

無人化施工機械の遠隔操縦支援を目的とした空撮映像の評価

Evaluation of Aerial Video for Unmanned Construction Machine Teleoperation Assistance

○ 桐林 星河 (東北大学) 学 薬師川 楓 (東北大学)
五十嵐 傑 (東北大学) 正 永谷 圭司 (東北大学)

Seiga KIRIBAYASHI, Tohoku University, seiga@frl.mech.tohoku.ac.jp
Kaede YAKUSHIGAWA, Tohoku University
Suguru IGARASHI, Tohoku University
Keiji NAGATANI, Tohoku University

We propose teleoperation using aerial video taken by multi-rotor UAV to increase operability of remote control construction machine. Outside view camera commonly using in remote construction is fixed on the ground thus the viewpoints are limited, but our method provides free views. On the other hand, there are no examples that are using an aerial video to operate a remote construction machine, so that, it is unclear that the video image is steady for the operation. Whence, we evaluated an aerial video taken by our Tether-Powered UAV system for operating a remote construction machine. As a result, all ten subjects completely operate a construction machine using aerial video.

Key Words: UAV, Tether Powered, HI, Construction machine

1 緒言

大規模な災害が発生すると、人や家屋だけでなく、道路や上下水道など多くのインフラにも被害が及ぶ。生活に必要なインフラが絶たれることにより、災害後に新たな人的被害が発生する要因となる。そのため、災害後のインフラの早期復旧は大きな課題である。2016年に発生した熊本地震に起因する土砂崩れでは、現地の交通の要所となる阿蘇大橋が崩落した。阿蘇大橋のかかっていた付近は急峻な地形であり、余震や降雨により頂上付近の土砂が再び流れ出る危険性が高かった。このような地域で道路の復旧工事を行うことは非常に危険であり二次災害の要因となりうる。二次災害による人的被害を避けるため、この現場では遠隔操縦可能な建設機械を用いた無人化施工による復旧工事が現在も継続して行われている。この阿蘇大橋の現場は一例にすぎない。これまで無人化施工を利用した工事は数多く実施されており、より施工効率の高い、より作業の安全性が高い工事の実現が期待されている。

現在行われている無人化施工は、建設機械を目視しながら操縦だけ遠隔で行う手法と、建設機械の内外に設置したカメラで撮影した映像をみて遠隔操縦する手法がある。前述の阿蘇大橋の現場では、頂上付近では目視による手法、麓付近ではカメラを用いた手法が採用されている。しかし、どちらの場合もオペレーターが見られる視点は限られており、効率の低下を招いている [1]。

我々の研究室では無人化施工の効率向上を目指し外部カメラとして、マルチロータ機を用いる手法を提案し、システムの開発を行っている。この手法では、従来の外部カメラや直接目視では不可能だった高い視点からの映像取得や、傾斜地の谷側からの撮影が可能になり、視点の自由度が大幅に上昇する。しかしながら、特に高い視点からの映像で建設機械を遠隔操縦した例は実例が少なく、そのような視点での遠隔操縦がどのような結果をもたらすか不明であった。そこで、本研究では遠隔ではない通常のパワーショベルのオペレータを被験者とし、マルチロータ機から撮影した映像

を利用した遠隔操縦を行う実験を実施した。本論文ではその実験について報告する。

2 空撮映像による建設機械の遠隔操作実験

本研究では、遠隔操縦建設機械の外部視点映像として、マルチロータ機による空撮映像を利用する方法を提案・採用する。マルチロータ機は、回転翼型の飛行ロボットであり、ホバリングが可能で空中の自由な点に移動できる。そのマルチロータ機にカメラを搭載することで、撮影対象の建設機械付近の地形に影響されずに様々な位置からの俯瞰映像の撮影が可能となる。一方、空撮映像は風などの外乱により一定の位置に留まることは難しく、映像の安定化が不十分になると考えられる。

これまで、同様の俯瞰映像による建設機械の遠隔操縦例として佐藤ら [2] が研究している建設機械上に搭載した魚眼カメラを用いた手法がある。この手法では、空撮映像と同様の外部視点での遠隔操縦が可能となるが、あくまでも建設機械上に設置したカメラによる映像を合成しているため、多くの死角がのこる。また、論文では俯瞰視点は固定されており、作業中に変化するような視点ではない。

実際の無人化施工で利用される外部カメラは、やぐらや移動カメラ車に搭載され、撮影対象の建設機械が作業中はパン、チルト、およびズーム操作のみが行われ、大きな視点移動や画面の揺れなどはほぼ発生しない。そこで、空撮映像のように撮影位置が大きく変わり、また、ゆれが存在するような映像を用いた遠隔操縦がどの程度実現可能か検証するため、遠隔操縦可能な油圧ショベルを用いて実験を行った。

2.1 使用機材

Fig.1 に実験に用いる遠隔操縦建設機械の概要を示す。

遠隔操縦する建設機械として、日立建機製の小型油圧ショベルである ZX35U-5B を遠隔操縦化したモデルを用いた。油圧ショベルは最も基本的な建設機械であり、無人化施工でも多く利用されているため選択した。油圧ショベルのキャビンにネットワークカメラ

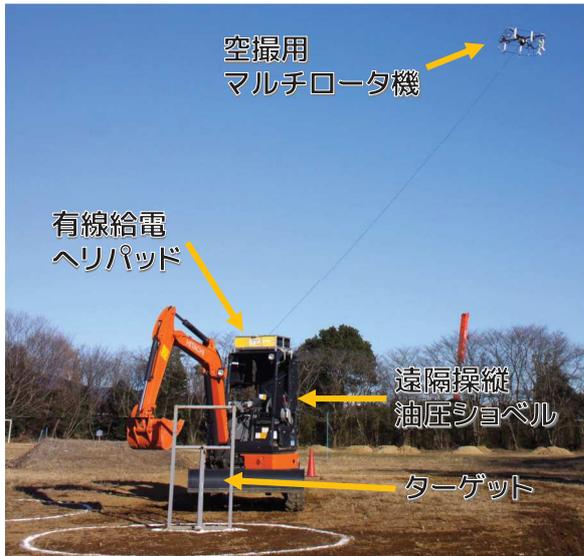


Fig.1 実験に用いる機材の概要

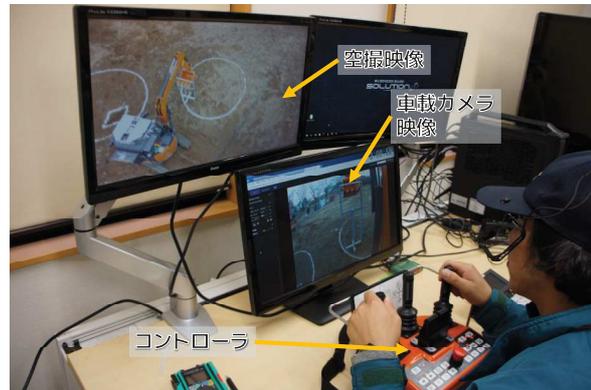


Fig.2 オペレータの様子

ラを設置し、無線 LAN によりオペレータ室まで映像を伝送する。映像の伝送遅延は十分に短く、オペレータが違和感を感じない程度である。

空撮を行うマルチロータ機として、我々がこれまでに開発してきた有線給電マルチロータ機 [3] を用いた。この有線給電マルチロータ機は、建設機械上に搭載した大容量バッテリーを内蔵するヘリパッドとマルチロータ機を電線で結び、給電することで長時間の飛行を可能にする。ヘリパッドは油圧ショベルのキャビン上に設置し、油圧ショベルの走行移動に伴って移動可能である。給電用電線の長さは安全を考慮し 12 m とした。マルチロータ機に搭載するカメラは Gopro 製の Hero4 のレンズを焦点距離が 2.8 mm のものに変更し採用した。このカメラを市販される 3 軸の映像安定化ジンバル上に設置した。ジンバルにより、マルチロータ機の振動や姿勢変動による画角の変動を防ぐことが可能であるが、マルチロータ機の位置が変動することの補償は不可能である。

Fig.2 に操縦を行うオペレータの様子を示す。オペレータは、油圧ショベル操縦用のコントローラを持ち、キャビン上の車載カメラと空撮カメラの映像を見ながら遠隔操縦を行う。このコントローラは遠隔操縦建設機械で一般的に用いられるものであり、搭乗操作と同じ手法で操作が可能である。

2.2 実験概要

遠隔操縦の可否を判定するため、茂木らが提案するモデルタスク [4] を採用する。モデルタスクは、次のような流れで実行される。

1. 初期姿勢をとる
2. 走行移動
3. ターゲットを持ち上げる
4. ターゲットを移動する
5. ターゲットを下ろす
6. 完了姿勢をとる
7. ターゲットを持ち上げる
8. ターゲットを移動する
9. ターゲットを下ろす
10. 走行移動
11. 完了姿勢をとる

このモデルタスクでは、ターゲットを持ち上げる動作が、油圧ショベルによる掘削動作を模擬し、繰り返し同一条件での試験が可能となる。最初のターゲット移動は、移動先が広い円であり、地面に描かれた円内にターゲットを置く。次のターゲット移動は、先に移動したターゲットを再び持ち上げ、初期位置まで戻す。初期位置はターゲットの底面と同形状にマーキングされており、可能な限り正確に元に戻すよう指定する。監視員がターゲット位置が枠内に収まっていることを確認した後、走行移動しスタート地点に戻り、一試行が完了となる。このタスクを実行可能であれば空撮映像を用いての操縦が可能であると判断する。

本実験は、搭乗および遠隔での油圧ショベル操縦経験者 10 名を被験者とし、それぞれ 10 回のモデルタスク実行を依頼した。なお、マルチロータ機、及びマルチロータ機上のジンバルの操縦は被験者とは別のオペレータが実施し、オペレータが利用しやすいと思われる映像が撮影できるようにマルチロータ機の機体位置やカメラ角度を操作した。カメラ位置は、建設機械オペレータから指示があった場合にはその位置に移動するものとした。これは現在行われている無人化施工に於いて、専任のカメラオペレータがカメラを操作する手法と同様である。

2.3 実験結果

実験の様子を Fig.3 に示す。Fig.3(a) の左下手前に見える円がターゲットの初期設置位置がある円であり、その左の円がターゲットの移動先となる。Fig.3 は、モデルタスクの前半半分である完了姿勢をとるまでを示している。

オペレータが利用した空撮映像の例を Fig.4 に示す。Fig.4(a) は、スタート直後に 90° 左旋回する地点付近の映像である。旋回の目安となる場所に赤いカラーコーンが置かれており (図中、建設機械の左)、オペレータはこれを見て旋回をする。このとき、キャビンの車載カメラからはすでにカラーコーンが画角外になっており視認できない。

Fig.4(b) は、旋回後にターゲットに向かって移動している際の映像である。このときは車載カメラにターゲットが映るため、車載カメラでの移動が有用となる。マルチロータ機はターゲットと建設機械の両方が画角に収まるように飛行した。これにより、車載カメラだけでは把握が困難な奥行き感を得ることが可能となる。



(a) スタート地点



(b) 走行



(c) ターゲットアプローチ



(d) ターゲット移動



(e) ターゲット移動完了

Fig.3 モデルタスクの流れ

Fig.4(c) は、はじめにターゲットを持ち上げた際の映像である。車載カメラによりターゲットとバケットの左右位置合わせが可能であるが、奥行き感がわかりにくい。そこで、マルチロータ機を車体ほぼ真横方向まで移動させ、ターゲットとバケットの相対位置が把握しやすい映像を撮影した。

Fig.4(d) は、ターゲット移動後に完了姿勢を取った状態である。完了姿勢は、ブーム、アーム、バケットすべてを端点まで動かすよう指示されているが、車載カメラからは画角外となり視認できない。それを補助するため、マルチロータ機で作業機がよく視認できる位置で撮影を行った。ただし、マルチロータ機の操作上の都合により、車体右側からの撮影となった。

このように、マルチロータ機の位置は試行中に大きく変動させ、

通常の外部カメラを用いた遠隔操縦とは大きく異なる視点を提供した。また、どの試験日も無風ではなく、2から5 m/s 程度の風が吹いており、静止を目標にしている場合でも1 m 程度の位置変動があった。これらの要因により、マルチロータ機から提供される映像は常に変位していた。

以上のような映像の提供を行い、被験者による試行を行った結果、どの被験者もマルチロータ機の映像を用いて遠隔操縦が可能であった。被験者への聞き取り調査では、「俯瞰視点での走行は全体が把握しやすく安心感がある」「映像の揺れはあまり気にならない」という意見が多かった。また、視点が大きく移動するため、画面内で建設機械の動作方向が変動することが操作性に影響することが懸念されたが、こちらについても「あまり気にならない」とい



(a) 走行時直上



(b) 走行時進行方向視点



(c) 作業視点左から



(d) 作業視点右から

Fig.4 モデルタスク中のマルチロータ機により撮影した映像

う意見が多かった。このことから、現状の映像安定度でも大きな問題とはならず、また、自由な視点を得るための位置移動についても問題とはならないと考えられ、マルチロータ機を用いた空撮映像が建設機械の遠隔操縦に利用可能であることが確認できたといえる。

また、オペレータの試行を観察すると、多くのオペレータは走行時はほとんどの場合で空撮映像を参照し、ターゲットの持ち上げ時には空撮映像を補助的に利用していた。一方、一部のオペレータは車載カメラの注目度が高く、空撮映像をあまり利用していない例もあった。また、空撮映像を見ることで詳細な位置の把握が可能になった結果、走行及びターゲット移動のどちらの場合もより繊細な位置決めを目指した操作を行う例があり、試行時間が伸びることも考えられる。

3 結言

これまで、我々の研究グループでは災害復旧工事に利用される遠隔操縦建設機械の外部視点カメラとしてマルチロータ機による空撮映像を利用する手法について提案し、報告を行ってきた。本論文では、提案する手法により実際に建設機械を遠隔操縦することで、提案手法の利用可否について確認するために実験を行った。実験の結果、マルチロータ機の映像を用いた遠隔操縦は十分に可能であると考えられる。今後はモデルタスクの妥当性の検証や、オペレータの視線解析等を進め、より具体的に遠隔操縦性能を向上させる空撮映像について評価を行う。

謝辞

本研究は、ImPACT プロジェクトの一環として行われた。

参考文献

- [1] 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, No. 6-187, pp. 373-374, 2004.
- [2] Takaaki SATO, Hiromitsu FUJII, Alessandro Moro, Kazuya SUGIMOTO, Akira NOZUE, Yoichi MIMURA, Katsumi OBATA, Atsushi YAMASHITA, and Hajime ASAMA. Development of bird's-eye view system in unmanned construction. *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 81, No. 823, pp. 14-00031-14-00031, 2015.
- [3] 薬師川楓, 桐林星河, 永谷圭司. マルチロータ機による無人建設機械の撮影を目的とした有線給電ヘリパッドの開発と評価. 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 3C3-04, September 2016.
- [4] 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一. 油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案. *建設機械施工 = Journal of JCMA : 一般社団法人日本建設機械施工協会誌*, Vol. 66, No. 8, pp. 71-79, aug 2014.