マルチロータ搭載型全方向風速計の開発

○中村拓磨,桐林星河,永谷圭司,吉田和哉 (東北大)

Development of an Omnidirectional Airspeed Indicator for Multi-rotor UAVs Takuma Nakamura, Seiga Kiribayashi, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida (Tohoku University)

Key Words: UAV, Multirotor, Volcano Exploration

Abstract

An observation in active volcanic areas is of vital importance for the evacuation strategy of the residents. In this research, we have developed a multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) which is aimed to undertake surveillance of inaccessible volcanic areas after an eruption. In order to conduct the surveillance mission, defining the relation between consumption of current and flight environment is crucial for estimation of the durability of the flight. Therefore, in this research, we developed an omnidirectional light airspeed indicator that is small, light-weight, and low power consumption. In this paper, we introduce the mechanism of the airspeed indicator, and report results of our performance tests.

1. 緒言

小型の無人航空機(UAV)は、空中撮影や危険な地域 の観察、軍事ミッションにおける偵察など、さまざまな 目的で利用、研究が行われている分野である。特に、活 動中の火山の監視は、近隣への被害予測のために必須で あるが、噴火活動が始まると、人は火山周辺エリアへ侵 入できなくなるため、無人航空機の利用が求められる。 そこで、我々の研究室では、これまで小型のUAVを用い て、遠隔で火山監視行うための研究開発を行ってきた[1].

UAVを用いた火山監視では、火山のふもとを離陸し、 火口付近へ大きな高度変化を伴う飛行を行う必要があ る.しかし、農業用無人ヘリコプタのようなレシプロ エンジンを用いたUAVでは、供給空気の密度変化にエ ンジンが対応できず、大きく高度を変える飛行ができな い.そこで、我々は、図1、図2に示すような、供給空 気の密度に影響されない電動のマルチロータ機を用い て、活火山の監視を試みている.

マルチロータ機が火山観察に代表される長時間のミッ ションを効率的に達成するためには、バッテリの残量か ら、逐次飛行可能時間の推定を行うことが非常に重要と なる.飛行可能時間は、飛行速度や風の強さに大きく影 響されるため、飛行可能時間の正確な推定には、対気速 度の計測が不可欠となる.さらに、マルチロータ機は、 全方向に移動可能であるため、既存の1軸方向の対気速度 を計測する航空機用対気速度計では、マルチロータ機の 対気速度を正確に測定することができない、加えて、マ ルチロータ機は、飛行速度が最大で10[m/s]程度であり、 有人の航空機と比較するとはるかに低速で飛行を行う.

故に,正確な飛行時間の推定には,全方向の低速領域 の風速計が必要となる.このような全方向風速計は,ホ バリング中の有人ヘリコプタや飛行船などの飛行性能の 評価にも不可欠なため、JAXAなどで研究が行われてい る[2].しかし、ペイロードが500g程度と非常に小さく、 かつ、使用電力の制限が厳しいマルチロータ機に利用で きるような、小型軽量で低消費電力の全方向風速計は開 発されていない.

そこで、本研究では、マルチロータ機に適した全方向 風速計を開発した.この風速計は、マルチロータ機に搭 載可能な重量であり、3次元的に、低速領域の対気速度 が計測が可能なため、マルチロータ機が受ける風の影響 を評価できる.本稿では、開発した全方向風速計の構成 を説明し、風洞で実施した性能評価実験の結果について 述べる.

2. 全方向風速測定の原理

2-1. 全方向風速測定の原理

風速測定の一つに、全圧と静圧の差圧を求め、流速を 導出する差圧式流速測定がある。差圧式は、有人の航空 機をはじめ、多くの場面で対気速度計測に用いられてい る。全圧と静圧の差圧を ΔP 、流体の密度を ρ とすると、 流速vは、ベルヌーイの定理より導出した式(1)を用いて 計算できる。

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{1}$$

風速を導出する場合,流体の密度は、すなわち空気密度である.空気密度 ρ [kg/m³]は、状態方程式より、気体常数R,気温t[°C],大気 EP_{atm} [Pa]を用いて、次式から導出できる.



Fig. 1: Octorotor

Fig. 2: Quadrotor



Fig. 3: System Architecture

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R(t+273.15)}$$
(2)

2-2. 1軸測定から全方向風速への計算

全方向の風速測定は、3軸方向の風速の合成ベクトル から導出できる.式(1)を用いて、x軸、y軸、z軸方向で 測定された風速を v_x 、 v_y 、 v_z とすると、UAVの対気速 度 v_{total} は、次式のように導出される.

$$v_{total} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \tag{3}$$

3. 風速計の実装

3-1. 3軸差圧計測法のシステム構成

本研究では、3軸方向の差圧を計測するため、全圧測 定に6個、静圧測定に1個の、小型気圧センサモジュール (BOSCH製BMP085デジタル気圧センサモジュール)を 使用した.マルチロータ機を含めた、本風速計のシステ ム構成を図 3に示す.7つの気圧センサの出力値はマイ クロコントローラ(ArduinoMega 2560)で読み取り、マ イクロコントローラとコンピュータの通信は、ZigBee を用いた無線シリアル通信によって実現した.風速計 のシステム全体で、消費電力は0.7 [W]であり、電力は、 マルチロータ機を飛行させるためのバッテリーから供給 するものを使用する.



Fig. 4: Static Pressure Fig. 5: Total Pressure Box Box

3-2. 静圧測定

風速を導出する場合,静圧の測定に注意を払わなけれ ばならない.静圧の測定は,風圧の影響を受けてはいけ ないが,飛行による高度変化や大気圧の変化による気 圧変化に対応したリアルタイムの静圧を計測する必要 がある.本研究では,風圧の影響を受けず,かつ,マル チロータに搭載可能な静圧測定装置(図 4)を製作した. この静圧測定装置は、ベースパーツに、気圧センサモ ジュールを設置し、その周辺を、アウターとインナーの 2重の防風壁でカバーする構造となっている.アウター とインナーは、静圧孔の位置が90度ずつずれており、風 圧の影響がセンサに及びにくい構造となっている.

3-3. 全圧測定

3軸方向の全圧を測定するため、図5に示す正六面体の 各面に、気圧センサモジュールを埋め込んだ装置を製作 した.風のセンサに正対する方向の投影成分を計測し、 それを6つ合わせることで、3軸方向の全圧を計測する.

4. 風洞を用いた評価

4-1. 静圧計測計の評価

静圧計測装置は、3.2節で述べたように、外気圧の変 化に対応しつつ、風圧の影響を受けないことが求められ る.そこで、実装した静圧計測計に、異なる風速の風な らびに、異なる入射角の風をあて、静圧計測に対する影 響の評価を行った.結果は図6、図7に示す通りである. これらの図には、計測中の差圧の平均値、及び、0.2秒 ごとの移動平均の最大値、最小値を用いたエラーバーが 示されている.本実験により、静圧測定装置は、風速や 風の入射角に無関係で、±10[Pa](風速3[m/s]程度)の範 囲の出力を行うことが確認できた.



Fig. 6: Differential Pressure vs. Airspeed



Fig. 7: Differential Pressure vs. Angle of Incidence

4-2. 流速の違いに対する全圧測定装置の評価

続いて、前節で用いた静圧測定装置を用いて静圧を測 定しつつ. 全圧測定装置のうち1面を風に正対するよう に設置し、その面の風速を計測した.また同時に、全 圧測定装置の他の5面のうち、風の方向と90度ずれた位 置にある、側面と上面の気圧センサを用いて風速を計 測した.風圧の理論は、計測した流速vと実験日の気温 t[°C]、気圧 P_{atm} [Pa]を代入し、(2)式から導出した空気 密度 ρ [kg/m³]を用いて、次式のように表わせる.

$$\Delta P = \frac{\rho v^2}{2} \tag{4}$$

データの取得方法は、風速一定の下、3分間差圧を計 測するというものである.これを、異なる12点の風速で 計測した.なお、我々の研究室で使用するマルチロータ 機の最大対気速度が、7[m/s]程度であるため、計測に使 用した風速は、最大7.6[m/s]とした.理論式(4)から導 出した理論値ならびに、風洞実験から得られた全圧測定 計の結果を図 8に示す.

式(4)より,差圧は,風速の2乗に比例するので,図8から,風圧と風速の関係を示す近似式を,最小二乗法を用いて2次式で導出することとした.これを式(5)に示す.

$$\Delta P = 0.4547v^2 + 3.428v + 0.9729 \tag{5}$$



Fig. 8: Differential Pressure vs. Airspeed



Fig. 9: Differential Pressure vs.Angle of Incidence

この式を利用することで、任意の風速で、センサに正 対する風圧成分を求めることができる.また、側面と上 面に設置された気圧センサモジュールは、風速の上昇に ともない負の差圧を示している.これは、ベンチュリ効 果により、圧力が減少しているためであると考えられる.

4-3. 風の入射角の違いに対する全圧測定装 置の評価

式(3)を用いるためには、各面の気圧センサは、風の 正面方向の投影成分を読みとる必要がある.この性質が 得られるかどうかを評価するため、風洞の風速一定のも と、全圧測定装置をある角度で固定し、3分間差圧を計 測した.計測は、1つのセンサが風に正対する方向から 始め、そのセンサが、装置自身を挟み、風下にまわるま で角度を変え、異なる13点の角度で行った.なお、上面 のセンサは、常に風圧に対し90度ずれた方向である.こ の結果を図9に示す.この図には、計測中の差圧の平均 値、及び、0.2秒ごとの移動平均の最大値、最小値を用 いたエラーバーを示している.

これにより,得られた結果は,風に対する角度が,正 対から±90度までは,理論値に非常に近い値を示すこと がわかる.このことから,式(3)を用いて,全方向の風速 を求めることができるといえる.ただし,風からの角度 が90度を超えると、装置自身に風の流れを阻害され、正 確な負の差圧を計測できないことが分かる.そのため、 風速を計測する際は、まず、10[Pa]以上の差圧を示して いるセンサを用いて風向きを決定し、風上側の3面の気 圧センサを用いて、最終的な風速を求めることとした.

5. 結言

本稿では、7つの気圧センサモジュールを有する全方 向風速計の原理について説明し、その構成を紹介した. また、試作した装置の性能を評価するため、風洞を用い た実験を行った.その結果、小型のマルチロータ機に搭 載可能かつ、おおよそ3[m/s]から7.6[m/s]の対気速度が 計測可能な、全方向風速計の開発に成功したといえる.

今後は、この風速計を用いて、屋外飛行試験を行い、 実環境での性能を評価する.続いて、マルチロータ機の モータ全てに電流センサを取り付け、消費電流と対気速 度を同時に計測できる環境を構築し、風が消費電流に及 ぼす影響を評価する.また、この全方向風速計で計測し た対気速度をコントローラにフィードバックすること で、よりロバストで効率の良い飛行を可能とする手法を 検討することも、今後の課題の一つである.

参考文献

- [1] 永谷圭司,西村健志 et al.,"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 (2012-12)
- [2] 矢沢健司,井之口浜木,稲垣敏治 et al.,"飛行デー タ取得用超音波風速計の改良と航空機による温室効 果ガスフラックスの測定法開発",独立行政法人航 空宇宙技術研究所報告,2002