ドライビングシミュレータおよび生体情報を用いた路面乗り心地評価システムの構築

富山和也¹・川村 彰²・石田 樹³・高橋 清⁴・秋田谷勇輝⁵

¹正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)
E-mail: tomiyama@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)
E-mail: kawamuak@mail.kitami-it.ac.jp

³正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)
E-mail: t-ishida@ceri.go.jp

⁴正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)
E-mail: kiyoshi@mail.kitami-it.ac.jp

⁵学生員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)
E-mail: m1252200015@std.kitami-it.ac.jp

路面乗り心地に関する利用者評価の多くは、主観的なアンケートにより収集されるが、個人の振動感受性差による定量化の困難さや、客観性の低さが問題となる。本研究では、ドライビングシミュレータ(DS)および心拍変動を用いた乗り心地評価システムを構築し、仮想道路環境下での利用者意識に基づく路面モニタリングについて検証した。その結果、異なる路面平坦性水準間で、車両振動がメンタルストレスに影響を与える場合、心拍変動の変化率は、一定の傾向を示し、試行回数の増加にともない、振動に順応することが示唆された。これらの結果について、実道およびDSにおける仮想環境下において同一条件での試験結果を比較したところ、同様の傾向が得られたことから、路面モニタリングにおけるDSを用いた評価システムの有効性が確認できた。

Key Words : driving simulator, physiological information, heart rate variability, pavement ride quality

1. はじめに

老朽化した社会資本が急増する昨今、優先的に補修が必要となる箇所を把握するため、その健全度を的確に評価することは極めて重要である¹⁾。また、利用者と直接の接点となる道路の舗装路面には、車両走行時の安全性や快適性など、利用者意識に基づく評価が必要である。特に、路面の主要な補修要因である平坦性は、車両走行時の乗り心地に直結することから、利用者および管理者共通の関心事である²⁾。

利用者意識に基づく路面評価では、対象箇所で行行試験を実施し、利用者の乗車感覚を計測する体感試験がしばしば実施される³⁾。しかし、実道実車試験では、被験者の安全性や必要とされる路面条件の確保など、多くの困難を伴う。一方、今日のバーチャル・リアリティ技術の進化により、ドライビングシミュレータ(以下、「DS」とする)を用いることで、安全かつ迅速な体感

試験の実施が可能となっている⁴⁾。DSを用いた体感試験は、実道実車試験に比べて、被験者の安全性確保や試験条件の設定が容易など多くの利点を有することから、今後もその需要は高まるものと考えられる。一方、体感試験における利用者評価の多くは、実験協力者(被験者)に直接乗車感覚を問う主観的なアンケートにより収集される。しかし、アンケートに基づく評価手法は、個人の振動感受性差に起因する評価のばらつきに伴う定量化の困難さや、自己申告であることによる客観性の低さが課題となっている⁵⁾。

本研究の目的は、DSおよび生体情報を用いた、客観的かつ高精度な、利用者意識に基づく路面乗り心地評価システムの構築である。はじめに、DSを用いた仮想道路環境の構築と、路面評価システムについて述べる。続いて、代表的な生体情報であり、比較的容易に測定可能な心拍変動を用いた、路面乗り心地のモニタリング方法を示す。最後に、DSおよび実道路環境下で、同一の評

図-1 路面の波状特性に基づく分類⁶⁾

図-2 KITDSの外観

図-3 KITDSによる路面評価システム

価シナリオによる体感試験を実施し、DSを用いた乗り心地評価システムの有効性について、生体情報に基づき検討する。

2. DSを用いた路面評価システム

DSとは、バーチャル・リアリティ技術に基づき、実際に道路上を運転せずに、ドライバの運転操作に応じた運転環境の変化をリアルタイムに乗員へ提供する装置である。北見工業大学では、路面乗り心地への社会的関心を背景に、路面評価に特化した機能を付加した、路面評価型DS (KITDS: Kitami Institute of Technology Driving Simulator) を開発している。

(1) KITDSの特徴

従来、道路研究におけるDSの利用は、道路の視認性や線形設計に関するものが主体であった。そのため、道路関連データの利用は、プロファイルをさまざまな周波数と振幅を有する波の複合体として捉えた、図-1に示す路面の波状特性分類⁶⁾に基づく、道路線形と関係の深い数十メートルから数百メートルの波長の再現に限られ

ていた。一方、KITDSでは、乗員の乗り心地や車両の操縦性・安定性、燃費や車両耐久性などの走行費用に直結し、数センチメートル単位の波状特性を有する、平坦性レベルでのデータが利用可能である。また、仮想道路環境の構築において、KITDSは、従来のコンピュータ・グラフィックス (CG) による方法に加え、汎用のビデオカメラで収集された実映像データを、同時に測定した車両挙動と同期し再現する実走行再現機能を有する。本機能では、走行映像および車両挙動を直接再現するため、運転操作を伴わず、乗り心地データの解析において、運転操作や走行速度、走行軌跡の違いなどを排除できる。

図-2にKITDSの外観を、図-3にKITDSにおける実走行再現機能を用いた路面評価システムの概要を示す。

(2) 実走行データの収集

DSでの体感試験に用いる実走行データは、実車両もしくは車両の数学モデルから得ることができる。実車両を用いた場合、フロントウィンドウに設置した汎用のビデオカメラにより前方映像を記録し、車両の重心位置付近に設置した加速度センサもしくはジャイロセンサにより、車両の6分力特性を測定する。計測機器は、汎用性があり設置車両を選ばないため、道路パトロール車など

(a) ジャイロセンサ (b) ビデオカメラ
図-4 車両挙動データ計測機器の設置例

図-5 KITDSの振動再現性検証例

を利用したデータ収集も可能である。計測機器の設置例を図-4に示す。また、実車両挙動および実映像データを用いるため、より実環境に近い状態での試験環境が構築できる。一方、車両の数学モデルを用いた場合、CarSim[®]に代表される運動シミュレーションソフトを用いることで、実験室内において効率的に車両6分力特性および前方映像のアニメーションデータを得ることが可能である。

(3) 振動加速度に着目したDSの乗り心地再現性

路面の乗り心地を把握する上で、車両バネ上に働く上下加速度（以下、「上下加速度」とする）は、利用者にとって最も体感しやすく、利用者評価と深い関係にあることが知られている⁸⁾。そのため、乗り心地の体感試験を実施する上では、DSコクピット上での振動再現性が非常に重要となる。KITDSの乗り心地再現性は、既往研究⁹⁾において、路面管理上重要な振動再現に優れていることが確認されている。図-5に、KITDSの振動再現性検証例として、国際ラフネス指数（IRI: International Roughness Index）が2mm/mの路面上を80km/hで走行した際の上下加速度の、周波数領域における比較結果を示す。図より、入出力データ間の高い相関があり、特に、車両開発の見地からは振動低減が難しい、車両バネ上共振域である1-2Hzの範囲でよく一致していることがわかる。

3. 生体情報に基づく路面乗り心地モニタリング

アンケートによる路面乗り心地評価は、利用者の乗車感覚を直接測定できる反面、自己申告であることによる客観性の低さが、評価結果を定量化する上での課題となっている。一方、生体情報として心拍数に着目し、心拍

図-6 心拍変動の連続ウェーブレット変換結果¹⁰⁾
(カラースケールはウェーブレット係数の絶対値)

変動を連続ウェーブレット変換することで、従来では困難であった、平坦性に起因する潜在的メンタルストレスの把握が可能である¹⁰⁾。本章では、心拍変動による路面乗り心地のモニタリングおよび評価手法について概説する。

(1) 心拍変動の概要

心拍数の周期は、常に一定でなく、外部刺激によるストレスなどによって、時間とともに変化する。心拍変動とは、心拍数の揺らぎであり、呼吸や体温、メンタルストレスなどによって変化する、自律神経系の活動を表す重要な生体情報の一つである¹¹⁾。自律神経系は交感神経系および副交感神経系の異なる活動動態を持ち、心拍変動に影響を及ぼす。とりわけ、心拍変動を周波数領域でみた場合、高周波成分（HF成分: 0.15-0.4Hz）と低周波成分（LF成分: 0.04-0.15）にピークを持ち、HF成分が副交感神経系の、LF成分が副交感神経系と交感神経系の活動を反映することが知られている。

(2) 心拍変動の連続ウェーブレット変換

心拍変動において着目すべきは、副交感神経系の活動が、車両振動などの外部刺激に起因するメンタルストレスにより不活化され、HF成分が減衰することにある。そのため、HF成分は、フーリエ変換や自己回帰モデルによるスペクトル解析により評価され、自律神経系の活動動態を表す指標として用いられてきた。しかし、従来のスペクトル解析では、信号の定常状態が前提であり、また、時間に関する情報の取得が困難であるという問題がある。一方、連続ウェーブレット変換は、解析波形の定常性を仮定する必要がなく、解析対象に局在する波の時間情報と周波数情報を同時に識別可能な利点を有する¹²⁾。

ここで、時間 u 、スケール s における信号 $f(t)$ の連続ウェーブレット変換は式(1)で与えられる。

図-7 KITDS 上での実走行再現映像

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (1)$$

なお、*は共役複素数を表す。また、本研究では、マザーウェーブレット $\psi(t)$ として、臨床医学における心拍変動の解析でしばしば用いられ¹³⁾、次式で定義されるMorletを用いた。

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} \cos(5t) \quad (2)$$

図-6に、心拍変動の連続ウェーブレット変換結果例を示す。図中、スカログラムは、心拍変動の振幅と対応したウェーブレット係数の絶対値を表し、周波数は対数表示とした。ここで、120から180秒が平坦性低下区間であるが、区間中HF成分の減衰が確認できる。このように、心拍変動の連続ウェーブレット変換によりHF成分減衰の有無を確認することで、アンケート評価結果によらず、平坦性に起因する車両振動乗り心地と関連したメンタルストレスのモニタリングおよび評価が可能である¹⁰⁾。

4. DSを用いた実走行再現による 乗り心地評価システムの検証

前章までに、DSを用いた路面評価システムおよび、心拍変動による乗り心地のモニタリング方法について述べた。本章では、実道およびDSによる仮想環境下で同様の体感試験を実施し比較することで、DSを用いた路面乗り心地評価システムの有効性について、生体情報に基づき検討する。

(1) 体感試験条件

実道における体感試験は、平坦性水準の異なる2路面(路面A, Bとする)が信号を挟んで連続した一般道路において、排気量2000ccの乗用車を使用して行なった。各路面の走行延長は500mであり、当該区間の制限速度40km/hにおいて、試行回数を3回とした。平坦性水準は、路面AがIRI=4.3mm/mと「表面の損傷、供用後の舗装」¹⁴⁾相当であり、路面BがIRI=6.8mm/mと「大半に小さく

図-8 2路面間の心拍変動比較結果

ぼみ、損傷を受けた舗装」¹⁴⁾相当である。また、走行時に生じる加速度は、ISO2631-1 (1997)¹⁵⁾の人体振動評価基準に基づき周波数重み付けした実効値で、路面Aが0.20m/s²と「不快でない」¹⁶⁾レベルであり、路面Bでは0.44m/s²と「少し不快」¹⁶⁾なレベルである。なお、周波数重み付けしない場合の加速度実効値は、路面A, Bでそれぞれ0.38および0.81m/s²である。また、2章(2)に基づき実走行データを収集し、KITDS上において、実道と同等の道路環境を再現し、体感試験を行なった。KITDS上での実走行再現映像を図-7に示す。

(2) 実験協力者(被験者)

既往研究¹⁷⁾より、IRIが3mm/m以上の2路面間で、走行速度40km/hにおける周波数重み付けしない加速度実効値差が0.43m/s²の場合、統計的に乗り心地の差は大きく、体感試験に要する実験協力者(以下、「被験者」として統一)は10名以下で十分である。そこで、本研究では、被験者として、健康な20代男性7名、女性3名、計10名の協力を得た。なお、体感試験の実施に際し、被験者に試験目的および条件に関し十分なインフォームドコンセントを行った後に実施した。被験者は、心拍数計測用の電極を装着後、実車では助手席に、DSでは運転操作を行なわない助手席状態とし、心拍数の安定を確認してから各試験条件の走行を行った。

(3) 心拍変動を用いた乗り心地評価指標

乗り心地と関連したメンタルストレスの指標は、HF領域における、ウェーブレット係数の二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)とする¹⁰⁾。時間-周波数領域における、 $N \times M$ の二次元平面上での信号 $S(x, y)$ のRMSは次式により与えられる。

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M S^2(x_i, y_j)} \quad (3)$$

なお、心拍変動は、予め平均値が0、標準偏差が1となるよう正規化した。また、心拍変動の評価対象区間は、信

図-9 被験者ごとの2路面間の心拍変動比較結果

号前後の加減速区間を除く40秒間(約444m)とした。

(4) 心拍変動に基づく乗り心地評価結果の比較

心拍変動の連続ウェーブレット変換により、平坦性に起因する乗り心地と関連したメンタルストレスが把握できることを前述した。本節では、比較的平坦な路面Aと、平坦性が低下した路面Bでの走行時のメンタルストレスについて、実道およびDS上での体感試験結果に基づき比較することで、生体情報の観点から、DSを用いた路面乗り心地評価システムの有効性について検討する。

図-8に実道およびDSでの仮想環境下における、2路面に対するメンタルストレスの比較結果を示す。図中、心拍変動が欠測したパターンは除外している。また、被験者の内1名は、全ての試行において心拍変動が欠損したため、解析から除外した。図-8より、2路面間においてメンタルストレスに大きな違いは見られず、実道およびDS試験とともに、同様のばらつきとなった。これは、DS

による乗り心地評価システムが、実道路環境下で得られた、車両振動および走行映像を用いているため、道路環境の高い再現性を有しているものといえる。

一方、回帰直線は、両試験環境で同様の傾きとなったが、高い決定係数は得られなかった。原因として、図-9に示す個人差によるものがあげられ、図-9(b)や(d)のように、路面性状に起因する車両振動(以下、「車両振動」とする)がメンタルストレスへ影響しない、即ち、1:1の直線より値が路面B側となり得る被験者は、振動感受性が低く、2路面間においてHF成分の変動がないため、ばらつきが大きい結果となった。一方、図-9(a)や(e)のように、車両振動によりメンタルストレスに影響を受ける被験者は、振動感受性が高く、試行回数ごとに、心拍変動RMSの絶対値は異なるものの、HF成分の減少傾向が同様となり、ばらつきの小さい結果となった。さらに、図-9(c)や(i)における実車試験結果のように、試行回数ごとに、振動感受性の傾向が異なり、メンタルストレスへの

図-10 試行回数ごとの2路面間の心拍変動比較結果

影響の有無がばらつくことで、回帰直線の傾きが負となる被験者がみられた。これは、試行回数の繰り返しにより車両振動への順応したものと考えられ、図-10に示すように、試行回数が増えるにつれ、心拍変動RMSのばらつきが小さくなるとともに、2路面間でのメンタルストレス差が小さくなった。即ち、2路面間のIRIの値が異なるにも関わらず、メンタルストレスが同様のレベルとなり、回帰直線が、1:1の直線に近似する結果となった。なお、実道およびDS試験の、被験者ごとの比較では、必ずしも両試験結果が一致しなかったが、これは、心拍変動が被験者の健康状態など路面以外の影響も反映するためであるといえる。しかし、複数の被験者から得られた結果を平均化することで、図-10のように、試行回数ごとに、DSによる仮想道路環境下において、実道試験と同様の結果が得られることがわかった。

以上より、被験者が平坦性に起因する車両振動によりメンタルストレスを受ける場合、HF成分は、一定の減少傾向を示し、繰り返し再現性を有することがわかった。また、被験者によっては、試行回数の増加にともない、車両振動へ順応することを確認した。これらの傾向を、実道とDS試験で比較したところ、同様の結果となったことから、DSを用いた路面乗り心地評価システムは、利用者の生体情報に基づく、高精度かつ客観的な路面モニタリングに有効であるといえる。

5. まとめ

本研究は、DSおよび生体情報を用いた路面乗り心地評価システムを構築し、実道およびDSによる仮想道路環境下での体感試験により、これまで不明であった、仮想道路環境下での体感試験の有効性を検証したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- a) 振動感受性が低く、車両振動によるメンタルストレスへの影響がない被験者は、平坦性水準の異なる2路面間においてHF成分の変動がみられず、試行回

数ごとのばらつきが大きくなった。一方、振動感受性が高く、車両振動によりメンタルストレスに影響を受ける被験者は、試行回数ごとに、心拍変動RMSの絶対値は異なるものの、HF成分の減少傾向が同様となった。また、被験者によっては、試行回数の増加にともない、車両振動へ順応し、試行ごとにメンタルストレスへの影響の有無がばらつく結果となった。

- b) 以上の結果について、実道およびDS試験の、被験者ごとの比較では、心拍変動が被験者の健康状態など路面以外の影響も反映するため、必ずしも結果が一致しなかった。しかし、複数の被験者から得られた結果を平均化することで、試行回数ごとに、DSによる仮想道路環境下において、実道試験と同様の結果が得られることがわかった。これは、DSによる乗り心地評価システムは、実道路環境下で得られた、車両振動および走行映像を用いるため、道路環境の高い再現性を有しているものといえる。

以上より、DSおよび生体情報を用いた乗り心地評価システムは、仮想環境下で安全かつ効率的に体感試験を実施でき、従来困難であった、利用者意識に基づく高精度かつ客観的な路面乗り心地評価が可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備重点化計画，<http://www.mlit.go.jp/common/000038075.pdf>, 2009.
- 2) 秋本 隆，鈴木康一，井上良和：ポータブル型路面プロファイル測定装置の開発，舗装，Vol.36, No.8, pp.3-7, 2001.
- 3) Janoff, M.S., Nick, J.B., Davit, B.S., and Hayhoe, G.F.: Pavement Roughness and Rideability, National Cooperative Highway Research Program Report 275, 1985.
- 4) 川村 彰：ドライビングシミュレータを用いた道路研究の可能性，道路建設，No. 687, pp.62-63, 2005.
- 5) 石田樹，川村彰，Alimujiang Yiming，富山和也：生体信号による舗装路面の乗り心地評価に関する基礎的研究，土木学会舗装工学論文集，第12巻，pp.

- 197-204, 2007.
- 6) 土木構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来, 土木学会論文集, No.472/V-20, pp.13-28, 1993.
- 7) Mechanical Simulation Corporation: CarSim Reference Manual, 2006.
- 8) 三浦登, 福田水穂：自動車設計と解析シミュレーション, 培風館, 1990.
- 9) 富山和也, 川村 彰, 城本政一：路面評価型ドライビングシミュレータの乗り心地再現性について, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.65, V-051, CD-ROM, 2010.
- 10) 富山和也, 川村 彰, 高橋 清, 石田 樹: 生体情報を利用した路面乗り心地に基づく舗装の健全度モニタリング, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.67, No.2, pp.I_125-I_132, 2012.
- 11) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart Rate Variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, European Heart Journal, Vol. 17, No. 3, pp. 354-381, 1996.
- 12) Mallat, S. A.: Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999.
- 13) 石川康広：臨床医学のためのウェーブレット解析, 医学出版, 2000.
- 14) 土木学会 舗装工学委員会 路面性状小委員会：舗装工学ライブラリー1 路面のプロファイリング入門 -安全で快適な路面をめざして-, 丸善, 2003.
- 15) ISO: Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: general requirements, ISO2631-1, 1997.
- 16) JIS：全身振動 - 第2部：測定方法及び評価に関する基本的要求, JIS B 7760-2, 2004.
- 17) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹, 高橋 清, 中辻 隆：舗装路面の体感乗り心地評価における被験者数の最適化, 土木情報利用技術論文集, Vol.19, pp.285-292, 2010.

(2012.10.19 受付)

DEVELOPMENT OF A PAVEMENT RIDE QUALITY RATING SYSTEM USING A DRIVING SIMULATOR AND PHYSIOLOGICAL INFORMATION

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Tateki ISHIDA,
Kiyoshi TAKAHASHI, and Yuki AKITAYA

Pavement ride quality testing is difficult to quantify the evaluation results based on the questionnaire due to the lack of objectivity. This study develops a ride quality rating system using a driving simulator and physiological information such as heart rate variability (HRV) that contributes to quantitative and high accuracy pavement surface monitoring. As a result, oscillations of HRV indicate a constant tendency toward different roughness conditions in case that experimental participants suffer mental stress caused by the vehicle vibration. On the other hand, some participants adjust to the vehicle vibration according to the increase of the number of trials. Because these results are observed on the driving simulator experiment as well as the in situ survey, the developed system is valid in pavement surface monitoring based on the ride quality rating of road users.