

自動運転車のレーザセンサを利用した路面性状調査

浦野 健太¹ 廣井 慧² 加藤 真平³ 駒形 望⁴ 河口 信夫^{1,2}

概要：本稿では、自動運転車が周囲の環境を認識するために搭載するレーザセンサで得られる点群をもとに、道路面の轍掘れを抽出する手法を提案する。老朽化していくインフラの適切な調査・修繕は安全な生活を送る上で重要である。中でも道路は劣化した状態を放置すると、舗装の剥がれに発展し危険である。高速道路や主要な幹線道路では定期的な調査が行われている一方で、地方自治体が管理する道路では、予算や労働力の不足のため専用車両を用いた定期的な調査・修繕が難しい。一方、今後社会に浸透すると思われる自動運転車は周囲の認識のためにレーザセンサを搭載しており、これを応用して調査の自動化が行えれば大きな経費節減になる。提案手法では、ひび割れ率・轍掘れ量・平坦性などで評価される路面性状のうち轍掘れについて、自動運転車が走行中に収集するレーザ点群から道路面のみの点群マップを生成し、直線状に点群マップを変形し、専用車両で得られるデータと同等の形式で抽出する。轍掘れデータの評価では、愛知県一宮市の2地点での調査データを用い、レーザ点群を用いて抽出した轍掘れと、専用車両で収集した轍掘れを比較した。相関係数で比較を行い、点群マップを用いた轍掘れの検出は専用車両による調査には及ばないものの、調査地点を選定する事前調査には有効と思われる結果を得た。

Road Surface Condition Survey using a Laser Scanner Mounted on an Autonomous Driving Car

Kenta Urano¹ Kei Hiroi² Shinpei Kato³ Nozomi Komagata⁴ Nobuo Kawaguchi^{1,2}

1. 背景

少子高齢化による労働力の不足が顕在化する中で、老朽化するインフラの維持管理が大きな問題となっている。道路インフラについては2012年の笹子トンネルで起きた事故に注目が集まり、報告書^{*1}では維持管理の不徹底も問題のひとつに挙げられた。道路の老朽化対策の本格実施に関する提言^{*2}では、老朽化対策の課題に、点検結果の記録・保存の不徹底による計画性のない管理や、予算および人不足によるメンテナンスサイクルの継続化の難しさを挙げている。図1に示すような専用車両を用いる路面性状調査では、短距離でも大きな費用が必要である。また専用車両の



図1: 調査専用車両^{*3}



図2: 轍掘れのある道路の例

台数も限られているため、広い地域に対する継続的・網羅的な調査の実施が難しい。

一方で、自動運転技術の発展に伴い、自動運転車両が町中を走行し、人や物を運ぶ未来が近づきつつある。自動運転車両は周囲の環境を認識するためにレーザセンサやミリ波レーダ、RGBカメラ等のセンサを搭載しており、走行中の自己位置推定や障害物の検出を行っている。これらのセンサにより路面の性状を把握し、轍掘れやひび割れなどの欠陥を検出できれば、自動運転車両が走行するだけで路面性状の調査を行えるため、検査コストを大幅に減らせると

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University
² 名古屋大学未来社会創造機構 Institutes of Innovation
for Future Society, Nagoya University
³ 東京大学大学院情報理工学系研究科 Graduate School of
Information Science and Technology, The University of Tokyo
⁴ ニチレキ株式会社 NICHIREKI CO., LTD.
^{*1} http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000363.html
^{*2} http://www.mlit.go.jp/road/road_fr4_000029.html

^{*3} https://www.nichireki.co.jp/product/consult/consult_list05/consult05_01.html

考えられる。

本稿では、レーザセンサを搭載した車両で取得したレーザ点群を用い、路面の横断方向の形状(轍掘れ)を調査する。路面において自動車の走行でタイヤが接する部分は徐々に陥没し、横断方向に凹凸を生じる。轍掘れのある道路の状態を図2に示す。轍掘れは国土交通省が定める、舗装の維持修繕の要否を判定する指標である Maintenance Control Index (MCI; 維持管理数)の要素として用いられる。レーザセンサ搭載車両の走行で収集したレーザ点群から、道路部分のみの点群マップを作成し、直線化処理を施したのち、長方形のメッシュを用いて専用車両で取得するものと同形式の轍掘れデータを生成する。また、レーザ点群から抽出した轍掘れの値について、専用の調査車両で検出した値との比較を行って、レーザセンサを用いた路面性状調査の可能性を議論する。

2. 関連研究

路面性状調査には、画像ベース、加速度ベースなど様々な方法があり、それぞれ対象とする路面欠陥の種類が異なる。例えばひび割れを検出する場合は画像ベースの手法が多く存在 [1] する。CrackTree[2]では画像に写り込んだ影を排除し、より精度の高いひび割れの検出を目指している。Gavilánら [3]の手法では、SVMを利用して路面の種類(アスファルトの色合いなど)を識別し、適応的に処理を行って高精度にひび割れを検出している。レーザセンサを利用してひびの深さを認識する例もある [4]。レーザセンサによる手法では、Tsaiら [5]が低照度環境(夜間)におけるひび割れ検出を行っており、路面にできる影や時間帯に依存しない検出に有用であるとしている。これらで利用する車両は、カメラやレーザセンサが路面に向けられており、精細な情報を得られる一方で、専用車両を用意する必要がある。また、一度の走行で複数の車線を同時に調査できない。

また、加速度センサを車両に搭載し、路面にできたポットホール(アスファルト舗装が剥がれて生じた穴)の探索や、平坦性の評価を行う研究もある。Chenら [6]は、加速度センサで得た値から平坦性に関する指標の算出を行っている。ポットホールの探索はErikssonら [7]が行っており、ボストンでタクシーに加速度センサを取り付けてデータを収集し、路面の異常と判定された地点から橋梁の接続部などを排除してポットホールを検出している。さらに、Mednisら [8]は計測機材としてAndroid端末の加速度センサを利用している。これらの研究では、得られる情報が自動車のタイヤやサスペンションなどに影響されるため、タイヤが通過しない部分の欠陥や、小さな欠陥の高精度な検出には複雑なアルゴリズムを開発する必要がある。

路面の横断形状の認識では、Liら [9]がレーザセンサを用いる手法を提案している。キャリブレーションを施したラインレーザとカメラを用いて轍掘れの検出や、スピード

バンプ、ポットホールの検出などを行っている。しかし、Huiら [10]はラインレーザを用いる調査車両が左右にふらつくことで生じる計測の誤差について検証を行っており、正確に横断形状を得るにはレーザのカバー幅の拡張が必要であると述べている。

本稿では、自動車の屋根に設置されたレーザセンサのみによる路面性状調査の可能性を検討する。このセンサは周辺環境を認識し、自車位置を把握するためのものであるため、得られるレーザ点群は路面以外の構造物を含む。路面のみの情報を捉えるカメラ・レーザによる手法と比較すると、一度に複数の車線の情報を得られる点が大きなメリットとなる。また、多数の自動運転車両が走行する環境では、常に路面の情報を収集できるため、時間的に密度の高い調査が行えると考えられる。一方でレーザセンサから路面までの距離は専用車両と比較して長くなり、また点の密度も低くなる。そこで本稿では点群から得られる路面性状として横断方向の凹凸を抽出し、専用車両のデータと比較してその精度を調査する。

3. レーザ点群からの凹凸抽出

提案手法による凹凸の抽出は、図3に示すような処理フローとなる。まずレーザセンサ搭載車両で走行中に得たレーザスキャンを記録した rosbag ファイルを、自動運転ソフトウェア Autoware[11]で処理し、(1)Normal Distributions Transform (NDT) マッピングによる車両位置・姿勢、(2)地面のみのレーザスキャンを得る。これら2つを用いて、地面のみの点群マップを生成する。さらに NDT マッピングの車両位置・姿勢を元に、アフィン変換を行って点群マップを直線状に並べる。最後に、直線状になった点群を長方形のメッシュで分割し、凹凸を抽出する。

3.1 地面のみの点群マップの作成

地面のみの点群マップの作成には Autoware が備える点群マップ作成機能である NDT マッピングと、レーザスキャンを地面部分とそれ以外に分割する機能である ground filter を利用し、それらと連携する自作プログラムを用いた。自作プログラムは、Robot Operating System (ROS) のノードとして動作し、NDT マッピングの出力である各レーザスキャンにおける車両位置・姿勢と、ground filter の出力である地面部分を抽出したレーザスキャンを組み合わせ、地面部分のみの点群マップを作成する。図4に、NDT マッピングで出力される通常の点群マップと、地面のみの点群マップを示す。図を見ると建物と思われる構造物が排除されている様子がわかる。また、以後の処理で利用するため、地面のみの点群マップを保存する際は NDT マッピングによる車両位置・姿勢のデータも同時に作成するようにした。

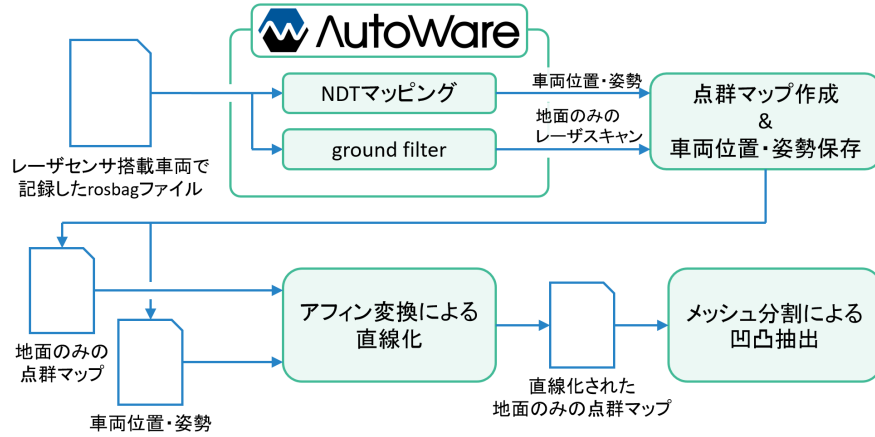
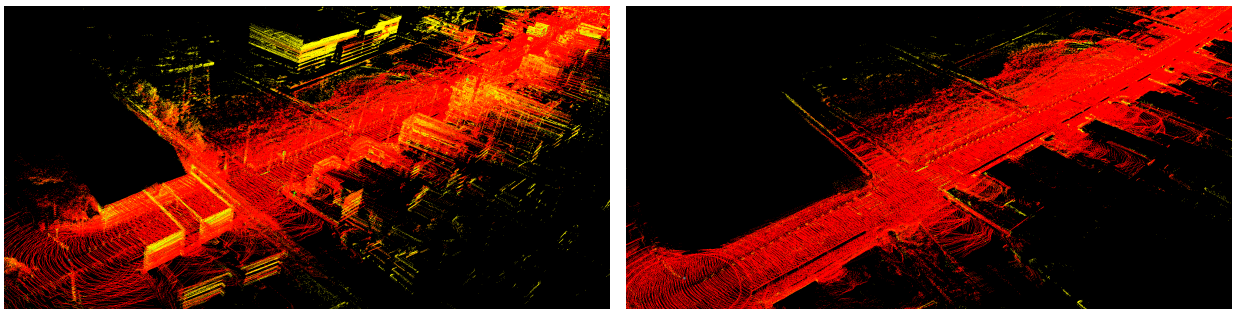


図 3: 提案手法の処理フロー



(a) NDT マッピングで出力される通常の点群マップ

(b) 地面のみの点群マップ

図 4: レーザスキャンからの点群マップ生成

3.2 アフィン変換による点群マップの直線化

前節で作成した地面のみの点群マップは、道路の曲がりや道路以外の地面も含んでおり、そのままでは以降の処理に適さない。そこで、アフィン変換を用いて直線化する。ここでは、点群マップの各点について、 z 方向(天地方向)を無視して扱い、 x 軸上に道路が伸びていくように変換を行う。直線化ではまず NDT マッピングによって得た車両位置・姿勢のうち車両位置について、車両が一時停止しているときに同じ位置が複数出力されるため、ひとつ前の位置から 1.5m 以内に入力されたものを取り除いた。その後、時刻 t の車両位置 $c_t = (x_{c_t}, y_{c_t})$ について、時刻 $t+1$ の車両位置 $c_{t+1} = (x_{c_{t+1}}, y_{c_{t+1}})$ へ向かう方向と垂直に、左右 10 メートルの点 l_t と r_t を取得する。これらの点の座標を $l_t = (x_{l_t}, y_{l_t})$ と $r_t = (x_{r_t}, y_{r_t})$ とすると次の式 1 および 2 で表される。ここで、 θ_t は式 3 で表される。

$$\begin{bmatrix} x_{l_t} \\ y_{l_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c_t} \\ y_{c_t} \end{bmatrix} + 10 \begin{bmatrix} \cos(\theta_t + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta_t + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{r_t} \\ y_{r_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c_t} \\ y_{c_t} \end{bmatrix} + 10 \begin{bmatrix} \cos(\theta_t + \frac{3\pi}{2}) \\ \sin(\theta_t + \frac{3\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta_t = \arctan \frac{y_{c_{t+1}} - y_{c_t}}{x_{c_{t+1}} - x_{c_t}} \quad (3)$$

次に、 l_t, r_t について、アフィン変換による移動後の点

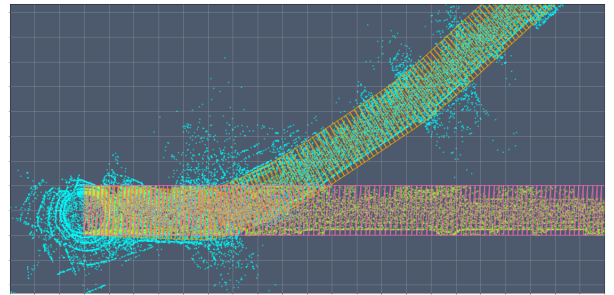


図 5: アフィン変換による点群マップの直線化の例

l'_t, r'_t を求める。これらの点は式 4 および 5 で表される。 d_a は時刻 t までの車両の累積移動距離で、式 6 で表される。ただし $t=0$ の場合は、 c_0 の原点からの距離とする。

$$\begin{bmatrix} x'_{l_t} \\ y'_{l_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_a \\ 10 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x'_{r_t} \\ y'_{r_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_a \\ -10 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$d_a = \sum_{\tau=0}^t \sqrt{(c_{x_\tau} + c_{x_{\tau-1}})^2 + (c_{y_\tau} + c_{y_{\tau-1}})^2} \quad (6)$$

最後に、 $l_t, r_t, l_{t+1}, r_{t+1}$ の四角形を $l'_t, r'_t, l'_{t+1}, r'_{t+1}$ に移動する。移動では、 l_t, r_t, l_{t+1} を l'_t, r'_t, l'_{t+1} に移動させるアフィン変換を用いて l_t, r_t, l_{t+1} の三角形内に存在する点を移動さ

せ, r_t, l_{t+1}, r_{t+1} を r'_t, l'_{t+1}, r'_{t+1} に移動させるアフィン変換を用いて r_t, l_{t+1}, r_{t+1} の三角形内に存在する点を移動させる。それ以外の点は移動の対象外とする。これをすべての車両位置について行うことで、点群マップを直線状に変換する。

アフィン変換によって直線状になった点群マップの例を図5に示す。変換前の三角形は図内にオレンジ色で示し、変換後の三角形は図内にピンク色で示す。変換前の点群は水色で、変換後の点群は黄緑色で示す。図より、徐々に曲がっていく経路が直線に修正されていることがわかる。また、どの三角形にも属さなかった点は直線化された点群には現れないため、不要な点は取り除かれる。

3.3 メッシュ分割と横断勾配の排除による凹凸抽出

アフィン変換により直線状に変換した点群マップでは、 x 軸が道路の進行方向に、 y 軸が道路の左右方向(横断方向)に対応する。凹凸の抽出では、 x 方向を1メートル単位、 y 方向を5センチメートル単位で分割するメッシュを用い、メッシュ上の各セルに属する点の z 方向の値の平均値を計算し、凹凸のデータとする。

また、道路面は雨水の排出を促すために横断勾配が設けられており、中央部が盛り上がったアーチ状の構造となっている。専用車両によるデータは車道外側線と中央線を結ぶ直線が水平になるように処理が施されているため、同様の処理を点群マップから計算した凹凸データにも適用する。ここでは、車両位置が常に車線中央で $y = 0$ にあるものとし、 $y = 1.5$ に運転手から見て左側の車道外側線が、 $y = -1.5$ に中央線が、 $y = -4.5$ に右側(対向車線)の車道外側線が来るものとした。これらのレーンマーキングの位置にあるセルが示す高さをそれぞれ z_{ll}, z_{cl}, z_{rl} とし、 $y = y_i$ を持つセルが示す高さ z は、次の式で表される z' に変換される。

$$z' = z - z_{fix} \quad (7)$$

$$z_{fix} = \begin{cases} z_c + \frac{z_c - z_r}{3}(y_i + 1.5) & (y_i \leq -1.5) \\ z_c + \frac{z_l - z_c}{3}(y_i + 1.5) & (y_i > -1.5) \end{cases} \quad (8)$$

4. 専用車両データとの比較

4.1 使用データ

評価に使用するデータは、愛知県一宮市の2地点における調査で取得されたものである。調査地点を図6に示し、各調査地点の片道の経路長を表1に示す。調査では、2017年11月10日にニチレキ株式会社の専用車両が各地点で1往復の往路・復路で1車線ずつ計測を行った。レーザーセンサ搭載車両は2017年11月7日に各地点を2往復し、1つの調査地点で往路・復路について合計8回分の計測を得た(レーザスキャンは2車線分のデータを含むため、片道で往路・復路の1計測を取得できる)。レーザ点群の記録に用い

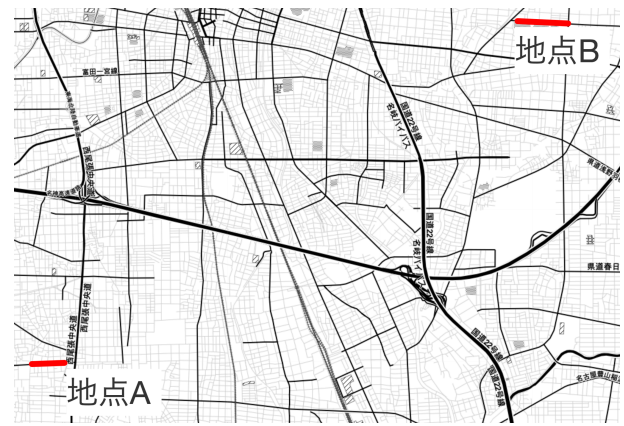


図6: 愛知県一宮市での調査地点

表1: 各調査地点の片道の経路長

調査地点	経路長 (m)
A	460
B	696

たレーザーセンサは Velodyne 社の VLP-16^{*3}である。

4.2 轍掘れ形状図による比較

横断方向の凹凸を直接プロットした轍掘れ形状図の例を図7に示す。利用したデータは調査地点5のもので、往路・復路でそれぞれ算出された轍掘れ形状を、往路をセンターラインからマイナス側、復路をセンターラインからプラス側に配置するよう並べてプロットし、片道で利用可能な4つの点群マップで算出した高さの平均を取ったものも示す。図7(a)と7(b)は専用車両で取得したデータとうまく合致している例であり、図7(c)および7(d)はうまく合致しなかった例である。

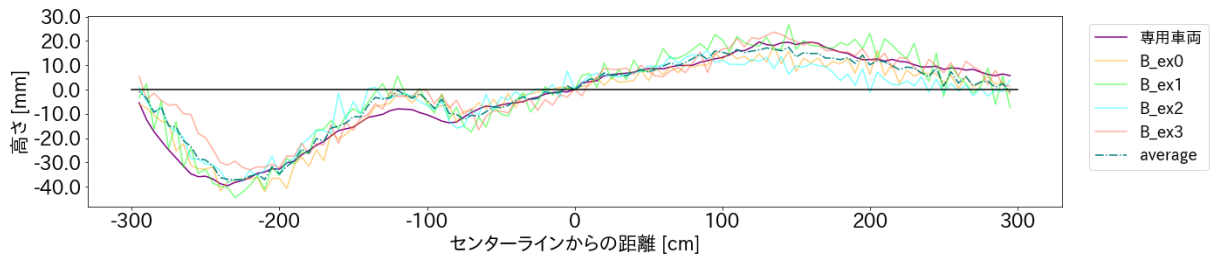
うまく合致しなかった原因として、図7(c)と7(d)では別の原因が考えられる。図7(c)の場合は3.3節における道路の横断勾配の排除である。車道外側線の位置を固定値としたため、車両位置が車線中央でない・幅員が狭いなどの場合、車道外側線として指定した地点にガードレールや縁石等の構造物がある。その構造物と中央線を結ぶ線を基準に高さを補正したために大きな誤差を生じた。図7(d)の場合は、3.1節において地面をフィルタリングした際に、地面以外の構造物が取り除けなかった地点だと考えられる。

また、平均を取ることでより専用車両のデータに近づいており、レーザーセンサ搭載車両が複数回走行するとより高精度に路面の凹凸を検出できると考えられる。

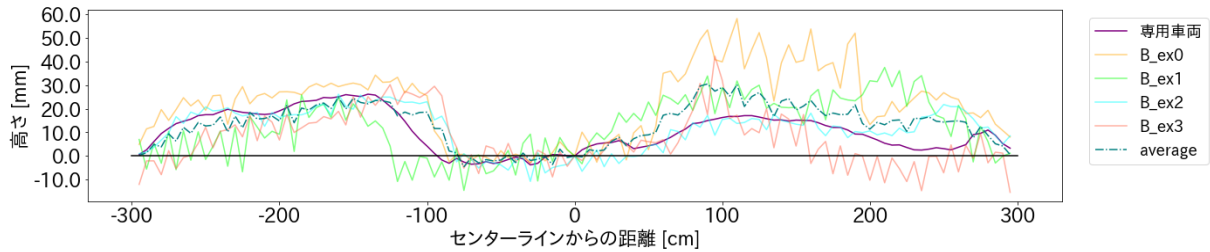
4.3 誤差の分布

各点群計測の平均を取ることによって、専用車両で取得できるデータに近いデータが得られることがわかった。そこで、専用車両のデータと、各点群の平均のデータについ

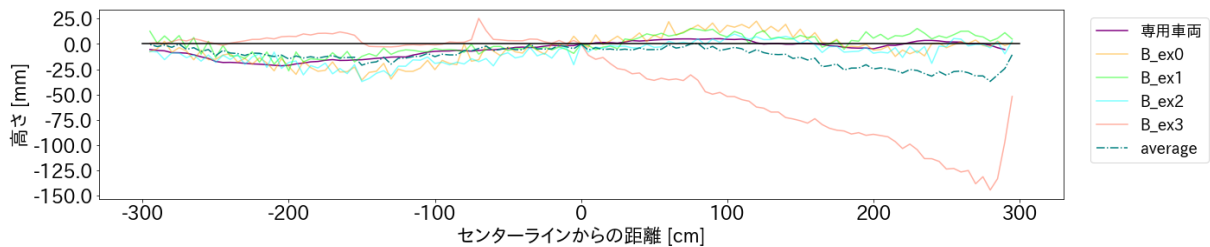
^{*3} <http://velodynelidar.com/vlp-16.html>



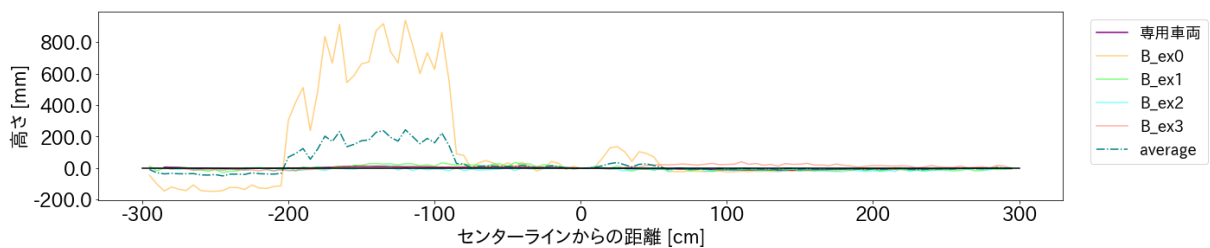
(a) 専用車両のデータと合っている例 (1)



(b) 専用車両のデータと合っている例 (2)



(c) 車道外側線の位置合わせに失敗した例



(d) 構造物が排除されなかったと思われる例

図7: 轍掘れ形状図

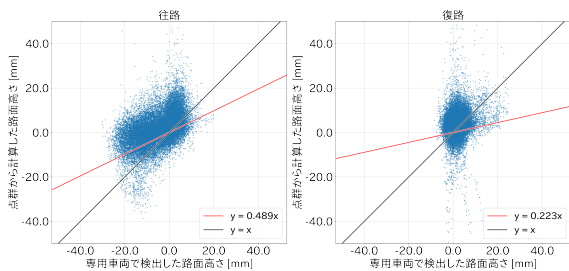
(往路と復路をセンターライン基準で合成)

て、横軸に専用車両で得た路面の高さ、縦軸に各点群の平均で得た路面の高さをプロットした散布図を作成した。図7(d)に示すような構造物の影響を取り除くため、プロット時は、高さが $[-200, 200]$ [mm]の範囲にない値は外れ値として除外した。結果を図8に示す。また、両者のデータが合致する際の直線 $y = x$ および、両者の間の相関係数 r を算出し、それを係数に用いた $y = rx$ の直線も示す。

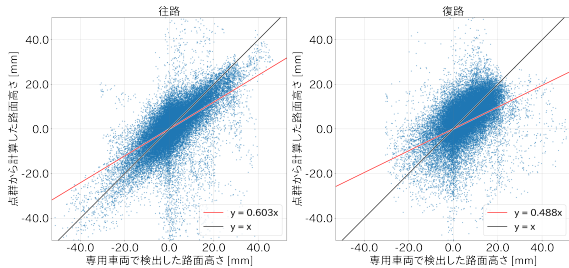
図より、地点Aでは専用車両の計測で大きな凹凸がなく、相関係数も低い値となった。一方、地点Bの往路では大きな凹凸が観測されており、点群から計算した値でもそれに応じた凹凸が捉えられ、相関係数も高い値となった。また、地点A,Bともに専用車両の高さ0mm周辺で誤差を生じており、これらの点の高さを正しく認識できるように改善すると、よりよく路面の凹凸を捉えられる。

5. 結論

本稿では、自動運転車両が搭載するレーザセンサを用いた路面性状調査について、道路横断方向の凹凸である轍掘れの検出を行った。レーザセンサで取得した点群について、Autwareを利用して地面のみの点群マップを生成し、車両位置を元にした点群の直線化を行ったのちに、メッシュ化を施して専用車両のデータと同形式の凹凸データを得た。愛知県一宮市で行った調査データと用いて比較を行ったところ、うまく凹凸を検出できている箇所とできていない箇所があった。凹凸の検出に失敗する例としては、横断勾配の修正に用いる車道外側線の位置が不正確である・地面のみの点群を作る際に排除しきれなかった構造物が混ざっているなどであった。



(a) 地点 A



(b) 地点 B

図 8: 専用車両データと点群から計算したデータの平均の相関

精度向上のために複数の点群のデータから平均を計算し、地点によって異なる相関となり、大きな凹凸がない地点では相関も弱かった。したがって、専用車両のデータには及ばないものの、専用車両による調査が必要な地点を探すスクリーニング調査へ利用できると思われる。

今後の課題としては、外れ値の排除や、車線認識を利用したより正確な凹凸の計算が挙げられる。継続的な調査による経年劣化の検出なども必要になる。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17B1 および JSPS 科研費 JP17H01762 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Sylvie Chambon and Jean-Marc Moliard. Automatic Road Pavement Assessment with Image Processing: Review and Comparison. *International Journal of Geophysics*, Vol. 2011, pp. 1–20, 2011.
- [2] Qin Zou, Yu Cao, Qingquan Li, Qingzhou Mao, and Song Wang. CrackTree: Automatic Crack Detection from Pavement Images. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 33, No. 3, pp. 227–238, 2012.
- [3] Miguel Gavilán, David Balcones, Oscar Marcos, David F. Llorca, Miguel A. Sotelo, Ignacio Parra, Manuel Ocaña, Pedro Aliseda, Pedro Yarza, and Alejandro Amírola. Adaptive Road Crack Detection System by Pavement Classification. *Sensors*, Vol. 11, No. 10, pp. 9628–9657, 2011.
- [4] W. Ouyang and B. Xu. Pavement Cracking Measurements using 3D Laser-scan Images. *Measurement Science and Technology*, Vol. 24, No. 10, 2013.
- [5] Yi-Chang James Tsai and Feng Li. Critical Assessment of Detecting Asphalt Pavement Cracks under Different Lighting and Low Intensity Contrast Conditions using Emerging 3D Laser Technology. *Journal of Transportation Engineering*,

Vol. 138, No. 5, pp. 649–656, 2012.

- [6] Kongyang Chen, Mingming Lu, Xiaopeng Fan, Mingming Wei, and Jinwu Wu. Road Condition Monitoring using On-board Three-axis Accelerometer and GPS Sensor. In *2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, pp. 1032–1037, 2011.
- [7] Jakob Eriksson, Lewis Girod, Bret Hull, Ryan Newton, Samuel Madden, and Hari Balakrishnan. The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. In *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '08*, pp. 29–39. ACM, 2008.
- [8] Artis Mednis, Girts Strazdins, Reinholds Zviedris, Georgijs Kanonirs, and Leo Selavo. Real Time Pothole Detection using Android Smartphones with Accelerometers. In *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, pp. 1–6, 2011.
- [9] Qingguang Li, Ming Yao, Xun Yao, and Bugao Xu. A Real-time 3D Scanning System for Pavement Distortion Inspection. *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, 2010.
- [10] Bing Hui, Yichang (James) Tsai, Mu Guo, and Xiaofang Liu. Critical Assessment of the Impact of Vehicle Wandering on Rut Depth Measurement Accuracy using 13-point Based Lasers. *Measurement*, Vol. 123, pp. 246–253, 2018.
- [11] Shinpei Kato, Eijiro Takeuchi, Yoshio Ishiguro, Yoshiki Ni-nomiya, Kazuya Takeda, and Tsuyoshi Hamada. An Open Approach to Autonomous Vehicles. *IEEE Micro*, Vol. 35, No. 6, pp. 60–68, 2015.