

新幹線軌道確認のための自動運転支障物検知車両の開発

Development of Automatical Driving and Obstacles Detection Vehicle for Shinkansen Track Confirmation

技術本部 山下 博*¹ 山口 正博*²
 三原製作所 怒 和 孝*³ 東 伸 一*⁴
 丹羽 英 臣*⁵

新幹線では、線路の安全確保のため営業列車の運転を開始する前に確認車と呼ばれる検査車を走行させる。従来、この検査は目視で行われていたが、今回、全自動運転可能な支障物検知車両を開発した。本車両は、自車内に線路データと目標速度データベースを持ち、それによって自動運転され、かつその速度を監視する装置を有している。さらに前方 400 m 以内の路線内にある 25 cm²以上の断面がある支障物を画像処理技術を用いて検知する性能を有している。開業前の北陸新幹線において特有の最急こう配 (100 m につき 3 m) での最高 60 km/h 自動運転支障物検知走行を確認した。

In case of conventional type inspection car of Shinkansen track, the operator checks ahead visually while driving, and the inspection car is operated manually by the driver. As a development of this, a fully-automatic operated vehicle has been manufactured which employs a target speed database by which the vehicle speed is automatically controlled. Equipment to monitor the speed and an obstruction detecting safety system, which checks the way ahead with image processing technology inside the vehicle, are also employed. As a result, a fully-automatic obstruction detection test has been realized on Shinkansen track at a maximum speed of 60km/h.

1. ま え が き

新幹線では、高速運転する列車の安全を確保するため、線路等の地上設備の保守を行う“作業時間帯”と、列車が運転される“運転時間帯”とに区別されている。この“作業時間帯”の終了に先立って、保守用機械・器具などの線路上への置忘れや、線路状態の異常の有無を確認するために“確認車”と呼ばれる専用の車両が運転されている。

そして、この“確認車”の運行が終了したことを受けて“作業時間帯”から“運転時間帯”に切換えられ、初めて営業列車が運転される。

この“確認車”の運転業務を効率的なものにするため、東日本旅客鉄道株式会社 (JR 東日本) と共同で“新型確認車”の開発に取り組んできた。

本報では、新型確認車のねらいと特徴、試験結果について概要を述べる。

2. 開発のねらい

(1) 省人化による保守人件費の低減 (2 → 1 名)

現有確認車は、目視による支障物監視員とオペレータの 2 名が乗務している。画像処理技術の導入による支障物検知の自動化と自動運転の導入による 1 人乗務化により保守人件費の低減を図るのがねらいである。

技術的には無人運転は可能であるが、支障物除去及びシステム監視要員として 1 人乗務としている。

(2) 遠方監視による速度向上 (40 → 80 km/h)

現有確認車は、目視により支障物を監視している。画像処理技術の導入により 400 m 前方の支障物を遠方自動監視することで速度向上を図る。

3. 新型確認車の特徴

新幹線を始めとする鉄道では、線路の敷設情報が正確にデータ化されている。そこで、この敷設情報 (曲線半径、こう配情報) に着目し、走行検査中の位置情報 (キロ程情報) と敷設情報を援用するシステムを構築したことが本開発のポイントであり、具体的には以下の特徴的技術を有している。

- ① 線路の線形 (曲率、こう配) に応じた目標速度データベースの構築 (車上自律型自動運転装置)
- ② 線路の線形 (曲率、こう配) に応じた最適なカメラ方向データベースの構築 (支障物検知装置: 軌道追従装置)
- ③ 誤検知を防止し、遠方まで監視するための光量、照射範囲、方向可変型サーチライトの開発 (支障物検知装置: 軌道追従装置)
- ④ 低周波の車両振動の影響をキャンセルする画像処理を用いたレールマッチングの実現 (支障物検知装置: 画像処理装置)
- ⑤ カメラ画像がぶれないための防振対策

3.1 車上自律型自動運転装置

新型確認車用自動運転装置は、地上側信号・通信設備からの指令を必要としない車上自律型であることが大きな特徴である。

以下にその方式を述べる。

(1) 目標速度データベース

自動運転装置には、敷設情報 (曲線半径、こう配情報)、ポイント手前等の停止位置データ、徐行区間等の速度制限データに基づいて、全路線の目標速度データベースをあらかじめ記憶させておく。

図 1 に目標速度データベースの例を示す。

(2) 車両位置追跡

自動運転装置は走行中、車輪の回転パルスにより車両位置を追跡する。また、車輪のすべりによって生じる距離誤差をなく

*1 広島研究所色彩・画像研究室

*4 電子制御部開発課長

*2 広島研究所機械研究室主務 工博

*5 電子制御部開発課

*3 機械・プラント技術部交通システム設計課長

開始キロ程	終了キロ程	目標速度 (km/h)	加減速度 [km/(h·s)]	走行距離 (m)
0	0	0	0	0/高崎駅中心
0	89	25	+1	89
89	131	25	0	42
131	220	0	-1	89/高崎駅停止限界標識外方52m停止
220	309	25	+1	89
309	461	25	0	152
461	550	0	-1	89/高崎駅62号背向外方58m停止
550	556	5	+1	6
556	650	5	0	94
650	772	25	+1	72

図1 目標速度データベース 目標速度データベースの構造を示す。
Data base for mark speed

すため線路上1 km ごとに設置された地上子(キロポスト)を検知し、あらかじめ記憶されたキロポスト位置へ車両位置を修正する。

(3) 自動運転速度制御・停止制御

自動運転装置は、車両位置に対応した前記データベース上の目標速度を速度指令として電動機駆動装置へ出力することにより、自動運転速度制御・停止制御を行なう。

図2に速度指令出力例を示す。



図2 速度指令出力例 自動運転の速度データに基づく速度パターンの一例を示す。
Example of speed command

(4) 自動運転監視装置

下記の機能を有する自動運転監視装置により、上記システムの信頼性を確保する。

- ① 自動運転装置の異常監視機能
- ② 速度保安パターン設定による車両速度の照査機能
- ③ 車両位置の照査機能
- ④ 車上制御機器の異常・故障監視機能

3.2 支障物検知装置

支障物検知装置は、大別すると、①軌道追随装置、②画像処理装置、の二つに分けられる。また、支障物検知のためのカメラ画像が鮮明に撮影できるよう車両構造は、防振対策を考慮して設計されている。

3.2.1 軌道追随装置

軌道追随装置は、曲率を有する軌道に沿って最大の監視距離を確保するための装置であり、以下の要素で構成される。

(1) 追随データベース⁽¹⁾

線路の敷設情報(曲線半径、こう配情報)を基に曲線部やこう配変更部での見通し距離を計算し、監視距離を3段階(100, 200, 400 m)に設定する。そして線路上の各走行位置での監視距離とそのときのカメラ支持装置の方向、サーチライトの方向を追随データベースとして作成、記憶する。

(2) カメラ支持装置

撮影倍率の異なる3台のCCDカメラを設置した旋回テーブル

を2台のモータにより旋回、俯(ふ)仰制御することで監視方向を設定する。3台の光学系はそれぞれ、100 m 前方用、200 m 前方用、400 m 前方用であり、撮影倍率が違って検出性能(最小検出対象物の大きさ)が等しくなるよう検査視野範囲は設定している。

(3) サーチライト

カメラ支持装置と同様に追随データベースに基づき、照射方向を変えることができる。また各監視距離に対応した検査視野範囲をほぼ照射できる可変構造とした。これは、余分な範囲の照射による画像処理への外乱を増加させないためである。さらに天候条件により可視光線の大気中での透過率が変化するので、明るさを調整する機能も持たせた。

(4) 制御コンピュータ

自動運転装置と現在位置や行き先情報を通信し、それに基づく追随データベースによりカメラ支持装置とサーチライトの方向を制御するとともに、3種類のカメラ画像の中から必要な画像を選択し、位置情報等とともに画像処理装置に送信する。

図3に軌道追随装置の構成を示す。

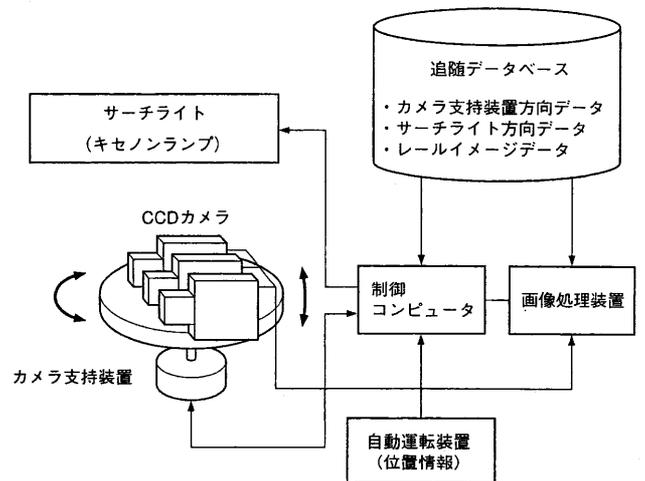


図3 軌道追随装置システム構成 キロ程情報を基にカメラ支持装置、サーチライトを制御している。
Construction of rail following systems

3.2.2 画像処理装置

画像処理装置は、大きくわけて二つの処理を行っている。まず始めに現在監視している画像の中から検査対象である建築限界(新幹線鉄道構造規則で定められた建物その他の建造物を設けてはいけない範囲)の特定化を行う。これは、検査範囲外の外乱影像の影響を除去し、支障物検知の信頼性を上げるためである。この場合考慮すべきポイントは、常に制動距離を確保して監視することで、支障物を発見後直ちに非常ブレーキを作動させ、支障物位置までに車両を停止させる必要がある。そのため軌道追随装置のデータベースと同様に敷設情報(曲線半径、こう配情報)を利用し、各位置でのカメラから見えるレールの画像をあらかじめ計算で求めておく。この画像のことをレールイメージと呼ぶ。このレールイメージをCCDカメラで撮影した画像上に重ねることにより、レールを中心とした建築限界を一定の監視距離の地点に設定できる。しかし、単純に重ねると車両の振動のため、レールを中心とした正しい建築限界、正しい監視距離を特定できない場合が発生する。正しく特定できないままその検査範囲内を検査すれば、軌道周辺に存在する柵(さく)や電柱などの多くの地上設備の影響を受け、

誤検知の確率が増えることになる。そこで、このカメラの撮影画像からレール成分を画像処理で検出し、レールイメージとパターンマッチングさせることで正しい距離と検査範囲の特定化を可能とした。

この処理の流れを図4に示す。

本方式は、処理時間の短縮と、誤判定防止に効果がある。またパターンマッチングを用いることで、自動運転装置のチェックも可能となる。例えば、出発の際、オペレータが行き先と現在位置を入力することになっているが、この入力間違いが間違っていたとしても自動運転装置では、その間違いが分からない。しかし、支障物検知装置では、レールイメージを持っているため実際の画像上のレールと一致しないことから異常を検知し、車両を停止させることができる。本システムでは、レールイメージと実際のレールとのパターンマッチングの一致度をマッチング率と呼び、ある基準以上一致する場合、その監視距離での視界(画像)が良好であることと、路線データと実際のレールが一致していると認識する。もし、ある基準以下になれば自動的に監視距離を1段階下げて、速度を落として検査を続行するシーケンスを採っている。

次に支障物を判定する基準であるが、特定された検査範囲(建築限界)内だけを対象に輝度分布を調べ、周辺より明るい物体を抽出し、その断面積が25 cm²以上であれば、支障物として検知するものとした。さらに実際の線路上には、新幹線の運行に必要なデータを新幹線車両と地上で通信するための地上子と呼ばれる設備が、1 kmごとに設置されている。このためレールイメージと同様に地上子の位置と形状をデータベース化している。このデータを用い、パターンマッチングすることで、支障物との区別を行っている。

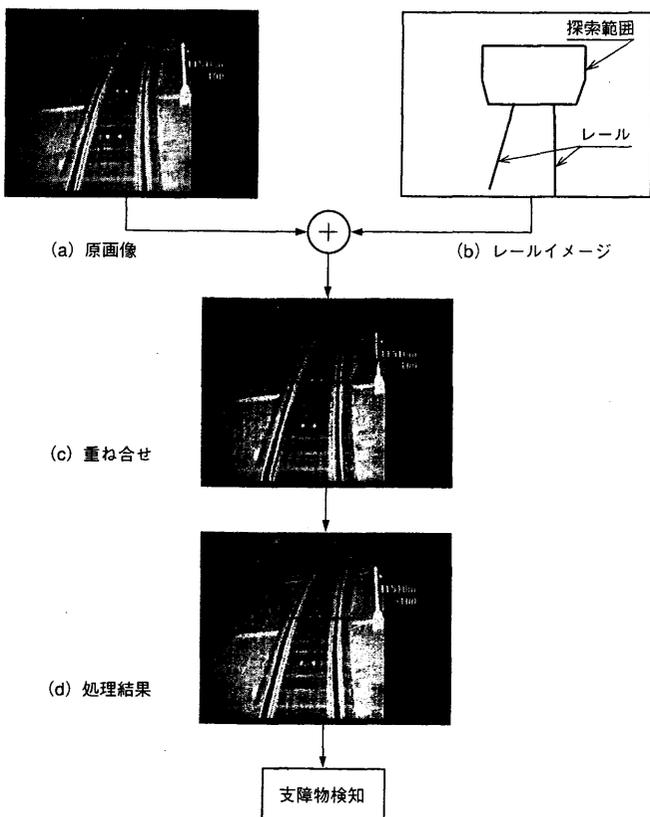


図4 レールマッチング処理 (a)原画像と(b)レールイメージを(c)単純に重ねると検査範囲に敷設物が入る。(d)レールマッチングにより正しい検査範囲内の検査が可能である。
Railmatching method

3.2.3 画像ぶれを軽減する防振対策⁽²⁾

走行中の車両がカメラ支持装置に及ぼす影響は、主として車両のピッチング振動による画像ぶれであり、像がぼける。特に遠方を監視する場合その影響は大きい。この画像ぶれは、カメラ光学系のピッチング角とその周波数に依存しており、許容限界線は本車両の場合、図5に示すとおりである。

現行確認車を用いた新幹線軌道上での走行試験の結果、画像ぶれ発生の主要因はエンジンの基本回転数 N 及びその高次(2, 3, 4 N)の振動成分と車体の上下曲げ固有振動及びカメラ支持装置の固有振動との共振である。

そこで新型確認車は、回転数一定のエンジン発電機、PWMベクトル制御VVVFインバータ、電動機による2軸駆動方式の車両として、エンジンの振動成分とカメラ支持装置及び車体の上下曲げ固有振動との共振を回避する構成とした。さらに、エンジンの振動成分の車体への伝ばを減少させるため、エンジン部に2段階防振支持を用いることにした。

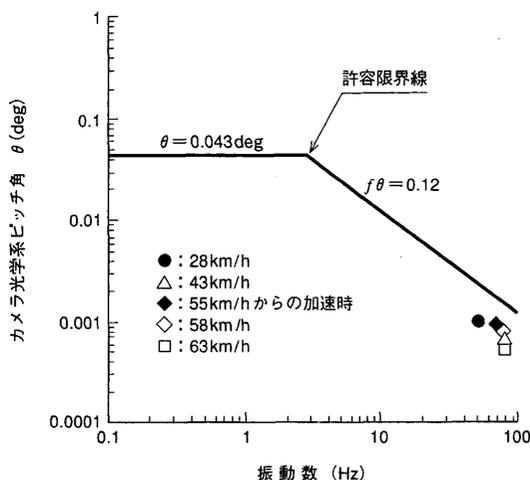


図5 カメラ光学系の許容限界線と試験結果 本システムのカメラ光学系の許容限界線を求め、走行試験での振動状態をプロットしている。
Results of test and permission line for vibration of camera

3.3 全体システム構成

図6に新型確認車の外観、図7にシステム構成、表1に諸元を示す。運転モードとしては、手動運転、自動運転、リモコン運転が選択できる。



図6 外観 夜間サーチライトを点灯し、軌道内の支障物を時速60 km/hで自動検査できる能力を有している。
View of vehicle

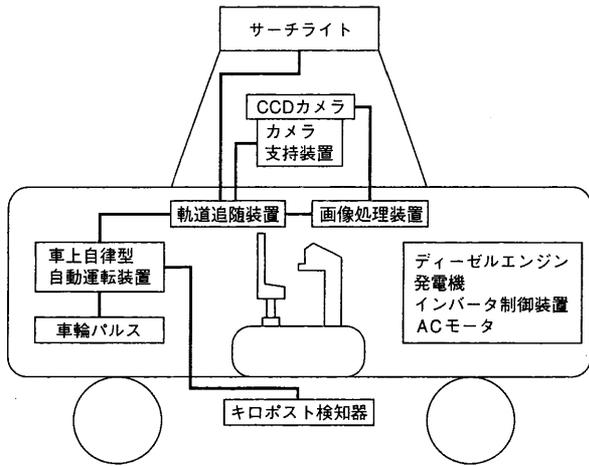


図7 全体システム構成 新型確認車の各装置のつながりを示す。
Construction of full-systems

表1 主要諸元
Principal specifications

項目	仕様
最大長さ	9 150 mm
最大幅	3 630 mm (限界検知装置使用時)
最大高さ (レール面から)	4 465 mm
軸距	5 300 mm
軌間	1 435 mm
自重	19.7 t (運転整備時)
機関	ディーゼルエンジン 定格出力 335 PS/1 800 rpm
駆動方式	ディーゼルエンジン、発電機、電動機による全2軸駆動 (1軸台車)
制動方式	電気指令式電磁直通ブレーキ 発電ブレーキ併用
最高速度 (水平レベル走行)	100 km/h (手動運転時) 80 km/h (自動運転速度向上時)

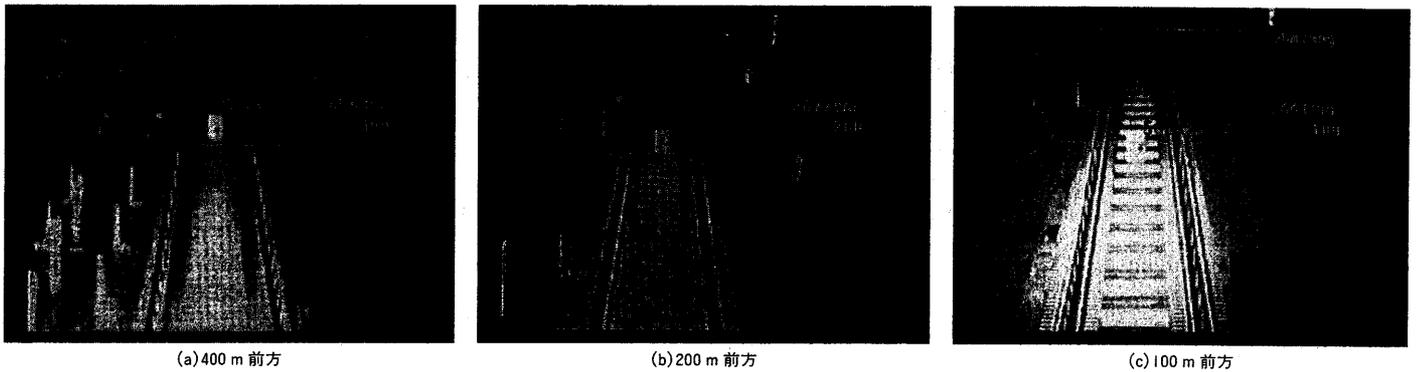


図8 支障物検知試験結果 (a)400 m 監視時に検出, (b)監視距離 200 m になり更に検出, (c)監視距離 100 m になり検出し, 停止した。
Results of obstacles detection test

手動運転時は、従来のモーターカー等と同様な主幹制御器 (マスコン) の取扱いによるトルク制御運転とすることで、オペレータが取扱い面で違和感なく操作できるよう配慮している。

自動運転時は、運転台のタッチパネルの自動運転開始ボタンを押すことにより運転を開始する。その場合、自動運転装置が自車位置の情報を支障物検知装置に通信し、支障物検知装置はその時点での監視距離を自動運転装置に返すことで、あらかじめ設定された速度 (監視距離に対して十分な制動距離を確保できる速度) で運転がスタートするようになっている。

リモコン運転は、保守基地内での入換えの作業時に使用され、最大 100 m 程度離れた地点から車両の走行・停止が遠隔操作できるようになっている。

4. 試験結果

平成 7 年 12 月に試作車両を開発した後、JR 東日本の上越新幹線の熊谷～高崎～上毛高原間で試験走行を実施した。

車両振動は、図 5 にプロットされているように、許容限界線以内に入っており、鮮明な画像が得られている。

自動運転装置と支障物検知装置も、目標速度データベースと追従データベースに準じて良好に動作した。模擬支障物検知試験を実施した時の画像を図 8 に示す。

支障物検知の信頼性を確保する上での課題は、処理画像が屋外のものであり、気象条件に左右される点にある。そのため、各種気象条件下 (雨・雪・霧) での性能試験を繰り返し実施した。

例えば、降雨時は、軌道面上にたまる水の反射により、地上子

が写り込み、形状が異なる現象などが見られた。これについては、地上子形状データベースに降雨時用の形状を追加することにより対処できた。

また降雪については降雪強度 0.7~1.5 (降雪強度 1 とは、1 h 当たり 1 cm の積雪をいう) 程度ならば、200 m 前方の監視まで可能であること、さらに、霧の場合にも、目視では見えないような状況でも、カメラ画像の方が良く見える場合があることが確認されている。ただし、この場合の監視距離は、見通し距離の影響から自動的に 100 m まで下がり走行速度もそれに伴って低下する。本システムの耐環境性に関しては、早めに監視距離を下げることでフェイルセーフ側になっているが、今後、データの蓄積を図ることで、より遠方で安定した検出及び運転速度の向上が可能になると考える。

5. むすび

前記試作機の試験結果を踏まえ、平成 9 年 10 月 1 日の北陸新幹線の開業に合わせて、平成 9 年 6 月に本新型確認車 6 台が導入され、現在順調に稼働している。

今後は、更なる曲線区間での速度向上を目指したい。

参考文献

- (1) 山下 博ほか、鉄道の障害物検知システムの開発、三菱重工技報 Vol.32 No.4 (1995) p.244~247
- (2) 田中 豊ほか、画像処理を用いた新幹線軌道の支障物検知システム、鉄道技術連合シンポジウム (1995-12)