

大規模構造物の建設時の補強度合決定問題に対する自然状況を考慮した多クラスサポートベクトルマシン

01308104 大阪大学 *巽 啓司 TATSUMI Keiji
大阪大学 増井 遼太 MASUI Ryota

1. はじめに

近年、少子高齢化に伴う労働人口の減少にともない、インフラ建設・整備や維持管理においても人手不足が深刻な問題となっている。そのため、大規模なインフラの建設・整備での危険度チェック等の判断を、AI (Artificial Intelligence) の導入により自動化・知能化する動きが見られる。本研究では、ある一つの種類の大型構造物の建設時補強度合決定問題に対し、多クラスサポートベクトルマシンを適用し、識別率の高い識別機を構成することを目的とする。

2. インフラ構造物の補強度識別

大型構築物における補強度とは、トンネル建設時であれば、上または横からの荷重を支える構造物である支保工パターンの度合を表し、橋梁や道路であれば、補強・補修の必要性の程度を表すものとする。その際、熟練者が建設状態に対して目視などの観察を行い、概ね 30 程度の項目の危険度を数値ベクトルとして表し、その観測ベクトルを考慮して補強度合を決定している。著者らは、この観測ベクトルから補強度合を決定する過程の自動化を目指す。

大型構造物の建設時は、構造物全体を適当な区間に分割し、その区間ごとに逐次的に作業が行われる。上記の補強度合は、各区間ごとに熟練者による観測により得られる観測ベクトルと、その区間の自然状況（立地環境や岩質など）を考慮して決定されている (図 1) ¹。

区間 i での m 次元観測ベクトル

$$\mathbf{x}^{(i)} = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)^\top \in \mathbb{R}^m$$

に対し、教師信号として、その区間 i での補強度合

$$y_i \in \{1, 2, \dots, l\}, i \in I := \{1, \dots, n\}$$

¹本来、各構築物ごとに、各々、適切な用語が用いられるが、本稿では、大型構築物一般の建設時の状況を一般的に述べるためこのような抽象的な表現を用いる。



図 1: 構造物建設時の作業順・区間

が与えられる。また、各区間での自然状況 r は、 \bar{r} 個の段階 $R := \{1, \dots, \bar{r}\}$ が存在し、構造物は、ほとんど同じ自然状況のもとで建設される場合も、様々な異なる自然状況のもとで建設される場合もある。通常、各評価項目の観測ベクトル要素 $x_j^{(i)}$ や $r(i)$ が大きいほど、補強度合 y_i も大きくなる (単調性)。

熟練者による補強度合の判断の際は、区間 i の自然状況 $r(i) \in R$ に応じて $\mathbf{x}^{(i)}$ の各要素に対する重みベクトル $\mathbf{d}^r = (d_1^r, \dots, d_m^r)^\top$, $r \in R$ がこれまでの経験に基づいて調整されており、その重み (既存重みと呼ぶ) を用いたスカラー評価値 $\sum_{j=1}^m d_j^{r(i)} x_j^{(i)}$ を参考にして補強度合が決定される。

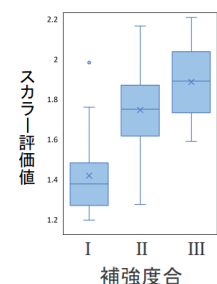


図 2: スカラー化評価値

この値により補強度合ラベルが一意に定まることが理想的であるが、実際の構造物データでは、スカラー値が同じでもラベルが異なるケースが多数存在する。図 2 は、一つの構造物データの全区間 $i \in I$ のデータに対する上記スカラー評価値とラベルの分布を表す。さらに、実データでは、観測ベクトルは同じで、補強度合が異なるデータも存在し、その矛盾の解消も必要である。さらに、公共性の観点から識別の判断根拠の説明可能性を保

持するため識別器としては、なるべく非線形性を含まない表現が望ましい。

3. 補強度合識別問題の定式化

本研究の目的は、新しい構造物の観察データ \mathbf{x} 自然状況 $r(i)$ に対する適切な補強度合を出力するような識別関数

$$f: \mathbb{R}^{m+1} \rightarrow L := \{1, 2, \dots, l\}$$

を機械学習を用いて作成することである。その際、上記の単調性を満たすように、同じ法線ベクトルを持つ複数の識別超平面 $\mathbf{w}^\top \mathbf{z} = \mathbf{w}^\top (\mathbf{x}^\top, r)^\top = p_k$, $k \in L_0 := \{1, 2, \dots, \ell - 1\}$ を用いて、各2クラス (k および $k+1$) を識別する。

著者らは、上記の矛盾解消のため、現在の区間だけでなく、すでに構築済の過去区間の情報も用いた、時系列入力に対して補強度を決定する識別器を構成する拡張のもとで以下の多クラス線形サポートベクトルマシン (SVM) を提案している [1].

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, v, p} \quad & \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{u}\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & p_{y_i-1} + 1 \leq \mathbf{w}^\top \mathbf{z}^{(i)} \\ & + \sum_{t=1}^{\tau} u_t (\mathbf{d}^{r(i-t)})^\top \mathbf{x}^{(i-t)} \leq p_{y_i} - 1, \quad i \in I, \end{aligned}$$

である。ただし、本稿全体を通じて、簡単のためハードマージンモデルを示す。また、常に $p_0 = 0$, $p_l = \infty$ である。このとき、入力 $\mathbf{x}^{(i)}$ に対する識別関数は、

$$f(\mathbf{x}^{(i)}) = \min \left\{ k \in L \mid \mathbf{w}^\top \mathbf{x}^{(i)} + \sum_{t=1}^{\tau} u_t (\mathbf{d}^{r(i-t)})^\top \mathbf{x}^{(i-t)} \leq p_k \right\}$$

となる。多数の異なる建設場所での構造物データを用いて、各構造物データごとに学習、テスト識別 (個別学習) での検証を行い、上記 SVM により高い識別率が得られる一方、構造物データごとに得られた識別器が大きく異なることを確認した。さらに、一つの構造物データをテストに、残りの構造物データを学習に用いた統合学習を行うと、得られる識別器が比較的似ており、個別識別の場合よりも劣るものの、従来法に比べて高い識別率が得られることも確認した [1].

4. 自然状況を考慮した SVM

本研究では、前述の統合学習を行う前提のもと、新規の構造物に補強度合決定を行う際、その構造物の特徴に適した識別が可能な識別器構築を考える。そのため、現在区間の観測ベクトルに対する重み \mathbf{w} を自然状況ごとに変化させ、また、過去区間の観測ベクトルに対する既存の重み \mathbf{d}^r , $r \in R$ を学習により改善する方法を提案する。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, \mathbf{u}, p} \quad & \sum_{r \in R} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}^r\|^2 + \sum_{r \in R} \frac{1}{2} \|\mathbf{v}^r\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & p_{y_i-1} + 1 \leq (\mathbf{w}^{r(i)})^\top \mathbf{x}^{(i)} \\ & + \sum_{t=1}^{\tau} \gamma^t (\mathbf{v}^{r(i-t)})^\top \mathbf{x}^{(i-t)} \leq p_{y_i} - 1, \quad i \in I. \end{aligned}$$

ここで、前述のモデルと異なり、スカラー化した過去区間観測ベクトルに対する重み $\gamma, \gamma^2, \dots, \gamma^\tau$ は、求解上の都合で、定数 $0 < \gamma < 1$ で与えている。

上記の定式化やいくつかのバリエーションを、統合識別を用いた数値実験を行い比較した。その結果、現在区間の観測ベクトルに対する重みについては、自然状況に無関係に共通のものを、過去区間の観測ベクトルに対する重みについては、重みを既存重みの近傍に限定する条件

$$\|\mathbf{d}^r - \mathbf{v}^r\| \leq \rho \|\mathbf{d}^r\|, \quad r \in R$$

をさらに追加することや、さらに、求まった最適解を中心とする近傍内を用いて繰返し解くことでも、識別率向上が図れることを確認した。

5. おわりに

本論文では、大型構築物に対する補強度合決定問題に対する SVM の改良として、過去区間の観測ベクトルに対する重みを適切に限定することが識別率向上となることを確認した。

参考文献

- [1] K. Tatsumi, S. Tsujioka, R. Masui, Y. Kusunoki, Y. Yun, "Determination of reinforcement degrees in constructing large-scale structures by using multiclass support vector machines," *Knowledge-Based Systems*, 249 pp. 108807-108807 (2022)