

可搬式軌道状態モニタリング装置のための 車上測定データ距離化手法

田中 博文* 猿木 雄三 芳賀 昭弘 (鉄道総研)
福山 幹康 (JR 九州)

Distance Sampling Method of On-board Measured Data for Portable Track Condition Monitoring Device

Hirofumi TANAKA*, Yuzo SARUKI, Akihiro HAGA (Railway Technical Research Institute)

Motoyasu FUKUYAMA, (Kyushu Railway Company)

To develop a portable track condition monitoring device, we are now studying a technique to convert the on-board measured data to the distance sampling data and a kilometer index adjustment technique that do not rely on the equal interval distance pulse and the point detection pulse. First of all, we converted the time sampling data measured on a train into the equal interval distance sampling data by using the train speed calculated from GPS. Next, we identified the position of the on-board measured data by using the maintenance register that contain information such as curves, rail joints etc., and provided the kilometer index to the measured data.

キーワード：車上モニタリング，等距離サンプリング，地点対照，キロ程補正，GPS，速度情報，レール波状摩耗
(Keywords, on-board monitoring, equal interval distance sampling, position identification, kilometer index adjustment, GPS, train speed information, rail corrugation)

1. はじめに

線路長手方向に保守対象箇所が点在する軌道のモニタリングには，線路上を走行する車両で測定したデータの活用が効率的である。その代表例が，軌道検測車で定期的に測定されている軌道変位である。軌道変位は，その検測特性上，波長数～数十 m 程度の走行安全性や乗り心地に影響するような長い波長の軌道状態の管理に用いられている。一方，波状摩耗に代表されるような短い波長の現象を管理するには，軸箱加速度の活用が有効である^{(1),(2)}。軸箱加速度は，レール凹凸と非常に相関が高いことが知られているが，車両の床下にセンサを設置することから，測定車両が制約される等の運用上の困難を伴う場合がある。

また，車上測定データから，軌道の正確な位置，すなわちキロ程を同定するためには，距離パルスおよび地点検知パルスの収録が不可欠となる。ここで，距離パルスとは，距離軸上で等間隔なパルスであり，一般には速度発電機パルス（以下，速発パルスという）が用いられる。地点検知パルスとは地上に固定された目標物から発生するパルスであり，ATS 地上子やデータデボ等が用いられる。しかし，これらのパルスは，本来列車の運行に用いられているものであり，これらを分岐してデータ収録するには，車上に専用の機器を設置する必要がある。したがって，収録装置は，特定の編成にしか設置されておらず，測定時に車両運用の制約を大きく受けることとなる。

これらの背景から，我々は車両運用の影響を受けることのない可搬式の軌道状態モニタリング装置に着目している。本研究でモニタリング対象とする軌道状態とは，軌道変位で管理できないものとし，現段階では，レールに生じる波状摩耗の検出システムを開発している^{(2),(3)}。その一環として，距離パルスや地点検知パルスを必要としない車上測定データの距離化およびキロ程補正手法について検討を進めている。本研究では，営業車の車上で測定した時間サンプリングのデータを対象として，GPS による速度情報を用いて等距離サンプリングのデータに変換し，さらに既知の地点情報を用いて軌道上のキロ程との地点対照を行い，等距離サンプリングのデータにキロ程を付与する手法について検討した。

2. 波状摩耗と車上測定の概要

前述したとおり，我々は，車上からの波状摩耗のモニタリング手法の確立を目的として，検出手法⁽²⁾および検出装置⁽³⁾の開発を行っている。波状摩耗とは，列車の走行に伴って，主に曲線内軌頭頂面に波長数～十数 cm 程度の周期的な凹凸が生じる現象である。その上を列車が走行すると著しい騒音と振動が発生するので，適切な保守・管理が必要となる。

そこで，本研究では，短波長のレール凹凸の検出に優れている軸箱加速度に加え，車上で容易に測定可能な車体加

速度および車内騒音を同時に測定した。また、これらのデータを等距離サンプリング化するために速発パルスを、地上との地点対照を行うために地点検知パルスも同時に測定した。さらに、これらのデータに加えて、GPSによる速度情報および車体のヨーイング角速度（以下、ヨーレートという）を測定した。

GPSセンサは、速度情報を5Hzで受信できるものを用いた。なお、GPSセンサは、速度情報に加えて、緯度・経度情報等も取得できるが、今回これらの情報は使用しなかった。これは、鉄道車両は、線路に沿ってのみ移動することから、走行経路さえ把握できれば速度情報以外の情報は不要と判断したためである。そのため、専用のGPSロガーを試作し、速度情報のみを電圧データに変換してレコーダーに収録した。また、ヨーレートセンサは、小型のシリコン振動ジャイロを用いて試作し、これについても電圧データに変換してレコーダーに収録した。

3. 等距離サンプリング化手法

〈3・1〉 距離パルスによる距離サンプリング化

一般的に鉄道車両では、速発パルスを用いて列車速度を演算している。速度発電機とは、車輪の回転と同期して距離軸上で等間隔なパルスを発生させるものである。車上で加速度等の測定を行う場合は、このパルスを同時に収録して、時間サンプリングされたデータを等距離サンプリングのデータに変換している。

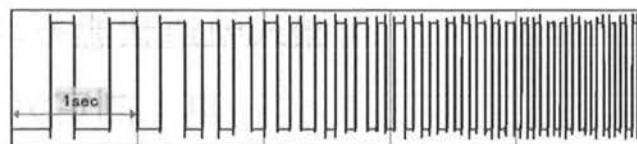
本研究においても、距離軸上で等間隔となるパルスを用いて、時間軸上で設定したしきい値を超過した際に、サンプリングを行っている。その際、サンプリング数は、距離パルスに対して1対1のみでなく、倍周機能を設け、任意の倍周倍率を設定可能とした。図1は、25cm距離パルスを用いて、自らのデータを25倍周したものである。時間軸上では不等間隔なパルスが、距離軸上では等間隔に変換されていることがわかる。

なお、この処理は、既に軌道保守管理データベースシステム（以下、LABOCSという）⁽⁴⁾において確立されている。また、測定データを距離サンプリングのデータに変換する際には、エイリアジングに対する事前処理が必要である⁽²⁾。

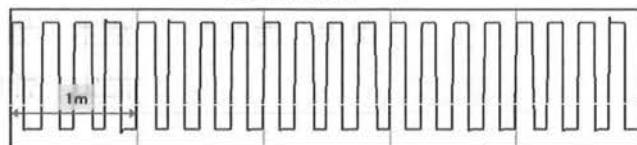
〈3・2〉 速度情報による距離サンプリング化

速発パルスを用いる手法では、車上に専用の機器を設置する必要があるため、可搬式のシステムの開発に当たっては、これに頼らない等距離サンプリング化手法を開発する必要がある。

ここで、GPS信号を用いた移動体の速度検出手法については多くの適用事例があり、鉄道分野においても既に検討されている^{(5),(6)}。本研究でもこれに着目し、GPSの速度情報を用いた等距離サンプリング化手法の検討を行った。GPSの信号を用いる場合、速発パルスに相当するような等距離サンプリングの信号を直接得ることはできず、列車速度を得ることとなる。時間サンプリングされた列車速度は、



(a) 時間軸データ



(b) 距離軸データ

図1 等距離サンプリングの一例（距離パルスの例）



(a) GPS



(b) 速発パルス

図2 GPSと速発パルスによるランカーブの比較

一回積分すると列車の移動距離となる。この関係を用いて、列車速度から算出した移動距離を用いて距離軸上で等間隔なパルスを演算で発生させることとした。その後の等距離サンプリングへのデータ変換は、図1に示したものと同一であるため、速度情報のみ取得することができれば、LABOCS上で自動で等距離サンプリング化を行うことが可能となっている。

図2に、GPSの速度情報から作成したランカーブを示す。図中には、比較対象として、速発パルスから算出したランカーブも示している。両データともに、自らのデータを用いて距離サンプリング化している。同図より、加減速区間においても両データはよく一致していることが分かる。

ここで、GPSの特性上、衛星からの信号を受信できない場合には、速度情報を得ることができない。従来測定に用いていた1Hzタイプのものと比較して、今回試験した5Hzタイプのものは受信感度が向上したため、山間部や都市部でも比較的多くの衛星を確保することが可能となった。しかしながら、例えばトンネル区間では衛星からの信号を受信できず、速度情報が欠測となり、距離サンプリングへの変換ができなくなる。そこで、本研究では、欠測時間が短時間の場合は、その前後の速度を用いて線形補間している。ただし、長大トンネル等で欠測時間が数分程度と長くなる場合については、線形補間では精度が低下することが避けられない。現時点では、車体前後加速度の1回積分による速度の演算あるいは計画ランカーブを用いた補正を行っている。車体前後加速度を用いる場合は、走行区間の勾配の

影響を受ける。また、計画ランカーブを用いる場合は、加減速があった場合に対応できない。いずれにしても、これらの手法ではやはり精度が劣るために、トンネル区間等、GPSの衛星不検知区間における処理については、今後も検討を進める予定である。

なお、上述した手法を用いて、ある程度の精度で欠測区間の速度情報を推定することができれば、4章で説明するキロ程・データ番号対照手法と合わせて用いることにより、大きな位置ずれは発生しない。

4. キロ程・データ番号対照手法

〈4.1〉 キロ程補正の必要性

地上での保線作業はキロ程標識（キロポスト）を基準に行われている。しかしながら、線路に敷設されているキロ程標識（キロポスト）は、正確に線路の長さを表してはいない。例えば、線路の付け替え等に伴う重キロあるいは断キロによる、キロ程の不連続が存在する。なお、重キロ区間（W区間）とはキロ程が重複している区間、断キロ区間（B区間）とはキロ程が断絶している区間をいう。ここで、キロ程に不連続が生じた際に、キロ程を再度振り直すことは、キロ程標識を含む全ての線路標識および台帳データを修正することとなり、管理上非常に煩雑となるため、実際には行われない。したがって、仮に線路の起点（0K000M）から測定を開始したとしても、サンプリング間隔 Δx [m] × データ数 n は、地上のキロポストと一致しない。

そこで、距離サンプリング化されたデジタルデータのデータ番号と、地上のキロ程との対照を行う必要性がある。また、車輪の空転や滑走等により、同一区間であってもデータ数は走行毎に異なるため、上記のデータ番号とキロ程の対照は走行毎に行う必要がある。

このためには、地上に固定されている目標物と、これを車上から確実に検出するセンサが必要となる。通常、ATS地上子やデータデポ等が用いられるが、可搬式のシステムの開発に当たっては、使用することができない。

このキロ程の不連続を補正するために、車上試験では、地点検知パルスと同時に収録し、地上との地点対照を行っている。LABOCSではこの処理を、「キロ程補正」と読んでおり、図3に示すように「キロ程・データ番号対照表(KDT表)」⁴⁾ という概念を用いている。

地点検知パルスとは、車両の床下に設置した受信機を用いて地上に設置されたATSやデータデポ等からの信号を受信するものや、渦流センサや光学センサ等を用いて地上に設置したターゲットを検出するものがある。いずれにしても、地上と車上に様々な設備を必要とするため、可搬式のシステムの開発に当たっては、これらを用いないキロ程補正手法を開発する必要がある。

そこで、本研究では、2つのキロ程補正手法を検討した。一つは、ヨーレートセンサによる曲線検知を行い、既知の曲線情報と照合する手法である。もう一つは、レールの継

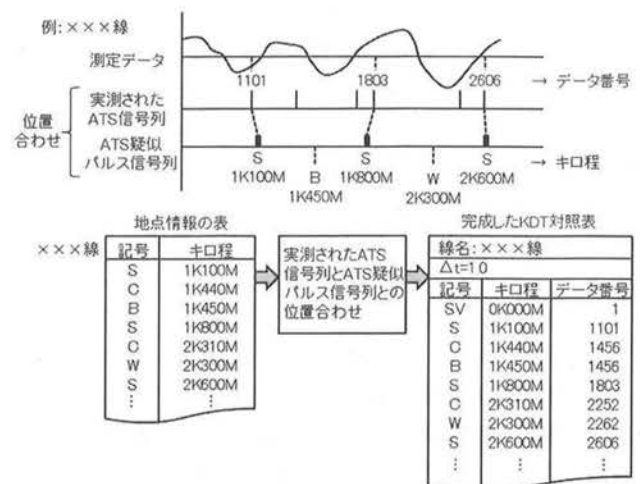


図3 LABOCSにおけるキロ程補正の概念

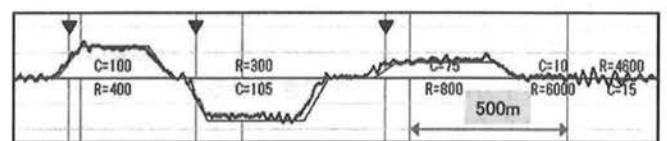


図4 曲線検知によるキロ程補正の一例

目や溶接、あるいは特定の構造物等を通過した際に、測定データそのものに発生する特有の応答を用いて、これらの位置と照合する手法である。

〈4.2〉 ヨーレートを用いたキロ程補正

ヨーレートによる曲線検知は既に検討されたものがある。本研究でも、この概念をしたキロ程補正を行った。まず、ヨーレートの測定データに対して、ローパスフィルタ処理して不必要なノイズ成分を除去する。次いで、絶対値化処理を行う。このデータに対して、あるしきい値を設定して曲線の検出を行う。この処理では、入口側の緩和曲線において、曲線を検知しており、それぞれの入り口側緩和曲線の始終点の中間点のデータベースを作成し、地点対照を行う。図4に、曲線検知によるキロ程補正の一例を示す。図中の▼印が曲線を検知した箇所であり、この位置でキロ程補正が行われている。

なお、この場合、曲線半径や列車速度によって、ヨーレートの出力感度が異なるので、若干の位置ずれを許容する必要がある。また、曲線がほとんど存在しない区間では、検知する曲線の間隔が広くなるため、キロ程補正の精度が低下する欠点を有しているが、波状摩耗が発生するような急曲線区間においては、精度良くキロ程補正を行うことが可能である。

〈4.3〉 測定データの応答を用いたキロ程補正

レールの継目や溶接、あるいは特定の構造物による応答を用いた検知では、測定データに含まれる特有の応答、すなわち、車両がこれらを通じた際に発生する特定の周波数成分を精度良く抽出する必要がある。この場合、測定データそのものから位置検知パルスを抽出するので、キロ程補正のためのセンサを別途設ける必要がない。例えば、継

目部や溶接部を通過すると、比較的周波数の高い振動や音が発生するので、これをバンドパスフィルタ（以下、BPF という）処理によって抽出すればよい。また、踏切や無道床橋梁等でも特徴的な振動や音が発生するので、これらを BPF 処理で抽出すれば、本手法を適用可能である。いずれにしても、曲線検知と同じく、保線台帳よりこれらのキロ程をデータベース化し、測定データのキロ程補正を行う。

図 5 に、測定データからの位置検知パルス抽出の一例として、継目を検出した場合を示す。図 5(a)は、軸箱加速度による継目検知の例、図 5(b)は、同じ区間における車内騒音による継目検知の例である。いずれのデータにおいても、約 25m 間隔で衝撃的な応答が得られており、継目を精度よく検知していることが分かる。ただし、車内騒音は床面からの固体音を収録しており、2 軸台車の前後軸による 1 継目に対して 2 回の衝撃的な応答が得られていることがわかる。また、図中の▽印のように、応答が小さい箇所では、検知できない場合もあるが、全ての継目を検知する必要は無く、前後の継目で十分に位置合わせできていることがわかる。

なお、これらの処理は、従来の地上子によるキロ程補正手法と同一の処理アルゴリズムを用いているため、データベースのみ作成すれば、LABOCS 上で自動でキロ程補正を行うことが可能となっている。なお、継目や溶接部の応答を用いた測定データの地点対照手法は、既にその概念が示されているが、自動化処理が課題とされている⁽⁹⁾。

なお、図 6 に示すように、波状摩耗区間では、そのレール凹凸によって、継目部以外でも大きな音や振動が発生する。したがって、波状摩耗の発生が予想される急曲線中では、継目あるいは溶接検知は実施しない方が良く、全ての継目でのキロ程補正を必要としないので、直線部での継目のみを用いてキロ程補正を実施すればよい。

これらを考慮すると、現時点では、以下の手順でキロ程補正を行うことを想定している。

- ①曲線のデータベースを作成し、ヨーレートで曲線検出し、数 m 単位でキロ程補正を行う。
- ②曲線部を除外した継目のデータベースを作成し、測定データから抽出したキロ程検知パルスで正確なキロ程補正を行う。

ここで、②のみでは、継目は一般的に 25m 間隔で存在することから、レール 1 本分ずれて誤検知する可能性があることから、前段階としての①の手順が必須となる。

5. まとめ

可搬式軌道状態モニタリング装置のための、等距離サンプリング化手法およびキロ程補正手法について検討を行った。その際、軌道保守管理データベースシステム (LABOCS) を用いたデータ処理を実施した。得られた知見を以下に列挙する。

(1)GPS の速度情報を用いた等距離サンプリング化手法

従来の速発パルスを用いた等距離サンプリング化のアル

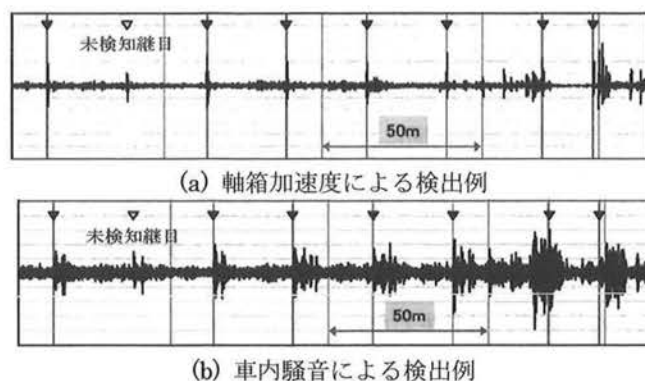


図 5 測定データを用いたキロ程補正の例（継目検知の例）

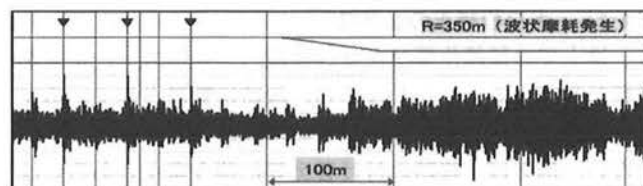


図 6 波状摩耗発生区間での継目未検知の例

ゴリズムを改良して、速度情報を用いた等距離サンプリング化手法を開発した。その際、GPS の速度情報を用いたが、速発パルスを用いた場合とほぼ同等の精度が得られた。

(2)ヨーレートおよび保線台帳を用いたキロ程補正手法

従来の地上子を用いたキロ程補正のアルゴリズムを、線路線形や継目のようなキロ程が既知の線路諸元を用いたキロ程補正手法を検討した。その結果、地上子を用いずとも、キロ程補正が可能になった。

なお、GPS を用いた場合、その欠測区間の処理が課題として残されているので、今後は欠測区間を精度良く補完するためのアルゴリズム、あるいは GPS を用いない全く別の方式による可搬式の速度情報取得手法の開発を進める予定である。

文 献

- (1) 須永陽一・井出寅三郎・金尾稔：「軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法」，鉄道総研報告，Vol.9，No.2，pp.35-40，1995
- (2) 田中博文・猿木雄三・清水淳・南木聡明：「車上測定データを用いた内軌波状摩耗の検出手法」，鉄道力学論文集，第 14 巻，pp.91-98，2010
- (3) 猿木雄三・田中博文・芳賀昭弘・福山幹康：「可搬式車上モニタリング装置による内軌波状摩耗の検出～車両条件が検出精度に与える影響～」，J-Rail2010，投稿中，2010
- (4) 吉村彰芳・吉田康夫・細川岳洋・菊地勝浩：「軌道保守管理データベースシステム：マイクロ LABOCS-II+の開発」，鉄道総研報告，Vol.6，No.11，pp.69-78，1992。
- (5) 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知システム」，鉄道総研報告，Vol.17，No.4，pp.11-16，2003
- (6) 山本春生・佐々木達也・菅原宏之：「閑散線区向け列車制御システムへの GPS の適用」，鉄道総研報告，Vol.24，No.3，pp.23-28，2010
- (7) 水野 裕介・片岡 慶太・松本 好弘・長山 智則・藤野 陽三：「鉄道営業列車による移動体センシングの加速度応答を用いた位置同定と軌道変状の検出」，土木学会論文集，Vol. 66，No.3，pp.360-365，2010