

マルチロータヘリコプタの軌道制御に関する研究

A Study of Trajectory Control for Multi Rotor Helicopter

主任研究員名：今村 彰隆

分担研究員名：三輪 昌史

1. はじめに

昨今、空中撮影や農薬散布などに無人ヘリコプタの利用が盛んになっている。我が国は国土が狭く山間地まで農地が作られる事情もあり、有人機では困難な狭所や危険地域、またコストの問題で利用できない空中業務を無人機が代行できるレベルにまでなってきた。搭載重量が比較的軽い空中撮影ではマルチロータヘリコプタが用いられ、搭載重量が重い農薬散布などでは大型な従来型のシングルロータヘリコプタが用いられている。マルチロータヘリコプタはシングルロータヘリコプタに較べて構造が簡単で操縦も容易なため、玩具のレベルまで低コスト化が進んでいる。また「ドローン」という愛称で呼ばれ、将来性が期待されるため「空の産業革命」と言われている。

本研究は、マルチロータヘリコプタの姿勢制御に関し次のような研究項目を実施した。

(1) 本研究の位置づけと目的として、マルチロータヘリコプタの空中撮影や対地計測などへの応用や課題について検討し、推力偏向機構による解決策を提案した。

(2) 初期の研究として偏向可能な補助推力装置を付加したクアッドロータヘリコプタを提案した。また実験機を試作し飛行試験により提案方式の有効性を評価した。

(3) ダクテッドファンを主推力装置とし、これに推力偏向ノズルを組み合わせる推力方向制御システムとしたクアッドロータヘリコプタを提案した。また実験機を試作し飛行試験により提案方式の有効性を評価した。





(4) ティルトロータ機構をクアッドロータヘリコプタに組合せた、最もシンプルな推力偏向機構を提案した。また実験機を試作し飛行試験により提案方式の有効性を評価した。

(5) クアッドロータヘリコプタの推力偏向に関する 3 種の提案方式について総合的な比較評価を行い、目的に最適な方式を決定した。

2. クアッドロータヘリコプタの問題点と解決策

一般に航空機は、Table 2.1 で示すように前進・旋回の際や横風に対抗するために機体を傾けて飛行する。

Table 2.1 Attitude of Airframe

	Forward	Turn
Plane (Fixed Wing)		
Helicopter (Rotary Wing)		

空中撮影や対地計測では水平姿勢を保つことが要求される。一般的な対応策はジンバル装置を用いて撮影機器等を搭載し、機体姿勢が変化しても搭載機器の対地姿勢を一定に保つ方法である。本研究では Figure 2.1 で示すようなレーザ測域センサを QRH に搭載し構造物や地形の計測を行う業務を想定している。計測中は飛行姿勢を水平に保つ必要があるが、移動中や横風時は機体を傾斜せねばならない。この課題に対し本研究では QRH の機体姿勢を常に水平に保つことが可能な機構を提案し、提案方式の有効性を試作機体の開発によって検証することを目的とする。



Figure 2.1 QRH with Laser Range Finder

また最終目標は Figure 2.2 で示すような空中作業ロボットの実現であり、ヒューマノイドロボットと同様に正確な作業を行うにはロボットの姿勢を安定させることが重要である。さらに作業の仕上げ段階で必要な位置調整などは、機体姿勢を任意の状態に固定した飛行が望まれる。このような飛行を実現するためには、従来型の航空機に推力偏向機構などの冗長な自由度の付加により解決する。



Figure 2.2 Flying Robot with Manipulator
(Composite Picture)

一般的なマルチロータヘリコプタはロータが固定ピッチのため、旋回飛行時の姿勢はピッチ軸の迎え角が前屈であり、ロール軸のバンク角が Figure 2.3 で示すように固定翼機と同じ動きになる。このような円運動では遠心力 F と向心力 F_o が等しくなるよう機体をバンク角 φ に傾けて旋回する。 φ は式(2.1)および式(2.2)のように F との関係から求まる。旋回時に高度を維持するには T_R を n 倍とする。 n は荷重倍数と呼ばれ、余分に必要となる推力は迎え角を上昇側に操舵することで補う。

$$F_o = F = T_R \sin \varphi = \frac{W V^2}{g R} \quad (2.1)$$

$$L = W = T_R \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{F_o}{L} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{V^2}{g R} \right) \quad (2.3)$$

$$n = \frac{T_R}{W} = \frac{1}{\cos \varphi} \quad (2.4)$$

直線移動時は遠心力が無いいため、式(2.1)は水平方向の力を示し

$$F_H = T_R \sin \varphi \quad (2.5)$$

であり、Figure 2.3 のように前進時の飛行姿勢はピッチ軸が前屈となる。

マルチロータヘリコプタはロータ回転によって反トルクが発生する。この対策としてロータの回転方向を正回転と逆回転に同数用いることで相殺するため、ロータは偶数個になる(Figure 2.4)。よって無風時のホバリングでは水平姿勢が維持される。しかし横風等の外乱が生じる際は、これに対抗する推力が必要となる。そこで QRH は機体を傾けることで水平面に推力を発生させ、位置を維持する (Figure 2.3)。屋外で無風状態は殆ど無いため、QRH は常時機体を傾けて飛行する。

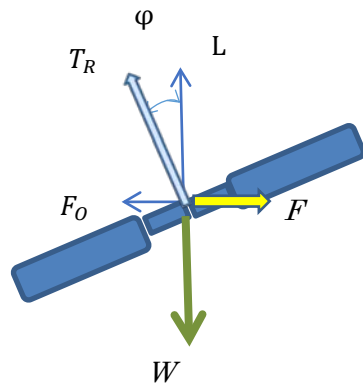


Figure 2.3 Thrust elements of turn flying

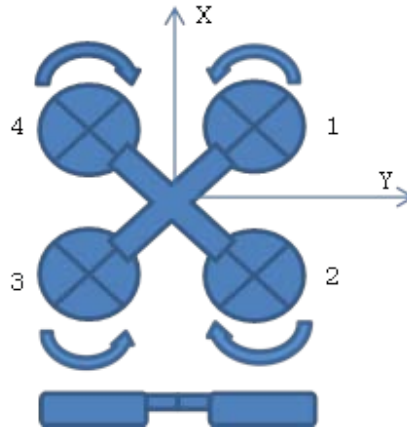


Figure 2.4 Rotating Directions for QRH

3. 提案方式

3. 1 補助推力型クアドロータヘリコプタ (担当: 今村)

通常の QRH に横滑りさせるための補助推力装置を付加する機体を提案する。補助推力装置(Extra Thruster; ET)にはダクテッドファンを用い、任意の方向へ推力偏向ができるように 2 軸のジンバル機構を設け、左右に各 1 個を配置する(Figure 3.1)。



Figure 3.1 QRH with ET

3. 2 推力偏向ノズル型クアドダクテッドファンヘリコプタ (担当：三輪)

ダクテッドファンを主推力装置としたクアドダクテッドファンヘリコプタ(Quad Ducted fan Helicopter; QDH)に対し、各噴出口に推力偏向ノズル(Thrust Vectoring Nozzle; VTN)を付加する機体を提案する。ノズルの偏向は2個のサーボモータを直交に配置して駆動する(Figure 3.2)。



Figure 3.2 QDH with VTN

3. 3 ティルトロータ型クアドロータヘリコプタ (担当：今村)

本研究の目的に特化したティルトロータ型クアドロータヘリコプタを提案する。本研究で提案するティルトロータ機構(Tilting Mechanism for Rotor; TMR)は、90°毎に配置されるブーム上の各ロータを異なる向きに傾斜させて、所望の推進ベクトルを得る(Figure 3.3)。



Figure 3.3 QRH with TMR

4. 総合評価

本研究の目的に沿って 3 方式の機体を提案し、実験機の試作、飛行試験を行った。これらの結果を Table 4.1 のように 8 項目で比較した。

Table 4.1 Comparison of three methods

Comparison item	Extra Thruster for QRH	Thrust Vectoring Nozzles for QDH	Tilting Rotor for QRH
Skid Effect	○	◎	◎
Robustness of Crosswind	◎	○	△
Structural simplicity	△	×	○
Required battery	2×3300mAH 4Cell	2×2450mAH 4Cell	1×2450mAH 3Cell
Flight duration	4 min.	2 min.	5 min.
Effect of Power (Rate)	1465 W (4.5)	2161 W (6.6)	326 W (1)
Cost	△	×	○
Lightweight	×	△	○
Quietness	△	×	○

本研究の最大の目的であるスキッド効果については推力偏向ノズル型が最も良く僅差でティルトロータ型が良い、しかし横風の耐性について両型はあまり良くない。横風耐性と機体重量には相関が認められ重量が重たい方が良い、有人のヘリコプタでも軽量のヘリコプタは強風に弱い傾向がある。また電力効率（1 秒当たりの電力消費量）の比較ではティルトロータ型が圧倒的に良い結果となっている。

これらの総合的な比較からティルトロータ型 QRH が本研究の目的に最適な方式と判断される。

ティルトロータ型クアドロータヘリコプタの飛行特性

今村 彰隆 (工学部電子情報通信工学科)

1. 補助推力型クアドロータヘリコプタ

ヘリコプタは、移動や旋回時、及び横風などに対して機体を傾けて推力の水平方向成分を発揮する必要がある。機構がシンプルな QRH も同様であるが、一般にロータのピッチが固定であるためロータの回転速度を個別に制御するだけで機体姿勢を制御可能であり、安定した飛行が可能である。

しかし、QRH にカメラ等の機器を搭載する場合、上記の理由により機体を常に水平に保つことができないため、一般にジャイロセンサで制御されるジンバル装置に撮影機器を搭載し、ジンバル装置により搭載機体の水平または姿勢を保つよう制御される。一方、本研究ではこの問題に対し機体姿勢を水平に維持したまま飛行するための推力偏向が可能な補助推力装置(Extra Thruster; ET)を提案する。本章では ET として QRH にジンバル構造で支持されたダクトドファン(Ducted Fan; DF)を 2 組追加する(Figure 1.1)。ET が横風に対抗する様子を Figure 1.2 に示す。

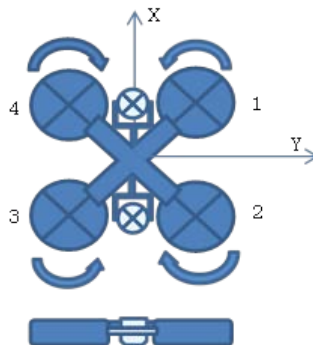


Figure 1.1 Layout of Extra Thruster

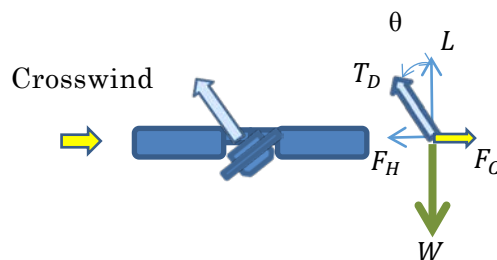


Figure 1.2 Effect of Extra Thruster

発表論文： Akitaka Imamura, Masafumi Miwa, Junichi Hino, “Flight Characteristics of a Quadrotor Helicopter Using Extra Deflecting Thrusters,” The Journal of Instrumentation, Automation and Systems, Vol 1, No 2 (2014), pp. 64-71, 2014-11

2. ティルトロータ型クアドロータヘリコプタ

クアドロータヘリコプタ(QRH)が水平移動する際、飛ぶ方向へ水平な推力成分を発生させるために機体の姿勢を傾けなければならない。また、姿勢制御システムはホバリング中の横風などの外乱に対しても機体を傾けて位置を一定に保つ。その結果、QRHが飛ぶ姿勢は常時傾くことになる。本研究では移動や外乱に対して機体の姿勢を傾けることなく、常時水平姿勢を維持したまま飛行可能な QRH を研究している。この実現には推力偏向機構が必要となるが、この目的に特化したティルト型クアドロータヘリコプタ(QTRH; Quad Tilting Rotor Helicopter)を提案する。

本研究ではロータ推力を偏向するためにティルトロータ機構(TMR; tilting mechanism for rotors)を用いる。

QTRH を適用できるフレーム形式は2種類が考えられる(Figure 2.1)。「H」タイプは推力偏向による損失が殆ど無いが、移動方向に制限がある。「X」タイプは推力偏向による合成で相殺成分があるため推力損失が生じる。しかしながら移動方向に制限が無く、全方向に均一な推力が得られる。そこで本研究では QTRH に「X」タイプを採用する。この「X」タイプは横風等の外乱下でも機能し、水平姿勢の維持が可能である(Figure 2.2)。

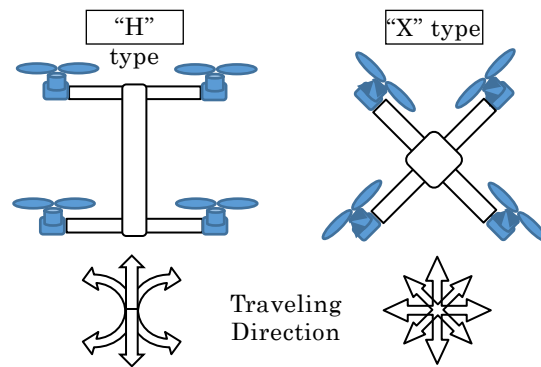


Figure 2.1 Tilt axis of QTRH

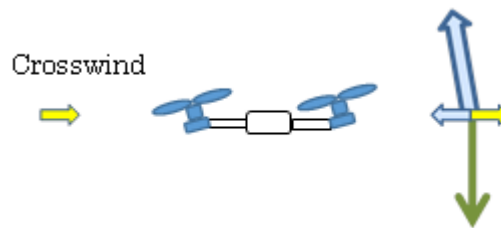


Figure 2.2 QTRH under crosswind

発表論文： Akitaka Imamura, Yasuyuki Urashiri, Masafumi Miwa, Junichiro Hino, “Flight Characteristics of Quad Rotor Helicopter with Tilting Rotor,” The Journal of Instrumentation, Automation and Systems, Vol 1, No 2 (2014), pp. 56-63, 2014-11

ダクトドファン型クアドロータヘリコプタの制御

三輪 昌史（徳島大学工学部）

本研究はクアドロータヘリコプタがいかなる状況でも機体姿勢を水平に保つ事を目指し、推力方向制御システム(Trust Vector Control System; TVCS)を導入する。このシステムはダクトドファン(Ducted Fan; DF) と推力偏向ノズル(Thrust Vectoring Nozzle; TVN)で構成され、ロータの危険性は更に低くなる。

本研究では Quad Ducted fan Helicopter(QDH)を先行研究しており、この QDH に TVN を追加装備した実験機を試作し、飛行実験によって効果を検証する。本研究はこの制御方法による飛行実験を行い、QRH の飛行制御が可能であることが確認された。



Figure 1 推力方向制御システム(TVCS)



Figure 2 実験機体 (QDH+TVN)

発表論文： Akitaka Imamura, Shinji Uemura, Masafumi Miwa and Junichi Hino, “Flight Characteristics of Quad Ducted Fan Helicopter with Thrust Vectoring Nozzles,” The Journal of Unmanned System Technology, Vol 2, No 1 (2014), pp. 54-61, 2014-06.