公益財団法人大林財団

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	鉄道軌道の簡易な予防保全に関する研究
研究者名※	藤田 吾郎
所属組織※	芝浦工業大学 工学部電気電子学群電気工学科 教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市交通システム、エネルギー計画
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

（研究報告-様式 2）

大林財団２０２２年度研究助成実施報告書

所属機関名　　芝浦工業大学工学部電気工学科
申請者氏名　　藤田吾郎

研究課題	鉄道軌道の簡易な予防保全に関する研究 Research on Simple Planning Maintenance of Railway Track

（概要）※最大 10 行まで

軌道管理の本質は，軌道変位（設計値からの差）を定量的に把握することである。この計測には軌道試験車を用いる方法と手作業による方法に大別される。前者は高価であり，採用できるのは十分な資金力のある，限られた大手鉄道事業者に限られる。後者は正矢法と呼ばれる方法であり，水糸を張ってレールの相対的な位置関係を計測していく方法である。これには膨大な人手を介するのが弱点であり，例えば 30km の路線の検測のために 3 名･3 か月を要する。

本グループでは，地方鉄道会社での安全性向上を目的として低コストかつ簡便に軌道の異常検知が可能となるシステムの構築を研究している。今回は測定方法に改良を施すとともに，速度別のデータの扱い方を，乗り心地の評価への適用も含めて検討した。

１．研究の目的　　（注）必要なページ数をご使用ください。

本研究の目的は，新しい予防保全策により，鉄道の保線コストを低減することである。

鉄道は社会インフラとして極めて重要な要素である。安全な運転のためには，施設の維持管理が不可欠である。軌道は一般にレールが枕木を介してバラストの上に敷設されている。バラストは振動と騒音を抑制する役割があるが，レールの位置がずれることも許容している。したがって一般の土木構造物とは異なり，強度面と形状の面から定期的な保守を行う必要がある。

ところで鉄道保線の保全技術としては，新幹線や一部の大手鉄道事業車では軌道検測車を用いた定期検測が行われている。しかし，多くの鉄道事業社では手作業による軌道狂いの検測を行っているのが実情である。これはコスト負担が大きいとともに，コスト削減の対象ともなりやすく，十分な検測が行なわれているとはいいがたい。軌道整備不足による脱線事故はローカル線で既に頻繁に発生している。今後の少子高齢化にともなう技術者不足，経済的不安定性を背景に，この傾向が都市部に拡大する可能性がある。

現状課題としては，TBM（時間基準保全)に基づいた保線の実施があげられる。TBM では定期的な保全業務を実施するため，工数が増えるのが欠点である。そこで，加速度測定を用いた簡便な CBM（状態基準保全）を前段に組み入れ，TBM の実施期間を延長することが考えられる。

この課題を解決するため，本研究では予防保全策として，簡易な軌道保全方法を提案する。最終的には運用している列車の加速度をスマートフォンを用いて計測して，信号処理を行う。これによりメンテナンスすべき軌道の洗い出しを行い，優先的に補修を行うことが可能である。本手法は簡易かつ安価に運用できることが特色であり，広く採用されることが期待される。特別なソフトウェアに頼ることなく，Excel を活用して汎用性を持たせる点が独創的であるといえる。

２．研究の経過　　（注）必要なページ数をご使用ください。

本研究は軌道検測車を用いた計測まで広げると数多くの研究報告がある。一方，近年急速に安価に活用可能となった画像処理技術に関しては，以下の[1][2]の研究報告がある。ただし，画像計測を用いているため，観測できるタイミングが限られるのが欠点となる。また[3]は車両の滑走検知への活用例であり，スマートフォンによる加速度計測の応用可能性を示唆している。

本グループでこれまで取り組んだ前報[4]~[6]では，汎用品の三軸加速度センサ(Kionix 製 KXR94-2050）をメインとした回路基板と，加速度データを記録するデータロガー（日置電機株式会社メモリハイロガー8430）からなる測定モジュールを用いて、100 Hz で加速度データを測定した。特徴としては，複数台使用した場合に同期が取れるため，車内の異なる位置での計測が可能であった。しかし，重量があり運搬が難しいことと，電池の持続時間が 2 時間程度であることが課題であった。すなわち，簡易に計測できる環境ではなかったといえる。

本報告ではこれに代わり，スマートフォン向け汎用物理量計測アプリである Phyphox を用いた。3 軸方向の加速度を手軽に計測することができる。これを車内に設置して加速度を計測した。X 軸方向が列車の進行方向，Y 軸方向が左右方向，Z 軸方向が上下方向と定義したが，スマートフォンを進行方向に向かって平らに設置した場合は，X 軸と Y 軸が入れ替わることに注意する必要がある。

今回のサンプリング周期は 2.5ms であるが 1s 平均値を用いた。Z 方向の加速度には重力加速度が含まれ，また X 軸方向，Y 軸方向の加速度にも，わずかな傾きによるオフセット値が含まれる可能性があるため，平均値がゼロとなるように補正している。

速度の算出にあたっては，X 軸方向の加速度をそのまま積分しただけでは誤差が蓄積されてしまう。そこで，補正を施した。具体的には Z 軸方向の振動が生じている場合は走行時とみなし，走行中か停止中かを判別する停止フラグを作る。次にこのフラグが停止となる直前で速度がゼロになっていることが必要上限であることに基づき，X 軸方向の加速度の補正を行う。このとき，加速時の値はそのまま，減速時の速度は係数を乗じて補正する。このような補正を行うことにより，実用的な速度を求めることができる。

なお，当初はこのアルゴリズムをコスト低減の目的で，Excel を用いる予定であったが，複雑になるため，MATLAB を使用することとした。実用化に当たっては，スタンドアローンのアプリケーションとして，フリー配布することが考えられる。

また，このアイデアの妥当性を検証するため，各路線でのデータ収集を行った。合わせて，由利高原鉄道の協力を得て，トラックマスターデータや列車動揺検査との照合や，保線点検手順のヒアリングを行った。

[1] 合田 航・長峯 望・糸井謙介・坪川洋友，大場久良・加藤 爽，「列車前方画像を用いた木まくらぎ検査システム」，令和 3 年電気学会全国大会，No.5-185 (2021 年)

[2] 小田篤史・小野幸彦・今本健二，「地上目標物を用いた画像処理による自己位置推定技術の有効範囲評価」，令和 3 年電気学会全国大会，No.5-187 (2021 年)

[3] 神谷浩武・貝塚勉・飯島仁・沓掛久志・中野公彦，「車上で計測した鉄道車両加速度からの滑走検知」鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (2017)

[4] 佐藤尚輝・藤田吾郎，「列車走行中に生じる三軸加速度データを応用した簡易軌道検測手法」，令和 3 年電気学会全国大会，No.5-186 (2021 年)

[5] 佐藤尚輝・藤田吾郎・唐鎌敏夫,「機械学習を適用した簡易軌道検測手法」, 令和 2 年電気学会全国大会, No.5-194 (2020 年)
[6] 佐藤尚輝・藤田吾郎,「磁気センサを用いたレール破断検知方法の提案」, 平成 31 年電気学会全国大会, No.5-213 (2019 年)

３．研究の成果　　（注）必要なページ数をご使用ください。

①計測結果の例

図 1 は東京都内路線の 8 区間，約 17min の測定結果である。駅間距離が短いため，加速後にすぐ減速することが大半となるが，480s 付近で惰行状態があることと，510s 付近では再加速があることが確認できる。また，Y 軸方向では，800s 前後および 900s 前後にそれぞれ 10s 以上の準定常偏移が見られるが，これは線形がカーブしているためである。

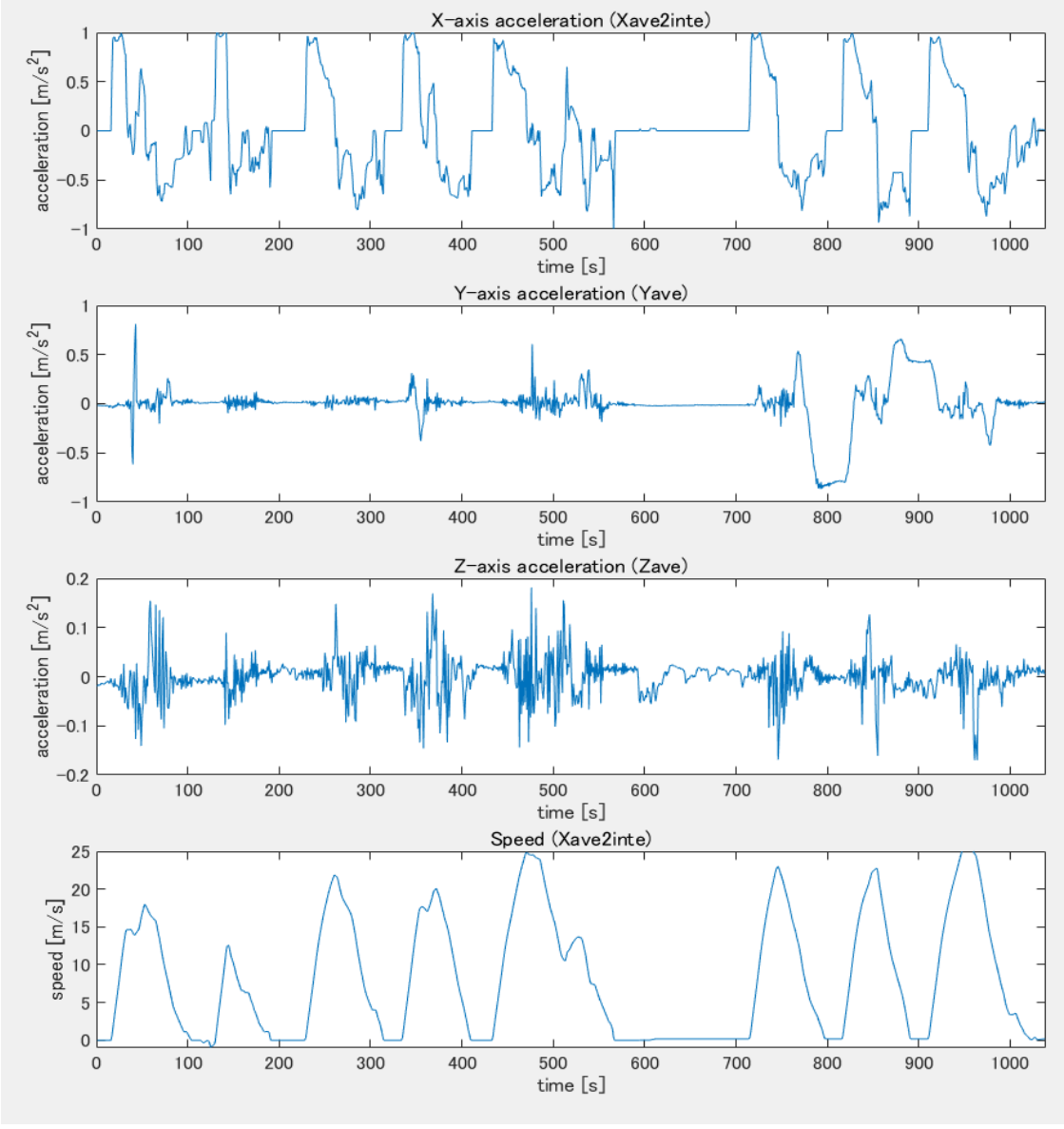

図 1　各軸の加速度と補正後の速度

②速度と各軸の加速度の相関

図 1 は時間軸での変動を示しているが，速度の違いによる挙動を検討するため，図 2 に速度と各軸の加速度の相関を示した。

X 軸（○印）は，加減速時と惰行時の 2 つに大別される。上側の包括線が加速度，下側の包括線が減速度である。15m/s 以上の領域では惰行時に緩やかに減速しているデータが見られる。起動停止時の加速度変動は，電動車と付随車が連結している場合が顕著にみられる。

Y 軸（△印）では，前述したカーブによる影響が示されている。約 0.5m/s^2 = 約 3° に車体が傾いている。カーブでは速度による生じる遠心力とカントの関係で Y 軸加速度の長周期成分が決まる。したがって短周期成分だけを取り出せば，軌道状態や乗り心地の評価に使用可能である。

Z 軸（□印）では，高速域における±1m/s^2 を超える値が見られる。これはまさに乗り心地の悪さを示しており，このデータを分析することにより，軌道状態の推定に用いることができると考えられる。逆に言えば，低速域における Z 軸方向の振動は生じにくいため，そのままでの活用は難しく，X 軸や Y 軸加速度との相関を取るなどの工夫が必要であるといえる。

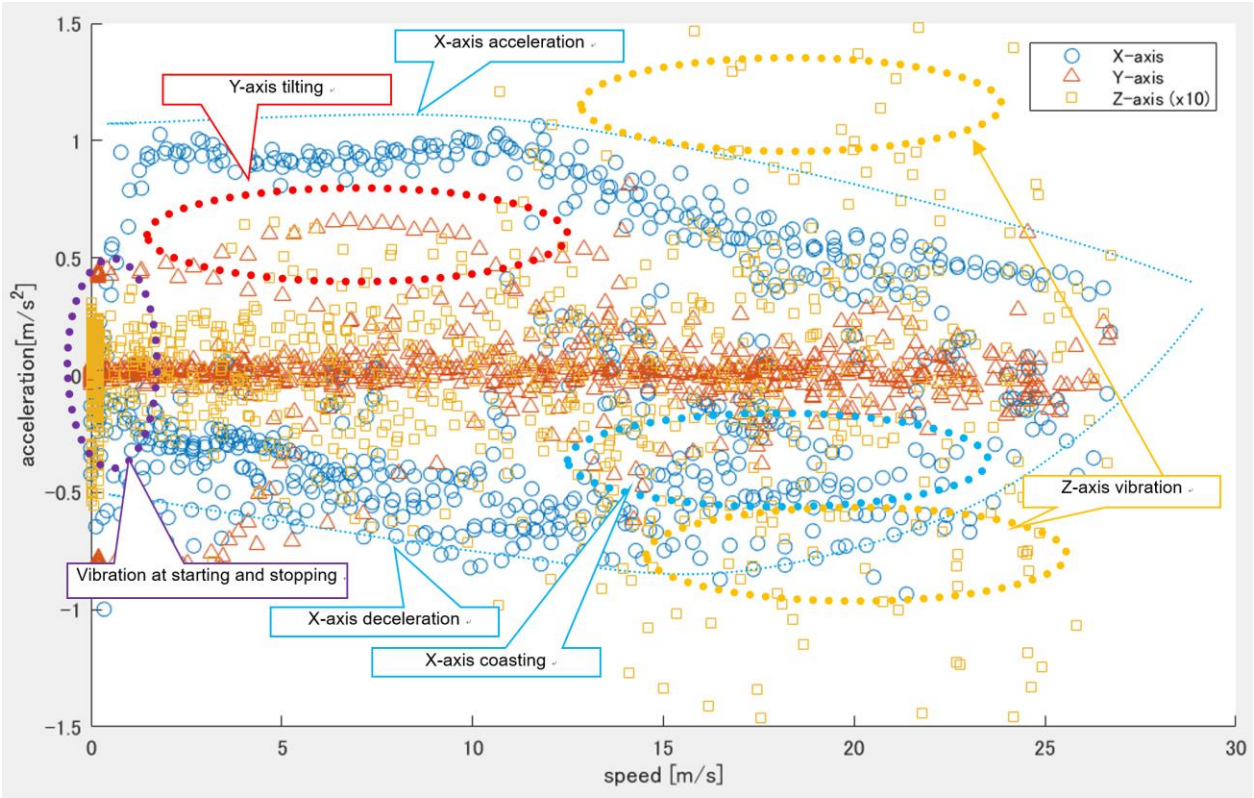

図 2　速度と各軸の加速度の相関

③ウェーブレット解析の活用

振動には固有の周期成分が含まれる。フーリエ解析を用いると，周期波形の場合は，周波数ごとの振動の大きさを取り出すことができるが，非周期波形の場合は不可能である。ウェーブレット解析を用いると，時間ごとの周波数ごとの周期成分の大きさを解析可能である。そこで，本研究への適用を試みた。図 3 は解析例となる。変動が定常的に継続する 0.01Hz の帯域(オレンジ色で囲んだ部分)では変動成分が抽出可能であるが，0.5Hz の帯域(黄色で囲んだ部分)では，そもそも対象とする時間が短いことから，抽出が難しく，対象時間を絞ることが考えられる。

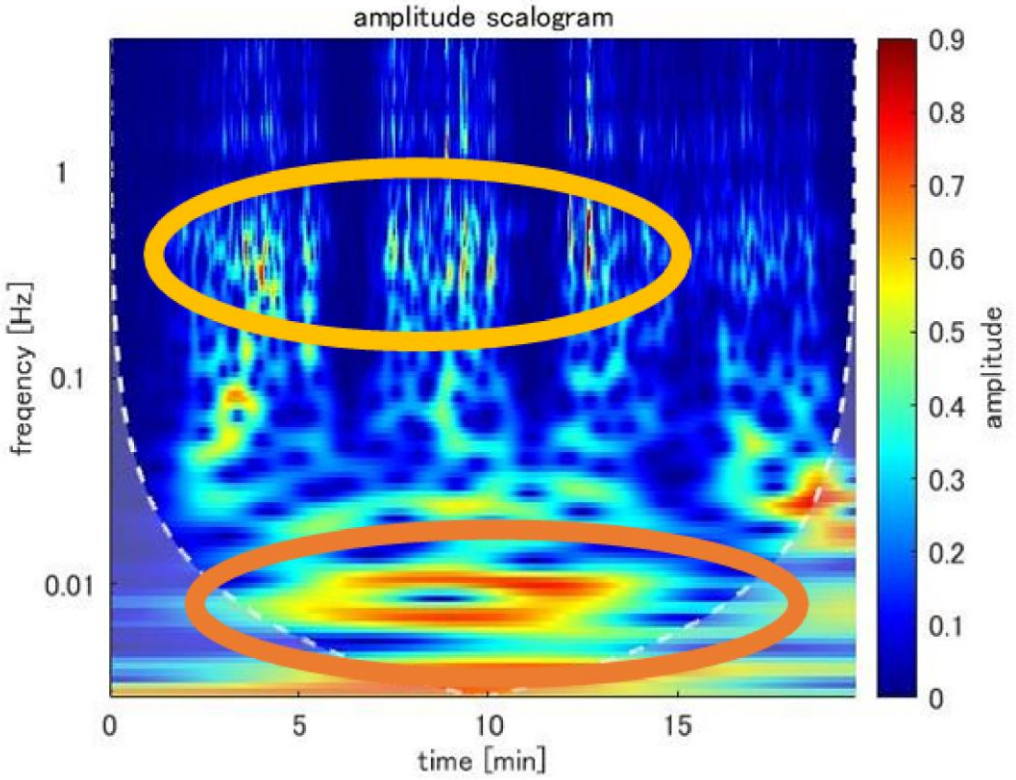

図 3　Z 軸方向加速度のウェーブレット解析結果の例

④まとめ

本研究では，スマートフォンのアプリ上で計測可能な加速度データから，振動の分析を行なった。速度に各軸の成分を比較することにより，乗り心地と軌道状態の推定に活用できる可能性があることを示唆した。またウェーブレット解析により，時間ごとの振動成分解析が可能であることが確認された。

研究成果は以下となる。また，電気設備学会誌への論文投稿を検討中である。

[1] 阿部寛史，立野裕一，藤田吾郎「汎用センサにより得られる列車振動を利用した鉄道軌道の予兆診断の検討」令和 4 年電気学会全国大会，No.5-182（2023）

[2] Hirofumi Abe, Goro Fujita, “Study of Predictive Diagnosis of Railway Tracks from Railway Vibrations Using General Purpose Sensors”, The 18thSEATUC Symposium, Track No.IS-2, Paper No.73 (2024)

４．今後の課題　　（注）必要なページ数をご使用ください。

(1) 同一条件で複数回測定した場合の再現性の確認
(2) 単線区間での往時・復時での再現性の有無
(3) 車両仕様，特に台車の違いによる等価性の有無
(4) 高速領域における周波数分析による固有振動の抽出
(5) 低速領域における周波数分析による固有振動の抽出
(6) 各軸測定値の相関性の確認
(7) 車内の測定位置による誤差の確認

などが今後の課題と考えられる。