

建設機械に搭載可能な有線給電式マルチロータ機システムの設計と開発

Design and Development of Tether Powered Multirotor System for Construction Machine

桐林 星河 (東北大学) 学 薬師川 楓 (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
Keiji NAGATANI, Tohoku University

Up to now, we have constructed a system that makes it easy to control general construction machine remotely. In this research, we describe a camera system using a Tether Powered Multi-rotor, which is a system for shooting a construction machine from the outside in the system. As a result of conducting practical tests on the Tether Powered Multi-rotor machine system developed so far found several problems. Among them, We thought that the power supply, communication, and performance of the Multi-rotor are a critical and fundamental issue, We propose a new system, developed and evaluated.

Key Words: UAV, Tether Powered, Construction machine

1 緒言

2016年に発生した熊本地震に起因する土砂崩れで阿蘇大橋が崩落したことは記憶に新しい。このような大規模土砂災害が発生した場合には、可能な限り迅速に工事を開始し、インフラ復旧を行うことが人命救助及びその後の復旧活動において非常に重要となる。一般に工事を行うためには建設機械を用いるが、人が搭乗し操縦する通常の建機を利用しては二次災害のおそれがあり大変危険である。そのため、遠隔操縦可能な建機による無人化施工が望まれる。ところが、現在運用されている無人化施工技術では、建機だけではなく、多くの周辺施設を必要とするため、運用開始までに長期間を要する。それに加え、遠隔操縦建機そのものの台数が少なく、災害現場へ運搬するだけでも時間を要する。

この課題に対応するため、我々の研究室では通常の搭乗型建機を容易に遠隔操縦可能にするシステムの開発を行っている [1][2]。本研究は、このシステムの中で、操縦対象の建機を外部から撮影するカメラ部についての研究である。一般的な無人化施工では、複数のカメラ画像を用いて建機を操縦する。その中でも、建機の外部に置かれたカメラ視点は、建機自体の状態把握や周辺環境との相対位置把握などに利用される大きな役割を持つが、応急復旧時には設置が難しい。

そこで我々は、回転翼型の小型無人航空機であるマルチロータ機に搭載したカメラをこの外部視点として利用する手法を採用した。一般的なマルチロータ機では消費電力が大きく飛行時間が数十分程度と短いため、我々は建機上に設置した電源から電線でマルチロータ機に給電する有線給電方式を用いる。この有線給電式マルチロータ機と専用のヘリパッドを建機に搭載し、建機とともに移動することで常に最適な視点からの映像を取得することが可能となる。これまでに、我々が提案する有線給電式マルチロータ機による画像取得システムの最低限の機能について開発、評価し、実用に向けた課題の抽出を行った。その結果、「電源」「通信」「マルチロータ機の性能」の3つの課題が重要かつ根本的であることがわかった。本研究ではこれらの課題について整理し、対策手段について提案し、その提案に基づき開発した新システムについて述べる。

2 有線給電マルチロータ機システム

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システムの外観を Fig.1(a) に、構成を Fig.1(b) に示す。このシステムは、カメラを運搬するマルチロータ機と、マルチロータ機に給電を行うヘリパッド [3] により構成される。

マルチロータ機には、飛行制御 (フライト) コントローラが搭載されており、マルチロータ機専任のオペレータが機体を直接無線により操縦する。また、撮影用カメラを機体前部に配置する。カメラは三自由度のジンバルに固定されており、そのジンバルを操作するカメラオペレータが独立に存在する。ヘリパッドには、マルチロータ機に供給するための電源及び、給電用電線の弛みを防ぐ適切な張力を保つ機構を搭載し、通常飛行時は特別な操作を必要としない。ただし、マルチロータ機の着陸時には張力を最大にまで上げ、電線を強制的に巻き上げる操作をマルチロータ機のオペレータが兼任する。

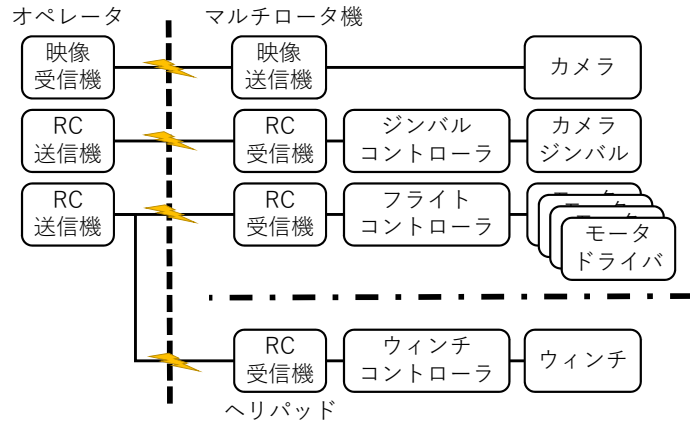
有線給電方式では、長い電線により電力を伝達する必要があり、電線中の電気抵抗による損失を抑えるために電源電圧を上げる工夫を一般的に利用する。電線重量は、マルチロータ機のペイロードとなるため、可能な限り細く軽くすることが望ましく、そのためにはより高い電圧を要する。本研究では、安全性と部品の入手性を考慮した結果、供給電圧を DC200 V から 400 V 程度とし、マルチロータ機上で降圧して利用する。開発したシステムでは、商用 AC100 V からコンバータによりこの電圧を得ている。

このような有線給電方式の小型無人機は多くの研究がなされ [4][5]、またすでに実用化 [6] もされており、有用性が高いといえる。

実際、我々が行った試験 [2] により得られた外部視点映像は、遠隔建機のテストオペレータから非常に有用であるという意見をいただくことができ、有用性を示すことができた。一方で、我々が対象とする建機上で有線給電マルチロータ機を運用するには、既存の研究では考慮されていない幾つかの特有の課題があり、実用に向け解決が必要となった。



(a) 無人建機上に設置したシステム



(b) 構成図

Fig.1 これまでに開発した有線給電マルチロータ機システム

3 実用化に向けた課題

これまでに開発したシステムを用い評価試験を行った結果、多くの課題が見出された。課題の多くは相互に関連するものであったが、その中でボトルネックとなる根本的な「電源」「通信」「マルチロータ機の性能」という三つの課題について述べる。

3.1 電源

本研究で用いるマルチロータ機は、電動モータにより飛行するため、電源を必要とする。これまでに開発した機体では、ホバリングにおよそ 400 W 程度を要し、移動時や外乱に対応する場合には、瞬時に 800W 程度を消費することがわかっている。飛行に必要な電力は、各部の効率で変動はあるものの、おおよそ機体重量とロータ直径によって決定する [7] ため、機体改良を行っても大幅に消費電力が低減することは望めない。この規模の消費電力を担うため、既存のシステムでは商用電源を利用している。当然ながら商用電源を利用するためには、建機が外部からの給電用電線を引き回す必要があり、建機の可動範囲を大きく損なう。建機の性能を維持するためには、建機上設置可能で十分な電力容量をもつ小型な電源が必要となる。さらに、本研究で対象とする災害現場での運用を行う建機は、不整地を走行するため大きく振動・傾斜することから、どのような姿勢であっても利用可能な電源であることが重要な条件となる。

3.2 通信

これまでに開発したシステムでは、通信が必要な機器はそれぞれがそれぞれの相手と独自に無線通信を行っていた。ところが、多くの無線が混在すると、チャンネル間干渉が発生し、十分な通信帯域が得られないばかりではなく、最悪の場合は通信が切断されてしまう可能性もある。従来の無人化施工に用いられる遠隔操作建機では、強力な電波を発することができる大型の無線機を搭載しており、遠距離においても通信が可能となる。しかしながら、そのような大型無線機はペイロード余裕の少ないマルチロータ機には搭載することができない。また、電波法上、マルチロータ機に設置した無線機は陸上局ではなくなるため制限を受ける。

このことから、通信を統合し最低限の無線通信によりシステムを利用できる枠組みが必要であるといえる。

3.3 マルチロータ機の性能

すでに開発したシステムで利用しているマルチロータ機は、軸間距離 390 mm の機体である。当初はこの機体で発揮できるペイ

ロードで十分な飛行が可能と考えていたが、有線給電用の降圧電源やカメラを搭載した結果、ペイロード過多となっていた。その結果、風速 5 m/s 程度の環境下では安定飛行ができなくなり、不時着してしまうことがあった。さらに、通信の課題を解決するためには、追加機器をマルチロータ機上に搭載する必要があるため、よりペイロードが必要となる。

また、既存の機体では、降圧電源を寸法の制約上、対角のロータ付近に配置した。ところが、マルチロータ機は対角のロータの回転方向を同一にし、機体をヨー旋回させる際には同一回転方向のロータ回転数を増減することで実現する。そのため、降圧電源を設置した側のロータペアの推力が少なく、機体ヨー旋回の特徴が左右で異なってしまった。

そこで、より大きなペイロードを持ち、また搭載物の配置を再検討し特性の偏りを抑えた新機体が必要となる。

4 改良した有線給電マルチロータ機システム

以上の課題を踏まえ、既存のシステムに改良を加えたシステムを新たに開発した。開発したヘリパッドを Fig.2(a) に、マルチロータ機を Fig.2(c) に示す。

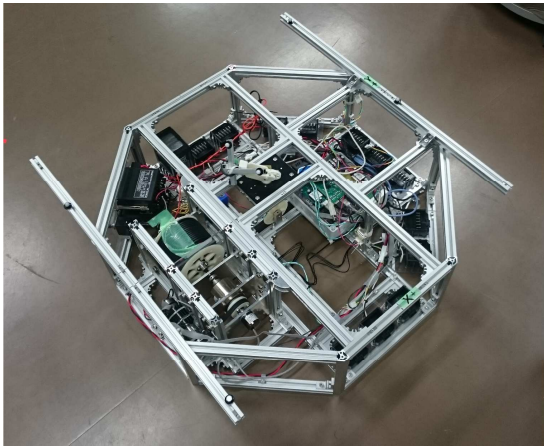
4.1 大容量バッテリーによる有線給電

課題を基に、実用可能な電源について検討を行った。800W の電力を供給可能かつ運搬可能な電源を調査した結果、バッテリー方式と発動発電機方式の二つが現実的であることがわかった。

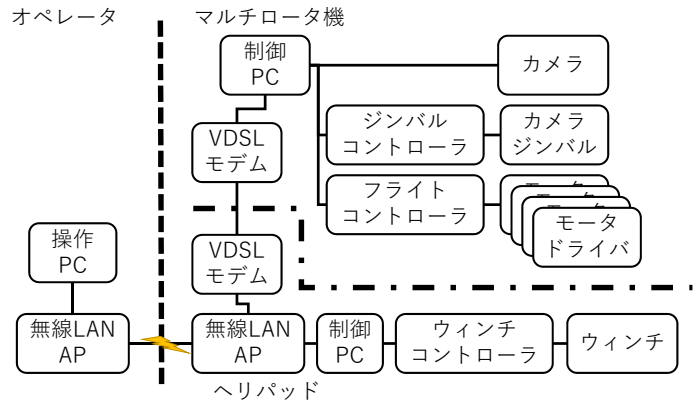
これら二つの電源について比較を行った結果、発動発電機は「稼働時間の推定が容易であること」および「傾斜地で利用できること」という課題を解決することが困難であると判断し、我々はバッテリー式を採用することとした。

電源をバッテリーにする場合、バッテリーからコンバータを通して有線給電用電圧に変換する手法と、バッテリーを必要数直列に接続することで有線給電用電圧を得る方法が考えられる。コンバータを通す場合には、バッテリーの電圧によらず一定の電圧を供給可能なため、バッテリーの選択肢が増える一方、コンバータでの変換損失が発生する。バッテリーを直列接続する場合には、変換損失は発生しないものの、バッテリー残量により電圧が変動する。本研究で用いるマルチロータ機に搭載した降圧電源は、DC200 V から 420 V という広範囲の電圧を入力できることから、ある程度の電圧変動が発生しても問題ない。そこで、本研究ではバッテリーを直列接続し、直接電源供給する手法を取ることにした。

「軽量であること」、「傾斜地で利用できること」という条件があ



(a) 大容量バッテリーを搭載可能なヘリパッド



(b) 構成図



(c) 新機体



(d) 新機体背面 (図右側が機体前方)

Fig.2 新たに開発した有線給電マルチロータ機システム

ることから、自動車用の鉛バッテリーは本研究には適さないと考え、リチウムバッテリーを採用する。本研究では Maxell 社製の 23.1 V, 127 Wh のバッテリーパック (型番:62KSP545483-2) を用いる。このバッテリーには、残量を推定する回路が搭載されているため、「稼働時間の推定が容易であること」という条件も満たすことが可能となる。本システムでは、このバッテリーパックを 12 個直列接続し、277.2 V, 1,524 Wh のバッテリーとして利用する。これにより、ホバリング状態で約 400 W を消費するマルチロータ機は 3 時間以上の飛行が可能となる。

4.2 給電電線を利用した有線通信

複数の機器が無線を発しないためには、それぞれの機器が有線で接続・通信し、無線へと変換する機器が一つとなれば良いと考えられる。そこで、ヘリパッドとマルチロータ機間を有線により通信を行う方式を採用することにした。新しいシステム構成を Fig.2(b) に示す。

新構成では、すべての通信を Ethernet に変換することで、一つのネットワーク上に統合する。ヘリパッドとマルチロータ機の間は通信用電線の重量は、マルチロータ機のペイロードに直接影響するため、軽量であることが望ましい。そこで、本システムでは 2 本の信号線のみで数百 m 程度の高速度通信が可能な VDSL を用いる。ヘリパッドとマルチロータ機の両者に VDSL モデムを搭載することで、VDSL-Ethernet の相互変換を実現している。また、それぞれの操縦が必要なカメラジンバルのコントローラ、フライト

コントローラ、給電用電線巻き上げ用ウィンチのコントローラは、制御用 PC (RaspberryPi2 および 3) に接続し、Ethernet 上の信号により制御が可能となる。さらにマルチロータ機上のカメラをマルチロータ機の制御 PC に接続し、制御 PC 上で動画圧縮を行うことで通信帯域に合わせた最適な映像を取得可能となる。

これらの機器はすべてヘリパッド上の無線 LAN アクセスポイント、もしくはスイッチングハブにより集積し、その後無線 LAN によりオペレータ側操作用 PC と接続する。このような構成にすることで、様々な通信機器の利用が可能となり、建機上の他のシステムとも統合が容易となる。

4.3 機体の大型化

マルチロータ機のペイロードを増大するためには、ロータが発する推力を大きくすれば良い。ロータ推力を大きくするためには、回転数を増加するか、ロータを大きくすれば良い [7]。回転数を増加させるためにはモータを変更することで対応可能だが、本研究で必要とするペイロードを得るためには 10000 rpm を超える回転数が必要となり、ロータ強度およびベアリング寿命について懸念が生じる。一方で、本システムでは機体寸法の制限が強くないことから、ロータ径を拡大することは容易である。

そこで、新構成では、ロータ径を大きくするとともに機体を大型化し、よりペイロード余裕を得ることとした。また同時に、有線給電用の降圧電源を撮影用カメラとは反対の後部側ロータ付近に設置することで前述のヨー特性への影響を軽減しつつ、重心バラン



(a) 有線給電によりマルチロータ機が飛行している様子



(b) マルチロータ機からの映像

Fig.3 新システムの動作検証の様子

スの向上を図る．開発した機体の詳細を Fig.2(c) に，降圧電源の配置については背面の Fig.2(d) に示す．

新構成用の機体には，前述の通信の新システムを組み込み，機体中央部に制御用 PC および VDSL モデムを搭載した．降圧電源は，それらの機器の下部，機体後部の 2 つのロータ後流を受ける位置に配置した．この降圧電源は 1 ユニット 600 W の容量をもち，合計で 1200 W の出力が得られる．

5 動作検証

これまでに提案実装したシステムの動作検証を行った．Fig.3 に検証の様子を示す．動作検証では，遠隔操縦可能なように改造された小型建機の上部に開発したシステムを搭載し，災害を想定した微細作業を行った．本システムは，建機上のアクセスポイントに有線で接続し，建機上の他の機器と同じ経路で通信を行った．

その結果，開発したシステムは不具合なく動作することが確認できた．ただし，マルチロータ機の操縦に関しては，建機上の無線機の不具合のため，従来と同様の RC 無線機により行った．機体からの映像については，新方式により取得した．

以上より実装した新システムが動作することが確認できた．

6 結言

これまで我々は遠隔操縦する無人建機上に設置し，外部からのカメラ画像を得るための有線給電マルチロータ機システムの開発を行ってきたが，評価試験により根本的な課題が発覚した．

具体的には，電源，通信，およびマルチロータ機の性能が課題となった．そこで，それらの課題を解決するために，新システムとして，大容量バッテリーの搭載，通信の Ethernet への統合と有線通信化，マルチロータ機の大型化を行った．

最後に，新しく構築したシステムが正常に動作することを確認するため，検証を行いシステムが動作することを確認した．

今後は，より詳細なシステムの評価を行うとともに，マルチロータ機の自律飛行を実現する給電用電線を用いた自己位置推定の研究 [8] を進める方針である．

謝辞

本研究は，ImPACT プロジェクトの一環として行われた．また，実験フィールドとして，ImPACT 評価フィールドを利用した．

参考文献

- [1] 速水邦晃, 山内元貴, 永谷圭司. 簡易取付可能な imu を複数用いた遠隔操作型バックホウの姿勢提示システムの開発と評価. 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 講演会論文集, pp. 2526–2529, December 2016.
- [2] 永谷圭司, 薬師川楓, 桐林星河, 渡辺敦志. 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. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2016, pp. 1P1–10a6, June 2016.
- [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] Su Y Choi, Bo H Choi, Seog Y Jeong, Beom W Gu, Seung J Yoo, and Chun T Rim. Tethered aerial robots using contactless power systems for extended mission time and range. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, pp. 912–916. IEEE, 2014.
- [5] Christos Papachristos and Anthony Tzes. The power-tethered uav-ugv team: A collaborative strategy for navigation in partially-mapped environments. In *Control and Automation (MED), 2014 22nd Mediterranean Conference of*, pp. 1153–1158. IEEE, 2014.
- [6] CyPhy. Parc. <http://cyphyworks.com/parc/>.
- [7] 加藤寛一郎, 今永勇生. ヘリコプタ入門. 東京大学出版会, 第 4 刷, 1985.
- [8] 芦澤純, 比嘉翔弥, Joao Vitor Thomsen Silveira, 大塚光, 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.