

階層ベイズによる空間的關係性を考慮した空港滑走路舗装の劣化予測

東京都市大学 学生会員 ○田崎 陽介
東京都市大学 正会員 吉田 郁政

1. はじめに

日本において、空港舗装を対象とした維持管理計画に関する既往研究の多くは舗装補修指数 PRI (Pavement Rehabilitation Index) ¹⁾に基づく検討がなされている。劣化特性の空間的な特性や不確定性を考慮した研究はまだ多くない。

著者ら ²⁾は実在する空港滑走路舗装を対象とし PRI を用いて空間的な關係性を考慮した劣化特性の空間分布推定と直線による劣化予測を行った。しかし、切片を固定したことで、過度の拘束条件となっていた可能性がある。本研究では、劣化予測式の切片と傾きに対し、空間的關係性を考慮した空間分布推定を行う。更に、その結果に基づき劣化予測を行った。

2. 対象とする空港滑走路の点検データ

本研究では熊本空港の点検データをもとに検討をおこなった。熊本空港の滑走路は縦 30m, 横 21m を 1 ユニットとし、全 100 ユニットからなり、ユニットごとに CR ひび割れ率 (%), RD わだち掘れ (mm), SV 平坦性 (mm) が測定されている。空港舗装を対象とした舗装補修指数 PRI は次式より定義される ¹⁾。

$$PRI = 10 - 0.45CR - 0.0511RD - 0.655SV \quad (1)$$

PRI の値から補修の必要性が 3 段階で評価される。

ユニットごとに最小二乗法を用いて、PRI と補修からの経過年の關係から、直線による劣化予測式を求めた。その結果として、劣化予測式の傾きの分布を図-1 に示す。ユニット 50 付近で傾きの値が正となり、劣化が回復するような不自然な結果となった。本研究ではユニット 1 から 85 を対象に検討を行った。

3. 空間的關係性を考慮した劣化予測の考え方

PRI の値のばらつきは全体的に大きく、各ユニットで得られているデータはあまり多くはない。そこで、空間方向の滑らかさを導入した最小二乗法により劣化予測式の推定を行う方法の概要を示す。詳細な考え方は文献 ²⁾を参照されたい。

(1) 差分を事前情報とした最小二乗法の定式化

未知パラメタベクトルについて期待値 $\bar{x}$ とその共分散行列 M が事前情報として与えられるとする。次に、観測方程式 $z = Hx + v$ で与えられるとする。ここで、 v は観測量誤差ベクトルを表し、その共分散行列ベクトル R を表す。未知パラメタの事前情報に関する不確定性と観測量誤差が互いに独立なガウス分布に従うと仮定し、事前情報も観測量の一部として考えて定式化して尤度関数を求め、-2 を乗じると、パラメタ推定のための次の目的関数を誘導することができる。

$$J = (x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (z - Hx)^T R^{-1} (z - Hx) + \ln|M| + \ln|R| + (n + m)\ln(2\pi) \quad (2)$$

x そのものではなく隣り合う要素の差分 Dx に対して平均 0 の事前情報を与える。

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

最小化の条件より以下の式が誘導される。

$$x = \frac{1}{\sigma_R^2} PH^T z \quad (3) \quad P = \left(\frac{1}{\sigma_R^2} H^T H + \frac{1}{\sigma_M^2} D^T D \right)^{-1} \quad (4)$$

分散 σ_M^2 , σ_R^2 の値は式(2)を最小化するように決める。

(2) 空港滑走路の各ユニットの劣化特性予測式

観測量ベクトル z が点検によって得られた各ユニット 1 から nu までの PRI の値とする。

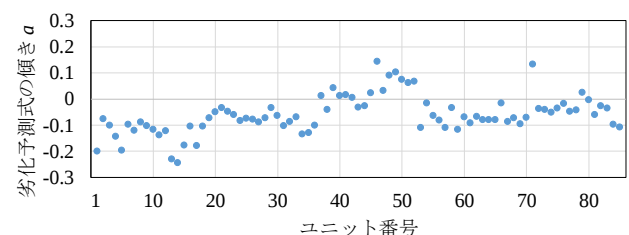


図-1 ユニットごとの劣化予測式の傾き

キーワード 維持管理, 空間分布推定, 空港土木施設, 滑走路, PRI

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL : 03-5707-0104 E-mail : g1681715@tcu.ac.jp

$$\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_{nu})^T \quad (5)$$

空港滑走路の劣化予測式を次式のように仮定する.

$$z = at + b \quad (6)$$

$\mathbf{z}_{old,A}$ を全データの PRI 値, $\mathbf{H}_A$ を全データの補修からの経過年とすると,

$$\mathbf{z}_{old,A} = \mathbf{H}_A \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (7)$$

ここで,

$$\mathbf{H}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{H}_{nu} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_{ni} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ \vdots \\ a_{nu} \\ b_{nu} \end{bmatrix}$$

観測ベクトル $\mathbf{z}_i$ や $\mathbf{H}_i$ はユニットごとに定義され, その成分の大きさは ni である. 誘導した方法は最小二乗法の回帰係数の確率分布を考えて場所ごとの特性を考慮していると解釈することができる.

4. 空間的な関係性を考慮した劣化予測の結果

分散の比 σ_M/σ_R によって解が決まり,

$$\alpha = \frac{\sigma_M}{\sigma_R} \quad (8)$$

とする. α を変化させて, ユニットごとの劣化予測式の傾き a_i と切片 b_i を算定した. 劣化予測式の傾き a_i の分布状況を図-2 に示す. α の値が小さければ小さいほど滑らかさが増し, 各劣化特性はユニットによらず一定の値に漸近する. また, 空間的な関係性を考慮せずユニットごとに最小二乗法を用いて劣化予測をした場合, 劣化予測式の傾き a_i の値が正となり, 劣化が回復するような不自然な結果も見られたが, α の値が 0.1 以下の場合, 劣化予測式の傾き a_i の値はすべて負の値となり, 不自然な結果は見られなかった.

$\alpha=1.0$, $\alpha=0.001$ とした場合の, ユニット 50 における劣化予測の結果を図-3 に示す. $\alpha=1.0$ とした場合は, 劣化が回復するような不自然な結果であるが, $\alpha=0.001$ とし空間的な関係性をより考慮した場合は, 劣化予測としてより自然な結果となった. また, 推定誤差は正規分布に従うと仮定し, $\pm 2\sigma_{est}$ の範囲を図の灰色の網掛けで示す. ユニット i における, ある時点 t_i での σ_{est} は $\mathbf{LPL}^T$ の対角成分より

$$\sigma_{est_i} = \sqrt{\sigma_{a_i}^2 t_i^2 + 2 \text{cov}(a_i, b_i) t_i + \sigma_{b_i}^2 + \sigma_R^2} \quad (9)$$

と示すことができる. ここで,

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{H}_{nu} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_i = [t_i \quad 1]$$

であり, σ_a , σ_b は(4)式に示す共分散行列 $\mathbf{P}$ の対角成分に相当する. 空間的な関係性が弱いほど, ユニットごとの点検データに依存し, 誤差は大きくなる.

5. おわりに

点検データがあまり多くないユニットがある場合にも, 空間方向の滑らかさを導入した最小二乗法により劣化予測式の推定を行う方法の提案を行った.

今後は, 情報の価値 (Value of Information, VoI) という考えに基づき最適な点検・補修計画の検討を行う.

参考文献

- 1) 福手勤, 佐藤勝久, 八谷好高, 山崎英男: 路面性状による航空舗装の供用性評価, 港湾技研資料, No.414, 1982.
- 2) 田崎陽介, 吉田郁政: 空港滑走路を対象とした劣化特性の空間分布の評価とその予測, 第 29 回信頼性シンポジウム講演論文集, pp. 20-25, 2016.

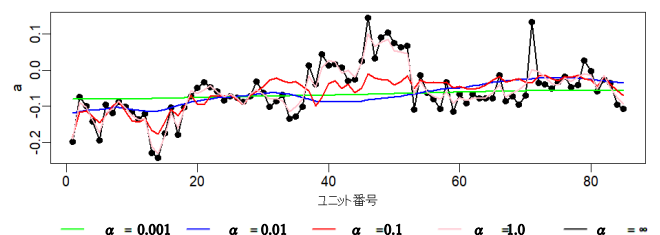
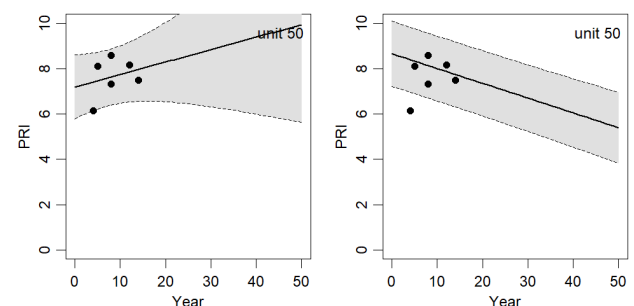


図-2 空間的な関係性を考慮した劣化予測式の傾き



(1) $\alpha=1.0$ とした場合 (2) $\alpha=0.001$ とした場合

図-3 空間的な関係性を考慮した劣化予測