

# 災害対応における建設ロボットのための遠隔操作技術の開発

## Development of Remote Control Technology for Disaster Response

### Construction Robots

○筑紫彰太 (東大) 淵田正隆 (東大) 河野 仁 (工芸大)  
モロ アレサンドロ (ライテックス/東大) 正 ミヤグスク レナート (東大)  
アンジェラ ファラガッソ (東大) 正 禹 ハンウル (東大/秋田県立大)  
正 藤井浩光 (千葉工大) 正 池 勇勳 (中央大) 正 田村雄介 (東大)  
山川博司 (東大) 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  
Masataka FUCHIDA, The University of Tokyo Hitoshi KONO, Tokyo Polytechnic University  
Alessandro MORO, RITECS Inc. / The University of Tokyo  
Renato MIYAGUSUKU, The University of Tokyo Angela FARAGASSO, The University of Tokyo  
Hanwool WOO, The University of Tokyo / Akita Prefectural University  
Hiromitsu FUJII, Chiba Institute of Technology Yonghoon JI, Chuo University  
Yusuke TAMURA, The University of Tokyo Hiroshi YAMAKAWA, The University of Tokyo  
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Natural calamities, such as landslides and flood, are very common in Japan due to heavy rains, earthquake and volcanic activities. The prompt response to those natural disasters reckon on the deployment of construction machines and equipments for search and rescue, assistance, assessment of damages, etc. In these cases, unmanned robots are the preferred choice, as they minimize the risks involved with secondary damages. The primary aim of the ImPACT Tough Robotics Challenge project was to develop the required technologies needed to employ unmanned robots in disaster response. Within the scope of this project, the work herein presented focused on remote operation technology of construction robots. Specifically, it highlights the strategy designed for ensuring safe behaviors and remote visualization for unmanned construction robots.

**Key Words:** Construction robot, Remote control, Disaster response

## 1. はじめに

日本は地震、台風、噴火等の自然災害が多く、災害が発生した場合の対応が喫緊の課題となっており、そのような災害が発生した場合、人の立ち入りが困難な現場も存在する。そのため、災害対応においては遠隔操作型の建設機械やロボットの運用が求められている。これらの背景から ImPACT タフ・ロボティクスチャレンジ (以降: ImPACT TRC) が組織された。ImPACT TRC とは、極限の災害現場における遠隔、自律ロボットの実現を目指した内閣府総合科学技術・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である。ロボットによる災害対応を実現するために、ImPACT TRC においては、飛行ロボット、脚ロボット、索状ロボット等、いくつかの分科会に分かれて研究開発が行われた。

建設ロボット分科会においては、図 1 に示す建設ロボットが開発された。図 1 に示す建設ロボットは 2 本の作業機と 2 重旋回機構を有している。さらに、建設ロボット周囲の映像を提示するための 4 台の魚眼カメラ、建設ロボット上空からの映像を提示するための有線給電式マルチロータ機、霧の中の映像を提示するための赤外線カメラ等が搭載されている [1]。その中で、著者らは遠隔操作のための経路計画、行動生成、映像提示、3 次元計測等の研究開発を行った。

そこで、本稿では ImPACT TRC 建設ロボットにおける成果の中でも特に遠隔操作のための移動、映像提示、計測に関する技術を報告する。

## 2. 移動に関する技術

### 2.1 経路計画

災害現場で活動する建設ロボットが転倒することなく移動

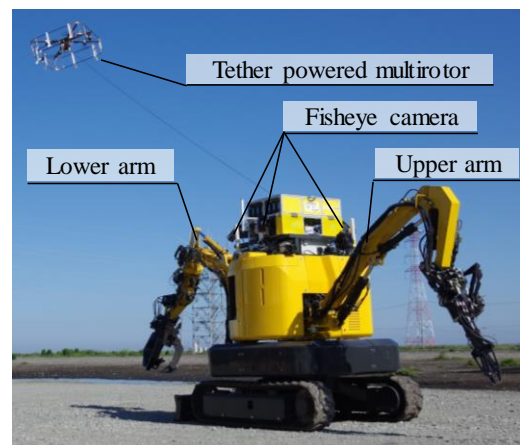


Fig.1 Overview of the dual arm construction robot [1]

することは重要である。また、不整地を走行する場合、環境の起伏も考慮した 3 次元経路計画が必要となる。そこで、3 次元地図を用いた不整地における経路計画手法を構築した [2, 3]。本手法は、不整地を含む 3 次元地図を用いて、ランダムサンプリングによる経路探索を行い、車両特性を考慮した経路計画を行う。また、災害現場における不整地走行の場合、スリップ等の影響で推定した位置に対して誤差が生じることが考えられる。誤差を考慮せずに移動した場合、障害物との衝突や転倒の危険性もある。そこで、位置誤差を考慮した経路計画手法を構築した [4]。本手法は、ランダムサンプリングによって探索した経路に対して、位置誤差を誤差楕円体で表し、障害物と誤差楕円体の衝突を検出することで、位置誤差に対してロバストな経路計画を行う。さらに、構築した手法に基づき実機

実験を行った [5]. その結果、構築した手法は実環境においても位置誤差に対してロバストかつ安全な経路計画が可能であることを確認した.

## 2.2 行動生成

災害現場で活動する建設ロボットが転倒や故障で停滞することなく、復旧活動を行うことは重要である. 故障が発生し、動けなくなった場合、作業の停滞を招くだけでなく、後続の復旧活動の妨げになる恐れもある. そのため、故障が生じた場合においても、移動して、後続の建機やロボットの経路から退避する必要がある. また、不整地移動においては地面と接地しているクローラが故障する可能性が最も大きい. そこで、行動生成においては、故障クローラの代替機能として作業機などの残存機能を活用した単腕無人建機のクローラ故障時における行動獲得手法を構築した [6, 7]. 本手法は動力学シミュレーションと強化学習を用いて、故障していないクローラと作業機の動作を学習させ、片側のクローラが故障した場合の直進方向へ移動するための行動を生成する. 行動を生成するための学習を促すために移動ベクトル報酬とゴール報酬に加えて、無人建機の NE 安定余裕に基づく安定性の報酬を与えた. その結果、単腕無人建機の片側のクローラ故障時の行動を生成して、直進方向への移動が可能であることをシミュレーションで確認した.

## 3. 映像提示に関する技術

### 3.1 俯瞰映像提示

不整地を移動するためには、移動対象である無人建機と移動経路上の段差や穴、障害物との相対的な位置関係を認識することが重要である. 相対位置を認識するためには、無人建機に搭載されたカメラの 1 人称視点の映像では不十分であり、無人建機を周囲から眺めている 3 人称視点の有効である.

そこで、任意方向からの映像提示が可能な俯瞰映像提示手法を構築した [8]. 本手法は図 1 に示すように無人建機に搭載した 4 台の魚眼カメラ映像を統合することで、図 2 に示すような無人建機を周囲から眺めている 3 人称視点を疑似的に生成する手法である. また、不整地における災害復旧においては振動や衝撃でカメラ等の機器が故障する可能性が考えられる. 俯瞰映像提示においては、カメラが故障した場合、視認性が大きく損なわれる. そこで、カメラ故障時の俯瞰映像提示手法を構築した [9, 10]. 本手法は、視野が広い魚眼カメラの特徴を生かし、カメラ配置設計を考慮することで、魚眼カメラが 1 台または対角線上の 2 台故障した場合においても俯瞰映像を提示する. その結果、複数台のカメラが故障した場合においても視野欠損の少ない俯瞰映像提示が可能であることを確認、カメラ故障に対する信頼性が向上した.

### 3.2 半隠消映像

災害現場において、建設ロボットが瓦礫の持ち上げ、撤去等の作業を行う場合、手先と把持する対象の位置合わせが必要となる. このような繊細な作業は、手先カメラの映像に基づいて行う. しかしながら、手先カメラと把持する対象の間に障害物やロボット自身による死角が存在する場合、把持する対象の全体を正確に認識することができず、操作性が低下する. そこで、障害物によって死角が存在する把持対象の全体を認識可能な半隠消映像生成手法を構築した [11]. 本手法は、作業機とロボットに搭載した RGB-D センサを用いて、それらの画像情報を統合することで、障害物を透視したような映像を生成する.

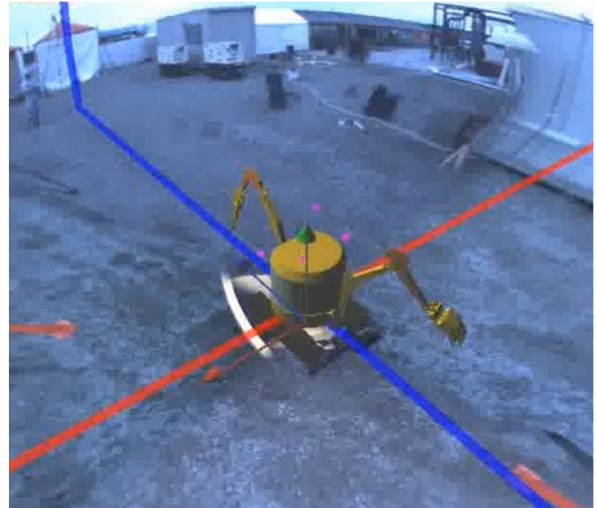


Fig. 2 Arbitrary viewpoint visualization

また、屋外での建設ロボットに搭載可能な半隠消映像生成手法を構築した [12]. 太陽光の影響を受ける屋外においては赤外光を用いた RGB-D センサでは距離計測できない. そこで、本手法は、屋外での距離計測手段の 1 つであるレーザー光による Time of Flight 方式のセンサを用いた LiDAR を使用する. 手先カメラ (以降: メインカメラ) によって把持対象を確認し、サブカメラと LiDAR によってメインカメラの死角となる領域の情報を取得する. サブカメラと LiDAR 情報に基づき作成したテクスチャ付きメッシュをメインカメラの映像に重畳することで半隠消映像を生成する. その結果、太陽光の影響を受ける屋外環境下において、把持対象と周囲環境を 1 つの映像で提示可能であることを確認した.

## 4. 計測に関する技術

### 4.1 水中物体の 3 次元計測

災害対応においては、水中環境での作業も想定される. 一般的な水中計測においては RGB カメラが使用される. しかしながら、災害現場における水中計測は濁りが発生している可能性もあり、そのような環境においては RGB カメラでは計測できない. そこで、音響カメラを用いた水中環境における 3 次元計測手法を構築した [13]. 本手法は、複数の異なる視点から取得した音響カメラ画像における特徴点情報に基づき、拡張カルマンフィルタを用いることで音響カメラの位置、姿勢、計測物体の 3 次元情報を推定する. また、音響カメラを用いた水中環境における密な 3 次元計測手法を構築した [14]. 本手法は、複数の異なる視点から取得した音響カメラ画像を用いて姿勢グラフ最適化に基づいた Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を行うことで音響カメラの位置、姿勢の推定及び密な 3 次元環境地図を生成する. その結果、水中環境下における密な 3 次元計測が可能であることを確認した.

### 4.2 スケール復元可能な Structure from Motion

複数枚の視点が異なる画像から計測対象の密な 3 次元形状の復元が可能な Structure from Motion (以降: SfM) は 1 台のカメラで計測が可能なため、簡便で災害現場における計測技術として有効である. しかしながら、SfM はカメラの回転と並進移動の向きの推定は可能であるものの、並進移動の大きさ (以降: スケール) は推定できない. そこで、スケール復元可能な SfM を構築した [15]. 本手法は、単眼カメラの前面に透

明平板を設置することで、屈折現象を起こし、その現象により歪みが生じた画像を取得することで、スケール復元を行う。また、構築した手法に基づき実環境において実験を行った [16]。その結果、正確なスケール情報を持つ 3 次元形状の復元が可能であることを確認した。

## 5. おわりに

本稿では、人の立ち入りが困難な災害現場における災害対応に焦点を当て、ImpACT TRC 建設ロボットにおける遠隔操作のための移動、映像提示、計測に関する研究開発について述べた。本稿で構築した技術は ImpACT TRC における建設ロボットに限定される技術ではなく、他の無人建機やロボットにも応用可能である。そのため、今後はそれぞれの要素技術を発展させ、システム統合を行い、実機での検証、災害対応における有効性を評価することを予定する。

## 謝辞

本研究は、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) の一環として実施したものである。

## 参考文献

- [1] 吉灘裕, 横小路泰義, 永谷圭司, 昆陽雅司, 山下淳, 田中正行, “ImpACT タフ・ロボティクス・チャレンジ (TRC) 建設ロボット -2 重旋回・複腕モデルによるフィールド評価実験-”, 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-J02, pp. 1-4, 2018.
- [2] 田中佑典, 池勇勳, 田村雄介, 木村麻衣, 梅村篤志, 金島義治, 村上弘記, 山下淳, 浅間一, “3 次元環境地図を用いた不整地走行無人車両の経路計画”, 第 22 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 203-204, 2017.
- [3] Yonghoon Ji, Yusuke Tanaka, Yusuke Tamura, Mai Kimura, Atsushi Umemura, Yoshiharu Kaneshima, Hiroki Murakami, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Adaptive Motion Planning Based on Vehicle Characteristics and Regulations for Off-Road UGVs”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 1, pp. 599-611, 2019.
- [4] 土居悠輝, 池勇勳, 田村雄介, 池田裕樹, 梅村篤志, 金島義治, 村上弘記, 山下淳, 浅間一, “不整地走行移動ロボットの位置誤差を考慮したロバストな経路計画”, 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. 3438-3443, 2017.
- [5] Yuki Doi, Yonghoon Ji, Yusuke Tamura, Yuki Ikeda, Atsushi Umemura, Yoshiharu Kaneshima, Hiroki Murakami, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Robust Path Planning against Pose Errors for Mobile Robots in Rough Terrain”, Intelligent Autonomous Systems 15, pp. 27-39, 2019.
- [6] Tasuku Ito, Hitoshi Kono, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Recovery Motion Learning for Arm Mounted Mobile Crawler Robot in Drive System's Failure”, Preprints of the 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, pp. 2365-2370, 2017.
- [7] 伊藤翼, 河野仁, 田村雄介, 山下淳, 浅間一, “アーム搭載移動ロボットの駆動系故障時のための強化学習を用いたリカバリモーション獲得”, 第 22 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 91-96, 2017.
- [8] Masataka Fuchida, Shota Chikushi, Alessandro Moro, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Arbitrary Viewpoint Visualization for Disaster Response Robots”, Proceedings of the 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, 2018.
- [9] 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.
- [10] 小松廉, 藤井浩光, Alessandro Moro, 山下淳, 浅間一, “俯瞰映像提示システムのカメラトラブル時における視野確保のための複数魚眼カメラ配置設計”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会`15 講演論文集, 2015.
- [11] 橘高達也, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一, “移動可能な RGB-D センサを用いた任意視点からの遮蔽物透視システム”, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 3, pp. 235-244, 2017.
- [12] 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.
- [13] Ngoc Trung Mai, Hanwool Woo, Yonghoon Ji, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “3-D Reconstruction of Underwater Object Based on Extended Kalman Filter by Using Acoustic Camera Images”, Preprints of the 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, pp. 1066-1072, 2017.
- [14] Yusheng Wang, Yonghoon Ji, Hanwool Woo, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Three-dimensional Underwater Environment Reconstruction with Graph Optimization Using Acoustic Camera”, Proceedings of the 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 28-33, 2019.
- [15] 柴田彬, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一, “単眼カメラと透明平板による屈折を利用したスケール復元が可能な Structure from Motion”, 精密工学会誌, Vol. 82, No. 12, pp. 1045-1053, 2016.
- [16] Akira Shibata, Yukari Okumura, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Refraction-based Bundle Adjustment for Scale Reconstructible Structure from Motion”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 30, No. 4, pp. 660-670, 2018.