

車載カメラ動画による 自転車走行時の振動不快度推定手法の開発

居駒 薫樹¹・浅田 拓海²・有村 幹治³・亀山 修一⁴

¹学生会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

E-mail: 16041020@mmm.muroran-it.ac.jp

²正会員 室蘭工業大学 助教 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

E-mail: asada@mmm.muroran-it.ac.jp

³正会員 室蘭工業大学 准教授 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

E-mail: arimura@mmm.muroran-it.ac.jpkuation

⁴正会員 北海道科学大学 教授 都市環境学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

E-mail: kameyama@hus.ac.jp

現在、我が国では、サイクルツーリズムが積極的に推進されており、走行環境の改善やルート情報の提供の必要性が高まっている。路面の平坦性や走行中の振動は、運転者の快適性や安全性に影響する一要素であるが、これを測定・評価する手法は確立されていない。そこで、本研究では、アクションカメラによる撮影動画から振動量（動画振動量）を計測し、振動に対する体感（振動不快度）を推定・可視化する手法を開発した。まず、10名の被験者の振動不快度と動画振動量の関係を明らかにし、振動不快度推定モデルを構築した。さらに、テスト区間への適用結果を基に、カメラを設置した自転車で通常走行することで、振動不快度を精度良く推定でき、その結果を簡易的にマッピングできることを示した。

Key Words : cycle tourism, pavement, flatness, discomfort, on-vehicle camera, optical flow

1. はじめに

現在、北海道では、2016年3月に閣議決定された北海道総合開発計画で位置づけられた、北海道の雄大な系色の中での移動そのものを楽しむサイクルツーリズムの振興や取り組みがなされている。北海道のサイクルツーリズムの推進する取り組みとして5つのモデルルートが指定された。モデルルートの満たすべき目標として、北海道の「景観」「食」「夏でも冷涼な気候」に加えて、休憩施設の充実や走行環境の改善を図り、世界のサイクリストが安全かつ安心して走行でき、また、受け入れ環境が整っている事とされている¹⁾。昨今では、50km以上となるロングライドも人気が高まっている。この場合、道路走行環境として、舗装状態が重要な要素となり得る。北海道開発局による報告²⁾によれば、サイクリストのアンケート調査結果から、路面の平坦性や段差は快適性、安全性の面から解消が望まれること、また、走行中に眺める景観への満足度が高いことなどが示されている。このような快適性や安全性を客観的に評価し、走行環境の改善や情報提供につなげることは、今後のサイクルツーリズムを推進するうえで、重要な課題と言える。しかし

ながら、このような自転車走行環境に関する様々な要素を定量的に評価する手法は確立されていないのが現状である。

自動車利用者の視点から、上記のような景観や舗装状態の評価手法としては個別に様々な研究事例が報告されている。その中でも、著者らは、車載カメラによる動画または静止画によって、景観、舗装や区画線の状態など道路空間の様々な対象について、連続的かつ定量的に評価する手法について研究を進めている。景観に関しては、一定の距離間隔で撮影した画像の特長量の連続性や分布からルートやエリアの特長を明らかにしている³⁾。舗装状態については、同様に画像にDeep learningを適用することでひび割れを検出し、ひび割れ評価の自動化を実現している⁴⁾。これらの研究のように、カメラを自転車に取り付けることで、同様な解析手法により景観やひび割れを評価することは可能である。これらに対し、自転車の路面の平坦性や走行時の振動に関する研究報告は少なく、特に、車載カメラ動画を用いた事例は稀である。

自転車走行路面の平坦性評価に関する研究は、幾つか報告されている。山中らは、自転車走行空間の改善地点や施策効果の把握をするために、三次元加速度計とGPS

を搭載した自転車を用いて、3名の被験者の実験結果から快適性評価と振動量の関係性を示した⁵⁾。久保田らは、自転車に簡易な加速度計（wiiリモコン）を設置し、振動計測を行っている⁶⁾。富山らは、専用車両により計測された路面性状データと自転車走行による加速度データの関係から、自転車振動モデルを構築し、このモデルによる推定結果と自転車運転者の主観評価との関係を確認している⁷⁾。しかしながら、これらの研究は、加速度計による振動計測が主な目的のため、景観や路面のひび割れなどを含んだ自転車走行環境の複合的な評価をするものではない。また、計測機器が特殊な装置であること、導入が難しいことなどから被験者数が少なく、運転者の快適性や不快感を精度良く推定できるモデルの構築には至っていない。

本研究では、自転車にアクションカメラを設置し、走行中に撮影した動画を解析して、振動に対する不快度（以下、振動不快度）を評価・可視化する手法を開発する。本論文の構成は、以下の通りである。第2章では、振動不快度に関する走行実験について説明する。第3章では、動画内の景色の揺れから走行中の振動（以下、動画振動量）を計測する方法について述べる。第4章では、振動不快度と動画振動量の関係について分析し、振動不快度を推定するモデルを構築するとともに、その精度について検証する。最後に第5章にてまとめとする。

2. 振動不快度に関する走行実験

本研究では、自転車走行時に撮影した前方景観の動画から走行中の振動を定量化し、その動画振動量から運転者が感じる振動不快度を推定するモデルを構築する。本章では、測定装置や自転車、区間などの実験条件について説明し、被験者による振動不快度の評価結果について整理する。

(1) 測定装置

自転車走行時の振動計測には、加速度計の導入事例が多く、さらに、位置情報取得のために別途GPSロガーを用いる方法が主流である。しかしながら、長距離に渡る計測、衝撃に対する耐久性、耐水性、購入コスト、設置、操作、解析の簡易さ、位置情報との同定などを考えると、加速度計とGPSロガーの個別システムあるいはそれがセットとなったスマートフォン等のデバイスでは、精度検証、実用面などから考えると導入は容易ではない。そこで、本研究では、昨今、自転車車載カメラとしても利用シーンが増えているアクションカメラに着目した。商品としては、GoPro社のGoPro HERO5を採用する。このカ



写真-1 カメラの設置状況

メラには動画撮影のほか、GPS機能も付いており、動画ファイルに位置情報がメタデータとして記録されるため、動画中の各フレームと位置の同定が容易である。また、専用のマウントにより、自転車への取り付けが簡単であり、導入コストは4万円程度に収まる。なお、著者らは、本研究で対象とする振動評価の他に、走行中に眺める連続的な景観、路面のひび割れ状態、日影区間長、車両との接近などについても対象とし、最終的には、アクションカメラ単独による低コスト・簡易な自転車走行空間の総合評価システムの確立を目指している。

カメラの設置については、写真-1に示すように、ハンドル中心部に近い位置とした。カメラの各種設定は以下の通りである。

- ・画質：1,280×720 ピクセル
- ・フレームレート：30FPS
- ・画角：広角モード（焦点距離 14mm，垂直画角 69.5°）
- ・手ブレ補正：OFF
- ・GPS サンプルング周波数：20Hz

一方、近年、サイクルツーリズムの一つの形態として、ロードバイクによるロングツーリングが選ばれるケースが増えている。また、本研究では、どのような運転者、自転車でも撮影動画から精度よく振動不快度を評価できる方法を目指している。以上のことから、実験車両はロードバイクに限定し、被験者自身の所有する自転車を使用し、複数の人、自転車による実験データからモデルの構築を試みる。ただし、通常走行を想定するため、サスペンションの付いていない自転車とし、空気圧は7.0barに統一した。

(2) 実験条件

走行実験では、前方景観の動画撮影と同時に振動に対する不快度（振動不快度）の評価を行う。評価1を特に問題を感じない滑らかな路面、評価5を振動が最大級に

大きい路面となるように設定した。そのため、モデル構築のための実験区間は、評価 1 から評価 5 の箇所を含むように設定した。なお、実験区間は勾配がほとんどなく、安全性の面から交通量が極めて少ない区間とした。

実験区間を図-1 に示す。実験の手順は以下の通りである。まず、事前に、大学付近の駐車場（集合場所）にて本実験の説明を行い、評価基準として振動不快度 1～5 の見本動画を見てもらった。その後、練習走行を行い、実験区間手前で数分の休憩時間を設けた。休憩後、動画撮影と実験走行を開始した。振動不快度については音声で記録し、走行速度は運動負荷がかからない 20km/h 程度、走行位置は外側線の 10cm 程度歩道側とし、無理をしない範囲で走行してもらうよう事前に指示した。走行中の評価は、見逃しやタイミングの遅延があることから、実験走行後すぐに大学研究室に戻り、PC 画面上で動画と走行時の評価記録を確認しながら、再度、振動不快度を評価してもらった。

被験者は、室蘭工業大学サイクリング部の学生 10 名（男性 9 名 A～I、女性 1 名 J）であり、競技レベルの学生が若干名含まれるが、ほとんどはロードバイク利用歴 1 年程度の初心者である。実験区間については、すべての被験者が走行経験を有している。実験期間は、2018 年 7 月であり、風がほとんどない晴天日の午前中に実験を行った。

振動不快度は、動画開始から 3 秒区間毎に評価をしてもらった。ただし、これでは被験者毎に空間的な評価箇所が異なるため、比較ができない。そこで、カメラ内蔵 GPS による位置情報を基に 15m 区間（20km/h で 2.7 秒）毎の値を線形補完により算出し、評価区間を空間的に統一した。本カメラの GPS 精度を調べたところ、標準偏差が 1m 程度であった。全被験者の各 15m 区間の動画を確認したところ、位置に大きなずれはなかった。

(3) 対象区間の振動不快度

被験者 10 名の振動不快度を比較したところ、主観的な評価のため、同一区間内ではばらつきがあったが、評価が大きい区間、小さい区間などその傾向については類似していた。そこで、個人間の評価の類似性を示すため、被験者間の振動不快度の相関係数を求めた（図-2）。相関係数は、0.3 程度と低い場合もあるが、ほとんどの被験者間で 0.5 以上となり、皆、類似した評価傾向となることがわかる。したがって、以下では、対象路線の代表的な振動不快度として、全被験者の平均値を用いることとした。この振動不快度の平均値は図-1 に示してある。マップ上では、1～5 の 5 段階で色分けしており、前半は評価が低い区間が続くが、後半では評価が空間的にばらついていることがわかる。



図-1 実験区間

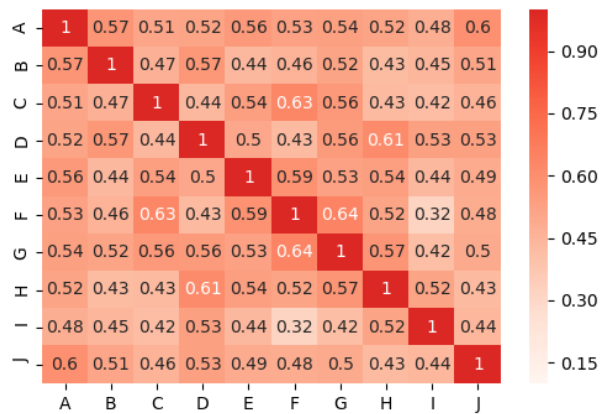


図-2 被験者間の振動不快度の相関係数

3. 動画解析による振動計測方法

本章では、撮影動画から走行中の振動を計測する方法について説明する。概略としては、まず、数秒間隔毎に動画中の景色の揺れ、変動をオプティカルフロー解析により時系列データ化する。次に、その変動のどの周波数帯が人の評価（振動不快度）と関係があるのかを調べるために、周波数解析を行う。最後に、振動計測方法として、その精度、ばらつきについて確認する。

(1) 動画の解析手順

動画データから走行時の振動（動画振動量）を算出する手順を図-3 に示す。本手法では、路面から伝わる振動によって生じる動画内の「景色の揺れ」に着目し、そのような「ブレ」の解析によく用いられるオプティカルフローを導入する。オプティカルフローとは、動画フレーム（静止画）内の特徴点を検出し、次のフレームにおいてそれらがどの位置に移動したのかを検出し、その移動量と方向を連続的に算出する手法である。この特徴点の

トレースには、高速処理アルゴリズムとして用いられているLukas-Kanade法を採用した。以下に具体的な手順を示す。

まず、特徴点をトレースする解析対象範囲を設定する。動画中の左側の領域は、道路上に張り出している樹木等が特徴点として誤検出される場合が多いことがプレ実験で判明したため、**図-3①**に示すように、左半分の領域を分析から除外した。また、右端の領域には自転車のハンドルが映り込む場合があるため、右端から100ピクセルの部分についても除外した。残る範囲を解析領域として特徴点を100点設定し、それらの変動の時系列データを得た。本研究では、路面からの振動を対象とするため上下方向の変動のみを分析に用いる。ただし、**図-3②**に示したように、時間の経過とともに、幾つの特徴点が動画枠外に流出してしまい、データが十分に得られないケースが生じるため、動画を細かく分割することとした。この分割間隔としては、この後に行う周波数解析（高速フーリエ変換）のためにフレーム数を2のべき乗とすること、特徴点の流出量や消失量について事前に調べた結果などを踏まえ、32フレーム（約1秒）とした。また、枠外に向かう特徴点は、周期が大きく、周波数解析におけるノイズとなることから、最初の位置から72ピクセル（上下方向画素数の10%）移動した場合は除外した。

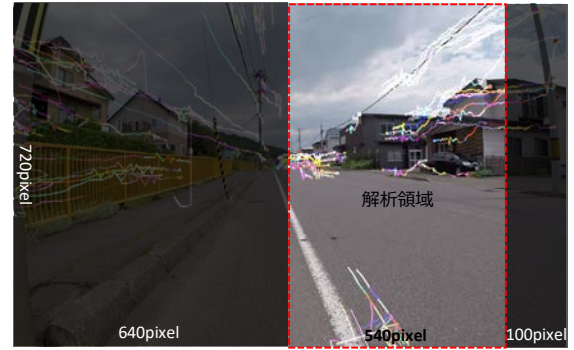
以上から、動画を1秒ずらしながら32フレーム分の特徴点の時系列データが生成されることとなる。次に、このデータに高速フーリエ変換を適用し、各特徴点のパワースペクトル密度（Power Spectral Density：PSD）を算出する。データを集約するため、**図-3③**に示したように、複数の特徴点のPSDを平均化した後、1～15Hz、1～10Hz、5～15Hz、1～5Hz、5～10Hz、5～15Hzの6つの周波数成分を算出した。それぞれ、 PSD_{1-15} 、 PSD_{1-10} 、 PSD_{5-15} 、 PSD_{1-5} 、 PSD_{5-10} 、 PSD_{10-15} と表記する。また、この1秒毎に得られる各PSDを3秒間で平均化し、振動不快度の時間間隔と合わせた。

最後に、振動不快度と同じように、動画（各フレーム）の位置情報を基に、15m区間毎の各PSDを線形補間により算出した（**図-3④**）。なお、各PSDの値の幅が大きいため、対数変換した値を用いることとする。以上により、全被験者の動画振動量と振動不快度の評価区間が空間的に統一されることとなる。

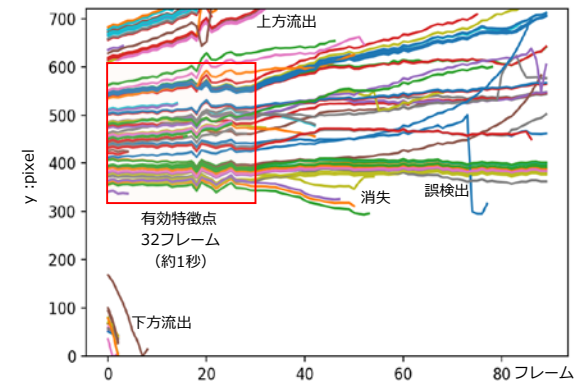
(2) 動画振動量の誤差

動画振動量は、車両や運転者による差、景色の変化などから、測定の度にばらつく可能性があるため、このようなばらつきや誤差を把握する必要がある。そこで、全被験者の動画振動量を比較した。一例として、 PSD_{5-15} の

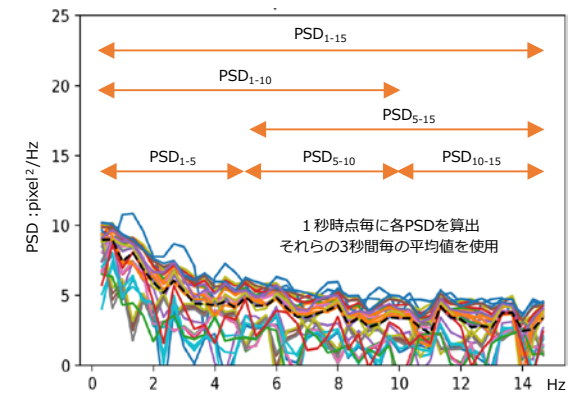
① 撮影動画のオプティカルフロー解析（特徴点の軌跡抽出）



② 解析領域内の特徴点の時系列変動（上下方向）



③ 有効特徴点の周波数解析



④ 15m区間値に線形補間（3秒間隔の各PSD・振動不快度）

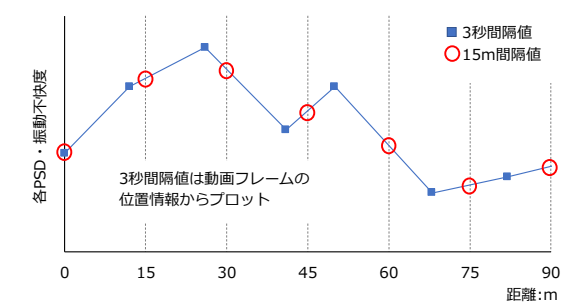


図-3 動画振動量の解析フロー

時系列変動を**図-4**に示す。動画振動量の変動は、どの被験者においても類似した動きを示しているが、各15m区間を見るとばらつきが生じている。そこで、15m区間毎に全被験者の変動係数を算出し、各周波数成分で比較し

た(図-5)。PSD₁₀₋₁₅は、変動係数が0.3以上となる区間が40%以上あり、個人間のばらつきが大きいですが、それ以外の周波数成分では、0.2以下となる区間が50%以上となった。前述のように、計測時々での景色、自転車の種類や運転者の違いによる影響から動画振動量をばらつきを0に近づけることは容易ではない。しかしながら、本研究では、振動不快度を精密に推定するのはなく、最終的には1~5の5段階で求めるため、その入力値となる動画振動量の精度については深く追求していない。したがって、変動係数が0.2程度となるが、これらの動画振動量を用いて、振動不快度推定モデルを構築することとした。

4. 振動不快度推定モデル

第2章では、10名の被験者による代表値から実験区間の振動不快度を評価した。第3章では、動画から振動を計測する方法を示し、その動画振動量の誤差について確認した。本章では、上記の振動不快度と動画振動量の関係について分析し、後者から前者を推定するモデルを構築する。さらに、モデル構築には用いていない区間でのテスト走行を行い、本手法の精度と有効性について示す。

(1) 振動不快度と動画振動量の関係

まず、どの周波数帯の動画振動量と振動不快度に関係があるのかを調べた。振動不快度と各被験者による動画振動量の相関係数を図-5に示す。低周波が含まれるPSD₁₋₁₅とPSD₁₋₅では、振動不快度との相関係数が0.6以下となる被験者が多いことがわかる。一方、高周波が含まれるPSD₅₋₁₅やPSD₁₀₋₁₅では、相関係数が0.65以上となった被験者がほとんどとなった。路面からの振動は、映像の揺れとして5~15Hzに現れ、その周波数成分は人の体感評価と相関があると言える。

以上のように、動画振動量の誤差(図-5)と振動不快度との相関(図-6)の両面を踏まえると、PSD₅₋₁₅から振動不快度を推定することが妥当と考えた。また、全被験者の動画振動量の変動係数は0.2と小さく、また類似した傾向を示すことから、全被験者の平均値をモデル構築に用いることとした。振動不快度との関係を図-7に示す。両者の相関係数は0.8以上となり、高い精度で振動不快度を推定できることがわかる。推定式は以下の式(1)に示す。

$$\text{振動不快度} = 0.84\text{PSD}_{5-15} - 0.07 \quad (1)$$

上記のモデルに各被験者のPSD₅₋₁₅を入力し、どの運転者、自転車でも精度良く推定できるかを確認した。一例

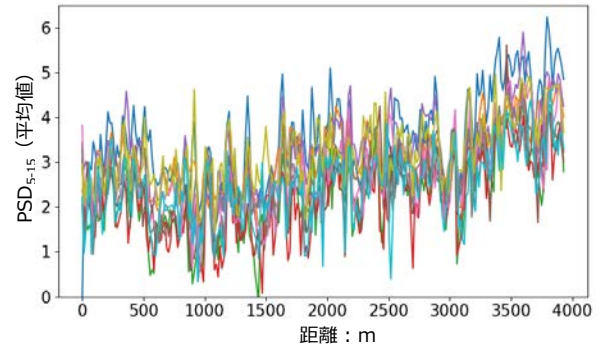


図-4 全被験者の動画振動量 (PSD₅₋₁₅)

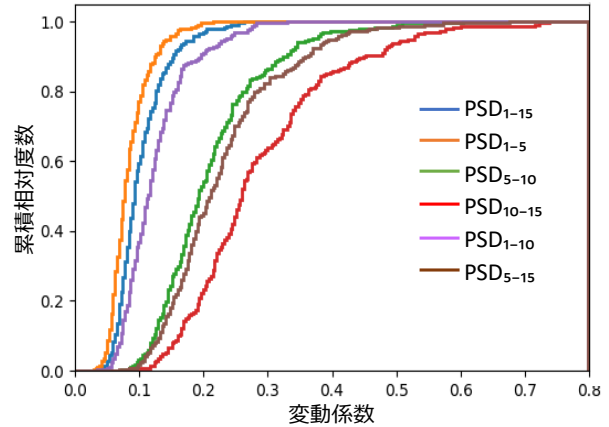


図-5 動画振動量の変動係数

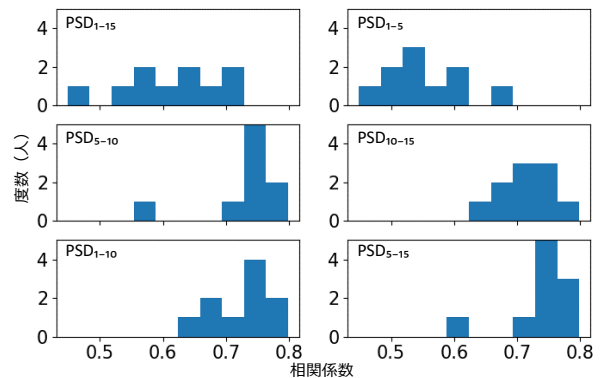


図-6 振動不快度と各被験者の動画振動量の相関係数

として、被験者DのPSD₅₋₁₅から推定した振動不快度を図-8に示す。観測値が低い箇所では、予測値が過剰となるケースが見られるが、全体的には観測値を再現できていると考えられる。他の被験者についても同様に、推定値と観測値の相関係数を求めたところ、すべての被験者で0.75以上となった。したがって、本手法では、運転者や自転車(ロードバイクに限定)が異なっても、同程度の推定値を得ることができ、複数人による代表的な体感評価値(振動不快度)を再現できると言える。

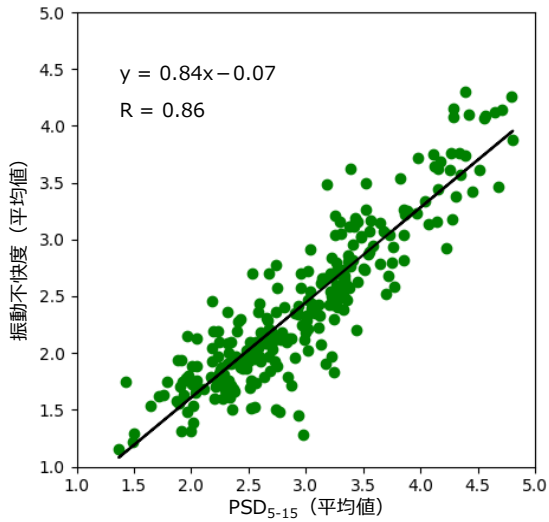


図-7 動画振動量と振動不快度の関係

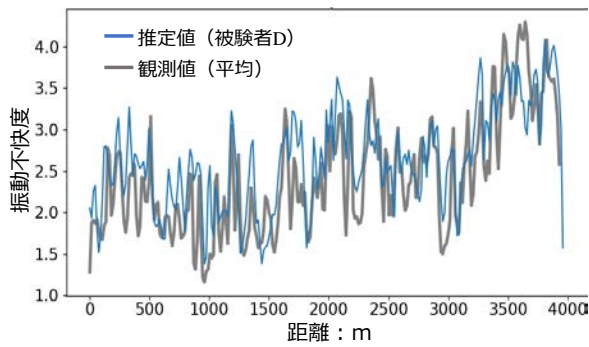


図-8 被験者 D の動画振動量による振動不快度推定

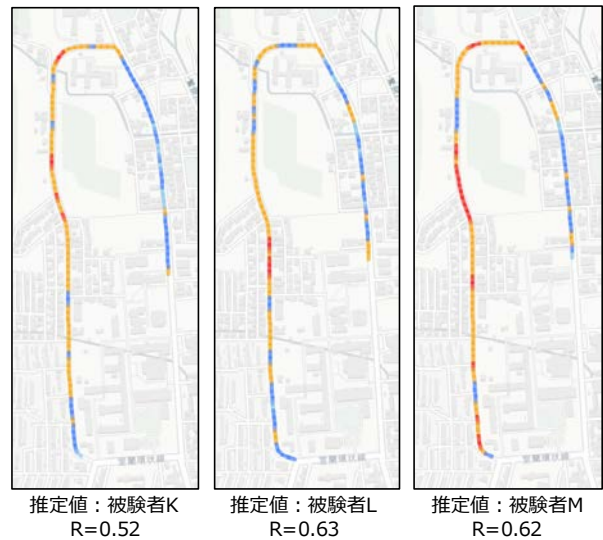
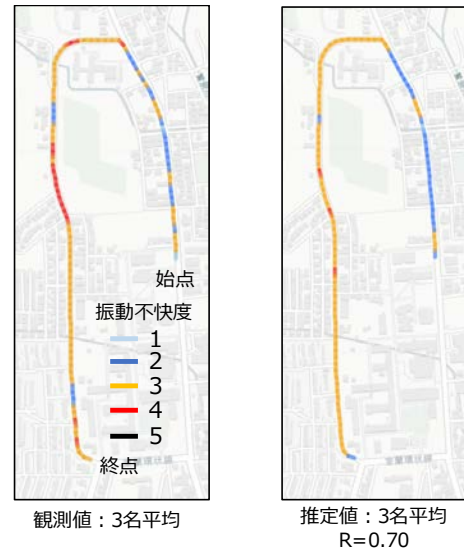


図-9 テスト区間における振動不快度の推定結果

(2) 本手法の適用

上記のモデルは実験区間のデータから得られたものであるため、これが景色の異なる他の区間でも精度が得られるのかを検証する必要がある。そこで、テスト用の区間を用意し、実験走行とは異なる3名の学生 (K~M) に走行撮影および不快度評価をしてもらった。振動不快度の代表値には、3名の平均値を用いる。観測値および3名の動画変動量 (PSD₅₋₁₅) による予測値をマップ上に示した (図-9)。どの走行者においても、個別の推定値は観測値と同様な分布となり、相関係数としては、およそ0.6程度となった。走行者により推定値が異なる理由としては、走行する際の車輪の位置が考えられる。すなわち、路面状態が居所的な箇所では、走行位置によって動画変動量が異なり、推定値に影響する。この問題は、自転車、自動車に関わらず車輪の通過位置に依存する計測方法では解決が難しい。この点について、本手法では、低コストかつ簡易な装置を用い、複数台の自転車での測定が容易であるため、データを平均化することで対応可能である。例えば、本テスト区間の場合では、3名の PSD₅₋₁₅ の平均値から振動不快度を推定すると、観測値と

の相関係数は0.7となり、精度が向上した (図-9)。

以上から、本手法では、測定対象となるルートがある場合は、調査・試走業務などの中で複数人による走行により、信頼度の高い振動不快度評価が可能と言える。また、一般のサイクリストをモニターとして、カメラを貸出すもしくは自身のものを使用してもらい、動画データを収集することができれば、面的な評価が可能となる。今後は、景観や舗装ひび割れなどの評価も行い、それらの結果に基づくルート探索システムについて検討したい。

5. まとめ

本研究は、自転車にアクションカメラを取り付け、走行中の動画から人が感じる振動への不快度を推定する手法を開発した。得られた成果を以下に示す。

- ・ 振動不快感に関する走行実験を行い、10名の被験者が走行路面からの振動に対して類似した評価をすることがわかった。そこで、対象区間の代表的な評価として全被験者の平均値を用いることとした。
- ・ 動画中の景色の揺れをオプティカルフローで定量化し、その変動データからパワースペクトル密度PSD（動画振動量）を算出した。被験者によってPSDがばらつくが、その変動係数は0.2程度に収まることを確認した。
- ・ 振動不快感と周波数帯毎のPSDの関係について調べた。その結果、5～15Hzの周波数成分（PSD₅₋₁₅）が人の体感である振動不快感と相関が強いことがわかった。
- ・ PSD₅₋₁₅から振動不快感を推定するモデルを構築し、各被験者のPSD₅₋₁₅による推定値を求めたところ、ほぼすべての被験者で相関係数が0.75以上となった。
- ・ 他の区間にて3名によるテスト走行を行った。その結果、走行者単独の推定値では観測値（3名平均値）との相関係数が0.6程度であったが、3名分のPSD₅₋₁₅平均値を用いると推定精度が向上することがわかった。
本手法では、市販のアクションカメラのみを用いて通常走行するだけで測定が可能である。また、撮影した動画を解析ソフト（著者らが開発）にかけることで、振動不快感を精度良く推定でき、その結果をKMLやHTMLなどでマッピングし、容易に可視化することができる。今後は、この簡易さを活かして、テスト走行数を増やし、走行速度や勾配の影響などについて明らかにする。また、複数の周波数帯や速度などをパラメータとして、重回帰モデルや機械学習モデルにより推定精度の向上を図る。

謝辞：本研究は、JSPS科学研究費補助金JP17K13304の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省：「北海道総合開発計画」（平成28年3月29日閣議決定）
- 2) 国土交通省北海道開発局：北海道における自転車利用環境に関する検討業務（概要版），2019.
- 3) Googleストリートビューのパノラマ画像を用いた広域・網羅的な地域景観分析，土木学会論文集D3，Vol.72，No.L_383-L_392，2016.
- 4) 浅田拓海，川村和将，石田篤徳，石井麻貴，亀山修一：畳み込みニューラルネットワークによる舗装ひび割れの高解像度トレース手法の開発，土木計画学研究発表会・講演集（CD-ROM），2018.
- 5) 山中英生，兼本広和，滑川達：振動特性に着目した自転車走行空間の評価，土木計画学研究・講演集，（CD-ROM），2003
- 6) 久保田彰人，北島規雄，小林佑貴，市村哲：ロコミと路面状況を共有できる自転車用安全運転支援システム，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.109，No.39，pp.103-108，2009.
- 7) 渡辺健太，萩原亨，高橋清，富山和也，佐々木優太：自転車走行路面の平坦性評価に向けた自転車振動モデルに関する研究，土木計画学研究・講演集（CD-ROM），2017.

(2018.?? 受付)