

# 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

○ 芦澤 純 (東北大学), 比嘉 翔弥 (東北大学), Joao Vitor Thomsen Silveira (UDESC),  
大塚 光 (東北大学), 永谷 圭司 (東北大学), 吉田 和哉 (東北大学)

## Development of the weird MUAV system mounted Mobile Robot for long time interior exploartion

○ Jun ASHIZAWA (Tohoku Univ.), Shoya HIGA (Tohoku Univ.), Joao Vitor Thomsen Silveira (UDESC),  
Hikaru OTSUKA (Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

**Abstract :** In disaster environments, it is very dangerous for rescue crews to enter and investigate the disaster site. Therefore, surveillance activity by unmanned robots, instead of humans, is expected. Particularly, investigation using a combination of Unmanned Ground Vehicle (UGV) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) mounted on the UGV can expand a range of work space. However, due to payloads, flight time of UAV is limited and very short. Therefore, we aimed to develop tethered UAV system, mounted on UGV for long time exploration. In this paper, we conducted initial test to confirm our developing system, and report the result about them.

### 1 緒言

地震大国である日本では、過去に巨大地震が幾度となく発生している。巨大地震発生時には、建物が崩落する可能性が高く、瓦礫などの障害物の影響で、崩壊した建物内への人の立ち入りは困難となる。しかしながら、建物の安全性の確認や生存者の捜索のため、建物内に入る必要がある。そこで、人の立ち入りが困難な環境において、積極的な活動が可能な無人地上移動ロボット(UGV)の投入が試みられてきた[1]。

これらの地上移動ロボットは、サブクローラーを有するクローラー型移動ロボットが多く、階段などの低い段差の走破が可能である[2]。しかしながら、ロボットの性能上、走破が困難な環境も多く存在する。そこで、ペンシルバニア大学と東北大学のチームにより、平面方向だけでなく、高さ方向の移動が可能な、小型マルチコプター(MUAV)をUGVに搭載し、両者による協調探査が行われた[3]。MUAVとUGVの協調探査では、UGVの侵入が困難な環境においても、搭載されたMUAVにより、深部の探査が可能である。しかしながら、MUAVは低空飛行時に地面効果を受けるため、UGVの離着陸プラットフォームへの着陸が困難となる。さらに、MUAVはペイロードが小さいため[4]、大容量のバッテリーを搭載することができず、長時間の探査が困難である。そこで、本研究では、まず、MUAVとUGVをテザーで接続し、テザーを巻き取ることでMUAVの着陸補助を行い、UGVプラットフォームへの安定した着陸を目指す。さらに、テザーを給電ケーブルに変更し、MUAVへの有線給電システムの開発に取り組むこととした。

本稿では、まず、UGVプラットフォームへの着陸補助のために開発した、テザー巻取りシステムについて述べ

る。次に、開発した有線給電システムについて報告する。

### 2 テザー巻き取りシステムの開発

先行研究で行われた、MUAVとUGVの協調探査では、MUAVの離着陸はすべて自動で行われている[3]。この研究では、MUAVに離陸時の場所を記憶させ、着陸時にその場所に着陸するという手法が採用されている。この場合、UGVはMUAVの飛行時にはその定点に留まる必要がある。一方で、手動によるMUAVの操作では、上記のような制限はない。しかし、MUAVは着陸時に地面効果を受けて不安定になるために、UGV側のプラットフォームに着陸するのは困難である。

そこで、本研究では、MUAVとUGVをテザーで接続し、テザーを巻き取ることでMUAVの着陸補助を試みる

#### 2.1 テザー巻き取りシステム

Fig.1, 2に、本研究で開発したテザー巻き取りシステムを示す。プーリー1は、モーターにより回転する。また、テザーはプーリー1に巻きつけられており、プーリー1の回転に伴って、テザーの放出および巻き取りが行われる。プーリー1に巻きつけられているテザーは、プーリー2を通り、天板にあけてある穴を通してMUAVに接続される。なお、引きバネをプーリー2に取り付けることにより、テザーを常に張った状態で着陸補助を行えるように工夫している。

本研究において、Maxon社製の”Maxon Motor 470725”モーターを使用し MUAVは、enRoute社製”Zion 330”を使用し、電源として4セルのLi-Feバッテリー(13.2V)を使用する。

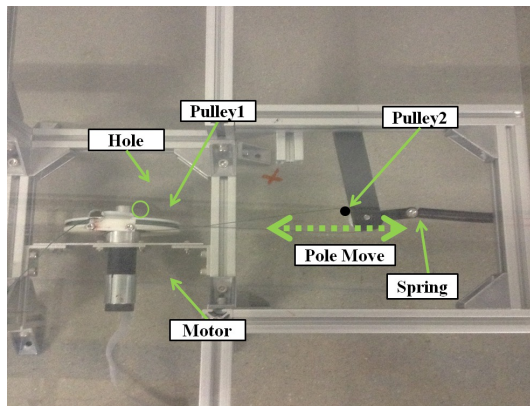


Fig. 1: Initial winding system prototype



Fig. 2: Experimental Picture of Initial Prototype

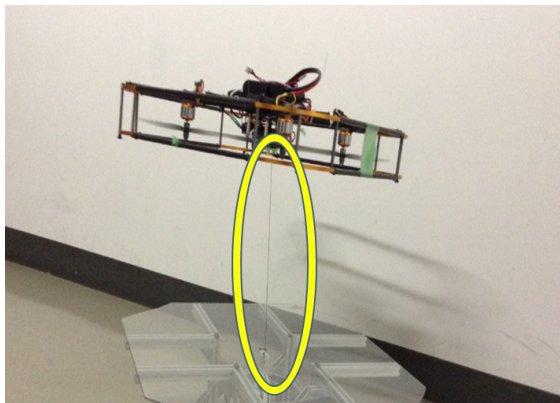


Fig. 3: Experimental Picture of Initial Prototype

## 2.2 実験

テザー巻き取りによる、MUAV着陸補助の有用性を検証するために、テザー巻き取り実験を行う。

本実験では、スイッチを用いて、手動でモーターの回転・停止を切り替える。なお、モーターの回転方向は、ケーブルを巻き取る方向に設定をした。また、MUAVの操作は、

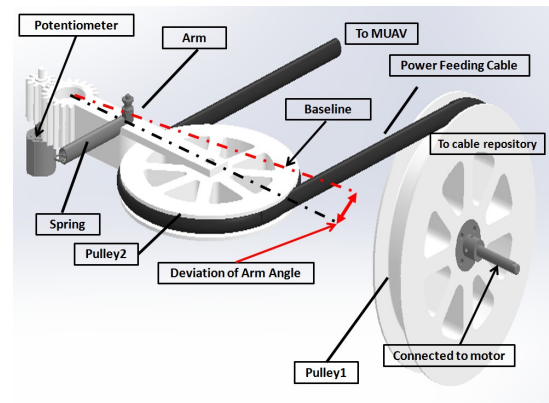


Fig. 4: 2nd Winding System Prototype

オペレーターが手動にて行う。

## 2.3 実験結果

Fig3に本実験時の写真を示す。テザーを巻き取ることで、MUAVはプラットフォームに容易に着陸できることを確認した。これにより、効率的なUGVとMUAVの協調探査が見込める。

## 3 有線給電システムの開発

テザー巻き取りシステムのテザーを給電ケーブルに変更することで、MUAVの探査可能時間の拡大が見込める。しかしながら、災害現場には瓦礫などの障害物があるため、給電ケーブルがたわんだ状態でMUAVを飛行させると、ケーブルが障害物に引っかかり、探査に悪影響を与える可能性がある。そこで、2節のシステムを改良し、MUAVの高度に応じて自動でケーブルの巻き取り・放出が可能な有線給電システムの開発に取り組む。

### 3.1 ケーブル長調整メカニズム

開発したケーブル長調整メカニズムをFig4に示す。ここで、巻き取り部分のプーリーの直径を100mm、ケーブルの張力は、MUAV本体の重さ(約1kg)と設定した。また、モーターには最大で0.49Nmのトルクがかかると想定し、Maxon社製の”Maxon DCXB72DC 1B27FD6”モーターを使用した。本研究室にて開発されたマイコン基板(使用マイコン:STM32F103VF)を使用した。2節のシステムと同様に、プーリー1はモーターにより回転する。アームには、ばねが固定されており、アームの先端にはプーリー2が取り付けられている。アームの根本に取り付けられたポテンシオメータ(7274R1KL 25)により、アームの角度を検出する。ポテンシオメータにより、基準位置からの角度のずれ量を検出し、ずれ量がゼロになるようにPI制御を行うことで、MUAVの高度に応じた電源ケーブルの供給を実現する。

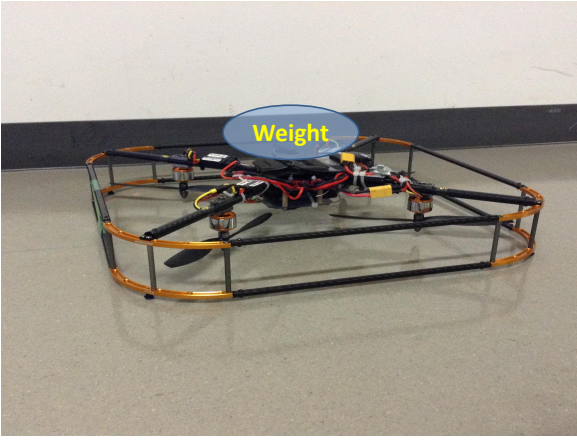


Fig. 5: Image of Testing Payload

### 3.2 ケーブルの選定

2節のシステムでは、細い糸を使用したためテザーの重量を考慮する必要はなかった。しかしながら、MUAVに有線給電を行う場合、MUAVの飛行時に発生する数十アンペアの電流に耐える、導体径の太い電源ケーブルの選定が必要となる。そこで、まず、MUAVのペイロードを測定した。

#### 3.2.1 MUAVのペイロード測定

MUAVはプラスチック製のプロペラを高速回転させて浮上する。飛行中は不安定なために飛行中のペイロードを測定するのは危険である。そこで、Fig5のように重りをMUAV上に固定し、重りの重量を変化させ、離陸ができなくなった時の重量をペイロードとした。計測の結果、ペイロードは約1.4Kgであることが分かった。また、Table1に示したケーブルの導体公称断面積と概算重量の関係[3]から、10mのケーブルを持ち上げるためには、導体公称断面積が $2\text{mm}^2$ 以下のケーブルを使用する必要があることも分かった。一方で、MUAVのペイロードの制約から、給電ケーブルの重量は軽い方が望ましい。しかしながら、導体公称断面積が小さいほど、ケーブルの発熱量が大きくなる。そのため、ケーブルの発熱量を考慮する必要がある。

Table 1: Relation of nominal cross-sectional area and weight

Nominal Cross-sectional area [ $\text{mm}^2$ ]	Weight [kg/m]
0.75	0.061
1.25	0.08
2.00	0.1
3.50	0.156

#### 3.2.2 発熱計算

ケーブルの発熱量を予測するためには、ケーブルに流れる電流量を把握する必要がある。そこで、予備実験として、安定化電源(KIKUSUI社製 PWR400L)を用いて、飛行中のMUAVに流れる電流を観察した。その結果、上昇時など、負荷がかかる状態では約22A、ホバリング時には約15A流れていることを確認した。これらの電流値を使用して、ケーブルの発熱量の計算を行う。ケーブルに電流が流れた時の発熱量は一般的にジュールの法則より(1)で表わされる。

$$Q = R \times I^2 \times t \quad (1)$$

ここで、 $Q$ はケーブルの発熱量[J]、 $R$ はケーブルの抵抗値[ $\Omega$ ]、 $I$ はケーブルに流れる電流[A]、 $t$ は経過時間[s]である。全発熱量がケーブルの温度上昇に変換されたと考えれば、ケーブルの上昇温度は式(2)で表される。

$$K = \frac{R \times I^2}{c\rho AL} t \quad (2)$$

ここで、 $K$ はケーブルの上昇温度[K]、 $A$ はケーブルの断面積[ $\text{m}^2$ ]、 $L$ はケーブル長[m]、 $\rho$ は導体(銅)の密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $c$ は導体(銅)の比熱[J/(K·kg)]である。銅の密度、比熱はそれぞれ $8940\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.397 \times 10^{-3}(\text{J}/\text{Kg} \cdot \text{K})$ である。また、ケーブルの長さは、部屋の端から端まで探査可能な長さとして、10mに決定した。計算簡略化のため、電源ケーブルの銅線のみを考える。選定候補となるケーブルの公称断面積と各公称断面積における抵抗値をTable2に、電流量と1分間で上昇する温度の関係をTable3に示す。また、ビニルキャップタイヤ丸形コードの被膜の耐熱温度( $105^\circ\text{C}$ )[3]より、MUAVがホバリング可能な時間は、それぞれのケーブルにおいて、50秒、2分、5分と見積もられた。実際には、ケーブルから熱が放熱されるため、耐久時間は延びると考えられる。以上のことを踏まえて、公称断面積が $2.00\text{mm}^2$ のケーブルを選択した。

### 3.3 実験

本研究で使用した有線給電システムの全体像をFig6に、システム像をFig7示す。本実験において、モーターの電源として電圧を12Vと設定した安定化電源を使用した。ま

Table 2: Relation of nominal cross-sectional area and resistance value

Nominal Cross-sectional area [ $\text{mm}^2$ ]	Weight [kg/m]
0.75	0.0025
1.25	0.0015
2.00	0.00098

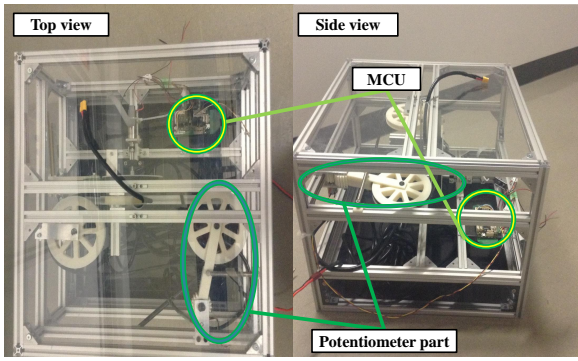


Fig. 6: Image of 2nd Winding System Prototype

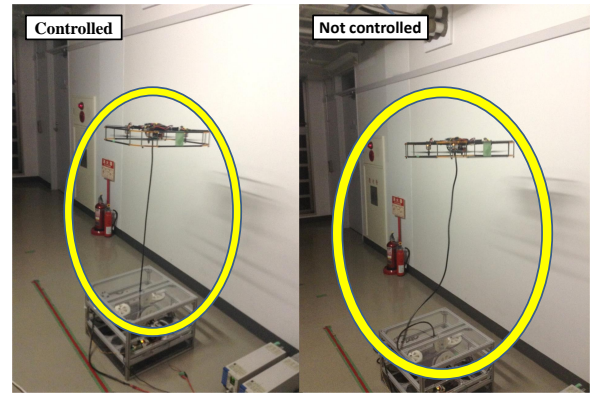


Fig. 8: Experimental Picture of 2nd Prototype

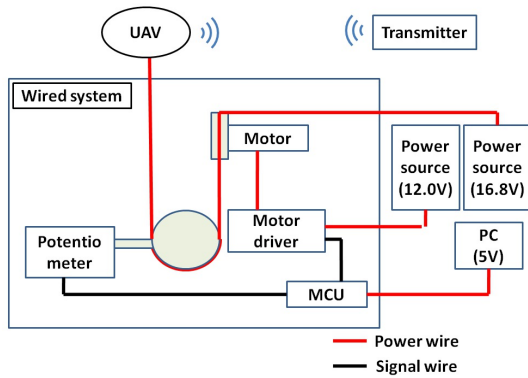


Fig. 7: Circuit System Diagram for 2nd prototype

たマイコンの電源として、PCからUSB接続(5V)を使用した。MUAVへの電源供給は、ケーブルの長さが長いため、電圧降下を考慮する必要がある。直流の電圧降下は一般的に式(3)で表される[6]。

$$e = (35.6 \times L \times I) / (1000 \times A) \quad (3)$$

ここで、 $e$ は電圧降下[V]、 $L$ はケーブル長[m]、 $I$ は電流[A]、 $A$ は断面積[mm<sup>2</sup>]である。Table4に流れる電流と、電圧降下の関係を示す。これより、電流が20A流れた場合、およそ3.6V降下することが分かる。そこで、電圧を通常のバッテリー13.2Vに降下分約3.6Vを合わせた16.8Vに設

Table 3: Relation of nominal cross-sectional area and resistance value

temperature increase (K/min)	Nominal cross-sectional area(mm2)			
	0.75mm <sup>2</sup>	1.25mm <sup>2</sup>	2.00mm <sup>2</sup>	
Current(A)	15A	127K/mini	46K/mini	19K/mini
	20A	226K/mini	82K/mini	33K/mini
	22A	274K/mini	99K/mini	40K/mini

定し、電源として安定化電源を使用することとした。本研究では巻き取りシステムありの場合と、システムなしの場合の二通りの実験を行った。どちらの場合もMUAVを高さ約2mまで上昇させ、5秒ほど静止させた。その後、降下させ着陸を行った。降下時の様子をFig8に示す。Fig8より、巻き取りシステムありの場合、ケーブルがたるまずにMUAVが降下出来ているのに対し、システムなしの場合においてはケーブルがたるんでいることがわかる。これにより、巻き取りシステムの有用性が確認された。一方で、着陸時のMUAVの不安定性が確認された。これは、地面効果によるものであり、電源コードを強制的に巻き取ることで改善が見込める。また、長時間の飛行によるケーブルの発熱量や、10mまで飛ばした時のケーブルの巻き取りシステムの有用性は未確認である。

#### 4 結言

本研究では、人の立ち入りが困難な屋内の災害現場において、地上移動ロボットに搭載したMUAVの長時間探索のためのMUAVの有線給電システムを開発した。本システムにより、着陸補助やケーブルの巻き取りの有用性は確認された。今後は、飛行時間や飛行距離を伸ばして実験を行う。また、着陸時の不安定性を解決するために、強制的にMUAVを引っばることでより安定した着陸を目指す。

Table 4: Reration of Current and voltage drop

Current [A]	Voltage drop [V]
15	2.7
20	3.6
22	3.9

## 謝辞

本研究は、公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団の研究助成金の支援を受けて実施されました。

## 参考文献

- [1] 永谷圭司  
災害現場におけるロボット活用事例  
電子情報通信学会総合大会 予稿集 SS-7 SS- 8
- [2] Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Hoshida, Satoshi Tadokoro, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi  
Shared Autonomy System for Tracked Vehicles on Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain Scanning Journal of Field Robotics , Volume 28 Issue6 pp875-893
- [3] Nathan Michael, Shaojie Shen, Kartik Mohta, Yash Mulgaonkar, Vijay Kumar, Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Seiga Kiribayashi, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, "Collaborative mapping of an earthquake-damaged building via ground and aerial robots", Journal of Field Robotics Volume 29, Issue 5, pp.832-841 (2012-08)
- [4] 興野 悠太郎 米澤 拓郎 野崎 大幹 小川 正幹 伊藤 友隆 中澤 仁 高汐一紀 徳田 英幸  
“着脱可能な線給電式空中センシングプラットフォーム”  
研究報告モバイルコンピューターティングとユビキタス通信  
2014-MBL-70
- [5] WIRE CABLE CATALOG vol.2.1 オーナンバ株式会社  
<http://www.onamba.co.jp/wp-content/themes/twentytwelve/pdf/wire-catalog.pdf>
- [6] 住電日立ケーブル株式会社  
技術資料P75  
<http://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/P75-84.pdf>