

建設機械におけるオイルセンサ情報を教師例としたオイルの状態推定モデル構築

Development of Oil Condition Estimation Model for Construction Machinery

Using Oil Sensor Data as Supervised Labels

日立建機（株）（正）*倉迫 彬 日立建機（株）（正）櫻井 茂行 日立建機（株）（正）秋田 秀樹

日立建機（株）（非）萩原 美伸 福井大学（正）本田 知己 福井大学（正）今 智彦

Akira Kurasako*, Shigeyuki Sakurai*, Hideki Akita*, Yoshinobu Hagiwara*, Tomomi Honda**, Tomohiko Kon**

*Hitachi Construction Machinery Co., Ltd., **University of Fukui

1. はじめに

建設機械業界では、ICTを活用して機械稼働情報を提供するサービスを逐次開始している。その中で、潤滑油の状態監視の要望は非常に強いものがある。それは、潤滑油は一般的に 500 時間間隔で採取され、オフラインで潤滑油の分析が行われているが、分析間隔内において突発的な潤滑油の性状変化を捉えることは難しいためである。この解決策として、オイルセンサを用いた潤滑油性状の常時監視システムを構築し、2017 年 10 月より機械の予防保全に貢献している。この積み上がったオイルセンサのデータを活用し、機械の稼働状態より潤滑油の状態を推定することができれば、オイルセンサが搭載されていない機械にも、効率の良いサービス提供が可能となる。また、推定に関わる様々な因子を整理することで、メンテナンスの説明材料とすることができる。一方、生分解性油の使用を含む潤滑油の交換や、異物混入による急激な潤滑油の性状変化は、稼働情報に影響する項目が含まれていないため、一部のオイルセンサ変化の推定は困難であることが予想される。

以上より本研究では、潤滑油状態の推定可能性を見極めるために、機械から日々送信される稼働情報を用いて、オイルセンサデータを推定する機械学習モデルを構築し、推定精度及び推定に関わる因子の解釈について検討した。

2. 取り扱いデータ、及び学習と検証手法

機械学習の目的変数には作動油のオイルセンサ値を、説明変数には機械の使用時間、各操作モード時間、温度、圧力などを含む稼働情報を用いた。推定精度向上のため、説明変数は前処理で追加演算を行い約 4,500 の特徴量とした。学習器には計算コストが安く分析精度が高い LightGBM を使い、ハイパーパラメータ探索には効率的な探索が可能な Optuna¹⁾を用いた。対象データには、油圧ショベルの単一機種約 2,000 台を対象として、約 420,000 レコードを用いた。

作成した学習済みモデルから得られる予測値とオイルセンサ実測値を比較することで、学習済みモデルの推定精度を評価した。また、学習済みモデルから特徴量の寄与度として SHAP 値²⁾を出力し、推定に関わる因子の現象解釈を行った。なお、オイルセンサ値の目的変数は動粘度補正值、密度補正值、比誘電率補正值の各々としたが、性能評価と現象の解釈は動粘度補正值モデルのみを取り扱った。

3. 学習済みモデルの性能評価と現象の解釈

オイルセンサの動粘度補正值モデルは、予測値と実測値の関係を決定係数、RMSE、頻度分布、散布図より性能評価を行い、SHAP 値より予測に寄与している説明変数の確認と現象の解釈を行った。

決定係数は一般に 0.5 以上であれば良いとされ、動粘度補正值は 0.533 と比較的当てはまりが良かった。RMSE は 1.374 mm²/s と、センサの計測精度±5%以内であった。

Figure 1 に予測値と実測値の差の頻度割合の分布を示す。区間間隔は 0.5 である。予測値と実測値の差が 0 付近を最大として、±2 以内に 9 割のデータが集約されていた。即ち、その範囲において、実測値の 9 割を予測可能なモデルとなっている。

Figure 2 に予測値と実測値の散布図を示す。

予測値と実測値のスケールが同じ範囲を橙色で示し、また「予測値 = 実測値」を赤点線で表示している。散布図の全体の傾向から、予測値が実測値と大きく乖離しているプロットが見られ、頻度分布の結果より赤点線上付近に 9 割のデータが集約されていることから、大部分の実測値については予測可能で一部の实測値は予測できないモデルになっていることが確認された。

Figure 3 に SHAP の beeswarm プロットを示す。上から重要度が高い順に最大 20 個の説明変数が並んでおり、横軸は

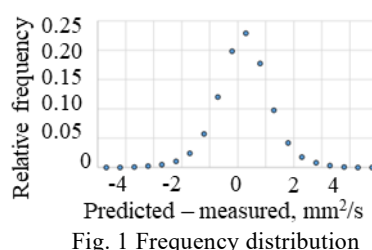


Fig. 1 Frequency distribution

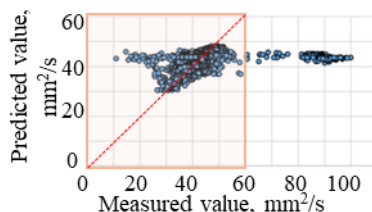


Fig. 2 Comparison of predicted and measured values

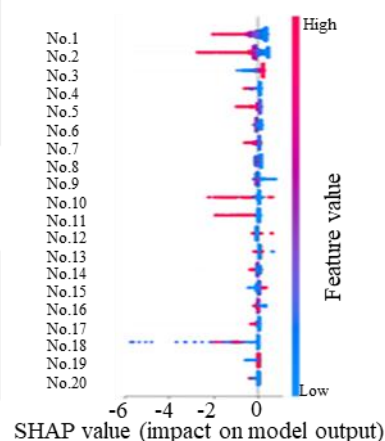


Fig. 3 SHAP values of the trained model

SHAP 値(予測値の変化寄与度), 各プロットの色は説明変数自身の値の大きさを示している. 横軸の分布が広い説明変数が, 予測値に大きく影響することから, 以降では SHAP 値の変化が大きい説明変数に注目する. 予測値の負への寄与が大きい説明変数は, 作動油の特定の温度帯の時間(No.1)や, 燃料使用量(No.2), アタッチメントモード使用時間(No.10, No.11)に関する特徴量が大きいこと, ラジエタの特定の温度帯の時間(No.18)に関する特徴量が小さいことであった. 解釈可能な現象としては, 作動油の特定の温度帯の時間や燃料使用量に関する特徴量が大きいということは, 潤滑油への投入エネルギーが大きく, それにより潤滑油へのせん断による粘度低下と解釈できる. また, アタッチメントモード使用時間に関する特徴量が大きいことは, 標準で用いられるバケットから他のアタッチメントに交換した際に, アタッチメント内の残油が混入して動粘度が変化する事例に近い現象と解釈できる. しかしながら, ラジエタの特定の温度帯の時間(No.18)に関する特徴量が小さいことについては, 解釈可能な現象がなかった.

4. 個別機械の予測値と実測値の時系列データ比較

次に実測値の予測精度が悪くなる原因について, 個別機械の時系列データの比較を通じて深掘りを行った. Figure 4 に個別機械の予測値と実測値の時系列比較を示す. 図中(a), (b), (c)には個別機械における稼働時間に対する動粘度補正值, 密度補正值, 比誘電率補正值の予測値と実測値を示している.

(a)の機械については, 予測値が実測値の変化に追従した例を示している. 稼働時間 700 h で動粘度補正值の実測値がバラツキながら推移していることに, 予測値もバラツキながら追従していた. なお, バラツキが生じていたタイミングではオーバーヒートが発生していたため, 温度に関する説明変数が予測に影響を与えていたことが考えられる.

(b)の機械については, 予測値が実測値に追従しない例を示している. 稼働時間 1,000 h で実測値の密度補正值(約 0.86 から約 0.89)と比誘電率補正值(約 2.3 から約 2.7)が同時に大きく変化したこと, 恐らく初期充填の鉱物油から生分解性油に交換されていると推測され³⁾, そのようなオイル交換が発生すると, 予測値は追従しない結果となった.

(c)の機械については, 予測値が実測値から乖離した例を示している. 稼働時間 11,000 h までの長期な実測値の変化に対して, 動粘度補正值は実測値と予測値が徐々に乖離した. 密度の補正值については実測値があまり変化しないことに対し, 予測値は大きく変化した. この実測値があまり変化しないこととしては, オイル交換が定期的になされていることが考えられ, そのような場合には予測値が追従しない結果となった.

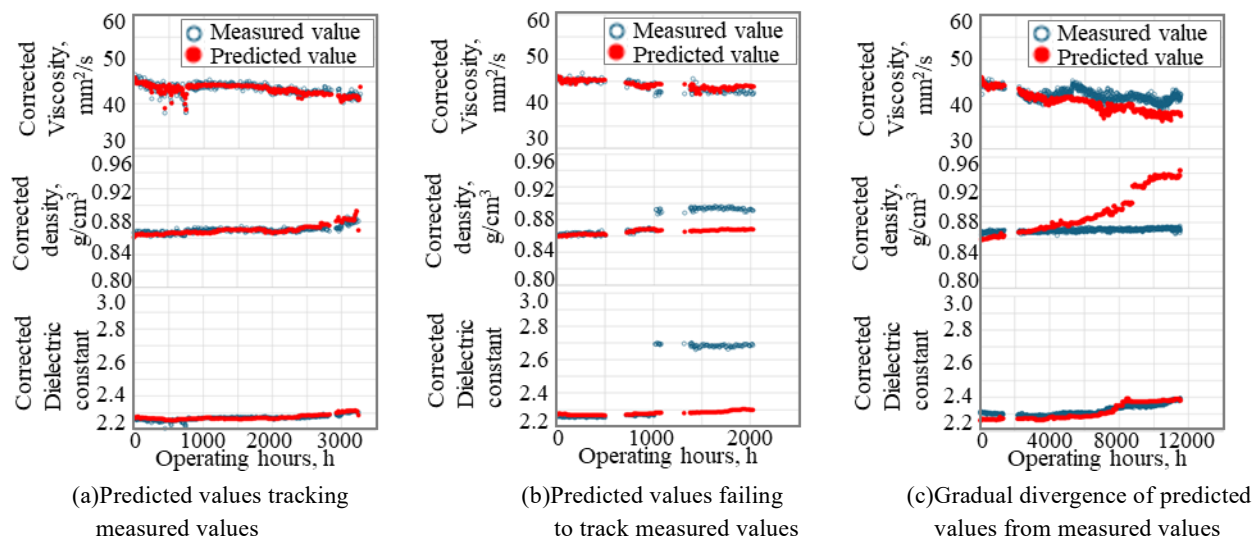


Fig. 4 Comparison of predicted and measured values over time

5. 結言

稼働情報を説明変数とし, オイルセンサを目的変数としたオイルの状態推定モデルを構築し, 推定精度の評価と, 推定に重要な変数について現象の解釈を行い, 以下の知見が得られた. オイルセンサが搭載されていない機械でオイルセンサ値を予測する場合には, これらの知見を加味した運用をする必要がある.

- (1) 実測値と予測値が大きく乖離しているものがみられるが, 全体の傾向としては, 実測値と予測値の差が小さくなるようにデータが分布している. また, 予測値に影響する説明変数の寄与度について, 現象の解釈が可能なものもあれば, 解釈が困難なものもあった.
- (2) 予測値と実測値を時系列で比較した結果, 当初想定していた通り, オイル交換(特に生分解性油)などの突発的な事象の変化を予測することは難しいことを確認した. また, 予測値は実測値のバラツキも含めた変化に追従することもあれば, 予測値だけ大きく変化して実測値と乖離することを確認した.

文献

- 1) 柳瀬利彦: Optuna で始めるハイパパラメータ最適化, 電子情報通信学会, 104, 7 (2021) 728-733.
- 2) S. M. Lundberg & S.-I. Lee: A Unified Approach to Interpreting Model Predictions, In Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (2017) 4765-4774.
- 3) A. Kurasako, H. Akita, M. Honda, Y. Hagiwara, T. Honda & T. Kon: Study of the Applicability of Biodegradable Oil in Oil Condition Monitoring System of Construction Machinery, In Proceedings of the International Tribology Conference Fukuoka(2023) 280.