

## 審査の結果の要旨

氏名 藤井 浩光

藤井浩光氏の博士論文は、「打音検査における時間周波数パターン解析に基づく自動変状検出」と題し、全 6 章より構成される。本論文では、社会インフラの維持管理において継続的な点検・診断を実施するために、非破壊検査法の 1 つである打音検査に注目し、ロボットなどにより検査・診断を自動化するための打音信号を用いた自動診断アルゴリズムの構築を行っている。

第 1 章では、本論文の背景である社会インフラの老朽化に関し、特にトンネルなど道路インフラにおけるコンクリート構造物の劣化が深刻であることが述べられている。安心・安全のための継続的な点検・診断の必要性を論じた上で、熟練点検員の減少、危険箇所での点検要求の高まりなどを背景に、点検・診断作業の自動化の意義を主張している。数多く存在する非破壊検査法との比較の結果、主に検査対象中の変状の検出における性能の高さと簡便に実施可能であるという効率性の高さから、打音検査法に注目している。

さらに、打音検査法を用いた自動検査を実現する上での未解決の問題を指摘している。従来人手でも行うことのできなかつたひび割れ深さの推定などの詳細な検査を実現するための方法論、現場への適用のために必要不可欠な現場ごとの環境雑音への対応に関しての検討が不十分であると問題提起し、本論文の目的である「打音信号を用いた変状検出法・劣化度診断法、および環境雑音が存在する現場への適用法の構築」の重要性を論じている。

第 2 章では、打音検査法の自動化に付いての問題設定を行った上で、本論文のアプローチが述べられている。まず、本論文で主に取り組む異状状態（変状）である浮きおよび斜めひび割れ変状について、コンクリート構造物に共通の深刻な問題である剥落現象に進展するおそれのある変状として、取り組む意義を明確にしている。その上で、打音検査を用いた変状検出アルゴリズムが達成すべき性能目標を定量的に設定している。また本論文では、特徴量空間を部分特徴量空間に分割し、それぞれの特徴量空間で生成した性質の異なる弱識別器群

を統合するという統一的なアプローチをとることを論じている。そのアプローチにより、変状検出の性能を向上させるとともに、第 1 章で述べた課題である劣化度診断、および環境雑音に対する校正を実現することが述べられている。

第 3 章では、本論文の基盤となるアルゴリズムである、健全・変状に対する複数の周波数テンプレート対を用いた変状検出法が提案されている。具体的には、時間周波数解析手法である短時間フーリエ変換を用いて打音のパターン解析を行い、変状検出に有効な部分周波数帯における周波数テンプレートを探素的に獲得する手法である。それぞれ異なる周波数テンプレートを有する弱識別器群を生成・統合するために、機械学習における集団学習法の 1 つであるブースティングを応用し、変状検出器を構築した。また、複合的な材料および実際のコンクリート建造物の石膏ボード壁面を用いた検証実験で、提案手法の有効性を確認している。

第 4 章では、コンクリート構造体の点検・診断における変状検出について取り組んでいる。まず実験環境として、浮き・ひび割れ変状を再現したコンクリート供試体の製作および現場を想定した検証環境である実寸大の模擬トンネルについて説明されている。変状検出法としては、訓練データの獲得が困難な場合に適用可能な教師なしクラスタリングによるアプローチと、より詳細にラベル付けした訓練データを用いることで第 3 章の手法を拡張した、教師ありでの変状の劣化度推定法が提案されている。

特に後者の教師あり手法は、従来の人手での打音検査では実施困難であった変状の劣化度合いの推定を行う手法である。訓練データに付加した劣化度に関するマルチラベルを用いて変状の詳細な状態を確率的に表現し、集団学習器を用いたラベル推定により劣化度を推定している。提案手法の検証実験では、現場において重要な診断項目であるひび割れの到達深さ推定に取り組み、斜めひび割れ変状を用いた性能評価を行った。RGB-D センサを用いた打点検出法と組み合わせることで、変状の及ぶ範囲と深さの状態を正確に推定可能であることが示されている。

第 5 章では、環境雑音が存在する現場への適用のために、追加学習による変状検出器の更新アルゴリズムが提案されている。特に、ブースティングの枠組みにおける周波数テンプレートの更新則が新規に導出されている。環境雑音下で獲得した追加訓練データを用いて、更新則に従い弱識別器群をそれぞれ更新することで、変状検出器全体を自動校正する手法である。変状検出器の校正を行うことで、現場ごとに環境雑音が異なった場合にも、事前の学習で生成済み

の変状検出器の再利用が可能である。

コンクリート供試体を用いた実験，および実際に供用中のトンネルにおいて打音検査実験を行い，提案手法の有効性について確認している．特にトンネルでの実験においては，実際の現場において検査を行う足場である高所作業車のエンジンを稼働させることで環境雑音を発生させ実験を行っている．エンジンノイズによる音響的な環境変化が生じた場合も，提案手法を用いて変状検出器を更新することで，変状検出の性能を維持可能であることが示されている．

第 6 章では，本論文の成果が総括されている．今後の研究の方向性として，現場適用における環境雑音以外の影響の考慮，半教師あり学習への拡張などが述べられている．

以上，本論文では社会的に自動化の要望の高い打音検査に対して，打音信号を用いた自動診断アルゴリズムの構築を達成した．従来人手で行われてきた変状検出の自動化に留まらず，人手での検査では困難だった劣化度合いの推定，さらに現場への適用に必要な環境雑音に対する変状検出器の自動校正を独自のアプローチで新規に達成しており，それらの有効性も十分に検証されている．以上の点において，博士論文として十分な独自性と貢献があると判断する．

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる．