II. 鉄道の軌道周辺障害物の走行検出

特集解説

後 藤 有一郎 (株)神戸製鋼所電子技術研究所
丹 間 泰 郎 (東海旅客鉄道(株)技術本部)

1. はじめに

鉄道において列車が安全に走行できるためには、線路周辺のトンネル、プラットホーム、橋梁などの建築物が列車の走行路より外側に設置されていることが第一条件である。この設置基準として線路の軌道間中点を原点とした建築限界線が規定されており、建築物はこれより外側になければならない。

通常、建築物が建築限界を侵すことはあってはならないが、特に在来線ではトンネルの漏水防止、表面劣化の修復、新たなプラットホームの建設などを目的とした建築物の改修工事が頻繁に行われており、その度ごとに建築物が建築限界を侵していないかどうかを検査する必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。また、保線作業の繰り返しのよって長年の間には線路自体が微妙な横滑りを起こすことがあり、線路に対する建築物の位置、形状の定期的検査管理も重要な業務となっている。現在国内で使用されているトンネルのほとんどは建築から数十年を経過し、こうした鉄道施設の維持管理のための測定作業の重要性は年々高まっている。

本報告では、鉄道における建築物の位置・形状に関する検査作業を概観し、筆者らが新たに開発した軌道障害物検出装置について解説する。

2. 建築物検査

列車の走行路を建築物が侵しているか否かを検査する装置としては、走行路断面方向の車両全周にわたり触針をもついわゆる「おいらん列車」がある。これは、触針と建築物が接触することにより建築限界侵犯の有無を検査するものである。直接的な方法であるが

検査できるレンジの範囲は固定的であり、また建築物が実際に建築限界を侵したときそれを検出するのみで、建築物、軌道間距離の経年変化などの測定、管理には用いることができない。建築物そのものの測定としては、軌道間中点を原点とした位置測定が行われている。従来この作業は特殊定規などを用いて人手により行われていたため、一点一点の測定に多大な労力と時間を費やしており、作業員の負担軽減の観点からも自動化が望まれている。測定器具として光波断面測定器が実用化されているが⁽³⁾、1断面の測定には向いているものの基本的には定点測定であり、機器の据え付け・運搬には時間がかかり、限られた時間の中で線路沿線の長距離にわたる測定には限界があった。

一方、保線関係の業務においては、東海道新幹線におけるドクターイエロー（電気軌道総合試験車）をはじめとして、検査機器の導入は以前より行われており⁽⁴⁾⁽⁶⁾、こうした状況下で土木関係業務における“ドクターイエロー”のような機器開発に対する要望が高まっていた。

筆者らはこうした背景をもとに光切断法の原理を用いて走行検測可能な装置の開発を進めていた⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。本装置は、リアルタイム建築限界侵犯判定機能、建築物の位置・形状計測機能を有し、おいらん車と“移動式”光波断面測定器の機能を合わせもつ装置である。

3. 軌道障害物検出装置

本装置の概念図および装置外観図を図1、図2に示す。レーザユニットからシート状のレーザ光を進行方向に対して垂直に放射し、測定対象とレーザシート光の交線上に生じる光切断線を5台のCCDカメラによってとらえ、得られた画像を専用の画像プロセッサによって処理することで光切断線を抽出し、光切断線の画像上における位置から三角測量の原理によって、軌道間中点から測定対象までの距離を測定することができる。CCDカメラからは1/60秒ごとに1枚の画像が出

II. In-motion Inspection around Railways.

By Yuichiro Gotoh (Kobe Steel, Ltd., Electronics Research Lab.) and Yasuhiro Tanaka (Central Japan Railway Co., Technical Research and Development Division)

キーワード：鉄道、光切断法、レーザ、CCDカメラ、画像処理

図 1 装置概念図

図 2 装置外観図

力されるので、1断面の測定はその周期で繰り返される。あとは装置を走行させることで、断面形状を進行方向に連続的に得ることができる。

光学系は、軌道と一般道の両方を走行することができる軌陸兼用車に設置され、機動性を重視している。本装置は次のような三つの特徴をもっている。

- ①縦横不等倍光学系によるカメラ台数の削減
- ②専用画像プロセッサによるリアルタイム建築限界侵犯判定機能
- ③レール測定による車体揺動補正機能

3.1 縦横不等倍光学系による高精度化光切断法

CCDカメラを用いた光切断法の測定分解能はカメラの結像倍率およびCCDカメラの1画素のサイズで決まるが、図3に示すような物体の z 方向の起伏を測定したいとき、物体全体を測定するためには(a)のような視野をとる必要があるが、 z 方向の起伏の測定分解能を向上させるために結像倍率 m を上げると、視野サイズが y, z 両方向に小さくなって(b)のような視野となる。このため物体全体が測定視野に入らなくなり、時分割で物体を移動しながら測定するか、測定チャンネル数を増やさなければならない。

しかしながら、測定対象によっては、ある方向には測定分解能が要求され、別の方向には分解能よりむしろ

図 3 測定視野

図 4 高精度化光切断法

視野の広がり優先される場合がある。図3に示す物体の場合で、 z 方向には高分解能測定が要求され、 y 方向には多少分解能を犠牲にしてもできるだけ少ない測定チャンネルで物体全体を測定視野に入れたいときには、縦と横で結像倍率を異なる値に設定し、測定視野を(c)のようにすれば、 z 方向の測定分解能を確保した上で物体全体を測定することができ、測定チャンネル数を増やすことなく高精度化を図ることができる。

CCDカメラの縦横で異なる結像倍率を円筒面レンズの組み合わせによって実現した高精度化光切断法概念図を図4に示す。縦横の倍率比は3倍に設定し、これによって装置の走行路周辺に5台のCCDカメラユニットを配置することで全周をカバーすることが可能になった。後で述べる車体揺動補正機能で用いるレール検出用の2チャンネルと合せて、計7チャンネルのカメラユニットを搭載している。

3.2 リアルタイム画像プロセッサ

画像プロセッサのシステムブロックを図5に、動作のタイミングチャートを図6に示す。光切断画像のリアルタイム抽出のため、画像プロセッサはパイプライン処理方式で専用ボード化した。CCDカメラからのビデオ信号はA/Dコンバータによって8ビットに量子化される。サンプリング周波数は、CCDカメラの水平解像度から10 MHzとし、1フィールド周期の水平走査線262.5本中240本の水平走査線が取り込ま

図 5 リアルタイム画像プロセッサ

図 6 画像プロセッサタイミングチャート

れ、1 水平走査線あたり 512 点のサンプリングが行われる。画像プロセッサは各々の水平走査線における光切断像の位置を走査線内の一次元処理によって検出する。

安定なエッジ検出に際して問題となるノイズとして、ビデオ信号に含まれる電氣的ノイズおよび駅構内やトンネル内の照明によって測定面が照らされて生じる背景光ノイズが考えられる。これらのうち数画素程度までの高周波成分が、まずデジタルフィルタによって除去される。エッジディテクトでは、残った低周波成分を除いて光切断線を検出するために、映像信号がある強度レベル以上となり、かつその 2 階差分がゼロクロスしたとき、そこをエッジとして検出し、一時レジスタに記憶する。

検出されたエッジ位置は、あらかじめゲージテーブルに蓄えられている建築限界データとコンパレータによって比較される。建築限界データはカメラパラメータを用いて画像座標系に変換された形でストアされており、これにより検出された建築物が建築限界を侵しているか否かをリアルタイムで判定できる。この判定結果は、“危険（建築限界内に物体あり）”、“注意（建築限界～建築限界+測定精度内に物体あり）”、

図 7 揺動補正原理図

“安全（建築限界+測定精度内に物体なし）”の 3 段階に分かれており、エッジデータとともにレジスタに記憶されると同時に、警告ランプによってオペレータにリアルタイムで通報される。1 画面分 240 個のエッジ位置と判定結果は、垂直帰線期間（1.2 ms）内にバッファメモリに転送される。バッファメモリは、各チャネルの共通領域となっており、7 チャネル分のデータを蓄えることができる。こうして得られた 7 チャネル分のエッジ位置データは、次の 1 フィールドの間（16.67 ms）にデータ処理系に転送される。

画像プロセッサによって抽出された画像上における光切断線の位置を建築物の三次元の位置・形状に変換・表示するためのデータプロセッサとして、40 メガバイトのハードディスクを備えた 32 ビットのパーソナルコンピュータを使用した。測定終了後、エッジ位置データはカメラパラメータを用いて三次元座標に変換され、カラーグラフィック表示される。

3.3 車体揺動補正機能

測定座標系の原点は軌道間中点にあり、装置較正時には車両に固定された車両座標系の原点は測定座標系と一致している。しかし走行したとき、両者が一致している保証はない。そこで、走行時は常に両座標系が一致するように車体の揺動成分を検出し測定値に対し補正をかけている。走行時の車体揺動に起因する誤差の補正は、車体とレールの相対位置検出により行う。検出原理は建築物測定と同じであり、そのための左右のレール検出用カメラ 2 台を設けている（図 1 にはその内の 1 台を図示）。

図 7 に揺動補正の原理図を示す。静止時には車両座標系 $O-yz$ と測定座標系 $O'-YZ$ は一致しているが、車体揺動によって $O-yz$ がある変換 T を受けて $O'-y'z'$ となり、5 台の建築物用カメラにおける $O'-y'z'$ における測定値 Pn' は $O'-YZ$ における測定値の真値 Pn に一致しない。

図 8 プラットホーム離れ測定結果

図 9 測定結果例 (トンネル)

$$Pn = T \cdot Pn' \dots\dots\dots (1)$$

したがって、変換 T を求めれば Pn を求めることができる。走行によって生じる系の変化は、高周波の振動によって生じるセンシング系 (レーザユニットと CCD カメラ検出系) の摂動と、車体全体の数 Hz 以下の揺動に分けられる。前者が生じると補正不能になるので、センシング系は一体の剛体と見なせるように強固に構成する。後者の揺動成分としては、進行方向に対するヨーイング、ピッチング、ローリングの回転成分と平行移動成分が考えられる。これらの成分を実測した結果、ヨーイング、ピッチングはほとんど揺動に影響しないことがわかったので、揺動補正は yz 面内での平行移動 ($\Delta Y, \Delta Z$) およびローリング ($\Delta \theta$) についてのみ行うことにした。

図 8 に車両のメンテナンス用プラットホームの軌間中点からの離れを測定した結果を基準線からの相対値で示す。揺動補正をかけない場合、本装置による測定値とマニュアルでの測定値は 20 mm 程度ずれているが、補正後両者は良く一致していることがわかる。

本装置によってトンネルを測定した結果を図 9 に示

す。+印は、現在実用化されている光波断面測定器によって測定した結果である。両者は良く一致している。20 km/h での走行試験の総合精度は、上方・側方チャンネルで ± 12 mm、プラットホーム用チャンネルで ± 6 mm 程度であった。

4. おわりに

鉄道における建築物の検査業務について概観し、光切断法を用いた新しい試みについて紹介した。軌道上、しかも暗いトンネルを徒歩で検査してまわることは大変な作業である。この試みがそうした作業員の方々の負担軽減の一助になれば幸いである。

(平成 5 年 10 月 18 日受付)

文 献

- (1) 朝倉・小島：「トンネルのリハビリテーション」, RRR, 48, 3, 24 (平 3)
- (2) D. Joachim: "Zerstörungsfreie Untersuchungs-methoden bei der Zustandsbeurteilung von Eisenbahntunneln", ETR, 39-H, 6, 361 (1990)
- (3) 北折：「トンネル断面をパソコンで管理する」, 日本鉄道施設協会誌, 5, 376 (平 2)
- (4) 笹間・鶴岡・興村：「レール遊間管理のための画像データベース」, 4, 6 (平 2)
- (5) 竹下：「これからの軌道検測」, 日本鉄道施設協会誌, 5, 338 (平元)
- (6) 河村・高田：「近鉄における新しい軌道検測車」, 日本鉄道施設協会誌, 5, 365 (平元)
- (7) 後藤・神・西元, 他：「高精度光切断法を用いた軌道障害物検出装置」, 計測自動制御学会論文集, 29, 4, 377 (平 5)
- (8) 後藤・神・西元：「縦横不等倍光学系を用いた高精度化光切断法とその応用」, 電気学会計測研究会資料, IM-92-23, p.9 (平 4)
- (9) Y. Jin, et al.: "Dynamic Obstacle-detecting System for Railway Surroundings Using a Highly Accurate Laser-sectioning Method", Proc. IECON '91, 3, p.2426 (1991)
- (10) 後藤・神・青野, 他：「光切断法を用いた線路内障害物検出装置」, 第 33 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 102 M-5 (平 5)

後 藤 一 郎

平成 2 年静岡大学大学院工学研究課修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。電子技術研究所勤務。現在に至る。三次元画像応用計測の研究に従事。計測自動

制御学会員。

丹 間 泰 郎

昭和 44 年立命館大学理工学部土木工学科卒業。同年日本国有鉄道入社。軌道、土木関係業務に携わり、JR 東海(株)新幹線鉄道事業本部施設部を経て平

成 4 年より技術本部に勤務。現在に至る。