

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289141

研究課題名(和文) 携帯情報端末による車両角速度応答計測と動画撮影を利用した簡易路面性状評価の高度化

研究課題名(英文) Improvement of road condition evaluation taking advantage of angular velocity vehicle response measurement and movie records

研究代表者

長山 智則 (Nagayama, Tomonori)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80451798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：車両動揺の分析により路面プロファイルを推定する取り組みが多く報告されている。しかし、その多くは一輪の簡易なクォーターカーで車両をモデル化しており、また、加速度応答のみを利用している。車両動揺においてピッチング運動はしばしば支配的であり、これを考慮できるハーフカーモデルや角速度計測が重要である。本研究では車両をハーフカーでモデル化し、車両パラメータを同定する仕組みと、路面プロファイルを準リアルタイムに推定するアルゴリズムを開発し、実車両を用いてその推定性能を確認した。さらに、プロファイルから推定されるIRIと、画像確認できる変状を対応付けられるよう、ドライブレコーダと連動するシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：There are research attempts on road profile estimation based on vehicle responses in order to achieve efficient and effective road condition evaluation. However, most approaches use simple Quarter-Car models and employ only acceleration measurement. Half-Car model and angular velocity measurement are important to deal with real vehicle motion, which is often affected by the pitching motion. This research models vehicles by a Half-Car model and a parameter identification method is developed. The profile is estimated with the model in pseudo-real-time. In addition, the estimated profile is converted to IRI and the result can be synchronized with drive-recorder movie files for image-based road evaluation.

研究分野：振動工学，橋梁工学，モニタリング

キーワード：路面評価 IRI スマートフォン プロファイル カルマンフィルタ

1. 研究開始当初の背景

1.1 簡易で堅牢な路面性状把握システムの必要性

我が国では 9000km 余りの高速自動車道を築きあげてきており、その効率的な補修・管理が必要である。開発途上国においても急速に道路インフラが整備されつつあるが、施工品質のバラつきや不十分な設計・維持管理により、劣悪な状態の路面も少なくない。膨大な道路インフラの路面性状やその変化を把握して、計画的に管理することが求められる。

研究代表者は、一般車両の加速度応答を、MEMS 加速度計と GPS、小型 PC を組み合わせた簡易システムで計測し、乗り心地 (国際ラフネス指数 IRI) を定量的に評価するシステム (Dynamic Response Intelligent Monitoring System; DRIMS) を開発してきた。車両動特性の違いを補正して加速度応答から IRI を推定し、GPS 記録から地図上にマッピングするものである。国内外に展開が図られており、ケニア共和国では 2013 年に本技術を採用することで初めて全国道路線の IRI 調査が実施された。道路管理を戦略的に進めるための基礎データとなるものである。

しかし、道路管理者らへのインタビューを通じて課題も明らかになってきた。センサ設置場所が細かく規定される上、計測機器は堅牢性に欠ける。さらに、状態の悪い路面での推定精度が低い。調査走行中に高 IRI 区間を目視確認するため、リアルタイムで IRI を把握するニーズがあることも明らかになった。ケニア共和国において継続した調査により経年変化を把握することが、維持管理上重要であるが、上述の問題が課題となり今後の路面調査は不確定である。

1.2. 普及する汎用計測機器の利用

スマートフォン上で MEMS 型計測機器が利用できるようになっている。専用の計測機器に代わり、普及度の高いこれらの汎用機器を利用できれば、システムの堅牢性・入手性が向上する。しかし、操作部とセンサ部の一体化したスマートフォンは、設置場所によっては著しく利便性が低下する。そこでセンサ設置場所に依存しない手法として、車両「角速度」応答ベースの IRI 推定を提案してきた。実利用にむけて、簡易車両キャリブレーション手法の開発が期待されている。

1.3. ひび割れ率や画像記録を踏まえた総合的判断への期待

IRI は世界銀行が提唱し、海外では舗装維持管理の管理指標として利用されているケースも多い一方で、国内高速道路のように、ひび割れ、わだち掘れなども含めて総合的に評価する道路管理者もある。IRI のみでは舗装状態の判断が難しいことも少なくない。路面の劣化過程はバラつきが大きく、その解明にあたり、ひび割れ、わだち掘れなどによる要因分けが重要となる。IRI に加えて、ひび割れ率や、舗装路面の画像記録を踏まえた判

断ができることが望ましい。研究代表者らはこれまで路面の撮影画像から橋梁ジョイント部の検出を行っているが、同様の画像解析によりひび割れ率の推定が期待される。

2. 研究の目的

2.1. 「角速度」ベースの車両キャリブレーション手法の開発

これまで「加速度」ベースの車両キャリブレーション手法を開発してきた。規定の形状をしたハンプを乗り越える際の車両応答加速度を再現する一輪モデル (クォーターカーモデル; QC) を同定することで、計測車両毎の振動特性の違いを補正するものである。本手法をハーフカーモデル (前後 2 軸から成る) の角速度応答に拡張することで、角速度応答を再現する車両モデルを同定し、計測車両の違いを補正する方法を提案する。

2.2. リアルタイム乗り心地評価手法の開発・推定精度の向上

IRI 推定手法は周波数領域の解析法であり、計測結果をリアルタイム表示できない。走行試験後に高 IRI 区間を特定しても、該当区間走行時の様子を計測者が回想し IRI 推定の妥当性を判断したり、IRI の高い要因を想起したりする必要があった。リアルタイム IRI 表示ができれば、計測中に高 IRI 区間の路面を視認できる。IRI 推定の妥当性判断、要補修区間の抽出が確実に行える。カルマンフィルタを利用した時間領域解析法に改良することでリアルタイム IRI 評価を実現する。

2.3. 同期計測カメラを利用した状況把握・ひび割れ率概算

加速度・角速度と同期して路面の動画を撮影する (1)、2) により求められる高 IRI 区間の画像を抽出するとともに、動画から切り出した静止画を利用してひび割れを評価する。

3. 研究の方法

簡易路面性状評価システム DRIMS をもとに、角速度応答を利用して高精度でリアルタイムに IRI 評価できるように拡張する。まず、一輪モデル (QC) を利用した加速度ベース車両キャリブレーションをハーフカーモデルに拡張し、角速度応答を再現する。次に IRI 推定アルゴリズムの改良により推定精度の向上とリアルタイム推定を実現する。さらに加速度・角速度・GPS 記録をするスマートフォンアプリと、動画記録をするドライブレコーダーを連動させることで IRI 値の高い箇所・低い箇所と、動画による路面評価を連動してできるシステムを構築する。

4. 研究成果

4.1. ハーフカーを利用した車両モデル化とパラメータ同定

従来は 1 輪のクォーターカーモデルを用いて車両をモデル化していたが、これを前後 2 輪を持つハーフカーモデル (図 1) に拡張した。ピッチング応答成分の大きさはホイールベース長、走行速度に依存するが、ハーフカ

ーによりこれらを表現できる。しかし、クォータカーモデルと比べて自由度及びパラメータ数が多いため、パラメータ同定が難しくなる。

本研究では、当初、時間領域の最適化手法、パラメータ同定手法である Uncented Kalman Filter を利用して車両同定を試みた。形状が既知のハンプを乗り越える際の車両応答を計測し、これを再現することのできる車両パラメータを同定しようとするものである。シミュレーションでは車両パラメータの推定に成功したものの、車両応答と走行路面形状の同期を高精度に実現することが難しい実車両への適用においては、車両モデル構築が困難であった。そこで、パラメータ同定のロバスト性の向上を目指して、周波数領域での応答を、遺伝的アルゴリズムにより最適化する手法を採用した。

これにより、車両パラメータをロバストに推定することに成功した。推定したモデルにより、計測された車両応答を精度よく再現できている。図2および図3に加速度、角速度の計測値および、モデルによる応答再現値を示す。車両応答を再現できる車両モデルを推定できた。

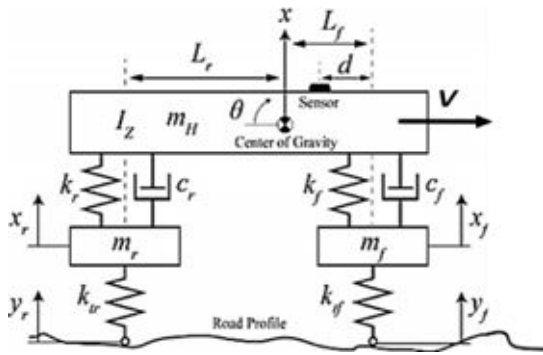


図1：ハーフカーモデル

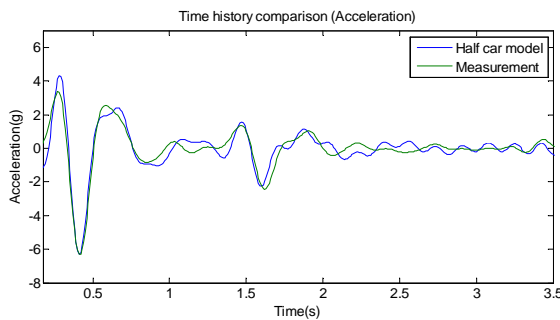


図2：ハンプ乗り越え時の加速度応答

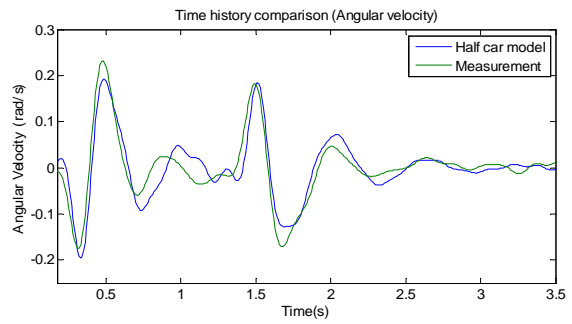


図3：ハンプ乗り越え時の角速度応答

4.2. 加速度と角速度計測を組み合わせた準リアルタイムプロファイル推定アルゴリズムの開発

車両ボディの加速度・角速度応答を観測し、カルマンフィルタの観測量としてこれらを設定して路面プロファイルを算出した。図4にシミュレーションによるプロファイル推定値を真値と共に示すが、車両応答からプロファイルを正確に推定できる。プロファイルを基に、定義通りの IRI を算出すると図5のように真値に近い IRI 値を算出できる。時間領域でのプロファイル算出法であるため、得られたデータから順に解析することで、準リアルタイムのプロファイル推定・IRI 推定が可能となる仕組みである。

しかし、観測ノイズを考慮したシミュレーションを行なうと、図6のように IRI 推定値は走行速度に依存する。また、車両パラメータ同定誤差を考慮すると、IRI 推定の誤差が極めて大きくなることも明らかになった。実験データに適用した場合、プロファイル推定、IRI 推定はほぼ不可能である。

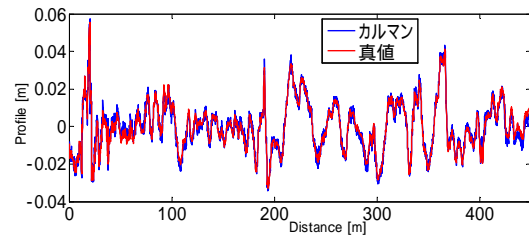


図4：プロファイル推定（ノイズなし）

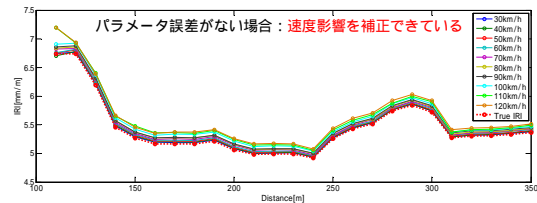


図5：IRI 推定（ノイズなし）

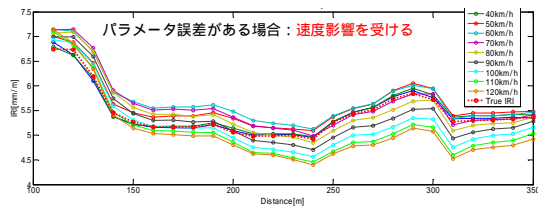


図 6 : IRI 推定 (ノイズあり)

そこで、カルマンフィルタの定式化においてシステムの可観測性を確認し、これを満たすように観測量を変更した。つまり、直接的計測物理量である加速度、角速度にくわえて、これらを積分した変位、角度を擬似的な観測量とすることで、可観測なシステムとした。これにより、観測ノイズおよびモデル化誤差が存在する場合においてもロバストにプロフィール推定が可能となった。

さらに、カルマンフィルタは一般的には過去および現在の観測量に基づいて現在の状態変数を推定するものであるが、現在以降の車両応答にも現在のプロフィールの影響が反映されていると考えられる。これを利用することで更なる高精度化、ロバスト化が可能と考えられた。そこで、「平滑化」のアルゴリズムを組み合わせることで、観測ノイズおよび車両モデル化誤差が存在する状況においてもプロフィールを高精度に推定することが可能となった。車両モデル化誤差および観測ノイズの双方を考慮したシミュレーションを行なうと、平滑化を考慮しない場合特に高周波数成分の誤差が大きい(図7)。一方で平滑化を考慮する場合、高周波数成分の誤差も小さく、真値に近いプロフィールを推定できている(図8)。推定されたプロフィールのスペクトル(図9)をみると、平滑化により高周波数領域に於ける推定精度が向上していることが確認できる。

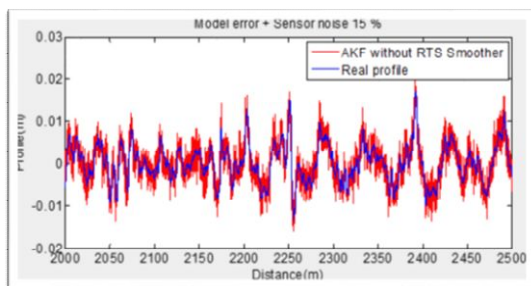


図 7 : カルマンフィルタによるプロフィール推定 (平滑化なし)

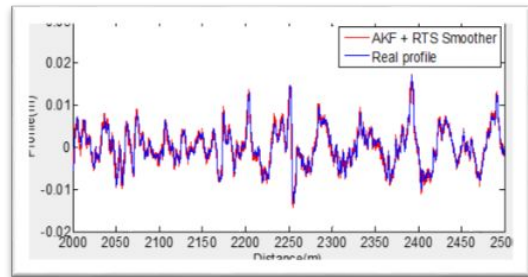


図 8 : カルマンフィルタによるプロフィール推定 (平滑化あり)

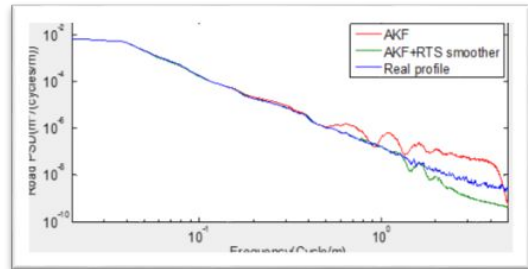


図 9 : カルマンフィルタによるプロフィール推定 (スペクトル)

4.3. スマートフォンによる IRI 評価と連動した動画計測システムの開発

スマートフォンにより取得した IRI 推定値とドライブレコーダにより取得した動画を連動して表示することで、IRI 値が大きい場合に対応する路面変状を画像を通じて評価できる仕組みを構築した。

ドライブレコーダとスマートフォンによる計測は必ずしも同期して実施されるわけではないため、両データに含まれる GPS の緯度経度情報をもとに、両データを紐付けし、連動して表示する仕組みとした。



5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Zhao, B.Y., Nagayama, T. (2017) “IRI estimation by the frequency domain analysis of vehicle dynamic responses.”

Procedia Engineering, 188, pp9-16 , 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

Zhao, B., Nagayama, T., Makihata, N., Toyoda, M., Takahashi, M., Ieiri, M.(2016): “ IRI estimation by the frequency domain analysis of vehicle dynamic responses and its large-scale application.” The 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services;11/28/2016, DOI:10.1145/3004010.3004013,

International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan
Makihata, N., Zhao, B.Y., Toyoda, M., Takahashi, M., Ieiri, M., Nagayama, T. (2016), “Large-scale road surface evaluation using dynamic responses of commercial vehicles”, Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, 6/29/2016,英国ケンブリッジ.

Zhao B.Y. Nagayama, T., VEHICLE MODEL CALIBRATION IN FREQUENCY DOMAIN USING MULTIPLE OBSERVABLES AND ITS APPLICATION TO IRI ESTIMATION, 第 71 回土木学会年次学術講演会概要集,2016 年 9 月 8 日,宮城県仙台市東北大学

趙博宇,高田修太,長山智則:複数観測量に基づく車両応答型路面プロファイル推定手法の開発,第 70 回土木学会年次学術講演会概要集,CS2-047,2015/9/16,岡山県岡山市岡山大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称:路面プロファイル推定装置,路面プロファイル推定システム,路面プロファイル推定方法及び路面プロファイル推定プログラム

発明者:長山智則,趙博宇,王浩祺

権利者:同上

種類:特許

番号:特願 2017 - 088700

出願年月日:2017 年 4 月 27 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等 vims.sakura.ne.jp

6. 研究組織

(1)研究代表者

長山 智則 (NAGAYAMA TOMONORI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号:80451798

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号:

(4)研究協力者

()