

加速度と車内音の相互補正による列車位置同定手法の提案

東京大学 学生会員 ○佐野 聡

東京大学 正会員 蘇 迪

東京大学 正会員 長山 智則

東京大学 正会員 水谷 司

鉄道総合技術研究所 正会員 田中 博文

1. 背景と目的

近年, 中小の鉄道事業者向けに, 軌道管理のための営業列車を用いたモニタリングシステムの開発が盛んである^{1),2)}. これは, 営業列車に加速度計やマイクを設置し, 測定した加速度や音データを解析することで, 軌道狂いや波状摩耗などの変状を検出し, 変状の位置や程度を特定するものである. その際, 列車位置情報が必要となるが, これは GPS によって取得されることが多い. しかし, 衛星からの電波が届かない山間部, トンネル, 地下区間では GPS の適用は不可能である. 本研究では, これら区間でも適用できるように, GPS に頼らない列車位置同定手法を提案する.

2. 手法の概要

図1に本手法の概要を示す. 理論上, 進行方向加速度を二回積分することで列車位置を求めることができる. しかし, 計測誤差や線路勾配により, この積分結果は誤差を有する. そこで, 左右加速度と鉛直加速度から車両の揺れを指標化し, それを閾値処理して発車時刻と停車時刻を推定することで, 走行区間の両端における速度を0にし, 積分誤差を減少させる(推定速度1の導出). また, 列車がレール継目部を通過する際にはレール継目音が発生するが, 図2のように, この時間差と車軸間距離を用いて速度を推定できる(推定速度2の導出). 音から導かれる推定速度2によって, 加速度積分に相当する推定速度1を補正することにより, 誤差をさらに減少させることができる(推定速度3の導出). 最後に推定速度3を積分することで列車位置を求める. 本手法の実現可能性を検討するため, 鉄道総合技術研究所の構内試験線において計測実験を行った. 計測実験では運転席に一番近い台車直上に iPod touch を設置し, 3方向加速度および車内音を計測した. また, 精度検証のため, 同時に GPS によって速度データを取得した.

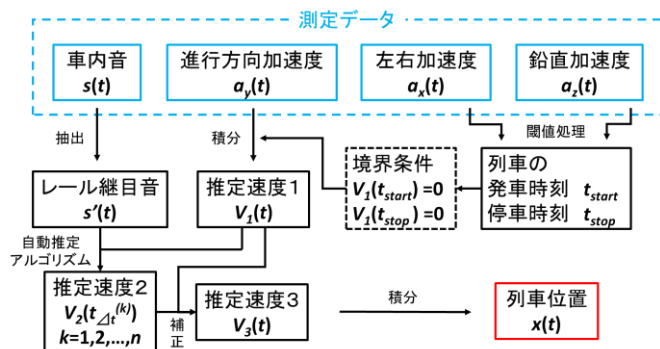


図1 手法の概要

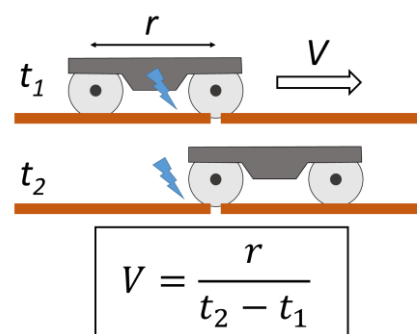


図2 レール継目音による速度推定

3. 速度推定解析

測定された車内音データには, レール継目音のほかにモーター音や転動音も含まれているため, これらを除去し, レール継目音を可能な限り抽出する必要がある. ここでは, 多重解像度解析による手法およびスプース表現による手法³⁾を採用する. 多重解像度解析による手法では, デルタ関数状で広帯域特性をもつレール継目音に対し, 周波数レベルごとに閾値処理を行う. これを再構成することにより, 明確な信号を得る. 一方, スプース表現による方法では, レール継目音の発生回数の有限性に着目し, 時間領域で局在的な離散ウェーブレ

キーワード: モニタリングシステム, 列車位置同定, 車内音, 加速度, レール継目, 信号処理

連絡先: 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

ット基底と非局在的な離散コサイン基底から成る過完備な辞書行列から少数個の基底を選択することで、オリジナル信号を近似する。その際、ウェーブレット基底のみを選択すれば、オリジナル信号中の突発的変化が抽出される。図3に、車内音データの一部に対して、多重解像度解析（閾値は試行錯誤的に設定,MRA）およびスパース表現（2種類のパラメータを設定、スパース性を重視したSR2と再現性を重視したSR4）によりレール継目音の抽出を試みた結果を示す。同図から、雑音除去によりレール継目音が明確になっているのがわかる。

次に、抽出されたレール継目音データから自動的に速度推定を行うアルゴリズムを作成した。このアルゴリズムでは、誤推定を減らすため、速度推定に用いる2つのレール継目音に対して、両者の時間差が推定速度1(図4中青線)の $\pm 25\%$ に相当する時間差の範囲内、かつ、ピーク絶対値がともに前後5秒間におけるピーク絶対値の最大値の20%以上、という条件を課している。このようにして導出される推定速度2(図4中の緑×)は不連続データであるため、最後に、推定速度2によって連続データである推定速度1を補正する。推定速度1の V_1 に対して、式(1)と(2)を利用し補正する。この補正速度と推定速度2の残差の二乗和が最小となるよう補正パラメータを定めることにより、最適補正速度として推定速度3(図4中赤線)を得る。

$$V(t|V_1(t)|\beta_1,\beta_2,\beta_3)=\int_0^t\{(\beta_1t+\beta_2)\dot{V}_1(t)+\beta_3t-\gamma\}dt \quad (1)$$

$$\gamma=\frac{1}{t_{stop}-t_{start}}\int_0^{t_{stop}-t_{start}}\{(\beta_1t+\beta_2)\dot{V}_1(t)+\beta_3t\}dt \quad (2)$$

表1 各抽出手法の位置同定誤差

	MRA	SR2	SR4
最小値	1.55%	0.64%	0.62%
最大値	14.02%	13.15%	10.55%
平均値	6.62%	5.85%	5.79%
中央値	6.96%	6.19%	6.23%

4. 位置同定の結果

GPS速度データを真値とみなし、推定速度3の積分結果のGPS速度積分結果に対する誤差率の時間平均(平均誤差率)を位置同定精度の指標とする。表1に、各抽出手法の平均誤差率について、計測した全20ケース(走行距離は凡そ620m)の要約統計量を示す。図5に、平均値が最も小さいSR4の場合について、推定速度1と推定速度3の積分結果に対し、それぞれ走行速度別に平均誤差率の箱髭図(全20ケース)を示す。同図より、加速度と車内音のデータを相互補正することにより、加速度のみ用いた場合に比べて位置同定誤差が減少することがわかる。位置同定誤差は、1~10%程度で平均すると約5%である。

5. まとめ

GPSに頼らず加速度と車内音データのみを用いて列車位置を同定する手法を構築した。本手法は、駅間距離を未知と仮定したときの解析手法であるが、駅間距離が既知である場合、駅間距離によって補正することで精度向上が期待される。また、本手法の位置同定誤差は $5\pm 5\%$ 程度であり、全区間でGPSが使えない地下鉄に適用するには現状では精度不足と言えるが、一部トンネルを含む路線ではGPSと併用することで十分適用可能であると考えられる。

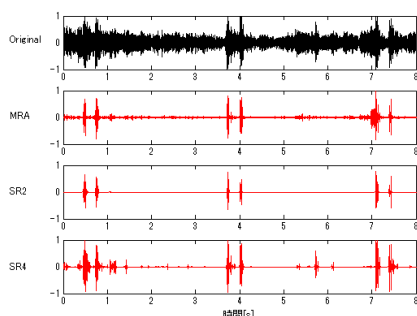


図3 車内音と抽出結果

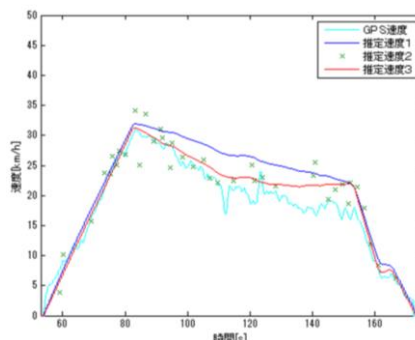


図4 加速度と車内音の相互補正

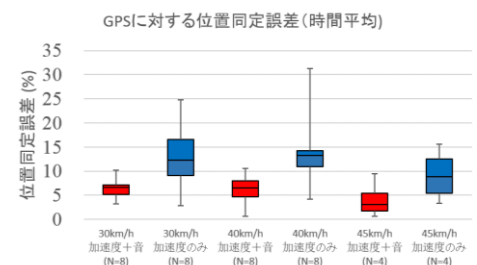


図5 位置同定誤差(SR4)

参考文献

- 1) 石井ら：営業車両の走行時の車両振動を用いた軌道モニタリングシステム(TIMs)の開発，土木学会論文集F, 64(1), 44-61, 2008.
- 2) 猿木ら：可搬型レール波状摩耗モニタリング装置の開発，土木学会第66回年次学術講演会，2011.
- 3) 酒井ら：スパース表現による異常肺音の抽出，電子情報通信学会技術研究報告，EA，応用音響，111(28) 131-136, 2011.