

審査の結果の要旨

氏名 王浩祺

橋梁上を走行する過積載車は舗装劣化や橋梁部材の疲労を加速する要因となる上、設計上の問題や劣化を有する橋梁では過積載車の走行が局所的な部材損傷や落橋事故を引き起こす恐れもある。このため、走行車両の総重量、軸重、軸数、動的荷重、走行車線といった、活荷重の実態を把握することは重要である。

活荷重に対する橋梁応答を計測することで走行車両重量を逆推定するシステム (Bridge Weigh-In-Motion; BWIM) がこれまで研究・開発されてきた。主桁や補剛材、あるいは床版などの部材に発生する歪を計測し、これと整合的な車両重量等を、歪影響線を利用して推定するものである。最小二乗法などの比較的簡易な計算で推定できるが、実用上の問題も少なくない。例えば、歪計測に必要な歪ゲージの設置には時間と手間を要する。重量推定精度は歪影響線の精度に依存するため重量既知の荷重車を利用した大掛かりなキャリブレーションが必要になる。さらに、車両の重量は求められるものの動的荷重を推定することはできない。

本研究では、橋梁の加速度応答計測を利用して、簡易に車両の静的荷重・動的荷重の双方を推定可能な手法を提案している。大型車両によるキャリブレーションを必ずしも必要としないものである。この車両重量推定を、出力である橋梁加速度応答と、システムである橋梁の特性から、入力としての車両重量を推定する逆問題として捉えると、2つの観点から課題がある。まず、システム特性として重要となるモード質量および橋梁路面プロファイルが未知である。3章、4章においてこれらを簡易に推定する手法をそれぞれ提案し、5章の静的荷重推定、6章の動的荷重推定で利用している。次に、逆問題を解くにあたり、車両-橋梁間の相互作用や、走行パスの不確定性の影響を考慮する必要がある。非線形の逆問題を解く必要があり、粒子フィルタにおいてこれらの影響を考慮することで解決している。

既往研究のレビューや、対象とする車両・橋梁系の運動の定式化に続いて、第3章においては、橋梁モード質量を推定する2段階の方法を提案している。モード質量同定においては、モード振動を励起可能な入力と、入出力を評価可能な正確な計測の双方が重要となる。入力として走行車両を利用できれば利便性は高いが、タイヤから橋梁に作用する接地力(動的な輪荷重)を計測することが難しい。そこで、車両ボディの加速度・角速度応答を計測し、拡張状態ベクトルに接地力を含むカルマンフィルタを設計することで、タイヤ接地力を推定する方法を提案している。次に、推定された入力である接地力と、同期計測された出力である橋梁加速度応答が整合的となるように、モード質量を遺伝的

アルゴリズムにより推定している。

第4章においては、橋梁路面プロファイルを走行車両応答から推定している。一般道路のプロファイルと異なり橋梁路面プロファイルの推定においては車両・橋梁相互作用の影響を考慮する必要がある。そこでこの相互作用を考慮した粒子フィルタを設計し、橋梁路面プロファイルを拡張状態ベクトルに含めて推定することを提案している。

第5章では、橋梁加速度応答計測から車両の静的荷重を推定する手法を提案している。車両をハーフカーとしてモデル化し、その重量を含む車両パラメータを粒子フィルタにより推定するものである。第4章で求めたプロファイルを車両-橋梁系の主要な入力として利用している。計測加速度を2回積分した変位応答を擬似的な観測量として含めることで推定精度や収束性が向上することを示している。実走行試験において約10%の誤差で車両重量を推定できることを示している。

第6章では、動的な車両荷重の推定法を提案している。橋梁を2次元のモードモデルとして捉え、モード特性は加速度計測から推定する。動的な作用荷重を橋梁モードモデルへのランダム入力として、拡張状態ベクトルに含めて各タイムステップで推定するものである。実橋梁において、本手法を適用し橋梁応答から推定した動的な車両荷重を、第3章で提案した接地力推定と比較して、両者が整合的であることを確認している。

本論文は、車両-橋梁系の運動に関する知見に基づいて、データ同化手法であるカルマンフィルタや粒子フィルタ、パラメータ最適化手法である遺伝的アルゴリズムを適切に組み合わせることで、加速度応答計測に基づいて走行車両の静的および動的な荷重を推定する方法を提案している。近年計測が容易になりつつある橋梁や車両の動的応答を、車両・橋梁モデルと合わせて用いることで従来のBWIMの課題を解決する方法を提示している。実活荷重に基づく合理的な橋梁維持管理の実現に向けて大きく貢献する成果をもたらした。本論文の学術上、工学上の貢献は大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。