

自転車の振動応答と傾斜角測定に基づく路面プロファイル推定

東京大学 学生会員 ○山口 貴浩
 東京大学 正会員 長山 智則
 東京大学 正会員 蘇 迪

1. はじめに

近年、我が国における自転車交通の重要性が急速に高まっている。一方、膨大な自転車走行空間に対して、舗装路面の評価は並行する車道の巡回車による目視点検に委ねられていることがほとんどで、既往の舗装路面評価技術は適用できないか、定性的あるいは非効率的である。そこで著者らは、自転車とスマートフォンを用いた簡易な計測システムを構築し、バンドパスフィルタを用いて加速度・角速度応答から路面の縦断形状（プロファイル）を推定するアルゴリズムを提案したが、この手法では低周波成分およびカットオフ周波数付近での推定精度が低下するという問題があった¹⁾。そこで本研究では、傾斜角を含むセンサ情報をカルマンフィルタにより融合することで、広帯域・高精度に路面プロファイルを推定するアルゴリズムを提案する²⁾。

2. 計測システムの概要及び振動特性

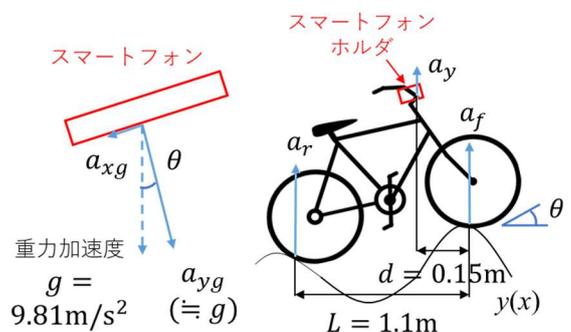
本研究で構築した計測システムは、図1に示す通り、一般的な自転車、スマートフォン、サイクルメータからなる。スマートフォンはスマートフォンホルダを介してハンドルに固定されており、ハンドル位置での3軸加速度、角速度を計測アプリ iDRIMS measurement により記録する³⁾。前輪タイヤの固有振動数が15Hz付近、スマートフォンホルダの固有振動数が40Hz付近であり、それぞれ10km/h定速走行を仮定して空間周波数で5(1/m)、14(1/m)付近であるため、自転車系の固有振動数が比較的高いことが分かる。そこで本研究では、自転車系を剛体系とみなして路面推定できる2(1/m)以下の帯域を推定の対象とする。



図1 構築した計測システム

3. カルマンフィルタによる推定アルゴリズム

提案するアルゴリズムは、鉛直加速度、角速度、傾斜角の3つのセンサ情報を用いて、カルマンフィルタによりセンサフュージョンを行うものであり、それぞれのセンサは、高周波帯域、低周波帯域、準静的成分において比較的精度が高いという特徴を持つ。具体的には、(1)ピッチング角速度 ω 及び走行方向計測軸の重力加速度成分 a_{xg} による自転車姿勢角 θ の推定(図2(a)) (2)ホルダ位置加速度 a_y の前輪位置加速度 a_f への変換(図2(b)) (3) θ の走行距離 x 方向の1回積分及び a_f の2回積分による路面プロファイル y の推定(4) θ と y のカルマンフィルタによる融合からなる²⁾。システム雑音は a_f 、 ω 及び a_{xg} による姿勢角 θ_g に付加されているとし、各 θ と y の真値からの誤差 e を状態量としてカルマンフィルタの状態方程式を構成した。観測量は e の差であり、各 y から e を減じることで高精度な y を得ることができる。



(a) 重力加速度成分 (b) 自転車の剛体モデル
図2 自転車の剛体モデル及び重力加速度成分

観測量は e の差であり、各 y から e を減じることで高精度な y を得ることができる。

4. 小金井公園における検証

小金井公園サイクリングコースは約400mの周回コースで、コース沿いの木の根が路面下に入ったことにより発生したと考えられる、路面の盛り上がりによるひび割れを確認できた(図3)。バンドパスフィルタによるキーワード 路面プロファイル、自転車、舗装の路面評価、カルマンフィルタ、スマートフォン

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橋梁研究室 TEL 03-5841-6099

る既往の方法(A), 提案する方法(B)について, 手押し式路面プロファイラ (DAM) の測定結果を併せて示す (図4, 図5). 図4から, 方法(A)では, 路面プロファイラの測定結果に対する高周波成分 0.5-1(1/m)及び準静的成分 0.05(1/m)以下の推定誤差が大きいことが分かる. 一方, 図5から, 方法(B)では 0.02(1/m)から 2(1/m)までの幅広い帯域で高精度な推定が可能である. 3cm 以上の路面プロファイラ計測値と推定路面プロファイルの相関の寄与率は, 方法(A)ではゼロに近く, 方法(B)では約 0.81 と高い相関があった. 表1に International Roughness Index (IRI) の路面プロファイラ測定値と測定値に対する誤差を示すが, 方法(A)では誤差が最大で約 33%であるのに対して, 方法(B)では約 14%であり, 本研究で提案するアルゴリズムは IRI についても高精度に推定可能であることが分かる. なお, プロファイルの 185m, 225m 付近の2つのピークは, 図3に示した路面の短波長の変状に対応しており, 路面プロファイルからこのような短波長の変状をピークとして検出できることを示している.

5. まとめ

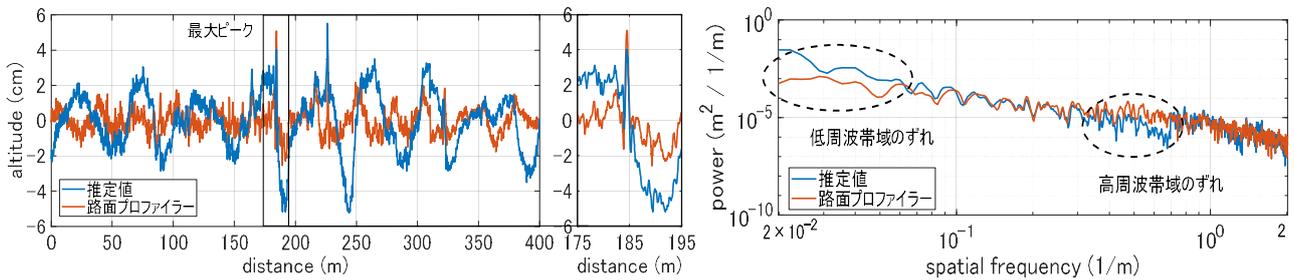
本研究で提案するアルゴリズムは, 路面プロファイルの相関の寄与率は約 0.81, IRI の最大誤差が約 14%であり, 既往の路面プロファイル推定手法と比較して, 0.02(1/m)から 2(1/m)までの幅広い帯域で路面プロファイルを高精度に推定可能であり, IRI の算出や短波長の変状の検出など幅広い用途に適用可能であることが分かった.



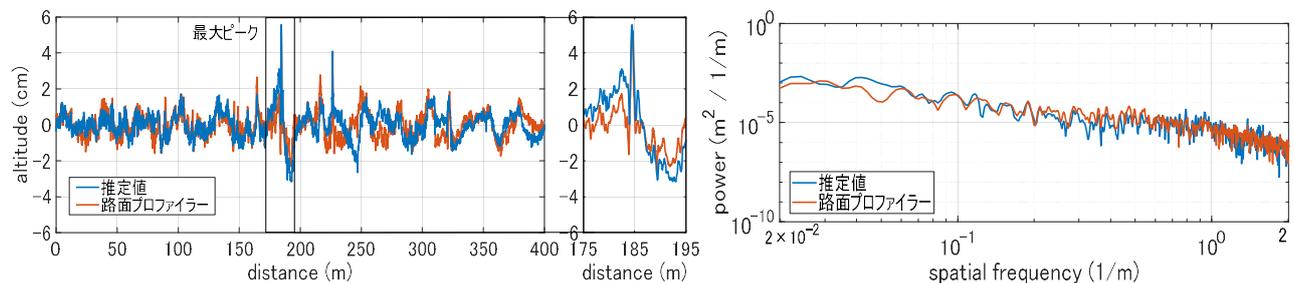
(a) 185m 付近 (b) 225m 付近
図3 小金井公園サイクリングコース内のひび割れ

表1 小金井公園サイクリングコースの IRI 誤差

区間(m)	IRI(mm/m)	方法(A) (%)	方法(B) (%)
0 - 100	7.1	-27.6	-2.3
100 - 200	9.3	-33.2	-10.2
200 - 300	11.5	-31.1	-14.3
300 - 400	5.5	-12.5	-9.2



(a) 推定路面プロファイル (最大ピーク付近拡大図も併せて示す) (b) 路面プロファイルのパワースペクトル
図4 バンドパスフィルタを用いた既往の方法(A)により推定された路面プロファイル



(a) 推定路面プロファイル (最大ピーク付近拡大図も併せて示す) (b) 路面プロファイルのパワースペクトル
図5 カルマンフィルタを用いた提案する方法(B)により推定された路面プロファイル

参考文献

- 1) 山口貴浩, 長山智則, 蘇迪: 自転車道を対象とした走行時の振動応答による舗装路面の簡易な状態評価, 第70回土木学会年次学術講演会, 2015. 9.
- 2) 山口貴浩, 長山智則, 蘇迪: カルマンフィルタを用いた自転車走行時の振動応答による簡易かつ高精度な舗装の路面プロファイル推定, 土木学会論文集 E1, Vol.75, No.1, pp.17-26, 2019.
- 3) 長山智則: iDRIMS Resampler, <http://www.bridge.t.u-tokyo.ac.jp/nagayama/iDRIMSResampler.pdf>