

舗装劣化の空間的自己相関を考慮した修繕トリージ方法の開発

Repair triage considering spatial autocorrelation of pavement deterioration in life road network

室蘭工業大学建築社会基盤系学科 ○学生員 可知宏太 (Kouta Kachi)
室蘭工業大学大学院工学科 正員 浅田拓海 (Takumi Asada)

1. はじめに

近年、我が国では、インフラの老朽化が顕著となり、橋梁、トンネル、下水道、舗装などの各部門で維持管理計画の策定、実施が喫緊の課題となっている。市町村が管理している生活道路では、舗装の劣化が居所的、面的に進行しており、住民からの修繕の要望も多い。多くの自治体では、通常、日常的なパトロールや住民からの報告により劣化箇所を特定し、補修、修繕等の措置を判断している。一方で、このような居所的、主観的な点検では、措置の対象箇所に偏りが生じ、維持管理の公平性に欠けるなどの問題が指摘される。管理道路全てを短期間かつ定量的に調査した上で、補修・修繕箇所の優先ランク付け（トリージ）することが望ましいが、関連予算や人員の制限から実現は難しい。

このような状況を背景に、近年、車載カメラを用いた走行調査と画像解析を組み合わせた点検アプローチが注目されている。例えば、市販のデジカメで撮影した路面画像に動的2値化処理を適用してひび割れ評価を自動化した浅田らの研究¹⁾、ひび割れ解析にDeep learningを導入した全らの研究²⁾などが代表的である。さらに、昨今では、電気、車両メーカーなどの参入も見られ、同様なシステムが次々と開発されている³⁾。しかしながら、既往のシステムでは、カメラ等の専用機器が高価なことや、従来の目視点検などの再現性が検証されていないことから、特に、市町村への導入は難しく、生活道路を含んだ全面的な調査にまで至った事例は極めて少ない。その中で、著者らは、IoT型車載カメラとAI(CNN: Convolutional Neural Network)による舗装点検システム(以下、IoT/AI型舗装点検システム)を開発するとともに、平成30年度に室蘭市の生活道路を含む全管理道路を対象として、上記システムにより舗装ひび割れの測定を実施し、位置情報付きの舗装劣化データベースの構築を実現させた⁴⁾。

本研究では、上記の舗装劣化DBの活用について検討する。具体的には、各箇所の舗装劣化に加え、「劣化箇所のまとまり」や「近隣住民の関心」を考慮した生活道路の舗装修繕トリージ方法を提案し、ケーススタディからその妥当性と有効性を示す。

2. IoT/AI型舗装点検システムの開発⁴⁾

2.1 車載カメラを用いた撮影調査

先行研究では、市販の小型アクションカメラ(Gopro Hero 6)を車両ボンネットに設置し、走行しながら前方路面の動画撮影を行った。このカメラは、高精度なGPSロガーを備えており、さらに、スマホと

のBluetooth通信により車内から操作可能であること、動画データをクラウド上にアップロード可能であることから、IoTカメラとして利用されるケースもある。

車内対象路線は、室蘭市管理道路の440km(中心線距離)である。基本的には往復方向を調査の対象とするが、幅員4m未満の生活道路は1方向のみ撮影し、全幅員を評価対象とした。片側2車線以上の幹線系の路線は、歩道側車線のみを対象とした。調査期間は、平成30年8月から11月であり、日射の影響を受けない時間帯(午前10時～午後15時)に動画撮影を行った。

2.2 CNNによるひび割れ評価

撮影した動画から、位置情報を基に5m区間毎に静止画を抽出した。次に、静止画の小片部(16×16ピクセル)毎に、CNNモデルを適用してひび割れを細かく検出した。モデルの教師データのために、PC画面上でひび割れスケッチを行った。そのスケッチの色情報を基に、16×16ピクセルサイズのひび割れ「有」「無」のラベル付きの画像をそれぞれ1,754,261枚、2,285,000枚抽出し、学習に用いた。学習方法としては、ミニバッチ学習法を採用し、バッチ数を1,000枚、エポック数を2,000回に設定した。

学習済みのモデルを路面画像に適用することで、図-1に示すようなひび割れ検出画像を得ることができる。ひび割れ評価としては、舗装調査・試験法便覧の路面性状測定車によるアスファルト舗装を対象とした目視スケッチによる手法⁵⁾を参考にした。図-1に示すように、0.5×0.5mで描いたメッシュ毎にひび割れ検出部の有、無を判定し、以下の式(1)により、ひび割れ率(以下、CR: Crack Ratio)を算出した。

$$CR(\%) = \frac{\text{ひび割れありメッシュ数}}{\text{全メッシュ数}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 従来目視評価の再現性

目視によるひび割れ評価は簡易であるため、昨今、採用事例が増えている。そこで、本システムでこの目視評価を再現できるかを検証するため、画像上または路上での目視評価実験を行った。ともに対象路面を見て、ひび割れ度合いを5段階で評価してもらった。評価者による個人差を低減するため、事前に目安となる画像とそのひび割れ率を評価者に見せ、これを確認しながら評価を行ってもらった。5段階評価は、ひび

割れ率 0%~10%を評価 1, 10%~20%を 2, 20%~30%を 3, 30%~40%を 4, 40%以上を 5 とした. 評価者は, 室蘭市の道路維持管理業務経験者 5 名である.

本システムでは, 市販の廉価な小型カメラで走行しながら, さらに, 角度をつけて路面を撮影する. そのため, まずは, ひび割れを的確に撮影できているのかを確認する必要がある. そこで, 画像と路上での目視評価 (5 名の平均値) の関係について調べたところ, 図-2 に示すように, 両者の R^2 値は約 0.9 となり, ほぼ 1 対 1 の関係となった. したがって, 簡易な撮影ではあるものの, 画質に問題はなく, 画像を用いた目視評価でも路上の場合と同等な結果が得られると言える.

次に, 画像を 100 枚追加して同様に目視評価実験を行った. 5 名の目視評価平均値と 本システム による ひび割れ率との関係を図-3 に示す. 誤差が大きいケースが幾つか見られるものの, R^2 値は約 0.8 となった.

以上から, 低コスト, 簡易な本システムにより, 安全, 迅速な調査が実施でき, さらに, 従来の目視と同等かつ客観的な評価結果を得ることが可能となった.

3. 舗装劣化 DB を用いた修繕トリアージ

本章で開発したシステムを用いて, 平成 30 年度に室蘭市の全管理道路を撮影, 解析し, 舗装劣化 DB を構築した. 位置情報も付いているため, 5m 区間ごとのひび割れ率が GIS 上にマッピングでき, どのような地区, 路線, 区間で舗装が劣化しているのかを容易に確認できる. しかしながら, 住宅エリアに広がる生活道路では, 修繕箇所を判断する際には, 劣化だけではなく, 沿道の住宅数や交通量などを考慮することが望ましい⁶⁾. ただし, 交通量データは容易に入手できるものではない. また, 生活道路では供用条件が大きく異なること, 重交通が少ないことから, 交通量や劣化予測よりも現在の劣化状況の全容把握が重要と考える自治体もある⁷⁾. 一方, 住宅については, データを揃えている自治体も多く, 航空写真などからデータ化することも容易である. そこで, 本研究では, 市町村管理道路へのフィージビリティの観点から, 本システムによる舗装劣化 DB と住宅データの 2 つを用いた舗装修繕トリアージ方法について検討する.

3.1 住宅近接度を考慮した舗装修繕優先度 RP

市町村では, 家の前や住んでいる周辺の道路に対する住民の関心は大きく, 舗装の補修, 修繕の要望が多く寄せられる. そこで, 住宅が, 近いほど, 沢山あるほど, その区間への関心度が高いと考え, 住宅からの距離の逆数とその延床面積を掛けた値の合計を当該区間への「住宅近接度」とした. 区間 i への住宅近接度 (以下, HPI_i) は, 以下の式(2)を用いて算出する.

$$HPI_i = \sum_{j=0}^n \frac{s_j}{d_{i,j}} \quad (2)$$

ここで,

S_j : 延べ床面積: m^2

d_{ij} : 区間 i と住宅 j の距離

n : 区間 i から 100m 以内の住宅数



図-1 CNN によるひび割れ検出の例

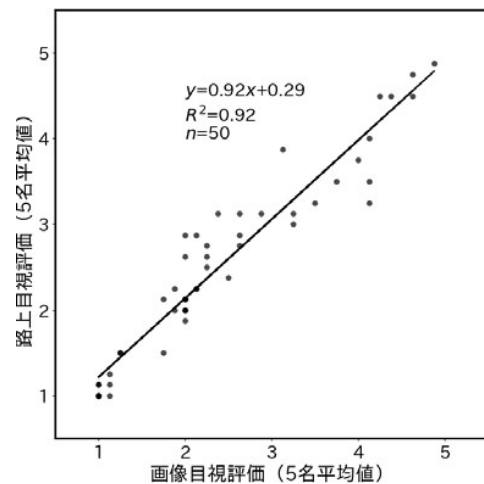


図-2 画像上と現場での目視評価の関係

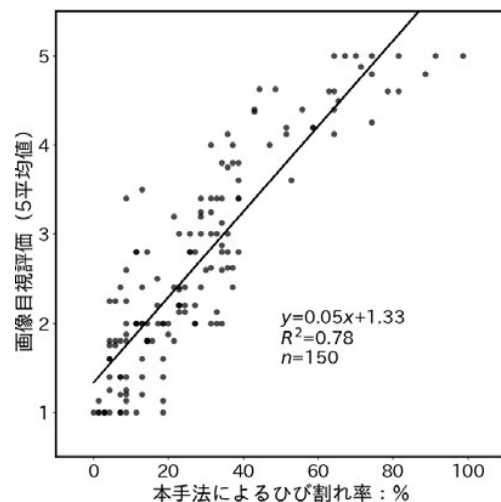


図-3 本システムと画像上での目視評価の関係

なお, 住宅データには, 平成 19 年の室蘭市都市計画基礎調査データを用いた.

一方, ひび割れ率による修繕判断では, 20%, 40%という基準が用いられる場合が多い. そこで, これらの基準を超える箇所を見逃さないように, CR をベースに上記の住宅近接度を加算するような舗装修繕優先度 (RP : Repair Priority) を考案した. RP は, 以下の式(2)により算出する.

$$RP = CR * HP^{\alpha} \quad (3)$$

ここで、

CR : ひび割れ率 : %

HP : 正規化した住宅近接度

α : 住宅近接度の重要度 (0~1)

HP は、市内全区間の中央値で除した後に 1 を加えて正規化した。これにより、 HP は 1 以上となるため、 α がどの値でも $RP \geq CR$ となる。したがって、 RP でも 20% や 40% などのひび割れ率の基準を利用できる。例えば、 $\alpha=0$ のときは、 $RP=CR$ である。 α を大きくしていくと、沿道や近隣の住宅を考慮した値となる。この α は、自治体や地区毎の実情などに応じて設定できる。

3.2 ひび割れ率の空間的自己相関と空間ラグ変数

本研究では、「ひび割れ率が高い箇所は周りも大きい。すなわち、ひび割れ率の分布には空間的自己相関がある。」という仮説を検証するために、ひび割れ率データを用いてモランの I 統計量を算出した。なお、市全体のデータを用いると、値が偏っている路線や地域を含み空間的自己相関の傾向が見づらくなることから、地区別に I 統計量を算出した。以下に算出の流れを示す。

まず、空間重み行列 w_{ij} を求める。本研究では、区間をポイントとみなして、空間的關係性を表現するため、重みには「閾値有りの距離の逆数」を採用した。区間 i と区間の j の距離に逆数を $1/d_{i,j}$ とすると w_{ij} は、以下のような行列式(4)で表現される。なお、閾値は 100m とし、それ以上となる要素は 0 とする。また、以降の計算のために行基準化を行った。

$$w_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 1/d_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/d_{i,1} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

次に、行基準化した w_{ij} を用いて、以下の式(5)からグローバルモラン I 統計量を算出した。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

ここで、

x_i, x_j : 区間 i または j のひび割れ率 : %

$\bar{x}$: ひび割れ率の平均値 : %

この I が 1 に近いほど空間的自己相関の度合いが大きくなる。 I の p 値が得られるため、有意水準 $\alpha=0.01$ により「空間的自己相関がない」という帰無仮説に対して検定を行った。全地区から算出した I の分布を図-4 に示す。 I は約 0.4 をピークとした正規分布を示している。また、 p 値は全地域で 0.01 以下であったことから、ひび割れ率には空間的自己相関があると言える。

また、式(6)から CR の空間ラグ変数 CRL を算出した。

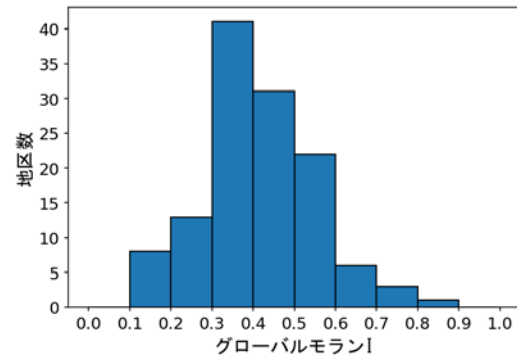


図-4 各地区のグローバルモラン I

$$CRL_i = w_{ij} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、

CRL_i : 区間 i のひび割れ率の空間ラグ変数

w_{ij} : 行基準化した空間重み行列

x_j : 区間 j のひび割れ率

CRL は、距離の逆数を重みとした加重平均である。つまり、周りにひび割れ率が大きく、近い区間が多いほど、当該区間の CRL は大きくなる。

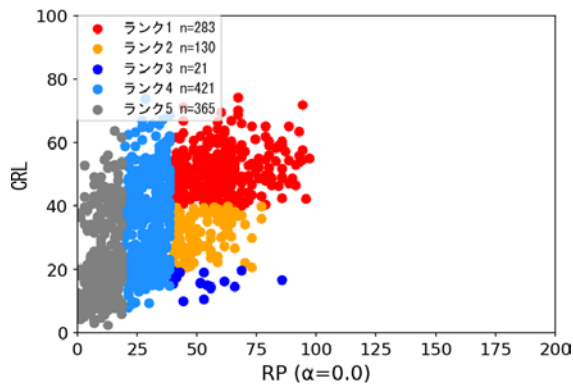
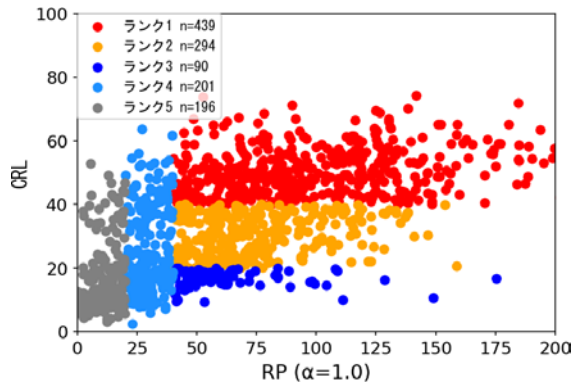
3.3 RP と CRL による修繕トリアージ方法

上記から算出される RP と CRL を基にした舗装修繕トリアージ、すなわち優先ランク付けの方法を提案する。 RP ($\alpha=0$) と CRL の関係を図-5a に示す。 RP ($\alpha=0$) はひび割れ率 CR と等しい。そこで、ひび割れ率の基準 20%、40% を RP に適用する。さらに、 $RP \geq 40\%$ では、 CRL で 3 つに区分する。 CRL は、ひび割れ率の加重平均値であることから、これに 20%、40% の基準を適用すると、5 つのランクに区分することができる (図-5a)。さらに、図-5b に示すように、 α が大きくなるほど、 RP が大きくなるため、優先ランクが高くなることがわかる。

次に、 RP と優先ランクをマッピングした結果を図-6 に示す。 RP ($\alpha=0$) はひび割れ率 CR を意味するため、これだけで見ると、 $CR \geq 40\%$ の箇所が多く、修繕対象の選定が難しい。これに対し、優先ランク ($\alpha=0$) を見ると、 $CR \geq 40\%$ かつ $CRL \geq 40\%$ の箇所、すなわち優先ランク 1 のように、修繕対象箇所がさらに絞られる。なお、優先ランクが高い区間では、周りに CR が大きい区間が集まっていることがわかる。また、優先ランクにおいて、 α を大きくすると、周辺の住宅との近接度が大きくなるため、優先度 1 や 2 が多くなり、これらが連続した区間を抽出することが可能となる。

4. まとめ

本研究では、舗装ひび割れ率の空間的自己相関と住宅近接度を考慮した新たな舗装修繕トリアージ方法を開発

図-5a RP と CRL による舗装修繕の優先ランク付け図-5b RP と CRL による舗装修繕の優先ランク付け

した。得られた結果を以下に示す。

- ・モランの I 統計量を用いて、ひび割れ率 CR には空間的自己相関があることを示した。
- ・住宅の位置と延べ床面積から区間への住宅近接度 HP を算出し、それを CR に加点することで当該区間の修繕優先度 RP を評価した。
- ・ひび割れ率の空間ラグ変数 CRL と RP から 5 段階の優先ランク付けを行い、これらをマッピングして、本方法の妥当性と有効性を確認した。

本研究では、 HP や CRL を算出する際、地点間のユークリッド距離を使ったため、実際の移動距離が考慮されていない。今後は、交通ネットワークによる最短距離の計算を行い、より実態、感覚に近くなるように各指標を修正する予定である。

謝辞：本研究で用いた舗装劣化データベースは、室蘭市との共同研究によって得られた成果である。同市都市建設部土木課には、調査と精度検証において多大なるご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 深谷渉, 末久正樹, 賀屋拓郎：スクリーニング調査を核とした管渠調査方法の技術評価：B-DASH プロジェクト（管渠マネジメントシステム）の実証研究, 土木技術の総合情報誌, Vol.57, NO.2, pp.32-35, 2015.
- 2) 全邦釘, 井後敦史, 南免羅裕治, 黒木航汰, 大窪和明：車載カメラにより撮影された舗装画像からのディープラーニングによるひび割れ率評価, 土木学会論文 E1（舗装工学）, Vol.73, No.3, I_97-I_105,

 $RP : \alpha = 0.0$ 優先ランク : $\alpha = 0.0$ 優先ランク : $\alpha = 1.0$ 図-6 RP と優先ランクの空間分布

2017.

- 3) 浅田拓海, 川村和将, 石田篤徳, 亀山修一：Convolutional Neural Network を用いたひび割れ・パッチングの高精度検出手法の開発, 土木学会論文 E1（舗装工学）, Vol.74, No.3, I_131-I_138, 2018.
- 4) 武藤聡, 久保和幸, 藪雅行：「舗装点検要領」の策定について, 舗装, Vol.52, No.1, pp.11-15, 2017
- 5) 大窪和明, 全邦釘, 橋爪謙治, 藤田尚：道路舗装の劣化速度に関する探索的空間データ分析, 土木学会論文 E1（舗装工学）, VOL.74, No.3（舗装工学論文 E1 第 23 巻）, I_95-I_103, 2018
- 6) あきる野市 都市整備部管理課：あきる野市道路舗装維持補修の優先順位設定評価基準
- 7) 横浜市のアセットマネジメントシステム構築に向けた生活道路の評価方法（土木学会舗装工学論文 E1 第 13 巻 2008 年 12 月）