評価

4.1 評価項目と試験条件

営業線での試験検測を実施し、本装置の性能評価を行った³⁾。評価項目は、各要件への適合性、手検測と比較した精度、列車前方映像との対応付けの効果である。

試験では、本装置を既存の軌道検測車に設置した。図 5 に供試車両の外観と測域センサの設置状況を示す。牽引車はディーゼル機関車 (DE10 形) であり、供試車両の前後両方に連結された。試験検測における最高速度は 80km/h 以上である。

試験検測は 7 時から 19 時(日没後)の間に行った。天気はおおむね晴れまたは曇りであった。走行区間には、直流電化・交流電化・非電化区間、単線・複線区間、明かり・トンネル区間を含む。

比較対象である手検測では、精度のばらつきの少ないレーザ式建築限界測定装置を用いた。精度評価の対象設備は、柱状設備として信号機柱(色灯式信号機構・点検台含む)・特殊信号発光機、箱状設備として器具箱・踏切しゃ断機、板状設備として喚呼位置標・停止位置目標、その他設備として踏切障害物検知装置の 7 種 10 設備を選定した。なお、本装置の車体動揺補正の機能は未実装であり、本評価では補正前の値を用いる。

4.2 試験結果

試験検測の前日に営業列車で撮影した前方映像と、本装置で取得した 3 次元点群を図 6 に示す。取得点群は、レーザ受信強度が高い点を明るい色、レーザ受信強度が低い点を暗い色で示している。図 6 の取得点群では、前方映像で撮影された電化柱、踏切警報機等の設備が測定されていることが確認できる。また、精度評価対象の



図 5 供試車両外観と測域センサの設置状況

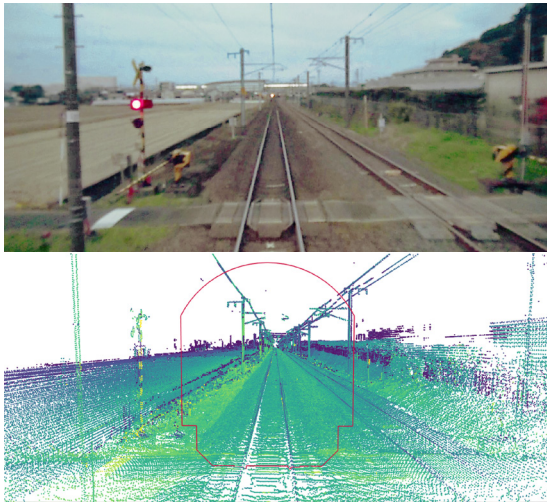


図6 列車前方映像（上）と取得点群（下）の対応

10 設備は本装置によって検知されており、設備単位での検知漏れは皆無であった。走行線区や日射等の条件による測域センサへの明確な悪影響も確認されなかった。

手検測と本装置の結果の比較について、信号機を例に図7に示す。図7の左側は対象設備の外観および手検測の測定箇所を示し、中央は手検測、右側は本装置の結果を断面図で示している。図7より、本装置により設備の形状の特徴が的確に取得できていることが分かる。

図8に手検測の各測定箇所（合計52点）のレールレベルからの高さ、水平離隔の誤差（手検測と本装置結果の差の絶対値）の関係を示す。図8に示すとおり、誤差200mm以上の箇所が2点存在した。この2点は図7の②・③であり、10設備のうち9設備は誤差200mm以下を満足した。また、誤差が大きい測定箇所は、レールレベルからの高さが大きい傾向が得られた。

4.3 考察

4.3.1 要件への適合性

本装置は、最大誤差を除き要件を満足していた。残課題は性能要件の達成であり、機能要件に関する技術については確立し、高い運用性を実現したと考える。

4.3.2 測定精度

性能要件を満たすためには、測定精度の向上が必要で

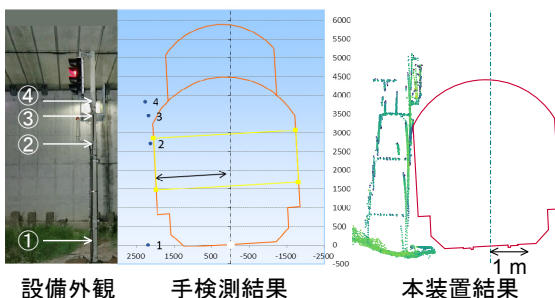


図7 手検測結果と本装置結果の比較³⁾

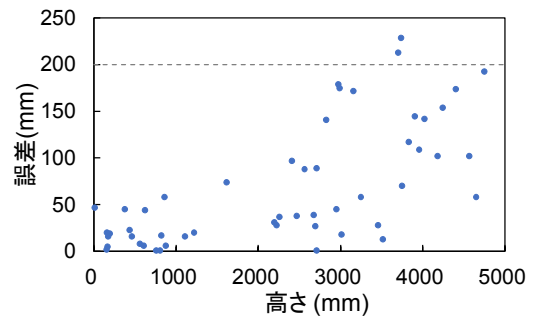


図8 レールレベルからの高さとの誤差³⁾

ある。誤差要因は複数考えられるが、誤差とレールレベルからの高さに関連が見られることから、車体動揺による影響が大きいと推察する。このため、車体動揺補正を行うことで誤差は低減可能であり、ハードウェアの変更を伴わずに要件を満足できると考える。

4.3.3 列車前方映像との対応付け

図6では、列車前方映像と取得点群はよく合致しており、対応付けは3次元点群データから対応する設備を特定するのに有用と言える。ただし、合致精度は絶対位置補正の頻度に大きく依存するため、補正に伴う労力と精度の関係については別途、定量的に評価する必要がある。

5. 建築限界管理システムの開発

5.1 管理システムの必要性

本装置の実用化により、従来の手検測では不可能であった膨大なデータを短時間に取得することができる。一方で、膨大なデータが取得可能なだけでは、建築限界管理の省力化は達成されない。省力化のためには、膨大なデータを蓄積し、設備に対応付けて体系的に管理する必要がある。これを実現するものとして建築限界管理システムの開発を進めており、現在、実装に向けた仕様策定を行っている。以下に管理の考え方を述べる。

5.2 空間軸と時間軸での管理²⁾

本装置を導入することにより、1度の走行で多くの設備の測定が行える。すなわち、空間（キロ程）軸で密な情報取得が可能となる。さらに、車上検測では、手検測と比較して高頻度での検測が可能であり、時間軸でも情報を密とすることができる。

空間軸に加え、時間軸での評価、すなわち時系列評価が実現することで、例えばバラスト流出による設備の傾斜等が検知できる可能性がある。また、急激な変化を抽出することで、工事後の台帳の修正漏れが検知可能であると考えられる。このように、空間軸と時間軸の両方で評価を行うことで、設備管理の高度化を実現する。

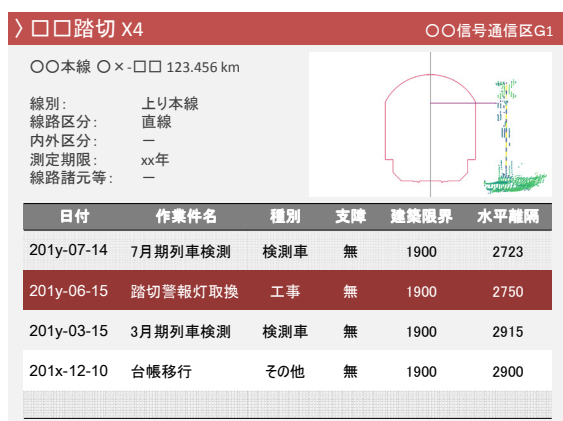


図9 工事情報を統合した管理システムの画面の例
出典：文献2) ©2017 土木学会

5.3 車上検測と手検測・工事情報の統合管理²⁾

車上検測の結果、建築限界に接近した要注意設備が検出された場合、後日、当該設備について手検測を行うことが想定される。車上検測と手検測の結果を独立して管理した場合、車上検測の結果が最終的にどのように評価されたのか追跡が困難になる。また、工事による設備の新設・撤去・移設も、設備の時系列の追跡を困難にする要因である。

そこで、管理システムでは、手検測・工事情報を車上検測の結果と統合管理することを検討している。図9に、工事情報を統合した管理システムの画面の例を示す。図9のように、工事情報の統合により、車上検測での水平離隔の変化の理由が工事にあることを明確化できる。

6. 今後の展望

4章で述べたとおり、本装置の機能要件に関する技術は確立したと考える。今後は、データ測定を重ね、本装置および管理システムの実用化に向けて、実装・改良を進め、さらに導入による効果検証を行う予定である。

測定精度については、車体動揺補正機能等を実装することで要件を満足させ、更なる高精度化を目指す。また、列車位置検知に関しては、IMUセンサを用いた絶対位置補正等の技術を検証し、GNSSが利用できないトンネル区間等での位置データ補正の作業を省力化する。

また、測域センサは、当面、高性能化と低価格化が進むと予想する。本装置は、設計の自由度に特長がある。基本設計を変更することなく、測域センサを置き換えることで、高性能化の恩恵を受けられると期待している。

7. おわりに

建築限界測定・管理の低コスト・高効率化を目標とし

た建築限界判定装置、および、建築限界管理システムの開発について報告を行った。本装置では、2次元測域センサを既存車両の妻面に複数台、角度を定めて配置することで、標識類の検知漏れを防止し、空間分解能を向上させる等の方策を採用した。本装置の性能を試験により評価した結果、多様な走行線区や昼夜への対応等、運用性の要件を満足することを確認した。測定精度については、一部設備で誤差200mm以上となったが、車体動揺補正機能等を実装することで要件を満足させる予定である。管理システムの開発では、車上検測と手検測・工事情報の統合管理の考え方を提案した。これらの開発により、建築限界測定・管理の高度化・効率化を可能とした。今後も実用化に向け、実装・改良・検証を進めていく。

謝辞

本開発を進めるにあたり、九州旅客鉄道株式会社の関係各位の協力を戴いた。ここに記し感謝の意を表す。

文献

- 1) 大森達也, 長峯望, 中曽根隆太, 遠山喬, 北尾憲一, 鶴飼正人, 久永雅子, 松山智彦: 建築限界判定装置の開発に向けた測域センサ設置位置の検討, 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道 リニアドライブ合同研究会, TER-17-42, pp. 23-28, 2017
- 2) 遠山喬, 長峯望, 大森達也, 北尾憲一, 中曽根隆太, 松山智彦, 久永雅子: 3次元点群データを用いた建築限界管理手法, 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017), S2-5-5, 2017
- 3) 大森達也, 長峯望, 遠山喬, 北尾憲一, 中曽根隆太, 松山智彦, 久永雅子, 原田幸幸: 建築限界判定装置の開発に向けた営業線における精度検証, 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道 フィジカルセンサ合同研究会, TER-18-31, pp.33-38, 2018
- 4) 長峯望, 遠山喬, 大森達也, 北尾憲一, 中曽根隆太, 松山智彦, 久永雅子, 原田幸幸: 建築限界判定装置における測定データと列車前方映像の対応付け, 平成30年電気学会全国大会論文集, No. 5-199, 2018
- 5) 土屋啓佑, 栗林健一, 宍戸早紀子: 新型建築限界測定車の開発導入, SED, No. 48, pp.106-109, 2016
- 6) 三菱電機: “三菱インフラモニタリングシステムII (MMSD II)” のトンネル点検サービス, 三菱電機技報, Vol.92, No. 1, p.18, 2018
- 7) 深井寛修, 田林精二, 和泉栄一, 伊東博之, 藤江 努: 建築限界領域と電車線設備離隔の画像処理による自動計測, 平成27年電気学会全国大会論文集, No. 5-148, 2015
- 8) 鶴飼正人, 長峯望, 中祐介, 木下芳郎, 川田浩彦: 測域センサを用いた建築限界支障検知, 第49回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, No. 623, 2012