

プローブ車両による軌道の状態診断 (可搬型プローブシステムの開発とその評価)

○ [機] 網島 均 (日本大学), [機] 小島 崇 (日本大学大学院, 現: 鉄道総合技術研究所),

[機] 森 裕貴 (日本大学大学院), [機] 丸茂 喜高 (日本大学),

[機] 水間 毅 (交通安全環境研究所), [機] 松本 陽 (交通安全環境研究所, 現: 国土交通省)

Condition Monitoring of Railway Track using In-service Vehicle (Development of probe system for track condition monitoring)

○Hitoshi Tsunashima, (Nihon University),

Takashi Kojima, (Graduate School of Nihon University, currently RTRI),

Hiroataka Mori, (Graduate School of Nihon University), Yoshitaka Marumo, (Nihon University),

Takeshi Mizuma, (National Traffic Safety and Environment Lab.),

Akira Matsumoto, (National Traffic Safety and Environment Lab., currently MLIT),

This paper describes the development and the verification of the "probe system" which estimates the track conditions without sensors on bogie. To detect the track conditions from the data which can be observed in the interior of a service vehicle, two methods have been proposed: the method to detect track irregularities using RMS of the lateral/vertical accelerations and the rolling of the vehicle body, and the method to detect rail corrugations from the interior noise using the windowed Furrier transform. The developed system has been installed onto the cab of a service vehicle to carry out a field test for the validation of the system. The results of comparison with the ground data show that the probe system can estimate effectively the amplitude of track irregularities, the grade of rail corrugations and its location.

キーワード: 鉄道, 診断法, 状態監視, スペクトル解析, 振動, 騒音

Key Words: Railway, Diagnostics, Condition monitoring, Spectrum Analysis, Vibration, Noise

1. はじめに

車輪がレールで案内されて走行する鉄道にとって、軌道の安全管理は重要である。その状況を把握し、事故に至る前に補修していく予防保全が不可欠である。そのためには、軌道の状態を常時あるいは高頻度で監視することが望ましい。しかし、軌道検測車やレール探傷車などの検査用車両の走行により精密な軌道検査が可能になっているものの、コストや要員などの点から走行頻度は非常に制限される。さらに地方鉄道では、施設の経年劣化が著しい一方で、費用の確保や技術力の維持が難しく、十分な検査が行えない事業者も少なくない。

このような問題に対して、簡便な方法により軌道状態の常時監視と診断が可能になれば、適切な保全時期、保全内容の計画によって、より確実な予防保全の実現が期待できる。常時監視を実現する一つの方法として、一般の車両に簡単なセンサ類を付加することにより、営業運転を行いながら軌道の状態診断を行う方法が考えられる(図1)このような車両をプローブ車両と呼ぶ⁽¹⁾⁻⁽³⁾。このプローブ車両が実現すれば、状態監視にもとづく新しい保安形態を確立できると考えられる。

このような保安形態を実現するには、異常を的確に検出することが重要であり、第一の課題である。センサなどにより状態を計測し、得られる情報から特徴を抽出、異常を判別する方法が必要となる。著者らは、ウェーブレット変換や窓フーリエ変換を用いて、台車および客室内で測定した振動加速度や騒音から、レール波状摩耗を検出する方法について提案した⁽⁴⁾。本論文では、車両の振動による軌道変位の検出および車内騒音による波状摩耗の検出の方法について提案し、車室内での簡易な計測により軌道の状態診断が可能なプローブシステムを構築し、実車走行実験によりその有効性を検証する。

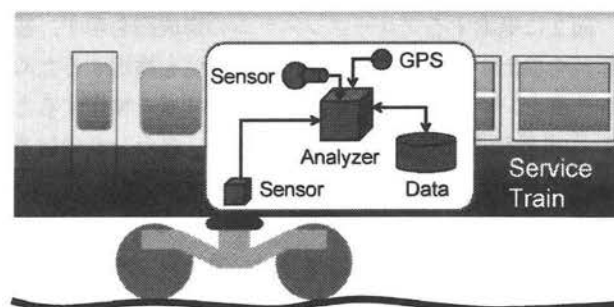


Fig.1 Probe Vehicle System

2. 車体振動による軌道変位の検出

レールの長手方向の形状の変化を軌道変位といい、車両の振動による乗り心地の悪化とともに脱線の危険性を発生させ、また著大な荷重により軌道を劣化させるため、最も重要な検査項目の一つである。

軌道状態の変化を監視する目的では、軌道変位の絶対値が得られなくても、その傾向を得るには車体振動の大きさは有効である。このような観点から、本研究では、振動の振幅が軌道変位を示す指標になり得ると考え、RMS (Root Mean Square) 値を用いる。

軌道状態と位置との関係を得るためには、短時間の RMS を求める必要がある。測定値 $x(t)$ のうちの短い時間区間 $t \leq \tau \leq t+N-1$ における RMS $x_{rms}(\tau)$ を次式で定義する。

$$x_{rms}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t+N-1} x(\tau)^2} \quad (1)$$

レールの上下方向の変形である高低変位、左右方向の変形である通り狂いを検出するために、上下・左右加速度を測定するほか、左右レールの高低差である水準変位を検出するために、ロール角を測定する。測定した上下加速度、左右加速度、ロール角についてそれぞれ $x_{rms}(\tau)$ を求める。

3. 車内騒音によるレール波状摩耗の検出

波状摩耗はレールの頭頂部が数 cm から十数 cm の周期で摩耗する現象である。波状摩耗が成長すると、著しい騒音や振動を発生するため、レールの研削や交換が必要となり、軌道保守の重要な課題の一つとなっている。

波状摩耗のような周波数の高い振動は、空気を伝搬し、騒音として捉えられる可能性がある。実際、車両が波状摩耗上を走行する際、独特の騒音が発生することが知られている。このことから、騒音からの軌道異常検出の可能性が考えられる。もし車内騒音から軌道異常を検出できれば、非接触の測定となり、既存の車両への導入がさらに容易になると考えられる。

著者らは前報⁽⁴⁾において、走行する車両の車内騒音から波状摩耗を検出するために、窓フーリエ変換を用いて騒音のスペクトルから波状摩耗のピークを検出する方法を検討し、その有効性を示した。

4. プローブシステムの構築

4.1 システム構成

図 2 に提案するプローブシステムの構成図を示す。波状摩耗を検出するための騒音計、軌道変位を検出するための加速度センサおよびレートジャイロ、位置を検出するための GPS 受信機、解析用のコンピュータ、各センサの信号をコンピュータに入力するためのアナログ入力ターミナルで構成される。

各センサから出力される信号は、アナログ入力ターミナルによりデジタル信号に変換され、コンピュータに入力される。また、GPS 受信機により求められる位置情報がコン

ピュータに入力される。コンピュータに組み込まれた位置推定・マップ表示ソフトは、GPS 受信機による位置情報にもとづいて、路線上の位置を求め、画面の地図上の現在位置を逐次表示する。軌道異常検出ソフトは、位置推定・マップ表示ソフトによる位置と GPS 受信機による速度情報に対して、加速度センサによる加速度信号を用いて補正を行うとともに、各センサからの信号を信号処理することにより軌道状態を逐次推定する。位置推定・マップ表示ソフトは、軌道異常検出ソフトによる軌道状態を画面の地図上に示す。信号処理されたデータは、オフラインにより解析するために、ハードディスクドライブに記録される。

4.2 軌道異常の検出方法

(1) 車体振動による軌道変位の検出

加速度センサおよびレートジャイロから窓幅分の信号を取得して、その RMS の計算を逐次行うようにした。窓幅は、次項の波状摩耗の検出と処理の一部を統合するために、0.512s とした。

(2) 騒音による波状摩耗の検出

騒音計から窓幅分の信号を取得して、高速フーリエ変換 (FFT) とスペクトルの平滑化、波状摩耗のピークの検出を逐次行うことにより、オンラインで波状摩耗を推定するようにした。窓幅は、時間分解能を高くするために極小小さく、かつ波状摩耗特有のスペクトルが観測できる程度に調整し、0.512s とした。窓関数には、周波数分解能の比較的良好な Hanning 窓を用いた。

4.3 列車位置・速度の補正方法

(1) 空間的補正

GPS による測位データは誤差を生じるため、マップマッチング補正を行う。あらかじめ路線形状のデータを作成しておき、GPS の測位座標から直近の路線上に補正する。補正した座標を、路線の基点からの距離 x_G に換算する。

(2) 時間的補正

GPS の測位情報は、1 秒間隔で得られる。その間の位置を、速度 $v(t)$ の積分値を用いて推定する。時刻 $t = t_g$ で GPS により求めた距離 $x(t_g)$ から現在時刻 $t = t_c$ の距離 $x(t_c)$ を次式より求める。

$$x(t_c) = x(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t) \Delta t \quad (2)$$

ここで、速度 $v(t)$ についても同様に予測する必要がある。GPS の速度情報も 1 秒間隔で得られるため、その間の速度を、加速度センサによる前後加速度 $a(t)$ の積分値を用いて推定する。ただし、GPS の速度情報は 2 秒程度の時間遅れを持つため、時刻 $t = t_g$ で GPS により得られた速度 $v(t_g)$ から現在時刻 $t = t_c$ の速度 $v(t_c)$ を次式より求める。

$$v(t_c) = v(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t) \Delta t \quad (3)$$

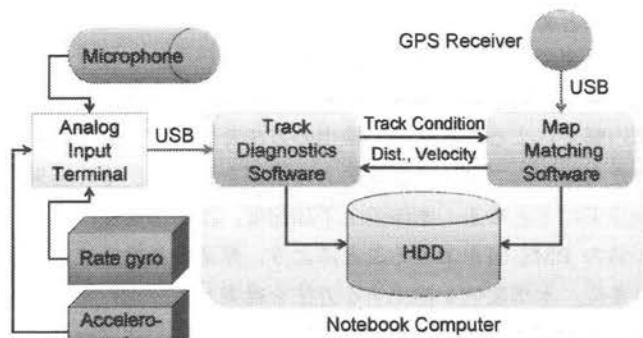


Fig.2 Configuration of Probe System

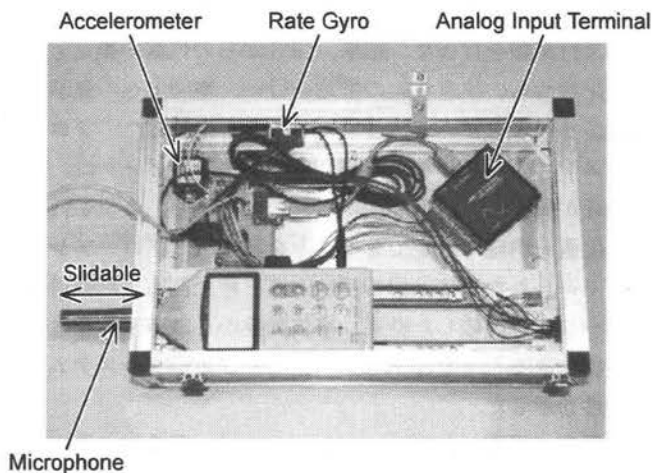


Fig.3 Interior View of Probe System

4.4 プローブシステムの構築

構築したプローブシステムの内部を図3に示す。センサ類を1つの箱に収め、解析用コンピュータと一体の構成にすることにより、運転直前の設置、運転後の取り外しを容易に行えるようにした。騒音計は、計測時に引き出し、搬送時に収納できるようにスライド式とした。GPS受信機は、受信状態の良好な位置にマグネットにより固定できるようにした。

5. 実車走行試験

構築したプローブシステムによる軌道状態診断の総合的な検証を行うため、営業車両による走行試験を行った。

5.1 試験方法

車室内において、台車から伝わる振動を測定する好ましい位置は台車直上の床面であるが、その位置は客室であるため実用を考慮し、構築したプローブシステムを乗務員室内の運転台の近くに設置した。GPS受信機を窓枠に固定し、営業路線を走行した。列車ダイヤは、試運転であるが、営業運転と同様の運転パターンとし、営業運転に使用されている一般の車両を使用した。

5.2 試験結果

図4は、測定した騒音、加速度、ロール角速度の原信号と、それを信号処理して求めた騒音スペクトルピーク、加速度とロール角速度のRMSを表示した結果である。また、

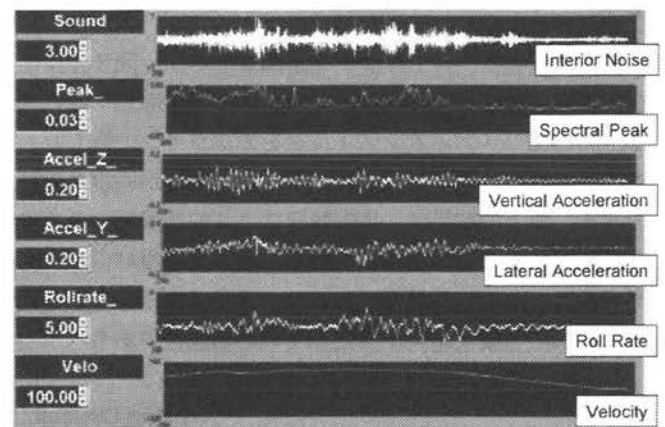


Fig.4 Real Time Monitoring of Track Condition

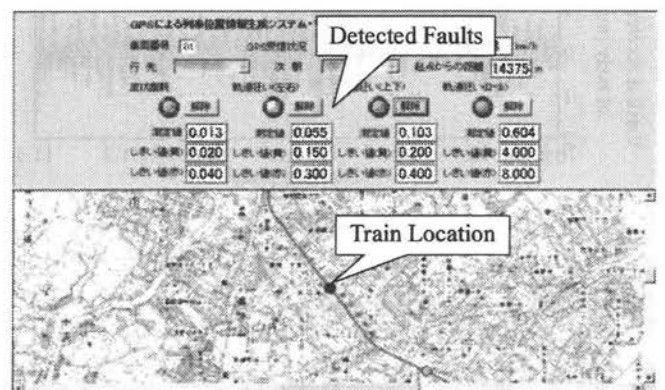


Fig.5 Real Time Fault Detection of Track

図5は、検出された軌道異常と、現在位置を地図上にリアルタイムで表示した結果である。軌道異常検出処理による評価値にしきい値を設定し、注意、警告の表示を行い、軌道異常の内容と程度の表示を行う。

5.3 地上測定データとの比較

(1) 軌道変位

直線区間を75 km/hで走行した際の車体上下加速度の測定結果と、地上測定データとの比較を図6に示す。地上測定データは、10m弦正矢法による5m毎の測定値で、横軸は、GPSと前後加速度から推定したキロ程である。

高低変位の大きい箇所(図6(c)の(1), (2))で、上下加速度RMSは高い値を示し(図6(b)の(1), (2)), 上下加速度RMSにより高低変位の大きい箇所を検出できたことがわかる。図6の(2)の位置が若干異なるが、これは軌道変位により車体が応答するまでの時間遅れと、GPSの測位誤差が含まれていると考えられる。

以上の結果は、車体振動の振幅を示すRMSにより軌道変位の増大箇所を特定できることを示している。例えば、正常な軌道状態におけるRMSを基準としてしきい値を設定すれば、異常を検出できると考えられる。

(2) 波状摩耗

車内騒音の測定結果を図7に示す。全区間における波状摩耗の地上測定は行っていないため、波状摩耗の発生を確認している半径400m以下の急曲線を網掛けで示す。車内騒音の振幅からは、網掛けの曲線区間における有意な変化

は確認できない。

車内騒音のスペクトルピークを図 8 に示す。図 8 では、波状摩耗に起因しないスパイク状のノイズを除去するために、3 秒間のメディアンフィルタをオフラインで施した。網掛けの曲線区間で高い値になっていることが明瞭に確認できる。以上の結果は、車内騒音により波状摩耗の発生位置を特定できることを示している。なお、網掛け以外にも高い値になっている箇所があるが、半径 400m を超える曲線においても波状摩耗が発生している可能性がある。

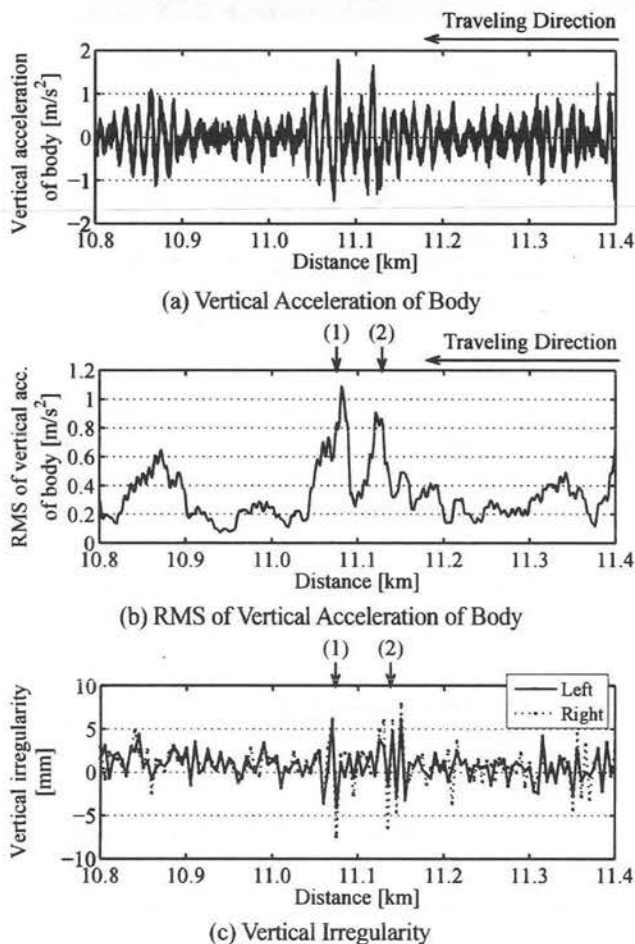


Fig.6 Vertical Acceleration and Vertical Irregularity

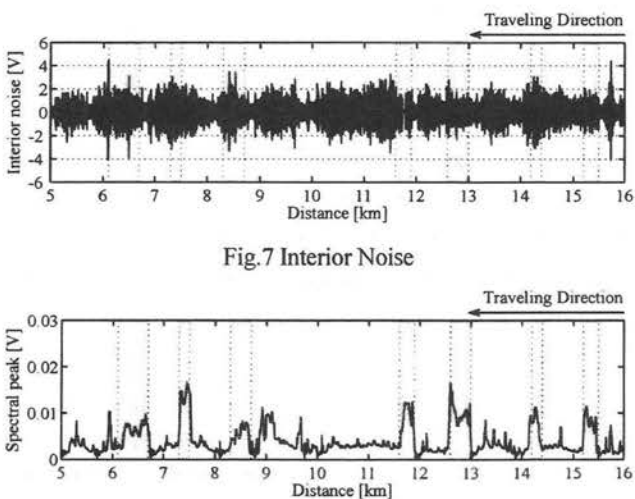


Fig.8 Spectral Peak of Interior Noise

6. まとめ

本論文では、営業車両により軌道の状態診断を行う方法について検討した。車両振動による軌道変位の検出および車内騒音による波状摩耗の検出の方法を提案し、実用に向けた可搬型のプローブシステムの構築を行った。その結果を以下にまとめる。車体の上下加速度、左右加速度、ロール角の RMS 値を求めることにより、軌道の高低変位、通り変位、水準変位を検出する方法を提案した。走行する車両の車内騒音から波状摩耗を検出するために、窓フーリエ変換を用いて騒音のスペクトルから波状摩耗のピークを検出する方法を提案した。

提案した可搬型のプローブシステムを構築、営業線において走行試験を行った。結果、GPS からの位置の推定と、各センサからの軌道状態の推定を行い、地図上への表示、記録がリアルタイムで実行できることを確認した。プローブシステムで得られた車内騒音のスペクトルピークは、波状摩耗が発生している急曲線で高い値を示し、波状摩耗の発生位置を明確に特定できることを示した。プローブシステムで得られた車体動揺の RMS 値と地上測定した軌道変位データとを比較した結果、車体動揺から軌道変位を良好に検出できることを確認し、構築したプローブシステムの有用性を示した。

本研究で提案したプローブシステムは、保全に必要な情報を 1 回の走行により得ることは困難である。実用に向けては、プローブシステムにより蓄積される日々のデータから、統計的処理などにより傾向を算出し、保全の必要性を提示する方法が今後の課題になると考えられる。これが可能になれば、適切な保全時期や保全内容の計画に活用できることが期待される。

参考文献

- 1) Tsunashima, H., Matsumoto, A., Nakamura H. and Yamashita H., Fundamental Studies on Development of Probe-Vehicle System for Advanced Railway Inspection, The 13th Transportation and Logistics Conference 2004 pp. 241-242, 2004
- 2) Tsunashima H., Matsumoto A., Mizuma, T. and Nakamura H., Condition Monitoring of Railway System by "Probe Vehicle" Technology, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 61, No. 2, pp. 98-104, 2007
- 3) 網島均, 松本陽, 水間毅, 山下博, プローブ車両による軌道の状態診断(営業車両による軌道状態の常時監視システムの開発), 検査技術, Vol. 12, No. 5, pp. 50-55, 2007
- 4) Kojima, T., Tsunashima, H., Matsumoto, A. and Ogata, S., Fault Detection of Railway Track from On-Board Measurement Data, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 720, No. 72, pp. 2447-2454, 2006