

# インテリジェント施工システムのための施工技術の開発

## 第一報：無人建機の知能化に向けた環境計測及び遠隔操作性の向上

### Development of Construction Technology for Intelligent Construction System

First report: Intelligent of Unmanned Construction Machine  
via Environmental Measurement and Remote Operability Improvement

|                   |              |             |
|-------------------|--------------|-------------|
| ○筑紫彰太（東大）         | 正 藤井浩光（千葉工大） | 正 田村雄介（東大）  |
| 山川博司（東大）          | 正 永谷圭司（東大）   | 正 池 勇勲（中央大） |
| 坂井郁也（フジタ）         | 千葉拓史（フジタ）    | 山本新吾（フジタ）   |
| 茶山和博（高環境エンジニアリング） |              | 正 山下 淳（東大）  |
| 正 浅間 一（東大）        |              |             |

Shota CHIKUSHI, The University of Tokyo, chikushi@robot.t.u-tokyo.ac.jp  
Hiromitsu FUJII, Chiba Institute of Technology  
Yusuke TAMURA, The University of Tokyo  
Hiroshi YAMAKAWA, The University of Tokyo  
Keiji NAGATANI, The University of Tokyo  
Yonghoon JI, Chuo University  
Ikuya SAKAI, Fujita Co., Ltd.  
Takumi CHIBA, Fujita Co., Ltd.  
Shingo YAMAMOTO, Fujita Co., Ltd.  
Kazuhiro CHAYAMA, KOKANKYO Engineering Co., Ltd.  
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo  
Hajime ASAMA, The University of Tokyo

When a natural disaster occurs, investigation and restoration are necessary to prevent damage spread. However, disaster scenarios always have a risk of secondary disasters, making it difficult to send in human for a response. In such situations, it is common to use unmanned construction machines. Moreover, recently, intelligent construction machines are required for efficient unmanned construction. Therefore, in the authors of this paper have tried to realize an intelligent construction system. This paper introduces the research and development conducted with regards to this intelligent construction system. This includes map generation by a drone, visualization for remote operation, and tumble avoidance.

**Key Words:** Intelligent construction system, Unmanned construction machine, Disaster response

## 1. はじめに

日本は地殻変動帯に位置しており、火山が多く、地震も多い。さらに国土の約7割は森林であり、急流な河川が多く、降水量も多い。そのため、噴火による溶岩流や土石流、地震による土砂崩れ、大雨による河川の氾濫等の自然災害が各地で発生している。そのような自然災害が発生した場合、被害の拡大を防ぐために、調査や復旧活動を迅速に行う必要がある。しかしながら、2次被害の危険性から、人の立ち入りが困難な災害現場も存在する。そのような災害現場においては無人化施工が有効である [1]。無人化施工とは、人の立ち入りが困難な災害現場に遠隔操作型の無人建機やロボットを投入して、2次被害の危険性が無い遠隔地からオペレータが無人建機に搭載されたカメラ映像や災害現場に設置された外部カメラ映像に基づきコントローラを操作し、災害現場の無人建機を操縦、施工する技術である。そのため、これまでに人の立ち入りが困難な災害現場において無人化施工は使われてきた。例えば、1990年11月に始まった雲仙普賢岳の噴火災害における復旧活動では、無人建機による除石作業、測量、砂防ダム工事等が行われた [2]。また、2010年7月に鹿児島県南大隅町で発生した大雨による土石流災害では、無人建機による土砂の掘削、積込、搬出等の復旧活動が行われた [3]。

これらの背景からも明らかであるように無人化施工はオペレータの安全を確保した災害復旧に有効である。しかしながら、無人建機の遠隔操作は有人建機の搭乗操作と比較して、土

工における施工効率が6割程度になるとも言われており [4]、その原因は操作遅延であると言われている [5]。そのため、無人化施工においては操作性の向上に加えて、遠隔操作をベースとしながらも無人建機の知能化が重要であると考えられる。そこで、迅速な災害対応、施工の省力化・効率化のための広く使える無人化技術の構築を目指し、東京大学と株式会社フジタによって社会連携講座「インテリジェント施工システム」を組織した。本稿では社会連携講座「インテリジェント施工システム」及び、インテリジェント施工システムにおける無人建機の知能化に向けた環境計測及び遠隔操作性の向上について述べる。

## 2. 社会連携講座「インテリジェント施工システム」

社会連携講座「インテリジェント施工システム」は自然災害の復旧に迅速かつ的確に対応する施工技術の開発を目的とし、遠隔操作型の無人建機を用いた施工技術の知能化に関する研究開発と教育を行う。研究開発においては、無人建機、ロボット、ドローン、ICT等の先端技術を使った施工技術の研究開発及び、新たなインフラ点検・補修工事や災害復旧工事におけるインテリジェント施工システムの研究を行う。教育においては、大学と企業との連携により実際の無人化施工現場から得られた研究の問題設定、解決法の提案、検証を学生が主体的に行うことで、無人化施工及び施工技術の知能化に関する理解を深める。

遠隔操作をベースにした無人建機の知能化を実現するためには、遠隔操作性の向上に加えて、環境計測及び、その情報に基づいて自律的に行動する必要がある。そこで、社会連携講座「インテリジェント施工システム」においては、環境計測及び遠隔操作性の向上に関する研究開発を行った。

### 3. 環境計測

#### 3.1 3次元地図の生成

災害現場においては、地形や周囲環境が時々刻々と変化する。そのため、広域的かつ継続的に災害現場の環境計測をして、地形や周囲環境の情報を更新して、それらの情報に基づき無人建機を運用する必要がある。そこで、環境計測においては、1つ目にドローンと無人建機から取得した計測データの統合による3次元地図生成手法を構築した [6]。本手法は、ドローンより取得した画像データに基づき SfM (Structure from Motion) による3次元地図生成を行い、無人建機に搭載されたマーカと IMU のデータを統合することで、スケールと傾斜情報を持つ3次元地図を生成する。

#### 3.2 土量変化の推定

環境計測において、2つ目にドローンの計測データに基づき3次元地図上における土量の変化を推定する手法を構築した [7]。本手法は、地形変化前の大域的地図と地形変化後の局所的3次元地図から FPFH (Fast Point Feature Histograms) によって高速に粗な特徴量抽出を行い、この特徴量を初期値として、ICP (Iterative Closest Point) による密な位置合わせを行い、3次元地図上での土量の変化を推定する。

### 4. 遠隔操作性の向上

#### 4.1 俯瞰映像の提示

災害現場における無人建機の移動経路は、土砂等が堆積し、障害物が存在する不整地環境が想定される。さらに、無人建機の遠隔操作は通常の搭乗操作と比較して、建機オペレータに提示される視覚情報は遠近感の把握が困難であり、体性感覚も得られない。そのような状況において、無人建機に搭載された1つのカメラ映像で周囲の環境を認識し、操縦することは困難である。また、1人の無人建機オペレータに対して、複数のカメラ映像を同時に提示して周囲環境の認識を行うことは施工効率を低下させる。そのため、無人建機オペレータへの映像提示は無人建機の周囲環境を1つの映像から認識できる必要がある。そこで、遠隔操作性の向上として、1つ目に屋内環境における俯瞰映像生成手法を構築した [8]。本手法は、移動ロボットに搭載されたレーザ測域センサを用いて、周囲環境の3次元メッシュモデルを生成する。移動ロボットに搭載された4台の魚眼カメラ映像を3次元メッシュモデルに投影することで、移動ロボットを周囲から眺めているような3人称視点を生成する。

遠隔操作性の向上として、2つ目に移動ロボットと障害物の正確な相対位置を俯瞰映像上に提示する手法を構築した [9-11]。本手法は魚眼カメラでは計測できない領域に存在する障害物を移動ロボットに搭載された3次元レーザ測域センサを用いて計測することで、俯瞰映像上に提示、移動ロボットオペレータへの注意を促す。

#### 4.2 不整地走行における転倒回避

災害現場における不整地環境では、急な斜面や起伏の激しい地形を転倒することなく走行する必要がある。しかしながら、そのような環境において無人建機に搭載したセンサのフ

ィードバックによって走行中の無人建機の状況を把握して、転倒を回避することは困難である。そのため、無人建機が走行する地形、地形に対する姿勢、速度、加速度を含むダイナミクスを考慮する必要がある。

そこで、遠隔操作性の向上として、3つ目に移動ロボットのダイナミクスを考慮して移動経路上に転倒可能性を提示する手法を構築した [12]。本手法は、環境計測で取得した3次元地形情報に基づき、動力学シミュレーションにおいて、移動ロボットの走行安定性を評価して転倒可能性を算出、移動ロボットオペレータが選択した経路に対して転倒可能性を提示する。また、転倒すると提示された地形において、移動ロボットに搭載したマニピュレータ姿勢を変化させることで、転倒回避が可能であることを確認した [13]。

遠隔操作性の向上として、4つ目に移動ロボットに搭載したマニピュレータを自律的に動作させることで転倒を回避する手法を構築した [14]。本手法は、転倒可能性の提示手法と同様に3次元地形情報に基づき、動力学シミュレーションにおいて、安定性評価値を算出し、その評価値が向上する方向にマニピュレータを自律的に動作、重心を移動させ、転倒を回避する。

#### 4.3 カメラ操作の自動化に向けた映像評価

無人化施工における盛土等の作業は無人建機に搭載された車載カメラと無人建機の外部に設置された外部カメラ映像に基づき行われる。そのため、無人建機を操縦する無人建機オペレータと外部カメラのパン・チルト・ズームを操作するカメラオペレータの2名によって運用される。しかしながら、無人化施工における作業は通常の搭乗操作と比較して、遠近感の把握が困難であることに加えて、無人建機オペレータが望む映像をカメラオペレータが提供できていない問題がある。そこで、遠隔操作性向上として、5つ目に外部カメラ映像の評価手法を構築した [15]。本手法は無人化施工現場でのヒアリング調査から、無人建機オペレータへ提示する映像の要求仕様を抽出し、外部カメラから取得した画像データと3次元レーザ測域センサから取得した3次元距離情報を用いて映像を評価する。

### 5. おわりに

本稿では、社会連携講座「インテリジェント施工システム」及び、インテリジェント施工システムにおける無人建機の知能化に向けた環境計測及び遠隔操作性の向上について述べた。環境計測においては、3次元地図の生成、土量変化の推定を行い、遠隔操作性の向上においては、俯瞰映像の提示、不整地走行における転倒回避、カメラ操作の自動化を行った。また、移動ロボットで検証した手法は無人建機への適用が可能であるため、今後はそれぞれの手法を発展させ、システム統合、実環境での検証を行い、建機の知能化を行うことを予定する。

### 参考文献

- [1] Kazuhiro Chayama, Akira Fujioka, Kenji Kawashima, Hiroshi Yamamoto, Yasushi Nitta, Chikao Ueki, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, "Technology of Unmanned Construction System in Japan", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 26, No. 4, pp. 403-417, 2014.
- [2] 野末晃, 藤岡晃, 浅沼康樹, 池内俊裕, 三鬼尚臣, 岡野幹雄, 山本新吾, "無人化施工技術の開発 Phase11", フジタ技術研究報告, no. 48, pp. 73-78, 2012.
- [3] 宇野政武, 羽山里志, 池ノ内烈, "緊急災害における無人化施工について", 西松建設技報, vol. 35, 2012.
- [4] 新田恭士, "災害復旧に貢献する無人化施工技術", 土木技術, vol. 67, no. 4, pp.16-23, 2012.
- [5] 山口崇, 吉田正, 石松豊, "遠隔操作におけるマンマシンインター

- フェイスに関する実態調査”, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, vol. 59, pp. 373-374, 2014.
- [6] Yuyang Shao, Yonghoon Ji, Hiromitsu Fujii, Keiji Nagatani, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Estimation of Scale and Slope Information for Structure from Motion-based 3D Map”, Proceedings of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 208-213, 2017.
- [7] Yuyang Shao, Yonghoon Ji, Hiromitsu Fujii, Shingo Yamamoto, Takumi Chiba, Kazuhiro Chayama, Yusuke Tamura, Keiji Nagatani, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Estimation of Soil Volume Change Using UAV-based 3D Terrain Mapping”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2017 講演論文集, pp. 247-250, 2017.
- [8] 小松廉, 藤井浩光, 田村雄介, 山下淳, 浅間一, “複数台のカメラとレーザ測域センサによる人工物の幾何情報を考慮した任意視点映像生成”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 2536-2540, 2016.
- [9] 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 3 次元測域センサを用いた俯瞰映像上での障害物提示”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 498-503, 2016.
- [10] 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.
- [11] Yasuyuki Awashima, Ren Komatsu, Hiromitsu Fujii, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Visualization of Obstacles on Bird's-eye View Using Depth Sensor for Remote Controlled Robot”, Proceedings of the International Workshop on Advanced Image Technology 2017, 2017.
- [12] Yasuyuki Awashima, Hiromitsu Fujii, Yusuke Tamura, Keiji Nagatani, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Safeness Visualization of Terrain for Teleoperation of Mobile Robot Using 3D Environment Map and Dynamic Simulator”, Proceedings of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2017.
- [13] 栗島靖之, 藤井浩光, 田村雄介, 永谷圭司, 山下淳, 浅間一, “ロボット遠隔操作のための動力学シミュレーションを用いた走行安定性の提示”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'18 講演論文集, 2A1-K06, pp. 1-4, 2018.
- [14] 水野秀哉, 筑紫彰太, 藤井浩光, 田村雄介, 永谷圭司, 山下淳, 浅間一, “遠隔操作ロボット走行時における機体の姿勢変化による転倒回避”, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 1680-1683, 2018.
- [15] 森山湧志, 藤井浩光, 田村雄介, 山川博司, 三鬼尚臣, 千葉拓史, 山本新吾, 茶山和博, 永谷圭司, 山下淳, 浅間一, “バックホウの盛土作業における遠隔操作のための映像評価”, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 2763-2768, 2017.