

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

○薬師川 楓 桐林 星河 永谷 圭司 (東北大学)

1. 緒言

地震や洪水などの自然災害が発生した際には、建設機械を用いて、障害物の除去や築堤等の応急・復旧作業を行う必要がある。このような作業では2次災害の危険性があるため、人が危険区域内に直接立ち入ることができず、無人化施工という技術が利用されてきた。無人化施工においては操作者は安全な場所に設けた操作室などから重機の遠隔操作を行う。

無人化施工を用いた工事では、重機から操作者の場所が離れているなど、直接の目視による操作が困難な場合は、重機に取り付けた車載カメラや外部カメラを利用して、操作を行う。現在、外部カメラとしては移動カメラ車からの映像や固定カメラの映像などが利用されている [1]。

固定カメラは、櫓や高所作業車の上に取り付けられ、一定の場所から作業現場全体の映像を取得することを可能にするものである。移動カメラ車は、クローラを搭載した車体にテーブルリフトが取り付けられ、建機の作業の邪魔にならない距離から、地上から5m程度の高さにあるカメラで、作業の様子を第三者視点で見ることを可能にするものである。移動カメラ車では操作者と別にカメラオペレータが、カメラの向きやカメラの切り替えを行う。移動カメラ車により、それぞれの建機の作業の補助をすることができるが、専用機械であり、作業が必要な時にすぐに調達することができない場合がある。

本研究では、移動カメラ車としてマルチロータ機を用いることで、より自由度の高い映像取得を行うことを目的とする。マルチロータ機での撮影では、移動カメラ車では移動できない、崖側や高い上空からの第三者視点を提供することが可能となる。また、建機の作業内容や移動にともなって、映像の場所を簡単に変更することができる。さらに、マルチロータ機による第三者視点の提示は、通常の建機に後付けで実装可能なことから災害対応の応急復旧工事において、より迅速な対応が可能になる考えられる。

一般的なバッテリー搭載型のマルチロータ機は飛行可能時間が数十分程度であり、建機の稼働する数時間に対して、不足している。そこで本研究では、電線を持ちいた給電ケーブルにより、送電を行うことで長時間の飛行を可能とする有線給電マルチロータ機を用いる。今回の用途では、建機の撮影なので、建機自体に搭載したヘリパッドから給電を行えば、飛行範囲の制限が問題となることもない。

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 [3] を行った際に、飛行時に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生じた。そこで、本研究室で移動ロボットへ

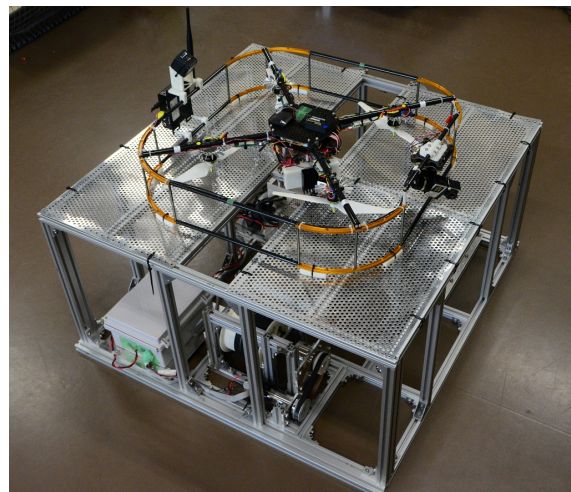


図1 開発したヘリパッドの概観図

の搭載を目的として開発を行ってきた電力供給可能なケーブル巻取り機構 [2] を搭載することで、飛行時にケーブルがたるまないような張力制御を行うことができる。また、着陸時にマルチロータ機の推力よりも大きな力で巻き取ることでヘリパッド上への安定した強制着陸も可能となる。可能となり、制御不能時においてもケーブルの長さ以上にマルチロータが飛んでいくことはないため、安全性が確保される。

しかし、本研究室で開発を行ってきた、電力供給可能なケーブル巻取り機構は、ヘリパッド側が静的で、水平な状態での運用しか想定しておらず、建設機械のような振動環境かつ移動や傾きが生じる環境では、適切な張力測定ができない。これは張力を計測してそれに対してフィードバック制御を行っており、張力計測は加速度がかかった状態では適切に測定することができないからである。また、関連研究として行われているケーブル巻取り機構においても、建設機械の上のような振動環境で適切に動作できるものではない [4]。

そこで、本論文では建設機械に搭載した状態でも動作可能なケーブル巻取り機構を搭載したヘリパッドの開発と評価について述べる。パウダクラッチと呼ばれる電流に対応したトルクを伝達する装置を利用し、フィードフォワードで張力を制御することで、振動環境でも動作を可能にした。開発を行った巻取り機構の張力の測定を行ったうえで、実際の無人建機を使用したフィールド評価を行った。

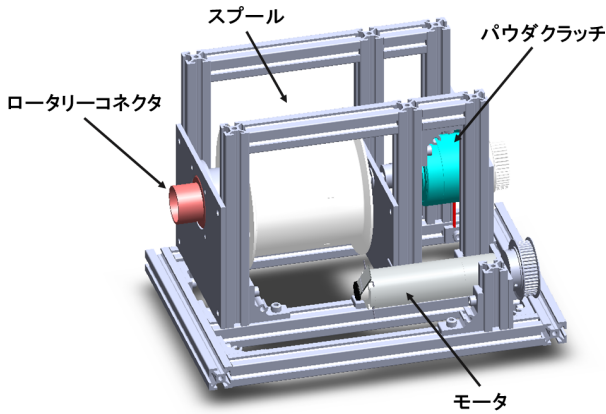


図2 巻取り機構の拡大図

2. 振動に対してロバストに張力制御が可能なヘリパッド

2.1 概要

2章で述べた様な要求から、図1に示すようなヘリパッドを開発した。ヘリパッドに求められるのは、電源を供給するケーブルの送り出しや巻取りを指定張力で適切に行うことである。また、着陸時には飛行時のマルチロータ機の推力よりも大きな張力で巻き取ることでマルチロータ機がヘリパッドの上に着陸するのを補助する必要がある。開発したヘリパッドの仕様を表1に示す。

使用するマルチロータ機は平面サイズが550mm×550mmのものであり、着陸の余裕を前後左右に100mm程度持たせ、この天板サイズとした。また、対象の無人建設機械への搭載の都合上、高さを400mmとした。実際にはヘリパッドの上半分は巻取り機構に利用されておらず、半分程度に高さを下げることが可能である。

利用したマルチロータ機は、ホバリング状態で400W程度の電力を消費する。送電には360V程度の電圧を用いることで、有線給電に用いる電線を細くしている。

これにより、発熱が小さくなり、スプールにケーブルを巻きつけながら、巻き取っても熱の問題が生じない。巻取り機構はAC100Vを電源としている。

2.2 可変張力巻取り機構

巻取り機構の拡大図を図2示す。開発した巻取り機構では、図のような配置で、モータ、パウダクラッチ、ロータリーコネクが搭載されている。

モータからの回転をパウダクラッチを使用を使用して伝達することで、指定張力でケーブルを巻き取るこ

表1 開発したヘリパッドの仕様

重さ [kg]	28.8
サイズ [mm]	780 × 780 × 400
巻取り張力 [N]	0.8~15
巻取り速度 [m/s]	0~2
電源	AC100V

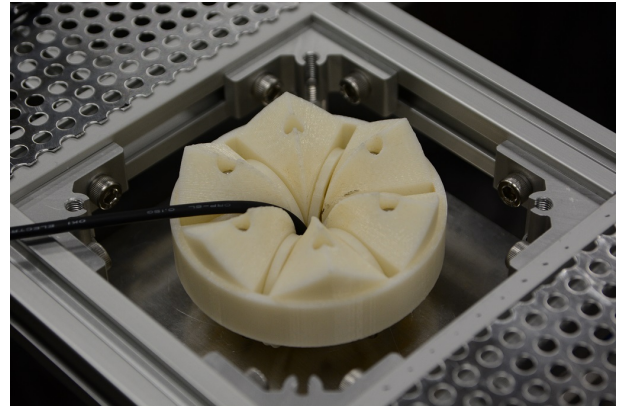


図3 ケーブル出口の機構の概観図

とを、フィードバックなしに可能にしている。パウダクラッチは、磁性粉黛に電流を流すことで電流に対応したトルクを伝達するクラッチである。パウダクラッチに流す電流をマイコンにより制御することで、オープンループで張力を制御することが可能なので、建機の上のような振動環境においても指定張力でケーブルを巻き取ることができる。また、回転するスプールに電力を供給するために、ロータリーコネクタを用いている。今回は、マイコンにラジコンプロポの受信機を接続することで、マルチロータ機の操作者が飛行させながら、張力の指定をできるようにした。

ケーブルを巻き取るにあたって、巻取り機構のケーブルと接触する箇所の最大静止摩擦が大きくなると、巻取り可能な最小の張力が大きくなってしまいうため、ケーブル出口に図3のような機構を搭載した。この機構は、ベアリングが入った6つのプーリとそのプーリ部分全体をケーブル繰り出し方向に対してロールの回転を行うベアリングを搭載している。また、どの方向にケーブルが移動しようとした場合でもプーリにケーブルが接触するように、山状の起伏をつけた。これにより、どの方向にケーブルが繰り出されるときについてもケーブルはプーリ部分と接触する。よって、出口部分の最大静止摩擦を非常に小さくすることが可能となった。

2.3 巻取り張力の測定

ケーブルが動いていない状態において、パウダクラッチに流す電流とケーブル張力の対応関係の測定を行った。測定に用いた装置の概観図を図4に示す。ヘリパッドの上に設置できる形で、計測器デジタルフォースゲージ(ZTA-20N, 精度±0.2% F.S. ± 1digit, 最大荷重20N, 最小分解能0.01N)を取り付けた。この状態で、デジタルフォースゲージはフックにかかる張力を測定する。フックにケーブルを引っ掛け、巻取り機構で引っ張ることにより、張力の測定を行った。

一回の測定で、張力を100回測定し、その平均値を測定結果とした。図5に電流-張力のグラフを示す。図からわかるように、マイコンからパウダクラッチに流れる電流を制御を制御することで、指定張力でケーブルを引くことができることを確認した。一方で、40mA未満の電流を流している場合には張力が発生していないことがわかる。このことから、ケーブルを引き始められる最小の張力は40mA流した際の0.8N程度であ

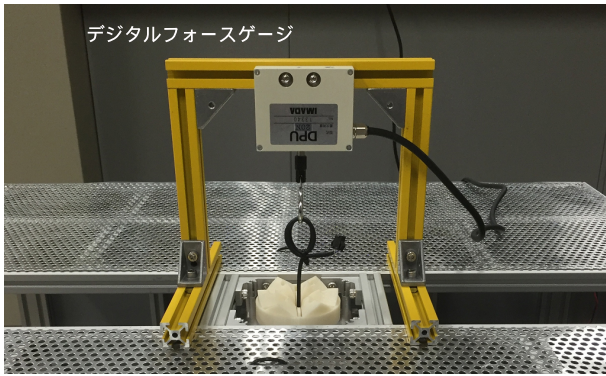


図4 実験装置の概観図

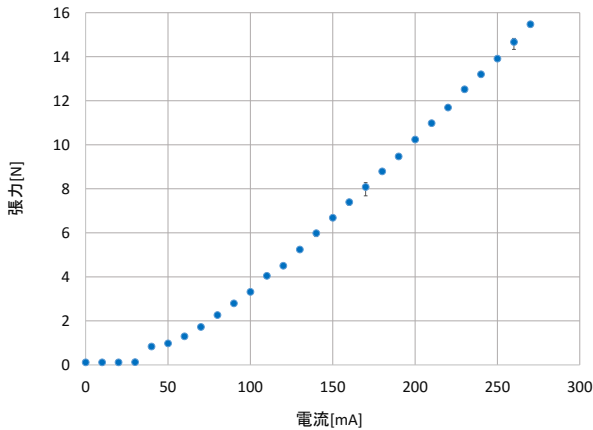


図5 電流に対する張力のグラフ

ると言える。これはケーブルと巻取り機構が接触する場所に静止摩擦が存在することが原因だと考えられる。特に、ロータリーコネクタの最大静止摩擦が大きく、これが主要な原因になっていると考えられる。

3. フィールド評価

3.1 内容

無人建機に本研究で開発したヘリパッドを搭載し、フィールド評価を行った。フィールド評価は、移動やブロックを積み上げるといった作業を行う建機に対して、マルチロータ機がヘリパッドから離着陸を行い、第三者視点からの映像を提供するというものである。

実験の様子を図6に示す。図において、矢印で示した部分がヘリパッドであり、無線で指定された一定テンションでケーブルを引いている。また、着陸時には巻取り張力を大きくすることで着陸の補助を行った。

3.2 結果

フィールド試験では、ヘリパッドは適切に機能し、有線給電マルチロータ機による無人建設機械の撮影を行うことができた。図7、図8に実際に無人建機の操作者にリアルタイムで提供される映像の例を示す。図7は建機の上空からの撮影を行っている時の画像であり、建機と周囲の環境を映すことで、移動などに役立つ。図8は建機の側面から撮影を行っている時の画像であり、作業の際に対象物との距離感をつかむのなどに役立つ。



図6 フィールド試験の様子



図7 フィールド試験の様子



図8 フィールド試験の様子

一方で、以下のようなことが問題となり、今後の開発の課題としてあげられた。

- ヘリパッドよりも低い位置をマルチロータ機が飛行する際に、ヘリパッドのエッジにケーブルが引っ

かかり、弱い張力では適切に巻き取れない。

- ヘリパッドの箱の上面が穴のアルミバンリングメタルでありながら、側面を板でふさいだ構造にしたため、マルチロータ機から発生する風が巻きあがり、通常の地面効果よりも大きな影響をマルチロータ機にあたえ、離着陸時のマルチロータ機の姿勢が不安定となる。

また、実際の現場での運用を考えると以下のようなことにも対策を行う必要があると考えられる。

- 雨天時において、ヘリパッドを利用することができない。
- ケーブルを引くことのできる最小張力が大きいため、マルチロータ機の負担となる
- 現状では、ケーブルの巻取りとマルチロータ機の飛行は手動での操作であるが、自動化する必要がある。

4. 結言

本稿では、マルチロータ機による無人建設機械周囲の情報提示を目的として開発をおこなった有線給電ヘリパッドとその評価について述べた。有線給電ヘリパッドは、パウダクラッチを利用し、フィードフォワードで張力を指定することで振動に対してロバスト張力制御が可能となった。これにより、今回の開発の目的とした建機上に搭載することに対して、十分な性能を発揮することができた。一方で、フィールド試験により改善が必要な点が明らかとなった。今後は、改善が必要となる点の中でも特に重要と考えられるヘリパッドよりも低い位置を飛ぶ状況への対応や位置推定について開発を行っていく予定である。

5. 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。

参 考 文 献

- [1] 建設無人化施工協会, “無人化施工による対応事例” http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/kondankai/saigaifukkyuu_kon/dai_2_kai/2_suzuki.pdf
- [2] 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, 2014.
- [3] 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, 1P1-10a6, 2016.
- [4] Lida Zikou, Christos Papachristos, and Anthony Tzes, “The Power over Tether system for powering small UAVs Tethering Line Tension Control Synthesis”, Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), pp.681-687, IEEE, Torremolinos, 2015.