

山岳地帯における小型探査ロボットの運搬を目的とした マルチロータ機の研究開発

Development of a Multi-Rotor UAV to transport a Small Rover in a Mountainous Area

○ 大塚 光, 桐林 星河, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大)

Hikaru OTSUKA, Tohoku University, h-otsuka@astro.mech.tohoku.ac.jp
Seiga KIRIBAYASHI
Keiji NAGATANI
Kazuya YOSHIDA

Tele-operated mobile robots play an important role in observing active volcano areas in restricted areas. However, it is very difficult for current mobile robotic technology to traverse a whole path from unrestricted area to the destination in restricted area by itself. Therefore, we drew up a scenario in which an electronic rotary-wing UAV transported a small-sized mobile robot by air. Based on the scenario, we developed a prototype rotary-wing UAV and conducted some field experiments, in which the UAV carries a small robot. In this paper, firstly, we discuss changing factors in thrust of rotary wings in different altitude, then introduce the prototype UAV, and finally, report some field experiments and evaluations of them.

Key Words :UAV, Rotary wing, transportation, Multi-rotor UAV, Volcano Exploration

1 緒言

火山噴火によってもたらされる火山災害は、周辺の環境に影響を与えるため、火山周辺に大きな被害をもたらす。特に日本では、多くの市町村が火山帯に近接しているため、火砕流や土石流といった火山活動により、住民に大きな被害が発生してきた。この火砕流や土石流の発生を予測し、火山災害による被害を軽減するためには、火山活動の継続的な監視が重要である。しかし、活動中の火山周辺は非常に危険であるため、有人での調査を実施することができない。そこで我々の研究室では、活動中の火山において、火山探査を行うことを目的とした、遠隔操作型の移動ロボットの研究開発を行ってきた [1]。しかしながら、火山災害発生時に、探査目標とする火山中腹地点まで移動ロボットを輸送する方法が確立されておらず、その方法が検討されてきた。

一般に、目標とする火山中腹は植生が少ないが、そこに至るまでの環境は植生が多いため、地表移動を行うことが困難である。そこで本研究では、探査用移動ロボットの空輸を考え、探査機を輸送する回転翼型 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) の開発を行った。なお、飛行高度の上昇に従って、回転翼から得られる推力の大きさは低下することが知られている。さらに、ガソリンエンジンは、酸素密度の低下が問題となるため、標高 1000m を超える火山での飛行が困難となる。こうしたことから、本研究では、高度変化に伴う推力変化が比較的小さい、電気駆動のマルチロータ機(回転翼を複数備えた小型 UAV) を開発対象とした。本研究の目的は、探査機の輸送を行うマルチロータ機を開発し、標高 1,000[m] を超える環境において、探査機の輸送が行えることを実証することである。本稿では、高度変化による回転翼推力への影響について触れ、開発したマルチロータ機を紹介し、飛行試験の結果について報告する。

2 山岳地帯における回転翼の推力低下

2.1 UAV の飛行高度と推力変化の原因

火山探査活動の分野では、これまでも固定翼型の UAV や、シングルロータの中型 UAV の利用が試みられてきた [2]。しかし、回転翼型 UAV の利用は、飛行高度の上昇に伴った推力低下が大きな問題とされ、標高 1,000[m] 以上に



Fig. 1 Multi-rotor UAV named TOBI.

おける環境での飛行は困難とされてきた。この推力変化は、高度変化に伴う酸素密度と大気状態の変化によって引き起こされる。以下ではこの 2 つの因子が、推力に及ぼす影響について述べる。

2.2 酸素密度が推力へ及ぼす影響

回転翼型 UAV が飛行する高度が上昇する際、大気密度の低下に伴って大気中の酸素密度が小さくなる。燃焼時の圧縮比が低いレシプロエンジンでは、酸素密度の低下に伴って燃焼効率が低下するため、回転翼を回す出力が低下し、飛行に必要な推力が十分に得られなくなる。この推力低下が原因となり、回転翼型 UAV の飛行高度には限界が存在していた。

そこで本研究では、レシプロエンジンを用いた UAV ではなく、電気駆動のモータを使用するマルチロータ機を用いることとした。回転翼を電気駆動とすることで、酸素密度が回転翼への出力に影響することがなくなり、従来よりも高い高度での飛行、ならびに、重いペイロードの搭載が可能となる。

2.3 大気状態が推力へ及ぼす影響

回転翼が得られる推力の大きさは、主に大気密度に依存している [3]。また、大気密度の大きさは気温、気圧、湿度の影響を受け、一般的には高度の上昇に伴って低下する。こうしたことから、気温の上昇、気圧の低下、ならびに湿度の上昇によって大気密度は小さくなり、回転翼の得る推力は低下する。

さらに小型の回転翼に関しては、飛行 Re (レイノルズ数)

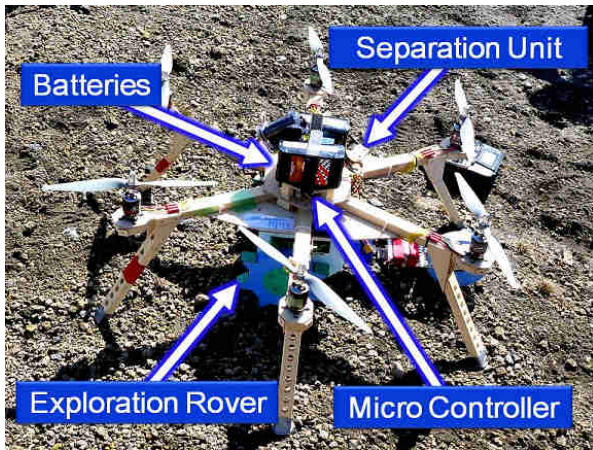


Fig. 2 Devices of TOBI.

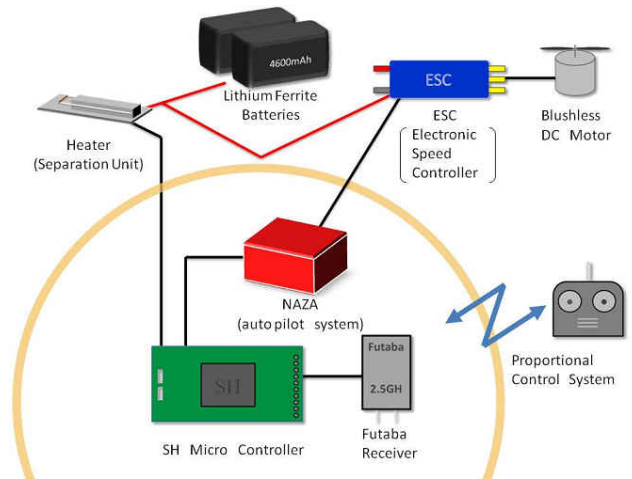


Fig. 3 System configuration of TOBI.

が 10^5 以下と低い値になることから、大気粘性の影響が強くなり、回転翼表面における流体現象が非線形的になることが知られている [4]。非線形的な空力現象は、非常に複雑であり、未だ小型回転翼の性能に関する理論体系は確立されていない。先行研究では、 Re によって小型回転翼の推力が変化することが指摘されており [5]、小型の回転翼ほど大気状態の変化による影響を受けやすい。そこで我々は、大気状態の変化による小型回転翼の推力変化を調べるため、異なる標高における推力測定試験を実施した [6]。その結果、マルチロータ機に用いた回転翼 (図 6) では、大気密度の変化により、標高差 1,000[m] で、約 20[%] の推力低下が確認された。大気の状態は、天候に左右されるため、常に同じ大きさの推力変化が起こるとは限らないが、この試験により、飛行高度が変化した際の小型回転翼の推力変化について知見を深め、機体製作に必要な情報を得ることができた。

3 マルチロータ機の製作

2 章までに述べた、飛行高度の変化による回転翼の推力変化を考慮し、小型移動ロボット運搬用マルチロータ機 TOBI を製作した。マルチロータ機は、回転翼の数や大きさの変更によって搭載ペイロード量に柔軟に対応でき、さらに回転翼の回転数を制御するだけで、機体の姿勢や移動を制御できるという長所を持つ。TOBI は 6 つの回転翼を持ち、マルチロータ機の中でもヘキサロータ機と分類される。

3.1 機体諸元

表 1 に機体の諸元を示す。本研究では、フレームを軽量で加工の容易な木材で製作することで、機体の重量を抑えつつ、高剛性を実現した。軽量化を行うことにより、TOBI は高度 1,500[m] で 1.5[kg] 程度の探査機を輸送することが期待できる。

3.2 機体構成

TOBI は 6 つの回転翼を有し、それぞれがブラシレス DC モーターと回転翼で構成される。採用したブラシレス DC モー



Fig. 4 Wire cutting mechanism.

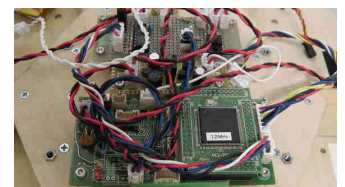


Fig. 5 Micro controller of TOBI.

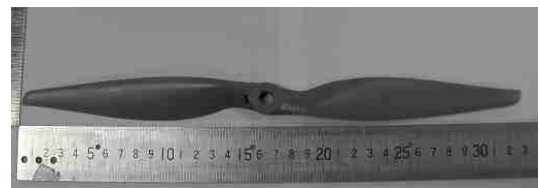


Fig. 6 Propeller of TOBI (APC 13 × 9 inches).

ターは、飛行時の最大回転数が、約 9,000[rpm] である。飛行の際、一つの回転翼あたりに 1[kg] 以上の推力が要求されるため、回転翼にはたわみが小さく、強度のあるものを用いた。

また、移動ロボットを飛行中に分離するため、機体下部に移動ロボットの収納スペースを設け、空中で分離する機構を有する。分離機構は、軽量化のため、ならびに、移動ロボットの形状に対応する汎用性のため、釣り糸 (ナイロン製) を電熱線で焼き切る方式を採用した (4)。

その他の装置として、機体上部に記録用のビデオカメラ、機体左舷に GPS ロガーを搭載した。機体の電源には、16.5[V] 9.2[Ah] のリチウムフェライトバッテリーを用いた。

3.3 機体制御

機体の姿勢制御には、市販されている RC 用の姿勢制御コントローラを用いた。現状の機体の操縦については、RC 用プロポにより、人間が目視できる範囲内において、遠隔操作を行う。受信した信号は、マイクロコントローラで処理され、姿勢制御コントローラ、及び分離機構の制御を行う。

3.4 移動ロボット

今回、飛行試験時に搭載する探査機は、秋山らの開発した GeoStar-Mini (図 7) である [7]。この探査機は、飛行運搬のために重量が 1.4[kg] と小型・軽量であり、無線 LAN または、携帯電話回線を用いて遠隔地からの操作が可能である。

Table 1 TOBI の諸元

本体重量	4120[g]	バッテリー重量	1600[g]
ペイロード重量	1460[g]	総重量	7190[g]
最大機体直径	840[mm]	高さ	420[mm]
モーター定格出力	600[W]	モーター KV 値	710[rpm/V]
測定最高回転数	8700[rpm]	最大モーター推力	1910[g]
バッテリー容量	9.6[Ah]	バッテリー電圧	16.5[V]
連続浮上時間	393[s]		※標高 50m にて

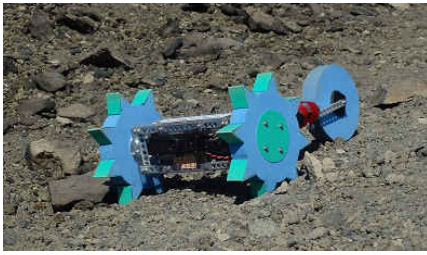


Fig. 7 Rover GeoStar-Mini.



Fig. 8 Separation test(1,700[m]).

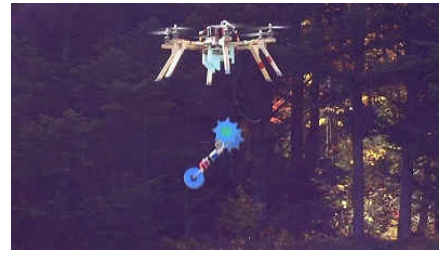


Fig. 9 Separation test(1,300[m]).

4 実験

マルチロータ機による移動ロボットの輸送が活動可能であることを示すため、TOBIを用いた飛行試験を行った。具体的には、山麓から山腹の探査地点まで移動ロボットを輸送・分離するシナリオの実現を目指し、これに必要なロボットの要素動作に関する試験を実施した。なお、標高1,000[m]以上での飛行試験については、探査対象とする活火山である長野県浅間山にて、環境省ならびに、地元自治体の許可を得て実施した。

4.1 標高40[m]での飛行試験

機体の飛行安定性と連続飛行時間の確認のために、標高40mという低い標高で飛行試験を行った。この試験の結果、1.5[kg]の探査機を搭載して、392秒間の連続飛行に成功した。

4.2 標高1,700[m]での飛行試験

2012年9月1日、高標高での機体の飛行能力を確認するため、浅間山の標高1,700[m]地点において、移動ロボットに見立てた930[g]のダミーペイロードを搭載して飛行し、分離する試験を行った。平均風速7[m/s]程度の強風環境にもかかわらず、”TOBI”は安定飛行を行い、ダミーペイロードの投下に成功した。図9に、分離試験の様子を示す。

4.3 標高1,500[m]での飛行試験

2012年10月22日、TOBIに実際に1,500[g]の探査機を搭載し、浅間山の標高1,500[m]地点において、飛行および探査機の分離動作の実証試験を行った。この試験では、飛行中にモータの一つが故障し、分離試験を行うことはできなかったが、探査機を搭載した状態での飛行が可能であることを確認した。

4.4 標高1,300[m]での飛行試験

2012年10月24日、探査機を搭載した状態で、再度、飛行および探査機の分離動作の実証試験を行った。その結果、探査機を搭載した状態での飛行ならびに、探査機の分離に成功した。図9に分離動作の様子を示す。

4.5 考察

一連の試験により、TOBIは、移動ロボットを探索地点まで輸送する能力を有することを確認した。現在、連続飛行時間は6分程度であり、浅間山の麓から探査目標とする地点までの距離を往復することはできないが、更なる軽量化、高効率のモータの利用、軽量かつ高出力のバッテリーの選定などを行うことで、目標とする火山探査シナリオは実現可能であることが示された。バッテリーに関しては、現在用いているリチウムフェライトよりも、高性能なリチウムポリマ電池が存在する。しかしながら、発火事故の危険から当研究室では、この電池の使用を行っていない。今回の試験では、マルチロータ機用のバッテリーにリチウムポリマを使用し

ていないことから、実際の活動の際にはこの電池に交換することで、航続距離を伸ばすことが期待できる。また、標高1,700[m]における安定飛行と標高1,300[m]での移動ロボットの分離試験が成功したことから、標高が1,000[m]を超える環境でも、火山探査を行うための移動ロボットの輸送に、マルチロータ機が有用であることを示すことができた。

5 結言

本研究では、火山探査を行う遠隔操作型的小型移動ロボットを、探査目標とする火山中腹地点まで輸送するための、マルチロータ機の開発を進めてきた。この開発にあたり、高い標高における大気密度の低下や大気の状態が推力に与える影響の考慮が重要となる。そこで本稿では、小型の回転翼では、飛行時の大気の状態が推力に大きく影響することを述べ、UAVの製作にあたり、機体諸元の決定に際して、この推力変化を考慮しなければならないことを述べた。次に、製作したマルチロータ機TOBIについて紹介し、TOBIによる飛行試験から、標高1,000[m]を超える高標高において、回転翼型UAVを用いた移動ロボットの輸送が可能であることを示した。今後は、この機体をモデルケースとして、飛行時間の延長や、搭載ペイロード重量の増加といった改良を進め、実際に火山環境で小型ロボットを運搬することが可能なマルチロータ機の開発を進める。

文献

- [1] 永谷圭司, 西村健志, 吉田智章, 小柳栄次, 羽田靖史, 油田信一, 多田隈健次郎, 小型移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察-浅間山における2012年フィールド試験-, 第13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.648-651, 2012.
- [2] 森川泰, 小森谷清, 情報収集飛行ロボット, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1019, pp.774-777, 2003.
- [3] 小池勝, 流体機械工学, コロナ社, 初版1刷, 2009.
- [4] John, B. Brandt., and Michael S. Selig.: Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2011.
- [5] Robert, W. Deters., and Michael, S. Selig.: Static Testing of Micro Propellers, 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2008.
- [6] 大塚光, 中村拓磨, 桐林星河, 永谷圭司, 吉田和哉, 高度変化に伴う回転翼型小型UAV用プロペラの推力低下の評価, 日本航空宇宙学会北部支部2013年講演会 JSASS-2013-H028.
- [7] 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史, 車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験, 第13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.652-654, 2012-12, 2012.