

# 視覚センサおよび聴覚センサを用いたコンクリート ひび割れの侵入方向の検出

林 鍾勳<sup>†</sup> 藤井 浩光<sup>†</sup> 山下 淳<sup>†</sup> 浅間 一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: <sup>†</sup> {im, fujii, yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** 本研究では、視覚センサおよび聴覚センサを用いたコンクリートひび割れの検出法を提案する。提案手法では、最初に光切断法を用い、コンクリート表面の3次元計測を行い、得られた点群データを解析し、ひび割れの位置を把握する。その次に、ひび割れの位置情報をもとにハンマで叩く位置を決め、打叩の際に得られる音響信号を解析することで、ひび割れの侵入方向を検出する。

**キーワード** 3次元スキャン, 打音検査, 学習, センシング

## Detection of Concrete Crack Direction Using Visual Sensor and Sound Sensor

Jonghoon IM<sup>†</sup> Hiromitsu FUJII<sup>†</sup> Atsushi YAMASHITA<sup>†</sup> and Hajime ASAMA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

E-mail: <sup>†</sup> {im, fujii, yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** In this paper, We propose a method of concrete crack detection using visual sensor and sound sensor. Firstly, three-dimensional measurement of the concrete surface is performed by using the light-section method. The obtained point cloud data is analyzed and the positions of the cracks are identified. Next, the positions to hit with a hammer are decided based on the crack position information. Finally, we actually hit the concrete with the hammer and analyze the acoustic signal to detect the direction of the crack.

**Keyword** 3D scan, Hammering test, Learning, Sensing

### 1. 序論

現在、膨大な件数のインフラが耐用年数を迎え始めており、社会インフラの維持管理は必須不可欠である。社会インフラの維持管理のための点検技術の重要性が高まっており、特に点検対象が膨大、または危険箇所位置する場合や熟練点検員の引退により人手が不足する場合には点検における自動診断技術が必要となる。点検・診断で早期の発見が望まれる異常状態(変状)の1つは剥落である。剥落とは構造物の表層からコンクリート片が剥がれ落ちる現象である。

橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物においては、落下したコンクリート片が構造物の下側および内部を通過する車両や歩行者を傷つける危険性があるため、点検および診断において見逃さないことが必要不可欠である。この剥落現象は、コンクリート表面に対して斜め方向に侵入したひび割れ同士が合体(閉合)するなどして引き起こされる。特に閉合状態から剥落現象を起こすコンクリート部材は大きなコンクリート塊となり、被害は大きくなる。したがって、剥落の発生を未然に防ぐためには、早期にひび割れを検出し、

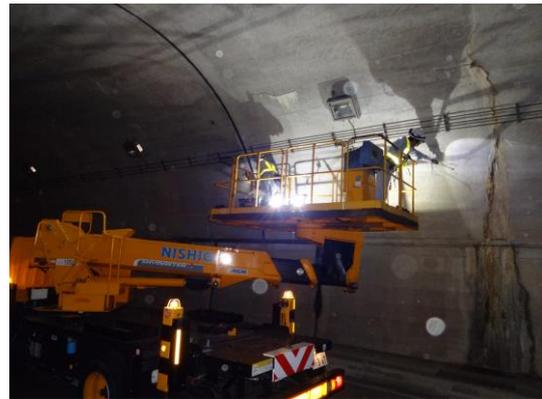


図1: トンネルにおける打音検査

その侵入方向を知ることが重要である。

従来の点検現場では、主に検査用ハンマにより対象物を叩いたとき発生する衝撃音の違いから対象物の変状を判断する打音検査が行われてきた。この手法は検査の対象や環境が異なった場合においても、柔軟に対応可能であるなど他の検査技術に対して優位な特長を有している。打音検査の自動化に関しては、藤井ら[1]

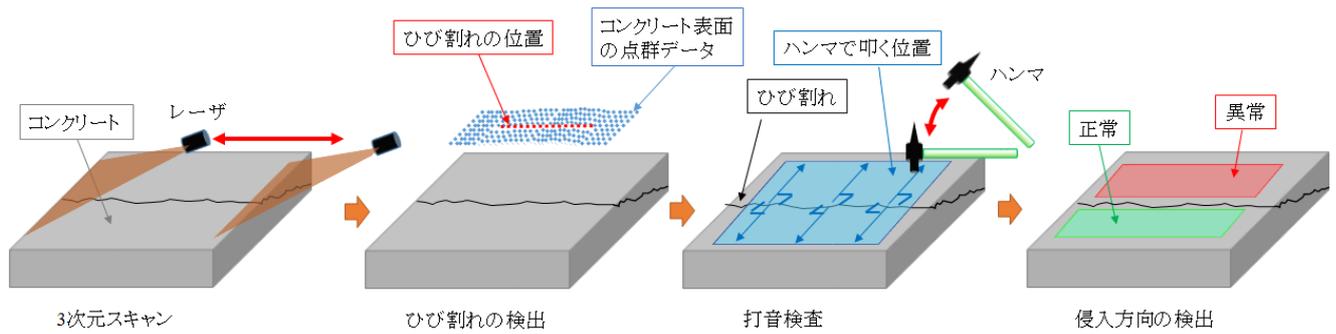


図 2：提案手法の流れ

によって打音検査における自動診断技術が提案されたが、ひび割れの侵入方向などを知ることができないといった課題が残っている。

本研究では光切断法を用いたひび割れ検出と自動打音診断手法を組み合わせたマルチモーダルな診断手法を提案し、コンクリートひび割れの侵入方向を検出する。

## 2. 従来研究

ここでは、視覚センサおよび聴覚センサを用いた従来のひび割れ検出手法について紹介する。視覚センサを利用した従来のひび割れ検出方法として、カメラから取得した画像を機械学習などを用いて解析することでコンクリート表面のひび割れを検出する手法[2-4]がある。これらの手法は照明条件による陰影の違いに影響を受けやすい問題や黒い線がひび割れとして誤認識される問題などがある。また、最近ではレーザを用いてコンクリート表面を3次元計測することでひび割れを検出する方法[5-6]が用いられている。しかし、これらの手法ではコンクリートひび割れの侵入方向までは検出できない。

一方、聴覚センサを利用した従来のひび割れ検出手法としては超音波を用いたコンクリートひび割れ検出方法[7-8]がある。この手法はひび割れの深さまで計測することが可能であるが、測定条件によって精度が大きく変わる問題がある。その他には打音検査に基づく手法[9-11]がある。しかし、今までの打音検査法は個人差により、ひび割れ検出の結果が変わる問題がある。

それに対して、我々の研究グループでは打音検査の自動化[12-13]を目指し、打音による自動診断法を提案してきた。しかし、序論で述べたように今までの手法ではひび割れの侵入方向を推定することはできない。そこで、本研究では高精度かつ短時間でひび割れ位置の検出が可能な光切断法、およびコンクリートの内部に存在するひび割れの検出が可能な打音検査法を統合することで、ひび割れの侵入方向が検出可能な手法を提案する。

## 3. 提案手法

### 3.1. コンセプト

本研究では光切断法および打音検査法を用いたコンクリートひび割れの侵入方向の検出法を提案する。図2に提案手法の流れを示す。最初に光切断法を用い、コンクリート表面の3次元計測を行う。その次に得られた点群データを解析し、ひび割れの位置を検出する。最後にひび割れの付近をハンマで叩き、得られた音響信号を解析することで、ひび割れがどの方向に侵入しているのかを検出する。

### 3.2. コンクリート表面の3次元計測

コンクリート表面の3次元計測のため、本研究では高精度で計測が可能である光切断法を利用する。この手法は物体表面に照射されたスリットレーザ光を観測し、三角測量を用いて物体表面の3次元形状を求める。本研究では、計測対象全体の形状を計測するため、カメラと計測対象は固定し、物体表面をスリットレーザで走査することで物体表面全体の形状を計測する。この結果、物体表面の3次元点群データが得られる。

### 3.3. ひび割れ検出手法

得られた物体表面の3次元点群データから、コンクリートひび割れの位置を検出し、ハンマで打叩する領域を決定する。ひび割れを検出するため、本研究では光切断法により得た平面の3次元点群データに対して最小二乗平面を求める。その上で、最小二乗平面から垂直方向に閾値以上離れた点群をひび割れとして判断する。

$$c = \begin{cases} 1 & \text{if } d > \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $c$  はひび割れの有無を表す変数で  $c=1$  はひび割れありを、 $c=0$  はひび割れなしを意味する。 $d$  は求めた平面から各点群データまでの距離を表し、 $\tau$  は閾値を表す。距離  $d$  が設定した閾値  $\tau$  より大きい場合は、

その点群をひび割れとして判断する。

次に、求めたひび割れの位置を基にハンマで叩く位置を決める。コンクリートひび割れは表層に対してある方向に連続的に侵入しているため、コンクリート表層に対し斜め方向に侵入したひび割れの場合、コンクリート表面上で検出された開口部に対して垂直上方向あるいは垂直下方向に侵入する。そのため、コンクリート表面では開口部に対して垂直上下方向に沿ってハンマで叩き、上下の音響信号を比較することで、ひび割れの侵入方向が上方向か下方向であるかを判別することができる。正常な部分は垂直方向に沿って動きながら叩いても音が一定になるが、ひび割れが存在する部分は垂直方向に沿って動きながら叩くと音に変化する。

### 3.4. 打音検査法

打音検査には藤井らによって提案された打音の時間周波数パターン識別による打音診断法[11]を利用する。この手法では時間周波数解析した打音信号から、健全である状態と変状を精度良く識別可能な部分周波数帯を複数抽出し統合する。アンサンブル学習の枠組みを用いることで、変状検出、変状の状態推定、環境雑音に実現する変状検出器が構成可能である。

## 4. 結論

本研究では光切断法および打音検査法を用いたコンクリートひび割れの侵入方向の検出法を提案した。今後の展望としては実際の現場での検証を行う必要があると考えられる。

## 謝 辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)によって実施された。

## 文 献

- [1] Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Improvement of Environmental Adaptivity of Defect Detector for Hammering Test Using Boosting Algorithm", Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015), pp. 6507-6514, 2015.
- [2] Zhang Lei, Fan Yang, Yimin Daniel Zhang and Ying Julie Zhu: "Road Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Network", Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2016), pp. 3708-3712, 2016.
- [3] Stephen J Schmugge, Lance Rice, N. Rich Nguyen, John Lindberg, Robert Grizzi, Chris Joffe and Min C. Shin: "Detection of Cracks in Nuclear Power Plant Using Spatial-temporal Grouping of Local Pathes", Proceedings of the 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV 2016), pp. 1-7, 2016.
- [4] Yong Shi, Limeng Cui, Zhiquan Qi, Fan Meng and Zhensong Chen: "Automatic Road Crack Detection Using Random Structured Forest", IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, Vol. 17, No. 12, pp.3434-3445, 2016.
- [5] Paritosh Giri and Sergey Kharkovskv: "Detection of Surface Crack in Concrete Using Measurement Technique With Laser Displacement Sensor", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 65, No. 8, pp. 1951-1953, 2016.
- [6] Tomohiro Mizoguchi, Yasuhiro Koda, Yoshikazu Kobayashi, Ichiro Iwaki, Yasuhiko Hara, Kenhi Shirai, Hwa-Soo Lee and Hiroyuki Wakabayashi: "Quantitative Damage Assessment of Concrete Structures Based on 3D Laser Scanning", Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 2129-2132, 2011.
- [7] Kevin Soetomo, Talitha F. Rahma, Endang Juliastuti and Dedy Kurniadi: "Ultrasonic Tomography for Reinforced Concrete Inspection Using Algebraic Reconstruction Technique with Iterative Kaczmarz Method", Proceedings of the 2016 International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA 2016), pp. 16-21, 2016.
- [8] Hoon Sohn, Hyung Jin Lim, Martin P. Desimio, Kevin Brown and Mark Derriso: "Nonlinear Ultrasonic Wave Modulation for Online Fatigue Crack Detection", Journal of Sound and Vibration, Vol. 333, No. 5, pp. 1473-1484, 2014.
- [9] Akane Miyoshi, Yoshimi Sonoda, Ayumi Nakayama and Naotsugu Yoshida: "An Analytical Study on the Use of Rotary Hammering Inspection Method for Detecting Defective Spots on Concrete Structures", Annual Journal of Concrete Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 1723-1728, 2008.
- [10] DG. Aggelis, T. Shiotani and K. Kasai: "Evaluation of Grouting in Tunnel Lining Using Impact-echo", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, No. 6, pp. 629-637, 2008.
- [11] 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 the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 1349-1356, 2014.
- [12] Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Automated Diagnosis of Material Condition in Hammering Test Using a Boosting Algorithm", Proceedings of the 2014 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO 2014), pp. 101-107, 2014.
- [13] Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Defect Detection With Estimation of Material Condition Using Ensemble Learning for Hammering Test", Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2016), pp. 3847 - 3854, 2016.