

UAV 打音検査における欠陥検知のための マルチモーダル情報を活用したエゴノイズ低減

正田 晃己, ルイ笠原 純ユネス, 浅間 一, 安琪, 山下 淳

Ego-noise reduction using multimodal information for defect detection in UAV hammering inspection

Koki Shoda^{*1}, Jun Younes Louhi Kasahara^{*1}
Hajime Asama^{*1}, Qi An^{*1} and Atsushi Yamashita^{*1}

^{*1} The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8563, Japan

We propose a novel method for reducing ego-noise in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) hammering inspections using multimodal information. UAVs are advantageous for inspecting hard-to-reach areas in structures, but their motor-propeller systems generate strong ego-noise, impeding differentiation between defective and healthy hammering sounds. Traditional methods using deep neural networks for differentiation of hammering sound require extensive data and struggle with ego-noise. Our approach predicts and subtracts ego-noise from acoustic data using propeller vibration information, offering a significant improvement in situations with limited training data. This technique enhances sound clarity, significantly advancing UAV auditory capabilities.

Key Words : multimodal; machine learning; sound sensing; field robotics; hammering test

1. はじめに

近年, 橋梁やトンネルなどのコンクリートインフラの老朽化が加速度的に進行しており⁽¹⁾, 打音検査を含む点検が義務付けられている. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) は橋梁下部などのアクセスが困難な場所の点検が可能のため, その研究開発が進められている⁽²⁾. しかし, プロペラやモータから発生する強力なエゴノイズは, 打叩音による欠陥の検知を妨げる.

Wang ら⁽³⁾は, 目的音源とエゴノイズの到来方向が異なることを利用し, 空間フィルタリングによりエゴノイズ低減をする手法を提案している. しかし, UAV はコンクリート面に近接して打音検査を行う. 反響したエゴノイズと打叩音は同じ方向から到来するため, 空間フィルタリングによるエゴノイズ低減は困難である.

Nishimura ら⁽⁴⁾は, Deep Neural Network (DNN) の高い表現力を利用し, エゴノイズを含む打叩音から欠陥を識別する手法を提案している. しかし, ノイズを含む打叩音から DNN を訓練するには, 多量のラベル付きデータが必要となる. 打叩音のラベリングは熟練の点検員が行う必要があるため, 人的リソースの依存度が高い.

そこで本研究は, UAV のエゴノイズ中において得ら

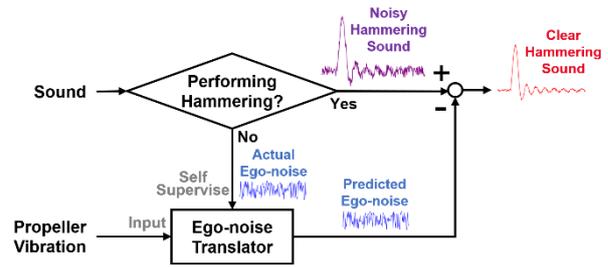


Fig. 1: Concept of proposed method.

れる, より少ない打叩音の訓練データから, より高い精度で欠陥を識別することを目的とする. この課題に対し, 本稿では UAV 打音検査に適したエゴノイズ低減手法を提案する. エゴノイズを低減することで, 打叩音の特徴を明瞭化し, 識別器を効率的に訓練することを目指す.

2. 提案手法

UAV 打音検査におけるエゴノイズ低減は, ノイズと目的音の観測期間が未知である一般のノイズ除去タスクとは異なる. UAV は自発的に打叩をするため, 打叩音とエゴノイズが混ざった音が捉えられる期間と, エゴノイズのみがマイクで捉えられる期間が既知である. また, UAV の主なエゴノイズ源はプロペラであり, プロペラの振動とそこから発生するエゴノイズは強く関係している.

そこで, 提案手法のコンセプトを Fig 1 に示す. プロペラに加速度センサを設置し, その振動を取

得する。プロペラ振動をまるで翻訳するようにエゴノイズを予測し、差し引くことで効果的に低減する。

エゴノイズ Translator は、非打叩期間に捉えたエゴノイズを教師として、自己訓練される。橋梁下部などの入り組んだ現場では、点検場所ごとに反響環境が異なることが想定されたため、予測劣化の検知と修正を可能にする自己訓練機構は重要な役割を果たす。

マイクで得られる音と加速度センサで得られる振動は、サンプリング周期が異なるため時間ステップ長の異なる信号である。また、時間-振幅領域の信号は機械学習モデルにとって特徴の認識が難しい。そこで、Short Time Fourier Transform (STFT) により前処理を行う。STFT の窓幅やオーバーラップ率をそれぞれ調節することで、時間-周波数領域での時間ステップ長を同期させる。また、信号特徴の認識を容易にする役割も果たす。

プロペラの振動と、それに対応するエゴノイズには複雑な時間遅れが生じる。プロペラから放射状に発生したエゴノイズは、マイクで捉えられるまでに、様々な反響経路を辿るためである。このような複雑な時系列信号の対応関係を捉えるため、Translator を再帰型ニューラルネットワークで構成した。

3. 実験

UAV により発生させたエゴノイズの中、コンクリート試験体を叩き、打叩音から欠陥を識別する実験を行った。コンクリート試験体には 15 度の亀裂があり、亀裂上部表面は欠陥領域となる。加速度センサ (Spark Fun ADXL34) を取り付けた UAV (DJI M300RTK) と、単一指向性マイク (Audio Technica AT875) を、実験室内のスタンドに設置した。マイクは主に打叩音とコンクリートから反響したエゴノイズを捉える。コントローラを操作することでプロペラの回転数を変化させ、UAV 飛行中のエゴノイズを再現した。

提案手法の有効性を検証するため、エゴノイズ低減した打叩音から欠陥を識別する精度を、既存手法⁽⁴⁾と比較した。既存手法は、エゴノイズを含む打叩音から DNN により欠陥を識別する手法であり、既存手法の識別精度が最大となるハイパーパラメタに DNN を設定した。比較を容易にするため、提案手法も既存手法と同じ DNN 識別器を用いた。

それぞれの DNN は検証用データの損失の減少が停止するまで訓練した。また、32 秒分のエゴノイズとプロペラ振動のデータを収集し、Translator を訓練した。

4. 結果

少ない打叩音の訓練データに対して提案手法の有効性を検証するため、訓練データ数に対し識別精度を

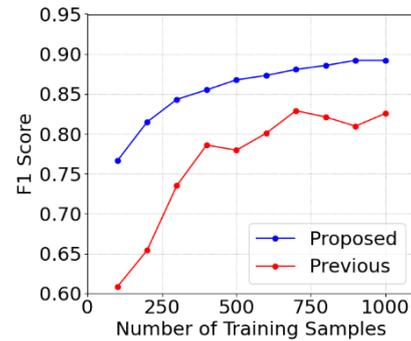


Fig. 2: F1 score as a function of number of training data.

比較した結果を Fig. 2 に示す。例えば、訓練サンプルが 100 の場合はそれぞれ 50 サンプルの健全音と欠陥音により、DNN を訓練したことを表す。

提案手法は 1/3 の訓練データで既存手法と同等以上の識別精度を示した。提案したエゴノイズ低減は打叩音を明瞭化し、機械学習モデルが本質的な特徴を簡単に捉えることを可能にする。これにより識別器は限られた訓練データにおいて高い優位性を示した。

5. おわりに

本稿ではマルチモーダル情報を活用したエゴノイズ低減手法を提案する。本手法は空間フィルタリング⁽³⁾では困難な反響エゴノイズの低減を可能にし、既存の欠陥識別手法⁽⁴⁾に対し高い優位性を示した。

UAV は橋梁下部などの入り組んだ現場を検査してまわるため、検査場所ごとにエゴノイズの反響環境は異なることが想定される。その場合、頻繁に Translator を自己訓練する必要がある。エゴノイズに比べ、環境ノイズが強く支配的となる状況では、Translator の自己訓練は困難となる。また、Translator の自己訓練のためのデータ収集を繰り返すことで時間がかり、点検が長引く。そこで、過学習を避けつつより少ないデータで Translator を自己訓練する、オンライン学習の枠組みを開発することが、実用化に向けた重要な課題になる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K17829 の助成を受けた。

参考文献

- (1) 国土交通省: 国土交通白書 2018, p. 133, 2018.
- (2) Pangjo Chun, et al., “Utilization of Unmanned Aerial Vehicle, Artificial Intelligence, and Remote Measurement Technology for Bridge Inspections”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 32, no. 6, pp. 1244–1258, 2020.
- (3) Lin Wang, et al., “Acoustic Sensing From a Multi-Rotor Drone”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 11, pp. 4570–4582, 2018.
- (4) Yuki Nishimura, et al., “Automated Hammering Inspection System With Multi-Copter Type Mobile Robot for Concrete Structures”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9993–10000, 2022.