

打音検査における変状検出のための時間周波数パターン抽出

Time-Frequency Pattern Extraction for Defect Detection in Hammering Test

○正 藤井浩光 (東京大学) 正 山下 淳 (東京大学) 正 浅間 一 (東京大学)

Hiromitsu FUJII, The University of Tokyo, fujii@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo

Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Hammering test is adequate for the auto-inspection of social infrastructures because of its high accuracy and easiness of operation. Recently, a lot of machine learning approaches to construct defect detectors of hammering test are studied. However, difficulty in obtaining training dataset of hammering sound decreases the performance of the detectors due to overfitting to the training dataset. In this paper, against the problem, a hammering sound feature that is liftered in the quefrequency domain is validated.

Key Words: Hammering test, Acoustic diagnosis, Maintenance of social structures

1 緒言

社会インフラの老朽化対策は極めて重要な問題である。特に道路トンネルなどのコンクリート構造物は件数・規模ともに膨大であり、それらを適切に維持管理していくために継続的な点検・診断は必須である。構造物の点検・診断において、検査対象物に与えた衝撃音の違いからその健全性を診断する打音検査法が従来より広く用いられている。その理由として、他の非破壊検査法に比べて実施が簡便であり診断結果の信頼性も高いことが挙げられるが、一方で健全性を音で聞き分けるための基準が明確でないため自動化が進んでおらず、現在も主に熟練の点検員による人手で行われている。

現在、打音検査の自動化に関して様々な研究が行われており、特に機械学習を用いて検査対象物中の異常(変状)を検出する変状検出器を生成するアプローチがとられている[1,2]。変状検出器の生成に機械学習を用いる際には、検出器の汎化性能を向上させることが、様々な状態の変状を扱うための大きな課題となる。例えば、コンクリート表層には様々なサイズおよび深さのひび割れが生じる。それらに対する打音もそれぞれ異なる特性を示すため、状態の多様さを表現可能な特徴量の適切な設計、あるいは訓練データの準備が必要不可欠である。

我々は変状検出に有効な打音の周波数特徴量を集団学習を用いて獲得し、異なる複数の部分周波数帯に注目した弱識別器群を統合することで、精度良く変状検出が可能な検出器を構築した[2]。その際、コンクリート表層に対して侵入角度が異なる複数のコンクリート供試体を製作し、それらを用いて構築した健全・変状の打音データベースを学習に用いることで、さまざまな深さのひび割れを検出可能な変状検出器を生成した。しかし、多様な変状の検出に対応するためには、大規模なデータが必要となり、それに伴い変状検出器の学習に要する時間も増加することが問題となる。

本研究では、小規模な打音データ群を用いて、複数の異なる特性の変状検出に有効な検出器を構築することを目的とする。打音の時間周波数解析により打音の時間方向の減衰なども考慮した2次元特徴量を提案する。実験では、1種類の角度で侵入した斜めひび割れ供試体から獲得した小規模な打音データセットを用いて、異なる角度のひび割れを検出可能であることを示す。

2 提案手法

2.1 振幅スペクトルのリフタ処理

打音検査における衝撃音の周波数解析は数多く行われている。特にコンクリート構造物の変状検出においては、打音の周波数領域におけるスペクトル形状に健全・変状を識別するための特徴的な差異が見られるという報告とともに、減衰などの時間方向への変化にも特徴が確認できるとの報告[1,3]もなされている。

本研究では、短時間フーリエ変換を用いて打音信号の時間周波数を行い、得られた時間-周波数軸でのスペクトログラムを2次

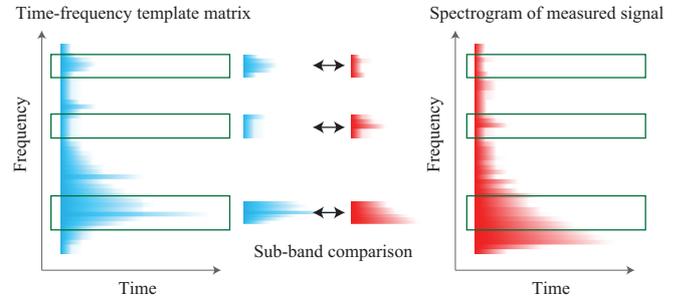


Fig.1 Sub-band similarity evaluation in time-frequency variations, which can be treated as a two-dimensional pattern.

元パターン信号として扱う。振幅スペクトル形状の時間変化の類似性を、部分周波数帯において比較・評価することで変状検出を行う(図1)。

ここで、非接触のマイクで取得した打音信号から得た振幅スペクトルの時系列変化には、検査対象物特有の応答や環境雑音の影響による特徴的なパターンが含まれる。そのため、マイク入力値そのものを用いて学習を行うと訓練データに過適合を生じやすくなり、汎化性能を損なうことが確認できている。本研究では、過適合を避けるために、打音信号のケプストラムを求め低次成分のみを通過する短パスリフタ処理を施すことで周波数領域での平滑化を行う。

2.2 時間周波数テンプレートマッチングによる弱識別器

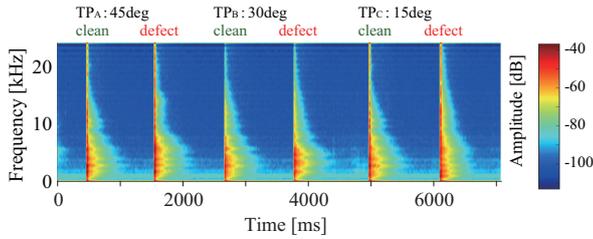
本研究では、既存研究[2]の手法と同様に打音の訓練データを用いて、健全・変状に関する打音信号のテンプレートを生成し、それらとの比較から変状検出を行う。打音信号のテンプレートは、時間周波数領域の2次元のテンプレート行列として以下のように定義する。

訓練データセット $\{\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(i)}, \dots\}$ は、前節のリフタ処理を施した健全・変状の振幅スペクトルである。時間周波数テンプレート行列の成分は、訓練データセットの重みつき平均として以下のように求める。

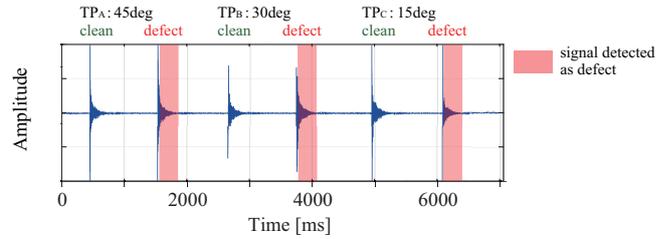
$$C_{(j,k|k \in \mathcal{C})} = \sum_{i \in \mathcal{C}} w^{(i)} x^{(i)}_{(j,k)} \quad (1)$$

$$D_{(j,k|k \in \mathcal{D})} = \sum_{i \in \mathcal{D}} w^{(i)} x^{(i)}_{(j,k)} \quad (2)$$

ここで、 $A_{(j,k)}$ は時間周波数テンプレート行列 \mathbf{A} の (j, k) 番目の成分であり、 \mathcal{C} および \mathcal{D} はそれぞれ健全および変状の訓練デー



(a) Spectrogram of liftered hammering sounds.



(b) Result of defect detection.

Fig.2 Hammering sound spectrograms obtained from the test pieces which include a slant crack (45deg, 30deg and 15deg).

Table 1 The specifications of concrete test-pieces

(W × D × H = 500mm × 500mm × 150 mm).

Test pieces	Crack angle	Maximum of crack depth
TP _A	45deg	53 mm
TP _B	30deg	37 mm
TP _C	15deg	19 mm

タを指すインデックス集合である。 $w^{(i)}$ は i 番目の訓練データ $\mathbf{x}^{(i)}$ の重みであり、 $\sum_i w^{(i)} = 1$ である。定数 J は類似度評価を行う時間窓の個数であり、 j は時間軸方向のインデックスである。 \mathcal{K} は部分周波数帯における周波数成分のインデックスの集合であり、 k は \mathcal{K} の中の特定の周波数成分を指すインデックスである。 $k \notin \mathcal{K}$ の場合は弱識別器では用いないが、便宜的に $A_{(j,k) \in \mathcal{K}} = 0$ とする。

本研究では、複数の異なる弱識別器を組み合わせてすることで検出精度の高い変状検出器を構成する。各弱識別器には異なる \mathcal{K} が割り当てられており、それぞれ異なる部分周波数帯で新たに計測した打音信号を評価する。打音信号の評価は、健全・変状のテンプレート ${}^c\mathbf{A}$, ${}^d\mathbf{A}$ との類似度 ${}^cS(\mathbf{x})$, ${}^dS(\mathbf{x})$ を 2次元特徴量として用いて、線形サポートベクタマシンで識別する。類似度の計算には、既存研究 [2] で提案した周波数領域での成分重みつき正規化相互相関を、時間周波数領域での 2次元に拡張して用いる。

3 コンクリート供試体を用いた検証

振幅スペクトルの平滑化が変状検出の結果に与える影響をコンクリート供試体を用いた実験により検証した。実験には、コンクリート表面に鋭角に侵入した斜めひび割れ変状を再現した供試体を製作し用いた。斜めひび割れ変状は、コンクリート片の剥落を引き起こす危険性があるため、早期の検出が重要とされている変状である。供試体の詳細な仕様を表 1 に示す。

ひび割れ侵入角度が 45deg の供試体 TP_A を用いて健全・変状に関する打音の学習を行った。訓練データには、健全・変状に対する各 15 回分の打音を短時間フーリエ変換を用いてスペクトログラム化して用いた。データの個数は、健全・変状に対してそれぞれ 150 個であり、データセットとしては極めて小規模である。評価に用いた供試体 TP_B, TP_C は、学習で用いた供試体 TP_A とはひび割れの侵入角度が異なり、それぞれ 30deg, 15deg とした。

検査用具には、ヘッド径 12.4 mm, ヘッド重量 0.1 kg の標準的な検査用ハンマを用いた。マイクロホンの解像度およびサンプリングレートは 24bit, 48 kHz, FFT の窓関数のサイズは 1,024 とし、ケプストラム次数 50 以上をカットするリフタを施した。

図 2(a) はケプストラム領域でリフタ処理を施したスペクトログラムである。横軸に時間、縦軸に周波数を示し、色の濃淡で振幅の大きさを示している。TP_A, TP_B, TP_C の順にそれぞれ健全・変状を 1 回ずつ、計 6 回の打叩を行った。打叩の瞬間はスペクトログラムの色の変化からも確認できる。また、スペクトログラムの色の境界がぼやけているのは、リフタ処理により打音の時間周波数パターンの振幅方向の高周波数成分がカットされ時系列変化が緩やかになった影響である。

図 2(a) に示した打叩音の時間領域での波形に、各供試体の健全・変状に対する変状検出結果を重畳して図 2(b) に示す。横軸が時間、縦軸がマイク入力値であり、赤く網掛けされた部分が変状として検出された時間帯である。学習に用いた TP_A とは異なる角度のひび割れも正確に検出可能であった。

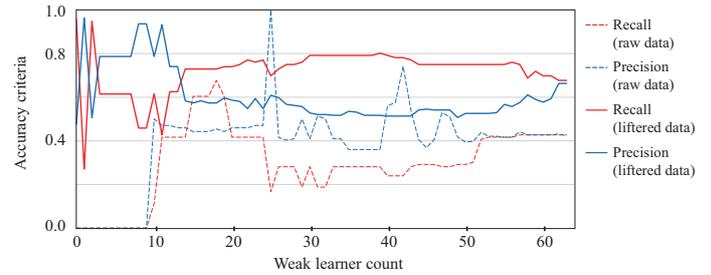


Fig.3 The performance difference of the raw-data-based detector and the liftered-data-based detector.

提案した変状検出器の性能を、識別器の性能指標である再現率 (Recall) と適合率 (Precision) で評価した結果を図 3 に示す。横軸は統合する弱識別器の個数、縦軸は各指標の値を示している。リフタ処理の効果と比較・確認するために、点線・実線でそれぞれリフタ処理を施さなかった場合と、施した場合の結果を示している。また、赤線で再現率を、青線で適合率を示している。評価には学習に用いていない供試体 TP_B および TP_C の健全部と、変状についてはひび割れの侵入深さの異なる部分について、それぞれ 200 回分の打音を用いた。一般的に、再現率と適合率はトレードオフの関係があるために、いずれの場合も両方の性能がほぼ同等になった弱識別器の個数が 64 の時点で学習を打ち切った。マイク入力値そのもので学習した場合は少ない訓練サンプルでは識別性能が向上しないが、リフタ処理を施すことで約 26% の性能向上を果たした。

4 結言

本研究では、小規模な打音データ群による学習では過適合を生じる問題に対し、ケプストラム領域でリフタ処理を施した振幅スペクトルを特徴量として用いることで汎化性能を向上させた。しかし現状では、多くのサンプルから獲得した打音データベースを用いた変状検出器の性能には及ばない。より正確な変状検出を行うための、汎化性能が高い特徴量の設計が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、NEDO 技術開発機構からの研究委託「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術/維持管理ロボット・災害対応ロボットの開発/トンネル全断面点検・診断システムの研究開発」において実施したものであり、JSPS 特別研究員奨励費 26-9039 の助成、および東急建設株式会社 技術研究所の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] J. Ye, M. Iwata, T. Kobayashi, M. Murakawa, T. Higuchi, Y. Kubota, T. Yui and K. Mori, "Statistical Impact-Echo Analysis Based on Grassmann Manifold Learning: Its Preliminary Results for Concrete Condition Assessment," Proceedings of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 1349–1356, 2014.
- [2] 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一, "打音検査のための自動校正機能を備えた自動変状診断アルゴリズム", 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 834, February 2016.
- [3] M. Ohtsu and T. Watanabe, "Stack Imaging of Spectral Amplitudes Based on Impact-echo for Flaw Detection," NDT & E International, Vol. 35, No. 3, pp. 189–196, 2002.