

ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用した i-Constructionの推進

山下 淳^{1,2}・ルイ笠原 純ユネス²・Sarthak PATHAK²・小松 廉²・筑紫 彰太²・
浅間 一²・谷島 諒丞¹・濱崎 峻資¹・永谷 圭司¹・小澤 一雅^{1,3}

¹東京大学大学院 工学系研究科 i-Constructionシステム学寄付講座 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

³東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻

E-mail:yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

本稿では、ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用したi-Constructionの推進について述べる。具体的には、建設機械の遠隔操作のための任意視点映像生成、建設機械の遠隔操作のための遮蔽物透視映像生成、土工現場におけるカメラを用いた建設機械の位置姿勢推定、無人化施工における遠隔操作オペレータへの映像自動提示、橋梁点検のための全天球カメラを用いたドローンの位置姿勢推定、画像・音響信号マルチモーダル処理を用いたコンクリート構造物の自動点検、海洋土木のための音響カメラを用いた水中3次元計測について紹介する。

Key Words : robotics, AI, sensor information processing, i-Construction

1. はじめに

本稿では、ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用したi-Constructionの推進について述べる。

東京大学大学院工学系研究科の社会基盤学専攻と精密工学専攻の共同運営体制で、i-Constructionシステム学寄付講座が2018年10月に設立された。i-Constructionシステム学寄付講座の目的は、社会インフラの建設企画・調査段階から維持管理・運用段階までのプロセスにおいて、IT、IoT、空間情報処理技術、ロボット化技術等を活用することで生産性向上を図ることが可能なi-Constructionを実現するためのシステム開発を行うこと、および、そのシステムを実践するプロフェッショナルを育成するため、i-Constructionシステム学を構築することである。

本稿では、i-Constructionに関連する筆者らのこれまでの取り組みの中で、ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用した研究開発について紹介する。具体的には、建設機械の遠隔操作のための任意視点映像生成¹⁾⁷⁾、建設機械の遠隔操作のための遮蔽物透視映像生成⁸⁾、土工現場におけるカメラを用いた建設機械の位置姿勢推定⁹⁾¹⁰⁾、無人化施工における遠隔操作オペレータへの映像自動提示¹¹⁾、橋梁点検のための全天球カメラを用いたドローンの位置姿勢推定¹²⁾¹⁴⁾、画像・音響信号マルチモーダル処

理を用いたコンクリート構造物の自動点検¹⁵⁾²⁰⁾、海洋土木のための音響カメラを用いた水中3次元計測²¹⁾について述べる。

2. ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用したi-Constructionの取り組み

建設現場の生産性や安全性を向上させるためには、作業現場および建設機械の状況を把握し、それらの情報をもとに作業を行うことが重要となる。そこで、ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用することにより、作業現場および建設機械のセンシングを行う技術、センシング結果をオペレータに提示する技術、センシング結果を用いて建設機械やカメラを制御する技術、センシング結果から状況を判断する技術、センシング結果をデータベースとして保存する技術などの研究開発に取り組んでいる。以下では、具体的な研究内容を紹介する。

(1) 建設機械の遠隔操作のための任意視点映像生成

建設機械を遠隔操作する際、建設機械に搭載された複数のカメラの情報を効率的にオペレータに提示することが重要である。そこで、建設機械に取り付けたカメラの

映像に対して画像処理を施し、あたかも別の位置に設置してあるカメラから見たような別視点映像を生成し、オペレータに提示する技術について研究開発を行っている(図1)⁷⁾。



図-1 別視点映像生成結果の例

(2) 建設機械の遠隔操作のための遮蔽物透視映像生成

建設機械を遠隔操作する際、作業対象物が遮蔽物に隠れて見えないことがある。そこでカメラと測距センサを用いることで、視野を妨害する遮蔽物を映像中から除去し、遮蔽物を透視したような映像を生成し、オペレータに提示する技術について研究開発を行っている(図2)⁸⁾。



(a) 元の映像 (b) 透視映像

図-2 遮蔽物透視映像生成結果の例

(3) 土工現場におけるカメラを用いた建設機械の位置姿勢推定

建設機械の位置計測が必要な場合、GNSS(衛星を利用した測位システム)が一般的に用いられる方法の1つである。しかし、土工現場によっては、GNSS信号が届きにくい環境も存在する。そこで、建設機械にカメラを搭載し、カメラから得られた映像に対して画像処理を施すことにより、建設機械の位置と姿勢を推定する技術について研究開発を行っている(図3)^{9),10)}。

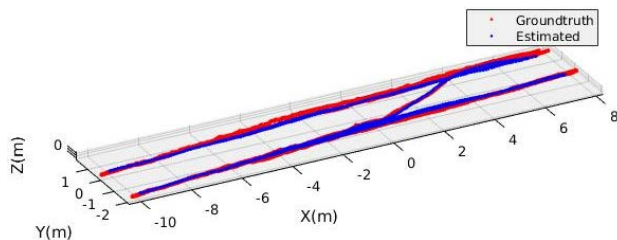


図-3 位置姿勢推定結果の例

(4) 無人化施工における遠隔操作オペレータへの映像自動提示

無人化施工などの現場においては、環境中にパン・チルト・ズームが可能な外部カメラを設置して、外部カメラの映像を見ながら建設機械を遠隔操作することがある。このとき、建設機械のオペレータ以外にも、外部カメラを制御するカメラオペレータが必要となる。そこで、画像処理技術やAI技術を用いて状況を判断して外部カメラを自動的に制御することでカメラオペレータを不要とし、建設機械のオペレータのみで作業を可能とする技術について研究開発を行っている(図4)¹¹⁾。

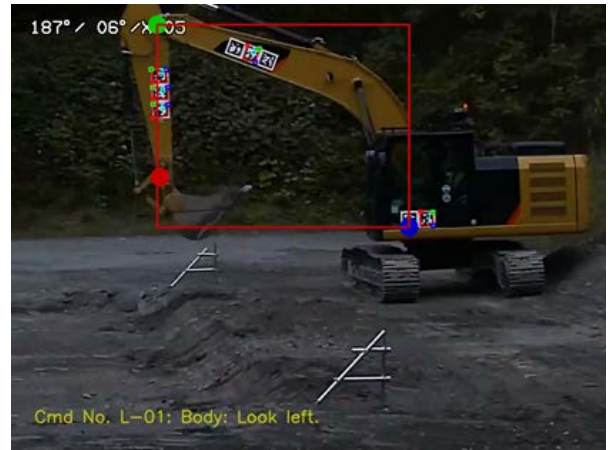


図-4 映像自動提示結果の例

(5) 橋梁点検のための全天球カメラを用いたドローンの位置姿勢推定

ドローンを用いて橋梁点検を行う際には、衛星からのGNSS信号が橋梁自体によって遮られ、ドローンの制御および点検位置の確認に必要な不可欠なドローンの位置姿勢が分からなくなることがある。そこで、全天球カメラと呼ばれる360度の視野を有するカメラをドローンに搭載し、画像処理の技術を用いて全天球映像を解析することにより、ドローンの位置姿勢を推定する技術について研究開発を行っている(図5)¹²⁾⁻¹⁴⁾。

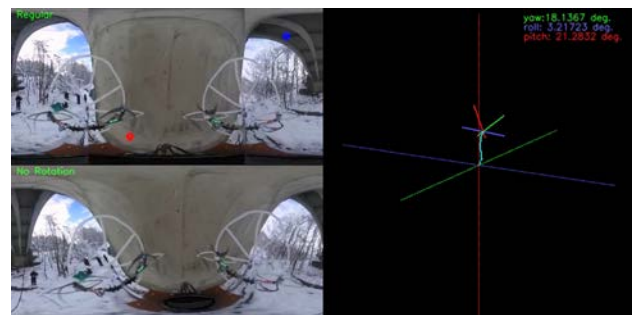


図-5 位置姿勢推定結果の例

(6) 画像・音響信号マルチモーダル処理を用いたコンクリート構造物の自動点検

コンクリート構造物の点検では、ハンマーでコンクリ

ートを叩いた際の音を人間が聞くことでコンクリート状況（変状）を調べる打音検査と呼ばれる方法が用いられる。ここでは、画像処理技術・音響信号処理技術・AI技術を組み合わせて用いることで、自動的に打音検査を行う技術について研究開発を行っている（図6）¹⁵⁻²¹⁾。

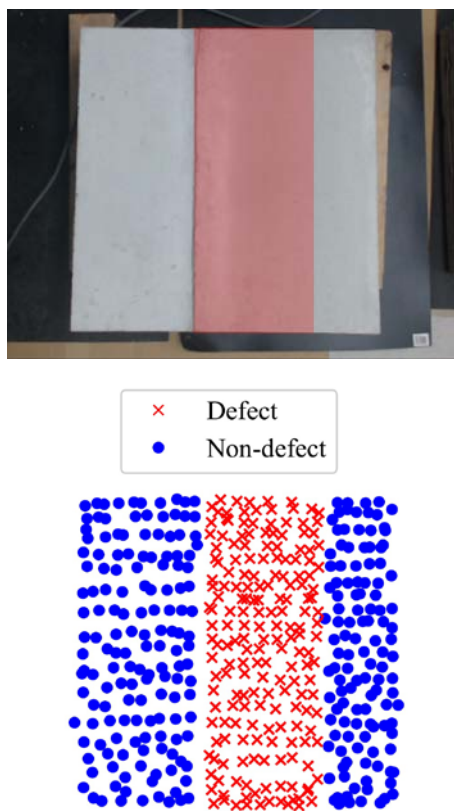


図-6 打音検査結果の例

(7) 海洋土木のための音響カメラを用いた水中3次元計測

音響カメラと呼ばれる特殊なセンサを用いることで、水中の状況を映像化することが可能であるが、映像のままでは3次元的な状況を把握することが難しい。そこで、音響カメラで取得した映像を画像処理技術やAI技術で解析することで、水中環境の3次元計測を実現する研究開発を行っている（図7）²²⁾。

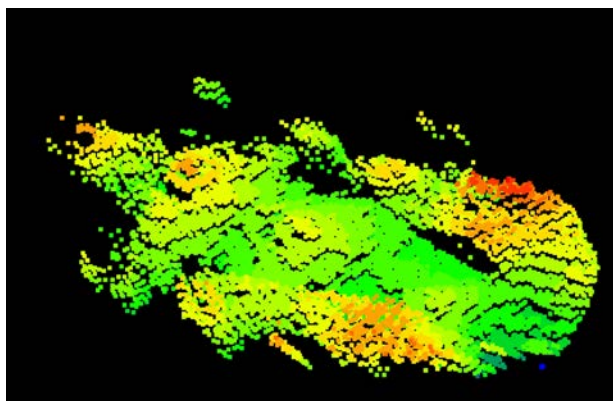


図-7 水中3次元計測結果の例

3. おわりに

本稿では、ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用したi-Constructionの推進について述べた。具体的には、建設機械の遠隔操作のための任意視点映像生成、建設機械の遠隔操作のための遮蔽物透視映像生成、土工現場におけるカメラを用いた建設機械の位置姿勢推定、無人化施工における遠隔操作オペレータへの映像自動提示、橋梁点検のための全天球カメラを用いたドローンの位置姿勢推定、画像・音響信号マルチモーダル処理を用いたコンクリート構造物の自動点検、海洋土木のための音響カメラを用いた水中3次元計測について紹介した。

今後も、ロボット・AI・センサ情報処理技術を活用することで、建設現場での生産性向上や安全性向上に資する研究開発に引き続き取り組む予定である。

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、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）、国土交通省建設技術研究開発助成制度、一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成、および、株式会社安藤・間、株式会社大林組、株式会社小松製作所、清水建設株式会社、東急建設株式会社、富士通株式会社、株式会社フジタ、若築建設株式会社との共同研究によって行われた。

参考文献

- 1) 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 杉本 和也, 野末 晃, 三村 洋一, 小幡 克実, 山下 淳, 浅間 一: “無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発,” 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, 14-00031, 2015.
- 2) 小松 廉, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一: “カメラ配置設計による故障時に備えたロボット遠隔操作のための俯瞰映像提示システムの開発,” 精密工学会誌, Vol. 81, No. 12, pp. 1206-1212, 2015.
- 3) 栗島 靖之, 小松 廉, 藤井 浩光, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一: “ロボット遠隔操作のための LiDAR を用いた全方位 3 次元測距による俯瞰映像上での障害物提示,” 精密工学会誌, Vol. 83, No. 12, pp. 1216-1223, 2017.
- 4) 岩滝 宗一郎, 孫 蔚, 藤井 浩光, 淵田 正隆, アレッサンドロ モロ, 野田 隆司, 久禮 一樹, 中沢 浩一, 吉灘 裕, 山下 淳, 浅間 一: “ブルドーザの位置姿勢変化および周囲危険領域を提示可能な任意視点映像提示,” 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866, 18-00196, 2018.
- 5) 岩滝 宗一郎, 淵田 正隆, モロ アレッサンドロ, 野田 隆司, 矢津田 修, 中沢 浩一, 吉灘 裕, 山下 淳, 浅間 一: “レーザレーダと複数のカメラを用いた任意視点映像提示システムのセンサキャリブレーション,” 精密工学会誌, Vol. 85, No. 12, pp. 1110-1116, 2019.
- 6) Weijie Chen, Sarthak Pathak, Alessandro Moro, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Extrinsic Parameters Cal-

- ibration of Multiple Fisheye Cameras in Manhattan Worlds,” Proceedings of SPIE, Vol. 11515, 2020.
- 7) Ren Komatsu, Hiromitsu Fujii, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Free Viewpoint Image Generation System Using Fisheye Cameras and a Laser Rangefinder for Indoor Robot Teleoperation,” ROBOMECH Journal, Vol. 7, 15, 2020.
 - 8) 長野 樹, 藤井 浩光, 橘高 達也, 淵田 正隆, 深瀬 勇太郎, 青木 滋, 鳴海 智博, 山下 淳, 浅間 一: “遠隔操縦建機のための屋外環境における遮蔽物透視システム,” 精密工学会誌, Vol. 84, No. 12, pp. 1085-1091, 2018.
 - 9) Runqiu Bao, Ren Komatsu, Renato Miyagusuku, Masaki Chino, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Cost-effective and Robust Visual Based Localization with Consumer-level Cameras at Construction Sites,” Proceedings of the 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics, pp. 1007-1009, 2019.
 - 10) 千野 雅紀, 包 潤秋, 小松 廉, Renato Miyagusuku, 山下 淳, 浅間 一: “土工現場における画像を用いた位置情報取得システムの適用可能性”, 土木学会令和 2 年度全国大会第 75 回年次学術講演会講演概要集, 2020.
 - 11) 筑紫 彰太, 森山 湧志, 藤井 浩光, 田村 雄介, 山川 博司, 永谷 圭司, 坂井 郁也, 千葉 拓史, 山本 新吾, 茶山 和博, 山下 淳, 浅間 一: “遠隔操作オペレータの要求仕様に基づいたバックホウ盛土作業のための映像自動提示,” 精密工学会誌, Vol. 86, No. 2, pp. 164-170, 2020.
 - 12) Yoshiro Hada, Manabu Nakao, Moyuru Yamada, Hiroki Kobayashi, Naoyuki Sawasaki, Katsunori Yokoji, Satoshi Kanai, Fumiki Tanaka, Hiroaki Date, Sarthak Pathak, Atsushi Yamashita, Manabu Yamada and Toshiya Sugawara: “Development of a Bridge Inspection Support System Using Two-Wheeled Multicopter and 3D Modeling Technology,” Journal of Disaster Research, Vol. 12, No. 3, pp. 593-606, 2017.
 - 13) Sarthak Pathak, Alessandro Moro, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Spherical Video Stabilization by Estimating Rotation from Dense Optical Flow Fields,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 29, No. 3, pp. 566-579, 2017.
 - 14) Sarthak Pathak, Alessandro Moro, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Optical Flow-based Epipolar Estimation of Spherical Image Pairs for 3D Reconstruction,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 10, No. 5, pp. 476-485, 2017.
 - 15) Jun Younes Louhi Kasahara, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Unsupervised Learning Approach to Automation of Hammering Test Using Topological Information,” ROBOMECH Journal, Vol. 4, 13, 2017.
 - 16) Jun Younes Louhi Kasahara, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Fuzzy Clustering of Spatially Relevant Acoustic Data for Defect Detection,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No. 3, pp. 2616-2623, 2018.
 - 17) Satoru Nakamura, Atsushi Yamashita, Fumihiro Inoue, Daisuke Inoue, Yusuke Takahashi, Nobukazu Kamimura and Takao Ueno: “Inspection Test of a Tunnel with the Inspection Vehicle for Tunnel Lining Concrete,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 31, No. 6, pp. 762-771, 2019.
 - 18) 高橋 悠輔, 前原 聡, 藤井 浩光, 山下 淳: “人の音に近い打音装置を使った変状検出手法,” 日本ロボット学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 113-118, 2020.
 - 19) Jun Younes Louhi Kasahara, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Acoustic Inspection of Concrete Structures Using Active Weak Supervision and Visual Information,” Sensors, Vol. 20, No. 3, 629, 2020.
 - 20) Jun Younes Louhi Kasahara, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Complementarity of Sensors and Weak Supervision for Defect Detection in Concrete Structures,” Proceedings of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 1-6, 2020.
 - 21) 湊 真司, ルイ笠原 純ユネス, モロ アレッサンドロ, 禹ハンウル, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一: “カセンサとカメラからのマルチモーダルデータに基づいたコンクリート構造物の変状検出,” 動的画像処理実利用化ワークショップ 2020 講演論文集, pp. 261-267, 2020.
 - 22) Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Hiroshi Tsuchiya, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Rotation Estimation of Acoustic Camera Based on Illuminated Area in Acoustic Image,” IFAC Paper-Online, Vol. 52, No. 21, pp. 163-168, 2019.

(2020.6.12 受付)

CHALLENGES FOR I-CONSTRUCTION USING ROBOTICS, AI, AND SENSOR INFORMATION PROCESSING TECHNIQUES

Atsushi YAMASHITA, Jun Younes LOUHI KASAHARA, Sarthak PATHAK,
Ren KOMATSU, Shota CHIKUSHI, Hajime ASAMA, Ryosuke YAJIMA,
Shunsuke HAMASAKI, Keiji NAGATANI and Kazumasa OZAWA

This paper introduces challenges for i-Construction using robotics, AI, and sensor information processing techniques, including generation method of free viewpoint images for teleoperation of construction machine, generation method of see-through images for teleoperation of construction machine, pose estimation method using stereo camera, automatic video presentation method for remote operator, pose estimation method of drone using spherical camera for bridge inspection, automatic inspection method of concrete structures using image and sound signal processing, and underwater sensing using acoustic camera.