

講演 4. 地方鉄道を対象とした車上センサを用いた 軌道の水準変位計測手法の検討

交通システム研究部 ※小野 寛典 一柳 洋輔 篠田 憲幸（客員研究員）

1. はじめに

鉄道は軌道により車両を支持・案内していることから、軌道の状態が走行安全性に大きく影響を与える。軌道は列車が繰り返し走行することで徐々に変形するため、鉄道事業者では軌道の本来あるべき形状からのずれ量である軌道変位を定期的に計測し、その結果を基に整備を行い、軌道の状態を管理している。軌道は列車の荷重が加わることで、一時的に変形を生じることから、本来、荷重が負荷された状態で軌道変位を計測する動的軌道検測を実施することが望ましい。しかし動的軌道検測を実施するには、軌道検測車に代表される高価な装置が必要となる。そのため地方の鉄道事業者では、費用等の関係から動的軌道検測ではなく、荷重がレールに作用しない状態で人手で変位を計測する静的軌道検測により軌道の状態を管理している場合が多い。

そこで当研究所ではこれまで、地方鉄道の軌道管理の省力化を実現するため、営業列車の上下振動計測に基づく軌道管理手法¹⁾や横圧载荷治具を用いた軌間拡大量の推定手法²⁾などを提案してきた。鉄道の走行安全性を確保するためには、このほかに平面性変位を監視することも重要である。平面性変位は一定間隔を隔てた2箇所の水準変位の差に相当するため、水準変位を計測することで平面性変位を算出できる。そこで今回は水準変位に着目し、LiDAR センサ等を活用し営業列車において動的水準変位を計測する手法を検討したので報告する。

2. 軌道変位について

前述したとおり、軌道変位とは軌道の本来あるべき形状からのずれ量であり、5種類の変位量で管理される。図1に軌道変位の種類を示す。このうち今回は水準変位と平面性変位について注目する。水準変位は左右のレールの高さの差を示している。平面性変位と

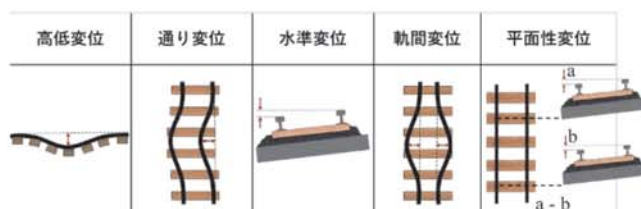


図1 軌道変位の種類

はレールのねじれを示す指標であり、線路方向に一定間隔を隔てた2箇所の水準変位の差である。よって、水準変位を計測することにより平面性変位も算出できる。

一方、曲線部においては遠心力に対応するため、曲線外側のレールが曲線内側のレールよりも高く設置され、この左右レールの高さの差をカントと呼ぶ。このカントが設定されている曲線部とカントのない直線部の間には左右レールの高さの差が連続的に変化するように緩和曲線が挿入される。よって、緩和曲線では構造的に軌道のねじれが生じている。図2に示すように、軌道のねじれがあると台車の4つの車輪は3点支持に近い状態となり、輪重が小さくなる車輪が生じる。これを輪重抜けと言う。さらにこの部分で著大な平面性変位が生じると、構造的に設定されている軌道のねじれと平面性変位が重畳することで、より輪重が小さくなり、脱線の危険性が高まることから、大きな問題となる。これらのことから、軌道の平面性変位の管理は列車の走行安全性の観点において重要であるため、動的に監視することが望ましい。

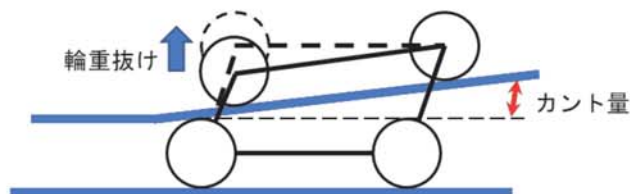


図2 軌道のねじれによる輪重抜け

3. 計測手法の検討

3. 1. 従来の検出方法

前述したとおり、軌道変位の検測には静的検測と動的検測がある。図3に静的水準変位検測の様子、図4に動的水準変位の検測概略図を示す。静的検測では、水準器が付いた棒状の計測器を左右のレールに渡し、その傾きから左右レールの高さの差を算出している。一方動的水準変位検測の場合では、一般的に車輪と車体間の変位量を車両の左右それぞれで計測し（図中のa,b）、ジャイロセンサにより車体の傾きを把握し（図中の θ ）、その傾き分を補正することで計測している。

また、近年では保守用のモーター車に取り付け可能な水準および平面性変位を計測できる装置も開発されている³⁾。



図3 静的水準変位検測の様子

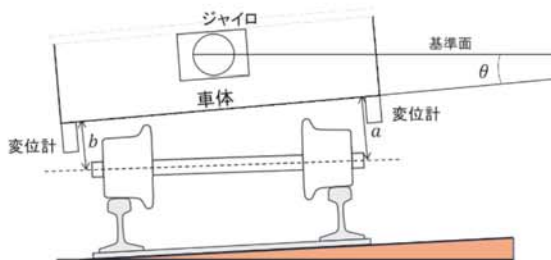


図4 動的水準変位検測方法の概略図

3. 2. 簡易動的水準変位計測システムの構成

本システムのコンセプトは容易かつ安価に動的軌道変位の著大箇所を把握することである。近年では各種センサの小型化・汎用化が進んでいる。そこで、小型の汎用センサを営業車両床下に設置することで、従来の手法よりも容易かつ安価に動的水準変位を計測できると考えた。具体的な計測手法は、非接触の変位センサ又は形状を測定可能なセンサと車体の傾斜角度を計測するジャイロセンサを車両床下に設置する。変位センサなどにより車体とレールの変位量を計測し、ジャイロセンサにより車体の傾斜角度を補正することで、水準変位を算出する。

次にセンサの選定について述べる。センサは車体の傾きを計測できるセンサと車体とレールの変位量を

計測できるセンサの2種類必要である。前者については、航空機やドローンの制御用に小型のジャイロセンサが多数製品化されており、それを用いることとした。一方、車体とレールの変位量を計測可能なセンサとしては様々なものが存在するため、選定にはコストだけでなく、営業車両の床下という環境を踏まえて以下の点を考慮しなければならない。

①センサの種類

自然光が入りにくいため、暗所でも計測可能なセンサとする必要がある。

②サンプリングレート

営業列車の走行速度に対応可能なサンプリングレートを有する必要がある。一般的に軌道変位は0.25m周期で計測している。また地方の多くの鉄道路線では最高速度80km/h以下である。よって、少なくとも80km/hで走行した場合に0.25m周期でデータを取得するするには、90Hz以上のサンプリングレートを有する必要がある。

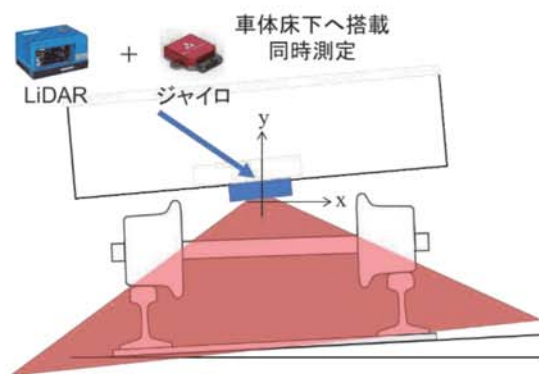
③検知範囲

センサを車体床下に設置した場合に、左右のレールが検知可能である必要がある。地方の鉄道路線の多くは軌間1067mmを採用しており、また多くの鉄道車両では、レール頭頂面から車体床下までの距離が約1mである。これらの条件からセンサ1つで左右のレール両方を計測するためには、センサからの距離が1m以下の物体を検知可能かつセンサの検知範囲は70°以上有する必要がある。センサを2つにし、右レールと左レールをそれぞれ計測する方法も考えられるが、システム構成を簡素化するため今回は採用しない。

以上の条件を満たす非接触センサとしてSICK社製の2次元LiDAR(Light Detection And Ranging)センサを選定した。LiDARセンサとは、レーザ光を照射し、物体からの反射光を受光することで物体までの距離や方向を測定するセンサである。選定した2次元LiDARセンサの諸元を表1に示す。また、図5に本システムの構成を示す。

表1 2次元LiDARセンサの諸元

角度分解能	0.0833° (1m離れた物体を測定する場合は約1.5mm)
照射角度	70°
検出可能範囲	0.7~3m
サンプリング周期	600Hz
質量	2.4kg



4. 水準變位算出手法

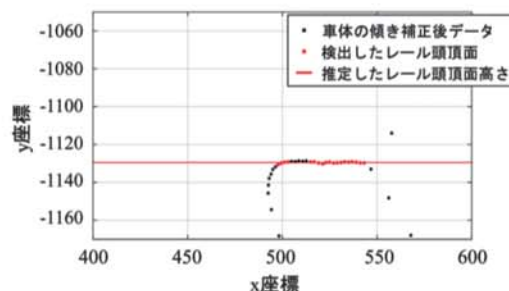
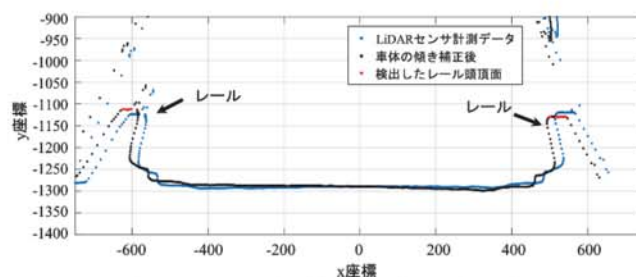
車体床下に設置した LiDAR センサからレールを計測したサンプルデータを図 6 に示す。LiDAR センサが原点となる座標を取り、計測したデータは点群データとして出力され、軌道を輪切りにしたような断面図のように見ることができる。図 6 の左右端に見られる凸形状の部分はレールを表す（図中の矢印部分）。

計測データの処理方法として、まずジャイロセンサで計測した車体の傾斜角度を用いて車体の傾き補正を実施する。図 6 の青点は LiDAR センサの生データ、黒点は車体の傾きを補正したものである。次にレールの高さを検出する方法について述べる。レール高さを推定する方法としてレール頭頂面を検出することとした。車両位置を基準とするレールの座標は車両動揺等で移動するものの、ある一定範囲に限られることから、レールが検出可能な範囲を事前に定め、これをレール検出範囲と呼ぶこととする。今回は x 軸 400～600mm と -600～-400mm、y 軸 -1170～-1050mm をレール検出範囲とした。図 7 は右レールのレール検出範囲である。レール検出範囲内において、車体側 (y 座標 0 側) から y 座標の 1mm 毎にデータ点数を数え、最初に 5 点以上となった y 座標をレール頭頂面の高さとし、これを推定した。図 7 の赤線がデータ処理により推定したレール頭頂面である。推定した左右のレール高さの差を算出することで、水準変位を求める。

5. 実車による計測

5. 1. 計測条件

検討したシステムが実際に水準変位を計測可能かを検証するため、実路線において営業車両を貸し切り、計測試験を実施した。計測は2024年3月に実施した。計測区間は約12kmである。図8に本システム



を台車直上の車体床下に取り付けた状態を示す。図9に計測風景を示す。赤い線がレールを計測している位置であり、車輪近傍であることから、動的な水準変位を計測できることが見て取れる。また、走行速度を把握するため、GNSS(Global Navigation Satellite System)を用いて同時に計測した。



5. 2. 計測結果

今回はキロ程 19500～21000m の 1500m 区間に注目することとし、図 10 に水準変位の計測結果を示す。縦軸に水準変位、横軸にキロ程を取り、黒線が従来の静的軌道検測装置で計測した水準変位、赤線が本システムで計測した水準変位である。なお、キロ程は GNSS 速度の積算により算出した。20000m 付近の大きな台形のような部分は半径 800m の曲線であり、カントが水準変位として計測されている。また 19700m 付近のひげのような波形があるが、この地点には橋梁が存在することがわかっており、これは橋梁の橋桁等を誤検知したものであると考えられる。図 10 より本システムで計測した水準変位と従来の方法により計測した水準変位を比較すると、概ね一致していることが読み取れる。しかし、曲線直後の 20100m 付近のように、計測値が小さくなる箇所も見られる。これは、車体の傾斜角度を計測するジャイロセンサの誤差によるものと考えられる。

次に 20400～21000m 区間において本システムで計測した水準変位と従来の方法により計測した水準変位の関係性を示した散布図を図 11 に示す。区間を限定した理由は、大きなカントが設けられている曲線部を除くためである。縦軸に従来の静的軌道検測装置で計測した水準変位、横軸に本システムで計測した水準変位をとり、線路延長 10m ごとに水準変位の最大値をそれぞれプロットした。図 11 より計測値にばらつきが生じているが、本システムで計測した値が、水準変位の傾向をよく捉えていることが読み取れる。データがばらつく原因については、LiDAR センサが受ける外乱によるレール高さの誤検知等が考えられるが、今回は静的軌道検測装置との比較しか実施できなかったため、静的と動的の差異による影響である可能性も考えられる。

6. まとめ

今回、LiDAR センサ等を活用し営業列車において動的水準変位を計測する手法を検討し、実際の路線で計測を実施した。その結果、従来の軌道検測装置で計測した結果と概ね一致する値を計測できることが確認された。

今後は、動的軌道検測装置（軌道検測車等）との比較や計測値のばらつきを抑えるためのフィルタの検討、ジャイロセンサの検証などを実施する必要がある

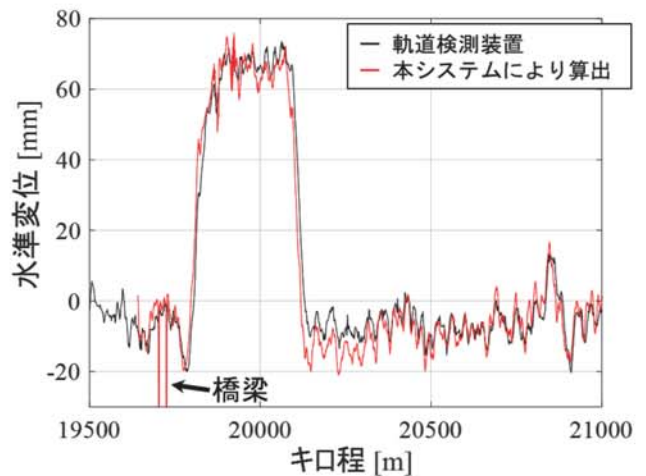


図 10 水準変位計測結果

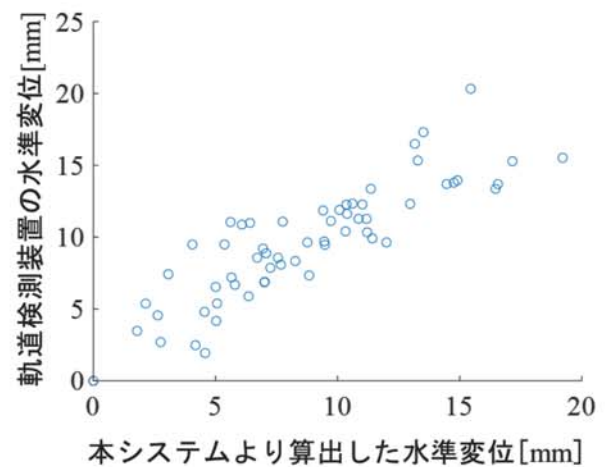


図 11 従来の軌道検測装置と本システムの水準変位計測結果の関係性

と考える。また、水準変位にとどまらず、平面性変位の検討にも着手する予定である。

最後に、計測試験の実施に協力いただいた鉄道事業者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 緒方正剛，一柳洋輔，佐藤安弘，篠田憲幸，“地方鉄道を対象とした列車動揺データに基づく軌道監視手法の検討”，交通安全環境研究所フォーラム 2022，pp.55-56（2022）
- 2) 一柳洋輔，緒方正剛，佐藤安弘，篠田憲幸“地方鉄道における軌間拡大リスクの評価の効率化に関する検討”，交通安全環境研究所フォーラム 2022，pp.25-28（2022）
- 3) https://www.rtri.or.jp/press/rkfto0000000056q-att/20220217_001.pdf