

## 分類型の機械学習モデルによる早期地震警報

野田俊太、岩田直泰、是永将宏（鉄道総合技術研究所）

### 概要

新幹線の早期警報用地震計は、沿線の変電所敷地内等に設置されるため、地震動以外にも列車通過時の振動等を観測する。現在の地震計は、P 波開始から最短 1 秒のデータで地震諸元を推定して警報出力判定を行う（P 波警報）ため、その短時間のデータから振動が列車等によるものか地震動かを正確に分類（識別）する必要がある。地震動を列車振動と誤認すると、P 波の分析による警報判定を行うことができず、主に S 波到達以降となるしきい値（規定値）超過判定による警報出力を待つ必要がある。したがって、この分類精度の向上は、警報の迅速化および地震時の走行列車の安全性向上に直結する。なお、現行手法によるこの識別の再現率（Recall）は、地震動・列車振動共に約 90%である（岩田・他, 2016）。本発表では、この問題に時間的な再帰性を考慮したニューラルネットワーク（Recurrent Neural Network: RNN）を適用し、その精度を評価した結果を報告する。

RNN は、時系列データの処理に適したニューラルネットワークの一種であり、過去の入力情報を保持し、それを次の入力処理に反映させることで、時間的な連続性のパターンや相関関係を学習することができる（例えば Panakkat & Adeli, 2007）。しかし、標準的な RNN には、長いシーケンスにわたる依存関係を学習する際に勾配消失や重み衝突などの課題が存在する。これらの問題を解決するために、LSTM（Long Short-Term Memory）や GRU（Gated Recurrent Unit）といった拡張モデルが提案されている（例えば Titos et al., 2019）。本研究では、LSTM と GRU を用いて解析を行い、その有効性を評価した。

解析に使用したデータは、K-NET で観測された 12,450 個の地震波形および新幹線地震計で観測された 1,307 個の地震波形記録である。さらに列車振動記録として、新幹線地震計で計測された 10,002 個のデータ、および鉄道総合技術研究所の日野土木実験所（東京都日野市）内で計測された JR 中央本線を走行する列車による 5,687 個のデータを用いた。なお、この日野土木実験所のデータには、周辺を走行する自動車による交通振動も含まれている。

RNN モデルには、1 秒ごとに切り出した 3 成分加速度振幅値をシーケンスとして入力した。このとき、列車振動データはすべて非地震動（ラベル 0）としてラベリングした。なお、列車は遠方から徐々に接近し、振動開始時点を明確に決定することが容易ではないため、常時微動や強い振幅を示す列車振動も同様にラベル 0 とした。地震動データについては、手動検測によって P 波開始時刻を決定し、地震動の振幅レベルが P 波開始前のノイズレベルの 10 倍以下となる状態が 2 秒以上継続した時点をもって地震動の終了と判定した。1 秒のシーケンス内に 0.3 秒以上の地震動のシグナル部（P 波開始から地震動終了まで）が含まれるものを地震動（ラベル 1）とし、それ以外は列車振動データと同様に非地震動（ラベル 0）とした。時間的な連続性を考慮するため、1 つの波形記録内のシーケンスデータはシャッフ

ルせず、波形記録自体を列車振動・地震動を問わずランダムにシャッフルした。データは、訓練用、検証用、テスト用にそれぞれ 60%、20%、20%の割合で分割した。解析には、TensorFlow を用いて LSTM および GRU モデルを構築した。過学習を防ぐため、20%の確率でニューロンをドロップアウトさせた上で、検証用データの損失が 5 エポック連続で改善しない時点で学習を停止させた。以下では、学習を停止させた時点までで最良の検証損失を示したエポックのモデルを用いて、テスト用データに対して評価した結果を示す。

解析によって得られた精度 (Accuracy)、適合率 (Precision) および再現率 (Recall) などの各指標は、LSTM と GRU を用いた場合で有意な差は認められない。ただし、GRU のほうが 1 シーケンスあたりの平均処理時間がわずかに短い傾向が確認されたが、その差は大きいとは言えない。Accuracy などの精度の指標にはハイパーパラメータによる影響が見られるが、列車振動および地震動の Recall はそれぞれ概ね 99%、94~95%という結果が得られた。これは、現行地震計の処理手法による値（共に Recall は約 90%；岩田・他，2016）と比較して有意に高い値である。この結果から、RNN を地震動と非地震動の分類に適用することで、地震警報の出力精度を向上させる可能性が示唆された。今後は、本手法を実装した早期警報用地震計を開発し、地震時の走行列車のさらなる安全性向上を目指す。

## 謝辞

本研究では、K-NET および新幹線地震計で観測された波形記録を使用させていただきました。記して感謝申し上げます。