

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01587

研究課題名（和文）一般車の動画画像・振動データに基づく重大な道路構造物被害の前兆の検出

研究課題名（英文）Detection of precursory changes of road structure damages using vision and vibration data of vehicles

研究代表者

長山 智則（Nagayama, Tomonori）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：80451798

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：車載カメラを用いて路面画像を取得し、正確な位置同定と画像解析を組み合わせることで、災害前後や平時のひび割れ変化量を算出し、重大な道路構造物被害の前兆となる進行性の変状を抽出する研究を行った。GPSが利用できない環境でも車両動揺逆解析による位置推定を実現し、セマンティックセグメンテーションでひび割れを抽出、日照条件の影響も考慮した。さらに、鳥瞰変換画像と機械学習を用いた特徴マッチングにより、ひび割れの精緻な位置合わせと進行性評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路舗装表面に現れる変状には、土砂崩れや大規模な沈下の前兆となる危険なひび割れや、事故を誘発する大きなポットホールが発生に至るものがある。重大な道路構造物被害につながるこれらの危険な変状を早期に捉える仕組みが求められる。車内設置カメラの画像を収集して広域のひび割れを効率的に抽出する試みはあるが、網羅的検出だけでは意味をなさない。本研究で開発した手法は、進行性を有する危険なひび割れ変状を車載カメラから効率的に抽出可能にするものである。また、Transformerモデルを用いた特徴マッチングにより、舗装表面の高度な位置合わせを実現し、今後の劣化評価や予測モデル構築の礎を築くものである。

研究成果の概要（英文）：We conducted a study to extract progressive road surface damages that could indicate significant infrastructure deterioration by using in-vehicle cameras to capture road surface images, accurately identify positions, and analyze the images. We developed methods to estimate vehicle speed and position using vehicle dynamics analysis, even in environments where GPS is unavailable, such as tunnels, mountainous areas, and urban canyons. For crack evaluation, we employed semantic segmentation to extract cracks and examined the effects of sunlight conditions. Additionally, we achieved precise alignment of individual cracks using feature matching with machine learning on bird's-eye view images, enabling the assessment of crack progression.

研究分野：インフラ維持管理

キーワード：画像解析 差分解析 ひび割れ 機械学習 振動

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

道路舗装表面に現れる変状には、土砂崩れや大規模な沈下の前兆となる危険なひび割れや、事故を誘発する大きなポットホールが発生に至るものがある。これらの重大な道路構造物被害を早期に捉える仕組みが求められている。車内設置された汎用カメラの画像を収集して広域のひび割れを効率的に抽出する取り組みはあるが、道路網に無数に存在するひび割れを網羅的に検出しても意味を成さない。そこで、車載カメラの動画像に対する精緻な画像処理と、車両動揺データ分析を活用した 2 段階の位置推定技術を用いて、災害前後や平時のひび割れ変化量(差分)を算出し、重大な道路構造物被害の前兆となり得る進行性のある変状を抽出することを目指した。地震や大雨等の災害時には危険な兆候を迅速に把握し、平時には進行性を持つ変状を効率的に捉えることで、二次災害の軽減や効率的な予防保全に貢献することが期待される。

2. 研究の目的

ドライブレコーダー等により走行車両から撮影された道路の動画像を機械学習処理し、ポットホールや落石などの変状を抽出するとともに、ひび割れ抽出結果の差分に基づいて新たに発生したひび割れや進行性のひび割れを判別できるようにすることで、危険性の高い変状を確実にかつ効率的に捉えることを目的とする。ドライブレコーダー等により走行車両から撮影された路面画像は撮影の度に撮影箇所が異なるため、差分の抽出には高度な位置同定が必須である。そこで、GPS 信号が一時的に得られない場合でも画像撮影位置を特定し、さらに画像解析により精緻な位置合わせを実現することで差分解析を行う。

3. 研究の方法

a) ひび割れの領域検出，鳥瞰図への変換

ひび割れはセマンティックセグメンテーション(領域検出)により行った。教師画像の拡充とラベリングの改善により精度向上を図った。

ドライブレコーダー等のカメラパラメータを、スケーリング情報を含めて全て路面撮影画像のみを利用して求めることは難しい。そこで、路面撮影に固有の情報を利用する。カメラは進行方向を向いており、仰俯角とカメラ高さの調整のみで撮影画像を鳥瞰図に変換できると仮定すると、パラメータは3つに絞られる。さらに、車線を示す白線の幾何学的条件を制約に入れ、GPS 情報からのスケール情報と合わせて、遺伝的アルゴリズム等の最適化手法によりパラメータを最適化した。

b) GPS に依存しない車両位置情報推定方法の開発

車両のピッチング運動は、路面の波長とホイールベース長の関係により、ある速度では卓越し、別の速度ではゼロとなる。この関係を利用することでピッチング角速度から走行速度を推定できる。マルチボディシミュレーションを行い、この速度推定の原理を確認した。このように推定された走行速度を、スマートフォンにより計測される加速度・角速度や、GPS 受信区間の GPS 情報と、データ同化手法により統合し走行軌跡を推定した。

c) 前後比較によるひび割れ変化分の抽出に向けた高精度な画像位置合わせ

2 時点において推定されたひび割れを、前述の位置同定手法および画像相関法により重ね合わせることで差分を推定する。画像相関法だけでなく機械学習ベースの特徴マッチング手法も組み合わせて位置合わせを高精度、ロバストに実現する。なお、2 時点で計測されたデータは撮影機材構成や設定の違いや、天候の違いによりひび割れ検出性能に違いが生じ、直接差分を算出できない。そこで、光学条件の違いを考慮したひび割れ抽出の方法を検討する。

4. 研究成果

a) ひび割れの領域検出，鳥瞰図への変換

舗装路面上の白線やマンホールの幾何学的条件および GPS の位置情報に基づいて、車両内に設置したカメラのカメラパラメータを推定した。図 1 は白線の平行条件に基づいて変換した例である。更にマンホールが円形であることを利用してパラメータ推定を行った(図 2)。カメラパラメータ推定により鳥瞰変換された画像を、進行方向につなぎ合わせ、路面の鳥瞰画像を取得した(図 3)。

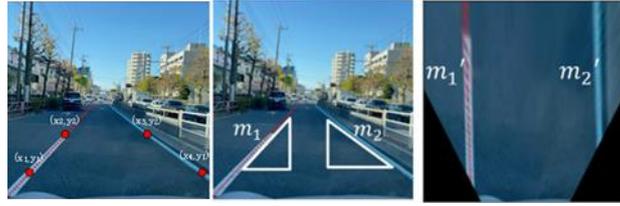


図1 白線の平行条件を利用した変換

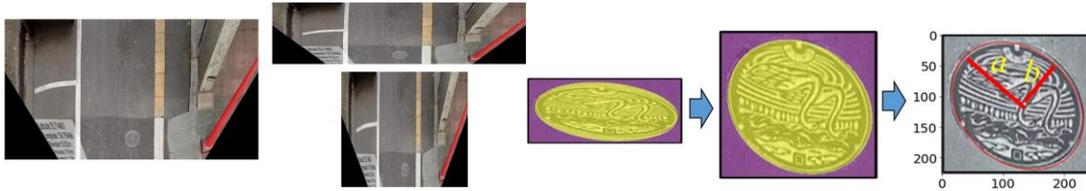


図2 マンホール形状を利用した、アスペクト比に関するパラメータ同定



図3 複数画像の接続による路面鳥瞰画像

b) GPS に依存しない車両位置情報推定方法の開発

車両のピッチング応答を空間周波数領域で捉えると、ホイールベース長（軸距）と波長の関係から特定の空間周波数において応答が小さくなったり、大きくなったりする（図 4）。波長の整数倍と軸距が一致する際には上下運動が卓越し、ピッチング運動は小さくなる。一方で軸距が波長の整数倍と半波長ずれている場合にはピッチング運動が卓越する。このため、ピッチング角速度が卓越するあるいは極小となる周波数を時間周波数上で同定することにより、走行速度を推定できる（図 5）。走行速度が推定されれば、慣性航法の原理を利用することにより、スマートフォン等に搭載のジャイロから得られる 3 軸加速度、角速度と推定走行速度情報を組み合わせて、走行軌跡を把握できる。図 6 に推定された走行速度を利用した走行軌跡を、走行速度を利用しない走行軌跡推定と共に示す。起点・終点間で GPS 信号が得られない場合でも、推定速度を利用することにより、GPS による位置情報とほぼ等しい走行軌跡を得られることが確認できる。

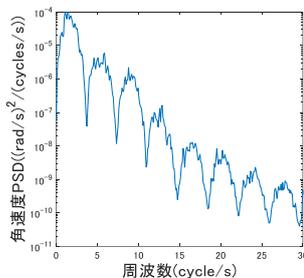


図4 ピッチング角速度 PSD

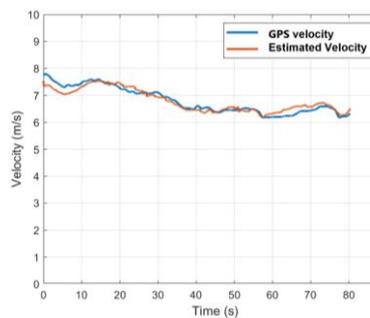


図5 推定速度

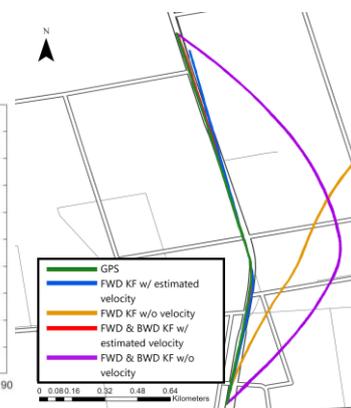


図6 推定走行軌跡

c) 前後比較によるひび割れ変化分の抽出に向けた高精度な画像位置合わせ

車両内に設置したカメラにより走行中に撮影した画像を利用して差分解析を行う場合、撮影場所が走行の度に異なるため、差分解析が難しい。動画撮影においても、30fps や 60fps とい

った通常のフレームレートでは画像間の移動距離が大きく、進行方向における撮影場所が異なってしまう。また、進行方向直角においても、走行の度に車線内の走行位置が異なるため、撮影場所が異なる。舗装上の同じ場所を対象に差分解析を行う場合にも、画角が異なるため直接比較ができない。

そこで、a)により得られる鳥瞰変換画像を、b)により GPS 信号の有無にかかわらず得られる位置情報と合わせて大まかに位置合わせを行い、その後、画像上の特徴量や画像相関法を利用して詳細かつ厳密な位置合わせを行った。ここでは、Transformer ベースの特徴量抽出手法である LoFTR を利用して舗装表面の特徴量を抽出し、これらの情報に基づいて位置合わせを実施した。図7に示すように、撮影時期が約2年異なる車両内設置カメラからの画像であるにもかかわらず、各ひび割れが重なる程度の位置合わせが実現できた。なお、この2年間の間に白線標示が補修されており、その見え方に大きな変化が見られるとともに、ひび割れの進行も確認できる。

この方法に基づいてひび割れ交点数の経年変化を算出したものが図8である。光学条件の違いを補正するセマンティックセグメンテーションのモデルを学習させているものの工学条件の違いを完全に補正することは難しく、ひび割れ交点数が減少する結果となった区間もあるが、経年的な変化を定量的に評価することができた。

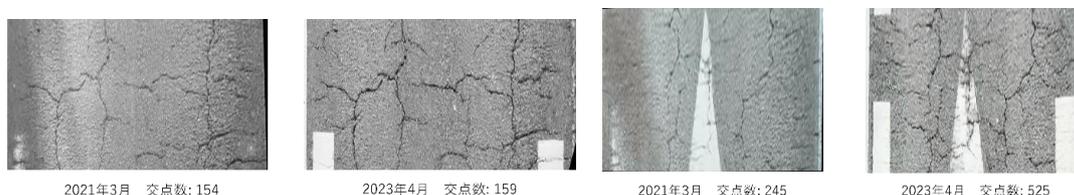


図7 正確な位置合わせを行って位置合わせをした後の2時点間の舗装ひび割れ

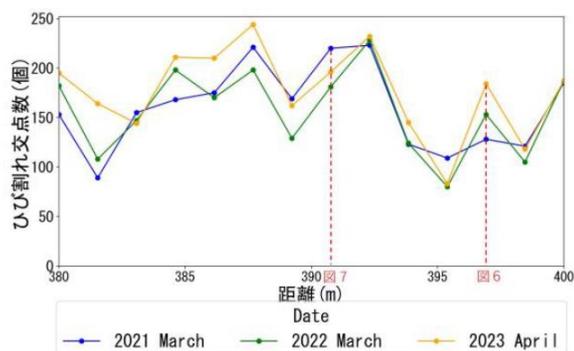


図8 ひび割れ交点数の経年変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Jose Maria Guyamin GEDA, Kai XUE, Tomonori NAGAYAMA, Boyu ZHAO, Michihiro NAKA	4. 巻 3
2. 論文標題 Estimation of pavement crack ratio by top-view transformation of in-vehicle smartphone camera and deep learning-based classification	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 26-39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/jsceiii.3.3_26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jingzi CHEN, Kai XUE, Tomonori NAGAYAMA	4. 巻 10
2. 論文標題 Vehicle Trajectory Estimation in GPS-blocked Environments Using Inertial Measurement Units, Estimated Drive Speed, and bidirectional Kalman Filters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造物の安全性および信頼性：構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR)論文集	6. 最初と最後の頁 23～30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.60316/jcossar.10.0_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長山智則
2. 発表標題 スマートフォンを用いて推定された路面の平坦性とひび割れの経時的分析手法の提案
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 垣内優希
2. 発表標題 車両動揺解析による路面評価のための軸距・センサ位置および走行速度の推定
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jose Maria Guyamin Geda
2. 発表標題 AUTOMATIC TOP-VIEW TRANSFORMATION AND IMAGE STITCHING OF IN-VEHICLE SMARTPHONE CAMERA FOR ROAD CRACK EVALUATION
3. 学会等名 9th international conference on experimental vibration analysis for civil engineering structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenchao Gao
2. 発表標題 Rut depth estimation by distortion analysis of images taken by an in-vehicle camera
3. 学会等名 Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	蘇 迪 (Su Di) (40535796)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任准教授 (12601)	
研究分担者	西川 貴文 (Nishikawa Takafumi) (50512076)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------