

# 小型無人ティルトウィング機的设计製作

## Development of an unmanned aerial vehicle with tilt-wing

宮野 智行<sup>1)</sup> , 羽場崎 祥<sup>1)</sup> , 堤野 雅貴<sup>1)</sup>

Tomoyuki MIYANO, Akira HABAZAKI, Masataka TSUTSUMINO

**Abstract :** Various drone had become widely used for many applications. Unmanned aircrafts are desired to be used in wide range and for long distance flights, and a drone equipped with tilt-wings could realize these requirements. This paper presents development of a quad-rotor aerial vehicle with tilt-wing and the gain determination process. The flight control system of the tilt-wing drone is required to be developed originally. Flight experiments were performed to verify the validity of the gain determination process. Consequently the process is enough stable to control our developing unmanned aerial vehicle with tilt-wing.

**Key Words :** drone, flight control, PID, tilt-wing

### 1 はじめに

無人航空機は、航空の用に供することができる飛行機、回転翼機、滑空機等であり、構造上人が乗る事できないものの中で遠隔操作もしくは自動操縦できる航空機である。無人航空機は地震や火災等の災害支援活動に用いられる他、海外では注文した商品を運搬する宅配トラックに代わって無人航空機による宅配を行っている実績がある。ドローンという言葉が広まったのは 2010 年 Parrot 社の A.R.Drone が発表されてからである。iPhone をコントローラとして使用し、また撮影した映像を iPhone で見るようになるようになっていた。その後、スマートフォンの発展・普及と共にジャイロセンサや加速度センサ、GPS モジュール等が安く大量に製造されるようになり、ドローンは個人で楽しめるまでに普及した。今日ではオープンソースの飛行制御プログラムが幾つか存在し、個人でも製作することが可能となっている。しかし、我が国では 2015 年に航空法が改正され、屋外で飛行するためには許可が必要となり、個人の操縦は制限されるようになった。無人機に対する需要は高まっているが、飛行の機会が減少しているという現状もある。

近年、ドローンを含む小型無人航空機の分野において、可倒式の主翼を装備し、垂直に離着陸可能なドローンが上空では航空機のように主翼に発生する揚力を得て、水平に飛行することが可能となる無人航空機が研究されている [1]。このような機能を持つ主翼はティルトウィングと呼ばれ、ビル街や屋内では垂直に離着陸し、空中での静止が可能なドローンとして活動を行い、長距離の移動に際して障害物の存在しない高度では固定翼のように高速飛行を行うことが可能となる。固定翼機と比べて滑走路がなくても離着陸でき、ドローンと比べて最高速度が高く、航続距離

が長い等の利点があるため、ドローンに求められるようになった、より活動範囲を広め、より高速に移動するという要求を満たすことができる。

しかしながら、ティルトウィング機構を備えた無人航空機の飛行制御についての研究や、飛行制御プログラムのゲイン調整についての研究例は少ない [2][3]。通常のドローンやラジコンのような模型飛行機、回転翼機については、知識や飛行技術が広く知られており、誰でも製作が可能となっているが、ティルトウィング機に供する汎用の飛行制御プログラムはなく、ドローンと比較して個人で製作することは困難を要する。

本研究では、ドローン向けに供給されている汎用の飛行制御プログラムを使用し、クワッドコプターを改修してティルトウィング機の試作を行った。さらに、ティルトウィング機の製作者において、それぞれ機体と用途に合わせた最適な飛行制御プログラムが利用できるように、部分的モデルマッチング法を用いてゲイン調整を行った [4]。飛行実験を実施し、飛行制御プログラムおよびティルトウィング実験機の検証を行った結果を示す。

### 2 ティルトウィング機の試作

本研究では前項に記したドローンや回転翼機への要求に答えるため、回転翼機と固定翼機の両方の特性を併せ持つティルトウィング機の試作を行った。実験機はティルトウィング機の機体特性のデータ取得、検証を目的としている。機体製作にあたり、次に挙げる目標性能やその実現に向けた機体コンセプトを定めて、これを設計製作の指標とした。

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科  
航空宇宙工学コース

- (1) 垂直離着陸が可能であること。
- (2) ペイロードを含む機体総重量に対して十分な揚力を発生できる主翼を装備し、プロペラ及び主翼のティルト機構を有すること。
- (3) 通常のドローン及びラジコン機と同様の操縦が行えること。
- (4) 搭載機器のデータが取得できること。

試作したティルトウィング機を図1に示す。図2にティルト角を垂直(90度)にした状態と、水平(0度)にした状態を示す。離着陸時は翼を垂直(90度)に設定し、水平方向に長距離移動する時は水平(0度)に設定する。

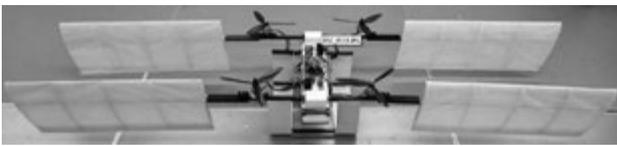


図1 試作したティルトウィング機



図2 ティルト角 垂直(90度)と水平(0度)

小型無人航空機の製作にあたって、制御方式はその飛行特性を決定付ける重要な要素である。ドローンは複数あるモータの回転数を変化させ、推力に偏りを生じさせて姿勢を変化させるが、姿勢を安定させるためには、機体の姿勢角、姿勢角レートから各モータ最適な回転数を算出し制御するというプロセスを継続して行わなければならない。一般的なドローンはこの制御をフライトコントローラと呼ばれるマイコンによって実現している。ドローン向けのフライトコントローラは幾つか市販されているものがあるが、本試作ではドローンと固定翼機の両方の特性を併せ持つクアドティルトウィング機の飛行制御として最適な開発環境が提供されており、飛行制御プログラムの汎用性、実用性と書き換えが可能であるという点から Multi-wii を採用することとした。同コントローラは Arudino のプラットフォームをベースにしているマルチロータモデルを制御することが可能なシステムである。今回、搭載した計算機ボード CRIUS ALL IN ONE PRO V2.0 は、三軸ジャイロスコップ、加速度センサ、気圧センサ等を標準で装備している。飛行制御プログラムはオープンソースであるため、C言語で書かれており必要に応じて変更することが可能である。同システムはジャイロセンサ、磁気加速度等、ドローンを安定的に操縦する際に必要となるセンサ、及び、モータに送られる信号の最適な処理が行える。また、PID制御のコントローラには比例ゲイン  $K_P$ 、微分ゲイン  $K_D$ 、積分ゲイン  $K_I$  の3つのゲインを設定することができる。

### 3 飛行制御プログラムの改修と確認実験

飛行制御プログラムを今回製作したティルトウィング機に対応させるために、ロータを備えた実験機のモデル化を行った。主翼のモデルを図3に示す。主翼のロール軸方向の回転について運動方程式立ててラプラス変換し、伝達関数を求めた。実験機について式を立てるに際し、以下に示す方法により PID 制御のゲイン値を決定した。

- (1) 機体の慣性モーメント  $I$ 、減衰係数  $c$ 、質量  $M$ 、中心からモータまでの距離  $L$ 、回転軸から重心までの距離  $x$ 、推力係数  $k$  の値、むだ時間を測定する。
- (2) 測定した値を式(3)~式(5)に代入し、部分的モデルマッチング法によりゲイン値を決定する。
- (3) 上記で求めたゲイン値を地上実験機に適用し、実験データを取得する。
- (4) 地上実験機で得られた応答を解析値と比較し、モデルや機体計測、実験データについて評価する。

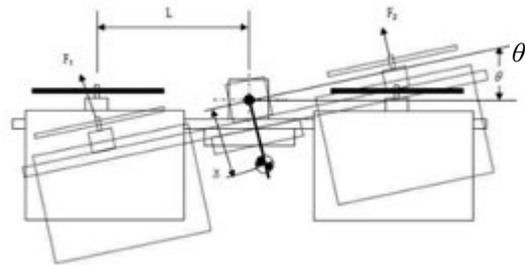


図3 ゲイン調整のための実験モデル

$I$ :機体の慣性モーメント  $c$ :機体の減衰係数  
 $M$ :機体の質量  $L$ :中心からモータまでの距離  
 $\theta$ :機体の傾斜角  $x$ :回転軸から重心までの距離  
 $F$ :モータの推力  $k$ :推力係数

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + Mgx\theta = L(F_1 - F_2) \quad (1)$$

ここで、 $F=kV$  とすると、伝達関数  $G(s)$  は式(2)となる。

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_1(s) - V_2(s)} = \frac{kL}{Is^2 + cs + Mgx} \quad (2)$$

式(3)~式(5)の PID 制御のゲイン値は部分的モデルマッチング法による。決定した値を表1に示す。

$$K_I = \frac{a_0}{\tau} \quad (3)$$

$$K_P = L + \frac{a_1}{a_0} - \alpha_2\tau \quad (4)$$

$$K_D = K_P \left( \frac{K_P\tau}{a_0} - L - \frac{a_1}{a_0} \right) + \frac{L^2a_0 + 2a_1L + 2a_2}{2\tau} - \alpha_3a_0\tau \quad (5)$$

表1 部分的モデルマッチング法によるゲイン値

	$K_P$	$K_I$	$K_D$
PID	0.052	1.108	22.3

表1に示したゲイン値を確認するために、今回製作した実験機を用いて、飛行中のロール、ピッチ、ヨー軸への入力に対する応答の確認を行った。実験機の諸元を表2に示す。

表2 実験機の緒元

全幅	1695mm	全高	200mm
全長	320mm	機体全重量	1146.6g
翼弦長	200mm	翼幅	520mm
翼面積	1040cm <sup>2</sup> ×4	主翼重量	221.0g×4

ロータを上方に向けたティルト角垂直（90度）の状態では、機体重量に対する十分な推力を確保することによって、主翼を外した状態と同様に垂直離着陸が可能であった。しかし、ロール軸については、標準のゲインでは主翼を外した状態と比較すると水平姿勢への復元に時間を要し、操縦に注意が必要となるものであった。主翼を装備した形態は、左右方向へ機体幅の増加と主翼の質量によるロール軸回りの慣性モーメントが増加していることによる。これには前節で示した方法により得られたゲイン値（表1）を飛行制御プログラムに設定することによって対応した。設定後のロール角制御の実験結果を図4に示す。

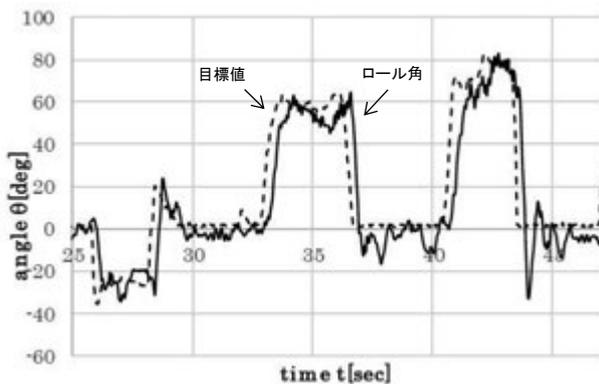


図4 ロール角制御（波線:目標値, 実線:ロール角）

#### 4 ティルトウィング機の飛行実験

飛行実験は、ロータを上方に向けたティルト角垂直（90度）で離陸した後、上空で主翼をティルト角水平（0度）に移行させて水平飛行する方法で行った（図5）。垂直離陸時に、ピッチ、ヨー方向への操作を加えても機体高度が変化しないことを確認した。推力不足は見られず、操作性は安定していた。ロール方向に関してはピッチ、ヨーと比較すると操作に対する応答が少し大きいですが、短時間で振動が抑制され収束していた。十分な推力によって高度が安定し、姿勢変動にも瞬時に水平に復元することが確認できたため、垂直離陸から水平飛行への移行実験を行い、状態遷移時における機体の挙動を確認した。

水平飛行への移行実験のデータを図6に示す。主翼を垂直（90度）から水平（0度）に傾斜させ、高度一定のまま約20mの水平飛行を確認した。これにより水平飛行に必要な機速が得られ、主翼が発生する揚力により高度を維持することができた。さらに、水平飛行中の主翼が上方に反っていることが確認され、揚力により機体が支えられ、推力を遮断した後も機体が滑空することを確認した。また、フライトデータから、移行に要した時間は約2.5秒であった。水平飛行中、機体に僅かなロール軸の揺れが見られたが、これは揚力により翼が反る量が左右均一でなかったためと推定している。

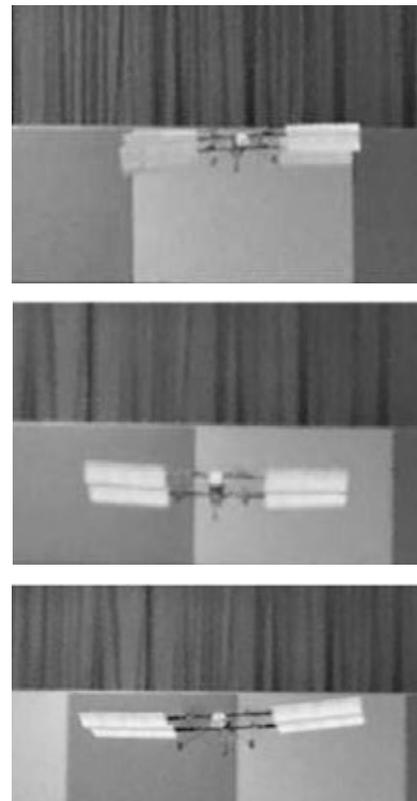


図5 垂直離陸から水平飛行への実験

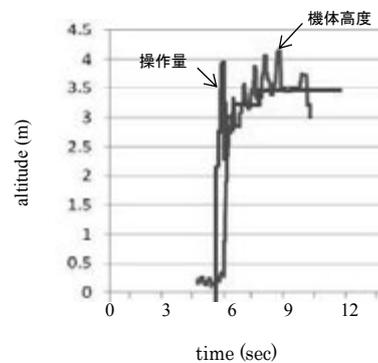


図6 水平飛行への移行実験

## 5 むすび

本研究ではティルトウイングを備えた小型無人航空機  
の設計製作を行い、ドローンにティルトウイングを装備す  
る際に必要となる設計上考慮すべき点や操縦性などのデ  
ータについて、飛行実験を実施して取得した。実験結果よ  
り、製作したティルトウイング機は、垂直に離陸した後、  
主翼を水平に移行して水平飛行が行えることを確認した。  
今後、水平飛行時の操縦系やロータ用のモータを主翼内蔵  
式に変更する等の機体改修、飛行制御プログラムの改良し、  
小型無人ティルトウイング機の開発を行う。

## 参考文献

- [1] 浦久保孝光, "VTOL 型ドローンの研究開発—次世代ドロー  
ンの実現に向けて," システム/制御/情報, Vol.60, No.10,  
pp437-442, 2016.
- [2] 三輪善裕, "災害用無人ティルトローター機の研究," 高知工  
科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻 修士論文, 2011.
- [3] 宮野智行, 植原雅貴, 中島正樹, "限界感度法を用いたドロー  
ンの飛行制御に関する一手法," 東京都立産業技術高等専門  
学校研究紀要, 12, pp.68-70, 2018.
- [4] 北森俊行, "制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法,"  
SICE 論文集, 15, 4, pp.549-555, 1972.