

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：53101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03290

研究課題名(和文)自己組織化MAPにより可視化された熟達点検者の暗黙知を基軸とした打音点検の体系化

研究課題名(英文)Organization of hammering inspection based on tacit knowledges for hammering inspection of expert inspectors visualized by using self-organizing map

研究代表者

村上 祐貴 (MURAKAMI, YUKI)

長岡工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：70509166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、既設構造物の打音点検熟達者から打音点検における共通技能を抽出し、形式知化することで熟達点検者から経験の浅い点検者へのシームレスな打音点検技能獲得プロセスの体系化を図ることを目的とする。これまで熟達者固有のものであった打音点検に関する暗黙知を、各種センサーを用いて可視化し、自己組織化マップを用いて熟達者に共通する暗黙知を抽出、形式知化した。また、形式知化した暗黙知をもとに、姿勢推定ライブラリを用いて可視化された動作をフィードバックしながら訓練を重ねることで早期に安定した打撃動作の獲得に繋がることを示すとともに、欠陥検知率向上に資する打音点検ハンマーを試作し、一定の効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では各種センサーを用いて熟達点検者の打音点検における暗黙知を可視化し、超多次元のビッグデータを、人間を凌駕する高精度でパターン認識することが可能な自己組織化マップを用いることで属人化された暗黙知の中から熟達者に共通する暗黙知を抽出し、形式知化した。打音点検技能の伝承を体系化する試みは未踏領域であり学術的意義は大きい。本研究課題の達成は全国的に喫緊の課題である熟達点検者不足の問題解決に資するものである。また、打音検査は各種車両点検等、他分野でも適用される点検方法であり、打音点検技能の獲得プロセスの体系化は他分野にも水平展開が可能であり、学術的、社会的波及効果は計り知れない。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim to organize the process of obtaining the skills for hammering inspection intended for existing structures by extracting the common tacit knowledge of expert inspectors by using self-organizing map (SOM). The tacit knowledge for hammering inspection that only experts have, was visualized by using various sensors. Explicit knowledge was extracted from tacit knowledge of the expert inspectors by using SOM. Moreover, it was found that that the training for hitting motion with the visualized motion by using the library for posture estimation obtain stable motion early. Moreover, Moreover it was confirmed that the prototype of hammer based on explicit knowledge for hammering inspection improved the detection rate of defect area inside concrete.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：打音点検 暗黙知 形式知化 自己組織化マップ

1. 研究開始当初の背景

H24.12 の笹子トンネル事故を契機として H25.9 に道路法が改正された。トンネル、道路橋は 5 年に 1 回の頻度を基本とした近接目視による点検が法的に義務付けられた。近接目視では、内部欠陥の存在は把握できないため、触診や打音点検等を併用することも明記された。

点検ハンマーさえあれば実施できる打音点検は一次検査として広く用いられる検査法であるが、打音点検は官能検査であり、その精度は点検者の技能や経験に左右される。そのため、ICT や RT (ロボットテクノロジー) を駆使した定量的な打音点検手法の開発が、国家プロジェクト「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の中でも進められている。一方、この次世代打音点検は人材、技術力、予算の観点から、膨大な量になる社会資本ストックすべてに展開していく体制を整えるには、時間がかかり、しばらくの間は、多くの既存構造物において従来通りの点検ハンマーによる打音点検を継続することが予想される。以上のように打音点検は既存の施設・設備の一次検査に必要不可欠な点検であり、その技能の伝承は我が国にとって喫緊の課題であることに議論の余地はない。

2. 研究の目的

熟達した打音点検従事者は全国的に減少傾向にあり、次世代を担う若手点検者への技術、技能の伝承は極めて重要な課題であるが、打音点検のように暗黙知で構成される建設技能の伝承について体系的に取り組んだ事例は無い。本研究では熟達点検者の暗黙知である打音点検技能を、自己組織化マップ (SOM) によるパターン認識を用いて可視化と標準化を行い、標準化された打音点検技能に基づいて、打音点検技能獲得プロセスの体系化を図るとともに、技能向上に資する打音点検支援ツールを開発する。

3. 研究の方法

(1) 点検者の打撃プロファイルを構成する属性の抽出と自己組織化マップによる標準化

試験体概要を図-1 に示す。試験体は、長さ 2000mm×高さ 1800mm×厚さ 280mm のコンクリート壁型パネルであり、このパネルを 4 枚横に並べ、長さ 8000mm の模擬壁を 2 枚作製した。パネル内部には、内部欠陥を模擬した大きさの異なる人工欠陥を、埋設深さを変えて複数個埋設した。

被験者はコンクリートパネル 1 枚を対象として打音点検を実施し、欠陥と判断した領域にチョーキングを行う。その際、加速度センサおよびエリ

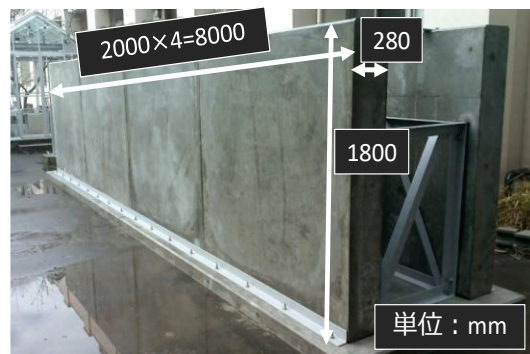


図-1 試験体概要

アセンサを使用し、各被験者の打撃応答振動、打撃位置等を取得した。また、試験中はビデオカメラで打音点検動作を撮影し、各被験者の打音点検の特徴を抽出した。なお被験者は、実務経験者 12 名と打音点検の非実務経験者 2 名の計 14 名である。

(2) 点検者の打音点検の動作解析とトレーニング手法の開発

本実験では、モーションキャプチャシステムを用いて被験者の打音点検動作を測定した。実験室上部に設置したオスプレイカメラにより、被験者の手首および肘に貼付したマーカの 3 次元座標を取得し、「関節角度変化量」と「平均角速度」、「手首関節と肘関節の角度変化波形の位相差」を測定した。なお、打音点検動作測定に使用するハンマーは全被験者 1/4 ポンドの点検ハンマーで統一した。

また、モーションキャプチャシステムによって明らかとなったデータをもとに、OpenPose を用いたトレーニング手法の検討を行った。OpenPose とは、人間の骨格の動きを深層学習によって推定する姿勢推定ライブラリである。本研究では、被験者の身体の推定と手指部の推定を同時に行った。被験者は打音点検の実務経験がない 20 歳の男女それぞれ 1 名ずつの計 2 名で、女性を被験者 A として、現在主に行われている技能継承の手法である、見てまねるといった徒弟的なトレーニング手法を再現して実施した。また、男性を被験者 B として、OpenPose による可視化から得られたデータを被験者自身にフィードバックする手法を実施した。なお、両被験者ともに打撃動作の統一を図るよう指示を行った。

(3) 打撃支援ツールの開発

打音点検に用いられるハンマーは、ヘッド部分の重さのみが統一されていて、ヘッドの形状、材質、柄の長さ等については特に定められていない。数値解析ソフトウェア LS-DYNA を用いて打音検査を模したシミュレーションを行い、材質や形状が異なるハンマーの打撃に対するコンクリートの応答特性を調査した。図-2 に解析モデル（コンクリート）の概要図を示す。縦横 900mm、

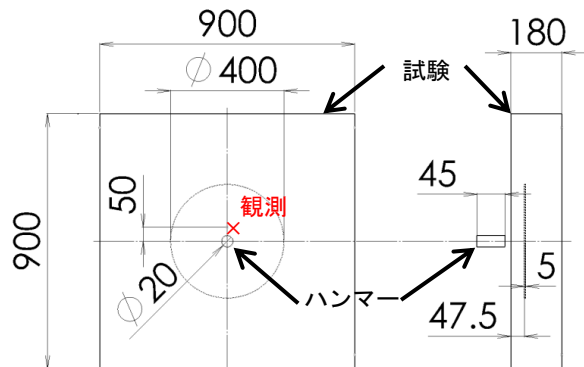


図-2 解析モデル（コンクリート）の概要

厚さ 180mm のコンクリートモデルの深さ 47.5mm の位置に、内部欠陥を想定した直径 400mm、厚さ 5mm の空隙をモデリングした。素材や打撃面の形状を変えた打音ハンマーで打撃し、コンクリート表面の振動解析を行った。その際、コンクリートに加えるエネルギー量は一定とした。なお、解析に使用したハンマーの材質はアルミ、鋼鉄（S45C）、超硬合金、銅であり、接触面の形状は直径 20mm、重さ 3000g の球面と平面の 2 種類である。また、上記数値解析をもとに決定した材質と形状で製作したハンマーを用いて、打音点検非実務経験者 3 名を対象に打音試験を行った。

4. 研究成果

(1) 点検者の打撃プロファイルを構成する属性の抽出と自己組織化マップによる標準化

各被験者の打音点検の打撃は、大別すれば欠陥を探索する打撃（探索フェーズ）と欠陥を発見し、欠陥の領域を同定する打撃（同定フェーズ）に分類できる。なお、同定フェーズは被験者が欠陥にチョーキングを開始した時点から終了までの打撃とし、探索フェーズはそれ以外の打撃として定義した。

探索、同定フェーズを構成する打音点検技能はそれぞれ異なり、各フェーズで技能を抽出する必要がある。そこで、各フェーズにおいて、被験者の技能レベルを評価する指標として、欠陥検知個数割合（探索フェーズ）と欠陥同定検知率（同定フェーズ）を用いた。

設定した2つの指標をもとに各被験者の技能を2軸化したグラフを図-3に示す。同図に示すように、欠陥同定検知率と欠陥検知個数割合は線形的な関係にあるが、例えば被験者Hのように、欠陥同定検知率は平均値程度であるが、欠陥検知個数割合が低い被験者がいた。一方で被験者E、Fのように欠陥検知個数割合は比較的高いが、欠陥同定検知率は平均値程度であった被験者もいた。このように、被験者によって各フェーズの技能レベルは異なることが明らかとなった。

次に、SOMを用いて、各フェーズの技能に影響する重要な属性の抽出を試みた。SOMに入力する属性データを表-1に示す。解析の結果、探索・同定の両フェーズにおいて、良好な成績が得られた被験者と良好でない被験者、その間に属する被験者にクラスタリングすることができた。また、探索フェーズ、同定フェーズにおいて必要とされる技能が異なることも分かった。抽出された属性をもとに各被験者の打音点検の技能レベルを図-4に示すように表現した。なお、図-4に示す各軸の数値は偏差値である。

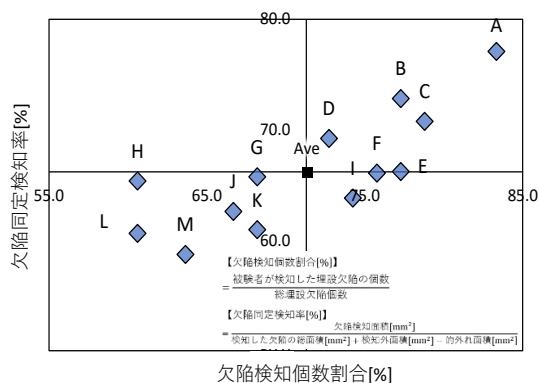
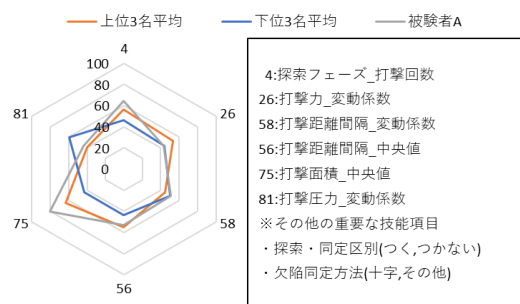


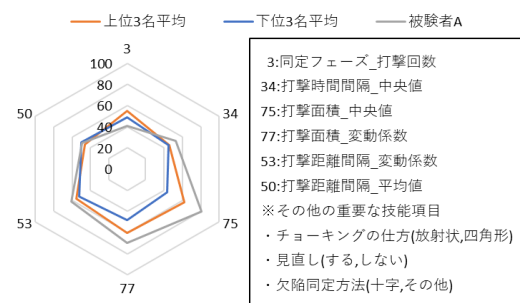
図-3 2軸化グラフ

表-1 SOMに入力する属性データ

入力データ	属性項目
打撃数	回数
打撃力	平均値,中央値,変動係数
打撃時間間隔	平均値,中央値,変動係数
打撃距離間隔	平均値,中央値,変動係数
打撃面積	平均値,中央値,変動係数
打撃圧力	平均値,中央値,変動係数
探索同定区別	探・同つく1 つかない0
チョーキングタイミング	すぐにする1 しない0
チョーキングの仕方	四角形1 放射状0
余剰時間	時間余る1 余らない0
見直し	見直しする1 しない0
欠陥同定方法	十字1 その他0
持ち方	柄の端を挟み込むようにして持つ1 その他0



(a) 探索フェーズ



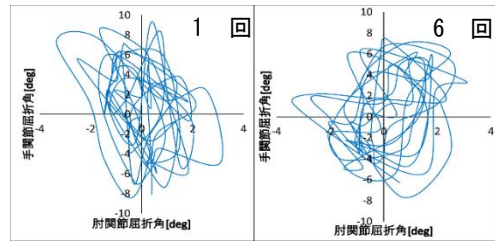
(b) 同定フェーズ

図-4 各フェーズのレーダーチャート

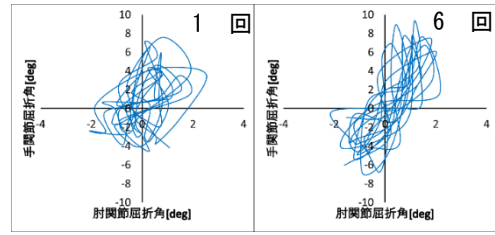
(2) 点検者の打音点検の動作解析とトレーニング手法の開発

動作解析の結果、手首関節と肘関節の角度変化波形の位相差が正である被験者の検知率は、負である被験者の検知率より高い傾向にあった。また、探索、同定フェーズにおける指標の数値が最も高かった被験者は一定の位相間隔(肘、手首の動くタイミング)であることが分かった。

このことから、熟達点検者は同様の腕部の動きを繰り返して行うことにより、リズムが一定の打撃を行っていることが分かった。本研究では、欠陥検知率を向上させる要因が一定の打撃動作を行うことであると推察し、トレーニングを行った結果を図-5に示す。トレーニング1回目と6回目を比較して、一定の位相間隔となるようにOpenPoseを使ってトレーニングを行った被験者Bは、徒弟的なトレーニングを行った被験者Aと比べて一定の位相関係であることが示された。



(a) 被験者 A



(b) 被験者 B

図-5 トレーニング回数による位相の変化

(3) 打撃支援ツールの開発

数値シミュレーションの結果、欠陥を埋設したコンクリートを打撃した際の周波数応答スペクトルの一次ピークは、ハンマーの打撃面の形状によらず、材質がS45Cの時、最も加速度成分が大きかった。また、球面の形状は平面の形状に比べて、周波数応答の1次ピークが大きい結果が得られた。

各ハンマーの欠陥検知率(被験者A、B、C:実務未経験者、被験者D:実務経験者)を図-6に示す。非実務経験者の被験者A、B、Cは球面のS45C製球面形状のハンマーを用いることによって欠陥検知率が向上した。図-7に被験者AとDの打撃面積を示す。非実務経験者の被験者Aは平面状のハンマーを用いた場合、打撃面積が三日月状となっているが、球面状の場合は、打撃面積が円状であり、接触面積は打撃によらず、ほぼ同程度であることが分かる。

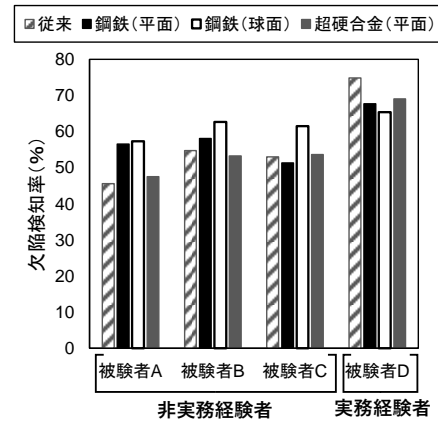


図-6 各ハンマーの欠陥検知率

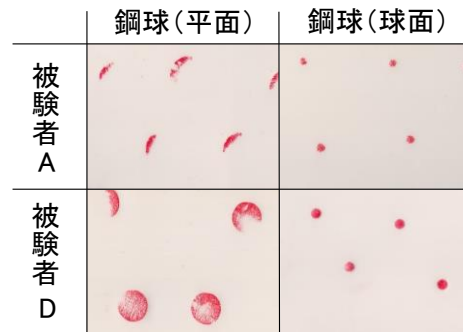


図-7 被験者の打撃面積

一方、実務経験者である被験者Dは平面のハンマーでも面的な打撃が行えていたため、球面形状のハンマーを用いても検知率の向上は認められなかった。これらのことから、実務未経験者に対してS45C製球状のハンマーの有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 舟波尚哉、山岸開、村上祐貴、外山茂浩	4. 巻 40(1)
2. 論文標題 打音点検の打撃動作がコンクリート構造物の内部欠陥検知率に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1773-1778
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 舟波尚哉、山岸開、村上祐貴、外山茂浩	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 熟達点検者の打音点検動作の形式知化に関する基礎的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1871-1876
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 大越悠生、村上祐貴、倉橋貴彦、池田富士雄	4. 巻 42(1)
2. 論文標題 打撃応答特性を自己組織化マップに適用したコンクリート内部欠陥の領域判定の迅速化に関する検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 林純哉、村上祐貴、外山茂浩、井山徹郎	4. 巻 42(1)
2. 論文標題 打音点検者の打撃特性が内部欠陥検知精度に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 舟波尚哉、山岸開、村上祐貴、外山茂浩
2. 発表標題 コンクリート構造物の打音点検時における打撃動作が欠陥検知率に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会平成30年度全国大会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林拓弥、舟波尚哉、村上祐貴、外山茂浩
2. 発表標題 コンクリート構造物を対象とした打音点検の欠陥検知精度に及ぼす点検ハンマー接触面積の影響
3. 学会等名 電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠山陸、舟波尚哉、村上祐貴、外山茂浩、
2. 発表標題 コンクリート構造物打音点検時におけるスイング動作の解析
3. 学会等名 電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽鳥俊太郎、池田富士雄、村上祐貴、外山茂浩
2. 発表標題 打音点検者の疲労軽減と動作アシストを目的とした装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越学生会 第48回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山岸開、舟波尚哉、外山茂浩、村上祐貴
2. 発表標題 熟達点検者の暗黙知である打音点検動作の可視化
3. 学会等名 土木学会第45回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 舟波尚哉、山岸開、外山茂浩、村上祐貴
2. 発表標題 コンクリート構造物の打音点検時における打撃動作が欠陥検知率に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会平成30年度全国大会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林航、中田亘、外山茂浩、村上祐貴
2. 発表標題 OpenPoseを用いたコンクリート打音点検における打撃動作の可視化
3. 学会等名 令和元年度（第29回）電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽鳥俊太郎、池田富士雄、村上祐貴
2. 発表標題 HoloLensによる打音点検の業務支援方法の提案とその基礎開発
3. 学会等名 日本機械学会北信越学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井山 徹郎 (IYAMA TETSURO) (00452087)	長岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (53101)	
研究分担者	池田 富士雄 (IKEDA FUJIO) (30353337)	長岡工業高等専門学校・機械工学科・教授 (53101)	
研究分担者	外山 茂浩 (TOYAMA SHIGEHIRO) (60342507)	長岡工業高等専門学校・電子制御工学科・教授 (53101)	