

転移学習ガウス過程回帰代替モデルによる構造性能解析の計算負荷低減

筑波大学大学院 学生会員 ○才田 大聖
筑波大学 正会員 西尾 真由子

1. はじめに

構造物の性能評価には、その限界状態を統計的に計算する信頼性解析が必要とされる。この性能評価では一般にモンテカルロ (MC) 計算を行うことで、構造物の不確定性を考慮するが、不確定パラメータの増加によって MC 計算のコストは指数的に増加してしまい現実に計算を行うことが難しい。そこで、数値解析計算を代替する回帰モデルを構築し、それによって MC 計算を行うことで、計算コストを低減することが有効である。構造性能解析への代替モデルの適用に関しては、すでに多くの研究がなされており、その有効性が示されている。しかし、代替モデルの研究のほとんどは、対象解析にのみ有効な代替モデルを構築しており、別の解析を対象とする場合には、再度一から代替モデルを構築する必要がある。そこで本研究では、転移学習を用いたガウス過程回帰 (GPR) によるサロゲートモデル (TL-GPRSM) を構築し、構造性能解析の計算コスト低減を検証する。転移学習によって、既に構築されている対象解析に類似性のある入出力データを考慮して、対象解析への代替モデル構築に必要な訓練データ数を削減できる。また、GPR で関連度自動決定 (ARD) カーネルを使うことで、各入力パラメータの出力に対する寄与度を推定することができる。この ARD と転移学習手法を組み合わせることで、代替モデル構築における転移学習の有効度合いを評価することを検討した。

2. TL-GPRSM の理論

TL-GPRSM では、ARD を適用した Matern5/2 カーネルで GPR モデルを構築する。また、転移学習手法として、GPR にも適用可能であり、直感的な理解がしやすい Daume によって提案された方法で転移学習を実現する。この転移学習手法では、データ拡張によって転移学習を実現しており、図-1 のように、common パート、source パート、target パートにデータ拡張する。ここで、代替モデルの対象とする入出力関係を target ドメインと呼び、あらかじめ別のモデルで使用された入出力関

係を source ドメインと呼ぶ。ここで、上付き文字 S と T は、それぞれ source ドメインと target ドメインを示す。このデータ拡張したデータを用いて GPR モデルを構築する。common パートでは source ドメインと target ドメインの両方を考慮し、source パートでは source ドメインのみを考慮し、target パートでは target ドメインのみを考慮する。この common パートを含むデータ拡張により、TL-GPRSM で source ドメインの情報を target ドメインの予測で利用することが可能になる。また、ARD カーネルを用いることで、各部が出力に与える寄与度を推定することができる。common パートの寄与度が target 部の寄与度に対して相対的に大きい場合、転移学習が有効であると判断できる。

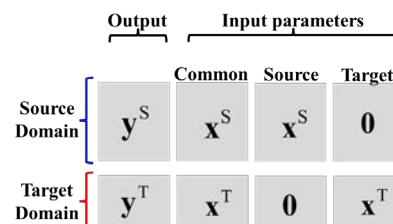


図-1 転移学習におけるデータ拡張

3. 免震 RC 橋脚の地震応答解析の TL-GPRSM の構築

本研究では基礎検証のために、道路橋の耐震設計に関する資料で諸基値や計算結果が示されている、免震 RC 橋脚の地震時刻歴応答解析を対象とした。図-2 に示す橋脚と上部構造の 2 質点 2 自由度系モデルで、免震支承及び RC 橋脚の履歴特性をバイリニアモデル、武田モデルとして水平バネでモデル化した。時刻歴応答解 RC 橋脚は 2% の減衰比として Rayleigh 減衰を仮定した。その上で、図-2 中の 8 つのモデルパラメータで、諸元値析の時間増分は 0.001 秒とし、数値積分法には Newmark- β 法を用いた。構造減衰は、免震支承は 0%、に対して $\pm 10\%$ 上下限値の一様分布として不確定性を表し、代替モデルの入力とした。各ケースで橋脚と免震支承の最大変位を代替モデルの目的出力とした。入力地震動が設計地震動 Level2Type1-1-1 と Level2Type2-1-1 の時の解析の入出力を source ドメイン、観測地震動で

キーワード サロゲートモデル, ガウス過程回帰, 転移学習, 構造性能解析

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1-1 TEL 029-853-6192

ある JMAKOBE を入力地震動とする解析の入出力を target ドメインとして、TL-GPRSM を構築した。

検証では、各 source ドメインのデータ数を 200 ずつとして、target ドメインのデータ数を変えながら TL-GPRSM を構築し、評価をした。評価方法として、代替モデルの精度を二乗平均誤差パーセント (RMSPE)、予測累積分布を定性的なグラフの重なりから評価した。また、代替モデルの予測の安定性を評価するため、各ケースで 10 回の代替モデル構築を行い評価した。図-3 に支承の最大変位を予測した時の RMSPE を示す。赤線が TL-GPRSM による予測、青線が転移学習なし代替モデルでの予測によるものである。この図を見ると、特に target ドメインのデータ数が 100 以下の場合に、TL-GPRSM は転移学習なし代替モデルよりも高い精度での予測ができていくことがわかる。また、図-4 に ARD 推定による各パートの寄与度を示す。この図を見ると、図-3 で RMSPE が低い学習データの範囲では、common パートの target パートに対する寄与度が比較的高くなっていることが確認できる。このことから、転移学習が有効であったといえる。また、図-5 に RC 橋脚と免震支承の最大変位の累積分布を示す。赤線が 10 回の target データ数 50 での TL-GPRSM 構築によるものであり、黒線がテストデータによるものである。この図を見ると、TL-GPRSM による予測はテストデータとよく一致しており、ばらつきも小さい。最大変位の分布が構築した代替モデルで適切に推定できることがわかる。この結果から、あらかじめ設計地震動による信頼性解析を

行っておき、そのデータを TL-GPRSM によって考慮することで、地震災害時に観測された地震動による信頼性解析を低コストで行うことが可能である。

4. 結論

本研究では、転移学習を用いた GPR による代替モデル (TL-GPRSM) を提案した。橋脚の地震応答解析に TL-GPRSM を構築し、その有効性を検証した。その結果、TL-GPRSM は転移学習なし代替モデルに比べて、少ないデータ数で精度の良い代替モデルの構築が可能であった。また、ARD カーネルを用いた寄与度推定から、転移学習の有効度を判定することができた。

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR205T の支援を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- H. Daumé III, Frustratingly Easy Domain Adaptation, ArXiv [Cs.LG]. (2009). <http://arxiv.org/abs/0907.1815>.
- 持橋大地 大羽成征著. "ガウス過程と機械学習 / Gaussian process and machine learning". 講談社, 2019,

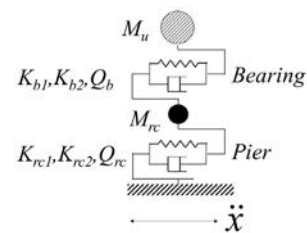


図-2 免震 RC 橋脚の 2DOF モデル

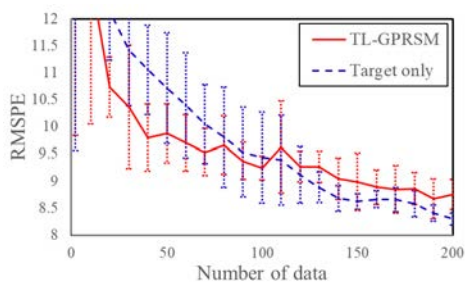


図-3 SM による支承の最大変位予測の RMSPE

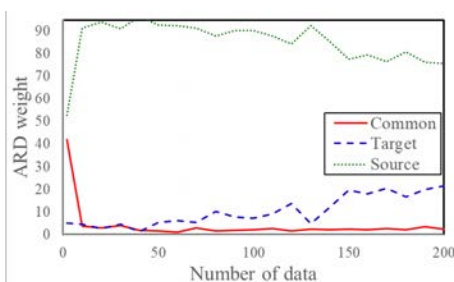


図-4 TL-GPRSM 構築中の各パートの寄与度の推移

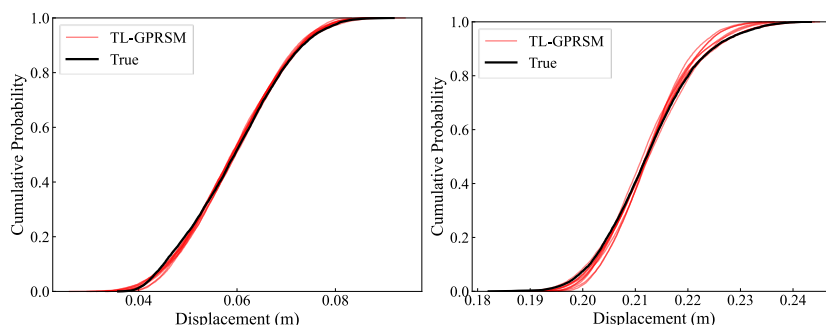


図-5 TL-GPRSM による予測累積分布 (左: 橋脚, 右: 支承)