

# 土砂災害の初動対応を目指した無人建設機械の状態提示技術の研究開発

## 第一報：有線給電式マルチロータ機を用いた建設機械周囲の情報取得試験

Status Display of Unmanned Construction Machine for Initial Response of Sediment Disasters

1st report: Initial Experiments of Information Acquisition System by Multi-Rotor UAV with a Wired Power Feeding System Mounted on an Unmanned Construction Machine

正 永谷 圭司 (東北大)      薬師川 楓 (東北大)  
学 桐林 星河 (東北大)      渡辺 敦志 (東北大)

Keiji NAGATANI, Tohoku University, daig\_keiji@ieee.org  
Kaede YAKUSHIGAWA, Tohoku University  
Seiga KIRIBAYASHI, Tohoku University  
Atsushi WATANABE, Tohoku University

Our research goal is to improve a status display of information acquisition system for unmanned construction machines to conduct an initial response (within 1 month) of sediment disasters. One of our approaches is to fly a tethered multi-rotor UAV (unmanned aerial vehicle) that mounts a camera, and to obtain environmental information around the construction machine. In order to advance this idea, we conducted a simple flight test of our multi-rotor UAV around a constructed machine. In this paper, we report the initial test, and introduce our lessons learned.

**Key Words:** Multi-rotor UAV, Tethered flight, Construction Machine

### 1 緒言

火山噴火後の土石流災害や集中豪雨による土砂災害の発生に対し、掘削、押土、盛土、土砂運搬等の復旧作業に係る緊急作業が期待される。これらの災害現場は、人の立入りが困難若しくは、人命に危険を及ぼす可能性があるため、人が搭乗しない建設機械を用いた無人化施工技術の利用が有用である。この無人化施工技術は、雲仙普賢岳の砂防堰堤工事に利用され、この15年で大きな進歩を遂げてきた[1]。しかしながら、復旧のフェーズの中でも、特に、発災から1ヶ月以内の「二次災害防止のための最低限の措置を目指した応急復旧」については、熟練オペレータでも、その作業は困難を極める。これは、対象環境の情報不足といった問題に加え、情報を取得するセンサの設置が困難であることが大きな要因である。例えば、視覚情報を用いた無人化建設機械の遠隔操作に有用となる無人カメラ車は、災害初期段階においては、希望の位置に設置することができるとは限らない。よって、建設機械に搭載したセンサのみを用いて、できる限り周囲の環境情報の取得を行うことが望ましい。さらに、不整地環境において作業を行う際、オペレータに対し、三次元環境情報ならびに建設機械の転倒可能性に関する提示を行うことができれば、転倒防止に効果があることも期待できる。

そこで、筆者らは、ImPACT タフロボティクスチャレンジの公募研究助成を受けるとともに、土木研究所の協力を得て、発災から1ヶ月以内の、二次災害防止のための最低限の措置を目指した応急復旧における、無人建設機械の周囲の環境情報と建設機械自体の状態を提示する手法の研究開発を行う。具体的には、以下の3点に関する研究開発を進めることとした。

1. 建設機械のバケットやアーム、ブームの各点に搭載した複数のIMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) が計測した姿勢より、建設機械の姿勢情報を取得する手法を提案する。また、上記より得られる情報を用いて、オペレータに建設機械の姿勢を提示する。
2. 建設機械上部に設置した有線給電式のマルチロータ機に搭載したカメラを利用して、建設機械周囲の視覚情報取得を行い、オペレータに提示する。これにより、オペレータは作

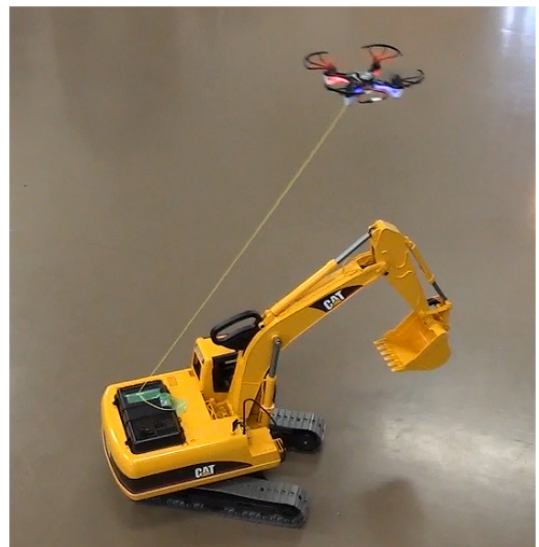


Fig.1 Concept of surveillance around a construction machine with multi-rotor UAV.

業時、無人カメラ車で取得する画像に近い画像情報を見ながら作業を行うことが可能となる。

3. 上記の建設機械の姿勢情報と作業環境情報より、建設機械の作業時の安定性を予測することが可能となる。これにより、対象作業環境内における作業計画の策定ならびに、作業中の転倒可能性の予測が可能となる。

このうち、一番目の研究内容については、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にて、開発状況の報告を行った[2]。そこで、本稿では、二番目の研究内容である、有線給電型マルチロータ機に搭載した視覚情報を用いた画像取得に関



Fig.2 Tethered multi-rotor UAV and heliport

する研究を対象とする。図 1 に、有線給電型マルチロータ機による情報取得のイメージを示す。本研究では、この図に示すように、建設機械上から離陸するマルチロータ機より、建機の周囲の情報取得を行う手法の実現を目指す。このシステムの問題点を抽出するため、本研究では、マルチロータ機の有線給電フライト試験を、土木研究所にて実施した。本稿では、その試験の状況と得られた知見について述べる。

## 2 有線給電マルチロータ機のコセプト

近年、マルチロータ機を安定に飛行させる技術が向上しているため、様々な場面でのマルチロータ機の利用が期待されているが、墜落する危険性は、ゼロにはならないという問題がある。また、搭載可能なバッテリー重量が限られるため、飛行時間も限られる。そこで、筆者らは、安全性確保と飛行時間の増大を図るため、実作業を行うためには、有線給電が必須と考え、これまで、屋内移動ロボットに搭載する小型マルチロータ機の有線給電に関する研究開発を進めてきた [3]。図 2 は、現在研究開発を進めている屋内移動ロボット搭載用のマルチロータ機ならびに有線給電システムである。このシステムの特徴は、ヘリの飛行に合わせてケーブル長を調節する機能の搭載、有線給電方式であるためホバリング可能な時間が長いこと、ならびに、マルチロータ機を回収する際、給電ケーブルを巻き取ることで、ヘリポートに容易かつ確実に着地ができることである。このシステムでは、仮に、作業中にマルチロータ機が墜落した場合も、給電ケーブルを強制的に巻き取ることで、マルチロータ機を回収することが可能となる。

本研究では、この有線給電システムを建設機械に搭載し、長時間のフライトならびに、安定した離着陸の実現を目指す。

## 3 有線給電フライト試験

前節に示した有線給電システムの構築と並行し、有線給電フライトによる利点や問題点を抽出するため、2016 年 2 月 23 日、国立研究開発法人 土木研究所の構内にて、巻き取りを行わない方式で有線給電飛行を行うマルチロータ機による、建設機械の作業状況映像取得試験を行った。

### 3.1 建設機械（バックホー）と環境

本試験で対象とする建設機械は、土木研究所が保有する日立建機の油圧ショベル ZX120（バックホー）を用いた。これは、遠隔からの無人化施工や自律施工の研究開発を行うための、機体質量 10 トンの研究プラットフォームであるが [4]、本試験では、人が搭乗して通常の建機として動作を行った。なお、対象環境は、土木研究所 建設機械屋外実験施設である。対象とするバックホーのタスクは、クローラの移動を伴わない、土砂の掘削と運搬動作である。



Fig.3 Tethered Multi-Rotor UAV.

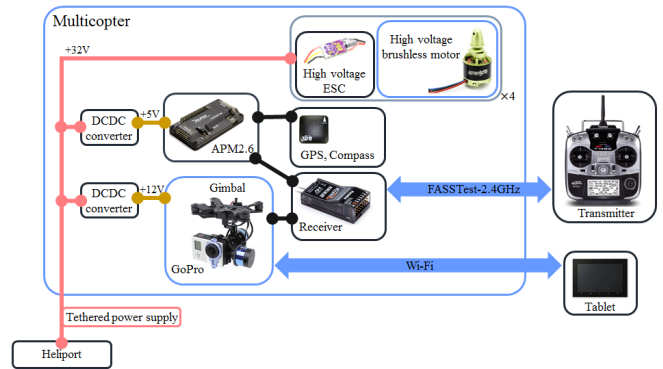


Fig.4 System schematic of the Multi-Rotor UAV.

### 3.2 有線給電マルチロータ機

本試験では、有線給電マルチロータ機として、EnRoute 社製 Zion330 を利用した。この筐体の外観を図 3 に示し、システム構成を図 4 に示す。マルチロータ機のサイズは、550 x 550mm x 210mm であり、下部に、2 軸ジンバル付き GoPro を搭載する。なお、有線給電で飛行を行うことを想定しているため、電源電圧を 32V とし、全体重量は、1600g となる。給電ケーブルの張力制御ならびに強制巻き取りを搭載したヘリポートは、現在製作中のため、今回は、電源をバックホーの横に置き、電源ケーブルは巻き取らず、地面に置いておくこととした。マルチロータ機の制御は、プロポを用いて主オペレータが行うこととした。また、カメラの制御については、搭載した GoPro からの画像を無線で受信し、これを Tablet に表示し、副オペレータがこの画像を見ながら、ジンバル角の変更指示を主オペレータに伝えることとした。

### 3.3 動作試験

本試験では、バックホーに乗車した操作員が、土砂の掘削と運搬を繰り返す動作を継続して行う。これに対し、マルチロータ機の主オペレータは、高度や相対距離を変更しながら、マルチロータ機に搭載した GoPro による作業状況の録画を行った。図 5 に、バックホーの掘削動作のシーンを示す。右上に、マルチロータ機が飛行し、作業状況を録画しているのが見て取れる。

この作業を行った際に、マルチロータ機に搭載したカメラから得たバックホーの作業の様子を図 6 に示す。それぞれ、画像取得したマルチロータ機の飛行高度や位置が異なる。上の画像は、バックホーのほぼ真横から、できるだけバケットに寄って撮影したものである。なお、GoPro は、広角レンズを利用しているため、マルチロータ機は、画像からの見た目よりも、非常に近いところでホバリングを行っていた。また、真横から撮影しているため、マルチロータ機のフレームが移り込んでいるのが見て取れる。二番目の画像は、バケットの左斜め前方、約 6m 上空から取得したものである。全体は分かりやすいが、作業の細かい部分を見るのができない。これは、操作インターフェースの改良によるデジタルズームにより、この問題の改善が期待できる。三番目





Fig.5 One scene of our initial experiments.

の画像は、後方、約 6m 上空から取得したものである。全体は分かりやすいが、作業を行っているバケット付近を見ることが、困難であることが見て取れる。

#### 4 Lessons Learned

本試験後、取得した動画像を見ながら、土木研究所の研究員と行ったミーティングを通じ、幾つかの知見 (Lessons Learned) が得られた。以下に、得られた知見を箇条書きで記す。

- 一般的な無人化施工において、外部カメラの映像として重要なのは、横からの建機の画像と前方の全景である。Fig.5 の三番目の画像のように、マルチロータ機を真上に飛ばし、前方の画像を取得することができれば、バックホー前方の全景画像が取得できるため、遠隔による移動に利用可能である。
- 正面からの作業風景の画像は、操作者から見ると対面となるため、扱いづらい。
- Fig.5 の中段の画像に示すように、上空からの俯瞰画像というのは、一般的なカメラ車を用いたシステムでは取得不可能である。したがって、これまで、このような画像を利用した無人化施工作業を実施したことは無い。よって、このような画像を利用した操作性の評価を行うことは、今後、重要かもしれない。
- 作業を考えた場合、マルチロータ機は、バックホーの腕の動きに応じて位置を変更する必要はない。むしろ、定点に停留している方が良い。
- 飛行時、地面の凹凸にテザーが引っかかり、フライトの安定性を損ねるといった問題が起こった。これにより、張力制御を行いつつ、テザーをたるませない制御の重要性を確認することができた。
- 取得した画像を用いた三次元復元も行ったが、機体のフレームや足が邪魔となり、三次元情報を上手く作成することができなかった。画像の前処理を行う工夫が必要である。

#### 5 結言

本研究の大目標は、有線給電で建設機械上を飛行するマルチロータ機より、建機の情報取得を行う手法の実現である。このシステムの問題点を抽出するため、本研究では、マルチロータ機の有線給電フライト試験ならびに画像情報取得試験を土木研究所にて実施した。本稿では、このシステムの説明と試験の状況、得られた Lessons Learned を紹介した。今後は、張力調整を行う有線給電ヘリポートの製作ならびに、マルチロータ機の制御について自動化を進め、発災から 1ヶ月以内の「二次災害防止のための最低限の措置を目指した応急復旧」に活用可能な情報提示システムの研究開発を進める。



Fig.6 Visual information obtained by GoPro. (1) Left side, very close, about 2.5m height from the ground. (2) Left side, a little bit high position: about 6.0 m height from the ground. (3) Back side, about 6.0 m height from the ground.

#### 謝辞

本研究は、ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の支援を受けて、実施されております。また、実験フィールドならびに建設機械については、国立研究開発法人 土木研究所に提供頂きました。

#### 参考文献

- [1] 小田博志, 小幡克実, 藤岡晃. 土木無人化施工ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 923-927, 2000.
- [2] 速水邦晃, 西村和真, 亀岡遼太, 永谷圭司. 複数の追加設置型 imu 搭載デバイスを用いたバックホーの姿勢推定. 第 16 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会論文集, pp. 2316-2319, December 2015.
- [3] 芦澤純, 比嘉翔弥, Joao Vitor Thomsen Silveira, 大塚家, 永谷圭司, 吉田和哉. Muav による長時間屋内探査を目的とした不整地移動ロボット搭載用有線給電システムの開発. 第 15 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会論文集, pp. 266-270, December 2014.
- [4] Hiroshi YAMAMOTO, Masaharu MOTTEKI, Takashi OOTUKI, Yuji YANAGISAWA, Akira NOZUE, Takashi YAMAGUCHI, and Shin'ichi YUTA. Development of the autonomous hydraulic excavator prototype using 3-d information for motion planning and control. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 48, No. 8, pp. 488-497, 2012.